

Floricultura 4.0 en el Ecuador:

retos y directrices para la integración de tecnologías digitales y políticas públicas en el mejoramiento genético y la innovación productiva

Floriculture 4.0 in Ecuador: Challenges and guidelines for the integration of digital technologies and public policies in genetic improvement and productive innovation

Xavier Rojas-Ruilova ¹

Génesis Vásquez²

Isabel Marques³

¹Universidad Nacional de Loja, Facultad de la Salud Humana, Loja, Ecuador,
<https://orcid.org/0000-0002-5692-5366>
xavier.rojas@unl.edu.ec

²Universidad Nacional de Loja, Facultad de Energía, Loja, Ecuador,
<https://orcid.org/0000-0002-9632-5429>
genesis.vasquez@unl.edu.ec

³University of Lisbon, Forest Research Centre, Associate Laboratory TERRA, School of Agriculture, Lisboa, Portugal,
<https://orcid.org/0000-0001-9788-4831>
isabelmarques@isa.ulisboa.pt

DOI: 10.61854/rccedia.v1n1.006

Enviado: 20 de enero de 2026

Aprobado: 08 de abril de 2026

Publicado: martes 14 de julio de 2026



Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.

Resumen

La floricultura ecuatoriana se encuentra en un proceso de transformación impulsado por la digitalización, la biotecnología y la ciencia de datos. Este estudio examina el papel de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), la bioinformática y el análisis de big data en el mejoramiento genético, con especial énfasis en el contexto nacional. Mediante una revisión exploratoria de la literatura científica, se identifican patrones emergentes en la adopción de tecnologías digitales para el desarrollo de nuevas variedades florales. Los resultados evidencian un claro desequilibrio en el panorama tecnológico actual, caracterizado por un predominio de herramientas digitales orientadas a la producción, como sensores IoT e inteligencia artificial, frente a una integración aún limitada de enfoques bioinformáticos y genómicos. Esta asimetría sugiere que la innovación en la floricultura ecuatoriana está siendo impulsada principalmente por la optimización del manejo del cultivo, más que por avances en la base genética de los sistemas productivos. No obstante, la incorporación de herramientas genómicas en especies ornamentales presenta un alto potencial para perfeccionar la eficiencia del mejoramiento genético, mediante la identificación de genes asociados a rasgos de interés y tolerancia al estrés, contribuyendo al desarrollo de sistemas de producción más resilientes y competitivos. En este contexto, los resultados subrayan la necesidad de fortalecer políticas públicas que promuevan la integración de capacidades genómicas y bioinformáticas dentro del sector florícola. Esto incluye la inversión en infraestructura científica, la formación de capital humano especializado y el fomento de alianzas entre academia, sector productivo y entidades gubernamentales. Una estrategia coordinada en esta dirección podría posicionar al Ecuador como un referente regional en floricultura 4.0, articulando innovación tecnológica con el aprovechamiento sostenible de su biodiversidad.

Palabras clave:

flores, bioinformática, big data, industria, innovación digital, orquídeas.

Introducción

La floricultura constituye uno de los sectores agrícolas más dinámicos del Ecuador, reconocido a nivel internacional por la calidad y diversidad de sus flores de corte, especialmente las rosas (Guaita-Pradas y otros, 2023). Desde su consolidación en la década de 1990, esta industria ha contribuido de manera significativa al producto interno bruto (PIB) agroexportador, “sumando más de 65 mil empleos directos y 55 mil empleos indirectos, con una participación destacada de mujeres, quienes representan el 51 % de la fuerza laboral”¹.

Según datos del Banco Central del Ecuador (BCE, 2024), entre enero y noviembre de 2024 las exportaciones florícolas alcanzaron 925 millones de dólares, con un crecimiento interanual del 2,6 % y un volumen superior a 160 000 toneladas, consolidando al país como el tercer exportador mundial después de los Países Bajos y Colombia (BCE, 2024). La producción florícola en el Ecuador ha estado históricamente concentrada en el norte del país, en las provincias de Pichincha y Cotopaxi, que representan conjuntamente más del 80 % de la producción nacional, mientras que el restante proviene de otras provincias del país, entre ellas Guayas, Imbabura y Azuay (Mañay y otros, 2022).

Sin embargo, la competitividad del sector florícola enfrenta actualmente una transición estructural marcada por la digitalización, la sostenibilidad y la innovación biotecnológica. La demanda global exige nuevas variedades con mayor vida útil, resistencia a enfermedades, tolerancia al transporte y adaptación al cambio climático

(Casigña y otros, 2024). En este contexto, las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), junto con la bioinformática y el análisis de big data, emergen como pilares de una nueva etapa de innovación agrobiotecnológica (García Torres y otros, 2024; Chavarro, 2021). En este marco, las TIC contribuyen a optimizar el uso de recursos, anticipar problemas fitosanitarios, mejorar la trazabilidad y reducir pérdidas poscosecha, al tiempo que facilitan modelos de gestión basados en datos y estrategias de innovación orientadas a la sostenibilidad (Vernier y otros, 2021; Abbes, 2025).

En la práctica, estas tecnologías se materializan en múltiples aplicaciones, como la automatización de invernaderos, la sensorización ambiental, el riego inteligente y la trazabilidad digital (Pandiyan y otros, 2024; Dai y otros, 2025; Peña-Holguín y otros, 2025; Kumar & Verma, 2025). Por ejemplo, los sensores IoT instalados en invernaderos permiten registrar variables como temperatura, humedad, radiación y concentración de CO₂, cuyos datos son procesados en plataformas en la nube mediante modelos predictivos que optimizan el crecimiento y la floración (Hosny y otros, 2025; Soussi y otros, 2025). En paralelo, el uso de tecnologías *blockchain* permite reforzar la trazabilidad del proceso productivo y aumentar la transparencia en mercados internacionales cada vez más sensibles a criterios de sostenibilidad (de Carvalho y otros, 2022; Chen y otros, 2023; Pang y otros, 2024; Thuy y otros, 2025).

