

Revisión bibliométrica y sistemática de tendencias, desafíos y oportunidades de la producción de Arándano (*Vaccinium* spp.) en la agricultura moderna para los departamentos de Cundinamarca, Boyacá y Antioquia

David Alejandro Pinzón Amado

Trabajo de Grado para Optar el Título de Administrador Agroindustrial

Director

Javier Quecho Mogollon

Mg. Gestión Ambiental Sostenible UCJC

Universidad Industrial de Santander

Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia (IPRED)

Administración Agroindustrial

Bucaramanga

2026

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	9
1. Objetivos	11
1.1 Objetivo General	11
1.2 Objetivos Específicos.....	11
2. Cuerpo del Trabajo	12
2.1 Marco Referencial.....	12
2.1.1 Marco teórico.	12
2.1.2 Marco contextual.	15
2.1.3 Marco conceptual.....	22
2.1.4 Marco metodológico.	25
2.2 Resultados	26
2.2.2 Objetivo específico 2	74
2.2.3 Objetivo específico 3	126
2.2.4 Objetivo específico 4	130
3. Conclusiones	142
4. Recomendaciones	145
Referencias Bibliográficas	147

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Matriz del estado del arte.....	13
Tabla 2. Demandas de la agenda de I+D+i para arándanos.....	16
Tabla 3. Diseño metodológico	25
Tabla 4. Top 5 de instituciones con mayor productividad científica.	49
Tabla 5. Top 5 de autores con mayor número de publicaciones.....	50
Tabla 6. Top 5 de revistas con mayor número de publicaciones.	58
Tabla 7. Top 10 de artículos con m mayor número de citas.	63
Tabla 8. Tabla comparativa tipos de manejo.	123
Tabla 9. Priorización líneas de investigación.....	130
Tabla 10. Relación entre hallazgos y demandas de la Agenda I+D+i.	136
Tabla 11. Indicadores de seguimiento.....	141

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Fases relevantes del análisis bibliométrico.	30
Figura 2. Evolución histórica de las publicaciones.....	37
Figura 3. Tipos de documentos publicados.	39
Figura 4. Áreas en las cuales se integran los documentos publicados.....	40
Figura 5. Distribución global de la producción científica.	42
Figura 6. Red de coautoría entre países.	45
Figura 7. Red de acoplamiento bibliográfico entre países.....	47
Figura 8. Red de coautoría entre autores.	53
Figura 9. Red de acoplamiento bibliográfico entre autores.	55
Figura 10. Red de acoplamiento bibliográfico entre revistas.	60
Figura 11. Palabras clave más usadas por los autores.	66
Figura 12. Red de coocurrencia de palabras clave.....	68
Figura 13. Mapa temático del área del conocimiento analizada.....	72
Figura 14. Flujo de trabajo PRISMA para revisión sistemática.	75
Figura 15. Análisis de correspondencias múltiples del área del conocimiento	127

Glosario

ARÁNDANO: planta de la familia de las ericáceas, de 20 a 50 centímetro(s) de altura, con ramas angulosas, hojas alternas, aovadas y aserradas, flores solitarias, axilares, de color blanco verdoso o rosado. Sus frutos son bayas negruzcas o azuladas, dulces y comestibles.

ANTIOXIDANTE: sustancia que protege a las células de los daños que causan los radicales libres (moléculas inestables elaboradas por el proceso de oxidación durante el metabolismo normal).

ANTOCIANINA: pigmentos solubles en agua que dan a las plantas colores rojos, morados y azules, y se encuentran en flores, frutas y verduras. Son compuestos químicos vegetales de la familia de los flavonoides, con propiedades antioxidantes que pueden ser beneficiosas para la salud, con efectos antiinflamatorios y anticancerígenos.

BIBLIOMETRIX: paquete gratuito de R© para realizar análisis bibliométricos, que utiliza métodos estadísticos para cuantificar y analizar publicaciones científicas, como artículos y citas.

I+D+i: Investigación, Desarrollo e Innovación tecnológica. Se refiere a un proceso estructurado y creativo para descubrir y aplicar nuevos conocimientos (investigación), que generen avances tecnológicos, productos nuevos o mejoras significativas en productos y procesos existentes (desarrollo), con el fin de crear valor y aumentar la competitividad de empresas y países (innovación).

OPERADORES BOLEANOS: Los operadores booleanos son palabras o símbolos como AND, OR y NOT que se usan en búsquedas para refinar y ajustar los resultados de forma más precisa. Conectan palabras clave para ampliar o restringir la búsqueda, permitiendo que los resultados incluyan o no términos específicos y sinónimos.

RADICAL LIBRE: molécula inestable que contiene al menos un electrón "desparejado" en su capa más externa, lo que la hace muy reactiva y propensa a dañar otras moléculas.

REVISIÓN SISTEMÁTICA: análisis crítico y estructurado de toda la evidencia científica publicada que responde a una pregunta de investigación específica. Su objetivo es sintetizar los hallazgos de manera rigurosa y transparente, minimizando los sesgos para obtener la mejor evidencia disponible sobre un tema.

SCOPUS: es la base de datos multidisciplinaria más grande del mundo para literatura revisada por pares, creada por Elsevier, que ofrece un amplio conjunto de herramientas para el seguimiento y análisis de la investigación a través de su recuento de citas.

SIEMBRA: plataforma de información para la gestión del conocimiento en Ciencia, Tecnología e Innovación (CTI) del Sistema Nacional de Innovación Agropecuaria (SNIA).

SNIA: Sistema Nacional de Innovación Agropecuaria de Colombia, promueve la investigación, el desarrollo tecnológico y la innovación en el sector agropecuario.

VOS VIEWER: software gratuito para construir y visualizar mapas bibliométricos y redes de datos.

Resumen

Título: Revisión bibliométrica y sistemática de tendencias, desafíos y oportunidades de la producción de Arándano (*Vaccinium spp.*) en la agricultura moderna para los departamentos de Cundinamarca, Boyacá y Antioquia

Autor: David Alejandro Pinzón Amado. Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia (IPRED). Administración Agroindustrial, Javier Quecho Mogollon. Mg. Gestión Ambiental Sostenible UCJC

Palabras Clave: *Vaccinium spp.*; bibliometría; agricultura de precisión; poscosecha; sostenibilidad.

La demanda global por *Vaccinium spp.*, conocido comúnmente como arándano ha aumentado en las últimas décadas gracias a sus propiedades nutraceuticas. Para comprender la evolución científica de esta especie, se desarrolló un análisis bibliométrico que integra casi cuatro décadas de producción académica. La búsqueda sistemática se realizó en la base de datos Scopus (1987–2025), utilizando descriptores taxonómicos, agronómicos y tecnológicos; tras la depuración, se analizaron 474 documentos mediante las herramientas Bibliometrix/Biblioshiny (R) y VOSviewer, aplicando métricas de rendimiento y redes de coautoría, acoplamiento bibliográfico y coocurrencia de palabras clave. Los resultados muestran una tendencia ascendente sostenida con un punto máximo en 2024, predominando los artículos de investigación sobre ponencias y revisiones, lo que refleja la madurez y orientación aplicada del campo. El mapeo temático identificó cinco núcleos principales: fisiología y salud, fitosanidad, manejo agronómico y digitalización, procesamiento y estabilidad de compuestos fenólicos, y caracterización analítica. De los 474 documentos analizados inicialmente y a partir de la metodología PRISMA 2020, 369 fueron analizados de manera comparativa y temática. Los resultados muestran un avance significativo en la propagación mediante hidrogel y micropropagación, el uso eficiente del fertirriego y la integración de labores de control climático i en invernaderos, lo que ha mejorado el rendimiento y la calidad del fruto. Asimismo, las tecnologías no térmicas, los recubrimientos comestibles y la automatización de la cosecha fortalecen la calidad poscosecha y reducen pérdidas. En sostenibilidad, la incorporación de reúso de agua y biorrefinería de residuos emerge como estrategia clave para reducir la huella ambiental y avanzar hacia sistemas circulares. El análisis permitió identificar falta de estandarización metodológica, escasa evaluación económica de innovaciones y limitada articulación entre escalas experimental y comercial. Se concluye que integrar fisiología, tecnología y sostenibilidad en el manejo es esencial para consolidar una fruticultura resiliente, baja en carbono y tecnológicamente avanzada.

*Trabajo de grado

**Universidad Industrial de Santander. Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia (IPRED). Director Javier Quecho Mogollon.

Abstract

Title: Bibliometric and Systematic Review of Trends, Challenges, and Opportunities in Blueberry (*Vaccinium* spp.) production in Modern Agriculture for the Departments of Cundinamarca, Boyacá, and Antioquia.

Author: David Alejandro Pinzón Amado. Institute of Regional Projection and Distance Education (IPRED). Agroindustrial Administration, Javier Quecho Mogollon. M.Sc. Sustainable Environmental Management UCJC

Keywords: *Vaccinium* spp.; bibliometrics; precision agriculture; postharvest; sustainability.

The global demand for *Vaccinium* spp., commonly known as blueberry, has increased in recent decades due to its nutraceutical properties. To understand the scientific evolution of this species, a bibliometric analysis was conducted integrating nearly four decades of academic production. The systematic search was carried out in the Scopus database (1987–2025) using taxonomic, agronomic, and technological descriptors; after cleaning, 474 documents were analyzed using the Bibliometrix/Biblioshiny (R) and VOSviewer tools, applying performance metrics and networks of co-authorship, bibliographic coupling, and keyword co-occurrence. The results show a sustained upward trend, peaking in 2024, with research articles predominating over conference papers and reviews, reflecting the maturity and applied orientation of the field. The thematic mapping identified five main areas: physiology and health, plant health, agronomic management and digitization, processing and stability of phenolic compounds, and analytical characterization. Of the 474 documents initially analyzed and following the PRISMA 2020 methodology, 369 were analyzed in a comparative and thematic manner. The results show significant progress in propagation through hydrogel and micropropagation, the efficient use of fertigation, and the integration of climate control activities in greenhouses, which has improved both yield and fruit quality. Likewise, non-thermal technologies, edible coatings, and harvest automation enhance postharvest quality and reduce losses. In terms of sustainability, the incorporation of water reuse and waste biorefinery emerges as a key strategy to reduce the environmental footprint and move towards circular systems. The analysis identified a lack of methodological standardization, limited economic evaluation of innovations, and weak linkage between experimental and commercial scales. It is concluded that integrating physiology, technology, and sustainability in management is essential to build a resilient, low-carbon, and technologically advanced fruit-growing sector.

*Trabajo de grado

**Universidad Industrial de Santander. Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia (IPRED). Director Javier Quecho Mogollon.

Introducción

El arándano (*Vaccinium* spp.) es una fruta que pertenece a la familia Ericaceae y se caracteriza por tener un alto contenido de antioxidantes, vitaminas y minerales que aportan beneficios para la salud. Gracias a estas propiedades, se ha convertido en un cultivo muy apreciado y con gran valor en los mercados internacionales, particularmente en la industria de los alimentos saludables y productos naturales.

A nivel mundial, la demanda del arándano ha aumentado bastante en los últimos años, principalmente porque cada vez más personas buscan llevar una alimentación saludable. Esto ha abierto nuevas oportunidades de negocio para países en desarrollo que cuentan con buenas condiciones agroecológicas para su cultivo (Meléndez-Jácome et al., 2021).

Colombia ha empezado a destacarse como un nuevo participante en el mercado del arándano. De acuerdo con datos de (PROCOLOMBIA, 2025), el país pasó de tener 131 hectáreas sembradas en 2019 a 466 en 2023, alcanzando una producción de 3.343 toneladas. Para 2026, se espera un crecimiento del 669%, llegando a cerca de 1.000 hectáreas cultivadas, especialmente en departamentos como Cundinamarca, Boyacá y Antioquia, en áreas que cuentan con condiciones agroclimáticas muy favorables, como altitudes entre 2.200 y 2.800 m s.n.m., temperaturas promedio entre 7 y 18 °C y suelos con buen drenaje y alto contenido de materia orgánica, ideales para el desarrollo de este cultivo (Cleves-Leguízamo, 2021; Instituto Colombiano Agropecuario - ICA, 2023).

A pesar del crecimiento que ha tenido el cultivo de arándanos en el país, aún existen retos por superar. Algunos de los más importantes son la falta de conocimiento técnico adaptado a las condiciones locales, la baja conexión entre la investigación científica y los pequeños productores y la necesidad de aplicar prácticas sostenibles para reducir el impacto ambiental de los sistemas de

producción intensiva. Esta situación demuestra que es necesario fortalecer la cadena productiva, para hacerla más sólida y sostenible, lo que requiere una base técnica y científica útil como guía para la toma de decisiones sobre el manejo agronómico, la selección de variedades, la nutrición del cultivo, el control de plagas y enfermedades y, no menos importante, sobre los procesos de cosecha y poscosecha (Meléndez-Jácome et al., 2021).

En este sentido, el presente trabajo se orienta a la transferencia de conocimiento científico y tecnológico relacionado con la producción de arándano (*Vaccinium* spp.) hacia los actores de la cadena agroindustrial. Más que diseñar un proyecto de inversión o un estudio de caso puntual, el objetivo central es organizar, caracterizar y sintetizar la evidencia científica disponible a nivel internacional y analizar su pertinencia frente a las demandas de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) definidas para los departamentos de Cundinamarca, Boyacá y Antioquia.

De esta manera, la revisión bibliométrica y sistemática constituye el primer eslabón del proceso de transferencia tecnológica, al proveer un mapa actualizado del conocimiento que puede ser adaptado, validado y difundido a productores, empresas y entidades públicas responsables del fomento del cultivo en estos territorios (Bozeman, 2000).

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Verificar tendencias clave, avances tecnológicos y desafíos en el cultivo de arándano (*Vaccinium* spp.) bajo distintos sistemas de producción, a partir de la revisión bibliométrica y sistemática de la literatura científica disponible.

1.2 Objetivos Específicos

Evaluar la producción científica sobre arándano mediante un análisis bibliométrico, considerando la evolución de publicaciones, redes de colaboración, fuentes relevantes y líneas de investigación predominantes.

Examinar los principales enfoques de manejo del cultivo mediante una revisión sistemática que abarque estrategias de fertilización, riego, manejo integrado de plagas y enfermedades, cosecha y postcosecha.

Proponer futuras líneas de investigación en la producción de arándano, considerando los desafíos actuales y oportunidades tecnológicas para su optimización en diferentes condiciones agroclimáticas y sistemas productivos.

Valorar la contribución del conocimiento científico en la producción de arándano al cumplimiento de los requerimientos de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) del Ministerio de Agricultura de Colombia, a partir de la información bibliométrica recopilada e interpretada, identificando cómo los avances científicos pueden fortalecer la competitividad y sostenibilidad del cultivo en el país.

2. Cuerpo del Trabajo

2.1 Marco Referencial

Como marco referencial de este Trabajo se incluyen los siguientes:

2.1.1 Marco teórico.

Como base para esta revisión, se tomaron en cuenta cinco estudios generales (Tabla 1) que, aunque no tratan directamente sobre el cultivo del arándano, sirven como soporte para los aspectos metodológicos y temáticos del proyecto. Estos trabajos ayudan a construir una base sólida para comparar los análisis bibliométricos y sistemáticos y en conjunto, fortalecen el enfoque del estudio, ya que permiten definir los criterios de búsqueda, las variables de interés y detectar vacíos de información en el contexto regional, especialmente la falta de investigaciones integradas sobre *Vaccinium* spp. en los departamentos de Cundinamarca, Boyacá y Antioquia. Con esta revisión se busca abordar esas falencias mediante la articulación de categorías como material vegetal, manejo agronómico, riego y fertirriego, manejo sanitario, poscosecha y comercialización, sostenibilidad y uso de modelamientos de datos.

Tabla 1.*Matriz del estado del arte*

Título	Autor - País - Año	Objetivos	Metodología y Técnicas	Observaciones (¿Para qué sirve en tu investigación?)
Exploring the research on sustainability reporting: a comprehensive bibliometric and literature review in the Latin American context	Julio Hernández-Pajares - América Latina - 2023	Describir el origen y contenido de la investigación sobre reporte de sostenibilidad corporativa en AL y proponer una agenda regional.	Revisión bibliométrica + narrativa; enfoque cuantitativo-cualitativo; análisis de contenido; bases: SCOPUS, WoS, SCIELO, REDIB; n≈75/40 revistas.	Marco para estructurar indicadores ESG/ODS en cadenas de arándano y orientar el reporte de sostenibilidad territorial (Cundinamarca/Boyacá).
Aplicación de teledetección en la estimación de rendimientos en cultivos agrícolas: una revisión bibliométrica	Irene Gutiérrez-Mora; A. S. Hernández-Cázares; J. V. Hidalgo-Contreras; J. L. López-Ayala; J. Velasco-Velasco - México - 2025	Analizar el estado del arte de la estimación de rendimiento mediante teledetección satelital en agricultura (1975–2023).	Revisión bibliométrica en Scopus; n≈818; VOSviewer (co-ocurrencias), análisis descriptivo y de clústeres.	Guía técnica para estimar rendimiento/biomasa de arándano con Sentinel-2 y ML; diseño de validación local en Cundinamarca/Boyacá.

Bibliometric revision regarding the use of survival analysis in seed germination studies	Gustavo D. Roesler; Josiane Rodrigues; Victor A. Forti - Brasil - 2023	Identificar y caracterizar el uso del análisis de supervivencia en estudios de germinación de semillas.	Revisión bibliométrica; de extracción en SciELO/otros; estadística descriptiva; de discusión de modelos de Kaplan-Meier, Cox, AFT.	Metodología robusta para ensayos de germinación/emergencia de <i>Vaccinium</i> spp. y comparación de tratamientos (vivero local).
Hacia un modelo productivo para la cadena de Sacha Inchi en Colombia: una aproximación desde la inteligencia científica	Diego Hernando FLOREZ-MARTÍNEZ1*; Gina Marcela AMADO-SAAVEDRA2; Natalia FLÓREZ-TUTA1; Eduardo BARRAGÁN-QUIJANO3; Alexis MORALES-CASTAÑEDA1 - Colombia - 2025	avances científicos en el sistema productivo de Sacha Inchi tanto en sus etapas de cultivo y cosecha, como en poscosecha y transformación	Revision bibliometrica Scopus, áreas temáticas de interés, poscosecha y transformación, material de siembra y mejoramiento, socioeconomía y desarrollo empresarial, manejo integrado del sistema productivo, y manejo de plagas y enfermedades	referencias como aporte al desarrollo de modelos productivos de Sacha Inchi en Colombia

Nota. Estudios generales

(Flórez-Martínez et al., 2023; Gutierrez Mora et al., 2025; Hernández-Pajares, 2023; Roesler et al., 2023; Román-Mireles, 2023)

2.1.2 Marco contextual.

El arándano (*Vaccinium spp.*), que pertenece a la familia Ericaceae, se ha vuelto muy importante dentro de la agricultura moderna por sus beneficios nutricionales, su alto potencial económico y la creciente demanda que tiene en los mercados internacionales.

En Colombia, este frutal ha mostrado un crecimiento sostenido en su área cultivada; actualmente se cuenta con más de 250 cultivadores de esta fruta, principalmente en los departamentos de Cundinamarca, Boyacá y Antioquia (Instituto Colombiano Agropecuario - ICA, 2025).

Como se menciona en el título del proyecto, el enfoque se centra en aportar una revisión de literatura científica que pueda ser aplicada en los departamentos de Cundinamarca, Boyacá y Antioquia, y contribuir así a cerrar las brechas identificadas mediante las demandas de la Agenda de I+D+i del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (Tabla 2), que en lo temático son similares, aunque difieren en el orden de prioridad en cada departamento. Este estudio busca ofrecer herramientas útiles para fortalecer las capacidades de los pequeños y medianos productores, promoviendo la transferencia de conocimiento científico y tecnológico dentro del sector agropecuario.

Tabla 2.

Demandas de la agenda de I+D+i para arándanos, departamentos de Boyacá, Cundinamarca y Antioquia

Boyacá		Cundinamarca		Antioquia		Área temática
Título de la demanda	Prioridad	Título de la demanda	Prioridad	Título de la demanda	Prioridad	
Generar modelos productivos sostenibles innovados de producción limpia y orgánica, que contemplen el manejo integrado del cultivo y sistemas de aseguramiento de la calidad e inocuidad (a través de BPA, BPM, BPH, Global GAP) utilizando sistemas de trazabilidad apropiados y orientados a las demandas del mercado.	1	Generar modelos productivos sostenibles innovados de producción limpia y orgánica, que contemplen el manejo integrado del cultivo y sistemas de aseguramiento de la calidad e inocuidad (a través de BPA, BPM, BPH, Global GAP) utilizando sistemas de trazabilidad apropiados y orientados a las demandas del mercado.	4	Generar modelos productivos sostenibles innovadores, de producción limpia, orgánica y convencional; que contemplen el manejo integrado del cultivo y sistemas de aseguramiento de la calidad y inocuidad (a través de BPA, BPM, BPH, Global GAP) utilizando sistemas de trazabilidad apropiados y orientados a las demandas del mercado.	2	Calidad e inocuidad de insumos y productos

Boyacá		Cundinamarca		Antioquia		Área temática
Título de la demanda	Prioridad	Título de la demanda	Prioridad	Título de la demanda	Prioridad	
Estudios de mercado nacional e internacional que consideren nichos de mercados con precios justos y que direccionen diferentes alternativas de manejo de postcosecha, transformación y agroindustria, comercialización y de mercadeo. Gestión para la exportación - oferta exportable.	2	Estudios de mercado nacional e internacional, que consideren nichos de mercados con precio justos y que direccionen diferentes alternativas de manejo de postcosecha, transformación y agroindustria, comercialización y de mercadeo. Gestión para la exportación. Oferta exportable, pago por diferencial de calidad (sabor, color, duración, tamaño, grados brix)	3	Estudios de mercado nacional e internacional que consideren nichos de mercados con precios justos y que direccionen diferentes alternativas de manejo en postcosecha, transformación y agroindustria, comercialización y mercadeo. Desarrollo de modelos de negocio inclusivos. Gestión y logística para la exportación. Oferta exportable.	4	Socioeconomía, mercadeo y desarrollo empresarial
Formación, capacitación y actualización integrada que considere el fortalecimiento para el desarrollo humano (innovación social), asociativo y empresarial, acompañada de procesos de asistencia técnica, transferencia de tecnología y vinculación	3	Formación, capacitación y actualización integrada que considere el fortalecimiento para el desarrollo humano (innovación social), asociativo y empresarial, acompañada de procesos de asistencia	1	Formación, capacitación y actualización integrada que considere el fortalecimiento para el desarrollo humano asociativo y empresarial (innovación social), acompañada de	3	Fortalecimiento de capacidades técnicas y funcionales

Boyacá		Cundinamarca		Antioquia		Área temática
Título de la demanda	Prioridad	Título de la demanda	Prioridad	Título de la demanda	Prioridad	
tecnológica, así como la formación especializada e integral para los extensionistas, Epseas** y diferentes actores de la cadena.		técnica, transferencia de tecnología, vinculación tecnológica, así como la formación especializada e integral para los extensionistas, Epseas y diferentes actores de la cadena. Banco de datos considerando los pequeños productores.		procesos de asistencia técnica, extensión agropecuaria, transferencia de tecnología y vinculación tecnológica. Formación especializada e integral para los diferentes actores de la cadena, extensionistas y miembros de Epseas.		
Conocimiento, identificación, manejo y control de las diferentes plagas y enfermedades del cultivo de arándanos, considerando el manejo y conocimiento de los insectos benéficos.	4	Conocimiento, identificación, manejo y control de las diferentes plagas y enfermedades del cultivo de arándanos, cumpliendo los requisitos de inocuidad y considerando el manejo de los insectos benéficos (control integrado y etológico).	5	Conocimiento e identificación, manejo y control de las diferentes plagas y enfermedades del cultivo de arándanos. Uso de agentes controladores y benéficos para el cultivo, de origen biológico.	2	Manejo sanitario y fitosanitario

** Entidades Prestadoras del Servicio de Extensión Agropecuaria

Boyacá		Cundinamarca		Antioquia		Área temática
Título de la demanda	Prioridad	Título de la demanda	Prioridad	Título de la demanda	Prioridad	
Generación de modelos productivos integrados e innovados de prácticas culturales de arándanos para pequeños y medianos productores.	5	Generación de modelos productivos integrados e innovados de prácticas culturales de arándanos para pequeños y medianos productores.	2	Generación de modelos productivos integrados e innovados de prácticas culturales de arándanos para pequeños y medianos productores.	1	Manejo de suelos y aguas
Alternativas de manejo de cosecha, postcosecha, transformación y agroindustria, y optimización de sus procesos.	6	Investigación, desarrollo e innovación para el desarrollo de diferentes alternativas de manejo de postcosecha, transformación y agroindustria, comercialización y de mercadeo del cultivo de arándanos.	3	Alternativas de manejo de cosecha, postcosecha, transformación y agroindustria, y optimización de sus procesos.	2	Manejo cosecha, poscosecha y transformación
Estudios fenológicos del cultivo de arándanos en todas las etapas de los diferentes ecotipos y variedades para obtener los requerimientos nutricionales e hídricos que se deben tener en cuenta en la producción de las principales variedades de la región.	7	Estudios fenológicos del cultivo de arándanos en todas las etapas de los diferentes ecotipos y variedades para obtener los requerimientos nutricionales e hídricos que se deben tener en cuenta en la producción	6	Estudios de fenología y fisiología de los diferentes ecotipos y variedades de arándanos en todas sus etapas, con el fin de obtener los requerimientos nutricionales e hídricos para ser aplicados en la	7	Fisiología vegetal y nutrición

Boyacá		Cundinamarca		Antioquia		Área temática
Título de la demanda	Prioridad	Título de la demanda	Prioridad	Título de la demanda	Prioridad	
		de las principales variedades de la región.		producción de arándanos de las principales variedades de la región.		
Generación de modelos productivos de arándanos resilientes que contribuyan a contrarrestar el efecto de la variabilidad climática en el cultivo, de acuerdo con las zonas productoras.	8	Generación de modelos productivos de arándanos resilientes que contribuyan a contrarrestar el efecto de la variabilidad climática en el cultivo, de acuerdo con las zonas productoras.	7	Generación de modelos productivos de arándanos resilientes que contribuyan a contrarrestar la variabilidad climática de acuerdo a las zonas productoras de arándanos en Antioquia.	6	Manejo ambiental y sostenibilidad
Aprovechar los bancos de germoplasma, conocer su caracterización y potencial de uso de los materiales de arándanos viables para incluir en programas de mejoramiento genético con zonificación de genotipos y un sistema de producción de semillas (plantulaje in vitro, in vivo) mejoradas con participación de los productores, adaptados a	8	Conocer y caracterizar el potencial de uso de los materiales de arándanos viables para incluir en programas de mejoramiento genético con zonificación de genotipos y un sistema de producción de semillas (plantulaje in vitro, in vivo) mejoradas con participación de los productores, adaptados a	6	Caracterización y aprovechamiento de las colecciones de bancos de germoplasma, para el uso potencial de materiales viables de arándanos, para el desarrollo de programas de mejoramiento genético, zonificación de genotipos y sistemas de producción de	5	Material de siembra y mejoramiento genético

Boyacá		Cundinamarca		Antioquia		Área temática
Título de la demanda	Prioridad	Título de la demanda	Prioridad	Título de la demanda	Prioridad	
condiciones agroclimáticas específicas y que tengan aceptación en los mercados nacional e internacional, con el fin de mejorar la productividad, competitividad, sostenibilidad y equidad del cultivo.		agroclimáticas específicas y que tengan aceptación en el mercado nacional e internacional, con el fin de mejorar la productividad, competitividad, sostenibilidad y equidad del cultivo.		semillas, plantulaje, in vitro e in vivo, adaptado a condiciones agroclimáticas específicas; con participación de los productores, que tengan aceptación en el mercado nacional e internacional, con el fin de mejorar la productividad, competitividad, sostenibilidad y equidad del sistema productivo.		
Posicionamiento y socialización de plataformas de información existente, complementación, articulación o generación de las mismas.	9	Posicionamiento y socialización de plataformas de información existentes, complementación, articulación o generación de las mismas.	4	Posicionamiento y socialización de plataformas de información existentes	6	Sistemas de información, zonificación y georreferenciación

Nota. Información de Boyacá, Cundinamarca y Antioquia

(Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA, 2022)

2.1.3 Marco conceptual.

A continuación, se establecen las ideas principales y las relaciones que guían la revisión bibliométrica y sistemática sobre el cultivo de arándano (*Vaccinium spp.*) en distintos sistemas de producción. Su propósito es identificar las principales tendencias, avances y desafíos tecnológicos, además de organizar los temas clave para la recopilación de información y el análisis bibliométrico. Con esto, se busca relacionar los resultados con decisiones que fortalezcan el manejo del cultivo y mejoren su competitividad.

Transferencia tecnológica. La transferencia de tecnología se entiende como el proceso mediante el cual el conocimiento científico y tecnológico generado en universidades, centros de investigación u organizaciones públicas y privadas se moviliza hacia usuarios que lo transforman en innovaciones, productos, procesos o servicios. (Bozeman, 2000)

Revisión bibliométrica. Una revisión bibliométrica se entiende como una parte de la revisión sistemática que se encarga de analizar cómo se produce y acumula el conocimiento científico. Para esto, se utilizan herramientas de software que permiten hacer un análisis cuantitativo de los datos bibliográficos de un gran número de documentos. A diferencia de otros tipos de revisión, esta no se enfoca en estudiar cada investigación por separado ni en resumir sus resultados (Rob Tierney, 2022).

Arándano (*vaccinium spp.*). Género de unas 450 especies de arbustos, de la familia de las Ericáceas, se encuentra ampliamente distribuido en el hemisferio norte y se extiende hacia el sur a lo largo de las cordilleras tropicales, especialmente en Malasia. Los arbustos son erectos o rastreros, con hojas alternas caducas o perennes. Las pequeñas flores se asemejan a las de las Ericas, pero el ovario se encuentra debajo de la flor. Las flores son individuales, agrupadas o en largas espigas en la axila de la hoja. Las bayas suelen ser comestible (Tierney, 2022).

En Colombia, el arándano (*Vaccinium* spp.) vive una fase de expansión: estimaciones sectoriales sitúan el área alrededor de 700–760 ha a inicios de 2025 con proyectos que aspiran a 5.000 ha, mientras el altiplano cundiboyacense concentra buena parte de las siembras por sus condiciones de altura y clima (Bravo, 2025). En lo técnico predomina highbush de bajo requerimiento de frío (p. ej., Biloxi, Legacy, Duke) con manejo en sustrato y pH ácido ($\approx 4,5-5,5$) y fertirriego; estos lineamientos están documentados para la región central y respaldados por ensayos locales en Biloxi bajo condiciones colombianas (Leguízamo, 2021)

En lo regulatorio, el ICA exige registro de viveros y huertos básicos para producir y comercializar material vegetal, fundamento de la trazabilidad y la sanidad del cultivo (Resolución 780006 De, 2020)

Scopus. Base de datos de referencias bibliográficas y citas de la empresa Elsevier, de literatura peer review y contenido web de calidad, con herramientas para el seguimiento análisis y visualización de la investigación (Elsevier (R), 2025).

Investigación. Conjunto de actividades humanas destinadas a la obtención de nuevos saberes y conocimientos, y/o su aplicación a la resolución de problemas concretos o interrogantes existenciales.

Agenda I+D+I. La Agenda Dinámica Nacional de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación Agropecuaria es un instrumento de planificación y gestión para la focalización de recursos y de acciones de I+D+i tendientes al fortalecimiento, dinamización y optimización del SNIA en torno al mejoramiento de la productividad y competitividad sectorial. Este instrumento recopila las demandas de I+D+i de diferentes cadenas productivas a nivel nacional y departamental (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA, 2022).

Eje Temático. Guía para orientar y direccionar el desarrollo teórico-práctico de un tema.

Metodología PRISMA 2020. Este sistema permite tener un checklist para la selección de artículos de revisión, indica la realización de diagramas que permitan identificar cantidad de artículos métodos de exclusión, es eficiente para mejorar la calidad y la transparencia de las revisiones.

Así, el estudio se ubica en las fases iniciales del proceso de transferencia de tecnología:

1. Identificación y organización del conocimiento disponible (mediante análisis bibliométrico y revisión sistemática).
2. Análisis de pertinencia frente a demandas territoriales de I+D+i (a través del contraste con la Agenda y los documentos de política).
3. Formulación de recomendaciones para la transferencia y adopción de tecnologías en la cadena del arándano, orientadas a distintos tipos de actores y escalas productivas.

2.1.4 Marco metodológico.

La Tabla 3 muestra el diseño metodológico utilizado para el desarrollo del trabajo.

Tabla 3.

Diseño metodológico

Tipo o clase de investigación	Investigación documental
<p>Sistema de hipótesis y variables o de Presupuestos y categorías de análisis</p>	<p>Hipótesis: El conocimiento científico sobre la producción de arándano (<i>Vaccinium spp.</i>) ha tenido una evolución importante en las últimas décadas, reflejada en el aumento de investigaciones enfocadas en el manejo agronómico, las tecnologías de producción y la sostenibilidad. Se plantea que estos avances pueden aportar al cumplimiento de los objetivos de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) de la Cadena Productiva de Arándano del Ministerio de Agricultura de Colombia, impulsando la adopción de nuevas tecnologías, fortaleciendo la competitividad del sector y promoviendo prácticas agrícolas más sostenibles.</p> <p>Variable independiente: La identificación de la literatura científica se realizó mediante una búsqueda sistemática en la base de datos SCOPUS a través de una ecuación de búsqueda con palabras clave (ver DEFINICION DE LA ECUACION DE BUSQUEDA).</p> <p>Variable dependiente: Agenda de I+D+i en investigación sobre el cultivo de arándano (<i>Vaccinium spp.</i>), enfocada en temas de socioeconomía, mercadeo y desarrollo empresarial.</p>
<p>Técnica de análisis y procesamiento de la información</p>	<p>La técnica principal de análisis y procesamiento de la información en este estudio es el análisis bibliométrico y de desempeño científico. Este enfoque metodológico se implementa utilizando herramientas especializadas como Bibliometrix en R y VOSviewer, que permiten examinar diversos aspectos de la producción científica. El análisis se centra en elementos como la producción científica anual y por país, las temáticas de investigación, las redes de coautoría, las instituciones y los investigadores más influyentes, el impacto de las publicaciones a través de las citas, y las palabras clave que definen las áreas de estudio. A través de este análisis bibliométrico, se busca obtener una visión clara de las tendencias, los desafíos y las oportunidades en la investigación sobre el cultivo de arándanos en diferentes sistemas de producción.</p>
<p>Método de investigación</p>	<p>Método documental</p>
<p>Fuentes de información</p>	<p>Primarias y secundarias</p>
<p>Técnicas de investigación</p>	<p>Análisis de contenido</p>

Tipo o clase de investigación	Investigación documental
Instrumento para recolectar la información	Bases de Datos SCOPUS
Modo de aplicación	Directo
Definición de población (elemento, muestral o censal)	NA
Proceso de muestreo	NA
Marco muestral o censal	Distribución de la población o segmento objetivo
Alcance	Global
Tiempo de aplicación	Seis (6) meses

Nota. Diseño metodológico utilizado para el desarrollo del trabajo

2.2 Resultados

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los objetivos.

2.2.1 Objetivo específico 1. Evaluación de la producción científica sobre arándano, mediante un análisis bibliométrico, considerando la evolución de publicaciones, redes de colaboración, fuentes relevantes y líneas de investigación predominantes.

El arándano (*Vaccinium spp.*) se ha posicionado en las últimas décadas como una de las berries de mayor expansión y valor estratégico dentro del sector hortofrutícola global. Su ascenso no solo se relaciona con el incremento del consumo por sus reconocidas propiedades nutraceuticas, sino también con los avances genéticos, fisiológicos y tecnológicos que han permitido su cultivo en una amplia diversidad de condiciones agroclimáticas (Bieniasz & Konieczny, 2022; Zydlik et al., 2016). El género *Vaccinium*, que comprende entre 300 y 400 especies distribuidas en el hemisferio norte desde los trópicos hasta las zonas templadas frías, concentra especial interés en el arándano alto (*Vaccinium corymbosum L.*). Este grupo varietal proviene de complejos cruzamientos interespecíficos que involucran especies como *V. australe*, *V. arboreum* y *V. angustifolium*, lo que ha derivado en cultivares con alto rendimiento, firmeza superior y excelente

calidad de fruto, características que lo han consolidado como el representante más productivo y comercialmente relevante del género (Bieniasz & Konieczny, 2022; Prodorutti et al., 2007).

Durante los últimos años, la demanda mundial de arándanos, particularmente de la sección *Cyanococcus*, ha experimentado un crecimiento exponencial. América del Norte continúa siendo el principal consumidor, con cerca del 58 % del mercado de fruta fresca, mientras que regiones emergentes como Europa, China y América Latina muestran incrementos notables en superficie cultivada y volumen exportado (Fang et al., 2020). Este auge se ha sustentado principalmente en el desarrollo del arándano alto del sur (SHB; híbridos de *V. corymbosum*), cuya alta calidad y adaptabilidad a zonas subtropicales y tropicales han permitido expandir la frontera productiva hacia países como Sudáfrica, España, Marruecos, México, Chile, China, Perú y Argentina (Bañados, 2008; Finn et al., 2012). A la par, la incorporación de innovaciones en agricultura protegida, control ambiental, fertirrigación precisa y manejo de dosel optimizado, ha potenciado la eficiencia fisiológica de las plantas, aumentando la productividad, reduciendo la fase juvenil y mejorando la rentabilidad mediante una menor duración del flujo de caja negativo (Retamales & Hancock, 2018).

La investigación sobre el arándano (*Vaccinium spp.*) ha transitado en las últimas décadas desde una aproximación predominantemente agronómica y fisiológica hacia un entramado interdisciplinario que convoca la biotecnología, la ciencia de los alimentos, la poscosecha, la ingeniería y la salud pública (Porter Starr et al., 2025; Rowland et al., 2020; W. Zhang et al., 2022). Este desplazamiento responde tanto a la expansión geográfica y comercial del cultivo como a la valorización de sus compuestos bioactivos, lo que ha impulsado agendas científicas orientadas a productividad, calidad, trazabilidad y sostenibilidad (Kalt et al., 2020; Lopes et al., 2023; Obedgiu, 2025). En ese contexto, el volumen y la heterogeneidad de la producción científica exigen

herramientas de síntesis capaces de describir la evolución del campo, sus núcleos de conocimiento y sus interdependencias temáticas e institucionales.

Las revisiones de literatura son fundamentales para sintetizar el conocimiento disponible, evaluar la evolución de un campo y detectar vacíos de investigación (Snyder, 2019). Sin revisiones periódicas, el cuerpo académico se fragmenta, dificultando la consolidación de marcos teóricos coherentes. El rápido aumento de publicaciones científicas y medios de difusión ha generado millones de artículos anuales, complicando el seguimiento del avance del conocimiento (Ozturk, 2021). Por ello, resulta esencial definir criterios claros de selección y evaluación de fuentes, ya que muchas revisiones tradicionales se basan en decisiones subjetivas o en la preferencia por revistas de alto impacto (Linnenluecke et al., 2020). Ante estas limitaciones, el análisis bibliométrico emerge como un método sistemático y reproducible que permite revisar y cuantificar de forma integral la evolución de la producción científica en un campo determinado.

El análisis bibliométrico constituye un enfoque cuantitativo y reproducible que permite mapear la estructura cognitiva de un campo, identificar actores clave y reconocer patrones en la citación, coautoría y coocurrencia de conceptos. A diferencia de las revisiones tradicionales, ofrece una visión explicativa sobre la organización y evolución temática del conocimiento (Montalván-Burbano et al., 2020; Rocha et al., 2021; Villagrán et al., 2023). En el caso del arándano (*Vaccinium spp.*), esta herramienta facilita comprender la interacción entre la fisiología, la calidad nutracéutica y los sistemas de producción, integrando dimensiones científicas y tecnológicas. Su aplicación permite construir una arquitectura del conocimiento que revela conexiones, prioridades y vacíos de investigación, aportando una base estratégica para el desarrollo de agendas en agricultura protegida, manejo poscosecha y adopción de tecnologías digitales orientadas a la sostenibilidad y competitividad del cultivo.

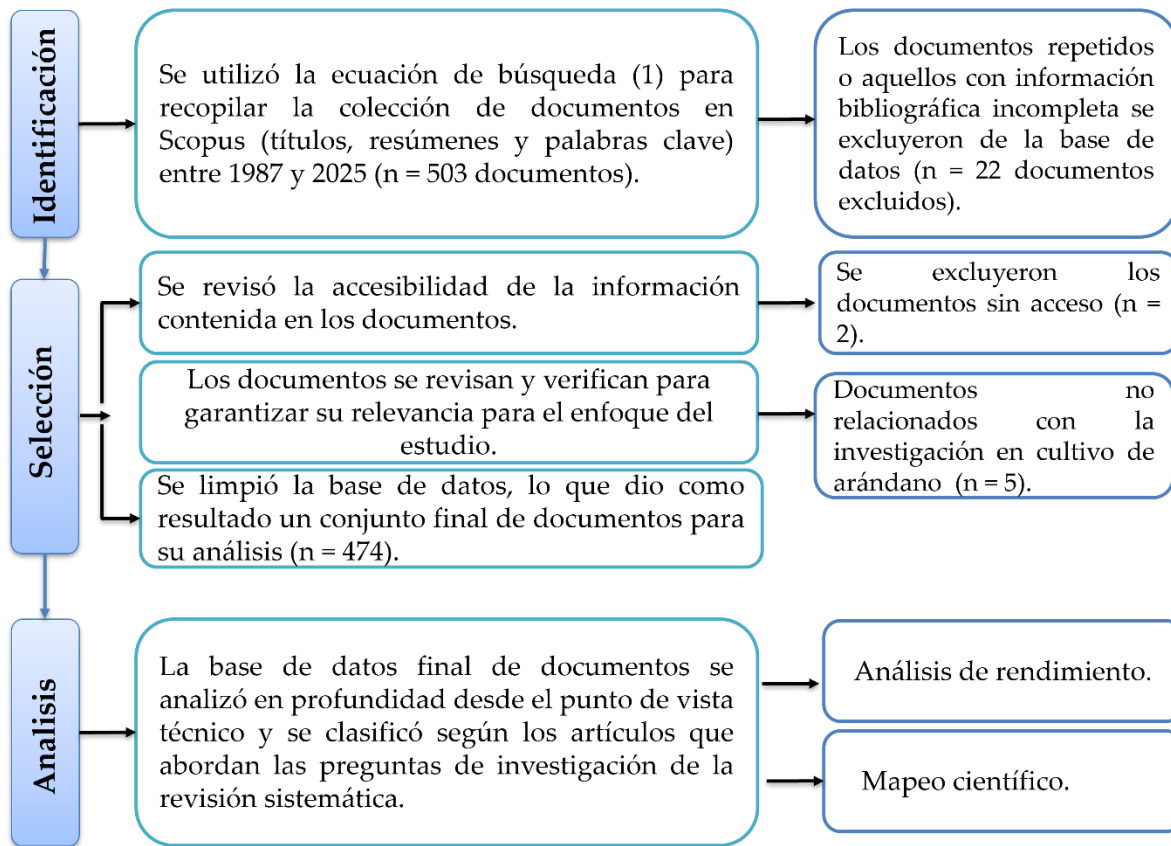
Por lo anterior el propósito de este estudio fue analizar la evolución, estructura y dinámica del conocimiento científico sobre el arándano (*Vaccinium spp.*) mediante un enfoque bibliométrico que permitiera comprender la organización intelectual, los actores más influyentes y las tendencias temáticas de la investigación global. Se plantearon tres interrogantes centrales: (i) ¿cómo ha progresado la producción científica en términos temporales, geográficos e institucionales?, (ii) ¿cuáles temas, enfoques y tecnologías predominan y cuáles emergen como áreas de investigación en desarrollo?, y (iii) ¿cuáles vacíos de conocimiento persisten en la interfaz entre la producción, la poscosecha y la sostenibilidad del cultivo? Para responder estas preguntas, se realizó una búsqueda sistemática en la base de datos Scopus, seleccionando documentos revisados por pares y depurados según criterios de relevancia y calidad. Posteriormente, los metadatos fueron procesados en RStudio (paquete Bibliometrix/Biblioshiny) y VOSviewer, aplicando análisis de rendimiento y redes de coautoría, acoplamiento bibliográfico y coocurrencia de palabras clave. Este procedimiento permitió obtener una visión integral y cuantitativa del ecosistema científico del arándano, identificando sus principales líneas de desarrollo, interconexiones temáticas y vacíos estratégicos para la investigación futura.

El análisis bibliométrico desarrollado en este estudio se diferencia de las revisiones tradicionales de literatura o de alcance, al centrarse en mapear, cuantificar y evaluar la estructura cognitiva y evolutiva del conocimiento científico sobre el arándano (*Vaccinium spp.*). Este enfoque permitió identificar tendencias de investigación, vacíos de conocimiento y áreas emergentes, ofreciendo una visión integral de la dinámica científica global del cultivo (HARUNA et al., 2024). El procedimiento metodológico siguió un enfoque sistemático en etapas, que incluyó la definición de la ecuación de búsqueda, la recopilación y depuración de la base de datos, el análisis de

rendimiento, el mapeo científico y la visualización de redes temáticas y estructurales (Santillan-Angeles et al., 2025).

Figura 1.

Fases relevantes del análisis bibliométrico.



Nota. La

Figura 1 ilustra las fases relevantes flujo de trabajo empleado en este análisis bibliométrico.

Definición de la ecuación de búsqueda. La ecuación de búsqueda fue construida con el propósito de recuperar publicaciones científicas que abordaran de manera directa aspectos relacionados con la producción, manejo agronómico, poscosecha, procesamiento y comercialización del arándano. La búsqueda se realizó en la base de datos Scopus reconocida por

su robustez y cobertura científica (Manley et al., 2022; Villagran, Espitia, et al., 2024), seleccionando los campos de *título*, *resumen* y *palabras clave* (*TITLE-ABS-KEY*), y se limitó a documentos revisados por pares. La ecuación empleada fue la siguiente:

```
TITLE-ABS-KEY (blueberry OR "Vaccinium corymbosum" OR "Vaccinium spp.") AND TITLE-ABS-KEY ("protected cultivation" OR "protected agriculture" OR "greenhouse" OR "tunnel" OR "shade net" OR "net house" OR "agribusiness" OR "fair trade" OR "processing") AND TITLE-ABS-KEY (irrigation OR fertigation OR fertilization OR "nutrient management" OR pruning OR training OR "crop management" OR "harvest" OR "postharvest" OR "storage" OR "shelf life" OR "diseases" OR "pests" OR "crop protection" OR "biological control" OR "Transformation" OR "Commercialization" OR "Marketing" OR "export" OR "markets").
```

Esta estructura combinó descriptores taxonómicos, agronómicos y tecnológicos, garantizando la inclusión de estudios interdisciplinarios relacionados con la producción, calidad, sostenibilidad y cadena de valor del arándano.

