

<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/index>

[www.ucr.ac.cr](http://www.ucr.ac.cr) / ISSN: 2215-2652

# Ingeniería






Revista de la Universidad de Costa Rica  
ENERO/JUNIO 2026 - VOLUMEN 36 (1)





# Desafíos y oportunidades para adopción de invernaderos climáticamente inteligentes: análisis en la agricultura costarricense

## Challenges and Opportunities for the Adoption of Smart Greenhouses: Analysis in Costa Rica Agriculture

José Francisco Aguilar Pereira <sup>1</sup> , Freddy Soto-Bravo <sup>2</sup> , Prayag L Yadav <sup>3</sup>   
Jong Heung Park <sup>4</sup> , Diana Oviedo <sup>5</sup> 

<sup>1</sup> Profesor, Escuela de Ingeniería de Biosistemas, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.  
correo: [jose.aguilar@ucr.ac.cr](mailto:jose.aguilar@ucr.ac.cr)

<sup>2</sup> Profesor, Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Universidad de Costa Rica, Alajuela, Costa Rica.  
correo: [freddy.sotobravo@ucr.ac.cr](mailto:freddy.sotobravo@ucr.ac.cr)

<sup>3</sup> Profesor, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, Daejeon, República de Corea.

<sup>4</sup> Profesor, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, Daejeon, República de Corea.

<sup>5</sup> Doctoranda en Innovación Digital, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, Daejeon, República de Corea.

### Palabras clave:

Adopción tecnológica, agricultura inteligente, estrategias sostenibles, resiliencia climática, tecnología agrícola.

### Resumen

La incorporación exitosa de tecnologías avanzadas es un desafío clave en la agricultura actual para enfrentar el cambio climático y la creciente demanda global de alimentos. Este estudio evaluó el potencial de implementación de invernaderos climáticamente inteligentes (ICI) en Costa Rica, mediante cuatro estudios de caso enfocados en aspectos agroclimáticos, tecnológicos, de infraestructura y mercadeo. La metodología incluyó una revisión bibliográfica y visitas a fincas para entrevistar a productores agrícolas y profesionales en producción hortícola bajo invernadero. Los hallazgos evidenciaron que los ICI pueden aumentar la productividad hasta un 30 %, reducir el uso de agua en un 40 % y fortalecer la resiliencia agrícola. Sin embargo, esto depende de la integración efectiva entre factores agroclimáticos, tecnológicos, financieros y de mercado. Es decisivo desarrollar estrategias colaborativas entre entidades públicas, privadas y académicas para implementar proyectos piloto en condiciones tropicales para la validación y adopción de tecnologías ICI que permitan capacitar a profesionales y productores. En conclusión, la implementación exitosa de los ICI requiere una validación tecnológica y agronómica precisa, el abordaje integral de factores clave y el respaldo de políticas públicas junto a la capacitación técnica del sector agrícola.

Recibido: 22/01/2025

Aceptado: 18/08/2025

### Keywords:

Agricultural technology, climate resilience, smart agricultural, sustainable strategies, technological adaptation.

### Abstract

The successful incorporation of advanced technologies is a key challenge in modern agriculture to address climate change and the growing global demand for food. This study evaluated the potential implementation of climate-smart greenhouses (CSGs) in Costa Rica through four case studies focused on agroclimatic, technological, infrastructural, and market aspects. The methodology included a literature review and farm visits to interview agricultural producers and professionals specializing in greenhouse horticultural production. The findings demonstrated that CSGs can increase productivity by up to 30 %, reduce water use by 40 %, and enhance agricultural resilience. However, this success depends on the effective integration of agroclimatic, technological, financial, and market factors. It is essential to develop collaborative strategies among public, private, and academic entities to implement pilot projects in tropical conditions for the validation and adoption of CSGs technologies while training professionals and producers. In conclusion, the successful implementation of CSGs requires precise technological and agronomic validation, a comprehensive approach to key factors, public policy support, and technical training for the agricultural sector.

DOI: 10.15517/ri.v36i1.63614



## I. INTRODUCCIÓN

La agricultura ha sido un pilar fundamental en la historia socioeconómica de Costa Rica, base imprescindible de la economía, que ha contribuido significativamente a la identidad nacional. A lo largo de los años, la agricultura costarricense ha experimentado una notable evolución, adaptándose a las cambiantes condiciones económicas, de mercado, tecnológicas y climáticas [1].

Actualmente, el sector agrícola a nivel global enfrenta grandes desafíos, incluyendo la necesidad de satisfacer una creciente demanda de alimentos en medio de una acelerada expansión demográfica y la potencial crisis global del agua frente al cambio climático. Estos retos exigen la implementación de conocimientos avanzados y sostenibles para asegurar la competitividad y resiliencia del sector agrícola [2]. Al respecto, FAO [3] resalta la importancia de implementar prácticas de cultivo en busca de una agricultura climáticamente inteligente que mejore la productividad, la sostenibilidad y la resiliencia del sector agrícola. De esta forma, la implementación de tecnologías avanzadas en la agricultura es decisiva para enfrentar los desafíos actuales y futuros del sector agrícola [4].