Paralelamente, la convergencia entre biología molecular, bioinformática y análisis de datos

¹ Ecuador reafirma su liderazgo en la industria florícola mundial con la inauguración de Expo Flor 2024 – Ministerio de Producción, Comercio Exterior e Inversiones, n.d.

ha impulsado avances significativos en el mejoramiento genético vegetal (Hasan y otros, 2021; Khan y otros, 2022; Panahi y otros, 2024; Belbase y otros, 2025; Li y otros, 2025; Salgado-Velázquez y otros, 2026). El uso de marcadores moleculares, secuenciación genómica y enfoques transcriptómicos permite identificar regiones genómicas y genes asociados a rasgos de interés, como color, aroma, resistencia a patógenos o tolerancia al estrés ambiental (Kim y otros, 2020; Koboldt y otros, 2013; Berman y otros, 2025; Pei y otros, 2026). Asimismo, enfoques como el mapeo de QTL, los estudios de asociación genómica (GWAS) y la edición génica mediante CRISPR amplían las posibilidades de mejora dirigida y exploración funcional de genes (Doll y otros, 2019; Li y otros, 2025; Verdezoto-Prado y otros, 2025).

A su vez, la integración de herramientas genómicas con modelos predictivos basados en inteligencia artificial está acelerando los programas de mejoramiento y ampliando las posibilidades de selección de rasgos complejos (Yang y otros, 2022; Afonso y otros, 2024; Mantilla y otros, 2025). La experiencia internacional muestra que estos enfoques permiten acortar los tiempos de desarrollo varietal y mejorar la selección anticipada de progenitores. Por ejemplo, en *Chrysanthemum morifolium* se ha demostrado el potencial de la predicción genómica para identificar combinaciones con rasgos comerciales deseables (OECD, 2015; Kim y otros, 2024; Su y otros, 2024).

A pesar del creciente interés en la digitalización del sector florícola, persiste una fragmentación en la literatura que dificulta comprender de manera integrada las oportunidades, limitaciones y desafíos asociados a la transición hacia una floricultura 4.0 en el país. Estudios recientes han analizado la adopción de tecnologías TIC en el

sector florícola, evidenciando que, aunque existe un alto potencial de mejora en eficiencia y sostenibilidad, su implementación en países emergentes como el Ecuador sigue siendo limitada debido a barreras económicas, técnicas y de capacitación (Mantilla y otros, 2025). Estos enfoques se han centrado principalmente en la adopción tecnológica a nivel productivo, mientras que la bioinformática, la inteligencia artificial y el mejoramiento genético, como componentes clave de la innovación florícola, han recibido una atención significativamente menor.

En este contexto, el presente estudio se plantea como una revisión exploratoria con orientación analítica, cuyo propósito es sintetizar y estructurar el conocimiento disponible sobre el papel de las tecnologías digitales en la floricultura ecuatoriana, integrando perspectivas tecnológicas, genómicas y productivas. A partir de este enfoque, se formulan las siguientes preguntas de investigación:

- (i) ¿Qué tecnologías están configurando el paradigma de la floricultura 4.0 en los procesos de producción y mejoramiento genético en floricultura y cuál es su relevancia en el contexto ecuatoriano?
- (ii) ¿Cuáles son las principales limitaciones estructurales, tecnológicas y formativas que condicionan su adopción en el Ecuador?
- (iii) ¿Qué oportunidades emergen de la convergencia entre TIC, bioinformática e inteligencia artificial para el desarrollo de una floricultura genética innovadora en el Ecuador?

Métodos

El presente estudio se desarrolló como una revisión exploratoria con enfoque cualitativo, incorporando elementos de revisión sistemática basados en las directrices de PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) (Page y otros, 2021). La identificación de fuentes se realizó mediante una búsqueda estructurada en la base de datos Scopus, utilizando operadores booleanos y combinaciones de términos definidos, incluyendo “digital agriculture” OR “bioinformatics” OR “artificial intelligence” OR “floriculture” AND “plant breeding” AND “Ecuador”. Scopus fue seleccionada como base de datos principal debido a su amplia cobertura de literatura revisada por pares en múltiples disciplinas, lo que garantiza una recuperación amplia y consistente de estudios relevantes.

Posteriormente, se llevó a cabo un proceso de selección en varias etapas, basado en la revisión de títulos, resúmenes y contenido completo, con el fin de identificar aquellos estudios alineados con los objetivos del trabajo. Para minimizar posibles sesgos, el proceso de cribado fue realizado de forma independiente por dos investigadores. Durante esta fase, se excluyeron 30 registros por no ajustarse al ámbito temático del estudio, incluyendo trabajos centrados en prácticas agrícolas no tecnológicas y cultivos fuera del sector florícola o sin relación con el mejoramiento

vegetal. Asimismo, se descartaron 32 registros adicionales por no corresponder a artículos científicos o revisiones (por ejemplo, libros u otros tipos de documentos no revisados por pares). Como resultado de este proceso, el conjunto final de análisis quedó conformado por 55 documentos, que constituyen la base de la revisión.

Este conjunto incluye un estudio de tipo revisión que integra evidencia procedente de 41 trabajos adicionales, lo que amplía el alcance empírico del corpus analizado. Además, el corpus fue clasificado según el tipo de tecnología y el campo de aplicación, lo que permitió realizar un análisis temático y cuantitativo de la literatura. Asimismo, los estudios seleccionados fueron analizados mediante una metodología de codificación temática, en la que cada documento fue categorizado según su enfoque tecnológico principal (por ejemplo, IoT, inteligencia artificial, bioinformática o mejoramiento genético) y su área de aplicación. Para ello, se construyó una matriz de extracción de datos que incluyó variables como tipo de tecnología, ámbito de aplicación, contexto geográfico y contribución principal del estudio. Esta información permitió identificar patrones recurrentes y cuantificar la distribución de enfoques tecnológicos dentro del corpus analizado, facilitando así la interpretación sistemática de los resultados.