Al usar estas palabras clave en combinación con los operadores booleados, el sistema filtra automáticamente sus archivos, cada palabra u operador que se cambie le ordenara al sistema arrojar un resultado diferente, así que queda a criterio usar las palabras adecuadas.

Resultados preliminares y depuración de base de datos. La búsqueda inicial arrojó un total de 503 documentos publicados entre 1987 y 2025. Posteriormente, se aplicó un riguroso proceso de depuración para garantizar la calidad y pertinencia de la información. En esta etapa se eliminaron registros duplicados ($n = 13$), documentos con metadatos incompletos o sin acceso (n

= 11) y publicaciones no directamente relacionadas con la temática de estudio (n = 5). Como resultado, se obtuvo una base de datos final compuesta por 474 documentos válidos, los cuales fueron exportados en formato CSV y BibTeX, conservando todos los metadatos esenciales, autores, filiaciones, año de publicación, palabras clave, resúmenes, fuente y referencias bibliográficas, necesarios para el análisis posterior.

Los criterios de inclusión consideraron:

- Estudios que presentaran métodos y resultados claramente descritos, con información suficiente para extraer variables de interés (país, sistema de producción, tipo de tecnología evaluada, indicadores de respuesta, resultados cuantitativos o cualitativos).
- Artículos que contribuyeran al entendimiento de las tendencias, desafíos y oportunidades de la producción de arándano en la agricultura moderna, incluyendo innovaciones en manejo, sostenibilidad, calidad y transformación.
- Estudios que abordaran explícitamente el cultivo de arándano (*Vaccinium* spp.) en contextos agrícolas o agroindustriales. Este proceso permitió consolidar una base de información sólida y representativa, adecuada para explorar la evolución científica y las interconexiones temáticas dentro del campo de estudio (Espitia et al., 2024).

Los criterios de exclusión consideraron:

- Trabajos centrados exclusivamente en aspectos botánicos, ecológicos o de conservación sin implicaciones para la producción o la cadena agroindustrial.
- Estudios cuyo organismo de interés no fuera arándano o cuyo foco principal recayera en otros cultivos sin análisis comparativo relevante.
- Publicaciones con información insuficiente, resultados ambiguos o falta de claridad metodológica que impidiera la comparación entre estudios.

- Trabajos duplicados o versiones preliminares de un mismo estudio ya publicado de forma completa.

Esta depuración permitió consolidar un conjunto final de artículos que constituyó la base para el análisis bibliométrico y la revisión sistemática, garantizando la coherencia temática con los objetivos planteados y la pertinencia para la discusión sobre transferencia tecnológica y agendas de I+D+i en el contexto colombiano.

Procesamiento y análisis de datos. El procesamiento de los datos se llevó a cabo en R-Studio (v.4.4.0) utilizando el paquete Bibliometrix y su interfaz Biblioshiny, complementado con el software VOSviewer (v.1.6.20) para la construcción de redes de coautoría, co-citación, acoplamiento bibliográfico y coocurrencia de palabras clave (Aria & Cuccurullo, 2017; Herrera-Franco et al., 2021). Se aplicaron filtros por año, país, institución, revista, área temática y tipo de documento, con el fin de describir la evolución temporal, identificar los actores más influyentes y analizar la estructura intelectual del campo. Estas herramientas permitieron desarrollar un mapeo científico integral, cuantificando la productividad, el impacto, las interconexiones y la especialización temática del conocimiento global sobre *Vaccinium spp.*, con énfasis en la transición hacia enfoques tecnológicos, digitales y sostenibles en la cadena productiva del arándano.

Evaluación de la calidad metodológica de los estudios. Aunque no se aplicó un protocolo formal de evaluación de calidad con puntuación cuantitativa, se realizó una valoración narrativa de los estudios, considerando aspectos como la claridad en la descripción de los métodos, la adecuación del diseño experimental u observacional, el tamaño de muestra, la consistencia entre

objetivos y análisis estadísticos, y la transparencia en la presentación de limitaciones y sesgos potenciales (Umali, 1993). Esta aproximación permitió identificar trabajos con evidencia robusta y otros con resultados más exploratorios, lo cual se refleja en la discusión de los hallazgos y en la formulación de recomendaciones para la transferencia y priorización de futuras investigaciones.

Análisis de rendimiento. El análisis de rendimiento constituye una fase esencial en los estudios bibliométricos, orientada a cuantificar y comparar las contribuciones científicas de los distintos actores que conforman un campo de investigación. Este enfoque, de carácter descriptivo y evaluativo, permite examinar el nivel de productividad, visibilidad e impacto de autores, instituciones, países y revistas, aportando una perspectiva integral del desarrollo científico (Donthu et al., 2021). Su aplicación es común tanto en estudios de mapeo como en revisiones sin análisis estructural, ya que proporciona una línea base empírica para interpretar la dinámica del conocimiento. Entre las métricas más relevantes se incluyen el número de publicaciones, que refleja la productividad académica, y el conteo de citas, que indica la influencia y reconocimiento de los trabajos en la comunidad científica. Adicionalmente, indicadores compuestos como el índice H y el promedio de citas por documento permiten una valoración más equilibrada del desempeño individual y colectivo dentro del campo analizado.

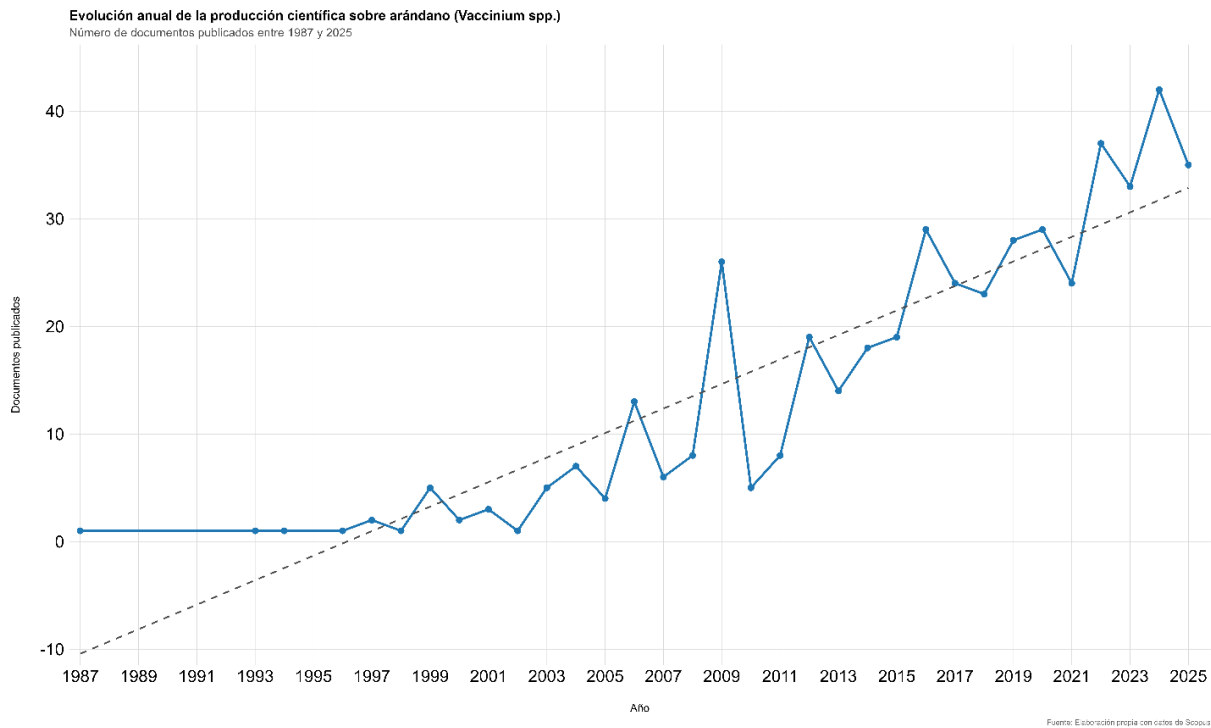
Mapeo científico. El mapeo científico permite examinar la estructura conceptual y las interrelaciones entre los diferentes componentes que conforman un campo de investigación. Este enfoque facilita la identificación de los vínculos intelectuales, temáticos y estructurales existentes dentro de la literatura científica (Montalván-Burbano et al., 2020; Rocha et al., 2021). Para ello, se emplean técnicas bibliométricas como el análisis de citas, el acoplamiento bibliográfico, el

análisis de co-palabras y el análisis de coautoría, las cuales, al integrarse con modelos de redes, ofrecen una visión global de las dinámicas de generación y transferencia de conocimiento. Estas herramientas permiten representar de manera gráfica la organización cognitiva del campo, revelando tanto las relaciones entre autores, instituciones y revistas como las conexiones temáticas que articulan el desarrollo científico. De esta forma, el mapeo contribuye a identificar núcleos de investigación consolidados, áreas emergentes y vínculos interdisciplinarios. En el presente estudio, este enfoque fue aplicado para caracterizar la evolución y estructura intelectual de la investigación sobre arándano (*Vaccinium spp.*) en el contexto de la agricultura, permitiendo reconocer las interacciones entre autores, instituciones y palabras clave, así como el grado de cohesión temática dentro del dominio científico analizado.

Número de documentos publicados. El análisis bibliométrico de la evolución anual (Figura 2) de la producción científica sobre el arándano (*Vaccinium spp.*) muestra una tendencia ascendente sostenida a lo largo de casi cuatro décadas, evidenciada por una pendiente positiva constante en la regresión lineal y una intensificación progresiva en la generación de conocimiento. Entre 1987 y 2005, el crecimiento fue incipiente, reflejando una fase exploratoria del campo científico, con aportes aislados centrados en aspectos fisiológicos, patológicos, ecológicos y de manejo agronómico básico (Nickerson & MacNeill, 1987; Starrett, 2002; Stretch et al., 2001; Tamada, 1996). Sin embargo, a partir de 2006 se observa una transición hacia un sistema de investigación más articulado, caracterizado por la diversificación temática, la consolidación de grupos especializados y la inserción del arándano en agendas científicas globales vinculadas a nutrición, biotecnología, agricultura de precisión, ciencia e industria de alimentos y sostenibilidad agrícola (Allan-Wojtas et al., 1999; Blanchet et al., 2020; Mari et al., 2025; Mounika et al., 2022;

Zaman et al., 2008). Este cambio estructural coincide con la expansión comercial del cultivo y la incorporación de nuevas regiones productoras, lo que favoreció el incremento en la visibilidad y el impacto de las publicaciones.

Durante el periodo 2016–2025, la tendencia se acentúa de manera significativa, alcanzando un máximo histórico en 2024 con 42 artículos publicados, lo que consolida al arándano como un modelo frutal de investigación interdisciplinaria. Las fluctuaciones observadas entre años pueden reflejar la naturaleza cíclica de la financiación y las colaboraciones internacionales, pero sin alterar el crecimiento general de la producción. El total de 503 documentos acumulados confirma la madurez del campo, con una expansión notable hacia estudios de genómica, fisiología del estrés, poscosecha, propiedades bioactivas y sistemas sostenibles de producción (Cai et al., 2025; Mounika et al., 2022; Rashwan et al., 2024). En conjunto, la figura 2 revela un patrón de consolidación científica con alta productividad y creciente especialización temática, situando a la investigación sobre *Vaccinium spp.* dentro de un estadio avanzado de desarrollo y con proyección estratégica en las ciencias agrícolas y alimentarias actuales.

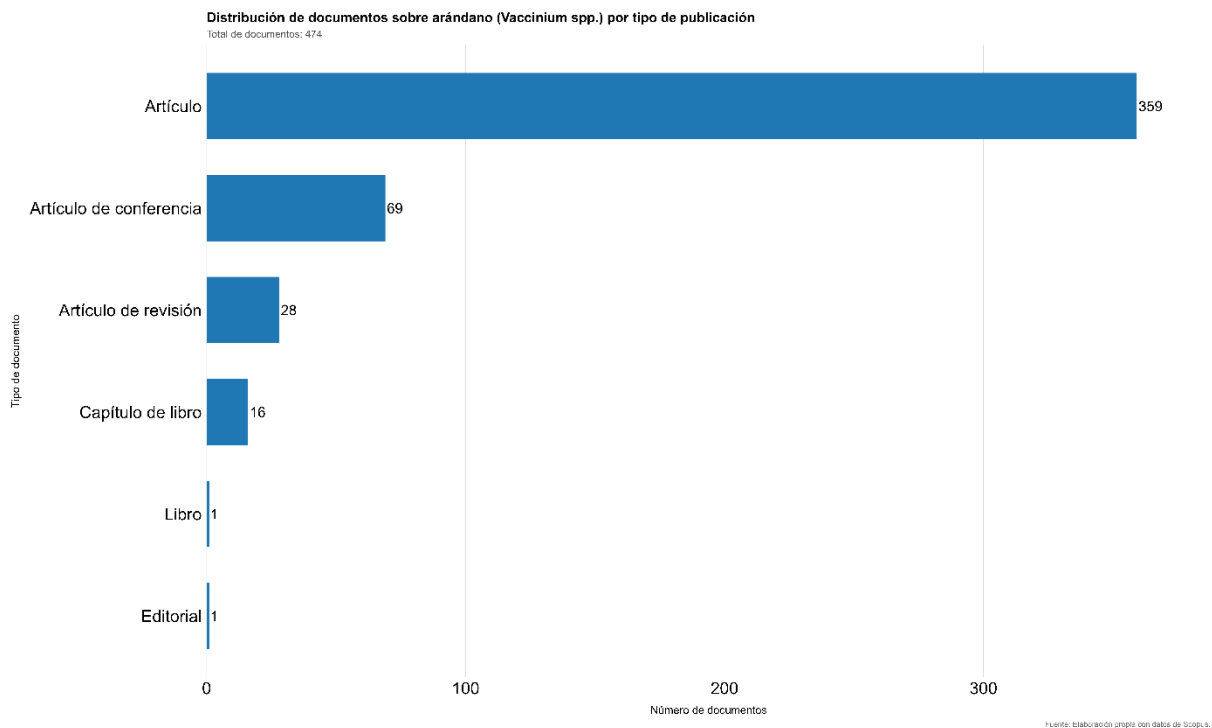
Figura 2.*Evolución histórica de las publicaciones*

Nota. El gráfico representa la evolución de las publicaciones desde 1987 al 2025.

Tipos de documentos publicados. El análisis de la distribución de los documentos por tipo de publicación muestra una estructura científica dominada por los artículos de investigación, que representan más del 75 % del total (359 de 474 documentos). Este predominio evidencia la consolidación del arándano (*Vaccinium spp.*) como un campo de estudio formalmente establecido dentro de la literatura académica, sustentado en la publicación de resultados experimentales revisados por pares (Rocha et al., 2022a). Los artículos de conferencia (69) ocupan el segundo lugar, reflejando la vitalidad de los foros científicos y la creciente presentación de hallazgos preliminares en congresos internacionales (Villagran et al., 2025). Los artículos de revisión (28) confirman la madurez del campo, ya que este tipo de documentos suelen emerger cuando existe

un cuerpo de conocimiento suficientemente amplio para ser sistematizado y analizado críticamente.

En contraste, los capítulos de libro, libros y editoriales constituyen un porcentaje marginal (menos del 5 % del total), lo que sugiere que la transferencia del conocimiento generado aún se orienta principalmente hacia canales académicos especializados antes que en la vía de compilaciones o síntesis de carácter divulgativo o interdisciplinar (Rocha et al., 2022b). Este patrón es característico de disciplinas en consolidación científica, donde la prioridad es fortalecer la base empírica y la visibilidad internacional mediante revistas indexadas (Montalván-Burbano et al., 2021). En conjunto, la distribución (Figura 3) refleja un ecosistema de producción científica dinámico y con alta dependencia de la comunicación formal, que favorece la consolidación de redes académicas, la citabilidad y el posicionamiento del arándano como cultivo modelo en la investigación hortícola global.

Figura 3.*Tipos de documentos publicados.*

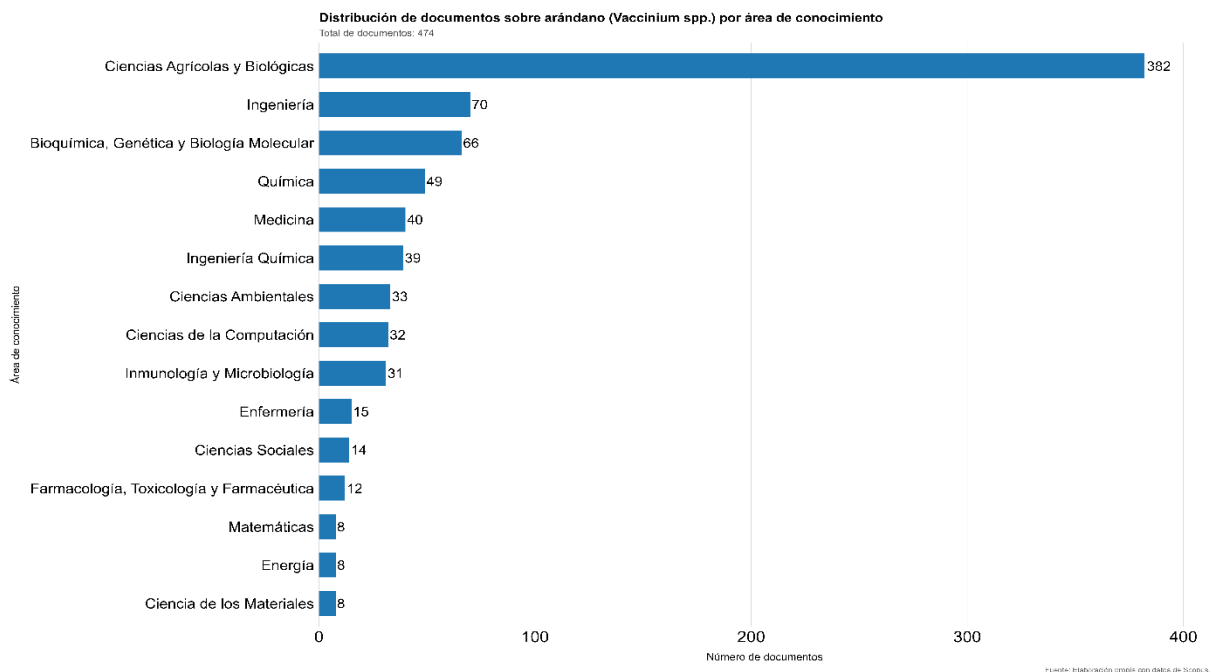
Nota. El gráfico representa la distribución de documentos sobre el arándano según el tipo de publicación.

Áreas de conocimiento que abarca el campo científico según los documentos publicados. La distribución por áreas de conocimiento (Figura 4) revela una concentración notable de la investigación sobre arándano (*Vaccinium spp.*) en el ámbito de las Ciencias Agrícolas y Biológicas, con 382 documentos, lo que refleja la consolidación de este cultivo como un modelo de estudio en fisiología vegetal, genética aplicada y manejo agronómico sostenible (Couture et al., 2023; Ngoc & Thao, 2024; Z. Song et al., 2025). El predominio de esta área se complementa con el crecimiento de la Ingeniería (70) y la Bioquímica, Genética y Biología Molecular (66), que evidencian la convergencia entre la ciencia de los cultivos y la innovación tecnológica. En los últimos años, esta integración ha favorecido la aparición de enfoques avanzados en poscosecha,

orientados al control de calidad, la conservación de antocianinas y la predicción del deterioro mediante sensores ópticos e inteligencia artificial (Bracamonte et al., 2022; D. Wang et al., 2022). Asimismo, los modelos de simulación y los algoritmos de aprendizaje profundo (deep learning) están siendo empleados para monitorear el cultivo, realizar clasificación automatizada de frutos, la detección de defectos superficiales y la estimación del contenido bioquímico, mostrando una transición desde el análisis descriptivo hacia la analítica predictiva y prescriptiva en la cadena productiva del arándano (Y. Huang et al., 2020; Majid et al., 2022; Sheikh et al., 2019; Tianyi & Fengzhi, 2022; Zhai et al., 2024).

Figura 4.

Áreas en las cuales se integran los documentos publicados.



Nota. El gráfico representa la distribución de documentos sobre el arándano según el área de conocimiento.

Las áreas secundarias Química (49), Medicina (40) e Ingeniería Química (39), refuerzan el enfoque multidimensional del campo, especialmente en el estudio de los compuestos bioactivos y

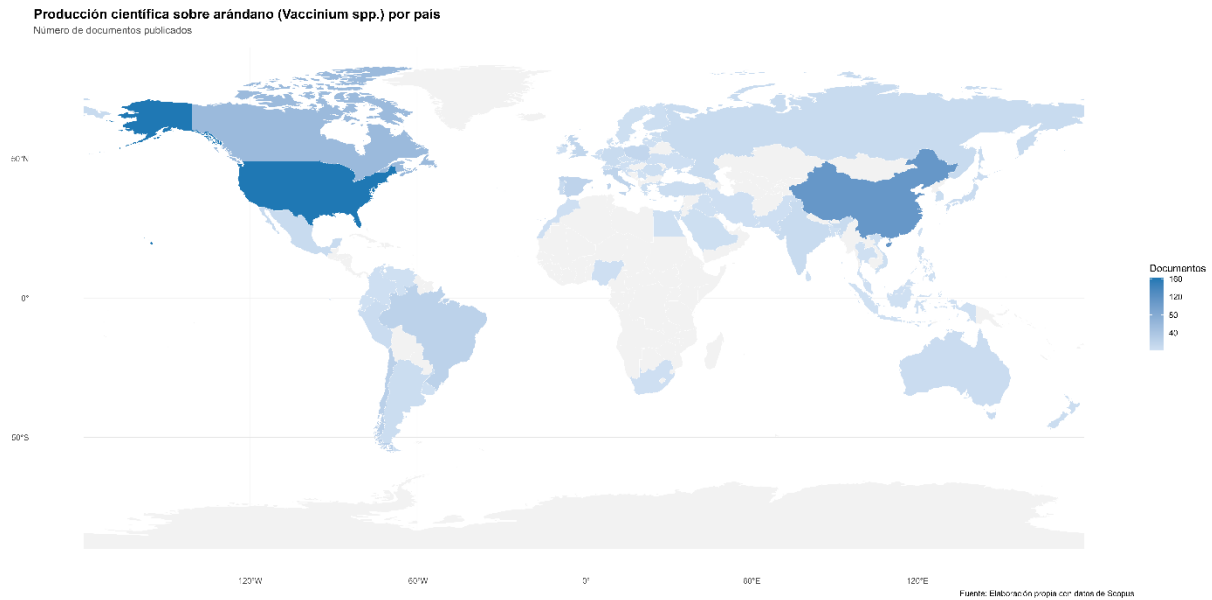
sus aplicaciones nutraceuticas (Mounika et al., 2022). En paralelo, el avance en Ciencias Ambientales (33) y Ciencias de la Computación (32) sugiere una ampliación del espectro investigativo hacia la sostenibilidad, el modelado del biosistema y la optimización de procesos mediante algoritmos de inteligencia computacional (Mari et al., 2025; Pérez et al., 2022; W. Zhang et al., 2022). Disciplinas emergentes como Energía, Ciencia de los Materiales y Matemáticas abren nuevas fronteras, vinculadas al diseño de empaques biodegradables o comestibles, el modelado y simulación, el desarrollo de tecnologías de secado en el procesamiento y prácticas de almacenamiento eficiente (Kaushalya & Rupasinghe, 2025; W. Wang et al., 2023; Waterhouse et al., 2017; Z. Zheng et al., 2021). En conjunto, la figura evidencia una madurez científica con creciente interdisciplinariedad, donde la investigación del arándano transita desde la comprensión biológica hacia la integración de herramientas de ingeniería, ciencia de datos y aprendizaje automático, configurando un campo con alta proyección hacia la agricultura de precisión y la bioeconomía circular.

Países donde se originan las publicaciones. El mapa global (Figura 5) de la producción científica sobre arándano (*Vaccinium spp.*) revela una clara concentración del conocimiento en países con sistemas agroindustriales tecnológicamente consolidados y estructuras académicas robustas. Estados Unidos (162 documentos) encabeza la generación de conocimiento científico, no por su volumen de producción actual, sino por su liderazgo histórico en investigación agronómica, fisiológica y biotecnológica del cultivo (Heller & Nunez, 2022; Lehman & Oudemans, 1997; Renquist, 2005). Sus universidades y centros de innovación han desarrollado modelos de manejo, fisiología, poscosecha y calidad de fruto que sirvieron como referencia para la expansión global del cultivo (Chang et al., 2012; Shen et al., 2020; W. Zhang et al., 2022). En

segundo lugar, se encuentra China (111), que en la última década ha experimentado un crecimiento exponencial tanto en superficie cultivada como en producción científica, impulsada talvez por programas estatales de innovación agrícola y biotecnología vegetal y explotación de mercados (Bin et al., 2024; W. Zhang et al., 2022). Canadá (57) completa el grupo líder, destacándose en estudios sobre poscosecha, calidad y efectos positivos sobre la salud mediante el consumo del fruto o alimentos derivados (Butot et al., 2018; Hicklenton et al., 2002; Kalt et al., 2020).

Figura 5.

Distribución global de la producción científica.



Nota. El gráfico representa la distribución de producción científica relacionada con el arándano por país.

En América Latina, la actividad científica se concentra en Chile (24 documentos), Brasil (22) y Perú (7), con una orientación aplicada hacia la calidad del fruto, la fisiología productiva y

las tecnologías poscosecha. Chile mantiene un papel central en la exportación y la generación de conocimiento sobre manejo agronómico, fisiología, riego y fertilización, producción bajo cubierta del cultivo (Calderón-Orellana et al., 2023; Max et al., 2009; Retamal-Salgado et al., 2015; Stückrath et al., 2008). Brasil aporta en el manejo de plagas y enfermedades a través de control, biológico y en estudios de algunos cultivares específicos (Marucci et al., 2024; Viencz et al., 2021), mientras que Perú, principal exportador mundial, orienta sus investigaciones desde la tecnología usando tecnologías emergentes para detección de enfermedades y para procesamiento poscosecha del fruto (Obregón Domínguez et al., 2024; Sullca et al., 2019). En conjunto, estos países reflejan un reordenamiento geoeconómico y científico, donde el sur global emerge como productor y, cada vez más, como generador de conocimiento especializado.

En Europa, la producción científica se distribuye principalmente entre España (20 documentos), Italia (19), Reino Unido (16) y Polonia (15), con aportes significativos en biotecnología, calidad nutracéutica y sostenibilidad. Estos países concentran investigaciones sobre metabolismo secundario y evaluación del potencial antioxidante del fruto, así como estudios en el campo ambiental enfocados al análisis del ciclo de vida asociadas a la producción de arándano (Calabuig-Jiménez et al., 2022; Cardeñosa et al., 2016; Cerrato et al., 2022; Girgenti et al., 2013; Rashwan et al., 2024). Asimismo, Portugal (10) y Alemania (9) destacan en líneas de investigación relacionadas con tecnologías de procesamiento y calidad poscosecha del fruto o productos derivados (Barba et al., 2012; Vilela et al., 2016).

Finalmente, países asiáticos como India, Japón, Corea del Sur y Vietnam evidencian un crecimiento sostenido de su participación, centrado en poscosecha, nutracéutica, producción en ambientes controlados y sostenibilidad (Ayyadurai et al., 2025; Ozeki & Tamada, 2004; H.-N. Song et al., 2018; Takahashi et al., 2021). Aunque con menor número de publicaciones, su aporte

se caracteriza por la adopción temprana de herramientas de visión artificial, aprendizaje automático y simulación para la clasificación de frutos (Majid et al., 2022; Park et al., 2021). De otro lado En Colombia se registran solo dos publicaciones indexadas sobre arándano, lo que refleja un campo aún incipiente y una probable prevalencia de literatura gris en tesis o revistas no indexadas. El primer estudio analiza el efecto del procesamiento térmico sobre los polifenoles y la capacidad antioxidante del *Vaccinium meridionale*, destacando su valor funcional frente a otros frutos andinos (Bernal-Roa & Díaz-Moreno, 2014). El segundo aborda la valorización del orujo como subproducto, aplicando secado y molienda para obtener polvos ricos en fibra y antocianinas, con potencial como ingrediente funcional. Ambos trabajos enfatizan la poscosecha y la economía circular, orientando futuras investigaciones hacia el aprovechamiento tecnológico y la sostenibilidad agroindustrial (Calabuig-Jiménez et al., 2022).

Finalmente se puede concluir que existe una globalización científica de la investigación sobre el arándano, donde América del Norte y Europa mantienen el liderazgo histórico en conocimiento, mientras Asia y América Latina emergen como polos de innovación tecnológica y sostenibilidad productiva, consolidando al arándano como modelo biológico y tecnológico en la agricultura de precisión contemporánea.

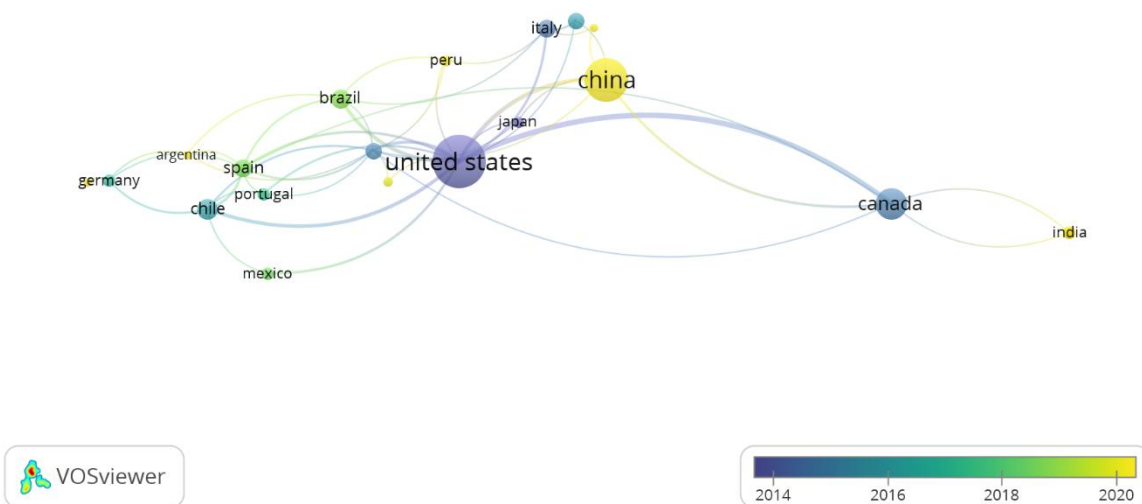
Red de coautoría por país. La red de coautoría por país (Figura 6) evidencia una estructura global de colaboración científica en torno al estudio del arándano (*Vaccinium spp.*), donde los vínculos entre naciones reflejan el intercambio de conocimiento y la capacidad de integración entre sistemas de investigación. Los nodos de mayor tamaño y conexión Estados Unidos, China y Canadá concentran la mayor productividad y cohesión de la red, actuando como ejes de cooperación con Europa, Asia y América Latina. Esta red no solo representa la distribución

geográfica de los estudios, sino también la interdependencia científica, en la cual la circulación de autores, proyectos y datos genera un ecosistema de conocimiento compartido (Espitia et al., 2025).

Se observa una alta centralidad de Estados Unidos, con un patrón de colaboración multinodal que enlaza con China, Canadá, España y Brasil, reflejando una estructura jerárquica típica de los campos científicos maduros. China aparece como un nodo emergente con una conectividad creciente, resultado de su expansión e interés en el cultivo y sus diferentes tipos de mercado. En América Latina, países como Chile, México y Brasil destacan por su inserción en redes internacionales, principalmente en áreas aplicadas como poscosecha, calidad nutracéutica y tecnologías, mientras Perú y Argentina fortalecen vínculos con centros de investigación europeos.

Figura 6.

Red de coautoría entre países.

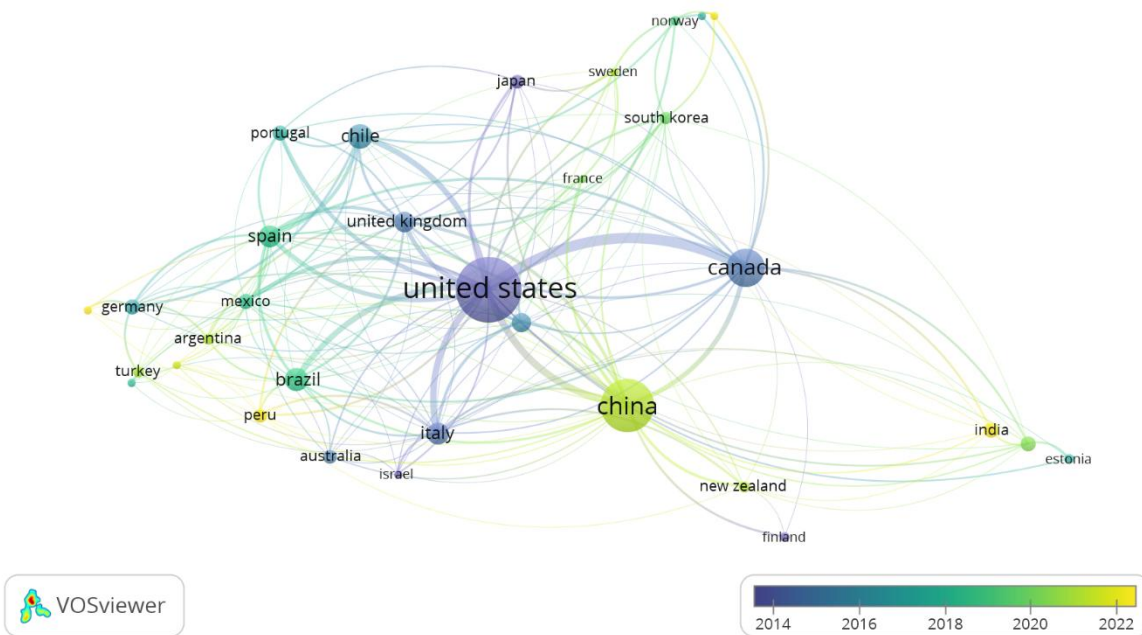


Nota. El gráfico representa la red de coautoría entre los diferentes países que realizan producción científica relacionada con el arándano.

Finalmente, la red muestra una tendencia hacia la diversificación regional y temática. Europa mantiene un rol relevante a través de España, Italia y Polonia, orientado a estudios de

sostenibilidad y química de compuestos bioactivos, mientras Asia amplía su presencia en innovación tecnológica y aprendizaje automático. En conjunto, la estructura de coautoría revela una transición desde un sistema concentrado en pocos polos hacia una red más distribuida y multidisciplinaria, donde la colaboración internacional se convierte en un motor clave para la evolución científica y tecnológica del arándano.

Red de acoplamiento bibliográfico entre países. La red de acoplamiento bibliográfico (Figura 7) permite identificar los países cuyas publicaciones comparten una base referencial común, es decir, aquellos que citan las mismas fuentes científicas en sus estudios sobre *Vaccinium spp.* (Rocha et al., 2021). En esta red, compuesta por 48 países y una fuerza total de enlace de 4.917, se observa que Estados Unidos (162 documentos, fuerza 917), Canadá (56, 421) y China (111, 330) son los principales nodos de articulación, lo que refleja su papel dominante en la construcción del marco conceptual y metodológico del campo (Batagelj, 2020). La alta coincidencia en referencias citadas evidencia una dependencia académica hacia estos países, que actúan como núcleos de estructuración cognitiva para las investigaciones globales en fisiología, genética y poscosecha del arándano.

Figura 7.*Red de acoplamiento bibliográfico entre países.*

Nota. El gráfico representa la red de acoplamiento bibliográfico entre los diferentes países que realizan producción científica relacionada con el arándano.

Los países europeos presentan una red de acoplamientos bien definida: Reino Unido (203), Italia (195), España (192), Portugal (81) y Polonia (85) conforman un bloque de cooperación intercontinental que comparte líneas en poscosecha, sostenibilidad y agricultura bajo cubierta. América Latina se integra mediante Chile (175), Brasil (170), México (73) y Perú (48), mostrando un crecimiento en producción y afinidad temática con Europa, centrado en calidad de fruto y estudios de fisiología. Esta articulación demuestra que la literatura latinoamericana se nutre de marcos teóricos consolidados en el norte global, pero comienza a generar adaptaciones tecnológicas y contextuales propias.

Finalmente, la presencia de países asiáticos como Japón (51), Corea del Sur (62) e India (29) refuerza la diversificación del conocimiento, destacando su participación en investigación avanzada sobre procesamiento, modelado predictivo y aprendizaje automático aplicado al manejo poscosecha principalmente. En conjunto, el análisis numérico y estructural confirma que el estudio del arándano ha alcanzado una fase de consolidación global, con fuertes interdependencias temáticas y una creciente sinergia interdisciplinaria orientada hacia la sostenibilidad y la innovación tecnológica.

Instituciones líderes en producción científica. El análisis institucional muestra que la producción científica sobre arándano está concentrada en entidades de Estados Unidos y Canadá, las cuales lideran tanto en volumen de publicaciones como en capacidad de articulación en redes internacionales (

Tabla 4). El USDA Agricultural Research Service, el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos y la Dalhousie University destacan con 25 documentos cada uno, evidenciando un núcleo de investigación sólido y complementario entre ciencia aplicada, fisiología vegetal y manejo cultural del cultivo, incidencia de enfermedades y poscosecha (Brownmiller et al., 2009; Copes et al., 2001; Forney et al., 2006; D. Percival & MacKenzie, 2007; Yeo et al., 2016). Estas instituciones no solo impulsan la investigación básica, sino también el desarrollo tecnológico y la transferencia de conocimiento hacia sistemas productivos de alta eficiencia, con énfasis en calidad de fruto y uso de herramientas de modelado (Kaushalya & Rupasinghe, 2025; Ni et al., 2022; Schumann et al., 2019).

En un segundo nivel, las universidades de Florida (23 documentos) y Georgia (21) refuerzan la base académica del conocimiento sobre *Vaccinium spp.*, contribuyendo en temas de

manejo agronómico, ecofisiología y desarrollo de modelos predictivos para optimizar la producción y poscosecha (Chang et al., 2014; Kuzy & Li, 2015; Ogden & van Iersel, 2009; Schumann et al., 2019; Takeda et al., 2013). La presencia de estas instituciones refleja un sistema científico articulado entre agencias gubernamentales y universidades, caracterizado por la integración de investigación aplicada, innovación tecnológica. En conjunto, este liderazgo institucional evidencia una sinergia entre ciencia pública y academia que ha permitido consolidar a Norteamérica como referente global en el estudio y mejoramiento del sistema productivo de arándano.

Tabla 4.

Top 5 de instituciones con mayor productividad científica.

Institución	Numero de documentos publicados	Página web
USDA Agricultural Research Service	25	https://www.ars.usda.gov/
Dalhousie University	25	https://www.dal.ca/
United States Department of Agriculture	25	https://www.usa.gov/agencies/u-s- department-of-agriculture
University of Florida	23	https://www.ufl.edu/
University of Georgia	21	https://www.uga.edu/

Nota. Esta tabla muestra las 5 instituciones con mayor productividad científica.

Autores líderes en producción académica. El investigador Arnold Walter Schumann, adscrito a la University of Florida (Estados Unidos), es actualmente uno de los líderes más

influyentes en la investigación aplicada al arándano (*Vaccinium* spp.), con 11 publicaciones y 3,488 citaciones con un índice H de 35 (**Tabla 5**). Su trabajo se caracteriza por la integración de la ingeniería agrícola, la ciencia del suelo y la automatización en los sistemas productivos de arándano, especialmente en ambientes de suelos arenosos del sureste estadounidense. En sus estudios, Schumann ha evaluado las pérdidas de nutrientes y la eficiencia del manejo del suelo, aportando evidencia relevante sobre la sostenibilidad y la conservación del agua en la producción intensiva (Bandaranayake et al., 2020). Además, también se ha introducido en el uso de redes neuronales profundas para la clasificación no destructiva de la madurez del fruto, demostrando la aplicabilidad del aprendizaje profundo y la visión artificial en la agricultura de precisión (Schumann et al., 2019). En conjunto, su trabajo posiciona a la Universidad de Florida como un referente en innovación tecnológica para cultivos frutales de alto valor.

Tabla 5.

Top 5 de autores con mayor número de publicaciones.

Autor	Numero de documento	Total de citaciones	H-index	Filiación	País
Schumann, Arnold Walter	11	3,488	35	University of Florida	Estados Unidos
Zaman, Qamar Uz	10	4,322	34	University of Lahore	Pakistan
Howard, Luke R	8	12,164	56	University of Arkansas	Estados Unidos
Li, Bin	7	5,964	40	Shenyang Agricultural University	China
Li, Changying Charlie	7	5,872	44	University of Florida	Estados Unidos

Nota. Esta tabla muestra los 5 autores con mayor número de publicaciones.

Por su parte, Qamar Uz Zaman, de la University of Lahore (Pakistán), ha desarrollado una línea de investigación igualmente sólida y complementaria, con 10 publicaciones y 4,322 citas y un índice H de 34, centrada en la automatización de procesos agrícolas y la agricultura de precisión en arándanos silvestres. En trabajos, Zaman ha demostrado la eficacia del uso de sensores ópticos y cámaras digitales para optimizar la aplicación localizada de fertilizantes, contribuyendo al ahorro de recursos y la reducción del impacto ambiental (Chang et al., 2014). En colaboración con Schumann, ha publicado estudios donde se analizan los beneficios técnicos y económicos de la mecanización inteligente (K. Esau et al., 2018; T. Esau et al., 2015). Su enfoque interdisciplinario, que combina ingeniería, análisis de datos y sostenibilidad, refleja la creciente internacionalización de la investigación sobre el arándano y el papel estratégico de Asia en la adopción de tecnologías digitales para la agricultura moderna.

En un tercer lugar esta Luke R. Howard (University of Arkansas, EE. UU.), con 8 publicaciones, 12,164 citas y un H-index de 56, se ha posicionado como referente mundial en el estudio de los compuestos bioactivos y la estabilidad de antocianinas. Sus trabajos, han definido los fundamentos sobre los efectos del procesamiento térmico en la calidad funcional del arándano. Así mismo su producción científica demuestra una orientación hacia la integración de la ciencia de alimentos con la fisiología vegetal y la salud humana (Howard et al., 2010; Kalt et al., 2020). Por su parte, Bin Li (Shenyang Agricultural University, China), con 7 artículos, 5,964 citas y un H-index de 40, lidera las investigaciones en metabolómica y estabilidad de antocianinas bajo condiciones de procesamiento. Sus aportes científicos reflejan una visión avanzada sobre nanoencapsulación y biotransformación de metabolitos secundarios. Su trabajo posiciona a China como un polo emergente en la biotecnología aplicada al valor agregado de los frutos azules (Meili et al., 2024).

Finalmente, el investigador Changying Li (University of Florida, EE. UU.) combina 7 publicaciones y 5, 872 citas con un H-index de 44, consolidándose como pionero en la aplicación de inteligencia artificial y visión computacional para la detección de daños y optimización de cosecha mecánica. Sus estudios como demuestran la transición hacia una agricultura digital basada en modelos de aprendizaje profundo, impulsando la mecanización inteligente y la trazabilidad de la calidad en tiempo real (Jiang et al., 2016; Ni et al., 2022).

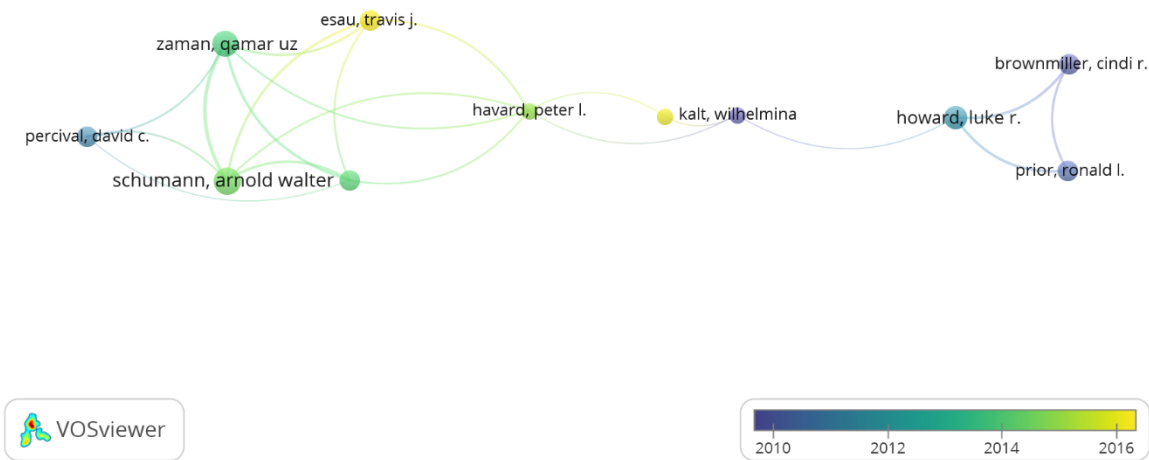
Red de coautoría entre autores. La red de coautoría (Figura 8) entre autores evidencia la estructura colaborativa de la producción científica sobre *Vaccinium spp.*, conformada por 11 autores principales, 20 vínculos y una fuerza total de enlace de 75, lo que indica un grado medio de cooperación y especialización temática. Los nodos más destacados corresponden a Arnold Walter Schumann (11 documentos, 159 citas, fuerza de enlace 27) y Qamar Uz Zaman (10 documentos, 156 citas, fuerza de enlace 27), quienes encabezan un clúster central vinculado a la automatización, la mecanización y la aplicación de inteligencia artificial en el manejo de arándanos (Schumann et al., 2019). Su colaboración estrecha, reflejada en trabajos sobre detección de madurez, optimización de cosecha y aspersión inteligente, consolida un bloque de investigación orientado a la agricultura de precisión y sostenibilidad tecnológica, con una fuerte interacción entre América del Norte y Asia.

El segundo grupo de autores, conformado por Luke R. Howard, Ronald L. Prior y Cindi R. Brownmiller, muestra un enfoque más clásico centrado en la química de compuestos bioactivos y antioxidantes. Este subgrupo, ubicado temporalmente en los primeros años del espectro de publicaciones (2010–2014), ha contribuido de manera fundamental a los estudios sobre antocianinas, polifenoles y estabilidad de pigmentos durante el procesamiento de los frutos

(Brownmiller et al., 2009; Khanal et al., 2009). Su alta citación y persistencia en la red reflejan que estos autores proporcionaron las bases experimentales que permitieron el surgimiento de líneas más tecnológicas en años posteriores, especialmente las que hoy se integran con inteligencia artificial y modelado de calidad poscosecha.

Figura 8.

Red de coautoría entre autores.



Nota. El gráfico muestra la red de coautoría entre autores que realizan producción científica relacionada con el arándano.