El desarrollo de la horticultura bajo cubierta en Costa Rica refleja la necesidad de innovación, donde las estructuras tradicionales, que ofrecen protección básica contra las inclemencias del tiempo, pueden dar paso a invernaderos climáticamente inteligentes (ICI). La intensificación de fenómenos climáticos extremos, como sequías y lluvias torrenciales, subraya la necesidad de soluciones agrícolas resilientes. Los ICI representan una herramienta clave para mitigar estos efectos y garantizar la seguridad alimentaria. Estos integran tecnologías avanzadas de gestión del clima, del riego y la nutrición, aprovechando las herramientas de la cuarta revolución industrial, como la inteligencia artificial, aprendizaje automático y el Internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés). De esta manera, los ICI representan una alternativa para mejorar la eficiencia, sostenibilidad y competitividad de la producción agrícola. La adopción de invernaderos climáticamente inteligentes no solo aumenta la productividad y competitividad, sino que también contribuye a la sostenibilidad ambiental al optimizar el uso de recursos como el agua y la energía [4].

La producción bajo cubierta en Costa Rica ha evolucionado significativamente, pasando de estructuras básicas de malla sombra y polietileno a instalaciones completamente automatizadas y gestionadas por sistemas de inteligencia artificial y aprendizaje automático. Investigaciones previas han demostrado que su adopción puede aumentar significativamente la productividad y reducir los costos operativos, lo que promueve triple sostenibilidad: ambiental, social y económica en la producción agrícola. Al respecto, algunos estudios [5] demostraron que los sistemas automatizados de control de clima y riego pueden aumentar el rendimiento de los cultivos de un 20 % a 30 %, al mantener condiciones óptimas de crecimiento. En el mismo sentido, el uso de IoT en invernaderos inteligentes no solo mejora la eficiencia

fotosintética a través del control preciso de la iluminación y ventilación, sino que también contribuye a un crecimiento vegetal más balanceado y a un aumento en la producción, al tiempo que minimiza el uso de recursos energéticos y de agua [6].

Desde el punto de vista económico, las estructuras de cultivo automatizados han demostrado apreciables ahorros en costos. El uso de tecnologías automatizadas en riego y fertilización puede disminuir el consumo de agua en un rango de 40 % a 50 % y el uso de fertilizantes entre un 20 % y 30 %, manteniendo la calidad del producto [7]. Además, los sistemas de control climático automatizados reducen los costos energéticos entre un 15 % y 20 % al optimizar el uso de calefacción y enfriamiento según las condiciones climáticas [8].

Diversas investigaciones han subrayado la importancia del estudio previo de las condiciones agroclimáticas para diseñar la infraestructura adecuada que asegure el éxito de los cultivos en invernadero [3]. La falta de evaluaciones detalladas sobre el clima y el suelo puede conducir a enormes dificultades en la producción en invernadero, afectando la calidad y el rendimiento de los cultivos. Conjuntamente, la integración de herramientas avanzadas de fertirriego es esencial para optimizar el uso de los recursos hídricos y fertilizantes para mejorar la sostenibilidad de la producción. En este sentido, FAO indica que el empleo de soluciones que promuevan la utilización eficiente de los recursos hídricos es fundamental para mejorar la productividad y la resiliencia ante los retos que genera el cambio climático en el contexto agrícola [3].

La literatura actual sobre ICI y su adopción en regiones tropicales destaca varios aspectos críticos. Por ejemplo, investigaciones recientes han documentado los beneficios de la automatización y la inteligencia artificial en la gestión de invernaderos, subrayando mejoras significativas en la eficiencia del uso de recursos y la calidad de los cultivos [9].

Otras revisiones concluyeron que, aunque existe abundante investigación sobre la implementación tecnológica, se observa una falta de análisis enfocados en tecnologías avanzadas, como la inteligencia artificial y la robótica [10]. Esto es especialmente relevante en el contexto agroclimático, donde las características específicas de cada región juegan un papel crucial en la integración tecnológica [11].

Otras investigaciones han explorado la implementación de sistemas de riego avanzados y su impacto en la sostenibilidad y productividad de los cultivos en invernadero, por ejemplo, el uso de la microirrigación en invernaderos inteligentes como herramienta para optimizar el uso de los recursos hídricos y mejorar la eficiencia en la producción alimentaria [2].

La capacitación continua y el soporte técnico son fundamentales para que los agricultores adopten soluciones avanzadas y, al mismo tiempo, la colaboración entre entidades públicas, privadas y académicas es clave para el éxito de estos proyectos. Al respecto, un estudio sobre la agricultura de invernadero en la región mediterránea [12] concluyó que los pequeños agricultores a menudo carecen de conocimientos sobre sistemas avanzados como el control climático, pero la creciente

participación de jóvenes graduados, más abiertos a la capacitación y la innovación, ha mostrado un impacto positivo. Asimismo, un estudio realizado en Kenia [13] subrayó la importancia de la colaboración internacional y la sinergia institucional para aumentar la adopción de prácticas climáticamente inteligentes. Además, otro estudio [14] resaltó que la adaptación de estas herramientas a condiciones locales depende de factores como las preferencias de los agricultores y la disponibilidad de recursos, lo que hace crucial la colaboración entre agricultores y expertos para ajustarlas a las necesidades locales.