Resultados

A partir del análisis de los 55 estudios seleccionados, clasificados mediante codificación temática según su enfoque tecnológico y área de aplicación, se identificaron patrones consistentes en la aplicación de tecnologías digitales en el sector florícola. En particular, 15 estudios se centraron en tecnologías IoT y sensores, 7 en inteligencia artificial y 8 incluyeron componentes relacionados con genética y mejoramiento. Los estudios restantes se distribuyen entre otras categorías tecnológicas o enfoques mixtos, reflejando la heterogeneidad del campo analizado (Figura 1).

Los estudios revisados muestran que la inteligencia artificial y el aprendizaje automático emergen como uno de los enfoques más recurrentes dentro de la literatura revisada, espe-

cialmente en aplicaciones relacionadas con la detección de enfermedades, la predicción de demanda, la clasificación de flores y la estimación de características fenotípicas mediante visión por computador.

Por otro lado, el análisis evidencia una presencia más limitada de estudios centrados en la aplicación de herramientas bioinformáticas y enfoques de mejoramiento genético en el contexto específico de la floricultura ecuatoriana. Asimismo, la mayoría de los estudios se desarrollan en contextos internacionales, con una representación reducida de investigaciones específicamente enfocadas en el Ecuador.

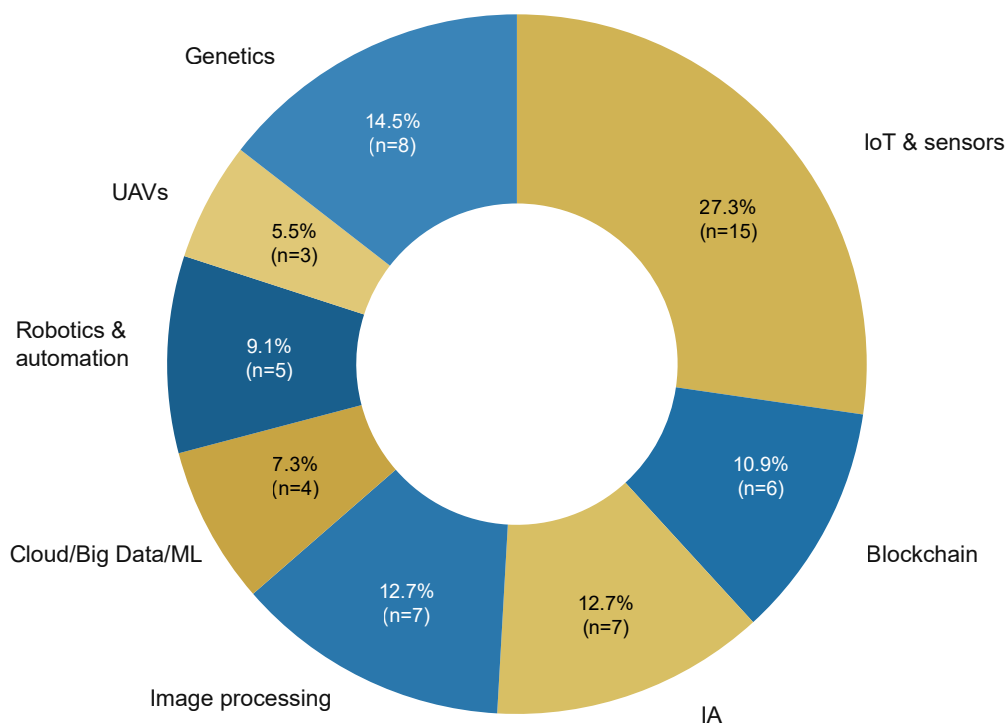


Figura 1

Distribución de los estudios incluidos en la revisión según categoría tecnológica.

Estos avances reflejan una transición emergente hacia una floricultura basada en datos, abriendo oportunidades para una producción más sostenible, eficiente y trazable. En este sentido, la Tabla 1 sintetiza las principales tecnologías identificadas, sus aplicaciones y su nivel de adop-

ción en el contexto ecuatoriano, evidenciando un desarrollo desigual entre tecnologías, con mayor consolidación en herramientas de monitoreo y automatización y un estado aún incipiente en bioinformática y edición génica.

Tabla 1

Tecnologías consideradas prioritarias para la transición hacia la floricultura 4.0 en el Ecuador, según su aplicación y nivel de adopción

Tecnología	Aplicación en floricultura	Beneficios principales	Nivel de adopción en el Ecuador
IoT y sensores climáticos	Monitoreo ambiental, riego y fertilización de precisión	Ahorro hídrico, control automatizado	Medio
Big data y analítica predictiva	Procesamiento de datos genómicos y fenotípicos	Mejora en selección varietal y trazabilidad	Bajo
Bioinformática	Identificación de genes asociados a color, resistencia y aroma	Aceleración del mejoramiento genético	Bajo
Inteligencia artificial (IA)	Predicción de floración, control de plagas, análisis de imágenes	Mayor eficiencia y reducción de pérdidas	Bajo
Blockchain	Certificación de origen y sostenibilidad	Trazabilidad y confianza comercial	Muy bajo
Edición génica (CRISPR)	Modificación precisa de rasgos de interés	Innovación genética y resiliencia	Experimental

Discusión

Potencialidades de la innovación digital en la floricultura ecuatoriana

Los resultados obtenidos evidencian un claro predominio de tecnologías digitales aplicadas a la producción, como *IoT*, sensores e inteligencia artificial, frente a una menor representación de enfoques centrados en bioinformática y mejoramiento genético. Este patrón sugiere que la transformación digital de la floricultura ha avanzado principalmente en la optimización de procesos productivos (Montalvo, 2025), mientras que la integración con la innovación genética permanece aún limitada.

En este contexto, el caso ecuatoriano representa una oportunidad estratégica para avanzar hacia modelos más integrados de floricultura 4.0, aunque existen esfuerzos incipientes en universidades, que han iniciado proyectos piloto de análisis de imágenes florales y modelado predictivo de rendimiento (Pérez-Campdesuñer y otros, 2025). La incorporación de TIC no debe entenderse únicamente como una modernización tecnológica, sino como un cambio de paradigma que transforma la forma en que se conciben la investigación, la producción y la comercialización.