Finalmente, dentro de la red destacan autores con un papel interconector y aplicado, como David C. Percival, Peter L. Havard y Wilhelmina Kalt, quienes vinculan las áreas de automatización, economía agrícola y química de alimentos. Percival ha desarrollado investigaciones pioneras sobre tecnologías de monitoreo y estimación del rendimiento en arándanos silvestres, incluyendo sistemas automatizados de cosecha y análisis del consumo energético y huella de carbono en la producción (Chang et al., 2012; D. Percival & Dias, 2012). Havard, por su parte, ha centrado su trabajo en la eficiencia económica y tecnológica de la agricultura de precisión, mediante estudios, que aportan una perspectiva integradora entre innovación y viabilidad económica (T. Esau et al., 2014, 2015). Finalmente, Wilhelmina Kalt

representa el vínculo con la investigación bioquímica, con contribuciones esenciales sobre antocianinas, fenoles y capacidad antioxidante en productos procesados, consolidando la relación entre calidad funcional y procesamiento (Kalt et al., 2020). En conjunto, estos autores actúan como nodos de convergencia interdisciplinaria, articulando el avance tecnológico, la sostenibilidad productiva y la salud humana dentro de un mismo marco de innovación científica.

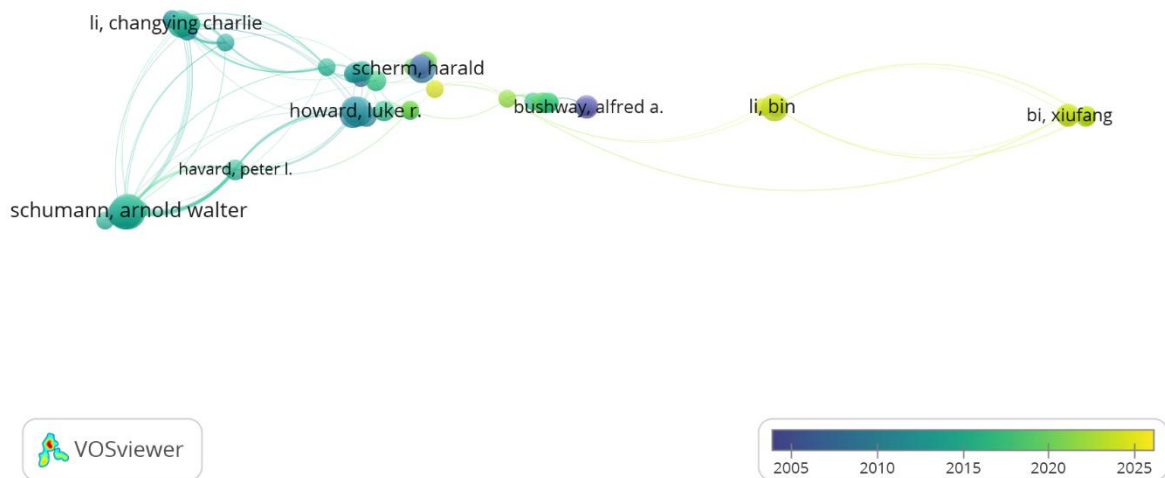
Red de acoplamiento bibliográfico entre autores. La red de acoplamiento bibliográfico entre autores (Figura 9) permite identificar la magnitud de la relación intelectual basada en las coincidencias de citas entre sus publicaciones, donde un mayor acoplamiento indica que los investigadores sustentan sus trabajos en un corpus bibliográfico similar (Villagran, Espitia, et al., 2024). En este caso, la red está conformada por 61 autores, conectados mediante 227 enlaces, con una fuerza total de enlace de 3.742, lo cual representa un sistema de colaboración científica consolidado y altamente cohesionado. La fuerza de enlace refleja el grado de proximidad temática entre autores: a mayor número, mayor es la afinidad en las referencias utilizadas y, por tanto, la cercanía conceptual en sus líneas de investigación (Carrión-Mero et al., 2020; Villagran, Rocha, et al., 2024). Destacan Arnold Walter Schumann (11 documentos, 159 citas, fuerza de enlace 465), Qamar Uz Zaman (10 documentos, 156 citas, fuerza 464) y Li Changying Charlie (7 documentos, 201 citas, fuerza 363), quienes conforman el núcleo de mayor densidad de la red. Este grupo lidera las investigaciones en agricultura de precisión, visión artificial y mecanización inteligente, demostrando una alta interdependencia en la producción de conocimiento aplicada a la cosecha mecanizada, la estimación de madurez y el manejo automatizado de campos de arándano.

El segundo conglomerado relevante lo conforman Luke R. Howard (8 documentos, 1.144 citas, fuerza 281), Ronald L. Prior (6 documentos, 590 citas, fuerza 235), Fumiomi Takeda (5 documentos, 179 citas, fuerza 312) y Peter L. Havard (4 documentos, 39 citas, fuerza 239), con

una orientación hacia la bioquímica, fisiología y calidad poscosecha. Su acoplamiento bibliográfico refleja la persistencia de un enfoque interdisciplinario entre la ciencia de los alimentos y la ingeniería agrícola. Estos investigadores comparten numerosas referencias relacionadas con polifenoles, antocianinas y estabilidad térmica de los compuestos antioxidantes, generando una base teórica común que sustenta la transición hacia investigaciones más tecnológicas. En este grupo, los valores intermedios de fuerza de enlace (entre 235 y 312) reflejan una colaboración indirecta pero coherente, donde la convergencia bibliográfica sirve de puente entre los estudios químicos y los desarrollos en automatización agrícola.

Figura 9.

Red de acoplamiento bibliográfico entre autores.



Nota. El gráfico muestra la red de acoplamiento bibliográfico entre autores que realizan producción científica relacionada con el arándano.

Finalmente, emergen autores como Li Bin (7 documentos, 118 citas, fuerza 87) y Bi Xiufang (5 documentos, 18 citas, fuerza 184), quienes simbolizan la expansión reciente del campo hacia Asia, especialmente China. Su producción científica, con valores de fuerza de enlace

menores, pero en aumento, se concentra entre 2020 y 2025 y aborda temas de metabolómica, nanoencapsulación y estabilidad de antocianinas durante el procesamiento y almacenamiento. Este desplazamiento temporal hacia la parte más reciente de la red muestra la evolución del conocimiento hacia tecnologías emergentes y el fortalecimiento de nuevos polos de investigación fuera del ámbito tradicional norteamericano.

Principales revistas seleccionadas por los autores para publicar los documentos. La producción científica sobre *Vaccinium spp.* se concentra en revistas especializadas de horticultura, fisiología vegetal y ciencia de los alimentos, destacando una combinación de publicaciones aplicadas y de alto impacto (

Tabla 6). Acta Horticulturae encabeza el número de contribuciones con 56 documentos, bajo la International Society for Horticultural Science (ISHS), clasificada en Q4, con un índice H de 74 y sede en Bélgica. Aunque su posición en el ranking SJR es modesta, su elevada productividad refleja su papel como principal canal de difusión técnico-científica en horticultura, especialmente en congresos y simposios sobre berries y manejo agronómico (Boudreau-Forgues et al., 2023; Smith et al., 2016; Smith & Miller-Butler, 2016). Su enfoque práctico, orientado a la transferencia de tecnología, la convierte en un espacio clave para la divulgación de innovaciones en producción, fisiología del cultivo y poscosecha del arándano.

Tabla 6.

Top 5 de revistas con mayor número de publicaciones.

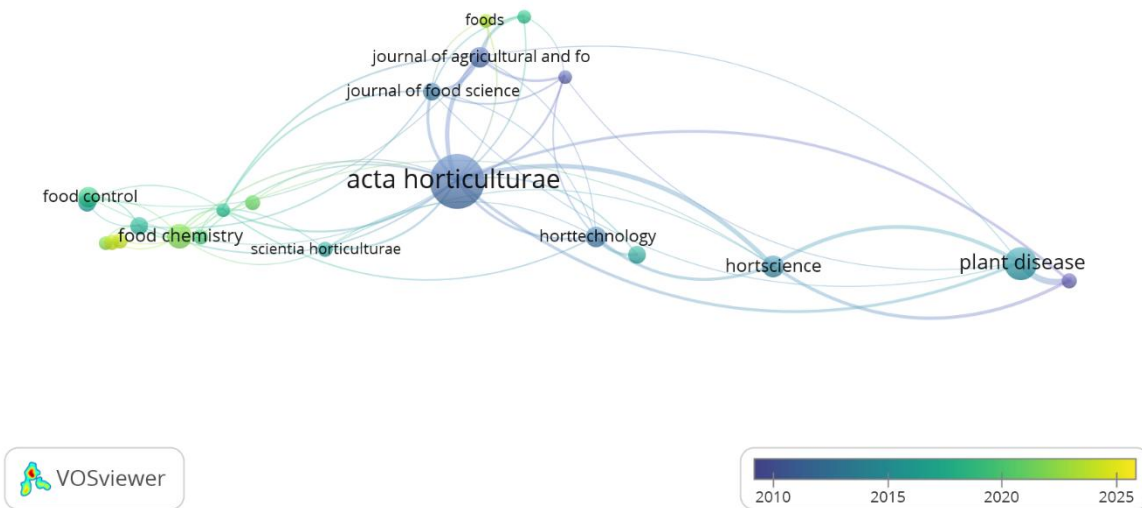
Journal	Numero Documentos	Editorial	SJR Ranking	H-index	Pais
Acta Horticulturae	56	International Society for Horticultural Science	Q4	74	Bélgica
Plant Disease	21	American Phytopathological Society	Q1	135	Estados Unidos
Food Chemistry	12	Elsevier	Q1	348	Reino Unido
Hortscience	10	American Society for Horticultural Science	Q2	109	Estados Unidos
Journal of Agricultural and Food Chemistry	8	American Chemical Society	Q1	358	Estados Unidos

Nota. Esta tabla muestra las 5 revista con mayor número de publicaciones relacionadas con arándanos.

En contraste, *Plant Disease*, *Food Chemistry* y el *Journal of Agricultural and Food Chemistry* representan los núcleos de alto impacto (Q1) dentro del sistema de publicaciones, con índices H de 135, 348 y 358, respectivamente. Estas revistas agrupan investigaciones de frontera sobre patología vegetal, metabolómica y química de los alimentos, consolidando la interfaz entre la fisiología del arándano y la ciencia molecular (Cardeñosa et al., 2016; Dawidowicz & Typek, 2014; Z. Jin et al., 2024). *Plant Disease* (21 artículos) enfatiza la fitosanidad del cultivo, incluyendo la caracterización de patógenos y la eficacia de fungicidas (Lan et al., 2016; Shantharaj et al., 2024), mientras que *Food Chemistry* (12 artículos) y *Journal of Agricultural and Food Chemistry* (8 artículos) lideran la exploración de antocianinas, polifenoles y compuestos bioactivos con valor nutracéutico (Correia et al., 2017; Howard et al., 2010). Su alto nivel de citación y el prestigio de editoriales como Elsevier y la American Chemical Society evidencian la madurez científica y el reconocimiento internacional de los estudios sobre la calidad funcional del fruto.

Por su parte, HortScience, con 10 documentos y un índice H de 109, ocupa una posición intermedia (Q2) y refleja un equilibrio entre la investigación aplicada y experimental. Publicada por la American Society for Horticultural Science (ASHS), esta revista se ha consolidado como un espacio relevante para trabajos sobre fisiología reproductiva y manejo agronómico del arándano (Kingston et al., 2017; Qiu et al., 2018). Su participación en la red bibliométrica, junto con *Acta Horticulturae*, sugiere que los estudios sobre *Vaccinium spp.* combinan revistas técnicas de alta frecuencia de publicación con revistas científicas de alto impacto y visibilidad internacional, evidenciando una estructura editorial dual que sostiene tanto la divulgación práctica como la investigación avanzada en el campo de los berries.

Red de acoplamiento bibliográfico entre revistas. La red de acoplamiento bibliográfico entre revistas evidencia la estructura editorial y las interconexiones temáticas que sustentan la investigación en *Vaccinium spp.*, conformada por 61 fuentes, 227 enlaces y una fuerza total de enlace de 3.742 (Figura 10). En esta red, el indicador de fuerza de enlace cuantifica el grado de similitud en las referencias citadas por los artículos de distintas revistas: valores altos implican que las publicaciones comparten una base teórica y metodológica común (Villagran et al., 2025). En este contexto, *Acta Horticulturae* se posiciona como el nodo más influyente, con 56 documentos, 302 citas y una fuerza de enlace de 91, reflejando su rol como eje central de la producción científica sobre arándano. Su cercanía con revistas como HortScience (10 documentos, fuerza de enlace 52) y HortTechnology (8 documentos, fuerza de enlace 28) consolida un clúster orientado a la investigación aplicada y agronómica, vinculado a la fisiología del cultivo, prácticas de manejo y mecanización agrícola.

Figura 10.*Red de acoplamiento bibliográfico entre revistas.*

Nota. La imagen muestra la red de acoplamiento bibliográfico entre revistas.

Un segundo grupo de revistas de alto impacto, como Plant Disease (21 documentos, 224 citas, fuerza 59), Food Chemistry (12 documentos, 414 citas, fuerza 14) y Journal of Agricultural and Food Chemistry (8 documentos, 630 citas, fuerza 45), forma un clúster complementario enfocado en la calidad, bioquímica y sanidad vegetal. Este grupo articula la investigación biotecnológica con la ciencia de los alimentos, conectando disciplinas como la fitopatología, la metabolómica y la evaluación de compuestos bioactivos. La temporalidad de los enlaces (2015–2025) sugiere una tendencia hacia la interdisciplinariedad reciente, donde las revistas técnicas de horticultura y producción convergen con aquellas de mayor factor de impacto en el área de química y ciencia alimentaria. Esta configuración dual refleja la madurez del campo: un sistema editorial que combina publicaciones de alta productividad técnica con revistas de excelencia científica, sosteniendo tanto la innovación práctica como la profundización analítica en la cadena de valor del arándano.

Top ten de artículos más citados. El análisis de los diez artículos más citados (Tabla 7) revela las principales líneas de investigación y los enfoques multidisciplinarios en torno al estudio del arándano y sus compuestos bioactivos. El trabajo más influyente, con 1.255 citas, es “*Chlorogenic acids and other cinnamates – nature, occurrence and dietary burden*”, que constituye una revisión exhaustiva sobre la presencia y función de los ácidos clorogénicos y otros cinamatos en los alimentos. Este estudio estableció las bases químicas y nutricionales para comprender el papel de los compuestos fenólicos en la dieta humana, incluyendo al arándano como una de las fuentes principales de estos antioxidantes naturales, lo que lo posiciona como una referencia obligada en la investigación de metabolitos secundarios y su impacto en la salud.

En segundo lugar, “*Recent Research on the Health Benefits of Blueberries and Their Anthocyanins*” (469 citas) sintetiza la evidencia epidemiológica y clínica que vincula el consumo de arándanos con la prevención de enfermedades cardiovasculares, metabólicas y neurodegenerativas. Este artículo consolidó el reconocimiento de las antocianinas como compuestos funcionales clave, mientras que “*Dietary factors affecting polyphenol bioavailability*” (464 citas) profundizó en los mecanismos de absorción, metabolismo y sinergia de los polifenoles, señalando la influencia de la matriz alimentaria y el microbiota intestinal sobre su biodisponibilidad. Ambos trabajos han sido cruciales para el desarrollo del concepto de alimentos funcionales y su incorporación en políticas de salud pública y nutrición preventiva.

Un tercer eje de investigación aborda la relación entre los flavonoides y la función cognitiva. El artículo “*Flavonoids, cognition, and dementia: Actions, mechanisms, and potential therapeutic utility for Alzheimer disease*” (412 citas) muestra evidencia los mecanismos moleculares mediante los cuales los compuestos presentes en arándanos y otras frutas mejoran la plasticidad neuronal, el flujo sanguíneo cerebral y la neurogénesis, sugiriendo un papel terapéutico

potencial en la prevención del Alzheimer. Paralelamente, *“Effects and Mechanisms of Resveratrol on Aging and Age-Related Diseases”* (273 citas) amplía esta línea al demostrar el efecto protector del resveratrol —presente también en arándano, frente al envejecimiento celular, el estrés oxidativo y las enfermedades crónicas asociadas a la edad.

Por otra parte, varios estudios se centran en los efectos del procesamiento y la calidad del fruto. *“Atmospheric cold plasma inactivation of aerobic microorganisms on blueberries and effects on quality attributes”* (298 citas) propuso el uso del plasma frío como tecnología no térmica para reducir la carga microbiana sin afectar significativamente la textura y el color del fruto, contribuyendo a mejorar la inocuidad alimentaria. Complementariamente, *“Processing and Storage Effects on Monomeric Anthocyanins, Percent Polymeric Color, and Antioxidant Capacity of Processed Blueberry Products”* (279 citas) y *“Anthocyanins, Phenolics, and Antioxidant Capacity of Processed Lowbush Blueberry Products”* (194 citas) evaluaron el impacto del procesamiento térmico y el almacenamiento sobre la estabilidad de las antocianinas y la capacidad antioxidante, demostrando pérdidas superiores al 50% tras varios meses y destacando la necesidad de desarrollar métodos más eficientes de conservación de compuestos bioactivos.

Tabla 7.*Top 10 de artículos con mayor número de citaciones.*

Documento	Título	Citas	Referencia	Journal
1	Chlorogenic acids and other cinnamates – nature, occurrence and dietary burden	1255	(Clifford, 1999)	Journal of the Science of Food and Agriculture
2	Recent Research on the Health Benefits of Blueberries and Their Anthocyanins	469	(Kalt et al., 2020)	Advances in Nutrition
3	Dietary factors affecting polyphenol bioavailability	464	(Bohn, 2014)	Nutrition Reviews
4	Flavonoids, cognition, and dementia: Actions, mechanisms, and potential therapeutic utility for Alzheimer disease	412	(Williams & Spencer, 2012)	Free Radical Biology and Medicine
5	Atmospheric cold plasma inactivation of aerobic microorganisms on blueberries and effects on quality attributes	298	(Lacombe et al., 2015)	Food Microbiology
6	Processing and Storage Effects on Monomeric Anthocyanins, Percent Polymeric Color, and Antioxidant Capacity of Processed Blueberry Products	279	(Brownmiller et al., 2008)	Food Science
7	Effects and Mechanisms of Resveratrol on Aging and Age-Related Diseases	273	(D.-D. Zhou et al., 2021)	Oxidative Medicine and Cellular Longevity
8	Berry antioxidants: small fruits providing large benefits	236	(Manganaris et al., 2014)	Journal of the Science of Food and Agriculture
9	Fruit cuticular waxes as a source of biologically active triterpenoids	211	(Szakiel et al., 2012)	Phytochemistry Reviews

10	Anthocyanins, Phenolics, and Antioxidant Capacity of Processed Lowbush Blueberry Products	194	(Kalt et al., 2000)	Food Science
----	---	-----	---------------------	--------------

Nota. La tabla presenta los 10 artículos con mayor número de citas.

Finalmente, investigaciones de carácter más general como “*Berry antioxidants: small fruits providing large benefits*” (236 citas) y “*Fruit cuticular waxes as a source of biologically active triterpenoids*” (211 citas) ampliaron la perspectiva hacia otros componentes fitoquímicos y tejidos vegetales. El primero destaca el valor nutracéutico de las bayas como una de las fuentes más ricas en antioxidantes naturales, mientras que el segundo resalta el potencial de las ceras cuticulares como fuente de triterpenoides bioactivos. En conjunto, estos diez trabajos configuran la columna vertebral científica de la investigación sobre arándanos, articulando las dimensiones química, nutricional, tecnológica y biomédica que sustentan su relevancia actual en la ciencia de los alimentos y la salud humana.

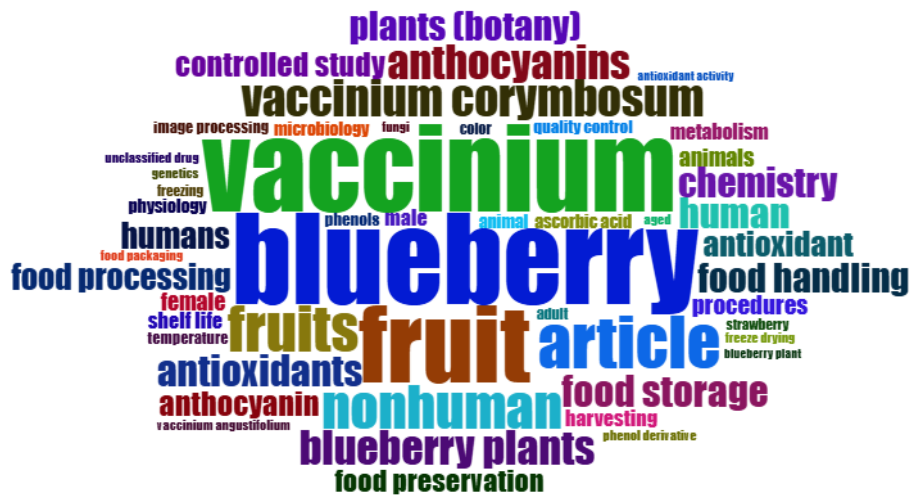
Palabras clave más usadas. El análisis de coocurrencia y el wordcloud de palabras clave (Figura 11) revela las tendencias temáticas y conceptuales predominantes en la literatura sobre arándanos (*Vaccinium spp.*). Los términos “blueberry” (133 ocurrencias) y “vaccinium” (127) son los de mayor frecuencia, evidenciando la consolidación de esta especie como objeto central de estudio. La alta presencia de “fruit” (113) y “fruits” (68) refleja el interés en su caracterización como alimento funcional, mientras que la aparición reiterada de términos como “anthocyanins” (50), “antioxidants” (46) y “phenols” (19) confirma el foco científico en los compuestos bioactivos responsables de su valor nutracéutico (Fenniri et al., 2025; Rashwan et al., 2024; Y. Wu et al., 2023). Esta red semántica sugiere un campo de investigación maduro, orientado tanto a la fisiología vegetal como a la ciencia de los alimentos, integrando perspectivas desde la química, la nutrición y la biotecnología.

Asimismo, la fuerte representación de palabras asociadas al manejo poscosecha y la calidad del fruto, como “food storage” (46), “food handling” (43), “food preservation” (33) y “shelf life”

(24), evidencia una línea de investigación aplicada a la conservación y estabilidad de los metabolitos fenólicos durante el procesamiento (Fenniri et al., 2025; Y. Wu et al., 2021). El uso de tecnologías emergentes, como la congelación (“freezing”, 16) o el secado por congelación (“freeze drying”, 15), resalta la importancia de mantener la capacidad antioxidante de los productos derivados (Cao et al., 2018; Hien et al., 2016; Q.-G. Zhang et al., 2014). Además, términos como “temperature” (18), “color” (17) y “quality control” (19) apuntan al control físico-químico de la calidad durante la cadena productiva y de almacenamiento, unos aspectos clave para la estandarización industrial y la exportación de arándanos (Buckow et al., 2010; Cao et al., 2020; Giuggioli et al., 2009).

Figura 11.

Palabras clave más usadas por los autores.



Nota. En la figura se evidencian las palabras clave más utilizadas por los autores

Finalmente, la presencia de términos vinculados con la biología y la salud como “human” (45), “controlled study” (36), “metabolism” (23), “animals” (26) y “microbiology” (20), sugieren una convergencia entre las ciencias agrícolas, de la salud y biomédicas (Oteiza et al., 2022). Este

vínculo refleja el creciente interés por los efectos del consumo de arándanos en humanos, especialmente en la prevención de enfermedades crónicas, óseas y musculares, en el metabolismo antioxidante el envejecimiento celular e incluso en el estado de ánimo (Thalacker-Mercer & Blum, 2021; Y. Wang, Haskell-Ramsay, et al., 2023). En conjunto, el análisis muestra que la investigación sobre *Vaccinium spp.* ha evolucionado desde el estudio agronómico del cultivo hacia una comprensión holística que abarca su composición fitoquímica, sus procesos de transformación y su impacto potencial en la salud pública.

Red de coocurrencia de palabras clave. La gráfica de coocurrencia de palabras clave (Figura 12) representa la estructura conceptual del conocimiento científico sobre *Vaccinium spp.* y sus productos derivados. Cada nodo simboliza una palabra clave y su tamaño refleja el número de ocurrencias, mientras que las líneas conectivas expresan la fuerza de enlace o frecuencia con que dos términos coaparecen en un mismo documento, evidenciando relaciones temáticas (Villagran, Espitia, et al., 2024). El análisis, que agrupa las palabras en cinco clústeres principales, permite identificar las áreas dominantes de investigación: fisiología y salud humana, fitopatología y taxonomía, tecnología poscosecha, procesamiento y química alimentaria, y finalmente, propiedades antioxidantes específicas.

consolidada sobre los beneficios nutracéuticos y funcionales del arándano, especialmente en la prevención de enfermedades crónicas y neurodegenerativas.

Clúster amarillo – Fitopatología y ecología del cultivo: El clúster agrupa trabajos relacionados con términos como “*vaccinium corymbosum*”, “*vaccinium virgatum*”, “*fungi*”, “*plant disease*”, y “*monilinia vaccinii-corymbosi*”, que corresponden a estudios de tipo fitosanitario y ecológico (Lehman & Oudemans, 2000; Reeh & Cutler, 2013). Esta agrupación aborda la diversidad de especies del género *Vaccinium* y las patologías que afectan su productividad, con énfasis en hongos y enfermedades propias del cultivo. La coocurrencia con *greenhouse* y *food safety* sugiere una transición temática hacia la inocuidad alimentaria, la agricultura protegida y la sostenibilidad del sistema productivo (El Horri et al., 2025; Pérez et al., 2022; Shen et al., 2020; Smaghe, 2020; J. Zhu et al., 2017). Este clúster consolida la base agronómica y sanitaria del campo, identificando los desafíos que condicionan la rentabilidad y calidad del fruto desde su origen.

Clúster azul – Tecnología para la producción, fisiología vegetal y manejo agronómico: El clúster está vinculado con la producción agrícola y las estrategias de manejo, reuniendo términos como “*fruits*”, “*plants (botany)*”, “*cultivation*”, “*crops*”, “*image processing*”, y “*deep learning*”. Las relaciones dentro de este grupo muestran el avance hacia la digitalización y la agricultura de precisión, aplicando inteligencia artificial para la caracterización de textura, color y madurez de los frutos, incluso para la detección de enfermedades (Majid et al., 2022; Park et al., 2021; Sulca et al., 2019). Palabras como *fruit quality* y *quality control* reflejan el interés por la evaluación objetiva de parámetros agronómicos y organolépticos (Chang et al., 2012; Gan et al., 2022; D. Wang et al., 2022), mientras *freezing*, *food storage* y *shelf life* vinculan esta línea con la conservación poscosecha (Ozkan et al., 2025; Perez et al., 2025). Este clúster representa la

dimensión tecnoproductiva, que busca optimizar la calidad del fruto y la eficiencia del cultivo mediante innovación tecnológica.

Clúster verde – Procesamiento, química de alimentos y compuestos bioactivos: Este clúster agrupa conceptos como “anthocyanin”, “antioxidant”, “phenols”, “polyphenols”, “plant extracts”, y “food processing”, que revelan el núcleo químico y tecnológico del campo del conocimiento. Estas palabras reflejan investigaciones sobre la extracción, estabilidad y funcionalidad de compuestos fenólicos, así como su relación con factores de procesamiento térmico, almacenamiento y manipulación (Chernenko, 2025; Kaushalya & Rupasinghe, 2025; Xin et al., 2025). La presencia de *food preservation*, *flavonoids* y *processing* indica la aplicación de la química de alimentos y la biotecnología para mantener la capacidad antioxidante del arándano en sus derivados industriales (Arabia et al., 2025; Karimova et al., 2025; Yang et al., 2025). Este clúster constituye la base fisicoquímica y tecnológica de los estudios sobre calidad y valor agregado.

Clúster púrpura – Propiedades antioxidantes y caracterización analítica: Este clúster es el menos denso, pero altamente especializado, contiene términos como “antioxidant activity”, “blueberry juice”, “ascorbic acid”, “phenolics”, y “color”. Este grupo está asociado con la evaluación instrumental y funcional de la actividad antioxidante de productos derivados del arándano. Los estudios en este dominio aplican métodos analíticos avanzados Oxygen Radical Absorbance Capacity, Ferric Reducing Antioxidant Power, 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (ORAC, FRAP, DPPH) y relacionan los resultados con la estabilidad de pigmentos y la variación del color (CUEVAS, 2016; R. O. Santos et al., 2016; H.-N. Song et al., 2018). En este sentido, el clúster refleja la consolidación de un eje metodológico centrado en la cuantificación,

estandarización y validación de propiedades bioactivas, fundamental para la transferencia a la industria alimentaria y farmacéutica.

Finalmente, la red de coocurrencia evidencia un sistema temático interconectado donde confluyen la biología, la agronomía, la química y la salud humana, posicionando al arándano como un modelo integral de investigación en alimentos funcionales. Los cinco clústeres muestran una evolución desde los fundamentos taxonómicos y fitosanitarios hasta los mecanismos moleculares y las aplicaciones industriales. Esta estructura multidisciplinaria confirma que el estudio de *Vaccinium spp.* ha trascendido el ámbito agrícola para convertirse en un campo de frontera entre la ciencia de los alimentos, la biomedicina y la sostenibilidad agroindustrial.

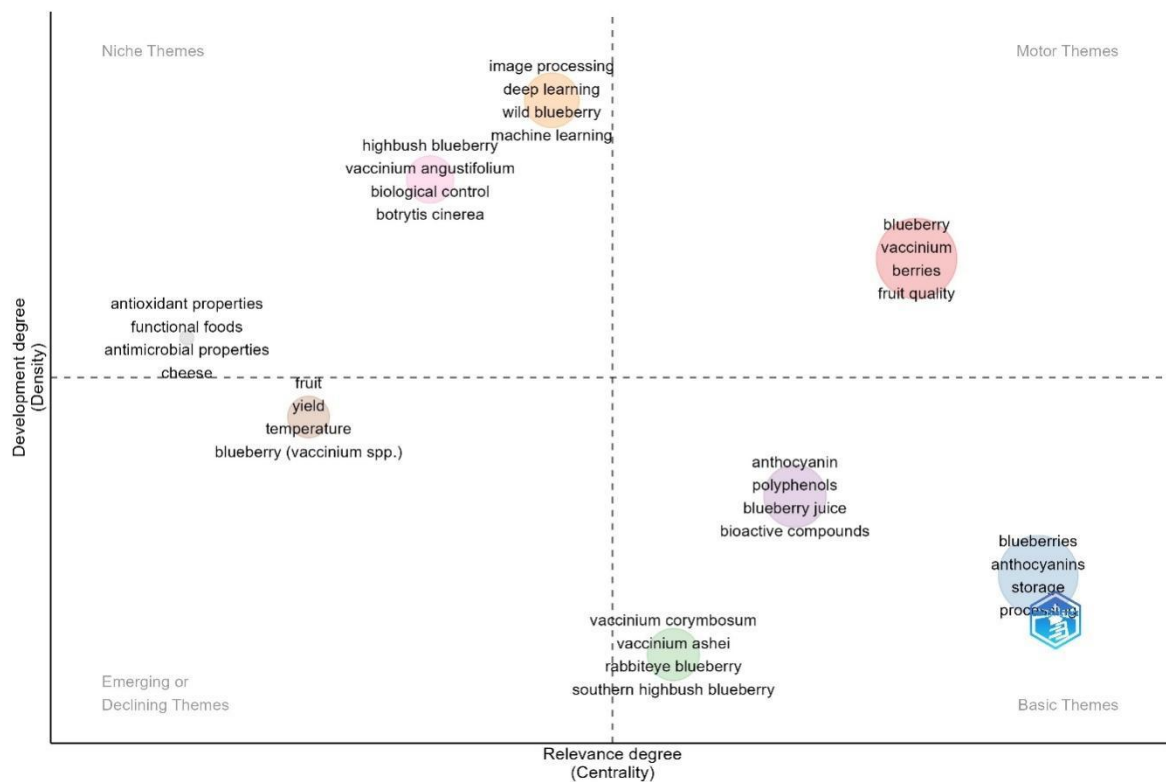
Análisis del mapa temático. El análisis de mapas temáticos o estratégicos permite examinar la evolución y dinámica de los clústeres de investigación a partir de redes construidas mediante la coocurrencia de palabras clave (Cobo et al., 2011). Este enfoque actúa como un indicador de la concentración de estudios en torno a temas o categorías específicas, organizadas según su centralidad y densidad (Madsen et al., 2023). En consecuencia, el mapa temático resume la estructura y madurez de la literatura en cuatro tipologías bien definidas, como se muestra en la Figura 13.

Los cuadrantes dividen los temas en cuatro categorías: temas motores, temas básicos, temas emergentes o en declive, y temas especializados o de nicho. En conjunto, el gráfico sintetiza la estructura cognitiva del campo, permitiendo visualizar vacíos de conocimiento y orientar futuras investigaciones (Villagran et al., 2025). En el cuadrante superior derecho se ubican los temas motores, representados por “blueberry”, “vaccinium”, “berries” y “fruit quality”. Estos conceptos son altamente centrales y desarrollados, lo que indica que constituyen el núcleo consolidado del

conocimiento científico sobre el cultivo y la calidad del fruto (Fan et al., 2018; Z. Jin et al., 2024). La literatura se enfoca aquí en la fisiología del fruto, las características fisicoquímicas y los parámetros de calidad comercial. No obstante, la fuerte concentración en estos tópicos sugiere una saturación temática y la necesidad de profundizar en aspectos de sostenibilidad, manejo postcosecha inteligente y respuesta a estreses abióticos, que aún aparecen poco representados en esta zona.

Figura 13.

Mapa temático del área del conocimiento analizada.



Nota. En la figura se presenta el mapa temático según el grado de desarrollo y de relevancia.

En contraste, el cuadrante inferior derecho agrupa los temas básicos “anthocyanins”, “polyphenols”, “bioactive compounds” y “blueberry juice”, esenciales para la comprensión de la composición química y el valor funcional del arándano (Buckow et al., 2010; N. Zhu, Zhu, et al., 2019). Estos temas presentan alta centralidad, pero menor desarrollo, lo que los convierte en pilares

conceptuales aún en expansión. Las investigaciones en este grupo se orientan hacia la caracterización de compuestos antioxidantes y sus implicaciones en la salud humana, aunque persiste un vacío en su validación biológica y en la integración de datos metabolómicos con estudios de bioactividad.

El cuadrante superior izquierdo agrupa los temas de nicho, entre los que destacan “image processing”, “deep learning”, “biological control” y “machine learning”. Estos tópicos emergen como áreas altamente especializadas, con baja conexión con el resto de la red, pero alto potencial innovador. Su desarrollo sugiere la incorporación de herramientas de inteligencia artificial y visión por computador en la evaluación del estado del cultivo y detección de enfermedades, marcando una tendencia hacia la digitalización y la agricultura de precisión (Mohammed et al., 2024; W. Zhang et al., 2022). Sin embargo, su aislamiento temático evidencia la necesidad de integrar estos avances con estudios agronómicos y fisiológicos tradicionales, de modo que contribuyan de forma efectiva a la gestión integral del cultivo del arándano.

Finalmente, los cuadrantes inferiores izquierdo y central contienen temas emergentes o en declive, como “antioxidant properties”, “functional foods”, “temperature” y “yield”, que, si bien fueron relevantes en etapas iniciales, han perdido protagonismo o se encuentran en proceso de redefinición. Esto refleja una transición desde estudios descriptivos hacia aproximaciones más tecnológicas e integradoras. En conjunto, el mapa temático muestra un campo en consolidación, donde los temas motores y básicos están bien estructurados, pero la interconexión entre los enfoques biotecnológicos, fisiológicos y digitales aún representa un vacío clave para futuras investigaciones interdisciplinarias.

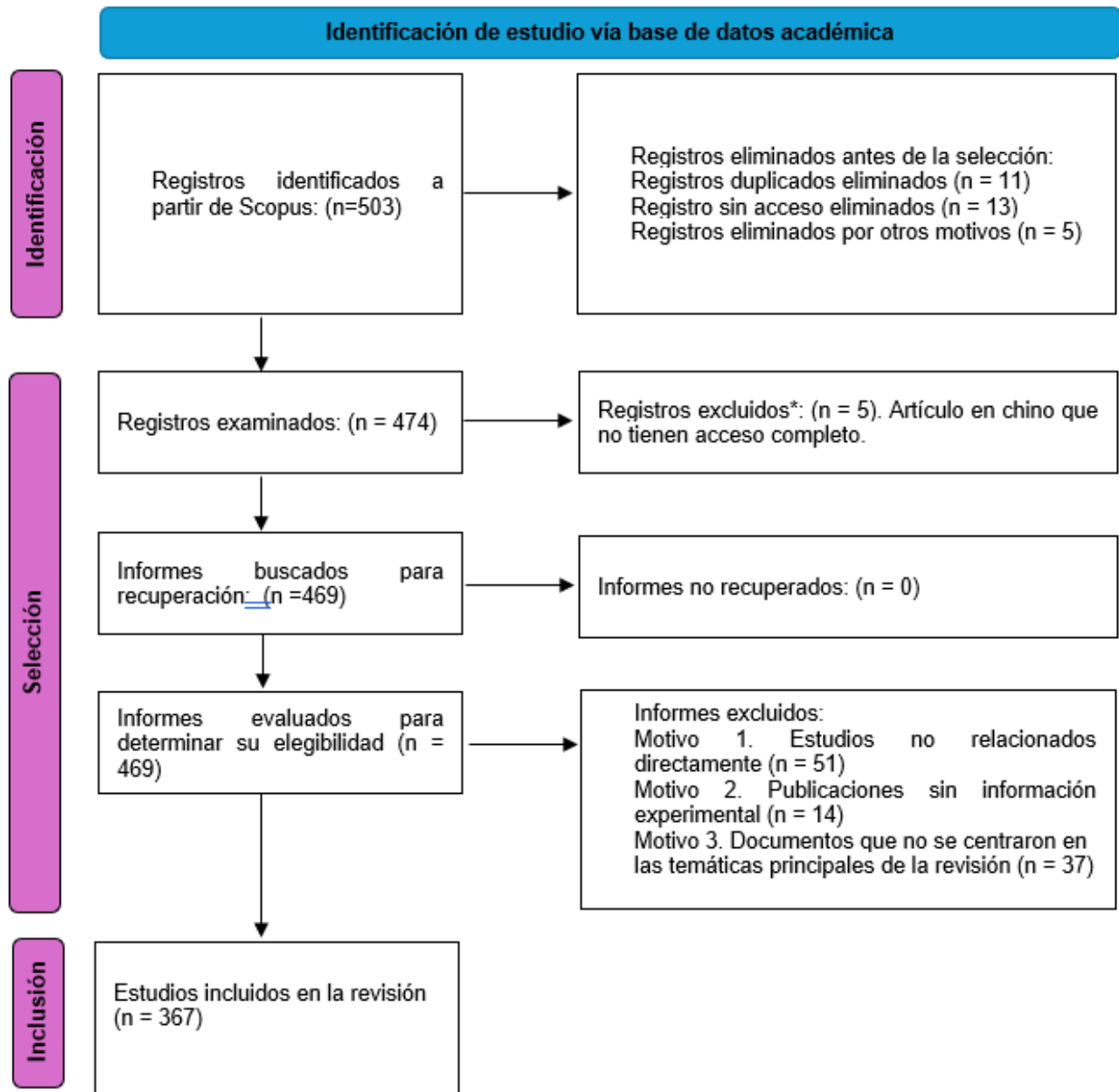
2.2.2 *Objetivo específico 2*

Identificación de los principales enfoques de manejo del cultivo a partir del proceso de revisión sistemática

La revisión sistemática se realizó siguiendo las directrices PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), con el fin de garantizar un proceso transparente, estructurado y reproducible en la identificación, selección y análisis de la literatura científica relacionada con el manejo integral, la sostenibilidad y la innovación tecnológica en el cultivo de arándano (*Vaccinium spp.*) (Villagran, Espitia, et al., 2024; L. Yao et al., 2022). El proceso metodológico comprendió cuatro etapas principales: (i) identificación de documentos en bases de datos científicas, (ii) depuración y selección según criterios de inclusión y exclusión, (iii) extracción y sistematización de la información, y (iv) análisis cualitativo y cuantitativo de las tendencias y resultados reportados (Figura 14). Para la identificación de estudios relevantes, se realizó una búsqueda exhaustiva en las bases de datos Scopus, seleccionada por su amplia cobertura de literatura científica revisada por pares relacionada con la fisiología, manejo agronómico, sostenibilidad e innovación tecnológica en el cultivo de arándano (*Vaccinium spp.*) (Villagran et al., 2023). La estrategia de búsqueda se elaboró con base en los principios de la lógica booleana, combinando descriptores controlados y términos libres con el fin de maximizar la sensibilidad y especificidad de los resultados (Rocha et al., 2021, 2022b). Se consideraron sinónimos y términos relacionados con las principales dimensiones de análisis del estudio: propagación, nutrición, riego, manejo fitosanitario, fisiología, cosecha, poscosecha, sostenibilidad y tecnología aplicada a la producción.

Figura 14.

Flujo de trabajo PRISMA para revisión sistemática.



Nota. En el grafico se evidencia el proceso de identificación, selección e inclusion de cada estudio.

La construcción de la ecuación se validó con el apoyo de especialistas en agricultura protegida y bibliometría, asegurando su pertinencia científica. En Scopus, la búsqueda avanzada empleó la siguiente consulta:

TITLE-ABS-KEY (blueberry OR "Vaccinium corymbosum" OR "Vaccinium spp.") AND TITLE-ABS-KEY ("protected cultivation" OR "protected agriculture" OR "greenhouse" OR "tunnel" OR "shade net" OR "net house" OR "agribusiness" OR "fair trade" OR "processing") AND TITLE-ABS-KEY (irrigation OR fertigation OR fertilization OR "nutrient management" OR pruning OR training OR "crop management" OR "harvest" OR "postharvest" OR "storage" OR "shelf life" OR "diseases" OR "pests" OR "crop protection" OR "biological control" OR "Transformation" OR "Commercialization" OR "Marketing" OR "export" OR "markets").

La búsqueda abarcó el periodo 1987–2025, sin restricciones geográficas, e incluyó documentos en inglés y español y otros idiomas. Los registros obtenidos se exportaron en formato CSV y RIS para su depuración, análisis bibliométrico y revisión sistemática.

Proceso de selección y evaluación de los estudios. El proceso de selección se realizó siguiendo las directrices PRISMA 2020, asegurando transparencia y reproducibilidad. Los registros obtenidos en Scopus se importaron a Microsoft Excel y Mendeley para la depuración y gestión de referencias. En la fase inicial, se eliminaron registros duplicados ($n = 11$), registros sin acceso al texto completo ($n = 13$) y registros descartados por otros motivos ($n = 5$). Posteriormente, tres revisores realizaron de forma independiente una evaluación en dos etapas: (i) revisión de título y resumen, y (ii) revisión de texto completo, aplicando los criterios de inclusión definidos para estudios sobre manejo integral, sostenibilidad, fisiología e innovación tecnológica en *Vaccinium spp.* Cada registro fue codificado en Excel (Sí = 1; No = 0; Parcial = 2) y las discrepancias se resolvieron por consenso. Todo el proceso, incluidos los motivos de exclusión, fue documentado para garantizar trazabilidad y rigor metodológico.

Criterios de elegibilidad. Los estudios se consideraron elegibles si cumplían los criterios predefinidos mediante operaciones booleanas basadas en términos de búsqueda relacionados con la propagación, fisiología, nutrición, riego, manejo integrado de plagas y enfermedades, cosecha, poscosecha, sostenibilidad e innovación tecnológica en el cultivo de *Vaccinium spp.* Los criterios de elegibilidad garantizaron la recopilación de evidencia exhaustiva y de alta calidad sobre el manejo integral, sostenible y tecnológicamente innovador del arándano. Se incluyeron investigaciones de todas las regiones geográficas y sistemas productivos, siempre que cumplieran los criterios metodológicos y temáticos establecidos. Se consideraron artículos científicos revisados por pares, actas de congresos y capítulos de libro, revisiones, publicados en inglés, chino, portugués, español entre 1987 y 2025, con acceso al texto completo y relevancia comprobada con los objetivos de la revisión. En esta fase se eliminaron 5 documentos en idioma chino que no tenían acceso completo.

Criterios de inclusión y exclusión. Se definieron criterios de inclusión y exclusión para garantizar la pertinencia científica, metodológica y temática de los documentos analizados. En total, se evaluaron 469 informes para determinar su elegibilidad, considerando como potencialmente relevantes aquellos centrados en el manejo integral del cultivo de arándano (*Vaccinium spp.*), que abordaran aspectos de propagación, fisiología, nutrición mineral, riego, manejo fitosanitario, sostenibilidad, cosecha, poscosecha o innovación tecnológica. Fueron excluidos los trabajos que no se ajustaron al objetivo de la revisión, aquellos sin información experimental o metodológica verificable, o los que carecían de acceso completo al texto. Los principales motivos de exclusión a partir del total de registros evaluados fueron: Motivo 1: Estudios no relacionados directamente con el manejo integral del cultivo de *Vaccinium spp.* (n =

51); Motivo 2: Publicaciones sin información experimental suficiente (n = 14); Motivo 3: Documentos que no abordaron las temáticas principales de la revisión (n = 37). El proceso de selección, conforme a las directrices PRISMA 2020, garantizó la transparencia y reproducibilidad del análisis, y se resume en el diagrama de flujo (Figura 14) que detalla las etapas de identificación, cribado y exclusión de estudios.

Las Áreas temáticas En el proceso de revisión de la Agenda de Investigación a nivel nacional, los requerimientos fueron clasificados, según sus características, en 14 áreas temáticas basadas en las categorías del Sistema Internacional de Información sobre Ciencias y Tecnologías Agrícolas (AGRIS ‘International System for Agricultural Science and Technology’) y las áreas del conocimiento utilizadas por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA; Departamento Administrativo de Ciencia, 2016).

Con el fin de analizar los estudios seleccionados, estos se agruparon en 11 áreas temáticas: Material vegetal y propagación, Prácticas agronómicas y estrategias de manejo cultural, Riego, fertirriego y nutrición mineral, Manejo sanitario y fitosanitario, Fisiología y regulación ecofisiológica en ambientes controlados, Cosecha, Poscosecha, almacenamiento y comercialización y modelamiento de datos, Sostenibilidad ambiental, Salud humana y Producción bajo invernadero.

Material vegetal y propagación. El arándano (*Vaccinium corymbosum* L.) es una especie perenne de gran valor económico cuyo mejoramiento genético busca optimizar rendimiento, calidad y adaptación a las condiciones agroclimáticas y a las exigencias del mercado (Tian et al., 2023). En Estados Unidos, estudios sobre metaxenia (efecto del polen sobre las características del

fruto), realizados con diez cultivares de *Highbush blueberry* demostraron que este fenómeno no altera significativamente la maduración ni el peso del fruto, salvo en genotipos autofértiles (Ehlenfeldt, 2003). Evaluaciones varietales en Países Bajos y EE. UU. identificaron materiales de alto potencial: 'Reka', 'Chandler' y 'Brigitta Blue', los cuales se destacaron por su productividad y vida poscosecha prolongada; 'Elliott' por su cosecha tardía; y las selecciones MS 706, MS 271, MS 454 y MS 812 por su tamaño, calidad y precocidad, además de ser adecuadas para consumo en fresco e industrial (Bal et al., 2004; Stringer et al., 2008). En China, el cultivar híbrido 'Chasing Dream' evidenció un elevado rendimiento y resistencia en almacenamiento (Xu et al., 2021), mientras que el programa polaco basado en *V. corymbosum* se orientó a mejorar la adaptación edafoclimática y la vida útil del fruto (Pluta & Zurawicz, 2012). En Marruecos, los cultivares 'Gupton', 'Alix Blue' y 'Star' exhibieron buena adaptación al clima local y diferencias significativas en rendimiento y calidad, demostrando la amplia plasticidad del género *Vaccinium* (Hamim et al., 2019).