Por consiguiente, la presente investigación analizó la viabilidad de la implementación de ICI en Costa Rica, enfatizando la necesidad de incorporación bajo un enfoque integrado que considere las condiciones agroclimáticas locales, la infraestructura disponible, factores financieros y tecnológicos, así como las dinámicas del mercado. Además, su puesta en práctica debe apoyarse en proyectos piloto colaborativos con el respaldo coordinado entre sectores público, privado y académico.

Asimismo, la planificación de infraestructura en terrenos inclinados requiere evaluar la nivelación y la estabilidad del suelo para garantizar estructuras seguras y funcionales. Esto incluye analizar características como la cohesión, el ángulo de fricción interna y las propiedades geotécnicas, que son esenciales para prevenir fallas en taludes y para optimizar el diseño. Un estudio reciente destaca el uso de métodos como el análisis de equilibrio límite y simulaciones numéricas para evaluar la estabilidad y diseñar soluciones adaptadas a las propiedades del suelo [15]. Este enfoque permite abordar desafíos técnicos y asegurar una construcción eficiente y sostenible.

Desde una perspectiva de análisis de sistema de producción, el cultivo protegido debe entenderse como la interacción coordinada de diversos componentes (material vegetal, manejo agronómico, nutrición, suministro de agua y control ambiental) que están ligados mediante procesos productivos y de gestión. En este marco, la incorporación de invernaderos climáticamente inteligentes (ICI) permite integrar tecnologías de monitoreo y control que optimizan estos procesos, lo que asegura que las decisiones de manejo respondan de forma precisa a las necesidades del cultivo y a las condiciones ambientales específicas, para mejorar así la eficiencia, sostenibilidad y resiliencia del sistema.

El objetivo del presente estudio fue evaluar el potencial de adopción, desafíos y oportunidades de los ICI en la agricultura costarricense, como alternativa para mejorar la competitividad, sostenibilidad y resiliencia de los sistemas agrícolas, mediante estudios de caso de la producción en invernadero enfocados en aspectos agroclimáticos, de infraestructura, tecnología y mercadeo.

## II. METODOLOGÍA

Este estudio se basó en un enfoque de investigación integral para evaluar el potencial de adopción de ICI en el contexto de la situación actual de la producción en invernaderos en Costa Rica. La recolección de la información se realizó mediante entrevistas, encuestas estructuradas y revisiones documentales, en las cuales fueron abordadas de forma integral los factores agroclimáticos, de infraestructura, de tecnología y de mercado, para identificar desafíos y oportunidades en la implementación de ICI en Costa Rica.

Se llevaron a cabo conversaciones estructuradas con productores y profesionales en ingeniería y agronomía con experiencia en la producción en invernaderos. En el abordaje metodológico del análisis de las partes interesadas en los ICI, se consideraron aspectos clave como la selección diversificada de participantes, que incluyó funcionarios públicos, académicos, consultores, productores y representantes de empresas tecnológicas, asegurando una amplia representación de perspectivas. El cuestionario fue diseñado con preguntas abiertas y flexibles, permitiendo a los participantes expresar libremente sus opiniones y experiencias sobre aspectos técnicos, económicos y operativos de la producción en invernadero. En total, se dialogó individualmente con diez personas, con quienes se abordaron temas como la incorporación de tecnología, los desafíos enfrentados, las oportunidades identificadas y las recomendaciones para futuras implementaciones de ICI. Todas las sesiones fueron grabadas y transcritas para su análisis posterior. La información recopilada se documentó y sistematizó meticulosamente para facilitar su evaluación cualitativa.

El enfoque metodológico utilizado en la investigación incluyó revisión documental, entrevistas a profundidad y análisis de campo (CUADRO I).

CUADRO I  
ESTRATEGIA METODOLÓGICA EMPLEADA PARA LA RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Fase	Actividades principales	Instrumentos utilizados
Selección de casos	Identificación de fincas representativas por zona agroclimática	Criterios de inclusión, validación local
Recolección de datos	Entrevistas semiestructuradas, visitas de campo, registro de observaciones	Guías de entrevista, bitácoras, fotografías
Análisis	Sistematización cualitativa y categorización de variables	Matriz comparativa, análisis temático

Las encuestas estructuradas se aplicaron en cuatro casos de estudio de proyectos de producción en invernaderos en Costa Rica con diferente grado de tecnificación enfocadas en aspectos agroclimáticos, infraestructura utilizada, tecnologías implementadas, estrategias de mercadeo y las lecciones aprendidas. Adicionalmente, estos casos de estudio proporcionaron un contexto práctico con ejemplos concretos, que proporcionaron información valiosa sobre temas de planificación, gestión operativa, impacto socioeconómico, lecciones aprendidas y recomendaciones sobre la adopción de ICI.