A pesar de los aportes de este estudio, es importante reconocer ciertas limitaciones inherentes al enfoque metodológico adoptado al tratarse de una revisión basada principalmente en la base de datos Scopus. Igualmente, la limitada disponibilidad de estudios específicos sobre el contexto ecuatoriano restringe la capacidad de generalización de algunos resultados, lo que pone de manifiesto la necesidad de futuras investigaciones empíricas que profundicen en la

incorporación de tecnologías digitales y genómicas en la floricultura nacional.

Integración de la bioinformática y el mejoramiento genético

Los escasos hallazgos de nuestra exploración evidencian una limitación en el avance del mejoramiento genético en floricultura en el Ecuador. En contraste con el predominio de tecnologías digitales encauzadas a la producción que se identificó en los resultados, hay una falta de información molecular. Sin embargo, la irrupción de la bioinformática y el análisis de big data permite transformar este panorama, lo que posibilita procesar grandes volúmenes de información genética, transcriptómica, fenotípica y ambiental con un nivel de resolución sin precedentes.

El Ecuador, al poseer una de las floras más diversas del planeta, tiene el potencial de convertirse en un centro regional de big data florícola, integrando información genómica de especies nativas con datos fenotípicos generados por empresas exportadoras. Por ejemplo, el país alberga más de 4 000 especies nativas de Orchidaceae, de las cuales una gran proporción son endémicas y aún poco estudiadas genéticamente (Vega y otros, 2013). Esta riqueza convierte al país en un laboratorio natural para aplicar herramientas de bioinformática, análisis de datos masivos e inteligencia artificial orientadas tanto a la conservación como al mejoramiento genético.

Plataformas internacionales han permitido avanzar en el análisis de secuencias, la identificación de genes y la exploración de rutas metabólicas relacionadas con rasgos florales como el color, la forma o la fragancia (Chen y

otros, 2022). Asimismo, adelantos recientes en genómica comparada y secuenciación de transcriptomas han posibilitado identificar genes implicados en la morfogénesis floral, la producción de pigmentos y la resistencia a estrés abiótico. Ejemplos como *Vanilla planifolia* (Gastelbondo y otros, 2025; Hernández-Peña y otros, 2025) o *Cymbidium goeringii* (Ramya y otros, 2019) ilustran el potencial de estas herramientas para aplicaciones en calidad y sostenibilidad.

En el caso ecuatoriano, la floricultura de precisión podría beneficiarse de la incorporación de marcadores moleculares para acelerar programas de mejoramiento genético orientados a rasgos de interés comercial, tales como la longevidad poscosecha, la intensidad del color o la tolerancia a enfermedades y condiciones ambientales adversas (Abril-Espin y otros, 2024). De forma complementaria, la edición génica mediante tecnologías como CRISPR/Cas9 abriría la posibilidad de estudiar funciones génicas específicas o desarrollar variedades adaptadas a los distintos pisos altitudinales del país, sin comprometer la biodiversidad nativa (Motoche-Monar y otros, 2023; Gómez-Lama y otros, 2025; Verdezoto-Prado y otros, 2025). Esta estrategia permitiría optimizar recursos, reducir pérdidas y potenciar una floricultura resiliente frente al cambio climático, diversificando además la base genética de los cultivos ornamentales.

La consolidación de estas innovaciones requiere avanzar hacia la estandarización metodológica en el manejo de datos genómicos y fenotípicos, así como en la implementación de modelos predictivos reproducibles basados en inteligencia artificial (Caballero-Ramírez y otros, 2023; Montalvo y otros, 2025). El uso de plataformas de secuenciación de nueva generación, herramientas de análisis transcriptómico de novo y algoritmos de aprendizaje profundo aplicados a imágenes hiperespectrales permitirá generar modelos más precisos y transferibles entre especies ornamen-

tales (Anastasiou y otros, 2025; Cravero y otros, 2026). De este modo, la integración de la genómica con la fenómica digital y la inteligencia artificial consolidará la base de una floricultura inteligente, centrada en la innovación sostenible y el conocimiento científico como ventaja competitiva.

Retos y perspectivas hacia una floricultura 4.0 ecuatoriana

La escasa adopción de herramientas genómicas identificada en los resultados se traduce en barreras estructurales para el desarrollo de una floricultura 4.0 plenamente integrada en el Ecuador. A pesar del potencial identificado, la implementación de tecnologías digitales enfrenta obstáculos relacionados con la infraestructura tecnológica, la disponibilidad de recursos humanos especializados y la gobernanza de datos. En particular, la falta de conectividad, la limitada capacidad de almacenamiento y procesamiento de datos y la escasez de profesionales en bioinformática y ciencia de datos restringen el desarrollo del sector.

En este contexto, la creación de centros de excelencia y plataformas de transferencia tecnológica resulta clave para conectar investigación y producción. A su vez, la implementación de laboratorios vivos (*living labs*) en zonas florícolas ofrecería escenarios reales para validar, adaptar y escalar innovaciones tecnológicas. En estos espacios, las orquídeas ecuatorianas y otras especies ornamentales nativas se convertirían en modelos biológicos de referencia para integrar inteligencia artificial, genómica y fenómica digital. Este enfoque permitiría transformar la biodiversidad en capital biotecnológico, impulsando una nueva economía del conocimiento donde los datos genéticos y fenotípicos sean considerados activos estratégicos de alto valor.

Desde la perspectiva institucional, el Estado desempeña un papel fundamental en la creación de marcos regulatorios e incentivos que promuevan la adopción tecnológica (De Leon Nazareno, 2024). Esto se establece en la Política Pública para la Transformación Digital del Ecuador 2025–2030, tal como se incluye en la base legal de la Ley Orgánica para la Transformación Digital y Audiovisual, la Ley Orgánica de Telecomunicaciones, la Ley Orgánica de Gestión de Identidad y Datos Civiles, la Ley Orgánica del Sistema Nacional de Registro de Datos Públicos, la Ley Orgánica para la Optimización y Eficiencia de Trámites Administrativos y la Ley Orgánica de Protección de Datos Personales (MINTEL, 2025).