La micropropagación, técnica *in vitro* que permite multiplicar plantas genéticamente uniformes y libres de patógenos, se consolida como herramienta esencial para la producción de material de alta calidad. En China, el uso del medio WPM (Woody Plant Medium) suplementado con 0,1 y 2,0 mg L⁻¹ de zeatina (ZT), iluminación parcial de 2 000 a 10 000 lux y temperatura entre 25 y 30 °C permitió alcanzar hasta 90 % de enraizamiento *ex vitro* en musgo tratado con AIB (ácido indolbutírico) o ANA (ácido naftalenacético) a concentraciones de 1 000 a 2 000 mg L⁻¹, además de desarrollar un método de almacenamiento en frío para conservar explantes viables (Z. Zhang et al., 2004). Otro ensayo, también desarrollado en China, con los cultivares 'Bluejay', 'Pink Lemonade', 'Sunshine Blue' y 'Top Hat', mostró que la capacidad de inducción de callos y regeneración de brotes depende de la constitución genética (hibridación poliploide), logrando

supervivencias superiores al 90 % en turba (Qiu et al., 2018). En Austria, la regeneración in vitro y la termoterapia resultaron eficaces para reducir infecciones virales y fitoplásmicas (Fernández et al., 2023). En Chile, cultivos tratados con colchicina ($C_{22}H_{25}NO_6$) permitieron generar seis clones vigorosos y adaptables, recomendándose su evaluación genotipo–ambiente en diferentes zonas agroclimáticas (Hernández et al., 2024).

Los avances biotecnológicos amplían las perspectivas de mejoramiento. El silenciamiento génico inducido por virus (VIGS, Virus-Induced Gene Silencing) ha demostrado ser un método eficiente para analizar funciones génicas y acelerar la obtención de nuevas variedades (Tian et al., 2023). En la Universidad de Florida, los cruces entre *V. corymbosum*, *V. darrowii* y líneas *Southern Highbush (SHB)* tetraploides incorporaron caracteres morfológicos favorables a la cosecha mecánica, longitud de pedicelos, racimos y hábito de crecimiento, contribuyendo a reducir costos y dependencia de mano de obra (Olmstead et al., 2013). Paralelamente, el USDA (United States Department of Agriculture) impulsa programas de certificación sanitaria para prevenir la diseminación de patógenos como *Phytophthora ramorum* y el virus del shock del arándano (BIShV, Blueberry Shock Virus). Es así como su colección clonal de *Vaccinium*, integrada por 600 accesiones, fue trasladada a macetas bajo condiciones controladas de sustrato, poda y propagación (Postman et al., 2008).

Avances en las prácticas agronómicas y estrategias de manejo cultural para la optimización del cultivo de arándano (Vaccinium corymbosum L.). El manejo cultural del arándano (*Vaccinium corymbosum* L.) abarca un conjunto de decisiones agronómicas que determinan la productividad, la calidad del fruto y la sostenibilidad del sistema de cultivo (Nestby & Retamales, 2020). Aspectos como la preparación del sustrato, el sistema de plantación, las

coberturas, el manejo de sombra y la regulación del ciclo fenológico son factores clave para el éxito técnico y económico de las plantaciones comerciales. En Eslovenia, se evaluaron tres variedades cultivadas en camellones y macetas bajo túneles altos o mallas antigranizo, observándose que los túneles adelantaron la maduración entre 6 y 18 días, aunque redujeron la cantidad de fruta y los compuestos bioactivos. En contraste, las mallas antigranizo mejoraron la calidad del fruto y la concentración de antioxidantes, mientras que el cultivo en macetas no afectó la firmeza ni el crecimiento, validándose como alternativa viable para sistemas intensivos. Este estudio sugiere que las mallas antigranizo constituyen una práctica sostenible de manejo frente al cambio climático (Smrke et al., 2021).

La producción de arándano se desarrolla tanto a campo abierto como bajo invernadero de ambiente controlado, permitiendo la oferta continua de fruta. Para mantener una alta calidad comercial, las buenas prácticas de manejo deben incluir la adecuada preparación del suelo, el suministro equilibrado de nutrientes y la aplicación de enmiendas orgánicas o minerales que prevengan deficiencias fisiológicas (Nestby & Retamales, 2020). En Oregón (EE. UU.), se compararon diferentes sustratos en cultivo en macetas, mezclas de musgo, fibra de coco y corteza de abeto, encontrándose que los medios con turba (peat) o fibra de coco (coir) favorecieron el crecimiento y la retención de humedad y nutrientes, mientras que la alta proporción de corteza incrementó la desecación y redujo la absorción de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), afectando el desarrollo vegetativo. Así, turba y coco se consolidan como sustratos óptimos para la producción intensiva y bajo invernadero (Kingston et al., 2017).

En China, la expansión del cultivo en suelos ácidos ha enfrentado limitaciones asociadas con la selección de sitios inadecuados, la escasez de material vegetal de calidad y la limitada diversidad varietal. Se recomienda la creación de plantaciones demostrativas como espacios de

capacitación técnica y transferencia de conocimiento, orientadas a fortalecer sistemas productivos sostenibles (He et al., 2009). De igual modo, la introducción de acolchados biodegradables, como el biopolímero Mater-Bi (derivado de aceites y almidones vegetales), ha mostrado efectos positivos en la conservación de humedad, fertilidad y control de malezas, además de sustituir plásticos convencionales y reducir residuos contaminantes (Girgenti et al., 2010). Este material, al degradarse de forma natural, representa una estrategia cultural coherente con los principios de la economía circular aplicada a la horticultura.

El uso de mallas de sombra de distintos colores y niveles de opacidad también incide en la planificación productiva. Las mallas blanca y roja con cobertura moderada (40–60 %) retrasaron la cosecha algunos días sin afectar el rendimiento ni la calidad, permitiendo una mejor gestión comercial y evitando daños por radiación y estrés térmico; por el contrario, sombreados excesivos redujeron el tamaño y dulzor del fruto (Lobos et al., 2013). Otro ensayo en condiciones de invernadero evaluó la inducción de floración mediante cianamida hidrogenada (CH_2N_2) y aceite mineral (OM) en tres variedades. Los resultados demostraron una floración más temprana y uniforme en ‘Georgiagem’ y ‘Climax’, aunque dosis elevadas causaron necrosis de yemas y menor producción, lo que subraya la necesidad de un manejo preciso de los reguladores (Coletti et al., 2011). Esta práctica resulta útil para sincronizar los ciclos productivos cuando la acumulación de frío invernal es insuficiente.

Estrategias integradas de riego, fertirriego y nutrición mineral en el cultivo de arándano (*Vaccinium corymbosum* L.). El manejo hídrico y nutricional del arándano (*Vaccinium corymbosum* L.) se ha orientado hacia esquemas de producción más eficientes y sostenibles, donde convergen la nutrición mineral, el riego de precisión y la incorporación de tecnologías inteligentes.

Entre las estrategias evaluadas, el uso de bioestimulantes minerales como el silicio (Si) ha mostrado efectos fisiológicos y bioquímicos relevantes. En estudios comparativos, el silicato de potasio (K_2SiO_3) presentó mayor absorción que la wollastonita ($CaSiO_3$), alcanzando concentraciones foliares de hasta 370 ppm en el cultivar ‘Bluegold’, mientras que ‘Earliblue’ y ‘Liberty’ alcanzaron apenas un 34–35 % del promedio general. Este incremento se asoció con mayores niveles de compuestos fenólicos y actividad enzimática microbiana, evidenciando el potencial del silicio para fortalecer la calidad funcional y antioxidante del fruto (Mohammed et al., 2024).

El tipo y la fuente de nitrógeno (N) influyen de manera determinante en la fisiología y productividad del cultivo. El suministro exclusivo de amonio (NH_4^+) promovió la acumulación de N, fósforo (P), magnesio (Mg), azufre (S), cobre (Cu), manganeso (Mn) y boro (B) en hojas, además de incrementar la clorofila a y los azúcares totales respecto al nitrato (NO_3^-). En un sistema de raíces divididas, la eficiencia en el uso del N se duplicó: con la mitad de la dosis de NH_4^+ se obtuvo un rendimiento equivalente al suministro completo, confirmando la influencia combinada de la fuente nitrogenada y el modo de aplicación sobre la fisiología del cultivo (Leal-Ayala et al., 2021).

El manejo del suelo y del sustrato constituye otro componente esencial en la productividad del sistema. En el Delta del Mekong, los suelos antiguos degradados (AA) alcanzaron solo el 81 % del rendimiento registrado en suelos fértiles recientes (RA). La omisión del N redujo el rendimiento en un 47 % (RA) y 39 % (AA), además de disminuir la biomasa de tallos (70 % y 42 %) y hojas (59 % y 46 %), evidenciando el papel crítico de la fertilización nitrogenada (Ngoc & Thao, 2024). En sistemas bajo contenedor, la fibra de coco (coir) mostró limitaciones por su tendencia a la salinización inicial: la fertilización con nitrato de calcio ($1,75 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) o fosfato

monoamónico ($2,38 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) no redujo los niveles de sodio (Na), y tampoco mejoró la biomasa del cultivar ‘Snowchaser’ (Heller & Nunez, 2022). En contraste, el manejo orgánico, sin fertilización nitrogenada mineral y con 20 % de materia orgánica en el sustrato (S2), promovió mayor volumen de dosel, área foliar y eficiencia fotosintética en el cultivar ‘Climax’, validando el potencial del manejo orgánico bajo condiciones protegidas como alternativa sostenible (Viencz et al., 2021).

En condiciones hidropónicas, el cultivar ‘Biloxi’ mostró su máximo rendimiento con una conductividad eléctrica (CE) de $1,5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ y una relación $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ de 30/70, alcanzando sólidos solubles de 14,4–15,4 °Brix. Los frutos pequeños concentraron más antocianinas ($141 \text{ mg}\cdot 100 \text{ g}^{-1}$) que los grandes ($85 \text{ mg}\cdot 100 \text{ g}^{-1}$), lo que refuerza la relación entre nutrición mineral y calidad funcional del fruto (Bolaños-Alcántara et al., 2018).

El manejo del agua se ha abordado mediante estrategias de riego deficitario y optimización de pulsos. En suelos arenosos con corteza de pino, aumentar la frecuencia de riego de 2 a 10 pulsos diarios redujo la fracción de lixiviación del 46 % al 30 %. El cultivar ‘Jewel’ presentó pérdidas menores al 20 %, en contraste con ‘Emerald’ (>50 %), debido a un sistema radicular más denso (Bandaranayake et al., 2020). Aplicar un riego deficitario controlado (80 % de la evapotranspiración) bajo túneles plásticos mejoró la firmeza y los sólidos solubles sin reducir la calidad comercial, aunque con una ligera disminución en la acidez titulable (Ordóñez-Díaz et al., 2020). Además, la restricción hídrica aumentó la síntesis de compuestos fenólicos, en especial delfinidín-3-acetilhexósido, destacando el papel del estrés hídrico moderado como inductor de calidad funcional (Cardeñosa et al., 2016).

El desarrollo tecnológico ha permitido consolidar estrategias de fertirriego inteligente. En China, la aplicación de sistemas automáticos basados en Internet de las cosas (IoT, *Internet of Things*) logró reducir el consumo de agua en 35–45 %, el uso de fertilizantes en 25–35 %, aumentar

el rendimiento en 10–15 %, y disminuir la mano de obra en más del 60 %, reduciendo también la contaminación agrícola (Dongchao et al., 2022). En huertos de montaña, un sistema de apoyo a la decisión con sensores de humedad y algoritmos de balance hídrico calculó en tiempo real la transpiración y el volumen de riego, activando los emisores automáticamente sin intervención humana (刘丽 et al., 2023). Paralelamente, se han explorado los potenciales eléctricos de las plantas como indicadores fisiológicos: señales entre -50 y -250 mV, con respuestas en milisegundos, se correlacionaron con el cierre estomático y la reducción de conductancia, configurándose como un sistema temprano de detección de estrés hídrico en frutales como arándano, aguacate y olivo (Gurovich, 2009).

La nutrición foliar también desempeña un papel determinante en la calidad poscosecha. Aplicaciones de precosecha con $7,8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ de calcio (Ca^{2+}) incrementaron su concentración en hojas y frutos de arándano cultivado bajo túnel, estableciendo una correlación directa entre el contenido de Ca y la firmeza del fruto. Este efecto se asoció a un aumento en la pectina de bajo metoxilo (LMP, *Low Methoxyl Pectin*), componente clave en la textura del fruto, demostrando que la dosis aplicada y el ambiente de cultivo (túnel, malla o campo abierto) inciden directamente en la calidad comercial y la vida útil de las bayas (Stückrath et al., 2008).

Enfoques integrados para el manejo sanitario y fitosanitario del arándano (*Vaccinium corymbosum* L.). El manejo sanitario y fitosanitario del arándano (*Vaccinium corymbosum* L.) constituye un pilar fundamental para la sostenibilidad del cultivo, dado el incremento de enfermedades fúngicas, bacterianas y virales, así como la aparición de plagas emergentes que amenazan la productividad y la calidad del fruto. La literatura reciente evidencia un esfuerzo global

por identificar los principales patógenos, desarrollar estrategias de manejo integrado y fortalecer tanto el diagnóstico molecular como la resistencia genética de los cultivares.

En Chile, la aplicación de los postulados de Koch permitió identificar por primera vez a *Chondrostereum purpureum*, agente causal del síndrome de hoja plateada y necrosis del xilema en el cultivar ‘Brigitta Blue’. El patógeno se diseminó rápidamente entre 2005 y 2006, afectando 21 huertos y ocasionando la muerte de plantas completas, con elevado impacto económico (France et al., 2008). De forma paralela, en China se detectó *Botryosphaeria dothidea* como agente del tizón y muerte regresiva en tallos, patógeno previamente asociado a especies como sicomoro y olivo (L. Yu et al., 2012). En Georgia (EE. UU.), *Xylella fastidiosa* subsp. *fastidiosa* fue confirmada como causante de la quemadura bacteriana de la hoja (BLS, *Bacterial Leaf Scorch*), mientras que *Ectophoma multirostrata* se reportó como nuevo agente del cancro del tallo, estableciendo a *V. corymbosum* como hospedador a nivel mundial (Atashi Khalilabad et al., 2023; Di Genova et al., 2020).

Asimismo, *Phytophthora cinnamomi* fue detectada en 2014 como agente de pudrición de raíz y base del tallo en plantas jóvenes de arándano en China (Lan et al., 2016). La evaluación de genotipos resistentes identificó cultivares tolerantes (‘Aurora’, ‘Legacy’, ‘Liberty’, ‘Reka’, ‘Overtime’ y ‘Clockwork’) y susceptibles (‘Bluetta’, ‘Bluecrop’, ‘Bluegold’, ‘Blue Ribbon’, ‘Cargo’, ‘Draper’, ‘Duke’, ‘Elliott’, ‘Last Call’, ‘Top Shelf’ y ‘Ventura’), desaconsejando estos últimos en suelos arcillosos o mal drenados (Yeo et al., 2016). En paralelo, se desarrollaron protocolos para la evaluación de germoplasma y la eficacia de agentes químicos y biológicos en el control de la podredumbre radicular (Smith et al., 2016).

Dentro de las enfermedades foliares, la roya de la hoja causada por *Thekospora minima* fue documentada en Oregón (EE. UU.), afectando viveros e invernaderos y generando defoliación

temprana; esta patología es considerada de cuarentena en la Unión Europea, limitando el comercio internacional (Wiseman et al., 2016). En Europa se registró también *Pucciniastrum vaccinii*, observándose diferencias de susceptibilidad entre cultivares y resistencia natural en *V. cylindraceum* (Hummer & Williams, 2008). En Canadá, *Exobasidium vaccinii*, causante de la hoja roja, mostró incidencia limitada gracias a prácticas culturales como la poda y a la resistencia natural del arándano bajo (Nickerson & MacNeill, 1987).

El control de insectos plaga ha sido otro frente de investigación relevante. En Canadá, el díptero *Dasineura oxycoccana* mostró aislamiento reproductivo entre poblaciones de *V. corymbosum* y *V. macrocarpon* por diferencias en feromonas sexuales (Cook et al., 2011). En Polonia, el manejo de cochinillas blandas (*Parthenolecanium* spp.) mediante productos de acción mecánica dentro del Manejo Integrado de Plagas (MIP) demostró eficacia similar o superior a insecticidas neonicotinoides, consolidándose como estrategia sostenible (Tartanus et al., 2018). La bacteria *Xylella fastidiosa*, transmitida por el cicadélido de alas vidriosas (*Homalodisca vitripennis*, GWSS), presentó variaciones varietales en la intensidad de infección (Tuovinen, 2008); además, cepas de las subespecies *multiplex* y *pauca* fueron detectadas en España e Italia con potencial de cambio de hospedador (Shantharaj et al., 2024). Los avances en diagnóstico molecular han permitido identificar la distribución de estas subespecies (Waliullah et al., 2022) y secuenciar genomas completos (Oliver et al., 2023). En su control, las nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) tipo Zinkicide™ TMN110 (ZnK) redujeron la severidad de la BLS bajo condiciones controladas (Shantharaj et al., 2023).

Los hongos del género *Colletotrichum* constituyen una amenaza creciente. En Polonia se reportó por primera vez *C. fioriniae* como agente de antracnosis en 2016 (Pszczółkowska et al., 2016), y *C. acutatum* mostró baja correlación entre síntomas foliares y en fruto (Ehlenfeldt et al.,

2006). En China, la defoliación prematura causada por *Corynespora cassiicola* se vinculó con condiciones de alta humedad y temperatura en invernaderos (Onofre et al., 2016; X. Zheng et al., 2015). La moniliosis del fruto, causada por *Monilinia vaccinii-corymbosi*, continúa siendo el principal problema fitosanitario en Norteamérica. Se han identificado fuentes de resistencia en poblaciones silvestres diploides (Ehlenfeldt & Stretch, 2001), junto con mecanismos florales de resistencia en el canal ginecial (Lehman et al., 2007). El control químico mediante fenbuconazol, azoxistrobina y triforina mostró eficacia variable según la fenología (Tarnowski et al., 2008; Thomas-Sharma & Scherm, 2017), mientras que la polinización temprana se propuso como medida preventiva (Ngugi et al., 2002). Además, la germinación de pseudoesclerocios y desarrollo de apotecios dependen del cultivar hospedante y de su estado fenológico (Lehman & Oudemans, 1997, 2000).

En México, *Neofusicoccum parvum* fue identificado como causante de tizón del tallo bajo túneles e invernaderos (Boyzo-Marin et al., 2016), y en China se describió una nueva especie, *Lasiodiplodia vaccinii*, adaptada a condiciones cálidas (Zhao et al., 2019). En ensayos con *Botryosphaeria*, se observó que la fertilización aumentó la longitud de las lesiones, mientras que el uso de fungicidas las redujo significativamente (Smith & Miller-Butler, 2016). El análisis transcriptómico de *Pestalotiopsis microspora* reveló 727 factores de transcripción, de los cuales 200 se asociaron con mecanismos de defensa y 45 con regulación celular, destacando siete genes implicados en la biosíntesis de α -(1,3)-glucano, un componente clave en la respuesta inmune (Oliveira et al., 2019).

Entre los nematodos fitoparásitos, se determinó que el nematodo anular *Mesocriconema ornatum* incrementa la enfermedad de replantación del arándano (RBD, *Replant Disease of Blueberry*), con mayores tasas de reproducción bajo baja inoculación inicial (Jagdale et al., 2013).

Asimismo, *Paratrichodorus renifer* y *Pratylenchus penetrans* reducen el rendimiento en cultivares susceptibles (Forge et al., 2012). En control biológico, *Steinernema scarabaei* mostró efectividad comparable a los neonicotinoides contra *Anomala orientalis* (Polavarapu et al., 2007), mientras que *Clonostachys rosea* resultó eficaz contra *Botrytis cinerea* en *V. angustifolium*, incluso dispersada por abejas (Reeh et al., 2014; Reeh & Cutler, 2013). En Chile, *Steinernema australe* fue propuesto como biocontrolador del gorgojo *Aegorhinus superciliosus* (Navarro et al., 2022), y los hongos endófitos *Codinaeella EC4* y *Schizophyllum commune* mostraron potencial frente a *Diaporthe vaccinii* y *Fusarium commune*, respectivamente (J. Li et al., 2024; Thimmappa et al., 2024). La aplicación de fuentes orgánicas de N redujo la marchitez por *Fusarium solani* en el cultivar ‘Legacy’ (Montalba et al., 2010).

El control del ácaro rojo del sur (*Oligonychus ilicis*) identificó a los depredadores *Phytoseiulus persimilis* y *Neoseiulus californicus* como especies promisorias bajo condiciones de invernadero (Marucci et al., 2024). Los estudios sobre toxicidad relativa de insecticidas demostraron que los productos de amplio espectro afectan severamente a los agentes de control biológico como *Aphidius colemani*, *Orius insidiosus*, *Chrysoperla rufilabris* y *Hippodamia convergens*, mientras que los insumos aprobados para agricultura orgánica resultan compatibles (Roubos et al., 2014). En Canadá, se observó que el polen de acedera roja potencia la germinación de *Botrytis cinerea*, aunque la aplicación de pronamida no mejoró la productividad (Hughes et al., 2016). Finalmente, el uso de análisis espectral de fluorescencia permitió la detección no destructiva de *B. cinerea* en frutos durante cosecha y poscosecha, mediante variaciones de reflectancia infrarroja asociadas al crecimiento micelial (Cerna Larenas et al., 2015).

Fisiología del cultivo y regulación ecofisiológica bajo ambientes controlados. El estudio de las respuestas ecofisiológicas del arándano (*Vaccinium corymbosum* L.) en sistemas protegidos es clave para optimizar productividad, calidad y adaptación frente al cambio climático y a variaciones de radiación, temperatura y disponibilidad hídrica. La manipulación lumínica, térmica y fenológica, junto con bioestimulantes y tecnologías emergentes, se posiciona como un conjunto de herramientas para sincronizar los ciclos vegetativos y reproductivos y reforzar la resiliencia fisiológica del cultivo. En este marco, la conversión descendente de luz (*light conversion*) ha mostrado eficacia al modificar la calidad espectral bajo cubierta: en túneles controlados y durante una temporada, películas que enriquecen el rojo aumentaron significativamente la biomasa en ‘Duke’ y sugirieron un efecto positivo en el rendimiento, además de favorecer la acumulación de reservas para el ciclo siguiente; no obstante, su adopción exige validación multianual con replicación adecuada para confirmar beneficios fisiológicos y la relación costo–beneficio (El Horri et al., 2025).

En la dimensión hídrica, la integración de electrodiálisis y ósmosis directa (EDFO) se consolida como una estrategia avanzada para la recuperación de nutrientes y la reutilización de aguas residuales. En arándano *highbush* del sur, el riego con agua tratada mediante EDFO no alteró el crecimiento ni el equilibrio iónico del sustrato, mantuvo el pH dentro del rango óptimo (4,5–5,5) y una conductividad eléctrica (CE) levemente superior a $2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$, fácilmente controlable mediante enjuagues periódicos. Desde un punto de vista fisiológico, la estabilidad del pH y de la CE favoreció la absorción balanceada de macro y micronutrientes (especialmente N, K, Ca y Mg), evitando la competencia iónica y la deshidratación celular asociada al exceso de sales. Asimismo, la concentración controlada de iones pudo haber generado una mayor eficiencia del potencial hídrico foliar, manteniendo la apertura estomática y la tasa de transpiración (E) dentro de valores

óptimos. El uso de agua regenerada no modificó significativamente la conductancia estomática (gs) ni la asimilación de CO₂ (A_n), lo que sugiere un ajuste osmótico activo que preserva la integridad de las membranas y la capacidad fotosintética bajo condiciones de CE moderada. Además, el sistema EDFO eliminó más del 90 % de fármacos y pesticidas, reduciendo la presión sobre las fuentes de agua dulce y contribuyendo al cierre de los ciclos de nutrientes sin comprometer el desempeño fisiológico del cultivo (Tran et al., 2025)

La presentación gradual del polen en *V. corymbosum* puede explotarse para programar polinizaciones, con abejorros (*Bombus* spp.) más eficientes que abejas melíferas (*Apis mellifera*). En invernadero, la combinación de ambiente protegido y manejo dirigido de colmenas incrementó rendimiento y calidad, mejorando cuajado y uniformidad de maduración frente a campo abierto (K. X. Sun et al., 2024). En la regulación fenológica, la aplicación de cianamida de hidrógeno (HC) al 0,67 % (v/v) en latencia, tras cumplir $\approx \frac{2}{3}$ del requerimiento de frío, adelantó la brotación 15–19 días, acortó floración y cosecha, y aumentó el rendimiento total 21–42 % (la producción temprana 43–163 %), sin detrimento en firmeza, vitamina C, antocianinas ni fenoles; la mezcla con ácido giberélico (GA₃), etefón, aceite mineral o KNO₃ no aportó ventajas y, en ocasiones, redujo el rendimiento (H. Wang et al., 2021). Ensayos controlados con ‘Duke’, ‘Bluecrop’ y ‘Elliott’ confirmaron que días largos (16 h, 22 °C) disparan oleadas vegetativas sin inducción floral ni endolatenia, mientras que días cortos (8 h) inducen yemas florales desde la semana 2 y latencia desde la 4; tras 900 h de frío a 4 °C, la brotación ocurrió ≈ 6 días después, la floración a los 26 días y la cosecha entre 65 y 130 días posbrote, según cultivar, respaldando un protocolo de oscurecimiento para inducir yemas/latencia, seguido de vernalización, elección de cultivares según ventana de mercado y manejo de polinización dirigido (Bañados & Strik, 2004; Spiers et al., 2004).

La termotolerancia estomática delimita una ventana operativa: la función de estomas mostró un óptimo de 30–35 °C bajo sombreados moderados (20–30 %), condiciones que maximizan asimilación de CO₂, eficiencia fotosintética y disipación térmica, aportando criterios para seleccionar genotipos tolerantes al calor y diseñar invernaderos en regiones cálidas o de alta carga térmica (Y. Zhu et al., 2016). En ambientes con radiación UV-B elevada (o cubiertas que la transmiten), *Vaccinium uliginosum* acumuló más compuestos fotoprotectores (“filtros UV”), pero redujo ~23 % la fotosíntesis estacional y mostró afectación del fotosistema II (PSII) y, probablemente, del ciclo de Calvin; de ello se deriva el uso de plásticos/mallas filtrantes UV-B, sombras moderadas y ajustes de riego y nitrógeno para sostener clorofila y antioxidantes, protegiendo la capacidad fotosintética y el rendimiento (Albert et al., 2008). El manejo de mallas de sombra implica compromisos: mayores niveles de sombreo aumentan clorofila (hojas más verdes) pero reducen eficiencia fotosintética; el fruto puede crecer ligeramente más, aunque retrasa maduración y disminuye azúcares (°Brix). Mallas oscuras exacerban estos efectos, mientras que sombreados blancos/ligeros (25–50 %) protegen de exceso de radiación con menor penalización de calidad, útil para ajustar ventanas de cosecha (Lobos et al., 2008). En el balance fuente–demanda, sostener ≈5 hojas por fruto mejoran el llenado y eleva tamaño, °Brix y precocidad; reforzar la polinización un día tras el primer pase incrementa semillas y peso del fruto. Estas prácticas se implementan mediante poda selectiva y raleo calendarizado, favoreciendo uniformidad y eficiencia reproductiva (Suzuki et al., 1998).

En climas cálidos, modular temperatura y fotoperiodo, junto con un manejo perenne (poda + fertilización estratégica), impacta la inducción floral, la brotación y la fructificación, permitiendo adelantar o concentrar producción hacia periodos de mayor valor; la elección de cultivares de bajo requerimiento de frío y el escalonamiento de bloques productivos son herramientas eficaces para

alinearse la fenología con el mercado (Strik, 2010). En paralelo, bioestimulantes han mostrado efectos antiestrés: extractos de algas marinas en invernadero elevaron hasta 20 % la actividad de enzimas antioxidantes bajo sequía, sin alterar clorofila ni nutrientes foliares (Lenart et al., 2024), y aplicaciones de metil jasmonato y ácido abscísico aumentaron antioxidantes del fruto sin afectar el rendimiento, mejorando el perfil nutracéutico (D. Percival & MacKenzie, 2007).

Cosecha del arándano: transición hacia sistemas mecanizados y asistidos. La cosecha constituye una de las etapas más críticas en la cadena de producción del arándano (*Vaccinium corymbosum* L.), tanto por su elevada demanda de mano de obra como por su impacto directo en la fisiología poscosecha y en la calidad comercial del fruto. La literatura reciente converge hacia la mecanización parcial o asistida, buscando reducir los costos laborales sin comprometer la firmeza, el contenido de antocianinas ni la integridad celular de las bayas. En sistemas bajo túnel, la cosecha asistida con sacudidores eléctricos portátiles y superficies de captura blandas aumentó la tasa de recolección a 81,3 bayas·min⁻¹, aunque con un 30,6 % de frutos verdes. La regulación del desprendimiento a 900 rpm durante 1,2 s mejoró la eficiencia global hasta el 80,7 %, mostrando el potencial del método para equilibrar productividad y selectividad (Sim et al., 2024). Este enfoque híbrido combina la precisión perceptiva del operario con la fuerza controlada del dispositivo, reduciendo el esfuerzo físico y mejorando la constancia de la manipulación, factores que inciden directamente en la preservación de la turgencia celular y la integridad de la cutícula.

El principal desafío de la mecanización es el daño por impacto, que altera la permeabilidad de membranas y acelera procesos oxidativos. Mediante sensores instrumentados (BIRD), se determinó que más del 30 % de los impactos provienen de placas de retención y 20 % de la caja vacía; la inclusión de acolchados de silicona celular y la reducción de la altura de caída de 101 a

50 cm disminuyeron significativamente las magulladuras. En cultivares tipo “ojo de conejo”, el rediseño de la arquitectura de la planta redujo las pérdidas al suelo de 24 % a 17 %, evidenciando la necesidad de sincronizar la morfología del racimo con la dinámica de desprendimiento (Takeda et al., 2013; P. Yu et al., 2012).

En la etapa de separación, la incorporación de un plenum de doble ventilador con control de velocidad desde cabina permitió ajustar el flujo de aire ($\sim 18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), eliminando residuos sin pérdida de fruta gracias a la mayor velocidad terminal ($\approx 15,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) de las bayas respecto a hojas y tallos. Esta innovación reduce la contaminación microbiana superficial y, fisiológicamente, disminuye el riesgo de pudriciones poscosecha al limitar los daños epidérmicos y la pérdida de ceras cuticulares (K. Esau et al., 2018). En paralelo, la tecnología óptica portátil emerge como herramienta para definir el punto óptimo de cosecha. Un índice espectral basado en tres longitudes de onda ($\sim 680, 740$ y 850 nm) clasificó las bayas con >93 % de precisión, correlacionando con los cambios fisiológicos de maduración: incremento de antocianinas ($\approx 1011\text{--}1060 \text{ mg}\cdot 100 \text{ g}^{-1}$ PS), aumento de sólidos solubles ($^{\circ}\text{Brix}$), pH y azúcares reductores (glucosa y fructosa), junto con la disminución de la acidez titulable y de los flavonoles y ácidos fenólicos, que alcanzan su máximo en frutos verdes. Estas transformaciones bioquímicas reflejan la activación de la fenilalanina amonio liasa (PAL) y la degradación controlada de pectinas, fundamentales para el diseño de algoritmos predictivos de madurez fisiológica (Gibson et al., 2013).

Desde el punto de vista económico y operativo, la mecanización total del mercado fresco sigue condicionada por la rentabilidad. Modelos de simulación indican que su adopción sería viable con reducciones combinadas del 20–30 % en brechas de precio, costos laborales y pérdidas de rendimiento (Gallardo & Zilberman, 2016). El avance hacia la eficiencia depende de la convergencia entre innovación en diseño mecánico (contactos amortiguados, control de caída,

ventilación adaptativa) y mejoramiento genético pro-mecanización, orientado a arquitecturas abiertas, racimos laxos, cicatriz pequeña, cera persistente y alta firmeza (Olmstead & Finn, 2014). Asimismo, la planificación de la cosecha puede beneficiarse de modelos multiobjetivo basados en lógica difusa y algoritmos evolutivos (NSGEA) que optimizan de manera simultánea la rentabilidad y la sostenibilidad, considerando emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), residuos, disponibilidad de mano de obra y variabilidad climática. En sistemas canadienses, este enfoque superó los modelos deterministas tradicionales, ofreciendo una base analítica para la toma de decisiones adaptativas (Fathollahi-Fard et al., 2023).

Tecnologías poscosecha y dinámicas de almacenamiento y comercialización. La poscosecha y el procesamiento del arándano (*Vaccinium* spp.) convergen en cuatro frentes: (i) procesos que preservan textura, color y perfil aromático minimizando la degradación de antocianinas/fenoles; (ii) control microbiológico mediante tratamientos físicos/químicos de bajo impacto; (iii) estabilización de pigmentos por encapsulación, copigmentación y matrices funcionales; y (iv) valorización de subproductos hacia ingredientes y empaques activos. Avances cuantificables (mayor retención de antocianinas, reducciones log de patógenos, mejoras sensoriales y extensión de vida útil) coexisten con brechas metodológicas (variabilidad varietal/matriz, cinéticas bajo condiciones comerciales, escalamiento), que requieren protocolos comparables y validaciones multisitio.

En el procesamiento de jugos y derivados, se ha informado que el uso de pectinasas en arándano incrementó el rendimiento (91%) y la concentración de antocianinas (4.287 mg/L), acompañadas de una mayor astringencia y acidez (Zárate-Carbajal et al., 2025). En formulaciones de mermelada reducida en azúcar, la aplicación de alta presión hidrostática (HHP) permitió

conservar, durante 68 días a 4 °C, los niveles de vitamina C (14,17 mg/mL), compuestos fenólicos (1,15 mg/mL), flavonoides (4,77 mg/mL) y antocianinas (0,45 mg/mL) (曹霞敏 et al., 2014). En cuanto a los compuestos volátiles, se identificaron 618 VOCs (volatile organic compounds), de los cuales 140 fueron diferenciales, permitiendo distinguir entre genotipos silvestres (Wb) y cultivados (Cb); β -ionona y 2(5H)-furanona explicaron las notas dulces y afrutadas, mientras que carotol y 1-hexanol actuaron como biomarcadores característicos de Wb/Cb (X. Xie et al., 2025). Por otro lado, frutos silvestres almacenados a 0,5 °C y 95% HR mostraron una capacidad antioxidante entre 4 y 15 veces superior, atribuida principalmente a la presencia de cianidina-3-O-glucósido y delphinidina-3-O-glucósido (Fenniri et al., 2025)(Art. 9). Finalmente, diversas revisiones destacan tanto el fruto como sus residuos industriales como fuentes relevantes de antioxidantes, vitaminas y colorantes naturales, recomendando el manejo orgánico por su equilibrio entre costo y sostenibilidad ambiental (Ayyadurai et al., 2025).

Los avances recientes en el estudio del microbioma, los materiales de empaque y la metabolómica del arándano revelan una fuerte interconexión entre las estrategias poscosecha y la estabilidad funcional del fruto. En Argentina, se observó que las frutas recién cosechadas presentaron una mayor diversidad bacteriana dominada por *Methylobacterium* y *Bacillus*, mientras que las procesadas o refrigeradas mostraron una mayor diversidad fúngica, con presencia de *Botrytis caroliniana* y levaduras benéficas como *Vishniacozyma victoriae* (Perez et al., 2025). Paralelamente, el desarrollo de películas “inteligentes” basadas en hidroxipropilmetilcelulosa, κ -carragenina y gelatina (HKGB) incorporadas con antocianinas ha permitido mejorar la conservación mediante una elevada capacidad antioxidante (DPPH 82,92%; ABTS 86,44%), resistencia mecánica de 5,85 MPa y alta sensibilidad al amoníaco (32,79%), compatible con lectura móvil (Mu et al., 2025). Estas innovaciones se complementan con formulaciones de bebidas en

polvo liofilizadas que mantienen la estabilidad de polifenoles y antocianinas durante nueve meses y aportan vitaminas esenciales (B5 = 78% y C = 11,7% de la IDR) (Karimova et al., 2025). Finalmente, la aplicación de riego con hidrógeno molecular, analizada mediante UPLC-MS/MS, demostró una reprogramación metabólica de ácidos fenólicos y flavonoides que prolonga la vida útil del fruto hasta 12 días a 4 °C (Z. Jin et al., 2024).

La deshidratación osmótica con propionato de calcio (1,5 g/mL) redujo el goteo poscongelación (-25,42 %), aumentó la dureza (1,54 N) y conservó pectinas (Art. 30), aunque persiste la necesidad de valorizar subproductos (Bin et al., 2024). La espectroscopía Raman mostró que la degradación de antocianinas se acelera con pH alto, temperaturas >65 °C o 96 h de radiación UV (10 W) (Duan et al., 2024). Secuencias con Tween 80, ácidos ferúlico y tánico más CaCl₂ incrementaron antocianinas (3,38 vs. 2,79 mg/g) y redujeron el color polimérico (15,5–17,4 %) (Jung et al., 2022). La congelación a -80 °C mantuvo mejor el agua vacuolar y la pectina, reduciendo el goteo frente a -20/-40 °C o N₂ líquido (李洋 et al., 2023). En inocuidad, NaOCl 200 ppm + ClO₂ 3–15 ppm disminuyó *Listeria* (5,5 log CFU/g) y *Salmonella*/STEC (*Shiga toxin-producing E. coli*, 3,0/2,6 log); la congelación duplicó el efecto (~5,0 log) (Lacombe & Wu, 2023). La cosecha higienizada redujo el APC (*Aerobic Plate Count*, -1,2 log) y el YMC (*Yeast and Mold Count*, -0,5 log) respecto a la mecanizada, sin detección de *Salmonella* ni STEC O157 en 12 casos de *E. coli* (Ells et al., 2024). Finalmente dada la corta vida útil (<6 días), se recomienda la transformación del fruto en polvos, jugos o vinos con altos niveles de antocianinas (123,2–623,9 mg/100 g PS) y elevada bioactividad; los polvos ('Jewelry', 'Coast') siguieron el modelo GAB (*Guggenheim-Anderson-de Boer*) y fueron estables a ≤ -30 °C y ≤ 0,11 g/g de humedad (Chu et al., 2023; Rashwan et al., 2024).

La valorización enológica del arándano complementa las estrategias poscosecha y de crioprotección, orientándose hacia la conservación de compuestos bioactivos y el desarrollo de bebidas funcionales. La deshidratación moderada (30 % de peso) incrementó las antocianinas (+25,9 %) y fenoles (+16,1 %), mejorando el perfil aromático; sin embargo, una reducción del 40 % elevó los compuestos fenólicos volátiles 4-etilfenol y 4-etilguayacol (Y. Wang, Zhang, et al., 2023). La harinosidad se evaluó por liberación de jugo, siendo alta en ‘Brigitta Blue’ y ‘Powder Blue’, y baja en ‘Puru’ y ‘Denise Blue’ (A. C. Castro et al., 2022). El tratamiento de presión hidrostática de alto nivel (HHP, *High Hydrostatic Pressure*, 300 MPa, 4 °C) conservó 54 % más antocianinas y redujo >80 % la actividad de polifenol oxidasa (PPO) frente al calentamiento rápido HTST (*High Temperature Short Time*, 95 °C, 15 s) (Adhikari et al., 2024). Tanto la liofilización como el secado por aspersión mantuvieron nutrientes clave, aunque requieren optimización cinética (Ravichandran & Krishnaswamy, 2023). De otro lado el análisis de valores de actividad de olor (OAV, *Odor Activity Values*) en vinos permitió identificar compuestos volátiles diferenciados por variedad, levadura y proceso (Zhijun et al., 2024).

A nivel estructural, la firmeza del cultivar ‘Star’ respecto a ‘O’Neal’ se asoció con diferencias en la expresión de pectin-lasa (PL) y en la pectina soluble (genes *VcPL41* y *VcPL65*) (Li X.; Lu X.; Huang Q.; Li Y.; Zong Y.; Xu L.; Guo W., 2024). En jugos tratados con HHP, la adición de ácido gálico (2 g/L) redujo la pérdida de antocianinas (62,27 % a 13,42 % a 20 días/4 °C) y la actividad de PPO (Ning et al., 2023). El CaCl₂ al 2 % retrasó el ablandamiento y la acumulación de ácido abscísico (ABA) (Z. Song et al., 2025). Extractos de cáscara y semilla (58,18 mg GAE/g, *gallic acid equivalents*) generaron películas comestibles con 76,02 % de capacidad antioxidante (Griep et al., 2024). La hidrólisis enzimática incrementó los polifenoles libres (+27,67 %, 343,58 mg GAE/100 g FW) y la actividad antioxidante FRAP (*Ferric Reducing Antioxidant*

Power) y ABTS (*2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)*) (+hasta 27,25 %)(Zhuxi et al., 2023). Los parámetros de adhesión y masa de jugo mostraron alta correlación ($r = 0,990$ y $r = 0,776$, respectivamente) (A. Castro et al., 2024). Polvos liofilizados mixtos conservaron estabilidad con pérdidas de antocianinas del 23,9 % tras 12 semanas (X. Zhang et al., 2022). Películas de almidón con microcápsulas AEPU (*anthocyanin extract-polyurethane*) extendieron la vida útil más de 7 días y fueron biodegradables en un 95 % tras 8 días (W. Wang et al., 2023). La inestabilidad en mermeladas almacenadas 120 días fue modelada mediante una red neuronal artificial (RNA, 10-30-10-3) (Guimarães et al., 2021). Finalmente, tratamientos HPP (100–500 MPa) no alteraron el máximo de absorbancia (λ_{max}) ni el color de antocianinas (*Mv-3-O-gal*, *Mv-3-O-ara*), salvo leves variaciones del parámetro cromático a^* con ácido gálico (GA); además, el ácido cafeico (CA) mostró mejor copigmentación con *Mv-3-O-gal*, mientras que GA lo hizo con *Mv-3-O-ara* (Y. Sun et al., 2024).

Los avances en procesamiento del arándano buscan optimizar eficiencia y calidad nutracéutica. Un sistema piloto de aire caliente híbrido con infrarrojo y burbujeo (HHAIB + HAIR), optimizado mediante red neuronal artificial (RNA) y NSGA-II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*), redujo el secado a 366,7 min y conservó vitamina C (4,19 mg/100 g) con 93 s, 89 °C y 1,2 m/s (W. Zhang et al., 2022). El uso de melatonina y triptófano mitigaron el ablandamiento a temperatura ambiente (Arabia et al., 2025). Las técnicas LF-NMR/MRI (*Low-Field Nuclear Magnetic Resonance/Magnetic Resonance Imaging*) describieron la migración hídrica en el secado FIRD-HPD (*Far-Infrared Radiation Drying – Heat Pump Drying*), con una eficiencia de transferencia del 40 % (Z. Yu et al., 2024). El uso combinado de microondas + liofilización asistida con cuarzo o SiC redujo >50 % el tiempo de proceso y retuvo >80 % TMA (antocianinas monoméricas totales) y >75 % TPC (fenoles totales) (Art. 98). Nanoemulsiones de

eugenol en EPS (*exopolisacáridos*) de *L. plantarum* disminuyeron *Salmonella* y *E. coli* hasta 3 log (Balyan et al., 2025). Recubrimientos de goma de almendra + quitosano extendieron vida útil 20 días y mostraron acción frente a *S. aureus* y *P. aeruginosa* (Suresh et al., 2024). El análisis 2D-NIR (*Two-Dimensional Near-Infrared Spectroscopy*) con SVM (*Support Vector Machine*) predijo calidad integral (100 %) (Guohong et al., 2024), y las técnicas hiperespectrales/termográficas detectaron magulladuras (Sharma & Venugopal, 2024). Finalmente, el uso de agua activada por plasma (PAW, *Plasma-Activated Water*) redujo *E. coli* y *S. aureus* manteniendo frescura; metabolitos de *L. plantarum* PC11 previos a congelación aumentaron dureza (+9 %), redujeron goteo (6,3 %) y duplicaron antocianinas (1,78×)(Xingcai et al., 2024).

Las estrategias no térmicas se consolidan como alternativas para preservar la calidad y funcionalidad del arándano durante el procesamiento y almacenamiento. Los recubrimientos de gelatina-carboximetilcelulosa (CMC) con extractos de hoja de arándano (*LP*) extendieron la vida útil un 12,5 % y aumentaron el contenido total de antocianinas (ATC, 75,75 mg/100 g) según RT-qPCR (*Reverse Transcription quantitative Polymerase Chain Reaction*) (Cai et al., 2025). La luz pulsada (*LP*, 6 J/cm²) mantuvo la firmeza y redujo la pudrición del cultivar ‘Draper’ durante seis semanas a 0,5 °C y 90–95 % de humedad relativa (HR) (Pratap-Singh et al., 2023). El secado a 50 °C preservó aminoácidos y terpenos (linalool, α -terpineol) (K. Li et al., 2023), mientras que los nanocomplejos de quitosano- κ -carragenina (CS-KC) retuvieron 94,4 % de antocianinas a pH 6,0 y 25 °C (C. Xie et al., 2020). El secado por FMFD (*Freeze-Microwave Freeze Drying*) superó al SD (*Spray Drying*) en TMA (*Total Monomeric Anthocyanins*, 7,11–8,09 vs. 4,34–5,69 mg/g) y TPC (*Total Phenolic Content*, 68–76 % vs. 48–72 %), con mejor rendimiento usando maltodextrina (MD) y aislado proteico de suero (WPI) (Darniadi et al., 2019). La termosonicación (600 W; 60 °C) incrementó los fenoles totales (+139 %), flavonoides (+252 %) y antocianinas

(+94 %) (Z. Wu et al., 2019). El despulpado con bajo oxígeno combinado con HHP (*High Hydrostatic Pressure*, 500 MPa, 5 min) prolongó la vida media de antocianinas (L. Zhang et al., 2022). Los pulsos eléctricos (LPEF, *Low Pulse Electric Field*, 400 V, 0,2 ms) conservaron vitamina C, antocianinas y fenoles, reduciendo el crecimiento microbiano por 30 días (N. Zhu, Zhang, et al., 2019). Se recomienda almacenamiento a 0 °C, 90–95 % HR, enfriamiento forzado (20–30 min) y cadena de frío continua (Madrid & Beaudry, 2020). La aplicación de microondas en gelatinas de residuos acertó el proceso (–30–50 %) y aumentó la actividad antioxidante (DPPH, FRAP) ((Ikramov et al., 2021). Mermeladas y mezclas mantuvieron fenoles, flavonoides y TMA, con terpenos representando >74 % de los volátiles (Art. 141). La LP inactivó microorganismos sin dejar residuos (Salehi, 2022), mientras que el metil jasmonato (ASM, *Acetylsalicylic Methyl Ester*) a 100 mg/L estimuló enzimas antioxidantes (SOD, APX, CAT) y elevó fenoles/flavonoides a 4 °C (Ge et al., 2019). Finalmente, el secado FIR-PVD (*Far Infrared – Photovoltaic Drying*, 65 °C) mejoró el contenido de TP y TMA, reduciendo el tiempo frente al aire caliente, y el análisis HMI (*Hyperspectral Machine Imaging*) clasificó firmeza con 85 % de precisión (Liu et al., 2022; Park et al., 2021).