Los estudios de caso de producción en invernadero incluyeron cuatro proyectos ubicados en diferentes regiones de Costa Rica: a) caso Zarcerero; b) empresa A dedicada a la producción de hortalizas

para supermercados ubicada en Moravia, San José; c) empresa B orientada a la producción de almácigos hortícolas situada en Cartago; y d) empresa C dedicada a la producción hidropónica de vegetales de hoja ubicada en Alajuela. La selección se basó en criterios de diversidad agroclimática, tipo de infraestructura, nivel tecnológico y estrategias de mercado, donde cada caso ofreció una perspectiva única sobre la implementación de tecnologías ICI en los diferentes contextos en que se desarrolla cada proyecto.

En el CUADRO II, se presentan las condiciones agronómicas y tecnológicas de cada finca, lo que permite contrastar las principales características de los cuatro casos analizados en el estudio, incluyendo la localización, cultivo, tipo de invernadero, tecnologías aplicadas y modalidad de comercialización.

CUADRO II  
CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS CASOS DE ESTUDIO EVALUADOS

Caso	Ubicación	Cultivo principal	Tipo de invernadero	Tecnologías implementadas	Modalidad de mercado
1	Zarcerero	Lechuga	Metálico semicilíndrico	Riego por goteo, sistema manual, sin sensores	Venta local a intermediarios
2	Cartago	Culantro castilla	Mixto con plástico difuso	Sombra inteligente, sensores básicos, manejo manual	Encadenamiento con hoteles
3	Alajuela	Fresa	Tipo túnel alto	Automatización parcial, sensores climáticos	Venta directa al consumidor final
4	Limón	Cebollino	Metálico tropical	Fertirriego automatizado, sensores de CE y humedad	Encadenamiento agroindustrial

Se aplicaron 15 entrevistas que incluyeron tanto productores como técnicos en agronomía y áreas afines, enfocadas en cuatro aspectos: condiciones agroclimáticas, infraestructura, tecnología y mercado. Las encuestas incluían preguntas cerradas y abiertas, permitiendo tanto la cuantificación de variables específicas como la obtención de conocimiento cualitativos. Los datos de las encuestas se analizaron utilizando métodos estadísticos descriptivos para identificar patrones y relaciones significativas.

La evaluación de aspectos agroclimáticos se basó en análisis previos del sitio de establecimiento del invernadero, que incluyeron clima, calidad del agua de riego y características topográficas y fisicoquímicas del suelo, con el fin de identificar posibles limitantes del proyecto. Asimismo, se contempló la implementación de proyectos piloto para validar el material genético adaptable al entorno local, así como optimizar el manejo tecnológico y las prácticas agronómicas.

En infraestructura, se abordaron las características físicas del sitio, incluyendo los requerimientos de nivelación del terreno y la estabilidad del suelo para la construcción de obras complementarias, por ejemplo, taludes. También, se detallan los requerimientos

de servicios como vías de acceso y la disponibilidad de agua, energía eléctrica, telecomunicaciones y transporte. Se trató de identificar posibles problemas climáticos que podrían afectar la infraestructura del invernadero, como vientos, inundaciones, escasez de agua, temperaturas y humedades extremas. Además, se realizaron visitas de campo para inspeccionar, fotografiar y documentar las instalaciones.

En el componente tecnológico, se evaluaron los sistemas de automatización implementados, incluyendo sensores para monitorear variables de clima, suelo y planta, tales como temperatura, humedad, conductividad eléctrica y radiación. Se indagó si la recolección y almacenamiento de estos datos se realiza de forma manual o automatizada. Asimismo, se examinó la efectividad del soporte técnico brindado por las empresas tecnológicas y las instaladoras de estas infraestructuras. También, se analizó el grado de dependencia tecnológica y el uso de la información recolectada para la toma de decisiones.

Finalmente, se recopiló información sobre el rendimiento y la calidad del producto, así como sobre aspectos de comercialización y mercado.

En aspectos socioculturales, se exploró sobre aspectos del proceso de transición de los sistemas productivos convencionales a los sistemas intensivos en invernadero, considerando la vocación y experiencia del productor, la disponibilidad de mano de obra, así como el nivel educativo y de capacitación de los involucrados. También, se identificó si hubo un choque cultural asociado a este cambio y las razones detrás de la decisión de adoptar nuevas tecnologías.

En el componente económico, se analizaron aspectos como la planificación financiera, las inversiones requeridas, los costos asociados a la incorporación de soluciones tecnológicas y factores financieros como el acceso y las condiciones de crédito. Asimismo, se evaluó el impacto económico de estas innovaciones en términos de ingresos y costos operativos.

Los aspectos de mercado abordaron componentes como las relaciones comerciales, estándares de calidad y el impacto de las innovaciones en los ingresos, precios, negociaciones y acceso a mercados. Se valoraron tanto los beneficios como los perjuicios de la tecnología y se recopilaron recomendaciones para otros productores. Además, se analizaron las estrategias de comercialización utilizadas por cada empresa, incluyendo canales de distribución, segmentos de mercado meta y estrategias de diferenciación de producto. Para ello, se realizaron entrevistas con los responsables de comercialización y la revisión de la literatura disponible.