Avanzar hacia una floricultura 4.0 exige una visión articulada en torno a la sostenibilidad, la innovación y la valorización de la biodiversidad que resumimos en la Tabla 2. La integración de TIC, biotecnología y economía circular no solo permitirá mejorar la eficiencia productiva, sino también posicionar al Ecuador como líder regional en floricultura inteligente, capaz de exportar no solo flores, sino también conocimiento, tecnología y modelos de gestión sostenible. Este paradigma emergente redefine el papel del país en la bioeconomía global, promoviendo una producción más resiliente, trazable y alineada con la conservación de su patrimonio natural.

Tabla 2
Marco estratégico para la implementación de la floricultura 4.0 en el Ecuador, integrando dimensiones tecnológicas, socioeconómicas y ambientales

Eje estratégico	Componente tecnológico	Impacto esperado	Actores involucrados
Digitalización productiva	IoT, automatización, data analytics	Eficiencia, reducción de costos	Empresas florícolas, universidades
Innovación genética	Genómica, bioinformática, CRISPR	Nuevas variedades, resiliencia climática	Centros de investigación, universidades
Sostenibilidad ambiental	Energías limpias, blockchain, circularidad	Huella ecológica reducida, trazabilidad verde	Estado, certificadoras
Formación y talento	Educación STEM, redes tecnológicas	Empleo calificado, innovación local	Universidades, gobierno
Gobernanza de datos	Infraestructura digital, marcos legales	Protección biogenética, soberanía científica	Ministerio de Producción, academia

Conclusiones

En respuesta a las preguntas de investigación planteadas, los resultados de este estudio evidencian un desarrollo asimétrico en la transición hacia la floricultura 4.0, con un predominio de tecnologías digitales orientadas a la producción frente a una limitada adopción de herramientas bioinformáticas y enfoques de mejoramiento genético. Este desequilibrio señala una oportunidad estratégica para avanzar hacia modelos más integrados basados en datos, genómica e innovación.

En este contexto, el Ecuador, gracias a su biodiversidad y liderazgo exportador, cuenta con condiciones favorables para establecerse como un polo regional de innovación florícola digital. La inclusión de tecnologías como IoT, inteligencia artificial y big data permitirá optimizar la producción, mejorar la trazabilidad y acelerar el desarrollo de variedades adaptadas al cambio climático.

No obstante, este potencial depende de superar limitaciones estructurales relacionadas con la infraestructura tecnológica, la formación de capital humano especializado y la gobernanza de datos. En esta línea, la inversión en formación interdisciplinaria, en estandarización de datos y en fortalecimiento de redes de cooperación será clave para consolidar un sistema de innovación sostenible. En conjunto, la integración de TIC, biotecnología y biodiversidad posiciona a la floricultura ecuatoriana como un sector estratégico dentro de la bioeconomía, con capacidad para impulsar un modelo productivo más resiliente, competitivo y basado en conocimiento.

Declaración de conflictos de interés

Quienes firman este artículo declaran no tener conflictos de interés.

Fuentes de financiación

Esta investigación fue financiada por los Fondos Nacionales a través de la Fundación para la Ciencia y la Tecnología (FCT) mediante los proyectos con referencia UID/00239/2025 (CEF) y LA/P/0092/2020 (Laboratorio Asociado TERRA),

así como por I.M. a través del programa de Estímulo al Empleo Científico—Convocatoria Individual (CEEC Individual)—2021.01107.CEECIND/CP1689/CT0001.

Contribución de autoría (CRedit):

Xavier Rojas Ruilova: Conceptualización; metodología; análisis formal; investigación; validación; redacción – borrador original; redacción – revisión y edición; visualización; recursos; supervisión; administración del proyecto.

Génesis Vásquez: Conceptualización; metodología; análisis formal; gestión de datos; investigación; validación; redacción – borrador original; redacción – revisión y edición; visualización; software.

Isabel Marques: Conceptualización; metodología; análisis formal; investigación; validación; redacción – borrador original; redacción – revisión y edición; recursos; supervisión; adquisición de fondos.

Referencias

- Abbes, I. (2025). Strategic pathways for innovation and sustainability in digital transformation: Insights from leading global companies. *Social Sciences & Humanities Open*, 12, 101906.
<https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2025.101906>
- Abril-Espin, E., Montes-Escobar, K., de la Hoz-M, J., Garcés-Fiallos, F. R., & Salas-Macias, C. A. (2024). Exploring global trends in scientific research on *Rubus glaucus* Benth: A comprehensive analysis integrating bibliometrics, LDA, and HJ-Biplot. *Journal of Berry Research*, 14(4), 287-300.
<https://doi.org/10.1177/187850932412849>
- Afonso, M., Paulo, M. J., Fonteijn, H., van den Helder, M., Zwinkels, H., Rijsbergen, M., van Hameren, G., Haegens, R., & Wehrens, R. (2024). Automatic trait estimation in floriculture using computer vision and deep learning. *Smart Agricultural Technology*, 7, 100383.
<https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100383>
- Anastasiou, E., Kasimati, A., Papadopoulos, G., Vatsanidou, A., Gemtou, M., Kantelhardt, J., Gabriel, A., Schwierz, F., Matavel, C.E., Meyer-Aurich, A., Maritan, E., Behrendt, K., Moroder, A., Bellingra-th-Kimura, S. D., Pedersen, S. M., Landi, A., Pesonen, L., Rojic, J., Kim, M., ... Denzer, H. (2025). Review and assessment of crop-related digital tools for agroecology. *Agronomy*, 15(11), 2600.
<https://doi.org/10.3390/agronomy15112600>
- Banco Central del Ecuador. (2024). *Resultados de comercio exterior: Abril 2024*.
https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/SectorExterno/ComercioExterior/informes/ResultCE_042024.pdf
- Belbase, P., & Balaji Bhaskar, M.S. (2025). Sustainable cultivation of dragon fruit: integrated nutrient and pest management strategies for enhanced productivity and environmental stewardship. *Agronomy*, 15, 2514.
<https://doi.org/10.3390/agronomy15112514>
- Berman, A., Su, N., Li, Z., Landau, U., Chakraborty, J., Gerbi, N., Liu, J., Qin, Y., Yuan, B., Wei, W., Yanai, O., Mayrose, I., Zhang, Y., & Shani, E. (2025). Construction of multi-targeted CRISPR libraries in tomato to overcome functional redundancy at genome-scale level. *Nature Communications*, 16(1), 1–14.
<https://doi.org/10.1038/s41467-025-59280-6>