Las innovaciones recientes combinan técnicas de conservación con enfoques sostenibles para mantener la estabilidad bioquímica y microbiológica del arándano. La electroforesis isoelectrica (IEF, *Isoelectric Focusing*, 250 V; 85 °C; 30 min) inactivó las enzimas polifenol oxidasa (PPO) y peroxidasa (POD), incrementó las antocianinas (+12,5 %) y mantuvo recuentos <1 log UFC/mL durante ocho semanas a 4 °C (Y. Jin et al., 2020). Los parámetros mecánicos del fruto (módulo de elasticidad $E = 0,225$ MPa; coeficiente de Poisson $\nu = 0,35$) explicaron las fuerzas de ruptura (3,15–7,04 N) y la vulnerabilidad localizada en cáliz y base (Z. Zheng et al., 2021). Los disolventes eutécticos naturales profundos (NADES, *Natural Deep Eutectic Solvents*) combinados

con extracción asistida por microondas (MAE, *Microwave-Assisted Extraction*) o ultrasonido (UAE, *Ultrasound-Assisted Extraction*) permitieron extraer 25,83 y 21,18 mg/g de antocianinas, con actividad antiproliferativa frente a líneas celulares HeLa y HaCaT (Grillo et al., 2020). La degradación de antocianinas siguió una cinética de primer orden en presencia de catecol y PPO, mostrando un pardeamiento dependiente de la concentración de enzima y fenoles (Shaoqian et al., 2022). El ácido peracético (PAA) redujo 2,2 log unidades en frutos silvestres precongelación, superando al etanol y cloro (Callahan & Perry, 2020). Películas de quitosano:carboximetilcelulosa (CS:CH) con extracto de semilla de uva (GSE, *Grape Seed Extract*) conservaron 84,8 % de la capacidad antioxidante y redujeron la podredumbre, mientras que las formuladas con aceite esencial de limón (LEO, *Lemon Essential Oil*) fueron menos eficaces (Bof et al., 2021). En cosecha mecanizada se registraron altas cargas en cintas y placas, aunque los coliformes fecales y enterococos fueron bajos y esporádicos (Holland et al., 2021). El orujo secado a 60–70 °C retuvo 66–75 % de antocianinas y más del 30 % de fibra tras 20 semanas (Calabuig-Jiménez et al., 2022). Lavados secuenciales con cloro, ácido láctico, dióxido de cloro (ClO₂) y ozono, seguidos de congelación a –17 °C, redujeron *Listeria* y *Salmonella* entre 6,6–7,2 log (Tadepalli et al., 2019). La albúmina sérica bovina (BSA, *Bovine Serum Albumin*, 0,15 mg/mL) protegió las antocianinas durante el almacenamiento y la digestión simulada (Zang et al., 2022). El uso de nitrógeno líquido (N₂) requiere ajuste fino de tiempo y energía para evitar daños tisulares (Sorica et al., 2019). Finalmente, el ClO₂ gaseoso (57,46 mg/L, 10 h) redujo 1,5 log de coliformes en 50 kg de fruta (Lacombe et al., 2020), y el control térmico de precisión limitó la pérdida de vitamina C (–16,67 mg/100 g en 60 días), conservando el 79,54 % de fruta comercial y mejorando el aroma (薛友林 et al., 2021).

El desempeño poscosecha del arándano también depende tanto de su base genética como de las tecnologías aplicadas en frío y procesamiento, integrando criterios de calidad, inocuidad y sostenibilidad industrial. Las variedades ‘Premier’ (altos antioxidantes y sólidos solubles), ‘Misty’, ‘O’Neal’ y ‘Legacy’ (adecuadas para consumo fresco), ‘Brigitta’ (pH bajo, apta para jugos) y ‘Northland’/‘Bluerain’ (ricas en pectina) confirmaron que la actividad antioxidante se asocia directamente con antocianinas, fenoles y flavonoides (Cheng et al., 2020). En la cadena de frío, la descongelación por inducción térmica lenta (SIT, *Slow Induction Thawing*) y su versión asistida por ultrasonido (UASIT, *Ultrasound-Assisted SIT*) preservaron mejor las antocianinas y °Brix, siendo UASIT más eficiente sin alterar las propiedades sensoriales (Cao et al., 2020). Recubrimientos de quitosano y 0,2 % de pectina redujeron la descomposición (–33 %) y la pérdida de peso (–22 %) a los 16 días, manteniendo antocianinas y ácidos orgánicos (X. Zhou et al., 2022). El tratamiento con plasma atmosférico frío (CAPP, *Cold Atmospheric Pressure Plasma*) durante 5–10 min inhibió bacterias más que hongos sin afectar °Brix, acidez, color ni antocianinas (Pathak et al., 2020). La combinación de campos eléctricos pulsados (PEF, *Pulsed Electric Fields*, 2 kV/cm, 2–6 min) y ácido peracético (PAA, 60 ppm) redujo *E. coli* y *Listeria* (hasta 3 log), la microbiota nativa (2 log/g) y aumentó antocianinas (+10 %) y fenoles (+25 %), con leve ablandamiento (T. Z. Jin et al., 2017). De forma complementaria, la presión hidrostática alta (HPP, *High Hydrostatic Pressure*, 200–600 MPa, 5–60 min) mantuvo la firmeza y redujo el colapso celular durante 28 días a 3 °C sin diferencias sensoriales (Scheidt & Silva, 2018). La manotermosonicación logró una inactivación de *E. coli* O157:H7 de 5,85 log (5 min), conservando 97,5 % de antocianinas y 10,9 % de PPO residual (J. Zhu et al., 2017). Así mismo se sabe que los procesos mínimos (congelación, deshidratación osmótica e impregnación al vacío) y la luz pulsada

(LP) emergen como alternativas sostenibles para mantener la calidad microbiológica y sensorial del fruto (CUEVAS, 2016).

La reciente investigación aplicada consolida la eficacia de tratamientos híbridos y valorización integral de residuos para optimizar la calidad y sostenibilidad del arándano. La combinación de cavitación hidrodinámica y pasteurización (86–96 °C) permitió inactivar mohos resistentes (94–96 °C; 1–2 min) y garantizar estabilidad por 24 semanas a temperatura ambiente (Fan et al., 2018). Los residuos del procesamiento (BWM, *Blueberry Waste Material*) se transformaron en polvos ricos en compuestos bioactivos (TPC, *Total Phenolic Content*, 25–30 mg GAE/g; TAC, *Total Anthocyanin Content*, 17–20 mg CyGE/g) mediante extracción acuosa y secado por aspersión, donde el alginato mostró mayor eficiencia encapsulante y efecto prebiótico (Waterhouse et al., 2017). En bebidas lácteas con 0–15 % de jugo se observó descenso de pH y luminosidad (L) y estabilidad fenólica, aunque con pérdida de antocianinas tras 28 días a 4 °C (V. L. M. Silva et al., 2017). Durante la deshidratación (70–90 °C) disminuyeron la humedad y la actividad de agua (a_w), con semividas de antocianinas de 7,7 h (70 °C) y 6,8 h (80 °C) y reducción de la capacidad antioxidante después de 3 h (Reque et al., 2016).

El tratamiento de campos eléctricos pulsados moderados (MPEF, *Moderate Pulsed Electric Fields*, 350 V) inactivó la microbiota y retuvo mejor la vitamina C (–11,5 % en 30 días a 4 °C) frente a HTST (*High Temperature Short Time*) (–26,8 %) (N. Zhu, Zhu, et al., 2019). La liofilización con precongelación a –20/–80 °C preservó la estructura del fruto aunque con pérdidas de volátiles detectadas por GC–MS (*Gas Chromatography–Mass Spectrometry*) (Hien et al., 2016). El escaldado previo en *Vaccinium ashei* conservó 30,7 % de antocianinas tras 10 días a 40 °C, superando al baño caliente (23,8 %) y al control (19,9 %) (L. Zhang et al., 2019). La radiación UV-C (4.000 mJ/cm²; ≤9 min) inactivó virus entéricos (HAV y norovirus murino, –2 a 3 log,

aunque con limitada acción bacteriana (<1 log) (Butot et al., 2018). Finalmente, el color del jugo disminuyó 33 % a 100 °C, siendo glucosa y galactosa los mejores agentes protectores, mientras que la congelación a -75 °C conservó 95,4 % del color durante siete semanas (H.-N. Song et al., 2018).

La calidad final del arándano procesado depende de la interacción entre los materiales de conservación, las condiciones térmicas y las características varietales, configurando verdaderas “cadenas y matrices” de valor funcional. Las películas de quitosano con sales de amonio cuaternario (CQAS, *Chitosan Quaternary Ammonium Salts*), goma konjac (KGM, *Konjac Glucomannan*) y bromuro de cetiltrimetilamonio (CTAB, 0,15 %) mejoraron la resistencia mecánica, la actividad antioxidante (AA) y la conservación del fruto (李翠萍 et al., 2018). En jugos NFC (*Not From Concentrate*), el rendimiento de extracción fue superior en SHB (*Southern Highbush Blueberry*) frente a RAB (*Rabbiteye Blueberry*) ($68,8 \pm 1,1$ % en laboratorio; $87 \pm 0,6$ % a escala piloto) tras congelación, calentamiento y aplicación de pectinasas (Stein-Chisholm et al., 2017). En el cultivar ‘Tifblue’, los jugos pasteurizados durante cuatro meses perdieron 84,5–85,5 % de antocianidinas y 70,9–73,8 % de compuestos volátiles, sin alteraciones sensoriales significativas (Beaulieu et al., 2017). Los vinos tratados con CaCO_3 y jarabe de glucosa mostraron menor acidez y, en ‘Climax’ y ‘Aliceblue’, mayores niveles de antocianinas y preferencia sensorial (R. O. Santos et al., 2016).

En los cultivares chilenos ‘Duke’ y ‘Brigitta’, la sobremaduración y el aumento del ácido ursólico cuticular se asociaron con mayor pérdida de firmeza y peso tras 20–50 días de transporte marítimo, siendo ‘Duke’ el más susceptible (Moggia et al., 2016). Un método optimizado para el aislamiento de ooquistes de *Cryptosporidium* y *Cyclospora* mediante tampón de glicina logró recuperaciones del 4,1–12 %, y la detección por qPCR-MCA (*Quantitative Polymerase Chain*

Reaction – Melting Curve Analysis) alcanzó sensibilidades de hasta tres ooquistes/g (Lalonde & Gajadhar, 2016)(Art. 296). La presión hidrostática alta (HHP, *High Hydrostatic Pressure*, ≥ 550 MPa, 2 min, 0 °C) inactivó >4 log del norovirus humano (HuNoV GII.4) en purés sin afectar el color ni las propiedades sensoriales (R. Huang et al., 2016). En mermeladas almacenadas 56 días, 4 °C conservó mejor el pH, la textura y la AA que 25 o 35 °C, con correlaciones significativas entre fenoles totales (TP) y AA ($R^2 = 0,617-0,716$) (Lafarga et al., 2018). Extractos de arándano silvestre complejados con proteínas por aspersión alcanzaron 156,2 mg GAE/g (TP), 13,4 mg/g de antocianinas y elevada capacidad DPPH, siendo el aislado de soja la mejor matriz encapsulante (Correia et al., 2017). Finalmente, las variedades ‘Duke’ y ‘Palmetto’ conservaron el “crujido” característico para consumo fresco, mientras que ‘Camellia’ y ‘Legacy’, de menor intensidad aromática, resultaron más adecuadas para jugos y mermeladas (Vilela et al., 2016).

El fortalecimiento de las cadenas de valor del arándano también se ha orientado hacia la estabilidad funcional y la trazabilidad del producto final, integrando biopolímeros, tecnologías limpias y herramientas analíticas avanzadas. La encapsulación de antocianinas en hidrogeles de alginato–pectina elevó la eficiencia de encapsulación (EE_m) de 48 a 116 %, prolongó la semivida ($t_{1/2}$) de 58 a 630 h y redujo la fotodegradación (Guo et al., 2018). La acidificación del jugo a pH 2,1 conservó entre 11–59 % más antocianinas tras la pasteurización, con mayor retención a 4 °C que a 25 °C durante ocho meses (Howard et al., 2016). Los isótopos estables (δ^2H , $\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$, $\delta^{18}O$) se consolidaron como marcadores robustos para verificar la autenticidad y el origen geográfico (Perini et al., 2018). El tratamiento por ultrasonido degradó la cianidina-3-glucósido (Cy-3-glu) bajo una cinética de primer orden, con mayor estabilidad en soluciones de etanol al 20 % (G.-L. Yao et al., 2016).

En arándanos silvestres de Alaska, la capacidad ORAC (*Oxygen Radical Absorbance Capacity*) fue casi tres veces superior a la de los cultivados (85 vs. 30), y aumentó por efecto de la deshidratación (Rodgers Dinstel et al., 2013). Las mermeladas con o sin azúcar mostraron pérdidas de antocianinas, procianidinas y ácido clorogénico a los seis meses, siendo el almacenamiento a 4 °C más favorable y las formulaciones sin azúcar las más estables (Howard et al., 2010). La degradación térmica controlada (HTD) retuvo el 81 % de antocianinas frente al 43 % del tratamiento convencional, duplicó los fenoles y redujo el color polimérico (Satanina et al., 2014). El monitoreo NIR (*Near-Infrared Spectroscopy*) permitió seguir en tiempo real la deshidratación osmo-aire y cuantificar agua, sólidos, fenoles y antocianinas (Art. 328). La congelación IQF (*Individually Quick Frozen*) con lecho fluidizado y nitrógeno (-40 °C; 4,5 m/s; 3,6 cm) extendió la vida útil hasta 150 días frente a 100 días a -18 °C (Q.-G. Zhang et al., 2014).

Evaluaciones comparativas demostraron que congelación, exprimido y secado afectan de manera diferencial los fitoquímicos, destacando el secado como el proceso más determinante (Michalska & Łysiak, 2015). La degradación de antocianinas alcanzó 32 % a 100 °C/20 min y 50 % a 100 °C/600 MPa, con cinética de orden 1,4 (Buckow et al., 2010). La presión hidrostática (HP, *High Pressure*, 600 MPa; 42 °C; 5 min) conservó mejor la vitamina C (-31 % en 56 días) y la actividad antioxidante (-21 %) que los tratamientos PEF (*Pulsed Electric Fields*) (-48 %) o el control (-30 %) (Barba et al., 2012). Procesamientos térmicos prolongados redujeron 86 % de antocianinas y 69 % de fenoles totales (TPC) en 13 meses, evidenciando el efecto del escaldado (Syamaladevi et al., 2012).

De otro lado en yogures, los derivados de malvidina fueron predominantes y las antocianinas siguieron una cinética de primer orden, con menor estabilidad en fermentaciones con *Lactobacillus paracasei* respecto a *Bifidobacterium Bb-12* o *Lactobacillus acidophilus La-5*

(Ścibisz et al., 2012). En mermeladas, la actividad antioxidante (AA) disminuyó 13–19 % tras la elaboración, con mayor degradación de arabinósidos respecto a glucósidos y galactósidos (6 meses) (Ścibisz & Mitek, 2009). Una síntesis crítica confirmó que los fenoles son los fitoquímicos dominantes, modulados por las condiciones poscosecha y de procesamiento (Manganaris et al., 2014). En congelación a granel, ClO₂ (4 ppm) redujo ~2 log de levaduras y 1 log de MAB, mientras que la congelación rápida (-3 °C; 3 h) limitó el crecimiento frente a la lenta (L. Zhang et al., 2015). Finalmente, la HTD con 13 % de sólidos y viscosidad de 1,45–2,76 Pa·s logró <10 UFC/g tras 95 °C, y el ácido clorogénico (5-CQA) formó 11 derivados térmicos potenciados por la sacarosa (Dawidowicz & Typek, 2014; Martynenko et al., 2015).

El fortalecimiento de las cadenas productivas del arándano combina tecnologías físicas de conservación con estrategias logísticas y de mercado orientadas a mantener calidad y valor agregado. El plasma frío atmosférico (CP, *Cold Plasma*, 15–120 s) redujo el recuento microbiano (APC) entre 0,8–1,6 log (hasta 2,0 log a 7 días), aunque exposiciones >60 s disminuyeron la firmeza y >90 s afectaron las antocianinas (Lacombe et al., 2015). La extracción a 60 °C y pH 1 maximizó antocianinas y actividad antioxidante (AA), con correlaciones positivas con fenoles (R = 0,95) y negativas con color polimérico (R = -0,64); la presencia de oxígeno aceleró la degradación (Kalt et al., 2000). El escaldado previo incrementó fenoles y AA en cinco cultivares, con magnitud dependiente de la variedad (Brambilla et al., 2005). En procesos de enlatado o jugificación, las pérdidas alcanzaron -28–59 % en antocianinas monoméricas y -43–71 % en capacidad ORAC(FL); tras seis meses a 25 °C, se retuvo solo 15–38 % de antocianinas, aunque los polímeros sostuvieron parcialmente la AA (Brownmiller et al., 2008). La retención fue alta para flavonoles (57–99 %) y ácido clorogénico (64–100 %), pero menor en antocianinas (42–72

%) y procianidinas (19–78 %); los productos enlatados mostraron mayor estabilidad (Brownmiller et al., 2009).

Imágenes crio-MEB (*Cryo-Scanning Electron Microscopy*) evidenciaron que la congelación rápida y las bajas temperaturas reducen el goteo y la fuga de antocianinas (Allan-Wojtas et al., 1999). El uso de H₂O₂ (1 %) u ozono (1 ppm) redujo hasta 2,5 log de *Enterobacter* y *Pseudomonas*, con eficacia similar a los procesos oxidativos avanzados (POA) y superior al cloro (Crowe et al., 2007). La extrusión del orujo a 180 °C y 150 rpm aumentó los monómeros de procianidinas (+84 %) y redujo los polímeros (–40 %), con pérdidas de antocianinas de 33–42 % (Khanal et al., 2009). Un secador prototipo para frutos silvestres de Maine eliminó ~1 % de humedad sin aumentar fugas de antocianinas ni daño tisular (Donahue et al., 1999). En ‘Tifblue’ y ‘Powderblue’, la recuperación postproceso fue de ~25 % en fenoles totales (TP), 29 % en antocianinas (TACY) y 69 % en capacidad antioxidante (TEAC); la conservación a –20 °C mantuvo la calidad 30 días, mientras 35 °C eliminó las antocianinas a 60 días (Srivastava et al., 2007).

Un muestreo secuencial para detectar bayas momificadas indicó que una sola muestra de 550 cm³ (~250 frutas) permite identificar >0,5 % de incidencia con menor costo (Copes et al., 2001). El modelo “Pick-Your-Own” creció por su bajo costo y beneficios percibidos (Frith, 2004), y la detección visual de frutos momificados mostró sesgos de –3,4 a 1,9 % y coeficientes de variación de 1,2–5,2 %, superiores al método destructivo (Scherm & Copes, 1999). En yogures con arándanos silvestres, la adición de vainillina (2.000 ppm) extendió una semana la vida útil, mientras que la nisina fue inefectiva (Penney et al., 2004). El secado en gabinete redujo 41–49 % las antocianinas, mientras la congelación a –20 °C las mantuvo tres meses sin afectar la AA (Lohachoompol et al., 2004). En geles, la presión hidrostática alta (HPP, *High Hydrostatic*

Pressure, 600–800 MPa) conservó la actividad catalasa (CAT) y redujo la retrogradación de amilopectina frente a tratamientos térmicos, prolongando la estabilidad (Vittadini et al., 2005). Finalmente, en arándanos *lowbush*, el H₂O₂ (1 %) superó al cloro (100 ppm), logrando la mitad de carga microbiana sin alterar el color (Crowe et al., 2005).

Modelamiento, visión computacional y agricultura de precisión en el cultivo de arándano. La literatura reciente evidencia una convergencia sólida entre la visión computacional, la espectroscopía y la agricultura de precisión como pilares del modelamiento inteligente aplicado al arándano (*Vaccinium corymbosum* L.). Estas herramientas abordan cuellos de botella a lo largo del ciclo productivo, desde la detección de madurez y la estimación del rendimiento, hasta el diagnóstico sanitario, la poscosecha y la optimización de insumos—, consolidando un paradigma predictivo basado en datos.

En la predicción de rendimiento, los algoritmos de detección de objetos han demostrado gran eficacia. El modelo YOLOv8 (*You Only Look Once, versión 8*) empleado para diferenciar bayas maduras e inmaduras alcanzó un desempeño de *mean Average Precision* al umbral de intersección sobre unión de 0,5 (mAP₅₀) igual a 0,708. Al integrarse con 42 regresores agronómicos, un modelo de gradient boosting logró un coeficiente de determinación (R²) de 0,80, mientras que la exclusión del genotipo redujo el ajuste a R² = 0,47, confirmando la relevancia genética en la productividad (Singh et al., 2025). En condiciones de baja iluminación, el modelo YOLOv11-BSD, optimizado con mecanismos de atención bidireccional y fusión multiescala, mejoró la precisión al 89 % (+5,4 pp) y el *mean Average Precision* entre IoU 0.50–0.95 (mAP@[0.50:0.95]) al 80,8 % (+5,7 pp) (R. Zhang et al., 2025). En cosecha mecanizada, YOLOv5, reforzado con saturación en espacio de color CIE Lu'v', incrementó la precisión (+3 %),

el *recall* (+2 %) y el mAP (+2,6 %) (Zhai et al., 2024), mientras que YOLOv3-spp, entrenado con 4220 imágenes, clasificó tres fases de madurez (verde, roja y azul) con un *recall* del 91 % y tiempos de inferencia de 28,3 s (Schumann et al., 2019). A nivel aéreo, los vehículos aéreos no tripulados (VANT), también conocidos como *Unmanned Aerial Vehicles* (UAV), equipados con cámaras RGB alcanzaron $R^2 = 0,89$ al predecir rendimiento, siendo más eficientes los vuelos a 30 m que a 5 y 15 m de altura (RMSE = 542,01; MAE = 379,94; donde RMSE = *Root Mean Square Error* y MAE = *Mean Absolute Error*) (Qu et al., 2024).

La evaluación no destructiva de la calidad interna mediante espectroscopía y aprendizaje profundo ha permitido predecir variables fisiológicas clave. En espectros visible NIR (*Near-Infrared Spectroscopy*, 400–1000 nm), los modelos PLS e iPLS (*Partial Least Squares* e *interval Partial Least Squares*) predijeron los sólidos solubles (*Soluble Solids Content*, SSC) y la firmeza (*Firmness Index*, FI) con coeficientes de predicción (R_p) de 0,90 y 0,78, respectivamente (Leiva-Valenzuela et al., 2012). En el rango NIR (900–1700 nm), un sistema *pushbroom* aplicado al cultivar ‘Bluecrop’ alcanzó coeficientes de calibración (RC) y validación (RV) de 0,911 y 0,871 para firmeza, y $RC = 0,891 / RV = 0,774$ para azúcares (R. Li & Fu, 2017). En los sistemas FT-NIR y FT-IR (*Fourier Transform Near-Infrared* y *Fourier Transform Infrared*) aplicados a ‘Brigitta’ y ‘Duke’, se obtuvieron errores mínimos (RMSEP = 0,36 % para SSC y 0,18 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ para fenoles totales)(Sinelli et al., 2008). Con espectrofotómetros portátiles Vis-NIR (450–980 nm), las correlaciones oscilaron entre $r = 0,80\text{--}0,92$ para SSC, firmeza y compuestos funcionales (Guidetti et al., 2008). En el rango THz (terahercios, 0,5–10 THz), una SVM (*Support Vector Machine*) con núcleo gaussiano clasificó cuatro estados de madurez con 84,3 % de precisión, confirmando la capacidad del espectro submilimétrico para caracterizar propiedades estructurales de la epidermis y la turgencia celular (Cruz, 2020).

En la poscosecha, la combinación de visión artificial y espectroscopía ha demostrado alta sensibilidad para cuantificar daño mecánico. Una aplicación web basada en MobileNet SSD/UNet detectó bayas con precisión promedio (AP) de 0,977 y segmentó magulladuras con *Intersection over Union* (IoU) de 0,773, procesando 50 bayas por imagen en menos de 30 s (Art. 116). En espectros hiperespectrales NIR (950–1650 nm), las relaciones de banda ($R_{1112.6/1470.9}$) y el algoritmo MT-COA identificaron daño mecánico 30 min post-impacto (IoU = 70,1 %) (Ni et al., 2022), correlacionando $R^2 = 0,78-0,83$ con la evaluación humana (Jiang et al., 2016). La termografía pulsada alcanzó precisiones de 88 % y 79 % según el cultivar ('Farthing', 'Meadowlark') (Kuzy & Li, 2015). Estos métodos permiten detectar alteraciones térmicas y de conductividad, indicadores fisiológicos tempranos de daño por impacto.

En el ámbito de la sanidad vegetal, los modelos de aprendizaje profundo abarcan desde el análisis foliar hasta la teledetección. Algoritmos geométricos segmentaron daño por herbivoría con alta robustez (da Silva Vieira et al., 2022). Mediante *transfer learning*, redes FCDCNN alcanzaron 98 % de precisión y redujeron el tiempo de cómputo en 25 % (Mohammed et al., 2024), mientras que EfficientNetB3 y ResNet (*Residual Network*) mantuvieron precisiones del 98,1 % en clasificación multiespecie, incluyendo arándano (Bogodukhova et al., 2023; Kushwaha & Rajesh, 2023). Modelos livianos (~2,6 M parámetros) clasificaron plantas con 98,1 % de acierto (B. Yu et al., 2025) y detectaron infestaciones con 84 % de exactitud (Sullca et al., 2019). En la detección de flores, un YOLOv10n reducido (CSP_MSEE + HS-FPN + SFF + LSDECD) alcanzó *recall* = 84,0 % y $mAP_{50} = 89,5$ %, con solo 1,3 M de parámetros, apto para sistemas embebidos y drones (Jian et al., 2025). Para infecciones internas, los espectrofotómetros NIR (650–1700 nm) superaron el 80 % de precisión, y los modelos hiperespectrales 400–1000 nm combinados con PLSDA

(*Partial Least Squares Discriminant Analysis*) reconocieron el 100 % de plantas sanas y el 99 % de enfermas (Y. Huang et al., 2020).

En agricultura de precisión, el principio rector es medir mejor para decidir mejor. En arándano silvestre, los mapas de rendimiento basados en el porcentaje de píxeles azules mostraron $R^2 = 0,98-0,99$ con el rendimiento real ($RMSE = 277 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) (Zaman et al., 2008). El sistema AYMS II, equipado con cámaras μEye y RTK-GPS (*Real-Time Kinematic Global Positioning System*), permitió cartografiar en tiempo real la productividad, revelando heterogeneidad espacial (Chang et al., 2012). Estos resultados se integran en modelos de idoneidad territorial en ArcGIS ModelBuilder, combinando sensores satelitales (QuickBird, Landsat, SPOT, IRS), tecnología LIDAR (*Light Detection and Ranging*) y variables agroclimáticas (pH, drenaje, horas de frío, permeabilidad) para delimitar zonas óptimas de producción (Panda et al., 2010)(Art. 369). En regiones boreales, modelos espaciales demostraron que la productividad aumenta con menor densidad de dosel y exposición suroeste, reflejando la interacción entre microclima y fisiología del rodal (Reich et al., 2018).

El uso eficiente de insumos representa otra aplicación directa del modelamiento inteligente. Pulverizadores con control selectivo de boquillas redujeron el costo de aplicación de 2052–1799 $\text{USD}\cdot\text{ha}^{-1}$ a 1138 $\text{USD}\cdot\text{ha}^{-1}$ (T. Esau et al., 2015), y los equipos multisección dirigieron herbicidas y fungicidas solo a zonas objetivo (T. Esau et al., 2014). Los sistemas VRG (*Variable-Rate Granular*) y MVRG–VRC (*Modified Variable-Rate Granular – Variable Rate Control*) clasificaron suelo, maleza y planta con 94,9 % de precisión, evitando sobredosificación ($p < 0,0001$) sin alterar la eficacia sobre cultivo ($p = 0,58$) (Chang et al., 2014; Chattha et al., 2013). A escala territorial, los VANT UX5 (Trimble) mapearon la cobertura vegetal y la presión de plagas, reduciendo significativamente el uso de agroquímicos (D. C. Percival et al., 2016).

En la clasificación industrial de calidad, los sistemas edge-to-PLC (*Programmable Logic Controller*) integran visión artificial en tiempo real. Una red neuronal convolucional (CNN, Convolutional Neural Network) específica para arándano alcanzó 95,6 % de validación con una latencia de 156,7 ms por imagen en un sistema Raspberry Pi + PLC Siemens S7-1200 (Bracamonte et al., 2022). Un modelo de reconocimiento de patrones redujo 951 rasgos a ≤ 20 mediante selección secuencial, y con SVM/LDA (*Support Vector Machine / Linear Discriminant Analysis*) clasificó defectos fúngicos, arrugas y daños mecánicos con exactitudes del 86–97 % (Leiva-Valenzuela & Aguilera, 2013).

Sostenibilidad ambiental y eficiencia en los sistemas de producción. La sostenibilidad ambiental del cultivo de arándano (*Vaccinium corymbosum* L.) constituye un eje estratégico dentro de la horticultura moderna, enmarcada en la búsqueda de sistemas agrícolas bajos en carbono, eficientes en el uso de recursos y alineados con los principios de economía circular (Salinas-Velandia et al., 2022; Villagrán et al., 2024). En este contexto, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), la aplicación del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y la optimización energética emergen como herramientas clave para cuantificar impactos y diseñar estrategias de mitigación sostenibles.

En Italia, se evaluaron las etapas de pre-cultivo, cultivo y poscultivo en la producción de arándano gigante americano mediante un enfoque de balance de emisiones de GEI. Los resultados demostraron que los mayores aportes a las emisiones totales provienen del uso y eliminación de materiales plásticos, principalmente envases agrícolas y empaques poscosecha. Este hallazgo subraya la urgencia de implementar estrategias de reciclaje, sustitución de plásticos

convencionales por biopolímeros y mejora en la gestión de residuos agrícolas, con el fin de reducir la huella ambiental del sistema productivo (Girgenti et al., 2013).

En Chile, país relevante dentro de la producción mundial de arándanos, se aplicó una metodología de huella de carbono (HC) basada en las normas ISO 14040 y la guía PAS 2050-1, abarcando huertos de producción orgánica. El estudio consideró los insumos, la maquinaria, los servicios, los materiales y el cambio de uso del suelo (LUC, *Land Use Change*), evidenciando variabilidad en los resultados según las prácticas agrícolas. Los mayores aportes a la HC provinieron del uso de fertilizantes orgánicos y del consumo energético, mientras que las estrategias de mitigación más efectivas fueron la reducción de fertilizantes, la implementación de cultivos de cobertura y la sustitución de tractores y bombas de riego ineficientes. Notablemente, el cambio de uso del suelo de cultivos anuales a perennes generó la mayor remoción neta de carbono, actuando como un sumidero que compensa parcialmente las emisiones del sistema (Cordes et al., 2016).

En Estados Unidos, un estudio de ACV identificó las etapas de cultivo, cosecha, poscosecha (congelación) y transporte como los principales puntos críticos ambientales del sistema productivo. Paradójicamente, los resultados mostraron que los arándanos frescos importados desde Chile presentan mejor desempeño ambiental que los producidos localmente, debido a la mayor eficiencia de los sistemas logísticos y agrícolas implementados en el país sudamericano. Este contraste evidencia la necesidad de considerar el factor tecnológico y la eficiencia operativa como variables determinantes en la sostenibilidad global de las cadenas de suministro (Chapa et al., 2019).

En España, un análisis comparativo de ACV realizado sobre cuatro plantaciones, dos orgánicas y dos convencionales, reveló que los impactos ambientales más significativos se asocian

con el uso de fertilizantes sintéticos, combustibles fósiles, plásticos agrícolas, papel y la incineración de restos de poda. Estas actividades representan los principales focos de intervención para reducir el impacto ambiental mediante la adopción de biofertilizantes, energías renovables, materiales biodegradables y compostaje de residuos vegetales, promoviendo una transición hacia un sistema agrícola más circular y sostenible (Pérez et al., 2022). Desde una perspectiva económica, en México se desarrolló un modelo financiero basado en flujos de caja descontados, con el fin de cuantificar la rentabilidad y el riesgo de inversión del cultivo de arándano. Los resultados destacaron la relevancia de incorporar herramientas financieras y de evaluación multicriterio que permitan simular escenarios de exportación, variación de precios y costos de producción. Este enfoque favorece la toma de decisiones estratégicas y la atracción de inversión sostenible en el sector frutícola (Trejo-Pech et al., 2024).

Finalmente, un ACV aplicado a un sistema de producción de bayas con deshidratación osmótica y recubrimiento comestible analizó la contribución ambiental de cada etapa del proceso. La deshidratación osmótica fue la fase con mayor impacto ambiental, seguida del recubrimiento y el empaque. Sin embargo, el elevado margen de rentabilidad del proceso y su capacidad para extender la vida útil y mejorar el valor nutracéutico del producto final justifican su aplicación, siempre que se acompañe de medidas compensatorias que reduzcan su huella ambiental (Mari et al., 2025).

Salud humana y valor nutracéutico del arándano. En las últimas dos décadas, el arándano (*Vaccinium* spp.) ha evolucionado de ser un fruto de alto valor comercial a consolidarse como modelo de estudio en nutrición preventiva y medicina funcional. Su riqueza fitoquímica, basada en antocianinas, flavonoides, ácidos fenólicos y taninos condensados, le otorga una destacada

capacidad antioxidante, antiinflamatoria y moduladora de procesos metabólicos, sustentando su clasificación como alimento funcional y nutracéutico. La literatura reciente, que abarca desde ensayos clínicos controlados hasta estudios moleculares y metaanálisis, converge en un punto clave: el consumo regular de arándanos puede favorecer la cognición, la función cardiovascular, la homeostasis glucolípida, la composición de la microbiota intestinal y la respuesta inmunitaria.

En el ámbito neurocognitivo, una síntesis de nueve ensayos clínicos aleatorizados ($n = 513$) mostró mejoras significativas en memoria episódica y lingüística en adultos mayores con deterioro cognitivo leve, aunque sin efectos consistentes sobre la velocidad de procesamiento, destacando la necesidad de estudios longitudinales con mayor potencia estadística (A. B. N. da Silva et al., 2025). En la misma línea, una revisión de más de 200 estudios documentó reducciones promedio de 5 a 6 % en la presión arterial, mejorías en el perfil lipídico y la glucorregulación, y un efecto positivo sobre la función endotelial y la memoria en adultos mayores, recomendando una ingesta diaria aproximada de 50 mg de antocianinas como referencia práctica (Kalt et al., 2020). En modelos preclínicos, los flavonoides del arándano demostraron efectos neuroprotectores y sinápticamente restauradores, con implicaciones para la prevención de enfermedades neurodegenerativas como Alzheimer (Kalt, 2004; Williams & Spencer, 2012).

Desde la perspectiva fitoquímica, el arándano destaca por su elevada concentración de polifenoles y su capacidad antioxidante total (Khoo et al., 2012; Routray & Orsat, 2011). Comparaciones en diez variedades revelaron amplias diferencias en composición funcional y aptitud tecnológica: ‘Centurion’, ‘Elliott’ y ‘Yuanlan’ presentaron alto contenido de antocianinas y polifenoles, idóneas para procesamiento industrial, mientras que ‘Lanfeng’, ‘Brigitta’ y ‘Brilliant’ sobresalieron por sabor, firmeza y apariencia, características deseables para consumo fresco. La variedad ‘Zhaixuan No. 4’ combinó ambas cualidades, con rendimiento elevado y

calidad sensorial superior. En promedio, las antocianinas representan más del 70 % de los polifenoles totales y se correlacionan con flavonoides y ácido elágico (ZHAO et al., 2025). En términos de matriz alimentaria, el fruto presenta sólidos solubles (~10,3 %), una relación azúcar/ácido (~10,9) y polifenoles totales (~4,9 mg·g⁻¹), parámetros de relevancia para la estandarización industrial y el valor funcional (W. L. Wu et al., 2012).

En los mecanismos fisiológicos, múltiples estudios atribuyen a las antocianinas acciones antioxidantes, antiinflamatorias, hipolipemiantes, antidiabéticas y anticarcinogénicas, coherentes con beneficios frente a diabetes mellitus tipo 2 (DM2), enfermedad cardiovascular (ECV), cáncer y procesos inflamatorios crónicos (Routray & Orsat, 2011; Y. Wu et al., 2023). En líneas celulares, los polifenoles del arándano muestran citotoxicidad selectiva frente a cáncer de mama y colon, modulada por el tipo de procesamiento y la digestión simulada. Tecnologías no térmicas como liofilización y ultrasonido asistido incrementan la bioaccesibilidad y estabilidad de los compuestos fenólicos, reforzando su potencial nutracéutico (Liović et al., 2022). En un modelo murino de colitis inducida por dextrano sulfato sódico (DSS), complejos cianidina-3-glucósido/pectina tratados por alta presión hidrostática (HHP-C3G-BP) redujeron la severidad clínica, inhibieron NF-κB, regularon Bcl-2/Bax y caspasa-3, y restauraron la microbiota, demostrando su capacidad inmunomoduladora y gastroprotectora (Tan et al., 2022).

Una vía emergente es la de las vesículas extracelulares de arándano (B-EVs, *Blueberry Extracellular Vesicles*), estructuras nanométricas resistentes a la digestión simulada que conservan su integridad en el tracto intestinal. Estas B-EVs interactúan con células epiteliales reduciendo la expresión de mediadores proinflamatorios (IL-1β, IL-8) y modulando vías inmunes asociadas a NF-κB y TLR5, sugiriendo un papel activo en la integridad de la barrera intestinal y la homeostasis inmunometabólica (Leng et al., 2023). En términos de biodisponibilidad, un ensayo cruzado en

adultos sanos mostró que el consumo de 250 g de arándanos enteros, comparado con jugo, favorece una mayor diversidad de metabolitos fenólicos plasmáticos y urinarios, resaltando la influencia de la matriz alimentaria en la liberación y absorción de compuestos bioactivos (Langer et al., 2018).

En la dimensión cardiovascular, estudios bibliométricos y metaanálisis relacionan el consumo de jugos ricos en antocianinas y flavonoides con descensos en presión arterial y mejoras en la función endotelial (Y. Wang et al., 2021). Revisiones centradas en *Vaccinium uliginosum* y *V. myrtillus* atribuyen a sus polifenoles propiedades antioxidantes, antibacterianas, antiinflamatorias y quimiopreventivas, con efectos positivos en salud ocular y vascular (Janowska & Wujec, 2023). De forma complementaria, una revisión sobre residuos pospresado (bagazo) de especies del género *Vaccinium* incluyendo *V. corymbosum*, *V. macrocarpon*, *V. oxycoccus* y *V. vitis-idaea*—destacó su potencial como fuente de compuestos fenólicos residuales con funciones preventivas o coadyuvantes frente a ECV, DM2, cáncer y enfermedades neurodegenerativas (Kunrade et al., 2020).

En diabetes, un complejo rutina-zinc (flavonoide antioxidante + mineral esencial) mostró efectos antidiabéticos superiores a extractos o soluciones minerales por separado, abriendo una línea prometedora en el desarrollo de complejos minerales naturales funcionales (Toporkova et al., 2021). En el manejo de enfermedad renal crónica, se exploró la reducción del contenido de potasio en frutos mediante restricción controlada de K en fertirriego, con el objetivo de adecuar el arándano a dietas hipopotasémicas (Takahashi et al., 2021).

La actividad antimicrobiana de los polifenoles del arándano se manifiesta a través del daño en la membrana bacteriana y la pérdida de integridad celular. Extractos han inhibido *Salmonella enterica*, *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus* y *Campylobacter* spp., mostrando potencial para reducir el uso de antibióticos en la industria alimentaria y contribuir a

sistemas de producción más seguros y sostenibles (Das et al., 2017). Mezclas de extractos de arándano rojo y azul, semilla de uva y orégano exhibieron efecto sinérgico frente a *Helicobacter pylori*, potenciando las actividades antioxidante y antimicrobiana y proponiendo alternativas dietarias coadyuvantes en patologías gastrointestinales (Vattem et al., 2005).

El procesamiento condiciona de forma directa la bioactividad funcional. Mermeladas de arándano, incluso versiones reducidas en azúcar con concentrado de jugo de uva blanca—conservaron altos niveles de fenoles, flavonoides y antocianinas, reduciendo la formación de especies reactivas de oxígeno (ERO) y la peroxidación lipídica en modelos celulares, lo que respalda su uso como alimento funcional (Seo et al., 2016). Jugos ricos en antocianinas mantienen un elevado potencial antioxidante, aunque su efectividad depende del proceso tecnológico y la biodisponibilidad final (Yuan & Baduge, 2018). A nivel aplicado, productos horneados enriquecidos con 5 % de arándano azul aumentaron significativamente el contenido fenólico y la capacidad antioxidante, evidenciando su viabilidad económica como ingrediente nutracéutico (Aksoylu et al., 2015).

Producción en ambientes controlados e innovación bajo invernadero. El uso de estructuras protegidas y sistemas de control ambiental en el cultivo de arándano (*Vaccinium corymbosum* L.) se consolida como una estrategia tecnológica clave para extender la temporada productiva, mejorar la eficiencia en el uso de agua y mitigar riesgos climáticos. Los invernaderos y túneles altos permiten modificar el microclima local mediante el control de radiación, temperatura y humedad, lo que impacta de forma directa la fenología, el rendimiento y la calidad del fruto, además de facilitar la incorporación de tecnologías inteligentes (IoT, *Internet of Things*) orientadas a la agricultura de precisión y la sostenibilidad (Villagran, Toro-Tobón, et al., 2024).

En Portugal, los ensayos bajo túneles demostraron que el uso de cubiertas plásticas de polietileno adelantó la floración, el cuajado y la maduración en 4, 7 y 10 días, respectivamente, incrementando la materia seca hasta 18,2 % y la productividad a 152 frutos por planta (363 g). En contraste, la malla plateada redujo el número y peso de frutos, la radiación fotosintéticamente activa (PAR) en 51 % y el flujo fotónico (PFD) en 54 % (Pereira et al., 2021). En Chile, los cultivares ‘Blue Ribbon’ y ‘Top Shelf’ bajo coberturas plásticas mostraron mayor conductancia estomática y eficiencia fotosintética bajo déficit hídrico frente a cultivos a cielo abierto, confirmando una mejor adaptación fisiológica (Calderón-Orellana et al., 2023). En túneles con transmisividad lumínica de 77–91 %, la instalación de mallas antiinsectos (0,243 × 0,773 mm) redujo notablemente poblaciones de áfidos y *Drosophila suzukii*, sin afectar el rendimiento ni la calidad, validando su eficacia dentro del manejo integrado de plagas (MIP) (Couture et al., 2023).

Los sistemas inteligentes de control climático marcan la evolución de los invernaderos hacia modelos de alta eficiencia. En Jiangsu (China), un invernadero tipo Venlo equipado con sensores IoT y algoritmos multifactoriales de control ambiental adelantó la cosecha en un mes e incrementó el rendimiento por planta en hasta 94,7 %, dependiendo del cultivar, con un aumento del peso medio del fruto de 10,9 % (Lihong et al., 2021). En Europa Central, la configuración del sistema de plantación modificó el comportamiento varietal: ‘Aurora’ rindió más en caballones, mientras que ‘Brigitta’ lo hizo en macetas, observándose también variaciones en compuestos fenólicos, lo que evidencia que el sustrato incide tanto en el rendimiento como en la calidad bioquímica (Smrke et al., 2022).

El crecimiento de la superficie bajo protección ha sido decisivo para mitigar riesgos térmicos y estabilizar la oferta. En Nueva Zelanda, los túneles plásticos impulsaron la expansión de la hidroponía orientada a exportación, aprovechando la condición de país libre de mosca de la

fruta (Nichols, 2019). En China, la superficie cultivada pasó de 681 ha (2006) a 31.210 ha (2015), con fuerte adopción de túneles e invernaderos en regiones templadas, impulsados por cultivares como ‘Duke’ y ‘Bluecrop’ (Y. Li et al., 2016)(Art. 310). En Mississippi, los highbush sureños bajo túnel alto adelantaron la cosecha 4 a 5 semanas, alcanzando rendimientos de 6,5 a 7,5 t·ha⁻¹ y sólidos solubles de 14,2 %, con un incremento térmico de +3 a +10 °C respecto al exterior (T. Li & Bi, 2019).

Los efectos microclimáticos positivos se reflejan en la fisiología y el balance hídrico. En Chile, 1296 plantas de ‘O’Neal’ bajo túnel alto registraron temperaturas 10 a 12 °C superiores y una PAR difusa 150 % mayor, lo que elevó la conductancia estomática hasta 99 % y el rendimiento 44 %, adelantando la cosecha 14 días (Retamal-Salgado et al., 2015). En Florida, túneles de 5,5 m redujeron los eventos de congelación de 61 a solo 3 días por temporada ≤ 1 °C, con rendimientos 4 veces mayores y reducción del 90 % en el uso de agua para protección antiheladas (B. M. Santos & Salame-Donoso, 2012). Estos resultados validan la eficiencia térmica e hídrica del ambiente protegido como mecanismo de resiliencia.

La sincronización fenológica con ventanas de mercado también se ha optimizado. En España, túneles tipo italiano sin calefacción permitieron rendimientos >1,7 kg/planta, destacando ‘Sharpblue’ por su estabilidad interanual (Ciordia et al., 2006). En Japón, el forzado térmico adelantó la floración y la cosecha 30 a 40 días, con cuajados >75 %, frutos de >2 g y sólidos solubles >12 % (Ozeki & Tamada, 2004). En Canadá, cubiertas parciales ajustaron la maduración ± 14 días, manteniendo >90 % de calidad comercial tras almacenamiento controlado (Hicklenton et al., 2002).