Finalmente, se realizó una reflexión sobre las lecciones aprendidas en términos de infraestructura y operación de la producción en invernaderos. Asimismo, se identificaron factores críticos, expectativas, desafíos y oportunidades futuras para la toma de decisiones en la adopción de tecnologías de ICI.

La revisión documental de los diferentes aspectos abordados en los casos de estudio incluyó una inspección de fuentes relevantes, tales como informes técnicos, investigaciones previas y registros históricos de cada caso, planes de manejo, registros de producción, estudios agroclimáticos y reportes de mercado. Estos documentos proporcionaron información contextual y datos cuantitativos que complementaron, respaldaron y contribuyeron a la validación y análisis de la información obtenida tanto en las entrevistas como encuestas.

La información y datos obtenidos fueron analizados por métodos cualitativos. Las conversaciones fueron transcritas y analizadas según temática, identificando temas coincidentes y patrones en las respuestas de los participantes. Los datos de las encuestas fueron procesados y analizados mediante herramientas de hojas de cálculo electrónicas, lo cual facilitó el desarrollo de análisis descriptivos y se exploraron las relaciones entre las variables. Los hallazgos de las revisiones documentales se integraron al análisis de la información y de datos obtenidos para proporcionar un contexto más amplio de los resultados obtenidos.

Para facilitar la comprensión y contraste de la información obtenida en los estudios de caso, se elaboró un esquema que sintetiza los principales elementos analizados en cada uno de ellos. La Fig. 1 presenta de manera resumida los cultivos, las tecnologías implementadas y las estrategias de adopción identificadas en cada caso, lo cual permite visualizar de forma clara las similitudes y diferencias entre las experiencias estudiadas. Esta representación gráfica complementa la descripción detallada de la metodología, lo cual refuerza la perspectiva comparativa y sirve como puente hacia el análisis de resultados.

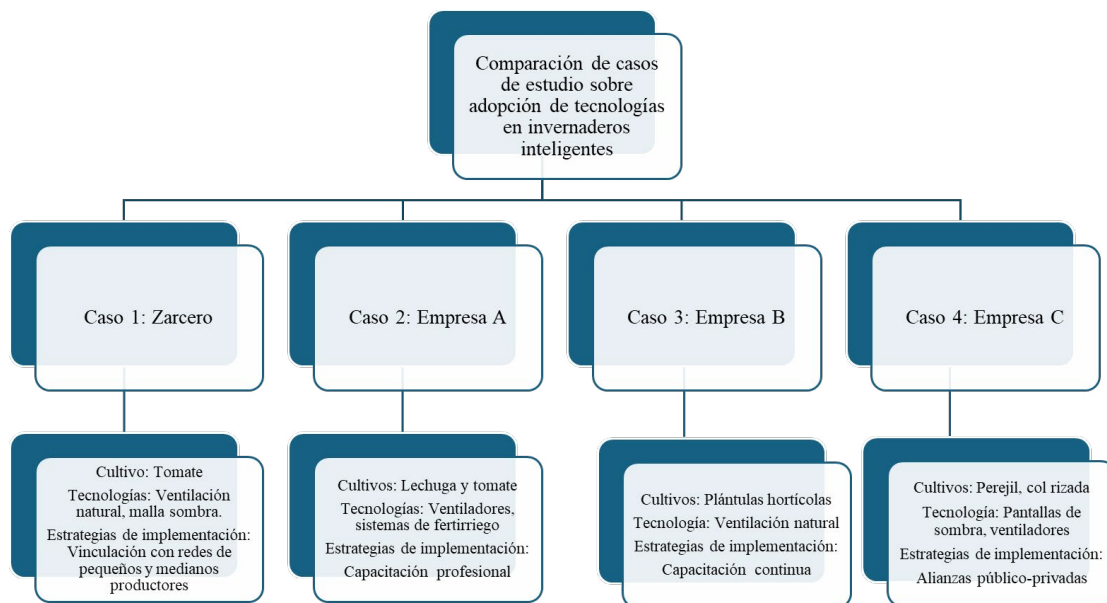


Fig. 1. Resumen gráfico de los elementos metodológicos empleados en este estudio, para facilitar la comprensión de la secuencia de actividades y su relación con los objetivos de investigación.

En total, se realizaron 15 entrevistas distribuidas en cuatro casos de estudio. En cada caso, se entrevistó a actores clave vinculados directa o indirectamente con el uso de invernaderos climáticamente inteligentes, incluyendo productores, técnicos y representantes institucionales. De manera complementaria, se aplicaron diez encuestas estructuradas a productores seleccionados en función de su experiencia con estas tecnologías, con el objetivo de ampliar la información obtenida en las entrevistas y fortalecer la caracterización de cada caso.