- Caballero-Ramirez, D., Baez-Lopez, Y., Limon-Romero, J., Tortorella, G., & Tlapa, D., (2023). An assessment of human inspection and deep learning for defect identification in floral wreaths. *Horticulturae* 9(11). 1213.
<https://doi.org/10.3390/horticulturae9111213>
- Casigña Guaman, N. S., Chicaiza Reisancho, E. R., Cali Palacios, M. A., Fiallos Ulloa, L. A., & Uvidia Armijo, J. H. (2024). Flores y suelo: Un estudio ambiental sobre las actividades florícolas en Los Ilinizas, Cotopaxi. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(1), 8249–8262.
https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i1.10153
- Chavarro, J. (2021). *Evolución y desafíos de la floricultura ecuatoriana en el futuro próximo*. Metroflor.
<https://www.metroflorcolombia.com/evolucion-y-desafios-de-la-floricultura-ecuatoriana-en-el-futuro-proximo/>
- Chen, H. Y., Sharma, K., Sharma, C., & Sharma, S. (2023). Integrating explainable artificial intelligence and blockchain to smart agriculture: Research prospects for decision making and improved security. *Smart Agricultural Technology*, 6, 100350. doi: 10.1016/J.ATECH.2023.100350
- Chen, Y., Li, C., Hsiao, Y., Ho, S. Y., Zhang, Z., Liao, C., Lee, B., Lin, S., Wu, W., Wang, J., Zhang, D., Liu, K., Liu, D., Zhao, X., Li, Y., Ke, S., Zhou, Z., Huang, M., Wu, Y., ... Tsai, W. (2022). OrchidBase 5.0: Updates of the orchid genome knowledgebase. *BMC Plant Biology*, 22(1), 557.
<https://doi.org/10.1186/s12870-022-03955-5>
- Colantonio, V., Ferrão, L. F. V., Tieman, D. M., Bliznyuk, N., Sims, C., Klee, H. J., Munoz, P., & Resende, M. F. R. (2022). Metabolomic selection for enhanced fruit flavor. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 119(7), e2115865119.
<https://doi.org/10.1073/pnas.2115865119>
- Cravero, A., Sepúlveda, S., Gutiérrez, F., & Muñoz, L. (2026). From precision agriculture to intelligent agricultural ecosystems: A systematic review of machine learning and big data applications. *Agronomy*, 16(5).
<https://doi.org/10.3390/agronomy16050516>
- Dai, Y., Huang, Z., Khan, N., & Labbo, M. S. (2025). Smart water management: governance innovation, technological integration, and policy pathways toward economic and ecological sustainability. *Water*, 17(13), 1932.
<https://doi.org/10.3390/w17131932>

- Danilevicz, M. F., Upadhyaya, S. R., Batley, J., Bennamoun, M., Bayer, P. E., & Edwards, D. (2025). Understanding plant phenotypes in crop breeding through explainable AI. *Plant Biotechnology Journal*, 23(10), 4200–4213.
<https://doi.org/10.1111/pbi.70208>
- de Carvalho, P. R. V., Naoum-Sawaya, J., & Elhedhli, S. (2022). Blockchain-enabled supply chains: An application in fresh-cut flowers. *Applied Mathematical Modelling*, 110, 841–858.
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2022.06.011>
- de Leon Nazareno, D. O. (2024). Transformación digital como factor de cambio de la matriz productiva de Ecuador. *Economía y Desarrollo*, 168(2), 1–22.
https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4.12331?no
- Doll, N. M., Gilles, L. M., Gérentes, M. F., Richard, C., Just, J., Fierlej, Y., Borrelli, V. M. G., Gendrot, G., Ingram, G. C., Rogowsky, P. M., & Widiez, T. (2019). Single and multiple gene knockouts by CRISPR–Cas9 in maize. *Plant Cell Reports*, 38(4), 487–501.
<https://doi.org/10.1007/s00299-019-02378-1>
- Fan, Z., Hasing, T., Johnson, T. S., Garner, D. M., Barbey, C. R., Colquhoun, T. A., Sims, C. A., Resende, M. F. R., & Whitaker, V. M. (2021). Strawberry sweetness and consumer preference are enhanced by specific volatile compounds. *Horticulture Research*, 8(1), 66.
<https://doi.org/10.1038/s41438-021-00502-5>
- Ferrão, L. F. V., Dhakal, R., Dias, R., Tieman, D., Whitaker, V., Gore, M. A., Messina, C., & Resende, M. F. R. (2023). Machine learning applications to improve flavor and nutritional content of horticultural crops through breeding and genetics. *Current Opinion in Biotechnology*, 83, 102968.
<https://doi.org/10.1016/j.copbio.2023.102968>
- García Torres, I. A., Castillo León, R. E., Navas Espín, W. R., & Veintimilla Andrade, J. G. (2024). El uso de la inteligencia artificial en un invernadero. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(4), 910–930.
https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4.12331
- Gastelbondo, M., Micheal, V., Wang, Y., Chambers, A., & Wu, X. (2025). Comparative transcriptome profiling of vanilla (*Vanilla planifolia*) capsule development provides insights of vanillin biosynthesis. *BMC Plant Biology*, 25(1), 1–16.
<https://doi.org/10.1186/s12870-025-06360-w>