No obstante, el uso de sistemas protegidos intensivos introduce nuevos desafíos fitosanitarios. En Norteamérica, los túneles altos duplicaron la productividad pero favorecieron

incrementos de *Tetranychus urticae*, *Aleyrodidae* y *Frankliniella* spp. (Demchak, 2009). En Georgia, el cierre invernal adelantó la floración ≈ 40 días y mejoró el contenido de antocianinas y sólidos solubles en ‘Emerald’, aunque eventos de helada comprometieron parte del potencial (Ogden & van Iersel, 2009). En Europa, los invernaderos climatizados adelantaron la cosecha 2 meses y los túneles plásticos 5 a 6 semanas, mientras las cubiertas impermeables la retrasaron 2–3 semanas, permitiendo ajustar la oferta según la demanda comerciales (Bal, 1996).

Adicionalmente, se elaboró una tabla comparativa por tipo de manejo (riego y fertirriego, nutrición, manejo de plagas y enfermedades, tecnologías poscosecha, prácticas de sostenibilidad, entre otros), donde se sintetizan el número de estudios por categoría, los beneficios reportados, los riesgos o limitaciones y un juicio cualitativo sobre el nivel de evidencia disponible (alto, medio, bajo). Esta síntesis permite visualizar de forma integrada qué tecnologías cuentan con mayor respaldo científico, cuáles son emergentes y cuáles requieren aún investigación adicional antes de ser promovidas de manera amplia entre productores.

Tabla 8.

Tabla comparativa tipos de manejo.

Tipo de manejo	Enfoque general identificado en la revisión	Prácticas / tecnologías clave	Beneficios reportados (productividad, calidad, sostenibilidad)	Brechas y advertencias para transferencia tecnológica
Riego / fertirriego	Migrar de riegos “a calendario” a riego de precisión, con fertirriego automatizado y soporte en sensores/IoT. El agua se maneja como variable de calidad y sostenibilidad, no solo como volumen aplicado.	<ul style="list-style-type: none"> • Riego por pulsos en sustratos arenosos/corteza, con aumento del número de pulsos diarios para reducir lixiviación. • Riego deficitario controlado (~80% ET) bajo túneles plásticos para mejorar firmeza y sólidos solubles. • Sistemas de fertirriego inteligente basados en IoT (sensores, algoritmos de balance hídrico). • Uso de sensores (humedad, CE, potencial hídrico) como alertas tempranas de estrés. 	<ul style="list-style-type: none"> • Menor lixiviación de agua y nutrientes; reducción de pérdidas y contaminación. • Ahorro de agua y fertilizante, reducción de mano de obra y aumento de rendimiento con sistemas automatizados. • Mejora de firmeza y calidad funcional (fenoles, antocianinas) con estrés hídrico moderado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los parámetros de riego óptimos no están calibrados para altiplano cundiboyacense (caudal, número de pulsos, umbrales). • Poca información sobre efectos de largo plazo del riego deficitario y la concentración de sales en suelo/sustrato. • Riesgo de sobre-tecnificación (comprar IoT sin saber interpretar datos); se requieren reglas simples y localmente validadas.
Nutrición (suelo, sustrato y foliar)	Enfoque en nutrición mineral ajustada a la fisiología del arándano (especie acidófila y muy sensible a forma de N y manejo de Ca y Si). La nutrición se integra con el riego (fertirriego) y la calidad poscosecha.	<ul style="list-style-type: none"> • Manejo de la forma de N (mayor uso de amonio frente a nitrato en ciertas etapas). • Diseño de sustratos (turba, fibra de coco, proporción de corteza) para mejorar retención de agua y nutrientes. • Uso de bioestimulantes con silicio y aplicaciones de calcio foliar en precosecha. • Empleo de fuentes orgánicas de N para reducir enfermedades del suelo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor rendimiento y eficiencia en el uso de nutrientes al ajustar forma y dosis de N. • Mejores resultados en sistemas intensivos en maceta/invernadero con sustratos bien diseñados. • Mejor calidad funcional y poscosecha (firmeza, fenoles, antioxidantes) asociada a Si y Ca. • Reducción de enfermedades de suelo al usar fuentes orgánicas de N. 	<ul style="list-style-type: none"> • No existen aún “recetas” claras por cultivar y región (curvas de extracción y programas de fertilización locales). • Riesgo de sobredosificar N amoniacal sin monitoreo de pH y CE, generando desbalances nutricionales. • Resultados con Si y Ca dependen del momento fenológico y ambiente; no son recomendaciones universales.
Sanidad / fitosanitario	Cambio claro hacia manejo integrado sanitario: identificación de nuevos patógenos, uso de diagnóstico molecular, control biológico y compatibilidad con enemigos naturales. Sanidad como pilar de sostenibilidad, no solo control químico.	<ul style="list-style-type: none"> • Identificación de patógenos clave y nematodos asociados a pérdidas de rendimiento. • Uso de hongos entomopatógenos y nematodos entomopatógenos para control biológico. • Introducción y manejo de enemigos naturales de ácaros y otros insectos. • Evaluación de la toxicidad relativa 	<ul style="list-style-type: none"> • Integración de diagnóstico temprano, biocontrol, resistencia genética y uso racional de químicos. • Menor dependencia de insecticidas de amplio espectro y mejor conservación de enemigos naturales. • Potencial de monitoreo avanzado para anticipar 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayos de biocontrol y diagnóstico avanzado suelen ser de corta duración; falta evaluación multianual. • Sin tablas de compatibilidad, los productores pueden mantener mezclas químicas que afectan enemigos naturales. • Tecnologías de diagnóstico molecular o espectral son costosas;

	<p>de insecticidas sobre controladores biológicos.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Métodos de detección temprana (fluorescencia, imágenes) y relación nutrición–sanidad. 	<p>problemas antes de que se reflejen en pérdidas.</p>	<p>hay que traducirlas a protocolos simples de monitoreo.</p>
<p>Poscosecha</p> <p>Énfasis en tecnologías no térmicas, recubrimientos y empaques funcionales/inteligentes, junto con una cadena de frío adecuada y mecanización suave de cosecha/procesamiento. La poscosecha se ve como espacio clave para capturar valor agregado y circularidad.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnologías no térmicas: presión hidrostática alta (HHP), luz pulsada, campos eléctricos pulsados, termosonicación. • Recubrimientos biopoliméricos y empaques funcionales/inteligentes. • Estrategias de estabilización de pigmentos (copigmentación, encapsulación, acidificación controlada). • Procesamiento con enzimas (pectinasas) para aumentar rendimiento de jugos y concentrar antocianinas. • Biorrefinería de residuos para obtener ingredientes antioxidantes, colorantes y empaques activos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta retención de antocianinas, fenoles y vitamina C con procesos no térmicos, prolongando vida útil. • Mejora de calidad funcional en frutos almacenados adecuadamente (frío y humedad relativa alta). • Potencial de cadenas de valor circulares mediante uso de residuos en biorrefinería. 	<ul style="list-style-type: none"> • La mayoría de tecnologías no térmicas están en fase de laboratorio o piloto; falta información de escalamiento industrial. • Alto costo de equipos para pequeños productores; es clave evaluar rentabilidad y volumen mínimo. • Falta de protocolos estándar comparables (temperaturas, tiempos, intensidades) por cultivar y tipo de producto.

Nota. En esta tabla se muestran los cuatro tipos de manejo del arándano.

2.2.3 *Objetivo específico 3*

Propuesta de líneas de investigación en la producción de arándano

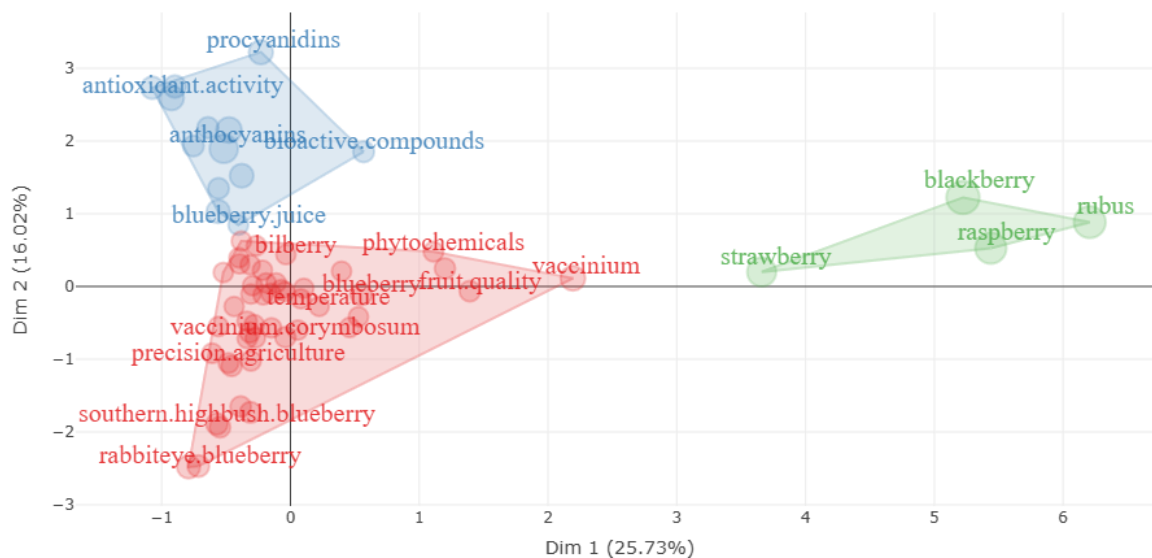
Con la intención de detectar vacíos de conocimiento y tendencias futuras de investigación se realizó un análisis del gráfico de correspondencias múltiples (Figura 15); este permite observar con claridad la segmentación del conocimiento científico sobre el género *Vaccinium*, donde tres núcleos conceptuales se distribuyen a lo largo de los ejes factoriales, explicando más del 40 % de la variabilidad total. El eje 1 (25.73 %) separa los estudios agronómicos y genéticos, centrados en especies cultivadas como *V. corymbosum*, *V. ashei* y *V. virgatum*, de aquellos que exploran las propiedades químicas y antioxidantes de los compuestos bioactivos. Por su parte, el eje 2 (16.29 %) diferencia los enfoques analíticos y de laboratorio de los trabajos de caracterización fisiológica y productiva. Esta organización evidencia un vacío estructural entre la biología vegetal y la ciencia de los alimentos, es decir, entre la comprensión de los procesos fisiológicos y la valoración del potencial nutracéutico del fruto. La falta de integración entre los estudios de fisiología, genética y metabolómica limita el desarrollo de modelos predictivos sobre cómo las condiciones de cultivo, el manejo del riego o las prácticas de poscosecha que influyen en la concentración de antocianinas, proantocianidinas y otros fenoles relevantes para la calidad y la salud humana.

De manera complementaria, la Figura 15 también muestra que las especies silvestres o menos estudiadas, como *V. virgatum* y *V. ashei*, ocupan una posición periférica, lo que refleja vacíos de conocimiento genético y adaptativo en la exploración de la diversidad del género *Vaccinium*. Esta carencia limita la identificación de genes y rutas metabólicas asociadas a la resistencia al estrés térmico o hídrico, un aspecto crítico ante el contexto del cambio climático. Además, las líneas de investigación vinculadas con el control biológico, la calidad sensorial, y el efecto de la microbiota del suelo aparecen débilmente representadas, lo que obstaculiza la

generación de estrategias sostenibles e integradas de manejo agronómico. También destaca la escasa interrelación entre la fisiología del fruto y los avances en bioprocesos o nanotecnología aplicados a la conservación y valorización de compuestos bioactivos, lo que constituye un vacío estratégico para el escalamiento industrial.

Figura 15.

Análisis de correspondencias múltiples del área del conocimiento analizada.



Nota. En la figura se evidencia el análisis de correspondencias múltiples del área de conocimiento analizada

En cuanto a las tendencias emergentes, el desplazamiento del grupo azul indica una evolución hacia la digitalización del estudio del arándano, con un marcado crecimiento en el uso de procesamiento de imágenes, aprendizaje profundo (*deep learning*) y modelado predictivo. Estas herramientas están comenzando a aplicarse en la detección de enfermedades, la estimación de rendimiento y la clasificación de frutos según color, firmeza o contenido fenólico. Tal convergencia entre inteligencia artificial y fenomica apunta a una agricultura de precisión sensorizada, donde los sistemas de visión hiperespectral, el análisis de datos en tiempo real y la

robótica agrícola se integren en la gestión del cultivo. En este sentido, el desarrollo de modelos de correlación entre imágenes digitales, variables ambientales y concentración de metabolitos podría transformar los métodos de evaluación de calidad, reduciendo pérdidas poscosecha y fortaleciendo la trazabilidad y sostenibilidad del sistema productivo.

Por último, el grupo verde, vinculado a *Rubus*, *Fragaria* y *Sambucus*, representa una línea de expansión interdisciplinaria e intergenérica que puede redefinir la investigación futura en berries. La proximidad semántica entre *Vaccinium* y estos géneros sugiere una tendencia hacia la comparación de rutas biosintéticas, perfiles antioxidantes y mecanismos de adaptación ecológica, lo que permitirá identificar marcadores genéticos y metabólicos compartidos. Esto abre la posibilidad de programas de mejoramiento genético integrados para el desarrollo de variedades con mayor estabilidad antioxidante, tolerancia climática y calidad funcional. En síntesis, el gráfico evidencia un cambio de paradigma: de una investigación fragmentada y descriptiva hacia un enfoque multidimensional, digital y biotecnológico, donde la interacción entre fisiología, genómica, inteligencia artificial y sostenibilidad marcará el rumbo de la investigación avanzada en *Vaccinium* y otras berries durante la próxima década.

En este orden de ideas, y teniendo en cuenta los resultados del análisis sobre los principales enfoques de manejo del cultivo y las tendencias emergentes, así como la evolución tecnológica y científica del cultivo de arándano, es evidente la necesidad de superar los vacíos metodológicos y temáticos actuales y fortalecer la integración interdisciplinaria, por lo que proponen cuatro líneas de investigación prioritarias:

Se describen cuatro líneas de investigación las cuales

1. ***Estandarización experimental y redes cooperativas.*** Desarrollar estudios multisitios y multianuales con metodologías homogéneas que permitan comparar estrategias de

propagación, nutrición, manejo hídrico, fisiología, cosecha y poscosecha bajo distintos sistemas productivos. Se recomienda establecer un conjunto mínimo de indicadores: fisiológicos (gs, A_n , Ψ , eficiencia PSII), de calidad ($^{\circ}$ Brix, acidez titulable, firmeza, vida útil), de inocuidad (reducciones log de patógenos), de productividad ($\text{kg}\cdot\text{planta}^{-1}$, $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) y de sostenibilidad (agua, energía, ACV, HC).

2. ***Integración de herramientas digitales y modelamiento inteligente.*** Promover el uso de inteligencia artificial (IA), visión computacional y gemelos digitales de cultivo que integren sensores IoT, fenómica, y modelos microclimáticos y fisiológicos. Su validación debe incluir métricas de desempeño (R^2 , RMSE, MAPE) y esquemas de interoperabilidad que favorezcan el uso compartido de datos.
3. ***Sostenibilidad y circularidad tecnológica.*** Evaluar cuantitativamente el impacto ambiental y energético de los sistemas de producción mediante análisis de ciclo de vida (ACV) y huella de carbono, incluyendo tecnologías emergentes como electrodiálisis-ósmosis directa (EDFO), recubrimientos biodegradables, empaques activos y valorización de residuos en esquemas de biorrefinería agrícola.
4. ***Transferencia tecnológica y fortalecimiento de capacidades.*** La adopción de innovaciones depende de la articulación entre investigación, productores y políticas públicas. Se requieren programas de mejoramiento genético pro-mecanización y resiliencia climática, incentivos a la certificación sostenible y formación técnica en gestión de datos, automatización y eficiencia energética. En conjunto, estas acciones permitirán consolidar un marco metodológico y tecnológico coherente para el manejo integral, sostenible y digitalizado del cultivo de arándano, articulando productividad, calidad e impacto ambiental dentro de un enfoque de agricultura inteligente y circular.

Analizando las líneas de investigación propuestas se realiza una tabla de priorización con base en tres criterios: (i) impacto esperado en el cierre de brechas de la Agenda de I+D+i y en la competitividad del cultivo, (ii) costo relativo de implementación (inversión en infraestructura, tecnología y capacidades humanas) y (iii) factibilidad regional según las capacidades instaladas en los departamentos de Cundinamarca, Boyacá y Antioquia

Tabla 9.

Priorización líneas de investigación.

Línea de investigación	Impacto (B/M/A)	Costo (B/M/A)	Factibilidad regional*	Prioridad global
Transferencia tecnológica y fortalecimiento de capacidades	Alta	Media	Alta (Cun, Ant); Media (Boy)	1
Estandarización experimental y redes cooperativas	Alta	Media-Alta	Alta	2
Sostenibilidad y circularidad tecnológica	Alta	Media-Alta	Media	3
Integración de herramientas digitales y modelamiento	Muy alta (largo plazo)	Alta	Media-Baja	4

Nota. En la tabla se muestran las 4 líneas de investigación con su impacto, costo y factibilidad.

2.2.4 Objetivo específico 4

Valorar la contribución del conocimiento científico en la producción de arándano al cumplimiento de los requerimientos de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) del Ministerio de Agricultura de Colombia, a partir de la información bibliométrica recopilada e

interpretada, identificando cómo los avances científicos pueden fortalecer la competitividad y sostenibilidad del cultivo en el país.

A partir del desarrollo del presente trabajo se identificaron aportes de la investigación existente y disponible al cierre de brechas reconocidas en los procesos de construcción de demandas de I+D+i desarrollados por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, sin embargo se hace especial énfasis en los vacíos de investigación que pueden ser relevantes para el país, teniendo en cuenta la necesidad de fortalecer el sistema productivo desde la base de la calidad requerida en los materiales y los productos terminados, más cuando existen perspectivas de cubrimiento del mercado interno y de exportación.

En cuanto a **Material vegetal y propagación**, las innovaciones en la propagación y el mejoramiento del arándano reflejan la convergencia entre biotecnología, sanidad vegetal y adaptación climática. No obstante, se mantienen desafíos relevantes que se deben abordar, como la limitada caracterización funcional de genes asociados a calidad y resistencia, la escasa validación multianual de clones micropropagados, la falta de estandarización internacional de protocolos in vitro, la integración de herramientas moleculares con la evaluación agronómica y la trazabilidad genética.

Los avances en las **prácticas agronómicas y estrategias de manejo cultural para la optimización del cultivo de arándano** muestran una tendencia hacia la sostenibilidad tecnológica, combinando innovación en sustratos, coberturas, acolchados y reguladores fisiológicos. Sin embargo, la revisión sistemática revela vacíos significativos: la mayoría de los estudios carece de análisis multianual, comparaciones entre regiones y métricas estandarizadas de desempeño ambiental. A pesar de los progresos observados, persisten retos vinculados con la optimización del balance energético en cultivos protegidos, la evaluación del ciclo de vida de

materiales biodegradables y la integración de indicadores de sostenibilidad en los sistemas de manejo. En consecuencia, se propone avanzar hacia un modelo de manejo cultural basado en evidencia cuantitativa y ecofisiológica, que vincule productividad, eficiencia hídrica y resiliencia frente al cambio climático, consolidando al arándano como un cultivo de referencia en la horticultura sostenible del país.

Las **estrategias integradas de riego, fertirriego y nutrición mineral en el cultivo de arándano** muestran una convergencia entre eficiencia fisiológica y sostenibilidad tecnológica. La evidencia científica confirma que la sincronización entre la fuente y forma de aplicación de nutrientes, la frecuencia de riego y la gestión tecnológica del agua son factores determinantes para mejorar la productividad y la calidad del fruto. No obstante, persisten vacíos de conocimiento en torno a la evaluación a largo plazo de los efectos combinados de la nutrición y el manejo hídrico sobre la huella ambiental, la eficiencia energética y la resiliencia del sistema. Avanzar hacia modelos basados en indicadores fisiológicos integrados y tecnologías de monitoreo en tiempo real permitirá optimizar los recursos y consolidar sistemas productivos más sostenibles frente a las limitaciones climáticas y de disponibilidad hídrica.

Los **enfoques integrados para el manejo sanitario y fitosanitario del arándano** muestran un progreso significativo hacia un enfoque sanitario integral, que combina herramientas de diagnóstico molecular, resistencia genética, control biológico y uso racional de agroquímicos. Sin embargo, persisten desafíos relevantes: la limitada evaluación multianual de la eficacia de agentes biológicos, la escasez de estudios sobre interacción microbioma–patógeno y la necesidad de cuantificar los impactos ambientales de las estrategias químicas. Avanzar hacia un manejo sanitario basado en principios de ecología microbiana, vigilancia molecular temprana y validación

fisiopatológica en campo permitirá fortalecer la resiliencia fitosanitaria del arándano frente al cambio climático y los nuevos escenarios de intensificación productiva.

Sobre la **fisiología del cultivo y regulación ecofisiológica bajo ambientes controlados** la evidencia apoya una ingeniería ecofisiológica del cultivo bajo cobertura: (i) gestión espectral prudente (LC) con verificación multianual, (ii) cierre de ciclos de agua y nutrientes (EDFO) con monitoreo de CE, (iii) regulación fenológica basada en días cortos/vernalización/HC y manejo fino de polinización, (iv) diseño microclimático (sombra moderada y filtrado UV-B) que preserve PSII, y (v) uso selectivo de bioestimulantes para amortiguar estrés abiótico. La priorización de estos ejes, calibrados a cultivar y ventana comercial, permite ganar precocidad y calidad sin comprometer la sostenibilidad fisiológica del sistema.

En el campo de **cosecha del arándano: transición hacia sistemas mecanizados y asistidos** se observa que el arándano transita hacia una mecanización progresiva sustentada en cuatro pilares: (i) asistencia humana inteligente como fase intermedia, (ii) rediseño ergonómico con materiales de absorción de impacto, (iii) diagnóstico óptico para la determinación fisiológica del punto de cosecha, y (iv) mejoramiento genético orientado a la mecanización. Este proceso no solo reduce la dependencia laboral, sino que integra la ingeniería mecánica y la fisiología del fruto, buscando un equilibrio entre eficiencia, calidad poscosecha y sostenibilidad tecnológica.

En cuanto a las **Tecnologías poscosecha y dinámicas de almacenamiento y comercialización se puede indicar que** las tecnologías no térmicas (HHP, LP, LPEF/PEF/MPEF, termosonicación) sostienen color y bioactivos con inactivación microbiana eficaz, pero requieren calibración por cultivar/matriz. Recubrimientos y empaques funcionales/inteligentes extienden vida útil y habilitan trazabilidad de frescura; copigmentación, encapsulación (incl. proteínas portadoras) y acidificación controlada reducen degradación de antocianinas; la cadena de frío y el

manejo mecánico (impactos, goteo) son determinantes de firmeza/pardeamiento; la biorrefinería de residuos viabiliza ingredientes antioxidantes y empaques activos. Persisten retos: homogeneizar cinéticas en condiciones comerciales, escalar con análisis costo-beneficio y asegurar comparabilidad entre estudios; resolverlos cerrará la brecha laboratorio-industria y consolidará la competitividad del arándano en fresco y transformación. El panorama tecnológico del arándano converge hacia procesos de estabilización sostenibles que equilibran calidad, inocuidad y valor funcional. Las tecnologías no térmicas, como la presión hidrostática alta (HHP), la luz pulsada (LP), los campos eléctricos pulsados (LPEF/PEF/MPEF) y la termosonicación, preservan color, textura y compuestos bioactivos al tiempo que garantizan una inactivación microbiana eficaz, aunque su desempeño depende de la calibración según cultivar y matriz. Los recubrimientos biopoliméricos y empaques funcionales o inteligentes prolongan la vida útil, mantienen la firmeza y habilitan esquemas de trazabilidad de frescura, mientras que estrategias de copigmentación, encapsulación (incluidas matrices proteicas) y acidificación controlada mitigan la degradación de antocianinas y fenoles. En paralelo, la cadena de frío, la velocidad de congelación y el manejo mecánico (impactos, goteo, presión en envases) emergen como factores críticos para conservar la firmeza y prevenir el pardeamiento. La valorización integral de residuos mediante enfoques de biorrefinería se proyecta como eje de circularidad, permitiendo generar ingredientes antioxidantes, colorantes naturales y empaques activos a partir de subproductos agroindustriales. Sin embargo, persisten vacíos relacionados con la homogeneización de cinéticas de degradación en condiciones comerciales, la evaluación integral de escalamiento y costo-beneficio y la comparabilidad metodológica entre estudios. Superar estos retos permitirá cerrar la brecha entre laboratorio e industria, optimizar la sostenibilidad de las cadenas de transformación y consolidar la

competitividad global del arándano tanto en el mercado fresco como en productos de alto valor añadido.

Frente al **modelamiento, visión computacional y agricultura de precisión en el cultivo de arándano**, la evidencia demuestra que la integración de visión artificial, espectroscopía, modelamiento espacial y automatización industrial está transformando la cadena del arándano hacia un sistema predictivo, eficiente y resiliente. Los beneficios cuantificables incluyen mejoras en rendimiento (R^2 hasta 0,89), calidad ($r \geq 0,80$; RMSEP = 0,36 % para SSC), sanidad (precisiones de 98–100 %), eficiencia de insumos (reducción de costos hasta 1138 USD·ha⁻¹) y resiliencia operativa desde la parcela hasta la línea de empaque, consolidando un modelo de producción basado en información, adaptativo y tecnológicamente convergente.

En términos de **Sostenibilidad ambiental y eficiencia en los sistemas de producción** las evidencias revisadas demuestran que la sostenibilidad ambiental del arándano depende de un enfoque sistémico que combine: (i) la cuantificación objetiva de impactos mediante ACV y HC, (ii) la innovación tecnológica orientada a la eficiencia energética y la reducción de GEI, y (iii) la integración de instrumentos financieros y de gobernanza ambiental que permitan cerrar los ciclos de materia y energía. Este marco impulsa la consolidación de sistemas productivos más resilientes, competitivos y climáticamente inteligentes, pilares esenciales de la fruticultura sostenible del siglo XXI.

En cuanto a **salud humana y valor nutracéutico del arándano** la evidencia global converge en que el arándano, gracias a su abundancia en antocianinas y taninos condensados (proantocianidinas), ejerce efectos protectores frente a infecciones del tracto urinario, trastornos oculares y deterioro asociado a la edad, incluyendo pérdida de función cognitiva y muscular (Girard & Sinha, 2006). En conjunto, el cuerpo de evidencia científica respalda el papel del

arándano como alimento nutracéutico integral, con beneficios demostrados en salud cardiometabólica, neurocognitiva, gastrointestinal e inmunometabólica, y enfatiza la necesidad de ensayos clínicos más extensos y estandarizados que consoliden las dosis, matrices y biomarcadores clínicos de su efectividad.

Finalmente, la producción en ambientes controlados e innovación bajo invernadero potencia la productividad, la calidad y la eficiencia del uso de recursos, posicionando los invernaderos y túneles como plataformas estratégicas de intensificación sostenible. Sin embargo, su adopción exige gestión precisa del microclima, integración de sensores IoT, modelamiento térmico y protocolos de bioseguridad, de modo que el avance tecnológico no derive en vulnerabilidad fitosanitaria ni en sobrecostos energéticos. El futuro inmediato apunta a sistemas híbridos de control climático pasivo-activo, integrados con energías renovables (solar térmica y fotovoltaica) y estrategias de inteligencia artificial para la predicción fenológica, consolidando un paradigma de agricultura protegida resiliente, tecnológicamente inteligente y climáticamente adaptativa.

2.2.4.1 Mapeo de los hallazgos frente a las demandas de la Agenda I+D+i por departamento. A partir de la información sintetizada en la Tabla 9 y de los resultados obtenidos en los objetivos específicos 2 y 4, la Tabla 10 presenta el mapeo entre algunas de las demandas prioritarias de la Agenda Dinámica Nacional de I+D+i para arándano en los departamentos de Boyacá, Cundinamarca y Antioquia y los hallazgos de la revisión sistemática. En cada caso se especifica el nivel de atención actual en la literatura, las brechas identificadas y las líneas de investigación propuestas que contribuyen a cerrarlas.

Tabla 10.

Relación entre hallazgos de la revisión y demandas de la Agenda I+D+i por departamento.

Departamento	Demanda I+D+i (según Tabla 9)	Evidencia científica encontrada en la revisión	Nivel de atención actual	Brecha identificada	Líneas de investigación propuestas que responden
Boyacá	Generar modelos productivos sostenibles con aseguramiento de calidad, inocuidad y trazabilidad (Prioridad 1)	Estudios sobre fertirriego eficiente, manejo orgánico bajo cubierta, sistemas protegidos, evaluación de huella ambiental (ACV, GEI) y tecnologías poscosecha que mejoran calidad y vida útil del fruto.	Media	Poca adaptación y validación multianual de modelos integrales de producción sostenible en condiciones altoandinas; escasa evaluación económica y débil articulación con esquemas de certificación (BPA, GlobalGAP).	1, 3 y 4
Boyacá	Fortalecer la calidad e inocuidad del producto para acceder a mercados especializados (Prioridad 2)	Evidencia en calidad físico-química del fruto, contenido de compuestos bioactivos, tecnologías poscosecha (refrigeración, recubrimientos, tecnologías no térmicas) y reducción de patógenos.	Media-Alta	Falta de estudios que vinculen estos avances con requisitos específicos de mercados objetivo y con protocolos integrales de aseguramiento de calidad e inocuidad a nivel de finca y cadena corta.	3 y 4
Cundinamarca	Estudios de mercado, poscosecha, transformación, agroindustria y gestión para la exportación (Prioridad 3)	Evidencia en tecnologías poscosecha, desarrollo de productos de valor agregado, estudios sobre estabilidad de compuestos bioactivos y atributos de calidad relevantes para mercados internacionales.	Media-Alta a nivel internacional / Baja a nivel local	Ausencia de estudios de mercado específicos para arándano colombiano, falta de modelos de negocio inclusivos y de análisis de costos/logística de exportación desde Cundinamarca.	3 y 4

Cundinamarca	Formación, capacitación y actualización para productores y otros actores de la cadena (Prioridad 2)	La revisión se centra en conocimiento científico y tecnológico; solo se registran referencias indirectas a procesos de extensión y transferencia, sin programas estructurados para Cundinamarca.	Baja	Falta de esquemas de formación y acompañamiento técnico que traduzcan los resultados de investigación en paquetes tecnológicos adaptados al perfil de productores de la región.	4
Antioquia	Manejo sanitario y fitosanitario del cultivo (Prioridad 2)	Estudios de manejo integrado de plagas y enfermedades, control biológico, diagnóstico molecular y estrategias de reducción de residuos de plaguicidas en fruto.	Baja/Media	Poca validación multianual en condiciones tropicales de Antioquia y escasa articulación de estas tecnologías con las capacidades reales de los productores; ausencia de sistemas locales de alerta temprana.	1, 2 y 4
Antioquia	Manejo, conservación y planificación del recurso suelo y agua para el cultivo (Prioridad 8)	Evidencia en estrategias integradas de riego y fertirriego, manejo de sustratos y suelos, eficiencia en uso de agua y estudios de huella hídrica y de carbono en sistemas de arándano.	Media	Escasez de estudios aplicados a escenarios tropicales de ladera y a sistemas productivos reales de Antioquia; poca vinculación con instrumentos de planificación hídrica y ordenamiento del territorio.	1 y 3

Nota. En la tabla se evidencia la relación entre hallazgos de la revisión y demandas de la Agenda I+D+i por departamento.

En **Boyacá**, las demandas asociadas a la generación de modelos productivos sostenibles con aseguramiento de calidad, inocuidad y trazabilidad (prioridad 1), así como al fortalecimiento de la calidad e inocuidad del producto (prioridad 2), encuentran un respaldo parcial en la evidencia disponible. La revisión identifica avances en fertirriego eficiente, manejo orgánico bajo cubierta,

sistemas protegidos, tecnologías poscosecha y estudios de huella ambiental, pero estos desarrollos se han validado de forma limitada en condiciones altoandinas y con escasa incorporación de análisis económico y de esquemas de certificación. En consecuencia, las líneas de Estandarización experimental y redes cooperativas, Sostenibilidad y circularidad tecnológica y Transferencia tecnológica y fortalecimiento de capacidades se orientan a adaptar y validar modelos de producción sostenible con pertinencia territorial.

En **Cundinamarca**, se observa una mayor convergencia entre los resultados de la revisión y las demandas relacionadas con estudios de mercado, poscosecha, transformación, agroindustria y gestión para la exportación (prioridad 3). La literatura reporta tecnologías poscosecha, desarrollo de productos de valor agregado y análisis de atributos de calidad relevantes para mercados internacionales; sin embargo, persisten vacíos en modelos de negocio inclusivos, estudios específicos de mercado para arándano colombiano y evaluación de los costos y la logística de exportación. A esto se suma una baja representación de experiencias de formación, capacitación y actualización (prioridad 2) orientadas a productores y otros actores de la cadena. En este contexto, las líneas de Sostenibilidad y circularidad tecnológica y de Transferencia tecnológica y fortalecimiento de capacidades buscan traducir los avances tecnológicos en propuestas de valor, estrategias comerciales y procesos formativos concretos para la región.

En **Antioquia**, las demandas asociadas al manejo sanitario y fitosanitario del cultivo (prioridad 2) y al manejo, conservación y planificación del recurso suelo y agua (prioridad 8) presentan un menor respaldo específico en la literatura, con niveles de atención Baja/Media. Si bien se identifican estudios de manejo integrado de plagas y enfermedades, control biológico, diagnóstico molecular y estrategias de uso eficiente de agua y nutrientes, estos desarrollos no se han validado de manera sistemática en condiciones tropicales ni se encuentran claramente

articulados con instrumentos de planificación hídrica y de ordenamiento del territorio. Esto evidencia la necesidad de profundizar en procesos de validación local multianual y de fortalecer la transferencia tecnológica, articulando las líneas de Estandarización experimental y redes cooperativas, Integración de herramientas digitales y modelamiento inteligente y Sostenibilidad y circularidad tecnológica con iniciativas regionales de gestión ambiental y sanitaria del cultivo.

2.2.4.2 Propuesta de indicadores para el seguimiento de la innovación regional en arándano. Con el fin de que los resultados de la presente revisión se traduzcan en procesos de innovación regional medibles, se proponen indicadores orientados al seguimiento de la generación y apropiación de conocimiento, la adopción tecnológica, los resultados productivos y la sostenibilidad ambiental en los departamentos de Cundinamarca, Boyacá y Antioquia. En la Tabla 11 se sintetizan estos indicadores, organizados en seis dimensiones clave para el análisis de la cadena productiva del arándano.

En la dimensión de adopción tecnológica se plantea como indicador el porcentaje de productores que incorporan sistemas de fertirriego eficientes, medido como proporción del total de productores a nivel departamental o municipal, a partir de encuestas y registros de UMATA y gremios. La dimensión de modelos productivos sostenibles se evalúa mediante las hectáreas de arándano certificadas bajo BPA o estándares como GlobalGAP, utilizando como fuentes al ICA y las entidades certificadoras. Los resultados productivos se capturan a través del rendimiento promedio de arándano ($t \cdot ha^{-1}$), estimado a partir de encuestas y estadísticas del Ministerio de Agricultura. La competitividad se mide mediante el porcentaje del volumen total de producción que cumple con los requisitos para exportación, información que puede obtenerse de exportadores y ProColombia. En cuanto a sostenibilidad ambiental, se propone la huella de carbono del sistema productivo ($kg \text{ CO}_2\text{-eq} \cdot t^{-1}$), basada en estudios de análisis de ciclo de vida y proyectos de I+D.

Finalmente, la dimensión de conocimiento y capacidades se aproxima mediante el número de proyectos de I+D+i en arándano activos por año en cada departamento, con fuentes como el SNIA y la plataforma SIEMBRA. En conjunto, estos indicadores permiten monitorear de manera integral el desempeño del sistema productivo y orientar intervenciones que fortalezcan su competitividad y sostenibilidad en el largo plazo.

Tabla 11.

Indicadores de seguimiento.

Dimensión	Indicador	Unidad / Métrica	Nivel geográfico	Fuente sugerida
Adopción tecnológica	% de productores que adoptan fertirriego eficiente	% productores	Depto/municipio	Encuestas, UMATA, gremios
Modelos productivos sostenibles	Ha de arándano bajo BPA / GlobalGAP	Ha	Depto	ICA, certificadoras
Resultados productivos	Rendimiento promedio de arándano	t·ha ⁻¹	Depto	Encuestas, MinAgricultura
Competitividad	% de producción que cumple requisitos para exportación	% del volumen total	Depto	Exportadores, ProColombia
Sostenibilidad ambiental	Huella de carbono del sistema productivo	kg CO ₂ -eq·t ⁻¹	Depto	Estudios ACV, proyectos I+D
Conocimiento y capacidades	Nº de proyectos de I+D+i en arándano activos por año	Nº de proyectos	Depto	SNIA, SIEMBRA

Nota. En la tabla se muestran los indicadores de seguimiento.

3. Conclusiones

La investigación científica sobre el arándano (*Vaccinium spp.*) se ha consolidado como un eje estratégico en la intersección entre fisiología vegetal, ciencia de los alimentos y biotecnología, reflejando un crecimiento sostenido durante casi cuatro décadas. Con 503 publicaciones indexadas y un máximo histórico en 2024 (42 documentos), el campo ha pasado de estudios agronómicos aislados a una red global de investigación aplicada en genómica, poscosecha, compuestos bioactivos y agricultura de precisión. Los países líderes son Estados Unidos (162 documentos), China (111) y Canadá (57), seguidos de Chile (24) y Brasil (22) en América Latina. Instituciones como USDA-ARS, Dalhousie University y la University of Florida destacan como polos de conocimiento, impulsadas por autores como Arnold W. Schumann, Qamar U. Zaman y Luke R. Howard, quienes han definido estándares metodológicos en fisiología, automatización y química de alimentos.

Las redes internacionales de colaboración muestran una estructura fuertemente interconectada, con una fuerza de enlace total de 4 917, articulada por los ejes EE. UU.–China–Canadá, y vínculos sólidos con Europa (España, Italia, Reino Unido, Polonia) y América Latina (Chile, Brasil, Perú). Este entramado evidencia la consolidación de una comunidad científica que combina investigación básica, innovación tecnológica y sostenibilidad agroindustrial. Los patrones de coautoría y acoplamiento bibliográfico confirman un tránsito hacia la interdisciplinariedad, donde la automatización, la inteligencia artificial y el modelado predictivo se integran en la gestión del cultivo, el control poscosecha y la valorización de metabolitos secundarios.

En términos temáticos, los cinco clústeres conceptuales revelan la madurez y diversificación del campo: (i) estudios biomédicos y fisiológicos centrados en los efectos del

consumo en la salud humana; (ii) fitopatología y sanidad del cultivo; (iii) manejo agronómico e incorporación de *deep learning* e *image processing*; (iv) procesamiento y estabilidad de compuestos bioactivos (antocianinas, polifenoles); y (v) caracterización analítica avanzada mediante métodos ORAC, FRAP y DPPH. Esta estructura demuestra una transición desde la descripción agronómica hacia una visión biotecnológica, digital y funcional, donde la calidad y trazabilidad del fruto se entienden como atributos cuantificables y modelables.

A partir de la revisión sistemática se evidencia que el manejo integral del cultivo de arándano (*Vaccinium spp.*) requiere un enfoque multidimensional que articule fisiología, tecnología y sostenibilidad. Los resultados muestran que la productividad, calidad y resiliencia del cultivo dependen de la interacción entre la regulación ecofisiológica, la nutrición mineral, el manejo hídrico y el control ambiental, enmarcados en estrategias de agricultura de precisión y ambientes protegidos. La integración de sensores, automatización y modelamiento inteligente ha permitido optimizar la eficiencia fisiológica y reducir la vulnerabilidad frente al estrés térmico e hídrico, consolidando las bases de una producción más eficiente y climáticamente adaptada.

Asimismo, la innovación tecnológica en los procesos de cosecha y poscosecha redefine los estándares de calidad, inocuidad y trazabilidad en la cadena de valor del arándano. Tecnologías no térmicas, recubrimientos comestibles, empaques inteligentes y sistemas de visión computacional aplicados al control de madurez y detección de daño han demostrado mantener la firmeza, los compuestos bioactivos y la calidad sensorial del fruto. Estos avances, sumados al desarrollo de soluciones digitales y automatizadas, impulsan una transición hacia sistemas poscosecha más sostenibles, eficientes y orientados al mercado global.

La sostenibilidad y la circularidad emergen como ejes estratégicos para el futuro del cultivo. La adopción de tecnologías de reúso y tratamiento de agua (como electrodiálisis-ósmosis

directa), el uso de energías renovables, la valorización de residuos agroindustriales mediante procesos de biorrefinería y la implementación de métricas de huella ambiental constituyen acciones clave para disminuir el impacto ecológico del sistema productivo. Estas estrategias, respaldadas por innovación científica y transferencia tecnológica, consolidan al arándano como un modelo de producción frutícola inteligente, rentable y alineado con los principios de la bioeconomía circular.

4. Recomendaciones

A partir del desarrollo de este trabajo, se plantean las siguientes recomendaciones estratégicas:

En primer lugar, se considera recomendable establecer un consorcio global interinstitucional que articule centros de excelencia de Estados Unidos, Europa, China y América Latina, con el objetivo de unificar metodologías analíticas, bases de datos genómicas y criterios de evaluación de calidad. Este consorcio debería desarrollar protocolos estandarizados para la medición de compuestos bioactivos (por ejemplo, ORAC, FRAP, DPPH), la trazabilidad digital del fruto y la modelación del comportamiento poscosecha bajo distintos entornos agroclimáticos. Un marco común de trabajo permitirá comparar resultados entre regiones, incrementar la reproducibilidad científica y fomentar la transferencia tecnológica hacia sistemas productivos más eficientes y sostenibles.

En segundo lugar, se recomienda profundizar en estudios de costos de establecimiento y producción del cultivo de arándano en las condiciones específicas de Cundinamarca y Boyacá (y, progresivamente, Antioquia). Estos estudios deberían integrar costos de inversión inicial (material vegetal, infraestructura, sistemas de riego y fertirriego, adecuación de suelos o sustratos) y costos operativos (insumos, mano de obra, energía, servicios técnicos), así como la estimación de ingresos bajo diferentes escenarios tecnológicos y de mercado. Contar con estructuras de costos comparables entre sistemas convencionales, orgánicos y modelos intensivos en tecnología es clave para traducir los resultados de la revisión en decisiones de adopción tecnológica, evaluación de riesgos y diseño de políticas de apoyo a productores. Como insumo preliminar, en el Anexo 2 se presenta una estructura de costos de referencia que puede servir de punto de partida para futuros ejercicios de validación y ajuste en campo.

Finalmente, se sugiere que futuros trabajos fortalezcan la transparencia y trazabilidad de la información bibliográfica mediante la actualización periódica de la base de datos de artículos incluidos en la revisión y su documentación en anexos técnicos. La consolidación de una matriz detallada de estudios (con información sobre país, periodo, enfoque temático, tipo de experimento y principales resultados), accesible para investigadores y actores institucionales, facilitará la replicabilidad de este estudio, la identificación temprana de nuevos vacíos de investigación y la formulación de agendas de I+D+i más alineadas con las necesidades regionales.

Referencias Bibliográficas

- Adhikari, J., Araghi, L. R., Singh, R., Adhikari, K., & Patil, B. S. (2024). Continuous-Flow High-Pressure Homogenization of Blueberry Juice Enhances Anthocyanin and Ascorbic Acid Stability during Cold Storage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72(20), 11629–11639.
- Aksoylu, Z., Çağindi, Ö., & Köse, E. (2015). Effects of blueberry, grape seed powder and poppy seed incorporation on physicochemical and sensory properties of biscuit. *Journal of Food Quality*, 38(3), 164–174.
- Albert, K. R., Mikkelsen, T. N., & Ro-Poulsen, H. (2008). Ambient UV-B radiation decreases photosynthesis in high arctic *Vaccinium uliginosum*. *Physiologia Plantarum*, 133(2), 199–210.
- Allan-Wojtas, P., Goff, H. D., Stark, R., & Carbyn, S. (1999). The effect of freezing method and frozen storage conditions on the microstructure of wild blueberries as observed by cold-stage scanning electron microscopy. *Scanning*, 21(5), 334–347.
- Arabia, A., Muñoz, P., & Munné-Bosch, S. (2025). Fruit-specific effects of tryptophan and melatonin as active components to extend the functionality of red fruits during post-harvest processing. *Food Chemistry*, 463, 141487.
- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Atashi Khalilabad, A., Fotouhifar, K., & Atghia, O. (2023). Characterization and report of *Ectophoma multirostrata*, causing stem canker disease in highbush blueberry in Iran. *Journal of Phytopathology*, 171(9), 470–477.
- Ayyadurai, P., Ragavendran, C., & Sillanpää, M. (2025). Transforming blueberries into a nexus of sustainability and health benefits: A review. *South African Journal of Botany*, 184, 862–879.

- Bal, J. J. M. (1996). Blueberry culture in greenhouses, tunnels, and under raincovers. *VI International Symposium on Vaccinium Culture* 446, 327–332.
- Bal, J. J. M., Balkhoven, J., & Peppelman, G. (2004). Results of testing highbush blueberry cultivars in The Netherlands. *VIII International Symposium on Vaccinium Culture* 715, 157–162.
- Balyan, S., Dadwal, V., Jha, D. K., & Patil, B. S. (2025). Innovative food safety strategy: Eugenol nanoemulsion with lactobacillus derived post-biotic biopolymer for biofilm inhibition on food and contact surfaces. *Food Control*, 176, 111348.
- Bañados, M. P. (2008). Expanding blueberry production into non-traditional production areas: Northern Chile and Argentina, Mexico and Spain. *IX International Vaccinium Symposium* 810, 439–445.
- Bañados, M. P., & Strik, B. (2004). Manipulation of the annual growth cycle of blueberry using photoperiod. *VIII International Symposium on Vaccinium Culture* 715, 65–72.
- Bandaranayake, W. M., Syvertsen, J. P., Schumann, A., & Kadyampakeni, D. M. (2020). *Leaching losses from blueberries grown in sandy soils amended with pine bark*. Wiley Online Library.
- Barba, F. J., Jäger, H., Meneses, N., Esteve, M. J., Frígola, A., & Knorr, D. (2012). Evaluation of quality changes of blueberry juice during refrigerated storage after high-pressure and pulsed electric fields processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 14, 18–24.
- Batagelj, V. (2020). On fractional approach to analysis of linked networks. *Scientometrics*, 123(2), 621–633.
- Beaulieu, J. C., Stein-Chisholm, R. E., Lloyd, S. W., Bett-Garber, K. L., Grimm, C. C., Watson, M. A., & Lea, J. M. (2017). Volatile, anthocyanidin, quality and sensory changes in rabbiteye blueberry from whole fruit through pilot plant juice processing. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(2), 469–478.