Como aclaración metodológica, antes de iniciar cada entrevista o encuesta, se obtuvo el consentimiento informado de manera verbal por parte de los participantes, explicando los objetivos del estudio y el uso de la información recolectada. Dado que el propósito central de la investigación es analizar implicaciones y lecciones aprendidas en el marco de la adopción tecnológica de invernaderos climáticamente inteligentes, la información recopilada se trató como insumo técnico y no incluyó datos personales sensibles. Por esta razón, y siguiendo principios de respeto a la privacidad y a la política de protección de datos (habeas data), no se compartió ni divulgó información identificable de los participantes.

El tamaño de la muestra se definió de manera intencional, priorizando la representatividad de los casos y la diversidad de actores con experiencia directa en el uso de estas tecnologías.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### A. *Análisis de entrevistas*

Dentro de los principales hallazgos de este análisis, resalta la importancia de un enfoque integral en la adopción de ICI en Costa Rica. Se evidenció que es fundamental proporcionar capacitación técnica y financiera, promover políticas públicas favorables y fomentar alianzas estratégicas para superar las limitantes y aprovechar los beneficios potenciales de esta tecnología para transformar y mejorar la eficiencia y sostenibilidad de la agricultura protegida.

Entre los principales hallazgos por caso de estudio, destacan el nivel de adopción de tecnologías ICI, beneficios percibidos y barreras identificadas que enfrentan los productores en cada caso de estudio (CUADRO III).

CUADRO III  
RESULTADOS POR CASO: NIVEL DE ADOPCIÓN DE TECNOLOGÍAS CLIMÁTICAMENTE INTELIGENTES

Caso	Nivel de adopción tecnológica	Beneficios observados	Principales barreras
1	Bajo	Manejo climático básico, mejora en rendimientos	Limitada capacitación, escaso financiamiento
2	Medio	Menor incidencia de enfermedades	Resistencia al cambio, limitada asesoría técnica
3	Alto	Ahorro de agua, incremento en productividad	Mantenimiento técnico, acceso a repuestos
4	Alto	Optimización del fertirriego	Alto costo de sensores, dependencia tecnológica

La información obtenida de las conversaciones realizadas a productores, profesionales y técnicos con experiencia en la producción en invernaderos reveló una diversidad de percepciones y necesidades en torno a la adopción e implementación de ICI en Costa Rica. Entre los descubrimientos más relevantes, destaca la urgencia de contar con capacitación técnica y operativa tanto en el manejo de los sistemas como en el cultivo, a fin de garantizar una implementación exitosa. Los participantes señalaron que estas infraestructuras pueden disminuir la incertidumbre en los procesos de toma de decisiones agrícolas, aunque también advirtieron sobre los retos económicos, remarcando la importancia de una gestión financiera sólida y de estudios de rentabilidad confiables.

Otro hallazgo recurrente fue la percepción favorable sobre los beneficios potenciales de los ICI, especialmente en cuanto a la mejora de la eficiencia y la sostenibilidad de la producción agrícola. No obstante, los entrevistados señalaron que su incorporación enfrenta serias barreras, entre ellas la limitada investigación y desarrollo en este campo, así como la ausencia de políticas públicas y mecanismos financieros que faciliten un entorno propicio para su implementación.

La participación activa de entidades financieras con lineamientos claros se identificó como una estrategia clave para impulsar proyectos de agronegocios con este tipo de infraestructuras.

El análisis de diversos casos de producción en invernadero en Costa Rica brindó una visión concreta sobre el proceso de puesta en marcha de los ICI. Estos casos evidenciaron que la elección de un diseño estructural adaptado al trópico, equipado con los sistemas esenciales, es determinante para el éxito. Asimismo, la información agroclimática recopilada en distintas ubicaciones mostró la relevancia de evaluar cuidadosamente las particularidades de cada zona, dado que la variabilidad ambiental incide directamente en los resultados productivos. Los casos más exitosos subrayaron la importancia de establecer alianzas estratégicas entre el sector público y privado, con la participación directa de las organizaciones de productores en todas las etapas, desde la planificación hasta la evaluación de resultados. Esto responde a la necesidad de evitar decisiones unilaterales por parte de las instituciones, las cuales suelen dejar de lado la experiencia práctica y la perspectiva social, económica y cultural de quienes producen. En este sentido, los entrevistados coincidieron en que la cooperación genuina y la integración del conocimiento técnico con la experiencia local constituyen el camino más sólido para lograr una adopción sostenible y escalable de los ICI en el país.

Dentro de los hallazgos, se identificaron patrones comunes y diferencias entre los distintos casos estudiados. Un patrón común es la necesidad de una validación técnica rigurosa y la capacitación continua para los productores. También se identificó que es una necesidad imperiosa la búsqueda de mercados de alto valor agregado para justificar la inversión inicial en ICI y asegurar la rentabilidad y sostenibilidad social y financiera del proyecto.

Entre las diferencias entre los distintos casos, se identificó el nivel de éxito, que fue dependiente de factores como la calidad de infraestructura utilizada, el acceso al financiamiento y a la capacitación técnica. Las experiencias menos exitosas evidenciaron la falta de estudios robustos del mercado y la subestimación de los costos operativos y de mantenimiento de equipos, infraestructura y de la tecnología.