- Gómez-Lama Cabanás, C., & Mercado-Blanco, J. (2025). Groundbreaking technologies and the bio-control of fungal vascular plant pathogens. *Journal of Fungi*, 11(1), 77.
<https://doi.org/10.3390/jof11010077>
- Guaita-Pradas, I., Rodríguez-Mañay, L. O., & Marques-Perez, I. (2023). Competitiveness of Ecuador's flower industry in the global market in the period 2016–2020. *Sustainability*, 15(7), 5821.
<https://doi.org/10.3390/su15075821>
- Hasan, N., Choudhary, S., Naaz, N., Sharma, N., & Laskar, R. A. (2021). Recent advancements in molecular marker-assisted selection and applications in plant breeding programmes. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 19(1) 128.
<https://doi.org/10.1186/s43141-021-00231-1>
- Hernández-Peña, R., Lorenzo-Manzanarez, J. L., Cruz-Ramírez, L. A., Reyes-López, D., Hernández-Domínguez, C., Pascual-Ramírez, F., & Ordaz-Ortiz, J. J. (2025). Unravelling vanillin biosynthesis: Integrative transcriptomic and metabolomic insights into pod development. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 73(30), 19094.
<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5c05293>
- Hosny, K. M., El-Hady, W. M., & Samy, F. M. (2025). Technologies, protocols, and applications of internet of things in greenhouse farming: A survey of recent advances. *Information Processing in Agriculture*, 12(1), 91–111.
<https://doi.org/10.1016/j.inpa.2024.04.002>
- Khan, I. A., Cao, K., Guo, J., Li, Y., Wang, Q., Yang, X., Wu, J., Fang, W., & Wang, L. (2022). Identification of key gene networks controlling anthocyanin biosynthesis in peach flower. *Plant Science*, 316, 111151.
<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2021.111151>
- Kim, S. Y., Lee, H. Y., Park, C., Kim, D., Kim, J. B., Kim, S. H., Jeong, K. J., Pak, H. S., Jung, J. A., & Kim, T. S. (2024). Assessing amounts of genetic variability in key horticultural traits underlying core korean breeding lines of cut chrysanthemums. *Plants*, 13(5), 577.
<https://doi.org/10.3390/plants13050577>
- Koboldt, D. C., Steinberg, K. M., Larson, D. E., Wilson, R. K., & Mardis, E. R. (2013). The next-generation sequencing revolution and its impact on genomics. *Cell*, 155(1), 27–38.
<https://doi.org/10.1016/j.cell.2013.09.006>

- Kumar, V., & Verma, P. (2025). Advances in microbial biotechnology for sustainable wastewater reclamation: Recent trends and future prospects. *World Journal of Microbiology Biotechnology*, 41(12), 478.
<https://doi.org/10.1007/s11274-025-04674-3>
- Li, X., Li, Y., Sun, Y., Li, S., Cai, Q., Li, S., Sun, M., Yu, T., Meng, X., & Zhang, J. (2025). Integrating genetic diversity and agronomic innovations for climate-resilient maize systems. *Plants*, 14(10), 1552.
<https://doi.org/10.3390/plants14101552>
- Mañay, L. O. R., Guaita-Pradas, I., & Marques-Perez, I. (2022). Measuring the supply chain performance of the floricultural sector using the SCOR model and a multicriteria decision-making method. *Horticulturae*, 8(2), 168.
<https://doi.org/10.3390/horticulturae8020168>
- Mantilla, F., Mejía, G., & Tascón, D. (2025). The role of industry 4.0 technologies in the export flower industry: Insights from a systematic literature review and surveys in emerging economies. *Results in Engineering*, 25, 104507.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104507>
- Ministerio de Producción, Comercio Exterior e Inversiones. (2024, octubre 8). Ecuador reafirma su liderazgo en la industria florícola mundial con la inauguración de Expo Flor 2024.
<https://www.produccion.gob.ec/ecuador-reafirma-su-liderazgo-en-la-industria-floricola-mundial-con-la-inauguracion-de-expo-flor-2024/>
- Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información [MINTEL]. (2025). Política pública para la transformación digital del Ecuador 2025-2030.
https://www.gobiernoelectronico.gob.ec/wp-content/uploads/2025/03/INSTRUMENTO-Politica-Publica-para-la-Transformacion-Digital-Ecuador-2025-2030-MINTEL-signed_f.pdf
- Montalvo Rodríguez, S. P. (2025). Implementación de un sistema de gestión energética aplicado a la empresa “ESTRUCTIM”. *Arandu UTIC*, 12(1), 1946–1969.
<https://doi.org/10.69639/arandu.v12i1.720>
- Motoche-Monar, C., Ordoñez, J. E., Chang, O., Gonzales-Zubiate, F. A. (2023). gRNA Design: How its evolution impacted on CRISPR/Cas9 systems refinement. *Biomolecules*, 13(12), 1698.
<https://doi.org/10.3390/biom13121698>
- Nisio, A., Adamo, F., Acciani, G., & Attivissimo, F. (2020). Fast detection of olive trees affected by *Xylella fastidiosa* from UAVs using multispectral imaging. *Sensors*, 20(17), 4915.
<https://doi.org/10.3390/s20174915>