- Bernal-Roa, L. J., & Díaz-Moreno, C. (2014). *Antioxidant capacity analysis of red fruits during the pulp process*.
- Bieniasz, M. E., & Konieczny, A. M. (2022). Opportunities to Improve Effectiveness of Pollination of Blueberry CV. 'Bluecrop.' *Agriculture*, 12(12), 2126.
- Bin, L. I., Yiwen, B. A. O., Jiabin, L. I., Wanqi, H., Yahua, X., Xu, S. I., Liang, W., & Ying, H. E. (2024). Comprehensive Utilization of Blueberry Processing By-Product Resources and Development Trend of New Business Forms. *Journal of Food Science and Technology*, 42(4), 1–10.
- Blanchet, R., Willows, N., Johnson, S., Salmon Reintroduction Initiatives, O. N., & Batal, M. (2020). Traditional food, health, and diet quality in Syilx Okanagan adults in British Columbia, Canada. *Nutrients*, 12(4), 927.
- Bof, M. J., Laurent, F. E., Massolo, F., Locaso, D. E., Versino, F., & García, M. A. (2021). Bio-packaging material impact on blueberries quality attributes under transport and marketing conditions. *Polymers*, 13(4), 481.
- Bogodukhova, E. S., Britvina, V. V., Mukhanova, A. A., Gelmiyarova, V. N., & Agostinho, A. C. (2023). Creating a digital platform with a deep neural network for detecting plant diseases using information technology. *BIO Web of Conferences*, 71, 1117.
- Bohn, T. (2014). Dietary factors affecting polyphenol bioavailability. *Nutrition Reviews*, 72(7), 429–452.
- Bolaños-Alcántara, M. N., Pineda-Pineda, J., Castro-Brindis, R., Vargas-Hernández, M., & Avitia-García, E. (2018). Nitrate/ammonium ratio and electrical conductivity in blueberry quality. *XXX International Horticultural Congress IHC2018: III International Berry Fruit Symposium 1265*, 233–240.

- Boudreau-Forgues, Æ.-M., Gaudreau, L., Nguyen, T. T. A., Gosselin, A., ThÃ©riault, L., BrÃ©gard, A., & Dorais, M. (2023). Impact of silicon applications on the agronomic and nutritional performance of container-grown organic highbush blueberries. *IV International Symposium on Organic Greenhouse Horticulture 1428*, 55–62.
- Boyzo-Marin, J., Rebollar-Alviter, A., Silva-Rojas, H. V., & Ramirez-Maldonado, G. (2016). First report of *Neofusicoccum parvum* causing stem blight and dieback of blueberry in Mexico. *Plant Disease*, *100*(12), 2524.
- Bracamonte, D., Chang, A., Vinces, L., & Oviden, J. (2022). A blueberry classification algorithm using convolutional neural networks developed in Python and a Raspberry Pi 4. *2022 Congreso Internacional de Innovaci3n y Tendencias En Ingenieria (CONITI)*, 1–5.
- Brambilla, A., Lo Scalzo, R., Bertolo, G., & Torreggiani, D. (2005). Cultivar Selection Bridged with Innovative Processing: a New Strategy to Preserve and Maximize Antioxidant Activity in Blueberry Juice. *I International Symposium on Human Health Effects of Fruits and Vegetables 744*, 337–342.
- Bravo, M. (2025). *El crecimiento del cultivo de arÃ¡ndanos en Colombia ya es una realidad*. <https://www.portalfruticola.com/noticias/2025/01/28/arandanos-en-colombia/>.
- Brownmiller, C., Howard, L. R., & Prior, R. L. (2008). Processing and storage effects on monomeric anthocyanins, percent polymeric color, and antioxidant capacity of processed blueberry products. *Journal of Food Science*, *73*(5), H72–H79.
- Brownmiller, C., Howard, L. R., & Prior, R. L. (2009). *Processing and storage effects on blueberry (Vaccinium corymbosum L.) polyphenolics*.

- Buckow, R., Kastell, A., Terefe, N. S., & Versteeg, C. (2010). Pressure and temperature effects on degradation kinetics and storage stability of total anthocyanins in blueberry juice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(18), 10076–10084.
- Butot, S., Cantergiani, F., Moser, M., Jean, J., Lima, A., Michot, L., Putallaz, T., Stroheker, T., & Zuber, S. (2018). UV-C inactivation of foodborne bacterial and viral pathogens and surrogates on fresh and frozen berries. *International Journal of Food Microbiology*, 275, 8–16.
- Cacabelos, R. (2005). Role of nutrition in the prevention of Alzheimer's disease. In *Aging Health* (Vol. 1, Issue 3, pp. 359–362). Taylor & Francis.
- Cai, Z., Wang, L., Zhang, Q., Yang, W., Zhang, C., Wang, H., & Xiao, H. (2025). Eco-friendly coating engineered with antimicrobial lipopeptides maintains freshness and induces genes expression in anthocyanin biosynthesis of blueberry. *International Journal of Biological Macromolecules*, 306, 141590.
- Calabuig-Jiménez, L., Hinestroza-Córdoba, L. I., Barrera, C., Seguí, L., & Betoret, N. (2022). Effects of processing and storage conditions on functional properties of powdered blueberry pomace. *Sustainability*, 14(3), 1839.
- Calderón-Orellana, A., Hermosilla, N., & Bastías, R. M. (2023). Impact of the covering material on drought tolerance responses and soil water content in two cultivars of young blueberry plants under protected cultivation. *Water*, 15(13), 2326.
- Callahan, S., & Perry, J. J. (2020). Survival of *Listeria innocua* and native microflora in sanitizer-treated wild blueberries (*Vaccinium angustifolium*). *International Journal of Fruit Science*, 20(sup2), S66–S81.
- Cao, X., Zhang, F., Zhao, D., Zhu, D., & Li, J. (2018). Effects of freezing conditions on quality changes in blueberries. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(12), 4673–4679.

- Cao, X., Zhang, F., Zhu, D., Zhao, D., Zhao, Y., & Li, J. (2020). Evaluation of the effects of immersion thawing methods on quality of blueberries. *Journal of Food Process Engineering*, 43(11), e13538.
- Cardeñosa, V., Girones-Vilaplana, A., Muriel, J. L., Moreno, D. A., & Moreno-Rojas, J. M. (2016). Influence of genotype, cultivation system and irrigation regime on antioxidant capacity and selected phenolics of blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.). *Food Chemistry*, 202, 276–283.
- Carrión-Mero, P., Montalván-Burbano, N., Paz-Salas, N., & Morante-Carballo, F. (2020). Volcanic geomorphology: A review of worldwide research. *Geosciences (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/geosciences10090347>
- Castro, A. C., Hertog, M., & Nicolai, B. (2022). Juice release determination method: a potential tool for blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) texture research. *XXXI International Horticultural Congress (IHC2022): International Symposium on Postharvest Technologies to Reduce Food Losses 1364*, 233–240.
- Castro, A., Hertog, M., Goos, P., & Nicolai, B. (2024). Objective instrumental method for blueberry (*Vaccinium* spp.) juiciness determination compared to sensory evaluation. *Postharvest Biology and Technology*, 218, 113144.
- Cerna Larenas, M., Guzmán Estrada, R., Guerrero Contreras, J., & Meriño Gergichevich, C. (2015). Determination of the fluorescence spectrum of *Botrytis cinerea* Pers: Fr. isolated from highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 15(4), 938–948.
- Cerrato, A., Piovesana, S., Aita, S. E., Cavaliere, C., Felletti, S., Laganà, A., Montone, C. M., Vargas-de-la-Cruz, C., & Capriotti, A. L. (2022). Detailed investigation of the composition and transformations of phenolic compounds in fresh and fermented *Vaccinium floribundum* berry

extracts by high-resolution mass spectrometry and bioinformatics. *Phytochemical Analysis*, 33(4), 507–516.

Chang, Y. K., Zaman, Q., Farooque, A. A., Schumann, A. W., & Percival, D. C. (2012). An automated yield monitoring system II for commercial wild blueberry double-head harvester. *Computers and Electronics in Agriculture*, 81, 97–103.

Chang, Y. K., Zaman, Q. U., Chattha, H., Read, S., & Schumann, A. W. (2014). Sensing system using digital cameras for spot-application of fertilizer in wild blueberry fields. *2014 Montreal, Quebec Canada July 13–July 16, 2014*, 1.

Chapa, J., Kipp, S., Cai, H., & Huang, J.-Y. (2019). A comparative life cycle assessment of fresh imported and frozen domestic organic blueberries consumed in Indiana. *Journal of Cleaner Production*, 217, 716–723.

Chattha, H. S., Zaman, Q. U., Schumann, A. W., Brewster, G. R., Chang, Y. K., & Read, S. (2013). Evaluation of Modified Variable Rate Granular Fertilizer Spreader for Spot-Specific Fertilization in Wild Blueberry Fields. *2013 Kansas City, Missouri, July 21-July 24, 2013*, 1.

Cheng, K., Yan, J., Yan, X., & Yuan, F. (2020). | *evaluation of juice quality and antioxidation activity of different blueberry cultivars in Hubei Province*.

Chernenko, S. (2025). Encapsulation of polyphenols in baked goods: a strategy for enhancing stability and antioxidant activity. *Technology Audit and Production Reserves*, 4(84).

Chu, W., Sun, Y., Xiao, L., Chen, A., & Tao, Y. (2023). *Hygroscopic mechanism of blueberry powder based on glass transition theory*.

Ciordia, M., Garcia, J. C., & Diaz, M. B. (2006). *Off-season production of Southern highbush blueberries in the North of Spain*.

- Cleves-Leguízamo, J. (2021). *Fundamentos técnicos del cultivo del arándano (Vaccinium corymbosum L.) en la región central de Colombia*.
- Clifford, M. N. (1999). Chlorogenic acids and other cinnamates—nature, occurrence and dietary burden. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 79(3), 362–372.
- Cobo, M. J., López-Herrera, A. G., Herrera-Viedma, E., & Herrera, F. (2011). An approach for detecting, quantifying, and visualizing the evolution of a research field: A practical application to the Fuzzy Sets Theory field. *Journal of Informetrics*, 5(1), 146–166.
- Coletti, R., Nienow, A. A., & Calvete, E. O. (2011). Dormancy breaking of blueberries cultivars in a protected environment with hydrogen cyanamide and mineral oil. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 33, 685–690.
- Cook, M. A., Ozeroff, S. N., Fitzpatrick, S. M., & Roitberg, B. D. (2011). Host-associated differentiation in reproductive behaviour of cecidomyiid midges on cranberry and blueberry. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 141(1), 8–14.
- Copes, W. E., Scherm, H., & Ware, G. O. (2001). Sequential sampling to assess the incidence of infection by *Monilinia vaccinii-corymbosi* in mechanically harvested rabbiteye blueberry fruit. *Phytopathology*, 91(4), 348–353.
- Cordes, H., Iriarte, A., & Villalobos, P. (2016). Evaluating the carbon footprint of Chilean organic blueberry production. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(3), 281–292.
- Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA. (2022). *Plataforma tecnológica de Ciencia, Tecnología e Innovación del sector agropecuario colombiano: demandas de la Agenda I+D+i actualizadas para el periodo 2021-2024*.
<https://Repository.Agrosavia.Co/Items/93e8ba2e-6743-46c4-B129-456c9933b9be>.

- Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA; Departamento Administrativo de Ciencia, T. e I. M. de A. y D. R. (2016). *PECTIA :Plan Estratégico de Ciencia, Tecnología e Innovación del sector Agropecuario colombiano (2017-2027)*. <https://repository.agrosavia.co/items/7f6257b4-90ae-4db2-ba77-eb2f3da51f22>.
- Correia, R., Grace, M. H., Esposito, D., & Lila, M. A. (2017). Wild blueberry polyphenol-protein food ingredients produced by three drying methods: Comparative physico-chemical properties, phytochemical content, and stability during storage. *Food Chemistry*, 235, 76–85.
- Couture, A., Gaudreau, L., Van Sterthem, A., Gosselin, A., Dubé, Y., Nguyen, T. T. A., Br  gard, A., & Dorais, M. (2023). How can high tunnel coverings and an insect-proof barrier improve productivity and pest management in berry crops? *IV International Symposium on Organic Greenhouse Horticulture 1428*, 101–108.
- Crowe, K. M., Bushway, A. A., & Bushway, R. J. (2005). Effects of alternative postharvest treatments on the microbiological quality of lowbush blueberries. *Small Fruits Review*, 4(3), 29–39.
- Crowe, K. M., Bushway, A. A., Bushway, R. J., Davis-Dentici, K., & Hazen, R. A. (2007). A comparison of single oxidants versus advanced oxidation processes as chlorine-alternatives for wild blueberry processing (*Vaccinium angustifolium*). *International Journal of Food Microbiology*, 116(1), 25–31.
- Cruz, J. O. (2020). Terahertz Time-domain Spectroscopy (THz-TDS) for classification of blueberries according to their maturity. *2020 IEEE Engineering International Research Conference (EIRCON)*, 1–4.
- CUEVAS, J. J. M. (2016). *Blueberries: Antioxidant properties, health and innovative technologies*.
- da Silva, A. B. N., de Oliveira, G. M., Gallo Ruelas, M., Gadelha, M. S. M., de Farias Santos, A. C. F., & Zamora, F. V. (2025). Blueberries for brainpower: A systematic review and meta-analysis with

Bayesian post hoc analysis of RCTS exploring cognitive function in the elderly with prior cognitive decline. *Biogerontology*, 26(5), 1–15.

da Silva Vieira, G., Rocha, B. M., Fonseca, A. U., de Sousa, N. M., Ferreira, J. C., Cabacinha, C. D., & Soares, F. (2022). Automatic detection of insect predation through the segmentation of damaged leaves. *Smart Agricultural Technology*, 2, 100056.

Darniadi, S., Ifie, I., Ho, P., & Murray, B. S. (2019). Evaluation of total monomeric anthocyanin, total phenolic content and individual anthocyanins of foam-mat freeze-dried and spray-dried blueberry powder. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13(2), 1599–1606.

Das, Q., Islam, M. R., Marcone, M. F., Warriner, K., & Diarra, M. S. (2017). Potential of berry extracts to control foodborne pathogens. *Food Control*, 73, 650–662.

Das, Q., Shay, J., Gauthier, M., Yin, X., Hasted, T.-L., Ross, K., Julien, C., Yacini, H., Kennes, Y. M., & Warriner, K. (2021). Effects of vaccination against coccidiosis on gut microbiota and immunity in broiler fed bacitracin and berry pomace. *Frontiers in Immunology*, 12, 621803.

Dawidowicz, A. L., & Typek, R. (2014). Transformation of 5-O-caffeoylquinic acid in blueberries during high-temperature processing. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(45), 10889–10895.

Demchak, K. (2009). Small fruit production in high tunnels. *HortTechnology*, 19(1), 44–49.

Di Genova, D., Lewis, K. J., & Oliver, J. E. (2020). Natural infection of southern highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* interspecific hybrids) by *Xylella fastidiosa* subsp. *fastidiosa*. *Plant Disease*, 104(10), 2598–2605.

Donahue, D. W., Bushway, A. A., Moore, K. E., & Hazen, R. A. (1999). Forced air removal of surface moisture from Maine wild blueberries for the fresh pack market. *Applied Engineering in Agriculture*, 15(2), 147–152.

- Dongchao, B., Fazhan, Y., Guodong, Z., Kairui, Z., & Haibo, L. (2022). Construction of intelligent water and fertilizer integration system for blueberry greenhouse. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 43(8), 55.
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 133, 285–296.
- Duan, C., Xiao, X., Yu, Y., Xu, M., Zhang, Y., Liu, X., Dai, H., Pi, F., & Wang, J. (2024). In situ Raman characterization of the stability of blueberry anthocyanins in aqueous solutions under perturbations in temperature, UV, pH. *Food Chemistry*, 431, 137155.
- Ehlenfeldt, M. K. (2003). Investigations of metaxenia in northern highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) cultivars. *Journal of the American Pomological Society*, 57(1), 26.
- Ehlenfeldt, M. K., Polashock, J. J., Stretch, A. W., & Kramer, M. (2006). Leaf disk infection by *Colletotrichum acutatum* and its relation to fruit rot in diverse blueberry germplasm. *HortScience*, 41(1), 270–271.
- Ehlenfeldt, M. K., & Stretch, A. W. (2001). Resistance to blighting by *Monilinia vaccinii-corymbosi* in diploid and polyploid *Vaccinium* species. *HortScience*, 36(5), 955–957.
- El Horri, H., Bartolini, S., Remorini, D., Ceccanti, C., Florio, M., D'Asaro, L., Jain, G., Massai, R., Landi, M., & Guidi, L. (2025). Light Down-Conversion Technology Improves Vegetative Growth, Berry Production, and Postharvest Quality in Tunnel-Cultivated Blueberry. *Agronomy*, 15(7), 1708.
- Ells, T., Tregunno, N., Fan, L., Elliot, M., Doucette, C., Lyu, H., & Jollimore, A. (2024). Microbiological Analysis of Wild Lowbush Blueberries Harvested in Nova Scotia, Canada for the Fresh Produce Market. *Microorganisms*, 12(11), 2251.

- Elsevier (R). (2025). *Scopus: Una base de datos completa de resúmenes y citas*.
<https://www.elsevier.com/es-es/products/scopus>.
- Esau, K., Esau, T., Zaman, Q., Farooque, A., & Schumann, A. (2018). Effective use of a variable speed blower fan on a mechanical wild blueberry harvester. *Applied Engineering in Agriculture*, 34(5), 831–840.
- Esau, T., Zaman, Q., Groulx, D., Chang, Y., Schumann, A., & Havard, P. (2014). Smart Sprayer for Spot-Application of Agrochemicals in Wild Blueberry Fields. *2014 Montreal, Quebec Canada July 13–July 16, 2014*, 1.
- Esau, T., Zaman, Q., Groulx, D., Corscadden, K., Chang, Y., Schumann, A., & Havard, P. (2015). Economic analysis for smart sprayer application in wild blueberry fields. *2015 ASABE Annual International Meeting*, 1.
- Espitia, J. J., Amado, G., Rodriguez, J., Gomez, L., Gil, R., Flores-Velasquez, J., Baeza, E., Aguilar, C. E., Akrami, M., & Arias, L. A. (2025). CO₂ Enrichment in Protected Agriculture: A Bibliometric Review on Greenhouses, Controlled Environment Systems, and Vertical Farms—Part 1. *Horticulturae*, 11(5), 476.
- Espitia, J. J., Velázquez, F. A., Rodriguez, J., Gomez, L., Baeza, E., Aguilar-Rodríguez, C. E., Flores-Velazquez, J., & Villagran, E. (2024). Solar Energy Applications in Protected Agriculture: A Technical and Bibliometric Review of Greenhouse Systems and Solar Technologies. *Agronomy*, 14(12), 2791.
- Fan, L., Martynenko, A., Doucette, C., Hughes, T., & Fillmore, S. (2018). Microbial quality and shelf life of blueberry purée developed using cavitation technology. *Journal of Food Science*, 83(3), 732–739.

- Fang, Y., Nunez, G. H., Silva, M. N. da, Phillips, D. A., & Munoz, P. R. (2020). A review for southern highbush blueberry alternative production systems. *Agronomy*, *10*(10), 1531.
- Fathollahi-Fard, A. M., Tian, G., Ke, H., Fu, Y., & Wong, K. Y. (2023). Efficient multi-objective metaheuristic algorithm for sustainable harvest planning problem. *Computers & Operations Research*, *158*, 106304.
- Fenniri, M. Z., Pico, J., Cohen, T. R., Castellarin, S. D., & Rosado, A. (2025). Postharvest evolution of physical and taste-related parameters, antioxidant capacity, and phenolic composition of berry crop wild relatives in the Pacific Northwest. *Postharvest Biology and Technology*, *227*, 113603.
- Fernández, E. G. B., Hanzer, V., Lok-Lee, F., & Laimer, M. (2023). “Recovery” of *Vaccinium myrtillus* from *phytoplasma* infection *in vitro*.
- Finn, C. E., Olmstead, J. W., Hancock, J. F., & Brazelton, D. M. (2012). Welcome to the party! Blueberry breeding mixes private and public with traditional and molecular to create a vibrant new cocktail. *X International Symposium on Vaccinium and Other Superfruits 1017*, 51–62.
- Flórez-Martínez, D. H., Amado-Saavedra, G. M., Flórez-Tuta, N., Barragán-Quijano, E., & Morales-Castañeda, A. (2023). Towards a productive model for the Sacha Inchi value chain: A scientometric approach. *Scientia Agropecuaria*, *14*(4), 549–569. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2023.046>
- Forge, T., Zasada, I., Pinkerton, J., & Koch, C. (2012). Host status and damage potential of *Paratrichodorus renifer* and *Pratylenchus penetrans* (Nematoda) to blueberry (*Vaccinium* spp.). *Canadian Journal of Plant Pathology*, *34*(2), 277–282.
- Forney, C. F., Eaton, L. J., & Gao, L. (2006). Development of a new harvest container for wild blueberries. *HortTechnology*, *16*(1), 33.

- France, A., Santelices, C., Buddie, A., & Kirk, P. (2008). Silver leaf: first worldwide report of a new and harmful disease on blueberry. *IX International Vaccinium Symposium 810*, 341–344.
- Frith, G. J. T. (2004). Some selection characters for blueberry cultivars grown for pick-your-own production. *VIII International Symposium on Vaccinium Culture 715*, 129–132.
- Gallardo, R. K., & Zilberman, D. (2016). The economic feasibility of adopting mechanical harvesters by the highbush blueberry industry. *HortTechnology*, 26(3), 299–308.
- Gan, Z., Zhang, Y., Gao, W., Wang, S., Liu, Y., Xiao, Y., Zhuang, X., Sun, A., & Wang, R. (2022). Effects of nonthermal plasma-activated water on the microbial sterilization and storage quality of blueberry. *Food Bioscience*, 49, 101857.
- Ge, Y., Tang, Q., Li, C., Duan, B., Li, X., Wei, M., & Li, J. (2019). Acibenzolar-S-methyl treatment enhances antioxidant ability and phenylpropanoid pathway of blueberries during low temperature storage. *Lwt*, 110, 48–53.
- Gibson, L., Rupasinghe, H. P. V., Forney, C. F., & Eaton, L. (2013). Characterization of changes in polyphenols, antioxidant capacity and physico-chemical parameters during lowbush blueberry fruit ripening. *Antioxidants*, 2(4), 216–229.
- Girard, K. K., & Sinha, N. K. (2006). Cranberry, blueberry, currant, and gooseberry. *Handbook of Fruits and Fruit Processing*, 369–390.
- Girgenti, V., Peano, C., Bounous, M., & Baudino, C. (2013). A life cycle assessment of non-renewable energy use and greenhouse gas emissions associated with blueberry and raspberry production in northern Italy. *Science of the Total Environment*, 458, 414–418.
- Girgenti, V., Peano, C., Giuggioli, N. R., Giraudo, E., & Guerrini, S. (2010). First results of biodegradable mulching on small berry fruits. *XXVIII International Horticultural Congress on Science and Horticulture for People (IHC2010): International Symposium on 926*, 571–576.

- Giuggioli, N. R., Geobaldo, F., Ceccarelli, R., & PEANO, C. (2009). Improvement of fruit storage in the supply chain with modified atmosphere packaging. *5th International Technical Symposium on Food Processing, Monitoring Technology in Bioprocesses and Food Quality Management*, 853–856.
- Griep, P., Ferreira, J., Fischer, B., Fernandes, I. A., Cansian, R. L., Junges, A., & Backes, G. T. (2024). Development and characterization of active edible film with blueberry residue extract (*Vaccinium* spp.). *Biomass Conversion and Biorefinery*, *14*(18), 22087–22097.
- Grillo, G., Gunjević, V., Radošević, K., Redovniković, I. R., & Cravotto, G. (2020). Deep eutectic solvents and nonconventional technologies for blueberry-peel extraction: Kinetics, anthocyanin stability, and antiproliferative activity. *Antioxidants*, *9*(11), 1069.
- Guidetti, R., Beghi, R., Bodria, L., Spinardi, A., Mignani, I., & Folini, L. (2008). Prediction of blueberry (*Vaccinium corymbosum*) ripeness by a portable Vis-NIR device. *IX International Vaccinium Symposium 810*, 877–886.
- Guimarães, D. H. P., Alves, G. L., Querido, A. F., Castillo, P. F. A., & de Moraes Gomes Rosa, M. T. (2021). Physical, Chemical and Rheological Properties of Blueberry Jam. *Brazilian Technology Symposium*, 436–442.
- Guo, J., Giusti, M. M., & Kaletunç, G. (2018). Encapsulation of purple corn and blueberry extracts in alginate-pectin hydrogel particles: Impact of processing and storage parameters on encapsulation efficiency. *Food Research International*, *107*, 414–422.
- Guohong, F., Jindong, Z., Yujie, Z. H. U., & Tiantian, W. (2024). Comprehensive Quality Evaluation of Blueberries Based on Near-infrared Spectroscopy and Fiber Optic Droplet Analysis. *Shipin Kexue*, *45*(18), 216–224.

- Gurovich, L. A. (2009). Real-time plant water potential assessment based on electrical signalling in higher plants. *7th World Congress on Computers in Agriculture Conference Proceedings, 22-24 June 2009, Reno, Nevada*, 1.
- Gutierrez Mora, I., Hernández Cázares, A. S., Hidalgo Contreras, J. V., López Ayala, J. L., & Velasco Velasco, J. (2025). APLICACIÓN DE TELEDETECCIÓN EN LA ESTIMACIÓN DE RENDIMIENTOS EN CULTIVOS AGRÍCOLAS: UNA REVISIÓN BIBLIOMETRICA. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 28(1). <https://doi.org/10.56369/tsaes.5613>
- Hamim, A., Lamrini, A., Bouriah, S., & Mohammed, E. (2019). Study of Growth and Yield Parameters of Two Cultivars of Blueberry in Loukkos Region. *International Conference on Advanced Intelligent Systems for Sustainable Development*, 357–363.
- HARUNA, E. U., ASIEDU, W. K., & BELLO, L. O. (2024). Mapping the knowledge domain of Natural Capital and Sustainability: A bibliometric analysis using the Scopus database for future research direction. *Development and Sustainability in Economics and Finance*, 100035.
- He, S., Yu, H., & Gu, Y. (2009). Prospects and problems of blueberry growing in China. *Acta Horti*, 810, 61–64.
- Heller, C. R., & Nunez, G. H. (2022). Preplant fertilization increases substrate microbial respiration but does not affect southern highbush blueberry establishment in a coconut coir-based substrate. *HortScience*, 57(1), 17–21.
- Hernández, R., López, A., Valenzuela, B., D'Afonseca, V., Gomez, A., & Arencibia, A. D. (2024). Organogenesis of plant tissues in colchicine allows selecting in field trial blueberry (*Vaccinium* spp. cv Duke) clones with commercial potential. *Horticulturae*, 10(3), 283.

- Hernández-Pajares, J. C. (2023). Exploring the research on sustainability reporting: a comprehensive bibliometric and literature review in the Latin American context. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, 12(1), 1–44. <https://doi.org/10.5585/2023.22801>
- Herrera-Franco, G., Montalván-Burbano, N., Carrión-Mero, P., & Bravo-Montero, Lady. (2021). Worldwide research on socio-hydrology: A bibliometric analysis. *Water (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/w13091283>
- Hicklenton, P., Forney, C., & Domytrak, C. (2002). Use of row covers and post harvest storage techniques to alter maturity and marketing period for highbush blueberries. *XXVI International Horticultural Congress: Berry Crop Breeding, Production and Utilization for a New Century* 626, 287–295.
- Hien, N. T., Tojo, S., Chosa, T., & Ban, T. (2016). Effects of prior freezing conditions on the performance of the freeze drying process of blueberry. *XI International Vaccinium Symposium* 1180, 77–84.
- Holland, R. M., Chen, J., Gazula, H., & Scherm, H. (2021). Environmental and fecal indicator organisms on fruit contact surfaces and fruit from blueberry mechanical harvesters. *Horticulturae*, 8(1), 20.
- Howard, L. R., Brownmiller, C., Mauromoustakos, A., & Prior, R. L. (2016). Improved stability of blueberry juice anthocyanins by acidification and refrigeration. *Journal of Berry Research*, 6(2), 189–201.
- Howard, L. R., Castrodale, C., Brownmiller, C., & Mauromoustakos, A. (2010). Jam processing and storage effects on blueberry polyphenolics and antioxidant capacity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(7), 4022–4029.

- Huang, R., Ye, M., Li, X., Ji, L., Karwe, M., & Chen, H. (2016). Evaluation of high hydrostatic pressure inactivation of human norovirus on strawberries, blueberries, raspberries and in their purees. *International Journal of Food Microbiology*, 223, 17–24.
- Huang, Y., Wang, D., Liu, Y., Zhou, H., & Sun, Y. (2020). Measurement of early disease blueberries based on vis/nir hyperspectral imaging system. *Sensors*, 20(20), 5783.
- Hughes, A., White, S. N., Boyd, N. S., Hildebrand, P., & Christopher Cutler, G. (2016). Red sorrel management and potential effect of red sorrel pollen on *Botrytis cinerea* spore germination and infection of lowbush blueberry (*Vaccinium angustifolium* Ait.) flowers. *Canadian Journal of Plant Science*, 96(4), 590–596.
- Hummer, K., & Williams, R. (2008). Pests of blueberries on São Miguel, Açores, Portugal. *IX International Vaccinium Symposium 810*, 287–292.
- Ikramov, R., Nilova, L., & Malyutenkova, S. (2021). Implementation of a differentiated approach to the use of microwaves processing in the production of gelatin jellies. *E3S Web of Conferences*, 258, 12014.
- Instituto Colombiano Agropecuario - ICA. (2023). *El nutritivo y delicioso sabor de los arándanos colombianos llega a Canadá*. <https://www.ica.gov.co/Noticias/Arandanos-Colombianos-Llegan-a-Canada>.
- Instituto Colombiano Agropecuario - ICA. (2025). *Nación Berries, impulso a la producción de arándano colombiano en el mundo*. <https://www.ica.gov.co/Noticias/Nacion-Berries-Impulso-Produccion-Arandanos>.
- Jagdale, G. B., Holladay, T., Brannen, P. M., Cline, W. O., Agudelo, P., Nyczepir, A. P., & Noe, J. P. (2013). Incidence and pathogenicity of plant-parasitic nematodes associated with blueberry

(*Vaccinium* spp.) replant disease in Georgia and North Carolina. *Journal of Nematology*, 45(2), 92.

Janowska, S., & Wujec, M. (2023). Bilberries as valuable sources of polyphenols with health-promoting properties. *Farmacja Polska*, 79(7), 403–412. <https://doi.org/10.32383/farmpol/174892>

Jian, C., Bingbing, W., Long, Y. I. N., Yanqing, L. I., Zhaoxin, L. I., & Zhuang, L. I. (2025). The Lightweight Bee Pollination Recognition Model Based On YOLOv10n-CHL. *Smart Agriculture*, 7(3), 185.

Jiang, Y., Li, C., & Takeda, F. (2016). Nondestructive detection and quantification of blueberry bruising using near-infrared (NIR) hyperspectral reflectance imaging. *Scientific Reports*, 6(1), 35679.

Jin, T. Z., Yu, Y., & Gurtler, J. B. (2017). Effects of pulsed electric field processing on microbial survival, quality change and nutritional characteristics of blueberries. *Lwt*, 77, 517–524.

Jin, Y., Huang, X., Xu, Y., Wu, F., Xu, X., Jin, Z., Liao, X., & Yang, N. (2020). *Changes of enzyme activity and total anthocyanin content in blueberry puree after induction electric field treatment.*

Jin, Z., Huang, H., Huang, H., Li, L., Zeng, Y., Cheng, X., Pathier, D., Gan, L., & Shen, W. (2024). The delayed senescence in harvested blueberry by hydrogen-based irrigation is functionally linked to metabolic reprogramming and antioxidant machinery. *Food Chemistry*, 453, 139563.

Jung, J., Lin, C., & Zhao, Y. (2022). Enhancing anthocyanin–phenolic copigmentation through epicarp layer treatment and edible coatings to retain anthocyanins in thermally processed whole blueberries. *Journal of Food Science*, 87(9), 3809–3821.

Kalt, W. (2004). *Vaccinium* berry crops and human health. *VIII International Symposium on Vaccinium Culture* 715, 533–538.

- Kalt, W., Cassidy, A., Howard, L. R., Krikorian, R., Stull, A. J., Tremblay, F., & Zamora-Ros, R. (2020). Recent research on the health benefits of blueberries and their anthocyanins. *Advances in Nutrition*, *11*(2), 224–236.
- Kalt, W., McDonald, J. E., & Donner, H. (2000). Anthocyanins, phenolics, and antioxidant capacity of processed lowbush blueberry products. *Journal of Food Science*, *65*(3), 390–393.
- Karimova, N. Y., Alekseenko, E. V., & Shanenko, E. F. (2025). Development of the powdered concentrate for soft drink based on freeze-dried blueberry juice. *Food Systems*, *8*(2), 244–251.
- Kaushalya, K. G. D., & Rupasinghe, H. P. V. (2025). Microencapsulation of fermented wild blueberry to improve the stability of (poly) phenols. *Applied Food Research*, *5*(1), 100764.
- Khanal, R. C., Howard, L. R., Brownmiller, C. R., & Prior, R. L. (2009). Influence of extrusion processing on procyanidin composition and total anthocyanin contents of blueberry pomace. *Journal of Food Science*, *74*(2), H52–H58.
- Khoo, H. E., Chew, L., Ismail, A., & Azlan, A. (2012). *Polyphenols: Chemistry, Dietary Sources and Health Benefits*. Nova Science Publishers New York, NY, USA:
- Kingston, P. H., Scagel, C. F., Bryla, D. R., & Strik, B. (2017). Suitability of sphagnum moss, coir, and douglas fir bark as soilless substrates for container production of highbush blueberry. *HortScience*, *52*(12), 1692–1699.
- Kunrade, L., Rembergs, R., Jēkabsons, K., Kļaviņš, L., Kļaviņš, M., Muceniece, R., & Riekstiņa, U. (2020). Inhibition of NF- κ B pathway in LPS-stimulated THP-1 monocytes and COX-2 activity in vitro by berry pomace extracts from five *Vaccinium* species. *Journal of Berry Research*, *10*(3), 381–396.

- Kushwaha, A., & Rajesh, E. (2023). Detecting malign in leaves using deep learning algorithm model ResNet for smart framing. In *Artificial Intelligence, Blockchain, Computing and Security Volume 1* (pp. 407–411). CRC Press.
- Kuzy, J. D., & Li, C. (2015). Blueberry Bruise Detection by Pulse-Phase Thermography and Neural Network. *2015 ASABE Annual International Meeting*, 1.
- Lacombe, A., Antosch, J. G., & Wu, V. C. H. (2020). Scale-up model of forced air-integrated gaseous chlorine dioxide for the decontamination of lowbush blueberries. *Journal of Food Safety*, 40(4), e12793.
- Lacombe, A., Niemira, B. A., Gurtler, J. B., Fan, X., Sites, J., Boyd, G., & Chen, H. (2015). Atmospheric cold plasma inactivation of aerobic microorganisms on blueberries and effects on quality attributes. *Food Microbiology*, 46, 479–484.
- Lacombe, A., & Wu, V. C. H. (2023). The effects of sanitizing hurdles against foodborne pathogens during blueberry processing. *Food Control*, 154, 109981.
- Lafarga, T., Aguiló-Aguayo, I., Bobo, G., Chung, A. V., & Tiwari, B. K. (2018). Effect of storage on total phenolics, antioxidant capacity, and physicochemical properties of blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) jam. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(7), e13666.
- Lalonde, L. F., & Gajadhar, A. A. (2016). Optimization and validation of methods for isolation and real-time PCR identification of protozoan oocysts on leafy green vegetables and berry fruits. *Food and Waterborne Parasitology*, 2, 1–7.
- Lan, C. Z., Ruan, H. C., & Yao, J. A. (2016). First report of *Phytophthora cinnamomi* causing root and stem rot of blueberry (*Vaccinium corymbosum*) in China. *Plant Disease*, 100(12), 2537.

- Langer, S., Kennel, A., & Lodge, J. K. (2018). The influence of juicing on the appearance of blueberry metabolites 2 h after consumption: a metabolite profiling approach. *British Journal of Nutrition*, *119*(11), 1233–1244.
- Leal-Ayala, O. G., Sandoval-Villa, M., Trejo-Téllez, L. I., Sandoval-Rangel, A., Cabrera-De la Fuente, M., & Benavides-Mendoza, A. (2021). Nitrogen form and root division modifies the nutrimental and biomolecules concentration in blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.). *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, *49*(1), 11998.
- Leguizamo, J. (2021). *Fundamentos técnicos del cultivo del arándano (Vaccinium corymbosum L.) en la región central de Colombia* (1st ed.).
- Lehman, J. S., Igarashi, S., & Oudemans, P. V. (2007). Host resistance to *Monilinia vaccinii-corymbosi* in flowers and fruits of highbush blueberry. *Plant Disease*, *91*(7), 852–856.
- Lehman, J. S., & Oudemans, P. V. (1997). Phenology of apothecium production in populations of *Monilinia vaccinii-corymbosi* from early-and late-maturing blueberry cultivars. *Phytopathology*, *87*(2), 218–223.
- Lehman, J. S., & Oudemans, P. V. (2000). Variation and heritability of phenology in the fungus *Monilinia vaccinii-corymbosi* on blueberry. *Phytopathology*, *90*(4), 390–395.
- Leiva-Valenzuela, G. A., & Aguilera, J. M. (2013). Automatic detection of orientation and diseases in blueberries using image analysis to improve their postharvest storage quality. *Food Control*, *33*(1), 166–173.
- Leiva-Valenzuela, G. A., Lu, R., & Aguilera, J. M. (2012). Assessment of internal quality of blueberry using hyperspectral imaging. *2012 Dallas, Texas, July 29-August 1, 2012*, 1.

- Lenart, A., Wrona, D., & Krupa, T. (2024). Biostimulators with marine algae extracts and their role in increasing tolerance to drought stress in highbush blueberry cultivation. *PloS One*, *19*(9), e0306831.
- Leng, Y., Yang, L., Zhu, H., Li, D., Pan, S., & Yuan, F. (2023). Stability of blueberry extracellular vesicles and their gene regulation effects in intestinal Caco-2 cells. *Biomolecules*, *13*(9), 1412.
- Li, J., Hou, R., & Zhang, F. (2024). A new *Schizophyllum commune* strain as a potential biocontrol agent against blueberry root rot. *Archives of Microbiology*, *206*(5), 235.
- Li, K., Li, W., Zhang, Y., Cheng, J., Wang, J., Yang, L., & Wang, C. (2023). Effects of different drying temperatures on flavor related quality of blueberry. *Journal of Berry Research*, *13*(1), 7–20.
- Li, R., & Fu, L. (2017). Nondestructive measurement of firmness and sugar content of blueberries based on hyperspectral imaging. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, *33*(1), 362–366.
- Li, T., & Bi, G. (2019). Container production of southern highbush blueberries using high tunnels. *HortScience*, *54*(2), 267–274.
- Li, Y., Sun, H., & Chen, L. (2016). The blueberry industry of China: the past 10 years and the future. *XI International Vaccinium Symposium 1180*, 531–536.
- Lihong, X., Huihui, L., He, X., Ruihua, W. E. I., & Wentao, C. A. I. (2021). Multi-factor coordination control technology of promoting early maturing in southern blueberry intelligent greenhouse. *Smart Agriculture*, *3*(4), 86.
- Linnenluecke, M. K., Marrone, M., & Singh, A. K. (2020). Conducting systematic literature reviews and bibliometric analyses. *Australian Journal of Management*, *45*(2), 175–194.

- Liović, N., Čikeš-Čulić, V., Fredotović, Ž., Krešić, G., & Bilušić, T. (2022). The effect of processing techniques on the antiproliferative activity of blueberry phenolics before and after in vitro digestion. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(1), e16140.
- Liu, Z.-L., Xie, L., Zielinska, M., Pan, Z., Deng, L.-Z., Zhang, J.-S., Gao, L., Wang, S.-Y., Zheng, Z.-A., & Xiao, H.-W. (2022). Improvement of drying efficiency and quality attributes of blueberries using innovative far-infrared radiation heating assisted pulsed vacuum drying (FIR-PVD). *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 77, 102948.
- Lobos, G. A., Retamales, J. B., Hancock, J. F., & Flore, J. A. (2008). Physiological response of *Vaccinium corymbosum*'Elliott'to shading nets in Michigan. *IX International Vaccinium Symposium 810*, 465–470.
- Lobos, G. A., Retamales, J. B., Hancock, J. F., Flore, J. A., Romero-Bravo, S., & Del Pozo, A. (2013). Productivity and fruit quality of *Vaccinium corymbosum* cv. Elliott under photo-selective shading nets. *Scientia Horticulturae*, 153, 143–149.
- Lohachoompol, V., Srzednicki, G., & Craske, J. (2004). The change of total anthocyanins in blueberries and their antioxidant effect after drying and freezing. *BioMed Research International*, 2004(5), 248–252.
- Lopes, S., Santos, R., Wessel, D., Brás, I., Silva, M. E., Ferreira, T., & Pereira, C. (2023). Mathematical Modeling of a Sustainable Dewatering Process for Blueberries and Raspberries Preservation. *International Conference on Energy and Environment Research*, 139–151.
- Madrid, M., & Beaudry, R. (2020). Small fruits: Raspberries, blackberries, blueberries. In *Controlled and Modified Atmospheres for Fresh and Fresh-Cut Produce* (pp. 335–346). Elsevier.
- Madsen, D. Ø., Berg, T., & Di Nardo, M. (2023). Bibliometric Trends in Industry 5.0 Research: An Updated Overview. *Applied System Innovation*, 6(4), 63.

- Majid, A., Khan, M. A., Alhaisoni, M., Tariq, U., Hussain, N., Nam, Y., & Kadry, S. (2022). An Integrated Deep Learning Framework for Fruits Diseases Classification. *Computers, Materials & Continua*, *71*(1).
- Manganaris, G. A., Goulas, V., Vicente, A. R., & Terry, L. A. (2014). Berry antioxidants: small fruits providing large benefits. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *94*(5), 825–833.
- Manley, K., Nyelele, C., & Egoh, B. N. (2022). A review of machine learning and big data applications in addressing ecosystem service research gaps. *Ecosystem Services*, *57*, 101478.
- Mari, A., Kekes, T., Boukouvalas, C., & Krokida, M. (2025). Integrating Life Cycle Assessment in Innovative Berry Processing with Edible Coating and Osmotic Dehydration. *Foods*, *14*(7), 1167.
- Martynenko, A., Astatkie, T., & Satanina, V. (2015). Novel hydrothermodynamic food processing technology. *Journal of Food Engineering*, *152*, 8–16.
- Marucci, R. C., Ruber, S. E., Pec, M., & Liburd, O. E. (2024). Are predatory mites effective as biological control agents to suppress *Oligonychus ilicis* (Acari: Tetranychidae) in blueberry plantings? *Journal of Economic Entomology*, *117*(3), 834–842.
- Max, J. F. J., Horst, W. J., Mutwiwa, U. N., & Tantau, H. J. (2009). Effects of greenhouse cooling method on growth, fruit yield and quality of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) in a tropical climate. *Scientia Horticulturae*, *122*(2), 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.05.007>
- Meili, X. I. N., LIANG, Q., Jinlong, T., Shufang, Y., Yiyun, Y., & Bin, L. I. (2024). Effects of Sucrose Degradation Products on the Stability and Antioxidant Activity of Blueberry Anthocyanins under Processing and Storage Conditions. *Food Science*, *45*(14), 51–59.
- Meléndez-Jácome, M. R., Flor-Romero, L. E., Sandoval-Pacheco, M. E., Vasquez-Castillo, W. A., & Racines-Oliva, M. A. (2021). *Vaccinium* spp.: Karyotypic and phylogenetic characteristics, nutritional composition, edaphoclimatic conditions, biotic factors and beneficial microorganisms

in the rhizosphere. *Scientia Agropecuaria*, 12(1), 109–120.
<https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.013>

Michalska, A., & Łysiak, G. (2015). Bioactive compounds of blueberries: post-harvest factors influencing the nutritional value of products. *International Journal of Molecular Sciences*, 16(8), 18642–18663.

Moggia, C., Graell, J., Lara, I., Schmeda-Hirschmann, G., Thomas-Valdés, S., & Lobos, G. A. (2016). Fruit characteristics and cuticle triterpenes as related to postharvest quality of highbush blueberries. *Scientia Horticulturae*, 211, 449–457.

Mohammed, M. A., Lakhan, A., Abdulkareem, K. H., Almujaally, N. A., Al, B. B. S. M. T., Memon, S., Marhoon, H. A., & Martinek, R. (2024). Edge-cloud remote sensing data-based plant disease detection using deep neural networks with transfer learning. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 17, 11219–11229.

Montalba, R., Arriagada, C., Alvear, M., & Zúñiga, G. E. (2010). Effects of conventional and organic nitrogen fertilizers on soil microbial activity, mycorrhizal colonization, leaf antioxidant content, and Fusarium wilt in highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.). *Scientia Horticulturae*, 125(4), 775–778.

Montalván-Burbano, N., Pérez-Valls, M., & Plaza-Úbeda, J. (2020). Analysis of scientific production on organizational innovation. *Cogent Business and Management*.
<https://doi.org/10.1080/23311975.2020.1745043>

Montalván-Burbano, N., Velastegui-Montoya, A., Gurumendi-Noriega, M., Morante-Carballo, F., & Adami, M. (2021). Worldwide research on land use and land cover in the amazon region. *Sustainability (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/su13116039>

- Mounika, A., Ilangovan, B., Mandal, S., Yashwant, W. S., Gali, S. P., & Shanmugam, A. (2022). Prospects of ultrasonically extracted food bioactives in the field of non-invasive biomedical applications—A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, *89*, 106121.
- Mu, L., Bi, J., Zhao, H., Li, J., Hou, H.-M., Zhang, G.-L., Hao, H., & Zhou, L. (2025). Intelligent pH-responsive films based on natural blueberry anthocyanins: A non-destructive monitoring system for the freshness of aquatic products with prospective smartphone compatibility. *Food Chemistry: X*, *28*, 102587.
- Navarro, P. D., Palma-Millanao, R., Ceballos, R., & Monje, A. J. (2022). *Steinernema australe* enhanced its efficacy against *Aegorhinus nodipennis* (Coleoptera: Curculionidae) larvae in berry orchards after an artificial selection process. *Agronomy*, *12*(5), 1128.
- Nestby, R., & Retamales, J. B. (2020). Diagnosis and management of nutritional constraints in berries. In *Fruit Crops* (pp. 567–582). Elsevier.
- Ngoc, N. P., & Thao, P. T. P. (2024). Yield-limiting nutrient response of lowbush blueberry grown in recent and ancient alluvial soils of the Mekong Delta. *PeerJ*, *12*, e17992.
- Ngugi, H. K., Scherm, H., & Lehman, J. S. (2002). Relationships between blueberry flower age, pollination, and conidial infection by *Monilinia vaccinii-corymbosi*. *Phytopathology*, *92*(10), 1104–1109.
- Ni, X., Takeda, F., Jiang, H., Yang, W. Q., Saito, S., & Li, C. (2022). A deep learning-based web application for segmentation and quantification of blueberry internal bruising. *Computers and Electronics in Agriculture*, *201*, 107200.
- Nichols, M. (2019). Recent changes in berry fruit production in New Zealand. *XI International Symposium on Protected Cultivation in Mild Winter Climates and I International Symposium on Nettings and 1268*, 285–288.