A pesar de la limitada literatura nacional, diversas investigaciones respaldan los hallazgos de este trabajo [2], lo cual subraya la relevancia de la innovación tecnológica en la agricultura protegida y la necesidad de políticas públicas que impulsen la inversión y capacitación en tecnologías avanzadas. Por ejemplo, el papel de las innovaciones avanzadas como la microirrigación, invernaderos inteligentes y sistemas agrivoltáicos para abordar los desafíos agrícolas [2]. La FAO recalca la necesidad de políticas que promuevan la agricultura climáticamente inteligente y la inversión en tecnología avanzada [16]. Además, advierte que las tendencias del cambio climático afectan la producción agrícola, reforzando la necesidad de métodos resilientes que mitiguen estos efectos [17]. Por otro lado, se destaca la eficiencia de los robots autónomos en la cosecha en ambientes protegidos [18], [19] y se propone la agricultura vertical como una solución para incrementar la producción en áreas urbanas [20]. Finalmente, se destaca la urgencia de una intensificación sostenible para alimentar a una población en constante crecimiento [21].

En resumen, los resultados de las entrevistas, encuestas y el análisis de los casos de estudio resaltan la importancia de

un enfoque integral para la adopción de ICI en Costa Rica. Es fundamental proporcionar capacitación técnica y financiera, promover políticas públicas favorables y fomentar alianzas estratégicas para superar los desafíos y aprovechar los beneficios potenciales de esta tecnología. La revisión bibliográfica apoya estos hallazgos, indicando que la implementación exitosa de ICI puede transformar la agricultura protegida, mejorando su eficiencia y sostenibilidad.

## *B. Análisis individual de los estudios de caso en la producción en invernaderos en Costa Rica*

### *1) Caso 1. Zarcero:*

El estudio de caso en Zarcero reveló una serie de limitantes agroclimáticos que afectaron significativamente la sostenibilidad del proyecto. Factores críticos que no fueron analizados previamente, como la baja luminosidad, bajas temperaturas y alta humedad propiciaron la incidencia y alta severidad de enfermedades como el mildiu vellosa, lo que resultó en pérdidas económicas sustanciales. Aunado a esto, la falta de una adecuada validación y selección de materiales genéticos adaptados a las condiciones locales agudizaron dichos problemas fitopatológicos. Además, la falta de un análisis exhaustivo de factores agroclimáticos, junto con el limitado conocimiento y experiencia sobre los genotipos, evidenció la ausencia de planes de manejo agronómico específicos para las condiciones climáticas de las distintas localidades de Zarcero, lo que significativamente limitó la capacidad de los productores para enfrentar estos desafíos de manera efectiva.

En términos de infraestructura, los invernaderos de Zarcero fueron construidos con tecnología de una empresa española, consistentes en una estructura de hierro galvanizado, cerramiento de plástico en el techo, malla antiinsectos en las paredes y sarán aluminizado para sombreo interno. Estas estructuras presentaban una altura adecuada para favorecer la estabilidad térmica y una ventilación pasiva eficiente, además de sistemas de humidificación fog system para controlar el ambiente interno. No obstante, la falta de capacitación y soporte técnico por parte de la empresa proveedora limitó el uso eficiente y el aprovechamiento pleno de la tecnología.

Por otra parte, la falta de estudios topográficos y físicos del suelo no previó los requerimientos de movimientos de tierra para la nivelación del terreno, lo cual incrementó apreciablemente los costos de inversión inicial, que además tuvo un fuerte impacto ambiental que no fue analizado previamente.

De acuerdo con lo anterior, la falta de una adecuada adaptación y validación de las tecnologías importadas a las condiciones locales promovió la dependencia tecnológica, que consecuentemente generó problemas adicionales e incrementos en costos innecesarios en la operación y mantenimiento de los invernaderos. Esto se debe a que las tecnologías con sistemas automatizados de control climático a menudo no están diseñadas teniendo en cuenta las particularidades climáticas locales.

En este sentido, estudios recientes destacan la importancia de adaptación y validación de estas tecnologías a las condiciones locales para mejorar su eficacia y reducir la dependencia externa [22].

En cuanto a las estrategias de mercadeo, la selección de productos de alto valor agregado fue crucial para intentar amortiguar los altos costos operativos y de mantenimiento. No obstante, la falta de estudios de mercado globales y de estrategias de marketing sólidas limitó la capacidad de los productores para posicionar sus productos en mercados competitivos. La creación de alianzas y un conocimiento más profundo de los mercados globales fueron identificados como necesarios para mejorar la sostenibilidad y la rentabilidad de la producción en Zarcero.

### *2) Caso 2. Empresa A - Producción de hortalizas en invernaderos:*

Este caso evidenció la importancia de los estudios climáticos para determinar previamente si el sitio presenta condiciones climáticas óptimas según los requerimientos del cultivo, que permitan obtener altos rendimientos que aseguren la rentabilidad y sostenibilidad del proyecto. Además, el estudio agroclimático permitió la selección de estructuras resistentes a los fuertes vientos alisios. Sin embargo, se identificó una falta de información sobre invernaderos adaptados al clima frío y nuboso del lugar, lo que probablemente limitó la capacidad de adaptación y eficiencia tecnológica.