- Novielli, P., Romano, D., Pavan, S., Losciale, P., Stellacci, A. M., Diacono, D., Bellotti, R., & Tangaro, S. (2024). Explainable artificial intelligence for genotype-to-phenotype prediction in plant breeding: A case study with a dataset from an almond germplasm collection. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1434229.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1434229>
- OECD. (2015). *Innovation, agricultural productivity and sustainability in Brazil* (OECD Food and Agricultural Reviews).
<https://doi.org/10.1787/9789264237056-en>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71.
<https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Panahi, B., Mohammadzadeh Jalaly, H., & Hamid, R. (2024). Using next-generation sequencing approach for discovery and characterization of plant molecular markers. *Current Plant Biology*, 40, 100412.
<https://doi.org/10.1016/j.cpb.2024.100412>
- Pandiyan, P., Saravanan, S., Kannadasan, R., Krishnaveni, S., Alsharif, M. H., & Kim, M. K. (2024). A comprehensive review of advancements in green IoT for smart grids: Paving the path to sustainability. *Energy Reports*, 11, 5504–5531.
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.05.021>
- Pang, S., Teng, S. W., Murshed, M., Bui, C., Karmakar, P., Li, Y., & Lin, H. (2024). A survey on evaluation of blockchain-based agricultural traceability. *Computers and Electronics in Agriculture*, 227, 109548.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109450>
- Pei, X., Xie, J., Liang, C., & Utkina, A. O. (2026). Next-generation precision breeding in peanut (*Arachis hypogaea* L.) for disease and pest resistance: From multi-omics to AI-driven innovations. *Insects*, 17(1), 63.
<https://doi.org/10.3390/insects17010063>
- Peña-Holguín, R. R., Vaca-Coronel, C. A., Farías-Lema, R. M., Zapatier-Castro, S. V., & Valenzuela-Cobos, J. D. (2025). Smart agriculture in Ecuador: Adoption of IoT technologies by farmers in Guayas to improve agricultural yields. *Agriculture*, 15(15), 1679.
<https://doi.org/10.3390/agriculture15151679>

- Pérez-Campdesuñer, R., Sánchez-Rodríguez, A., García-Vidal, G., Martínez-Vivar, R., & De Miguel-Guzmán, M. (2025). Artificial intelligence in Ecuadorian SMEs: Drivers and obstacles to adoption. *Information*, 16(6), 443.
<https://doi.org/10.3390/info16060443>
- Ramya, M., Park, P. H., Chuang, Y. C., Kwon, O. K., An, H. R., Park, P. M., Baek, Y. S., Kang, B. C., Tsai, W. C., & Chen, H. H. (2019). RNA sequencing analysis of *Cymbidium goeringii* identifies floral scent biosynthesis related genes. *BMC Plant Biology*, 19(1), 337.
<https://doi.org/10.1186/s12870-019-1940-6>
- Reynolds, C., Colmer, J., Rees, H., Khajouei, E., Rusholme-Pilcher, R., Kudoh, H., Dodd, A. N., & Hall, A. (2025). Machine learning models highlight environmental and genetic factors associated with the Arabidopsis circadian clock. *Nature Communications*, 16(1), 1–17.
<https://doi.org/10.1038/s41467-025-62196-w>
- Salgado-Velázquez, S., Barrios-Gómez, E., Hernández-Aragón, L., Hernández-Lara, P. U., Olvera-Rincón, F., Sumano-López, D., Inurreta-Aguirre, H. D., & Palma-Cancino, D. J. (2026). Advances in rice agronomic technologies in Latin America in the face of climate change. *Crops*, 6(1):8.
<https://doi.org/10.3390/crops6010008>
- Soussi, A., Zero, E., Ouammi, A., Zejli, D., Zahmoun, S., & Sacile, R. (2025). Smart greenhouse farming: A review towards near zero energy consumption. *Discover Cities*, 2(1), 1–29.
<https://doi.org/10.1007/s44327-025-00096-w>
- Soussi, A., Zero, E., Sacile, R., Trincherro, D., & Fossa, M. (2024). Smart sensors and smart data for precision agriculture: a review. *Sensors*, 24(8), 2647.
<https://doi.org/10.3390/s24082647>
- Su, J., Lu, Z., Zeng, J., Zhang, X., Yang, X., Wang, S., Zhang, F., Jiang, J., & Chen, F. (2024). Multi-locus genome-wide association study and genomic prediction for flowering time in chrysanthemum. *Planta*, 259(1), 13.
<https://doi.org/10.1007/s00425-023-04297-8>
- Thuy, T. Le, Nguyen, M. K., Bui, T. D., Yen, H. P. H., Hoai, N. T., Ngan, N. V. C., Pradiprao Khedulkar, A., Van, D. P., Halog, A., & Hoang, T. D. (2025). Blockchain-enabled water quality monitoring: A comprehensive review of digital innovations and challenges. *Water*, 17(17), 2522.
<https://doi.org/10.3390/w17172522>

- Vega, Y., Marques, I., Castro, S., & Loureiro, J. (2013). Outcomes of extensive hybridization and introgression in *Epidendrum* (Orchidaceae): Can we rely on species boundaries? *PLoS ONE*, 8(11), e80662.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0080662>
- Verdezoto-Prado, J., Chicaiza-Ortiz, C., Mejía-Pérez, A.B. Freire-Torres, C., Viteri-Yáñez, M., Deng, L., Barba-Ostria, C., & Guamán, L. P. (2025). Advances in environmental biotechnology with CRISPR/Cas9: Bibliometric review and cutting-edge applications. *Discover Applied Sciences*, 7, 167.
<https://doi.org/10.1007/s42452-025-06609-x>
- Vernier, C., Loeillet, D., Thomopoulos, R., & Macombe, C. (2021). Adoption of ICTs in agri-food logistics: Potential and limitations for supply chain sustainability. *Sustainability*, 13(12), 6702.
<https://doi.org/10.3390/su13126702>
- Wang, T., Thomasson, J. A., Isakeit, T., Yang, C., & Nichols, R. L. (2020). A plant-by-plant method to identify and treat cotton root rot based on UAV remote sensing. *Remote Sensing*, 12(15), 2453.
<https://doi.org/10.3390/rs12152453>
- Yang, L., Wang, H., Zou, M., Chai, H., & Xia, Z. (2025). Artificial intelligence-driven plant bio-genomics research: A new era. *Tropical Plants*, 4(1), 15.
<https://doi.org/10.48130/tp-0025-0008>
- Yang, W., Egea, G., & Ghamkhar, K. (2022). Editorial: Convolutional neural networks and deep learning for crop improvement and production. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1079148.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1079148>
- Zinke-Wehlmann, C., & Charvát, K. (2021). Introduction of smart agriculture. En *Big Data in Bioeconomy: Results from the European DataBio Project* (pp. 187–190).
https://doi.org/10.1007/978-3-030-71069-9_14