- Nickerson, N. L., & MacNeill, B. H. (1987). Studies on the spread of red leaf disease, caused by *Exobasidium vaccinii*, in lowbush blueberries. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 9(4), 307–310.
- Ning, N., Wang, X., Li, J., Bi, X., Li, M., Xing, Y., Che, Z., & Wang, Y. (2023). Effects of different antioxidants combined with high hydrostatic pressure on the color and anthocyanin retention of a blueberry juice blend during storage. *Food Science and Technology International*, 29(5), 518–528.
- Obedgiu, S. (2025). The Role of Biotechnology in Climate Change Adaptation and Postharvest Loss Mitigation in Blueberries. In *Handbook of Nature-Based Solutions to Mitigation and Adaptation to Climate Change* (pp. 1–38). Springer.
- Obregón Domínguez, J. A., Medina, C. A. M., & Barraza-Jáuregui, G. del C. (2024). Artificial neural networks in the retention of anthocyanins and total phenolics in the osmotic pre-treatment of Biloxi variety blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) jam. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 77(3), 10877–10885.
- Ogden, A. B., & van Iersel, M. W. (2009). Southern highbush blueberry production in high tunnels: Temperatures, development, yield, and fruit quality during the establishment years. *HortScience*, 44(7), 1850–1856.
- Oliveira, M., Rodrigues, C. M., & Teixeira, P. (2019). Microbiological quality of raw berries and their products: A focus on foodborne pathogens. *Heliyon*, 5(12).
- Oliver, J. E., Lewis, K. J., Taylor, S. J., & Chen, J. (2023). Complete Genome Sequences of *Xylella fastidiosa* subsp. *fastidiosa* and *X. fastidiosa* subsp. *multiplex* Strains Causing Blueberry Bacterial Leaf Scorch Disease in Georgia, USA. *Microbiology Resource Announcements*, 12(6), e00114-23.
- Olmstead, J. W., Armenta, H. P. R., & Lyrene, P. M. (2013). Using sparkleberry as a genetic source for machine harvest traits for southern highbush blueberry. *HortTechnology*, 23(4), 419–424.

- Olmstead, J. W., & Finn, C. E. (2014). Breeding highbush blueberry cultivars adapted to machine harvest for the fresh market. *HortTechnology*, 24(3), 290–294.
- Onofre, R. B., Mertely, J. C., Aguiar, F. M., Timilsina, S., Harmon, P., Vallad, G. E., & Peres, N. A. (2016). First report of target spot caused by *Corynespora cassiicola* on blueberry in North America. *Plant Disease*, 100(2), 528.
- Ordóñez-Díaz, J. L., Pereira-Caro, G., Cardeñosa, V., Muriel, J. L., & Moreno-Rojas, J. M. (2020). Study of the quality attributes of selected blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) varieties grown under different irrigation regimes and cultivation systems. *Applied Sciences*, 10(23), 8459.
- Oteiza, J. M., Prez, V. E., Pereyra, D., Jaureguiberry, M. V., Sánchez, G., Sant'Ana, A. S., & Barril, P. A. (2022). Occurrence of norovirus, rotavirus, hepatitis A virus, and enterovirus in berries in Argentina. *Food and Environmental Virology*, 14(2), 170–177.
- Ozeki, M., & Tamada, T. (2004). The potentials of forcing culture of southern highbush blueberry in Japan. *VIII International Symposium on Vaccinium Culture* 715, 241–246.
- Ozkan, G., Oner, M. E., Fischer, A., Juadjur, A., Aganovic, K., Dräger, G., Capanoglu, E., & Esatbeyoglu, T. (2025). Effects of non-thermal food processing techniques on the composition, bioaccessibility and shelf-life of bioactive compounds in a fruit juice blend. *Food Chemistry: X*, 103000.
- Ozturk, O. (2021). Bibliometric review of resource dependence theory literature: an overview. *Management Review Quarterly*, 71(3), 525–552.
- Panda, S. S., Hoogenboom, G., & Paz, J. O. (2010). Remote sensing and geospatial technological applications for site-specific management of fruit and nut crops: A review. *Remote Sensing*, 2(8), 1973–1997.

- Park, B., Shin, T.-S., Cho, J.-S., Lim, J.-H., & Park, K.-J. (2021). Characterizing hyperspectral microscope imagery for classification of blueberry firmness with deep learning methods. *Agronomy*, *12*(1), 85.
- Pathak, N., Grossi Bovi, G., Limnaios, A., Fröhling, A., Brincat, J., Taoukis, P., Valdramidis, V. P., & Schlüter, O. (2020). Impact of cold atmospheric pressure plasma processing on storage of blueberries. *Journal of Food Processing and Preservation*, *44*(8), e14581.
- Penney, V., Henderson, G., Blum, C., & Johnson-Green, P. (2004). The potential of phytopreservatives and nisin to control microbial spoilage of minimally processed fruit yogurts. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *5*(3), 369–375.
- Percival, D. C., Gallant, D., Harrington, T., & Brown, G. (2016). Potential for commercial unmanned aerial vehicle use in wild blueberry production. *XI International Vaccinium Symposium 1180*, 233–240.
- Percival, D., & Dias, G. (2012). Energy consumption and greenhouse gas production in wild blueberry production. *X International Symposium on Vaccinium and Other Superfruits 1017*, 163–168.
- Percival, D., & MacKenzie, J. L. (2007). Use of plant growth regulators to increase polyphenolic compounds in the wild blueberry. *Canadian Journal of Plant Science*, *87*(2), 333–336.
- Pereira, M., Mota, M., & Oliveira, P. B. (2021). Extending blueberry production season with different covering materials. *XII International Vaccinium Symposium 1357*, 69–78.
- Perez, M. F., Chacón, F. I., Sineli, P. E., Poehlein, A., Daniel, R., & Dib, J. R. (2025). Impact of postharvest management practices on the microbiome of blueberry from Tucumán, Argentina. *Journal of Agriculture and Food Research*, *21*, 101915.

- Pérez, R., Laca, A., Laca, A., & Díaz, M. (2022). Environmental behaviour of blueberry production at small-scale in Northern Spain and improvement opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 339, 130594.
- Perini, M., Giongo, L., Grisenti, M., Bontempo, L., & Camin, F. (2018). Stable isotope ratio analysis of different European raspberries, blackberries, blueberries, currants and strawberries. *Food Chemistry*, 239, 48–55.
- Pluta, S., & Zurawicz, E. (2012). The high-bush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) breeding programme in Poland. *X International Symposium on Vaccinium and Other Superfruits 1017*, 177–180.
- Polavarapu, S., Koppenhöfer, A. M., Barry, J. D., Holdcraft, R. J., & Fuzy, E. M. (2007). Entomopathogenic nematodes and neonicotinoids for remedial control of oriental beetle, *Anomala orientalis* (Coleoptera: Scarabaeidae), in highbush blueberry. *Crop Protection*, 26(8), 1266–1271.
- Porter Starr, K. N., Connelly, M. A., Wallis, J., North, R., Zhang, Q., Song, K., González-Delgado, J. M., Brochu, H. N., Icenhour, C. R., & Iyer, L. K. (2025). Effects of Blueberry Consumption on Fecal Microbiome Composition and Circulating Metabolites, Lipids, and Lipoproteins in a Randomized Controlled Trial of Older Adults with Overweight or Obesity: The BEACTIVE Trial. *Nutrients*, 17(7), 1200.
- Postman, J., Oliphant, J., & Hummer, K. (2008). Diseases impact management of USDA clonal *Vaccinium* genebank. *IX International Vaccinium Symposium 810*, 319–324.
- Pratap-Singh, A., Shojaei, M., Singh, A., Ye, Y., Mandal, R., Yan, Y., Pico, J., Gerbrandt, E. M., & Castellarin, S. D. (2023). Effects of pulsed light on the postharvest quality and shelf-life of highbush blueberries (cv. Draper). *Applied Food Research*, 3(1), 100273.
- PROCOLOMBIA. (2025). *¿Por qué los arándanos colombianos son tan apetecidos en el mundo?*

- Prodorutti, D., Pertot, I., Giongo, L., & Gessler, C. (2007). Highbush blueberry: Cultivation, protection, breeding and biotechnology. *The European Journal of Plant Science and Biotechnology*, *1*(1), 44–56.
- Pszczołkowska, A., Okorski, A., Paukzsto, Ł., & Jastrzębski, J. (2016). First report of anthracnose disease caused by *Colletotrichum fiorinae* on blueberry in western Poland. *Plant Disease*, *100*(10), 2167.
- Qiu, D., Wei, X., Fan, S., Jian, D., & Chen, J. (2018). Regeneration of blueberry cultivars through indirect shoot organogenesis. *HortScience*, *53*(7), 1045–1049.
- Qu, H., Zheng, C., Ji, H., Barai, K., & Zhang, Y.-J. (2024). A fast and efficient approach to estimate wild blueberry yield using machine learning with drone photography: Flight altitude, sampling method and model effects. *Computers and Electronics in Agriculture*, *216*, 108543.
- Rashwan, A. K., Osman, A. I., Karim, N., Mo, J., & Chen, W. (2024). Unveiling the mechanisms of the Development of blueberries-based Functional foods: An updated and Comprehensive Review. *Food Reviews International*, *40*(7), 1913–1940.
- Ravichandran, K. S., & Krishnaswamy, K. (2023). Sustainable food processing of selected North American native berries to support agroforestry. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *63*(20), 4235–4260.
- Reeh, K. W., & Cutler, G. C. (2013). Laboratory efficacy and fungicide compatibility of *Clonostachys rosea* against *Botrytis* blight on lowbush blueberry. *Canadian Journal of Plant Science*, *93*(4), 639–642.
- Reeh, K. W., Hillier, N. K., & Cutler, G. C. (2014). Potential of bumble bees as bio-vectors of *Clonostachys rosea* for *Botrytis* blight management in lowbush blueberry. *Journal of Pest Science*, *87*(3), 543–550.

- Reich, R. M., Lojewski, N., Lundquist, J. E., & Bravo, V. A. (2018). Predicting abundance and productivity of blueberry plants under insect defoliation in Alaska. *Journal of Sustainable Forestry*, 37(5), 525–536.
- Renquist, S. (2005). An evaluation of blueberry cultivars grown in plastic tunnels in Douglas County, Oregon. *International Journal of Fruit Science*, 5(4), 31–38.
- Reque, P. M., Steckert, E. V., dos Santos, F. T., Danelli, D., Jablonski, A., Flôres, S. H., Rech, R., de O. Rios, A., & de Jong, E. V. (2016). Heat processing of blueberries and its effect on their physicochemical and bioactive properties. *Journal of Food Process Engineering*, 39(6), 564–572.
- Resolución 780006 De, <https://www.ica.gov.co/normatividad/normas-ica/resoluciones-oficinas-nacionales/2020/2020r78006> (2020).
- Retamales, J. B., & Hancock, J. F. (2018). *Blueberries* (Vol. 27). Cabi.
- Retamal-Salgado, J., Bastías, R. M., Wilckens, R., & Paulino, L. (2015). Influence of microclimatic conditions under high tunnels on the physiological and productive responses in blueberry 'O'Neal'. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 75(3), 291–297.
- Rocha, G. A. O., Medina, A. N. C., Arias, L. G., Caíta, J. F. A., & Villagran, E. (2022a). Análisis sobre la actividad científica referente a las estrategias de climatización pasiva usada en invernaderos: Parte 1: Análisis bibliométrico. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(5), 4596–4623.
- Rocha, G. A. O., Medina, A. N. C., Arias, L. G., Caíta, J. F. A., & Villagran, E. (2022b). Análisis sobre la actividad científica referente a las estrategias de climatización pasiva usada en invernaderos: Parte 2: análisis técnico. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(6), 2220–2245.
- Rocha, G. A. O., Pichimata, M. A., & Villagran, E. (2021). Research on the Microclimate of Protected Agriculture Structures Using Numerical Simulation Tools: A Technical and Bibliometric Analysis

as a Contribution to the Sustainability of Under-Cover Cropping in Tropical and Subtropical Countries. *Sustainability* 2021, Vol. 13, Page 10433, 13(18), 10433.

<https://doi.org/10.3390/SU131810433>

Rodgers Dinstel, R., Cascio, J., & Koukel, S. (2013). The antioxidant level of Alaska's wild berries: high, higher and highest. *International Journal of Circumpolar Health*, 72(1), 21188.

Roesler, G. D., Rodrigues, J., & Forti, V. A. (2023). Bibliometric revision regarding the use of survival analysis in seed germination studies. *Ciência Rural*, 53(11). <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20220223>

Román-Mireles, A. (2023). Remote sensing as a tool for natural disaster risk analysis: a bibliometric review. *Salud, Ciencia y Tecnología - Serie de Conferencias*, 2, 390. <https://doi.org/10.56294/sctconf2023390>

Roubos, C. R., Rodriguez-Saona, C., Holdcraft, R., Mason, K. S., & Isaacs, R. (2014). Relative toxicity and residual activity of insecticides used in blueberry pest management: mortality of natural enemies. *Journal of Economic Entomology*, 107(1), 277–285.

Routray, W., & Orsat, V. (2011). Blueberries and their anthocyanins: factors affecting biosynthesis and properties. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 10(6), 303–320.

Rowland, L. J., Ogden, E. L., & Vinyard, B. T. (2020). Phenotypic evaluation of a hybrid diploid blueberry population for plant development and fruit quality traits. *Agronomy*, 10(8), 1067.

Salehi, F. (2022). Application of pulsed light technology for fruits and vegetables disinfection: A review. *Journal of Applied Microbiology*, 132(4), 2521–2530.

Salinas-Velandia, D. A., Romero-Perdomo, F., Numa-Vergel, S., Villagrán, E., Donado-Godoy, P., & Galindo-Pacheco, J. R. (2022). Insights into Circular Horticulture: Knowledge Diffusion, Resource Circulation, One Health Approach, and Greenhouse Technologies. In *International*

Journal of Environmental Research and Public Health (Vol. 19, Issue 19).
<https://doi.org/10.3390/ijerph191912053>

- Santillan-Angeles, A., Mendoza-Perez, C., Villagrán, E., Garcia, F., & Flores-Velazquez, J. (2025). Bibliometric Analysis of Hydrothermal Wastewater Treatment in the Last Two Decades. *Water*, *17*(5), 746.
- Santos, B. M., & Salame-Donoso, T. P. (2012). Performance of southern highbush blueberry cultivars under high tunnels in Florida. *HortTechnology*, *22*(5), 700–704.
- Santos, R. O., Trindade, S. C., Maurer, L. H., Bersch, A. M., Sautter, C. K., & Penna, N. G. (2016). Physicochemical, antioxidant and sensory quality of brazilian blueberry wine. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, *88*(03), 1557–1568.
- Satanina, V., Kalt, W., Astatkie, T., Havard, P., & Martynenko, A. (2014). Comparison of anthocyanin concentration in blueberries processed using hydrothermodynamic technology and conventional processing technologies. *Journal of Food Process Engineering*, *37*(6), 609–618.
- Scheidt, T. B., & Silva, F. V. M. (2018). High pressure processing and storage of blueberries: effect on fruit hardness. *High Pressure Research*, *38*(1), 80–89.
- Scherm, H., & Copes, W. E. (1999). Evaluation of methods to detect fruit infected by *Monilinia vaccinii-corymbosi* in mechanically harvested rabbiteye blueberry. *Plant Disease*, *83*(9), 799–805.
- Schumann, A. W., Mood, N. S., Mungofa, P. D. K., MacEachern, C., Zaman, Q., & Esau, T. (2019). Detection of three fruit maturity stages in wild blueberry fields using deep learning artificial neural networks. *2019 ASABE Annual International Meeting*, 1.
- Ścibisz, I., & Mitek, M. (2009). Effect of processing and storage conditions on phenolic compounds and antioxidant capacity of highbush blueberry jams. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, *59*(1), 45–52.

- Ścibisz, I., Ziarno, M., Mitek, M., & Zaręba, D. (2012). Effect of probiotic cultures on the stability of anthocyanins in blueberry yoghurts. *LWT-Food Science and Technology*, *49*(2), 208–212.
- Seo, J. Y., Jang, J. H., Kim, J.-S., Kim, E.-J., & Kim, J.-S. (2016). Development of low-sugar antioxidant jam by a combination of anthocyanin-rich berries. *Applied Biological Chemistry*, *59*(2), 305–312.
- Shantharaj, D., Naranjo, E., Merfa, M. V, Cobine, P. A., Santra, S., & De La Fuente, L. (2023). Zinc oxide-based nanoformulation zinkicide mitigates the xylem-limited pathogen *Xylella fastidiosa* in tobacco and southern highbush blueberry. *Plant Disease*, *107*(4), 1096–1106.
- Shantharaj, D., Román-Écija, M., Velasco-Amo, M. P., Navas-Cortés, J. A., Landa, B. B., & De La Fuente, L. (2024). European *Xylella fastidiosa* strains can cause symptoms in blueberry. *Plant Disease*, *108*(9), 2658–2662.
- Shaoqian, C. A. O., Kai, J., & Liang, L. I. U. (2022). Coupled Oxidative Degradation of Blueberry Anthocyanins Induced by Catechol. *Science and Technology of Food Industry*, *43*(2), 58–63.
- Sharma, P., & Venugopal, A. P. (2024). Bruise damage susceptibility of blueberry and strawberry. In *Mechanical Damage in Fresh Horticultural Produce: Measurement, Analysis and Control* (pp. 239–267). Springer.
- Sheikh, M. H., Mim, T. T., Reza, M. S., & Hena, M. H. (2019). Leaf diseases detection for commercial cultivation of obsolete fruit in bangladesh using image processing system. *2019 8th International Conference System Modeling and Advancement in Research Trends (SMART)*, 271–275.
- Shen, X., Sheng, L., Benedict, C., Kruger, C. E., Su, Y., Schacht, E., Zhang, Y., & Zhu, M.-J. (2020). Evaluation of pre-harvest microbiological safety of blueberry production with or without manure-derived fertilizer. *Frontiers in Microbiology*, *10*, 3130.

- Silva, V. L. M., Silva, A. C. O., Costa-Lima, B. R. C., Carneiro, C. S., & Conte-Junior, C. A. (2017). Stability of polyphenols from blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) in fermented dairy beverage. *Journal of Food Processing and Preservation*, *41*(6), e13305.
- Sim, A., Pearse, J., McGuinness, B., Williams, H., & Duke, M. (2024). Evaluation of a low-cost selective shaking device and soft surface catchment for fresh market blueberry harvesting. *2024 IEEE 20th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 2813–2818.
- Sinelli, N., Spinardi, A., Di Egidio, V., Mignani, I., & Casiraghi, E. (2008). Evaluation of quality and nutraceutical content of blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.) by near and mid-infrared spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*, *50*(1), 31–36.
- Singh, P., Niknejad, N., Spiers, J. D., Bao, Y., & Ru, S. (2025). Development of a Smartphone Application for Rapid Blueberry Detection and Yield Estimation. *Smart Agricultural Technology*, 101361.
- Smagghe, G. (2020). Case studies on entomovectoring in the greenhouse and open field. In *Entomovectoring for Precision Biocontrol and Enhanced Pollination of Crops* (pp. 123–136). Springer.
- Smith, B. J., & Miller-Butler, M. A. (2016). Effect of nitrogen fertilization and fungicides on *Botryosphaeria* stem blight lesion development on detached blueberry stems. *XI International Vaccinium Symposium 1180*, 61–70.
- Smith, B. J., Miller-Butler, M. A., Curry, K. J., & Sakhanokho, H. F. (2016). Effect of *Phytophthora cinnamomi* isolate, inoculum delivery method, and flood and drought conditions on vigor, disease severity scores, and survival of blueberry plants. *XI International Vaccinium Symposium 1180*, 93–104.

- Smrke, T., Veberic, R., Hudina, M., & Jakopic, J. (2022). Pot and Ridge Production of Three Highbush Blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) Cultivars under High Tunnels. *Agriculture*, 12(4), 438.
- Smrke, T., Veberic, R., Hudina, M., Zitko, V., Ferlan, M., & Jakopic, J. (2021). Fruit quality and yield of three highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) cultivars grown in two planting systems under different protected environments. *Horticulturae*, 7(12), 591.
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333–339.
- Song, H.-N., Ji, S.-A., Park, H.-R., Kim, H.-H., & Hogstrand, C. (2018). Impact of various factors on color stability of fresh blueberry juice during storage. *Preventive Nutrition and Food Science*, 23(1), 46.
- Song, Z., Xu, B., Kang, S., Dai, H., Zhou, X., Li, M., Luo, M., Ji, S., & Zhou, Q. (2025). Calcium chloride treatment delayed the softening of postharvest blueberries by regulating ABA biosynthesis and signal transduction. *Scientia Horticulturae*, 339, 113879.
- Sorica, C., Vintilă, M., Pirnă, I., Grigore, I., Cristea, M., Vladuțoiu, L., Sorica, E., Bălănescu, I. N., Grosu, C., & Raischi, M. (2019). Researches on the freezing of blueberries and green bean pods using an experimental model of a fast freezing equipment. *E3S Web of Conferences*, 112, 3033.
- Spiers, J. M., Marshall, D. A., & Braswell, J. H. (2004). Chilling requirement studies in blueberries. *Small Fruits Review*, 3(3–4), 325–330.
- Srivastava, A., Akoh, C. C., Yi, W., Fischer, J., & Krewer, G. (2007). Effect of storage conditions on the biological activity of phenolic compounds of blueberry extract packed in glass bottles. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(7), 2705–2713.

- Starrett, M. C. (2002). Initial shoot growth and development of micropropagated blueberry plants following inoculation with an ericoid mycorrhizal isolate. *XXVI International Horticultural Congress: Berry Crop Breeding, Production and Utilization for a New Century* 626, 191–197.
- Stein-Chisholm, R. E., Finley, J. W., Losso, J. N., & Beaulieu, J. C. (2017). Not-from-concentrate blueberry juice extraction utilizing frozen fruit, heated mash, and enzyme processes. *HortTechnology*, 27(1), 30–36.
- Stretch, A. W., Ehlenfeldt, M. K., Brewster, V., Vorsa, N., & Polashock, J. (2001). Resistance of diploid *Vaccinium* spp. to the fruit rot stage of mummy berry disease. *Plant Disease*, 85(1), 27–30.
- Strik, B. C. (2010). Flowering and fruiting on command in berry crops. *XXVIII International Horticultural Congress on Science and Horticulture for People (IHC2010): International Symposium on* 926, 197–214.
- Stringer, S. J., Draper, A. D., Spiers, J. M., & Marshall, D. A. (2008). Potential new blueberry cultivars for the Gulf Coast region of the US. *IX International Vaccinium Symposium* 810, 87–92.
- Stückrath, R., Quevedo, R., de la Fuente, L., Hernández, A., & Sepúlveda, V. (2008). Effect of foliar application of calcium on the quality of blueberry fruits. *Journal of Plant Nutrition*, 31(7), 1299–1312.
- Sullca, C., Molina, C., Rodríguez, C., & Fernández, T. (2019). Diseases detection in blueberry leaves using computer vision and machine learning techniques. *International Journal of Machine Learning and Computing*, 9(5), 656–661.
- Sun, K. X., Zhang, Y. J., Zhou, C. Z., Yang, S. L., Jiang, H. X., & Cui, R. R. (2024). Effect of gradual pollen presentation on pollination efficiency and reproduction of *Vaccinium corymbosum* Berkeley in two habitats. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 12, 1476848.

- Sun, Y., Huang, F., Chen, Y., Ning, N., Hao, G., & Bi, X. (2024). The effect of high-pressure processing on the copigmentation and storage stability of polyphenols with anthocyanin monomers. *Foods*, *13*(23), 3756.
- Suresh, S. N., SenthilKumar, P., Pushparaj, C., Sarangi, P. K., Regina, V. R., & Subramani, R. (2024). Almond gum-chitosan nanocomposite as edible formulation for advancing postharvest longevity of fruits and vegetables. *Polymers for Advanced Technologies*, *35*(6), e6453.
- Suzuki, A., Shimizu, T., & Aoba, K. (1998). Effects of leaf/fruit ratio and pollen density on highbush blueberry fruit quality and maturation. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, *67*(5), 739–743.
- Syamaladevi, R. M., Andrews, P. K., Davies, N. M., Walters, T., & Sablani, S. S. (2012). Storage effects on anthocyanins, phenolics and antioxidant activity of thermally processed conventional and organic blueberries. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *92*(4), 916–924.
- Szakiel, A., Pączkowski, C., Pensec, F., & Bertsch, C. (2012). Fruit cuticular waxes as a source of biologically active triterpenoids. *Phytochemistry Reviews*, *11*(2), 263–284.
- Tadepalli, S., Bridges, D. F., Anderson, R., Zhang, R., & Wu, V. C. H. (2019). Synergistic effect of sequential wash treatment with two different low-dosage antimicrobial washes in combination with frozen storage increases *Salmonella* Typhimurium and *Listeria monocytogenes* reduction on wild blueberries. *Food Control*, *102*, 87–93.
- Takahashi, S., Che, J., Horiuchi, N., Cho, H. Y., Onwona-Agyeman, S., Kojima, K., Yamada, M., & Ogiwara, I. (2021). Production of low-potassium fruit of potted and fertigated southern highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L. interspecific hybrid). *The Horticulture Journal*, *90*(2), 161–171.

- Takeda, F., Krewer, G., Li, C., MacLean, D., & Olmstead, J. W. (2013). Techniques for increasing machine harvest efficiency in highbush blueberry. *HortTechnology*, 23(4), 430–436.
- Tamada, T. (1996). Blueberry culture and research in Japan. *Journal of Small Fruit & Viticulture*, 3(4), 227–241.
- Tan, C., Wang, M., Kong, Y., Wan, M., Deng, H., Tong, Y., Lyu, C., & Meng, X. (2022). Anti-inflammatory and intestinal microbiota modulation properties of high hydrostatic pressure treated cyanidin-3-glucoside and blueberry pectin complexes on dextran sodium sulfate-induced ulcerative colitis mice. *Food & Function*, 13(8), 4384–4398.
- Tarnowski, T. L. B., Savelle, A. T., & Scherm, H. (2008). Activity of fungicides against *Monilinia vaccinii-corymbosi* in blueberry flowers treated at different phenological stages. *Plant Disease*, 92(6), 961–965.
- Tartanus, M., Malusa, E., Sas, D., & Łabanowska, B. (2018). Integrated control of *Lecanium* scale (*Parthenolecanium* sp.) on highbush blueberry in open field and protected crops. *Journal of Plant Protection Research*, 297–303.
- Thalacker-Mercer, A., & Blum, J. (2021). Discovery and application of dietary compounds to optimize human health, a focus on skeletal muscle regeneration. *Current Opinion in Biotechnology*, 70, 131–135.
- Thimmappa, B. C., Salhi, L. N., Forget, L., Sarrasin, M., Bustamante Villalobos, P., Henrissat, B., Lang, B. F., & Burger, G. (2024). A biofertilizing fungal endophyte of cranberry plants suppresses the plant pathogen *Diaporthe*. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1327392.
- Thomas-Sharma, S., & Scherm, H. (2017). Pre-and post-anthesis activity of fenbuconazole and triforine against blueberry flower infection by *Monilinia vaccinii-corymbosi*. *Crop Protection*, 96, 180–187.

- Tian, L., Liu, L., Jiang, Y., Yang, Y., Dong, G., & Yu, H. (2023). Tobacco rattle virus-induced VcANS gene silencing in blueberry fruit. *Gene*, *852*, 147054.
- Tianyi, Z., & Fengzhi, D. (2022). A Review of Machine Vision Based Fruit Recognition Applications. *人工生命とロボットに関する国際会議予稿集*, *27*, 827–830.
- Tierney, R. ; R. F. ; E. K. (2022). *International Encyclopedia of Education*.
- Toporkova, V. I., Vishnyakov, E. V, Sidorov, K. O., Terninko, I. I., & Ivkin, D. Y. (2021). Assessment of the influence of the mineral complex of rutin on the degree of expression of anti-diabetic activity. *Drug Development & Registration*, *10*(4), 197–205.
- Tran, Q., Retano, A., Bryla, D. R., Garcia-Jaramillo, M., & Jin, X. (2025). Integrated Electrodialysis–Forward Osmosis Process for Sustainable Water Reuse: A Case Study in Southern Highbush Blueberry. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 117178.
- Trejo-Pech, C. O., Rodríguez-Magaña, A., Briseño-Ramírez, H., & Ahumada, R. (2024). A Monte Carlo simulation case study on blueberries from Mexico. *International Food and Agribusiness Management Review*, *27*(2), 359–377.
- Tuovinen, T. (2008). Risk of invasive arthropod pests related to climate change in the northernmost small fruit production area in EU. *Workshop on Berry Production in Changing Climate Conditions and Cultivation Systems. COST-Action 863: Euroberry Research: From 838*, 151–154.
- Vattem, D. A., Lin, Y.-T., Ghaedian, R., & Shetty, K. (2005). Cranberry synergies for dietary management of *Helicobacter pylori* infections. *Process Biochemistry*, *40*(5), 1583–1592.
- Viencz, T., Santana, K., Ayub, R. A., & Botelho, R. V. (2021). Development, photosynthesis and yield of blueberry cultivar ‘Climax’ growth with different substrates and nitrogen fertilization under protected cultivation. *Ciencia Rural*, *51*(6), e20190367.

- Vilela, A., Gonçalves, B., Ribeiro, C., Fonseca, A. T., Correia, S., Fernandes, H., Ferreira, S., Bacelar, E., & Silva, A. P. (2016). Study of textural, chemical, color and sensory properties of organic blueberries harvested in two distinct years: A chemometric approach. *Journal of Texture Studies*, *47*(3), 199–207.
- Villagran, E., Espitia, J. J., Rodriguez, J., Gomez, L., Amado, G., Baeza, E., Aguilar-Rodríguez, C. E., Flores-Velazquez, J., Akrami, M., & Gil, R. (2025). Use of Lighting Technology in Controlled and Semi-Controlled Agriculture in Greenhouses and Protected Agriculture Systems—Part 1: Scientific and Bibliometric Analysis. *Sustainability*, *17*(4), 1712.
- Villagran, E., Espitia, J. J., Velázquez, F. A., & Rodriguez, J. (2024). Solar Dryers: Technical Insights and Bibliometric Trends in Energy Technologies. *AgriEngineering*, *6*(4), 4041–4063.
- Villagran, E., Ortiz, G. A., Mojica, L., Flores-Velasquez, J., Aguilar, C. E., Gomez, L., Antolinez, E., & Numa, S. (2023). Bibliometric Study of Cut Flower Research. *Ornamental Horticulture*, *29*, 500–514.
- Villagran, E., Rocha, G. A. O., Mojica, L., Flores-Velazquez, J., Aguilar, C. E., Gomez, L., Gomez, D., Antolinez, E., & Numa, S. (2024). Scientific analysis of cut flowers: a review of the main technical issues developed. *Ornamental Horticulture*, *30*, e242699.
- Villagrán, E., Romero-Perdomo, F., Numa-Vergel, S., Galindo-Pacheco, J. R., & Salinas-Velandia, D. A. (2023). Life Cycle Assessment in Protected Agriculture: Where Are We Now, and Where Should We Go Next? *Horticulturae*, *10*(1), 15.
- Villagrán, E., Romero-Perdomo, F., Numa-Vergel, S., Galindo-Pacheco, J. R., & Salinas-Velandia, D. A. (2024). Life Cycle Assessment in Protected Agriculture: Where Are We Now, and Where Should We Go Next? *Horticulturae*, *10*(1), 15.

- Villagran, E., Toro-Tobón, G., Velázquez, F. A., & Estrada-Bonilla, G. A. (2024). Integration of IoT Technologies and High-Performance Phenotyping for Climate Control in Greenhouses and Mitigation of Water Deficit: A Study of High-Andean Oat. *AgriEngineering*, 6(4), 4011–4040.
- Vittadini, E., Curti, E., Del Rio, D., & Vodovotz, Y. (2005). *Development of Antioxidant-Rich Fruit-Based Snacks as Food Space Prototype*. SAE Technical Paper.
- Waliullah, S., Di Genova, D., Oliver, J. E., & Ali, M. E. (2022). Development of a CAPS Marker and a LAMP Assay for Rapid Detection of *Xylella fastidiosa* Subsp. multiplex and Differentiation from *X. fastidiosa* Subsp. fastidiosa on Blueberry. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(4), 1937.
- Wang, D., Zhang, M., Mujumdar, A. S., & Yu, D. (2022). Advanced detection techniques using artificial intelligence in processing of berries. *Food Engineering Reviews*, 14(1), 176–199.
- Wang, H., Xia, X., & An, L. (2021). Effect of hydrogen cyanamide on bud break, fruit yield and quality of highbush blueberry in greenhouse production. *Agriculture*, 11(5), 439.
- Wang, W., Zhang, W., Li, L., Deng, W., Liu, M., & Hu, J. (2023). Biodegradable starch-based packaging films incorporated with polyurethane-encapsulated essential-oil microcapsules for sustained food preservation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 235, 123889.
- Wang, Y., Gallegos, J. L., Haskell-Ramsay, C., & Lodge, J. K. (2021). Effects of chronic consumption of specific fruit (berries, citrus and cherries) on CVD risk factors: A systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials. *European Journal of Nutrition*, 60(2), 615–639.
- Wang, Y., Haskell-Ramsay, C., Gallegos, J. L., & Lodge, J. K. (2023). Effects of chronic consumption of specific fruit (berries, cherries and citrus) on cognitive health: a systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials. *European Journal of Clinical Nutrition*, 77(1), 7–22.

- Wang, Y., Zhang, Q., Cui, M.-Y., Fu, Y., Wang, X.-H., Yang, Q., Zhu, Y., Yang, X.-H., Bi, H.-J., & Gao, X.-L. (2023). Aroma enhancement of blueberry wine by postharvest partial dehydration of blueberries. *Food Chemistry*, *426*, 136593.
- Waterhouse, G. I. N., Sun-Waterhouse, D., Su, G., Zhao, H., & Zhao, M. (2017). Spray-drying of antioxidant-rich blueberry waste extracts; interplay between waste pretreatments and spray-drying process. *Food and Bioprocess Technology*, *10*(6), 1074–1092.
- Williams, R. J., & Spencer, J. P. E. (2012). Flavonoids, cognition, and dementia: actions, mechanisms, and potential therapeutic utility for Alzheimer disease. *Free Radical Biology and Medicine*, *52*(1), 35–45.
- Wiseman, M. S., Gordon, M. I., & Putnam, M. L. (2016). First report of leaf rust caused by *Thekopsora minima* on northern highbush blueberry in Oregon. *Plant Disease*, *100*(9), 1949.
- Wu, W. L., Zhao, H. F., Fang, L., Lv, L. F., & Li, W. L. (2012). Nutritional components in the fruit of different blueberry cultivars in Nanjing. *Applied Mechanics and Materials*, *140*, 374–378.
- Wu, Y., Han, T., Yang, H., Lyu, L., Li, W., & Wu, W. (2023). Known and potential health benefits and mechanisms of blueberry anthocyanins: A review. *Food Bioscience*, *55*, 103050.
- Wu, Y., Xu, L., Liu, X., Hasan, K. M. F., Li, H., Zhou, S., Zhang, Q., & Zhou, Y. (2021). Effect of thermosonication treatment on blueberry juice quality: Total phenolics, flavonoids, anthocyanin, and antioxidant activity. *Lwt*, *150*, 112021.
- Wu, Z., Li, H., Wang, Y., Tan, H., Yang, Y., Zhan, Y., & Wang, F. (2019). *Effects of different thermal-treated temperatures on polyphenols and flavonoids of blueberry juice during cold storage*.
- Xie, C., Wang, Q., Ying, R., Wang, Y., Wang, Z., & Huang, M. (2020). Binding a chondroitin sulfate-based nanocomplex with kappa-carrageenan to enhance the stability of anthocyanins. *Food Hydrocolloids*, *100*, 105448.

- Xie, X., Nie, Y., Wang, Y., Wen, B., Shang, J., Guo, X., Tian, J., Wang, Y., Zhang, Y., & Li, S. (2025). Integration of GC-MS, ROAV, and chemometrics to characterize key differential volatile compounds in wild and cultivated blueberries from Northeast China. *LWT-Food Science and Technology*, 225(11795), 0.
- Xin, M., Liu, Z., Nie, Y., Wang, Y., Tian, J., Huang, W., Yang, S., Yang, Y., & Li, B. (2025). Mechanism of protein binding to blueberry anthocyanins in the presence of 2-Furaldehyde, a sucrose degradation product. *Food Hydrocolloids*, 162, 111028.
- Xingcai, W. E. I., Bangdi, L. I. U., Xinqun, Z., Jing, S. U. N., Shanshan, Z., & Guangfei, H. A. O. (2024). Effects of combined dehydration treatment with different biological-source cryoprotectants on the freeze-thawed quality of blueberries. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 40(15), 271–279.
- Xu, G., An, Q., Liu, G., Zhao, L., & Wang, H. (2021). *A new blueberry cultivar 'chasing dream'*.
- Yang, H., Guo, J., Lin, S., Huang, L., Cheng, X., Yi, W., Wang, R., Shan, Y., Jiang, N., & Ding, S. (2025). New insights into the mechanism of quick-freezing reducing blueberry flavor loss: Coupling cellular microstructure maintenance and fatty acid metabolism regulation. *Food Research International*, 117581.
- Yao, G.-L., Ma, X.-H., Cao, X.-Y., & Chen, J. (2016). Effects of power ultrasound on stability of cyanidin-3-glucoside obtained from blueberry. *Molecules*, 21(11), 1564.
- Yao, L., Zhang, Y., Zhao, C., Zhao, F., & Bai, S. (2022). The PRISMA 2020 statement: a system review of hospital preparedness for bioterrorism events. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(23), 16257.
- Yeo, J. R., Weiland, J. E., Sullivan, D. M., & Bryla, D. R. (2016). Susceptibility of highbush blueberry cultivars to phytophthora root rot. *HortScience*, 51(1), 74–78.

- Yu, B., Zhao, H., & Zhang, X. (2025). BlueberryNet: A Lightweight CNN for Real-Time Ripeness Detection in Automated Blueberry Processing Systems. *Processes*, *13*(8), 2518.
- Yu, L., Rarisara, I., Xu, S. G., Wu, X., & Zhao, J. R. (2012). First report of stem blight of blueberry caused by *Botryosphaeria dothidea* in China. *Plant Disease*, *96*(11), 1697.
- Yu, P., Li, C., Takeda, F., Krewer, G., Rains, G., & Hamrita, T. (2012). Quantitative evaluation of a rotary blueberry mechanical harvester using a miniature instrumented sphere. *Computers and Electronics in Agriculture*, *88*, 25–31.
- Yu, Z., Yanchao, H., Ruiling, L., Huizhi, C., Xiangjun, F., Weijie, W., & Haiyan, G. (2024). Effect of FIRD-HPD Method on Drying Characteristics and Quality of Blueberry. *Journal of Chinese Institute of Food Science & Technology*, *24*(6).
- Yuan, Y. V., & Baduge, S. A. (2018). The contribution of phytochemicals to the antioxidant potential of fruit juices. In *Fruit juices* (pp. 95–128). Elsevier.
- Zaman, Q. U., Schumann, A. W., Percival, D. C., & Gordon, R. J. (2008). Estimation of wild blueberry fruit yield using digital color photography. *Transactions of the ASABE*, *51*(5), 1539–1544.
- Zang, Z., Chou, S., Si, X., Cui, H., Tan, H., Ding, Y., Liu, Z., Wang, H., Lang, Y., & Tang, S. (2022). Effect of bovine serum albumin on the stability and antioxidant activity of blueberry anthocyanins during processing and in vitro simulated digestion. *Food Chemistry*, *373*, 131496.
- Zárate-Carbajal, A., Turgeon, S. L., Bazinet, L., Mcsweeney, M., & Sierra, A. D. (2025). Optimizing wild blueberry juice production: Sensory, physicochemical, and phytochemical characteristics. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 101279.
- Zhai, Y., Liang, Z., Zhang, L., Xu, S., Huang, C., Zhou, X., Li, M., & Huang, Y. (2024). Machine learning based blueberry detection method by CIE-YOLOv5. *International Conference on*

Computer Graphics, Artificial Intelligence, and Data Processing (ICCAID 2023), 13105, 462–467.

Zhang, L., Wu, G., Wang, W., Yue, J., Yue, P., & Gao, X. (2019). Anthocyanin profile, color and antioxidant activity of blueberry (*Vaccinium ashei*) juice as affected by thermal pretreatment. *International Journal of Food Properties*, 22(1), 1035–1046.

Zhang, L., Xiao, G., Yu, Y., Xu, Y., Wu, J., Zou, B., & Li, L. (2022). Low-oxygen pulping combined with high hydrostatic pressure improve the stability of blueberry pulp anthocyanins and color during storage. *Food Control*, 138, 108991.

Zhang, L., Yan, Z., Hanson, E. J., & Ryser, E. T. (2015). Efficacy of chlorine dioxide gas and freezing rate on the microbiological quality of frozen blueberries. *Food Control*, 47, 114–119.

Zhang, Q.-G., Tao, L.-R., & Cai, M.-Y. (2014). Process and Storage Quality of Quick Freezing Blueberries in LN₂-spraying Fluidized Bed. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 6(7), 852–866.

Zhang, R., Dong, W., Hou, P., Li, H., Han, X., Chen, Q., Li, F., & Zhang, X. (2025). YOLOv11-BSD: Blueberry Maturity Detection Under Simulated Nighttime Conditions Evaluated with Causal Analysis. *Smart Agricultural Technology*, 101314.

Zhang, W., Wang, K., & Chen, C. (2022). Artificial neural network assisted multiobjective optimization of postharvest blanching and drying of blueberries. *Foods*, 11(21), 3347.

Zhang, X., Bi, J., Chen, Q., Wu, X., Li, X., & Lü, Y. (2022). *Quality and processing characteristics of a mixed freeze-dried powder of blueberry and blue honeysuckle berries during storage.*

Zhang, Z., Liu, H., Wu, L., & Li, Y. (2004). Technical system of blueberry micropropagation in China. *VIII International Symposium on Vaccinium Culture* 715, 421–426.

- ZHAO, F., FAN, S., ZHAO, H., LIU, H., LYU, L., WU, W., WU, Y., & LI, W. (2025). A comparison of fruit quality of ten high-anthocyanin blueberry cultivars. *JOURNAL OF NANJING FORESTRY UNIVERSITY*, 49(3), 63.
- Zhao, L., Wang, Y., He, W., & Zhang, Y. (2019). Stem blight of blueberry caused by *Lasiodiplodia vaccinii* sp. nov. in China. *Plant Disease*, 103(8), 2041–2050.
- Zheng, X., Qi, X., Xu, J., Cui, Y., Yu, X., Chang, X., Zhou, Y., & Gong, G. (2015). First report of *Corynespora* leaf spot of blueberry caused by *Corynespora cassiicola* in Sichuan, China. *Plant Disease*, 99(11), 1651.
- Zheng, Z., Chen, J., Tian, W., Zhang, C., & An, Z. (2021). Finite element analysis of blueberry stack damage. *Journal of Food Process Engineering*, 44(11), e13840.
- Zhijun, G. U. O., Hongli, Y., Zhuo, M. I. N., & Yulin, F. (2024). Research Progress in Aroma Compounds of Blueberry Wine and Their Influential Factors. *Food Science*, 45(6), 337–343.
- Zhou, D.-D., Luo, M., Huang, S.-Y., Saimaiti, A., Shang, A., Gan, R.-Y., & Li, H.-B. (2021). Effects and mechanisms of resveratrol on aging and age-related diseases. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2021(1), 9932218.
- Zhou, X., Liu, L., Li, J., Wang, L., & Song, X. (2022). Extraction and characterization of pectin from Jerusalem ArtiChoke residue and its application in blueberry preservation. *Coatings*, 12(3), 385.
- Zhu, J., Wang, Y., Li, X., Li, B., Liu, S., Chang, N., Jie, D., Ning, C., Gao, H., & Meng, X. (2017). Combined effect of ultrasound, heat, and pressure on *Escherichia coli* O157: H7, polyphenol oxidase activity, and anthocyanins in blueberry (*Vaccinium corymbosum*) juice. *Ultrasonics Sonochemistry*, 37, 251–259.

- Zhu, N., Zhang, S., Li, J., Qu, C., Sun, A., & Qiao, X. (2019). Design and optimization of a microchip operating at low-voltage pulsed electric field for juice sterilization. *Food and Bioprocess Technology*, 12(10), 1696–1707.
- Zhu, N., Zhu, Y., Yu, N., Wei, Y., Zhang, J., Hou, Y., & Sun, A. (2019). Evaluation of microbial, physicochemical parameters and flavor of blueberry juice after microchip-pulsed electric field. *Food Chemistry*, 274, 146–155.
- Zhu, Y., Huang, L., Dang, C., Wang, H., Jiang, G., Li, G., Zhang, Z., Lou, X., & Zheng, Y. (2016). Effects of high temperature on leaf stomatal traits and gas exchange parameters of blueberry. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 32(1), 218–225.
- Zhuxi, T., Mengling, D. A. I., Yongfu, L. I., Mingxiu, L., & Qiqi, L. U. O. (2023). Optimization of Enzymatic Transformation Process for Different Forms of Polyphenols from Blueberry Pulp and Its Antioxidant Activity Analysis. *Shipin Gongye Ke-Ji*, 44(9), 207–215.
- Zydlik, Z., Pacholak, E., Rutkowski, K., STYŁA, K., & Zydlik, P. (2016). The influence of a mycorrhizal vaccine on the biochemical properties of soil in the plantation of blueberry. *Zemdirbyste-Agriculture*, 103(1).
- 刘丽, 张玉翠, 张小帅, 黄欣莉, & 黄彩霞. (2023). 北方缺水地区农业智慧灌溉应用与发展. *农业工程*, 13(10), 78–83.
- 曹霞敏, 毕秀芳, 李仁杰, 董鹏, 胡小松, & 廖小军. (2014). 超高压和热杀菌对草莓浊汁及清汁品质的影响. *高压物理学报*, 28(5), 631–640.
- 李洋, 冯鑫, 徐瞳晖, 李庆鹏, & 黄碧飞. (2023). 不同冻结温度及冻融循环处理对蓝莓品质特性的影响. *Modern Food Science & Technology*, 39(5).

李翠萍, 袁磊, 杨延存, 王茜, 周凯乐, 刘双, & 李鹏程. (2018). Effect of plasticizers on the preservation of blueberries by quaternary ammonium salt of chitosan coating. *MODERN FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY*, 34(12), 117–121.

薛友林, 袁兴铃, 张鹏, 贾晓昱, 李春媛, & 李江阔. (2021). Effect of precise temperature control on low-temperature preservation of blueberries. *MODERN FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY*, 37(11), 185–194.