La infraestructura de los ambientes protegidos de la empresa A tenía aproximadamente 12 años de construida, con sistemas de riego por goteo automatizado y una estación con Internet de las cosas (IoT) para el monitoreo del clima. No obstante, los datos climáticos y de producción se recolectaron y procesaron manualmente, lo que evidenció una necesidad de mayor automatización y capacitación en el uso de la tecnología.

Desde un punto de vista económico, la empresa desarrolló un plan de inversión detallado y obtuvo financiamiento mediante un crédito bancario complejo. La inversión en recursos tecnológicos permitió una mejor gestión y reducción de los costos en plaguicidas, agua y mano de obra, mejorando la eficiencia operativa. Sin embargo, los desafíos financieros y la necesidad de obtener altos rendimientos para justificar la inversión fueron constantes.

En términos de mercado, la empresa A estableció relaciones comerciales con supermercados como Megasuper y Automercado, lo que aseguró un flujo constante de demanda. A pesar de esto, la diferenciación de precios en el mercado nacional para productos de invernadero fue un desafío, ya que los consumidores no reconocían plenamente los beneficios de estos productos en términos de calidad y reducción de carga química. Además, los supermercados no reconocían un precio diferenciado para dichos productos.

### *3) Caso 3. Empresa B - Invernaderos para producción de almácigos:*

El monitoreo de componentes climáticos críticos, como radiación solar, humedad, temperatura y viento, permitió una gestión más efectiva del clima dentro de los invernaderos.

Por ejemplo, mejoró la toma de decisión en la utilización de pantallas de sombreado para controlar la temperatura y la humedad, con el fin de realizar una buena gestión del riego, lo cual redujo las pérdidas de agua por evaporación.

Coincidiendo con los otros casos de estudio, hubo falta de validación de materiales genéticos adaptados a las condiciones de la zona, debido al corto tiempo de cultivo de las plántulas (3-8 semanas). En este caso, se trabajó con los materiales comerciales que el productor habitualmente cultiva en su zona. Esto pudo ser una limitación significativa, ya que los materiales presentaron mayor susceptibilidad a ciertos patógenos que ocasionalmente podrían afectar la calidad de las plántulas.

Como parte de las obras de infraestructura, se incluyó movimientos de tierra y la subsecuente nivelación del terreno. Asimismo, se construyeron reservorios de agua captada de la lluvia y su uso en el riego.

La falta de información agroclimática previo al diseño y construcción del invernadero, principalmente vientos, no consideró estos factores a la hora de diseñarlo, lo cual condujo a problemas estructurales que causaron la pérdida de los techos plásticos. Como parte del diseño estructural, se incluyeron ventanas cenitales y laterales como sistema de ventilación pasiva, complementado con ventilación activa mediante el uso de ventiladores internos. Además, se instalaron mallas térmicas para contrarrestar las bajas temperaturas nocturnas.

Económicamente, la empresa desarrolló un plan de negocios sólido y financió la infraestructura mediante un préstamo bancario. La evolución y adaptación de la tecnología fueron empíricas, basadas en la experiencia y capacitación en el extranjero. En cuanto al mercado, la empresa se enfocó en la comercialización de plántulas para productores hortícolas, destacándose por la reducción en el uso de agroquímicos y el control de plagas, aunque enfrentó altos costos de mantenimiento y sustitución de plásticos.

### *4) Caso 4. Empresa C - Desafíos en la producción de vegetales hidropónicos bajo invernadero:*

El estudio de este caso evidenció la ausencia de estudios del clima, de las características del agua de riego y de validación de materiales genéticos adaptados a las condiciones climáticas y al sistema de cultivo hidropónico, lo que resultó en una baja productividad de los cultivos.

En términos de infraestructura, la construcción del invernadero se adaptó a los contextos topográficos urbanos, sin análisis topográficos ni de impacto ambiental. Por esta razón, la infraestructura original fue afectada por los fuertes vientos, lo que requirió modificaciones costosas.

Desde el punto de vista de tecnología, se evidenció la falta de equipos, sensores y recursos tecnológicos, como el IoT para la monitorización de parámetros del sustrato, la planta y el clima.

Por ejemplo, la falta de una estación meteorológica propia generó la dependencia de datos de una estación cercana, lo cual limitó la capacidad de una gestión más precisa del clima.

En el componente económico, la falta de estudios previos

al diseño e implementación del proyecto junto a la falta de planificación generó altos costos de inversión inicial. Asimismo, la falta de registros de costos operativos, de mantenimiento y de producción dificultaron la evaluación de la rentabilidad del proyecto. El ingreso al mercado se realizó a través de un convenio con la cadena de supermercados Walmart, sin embargo, la inestabilidad y atraso en los pedidos, junto con la consecuente

pérdida de calidad de los productos dificultaron la sostenibilidad económica del proyecto.

La relación entre especies cultivadas, tecnologías aplicadas y sus requerimientos específicos se sintetiza en el CUADRO IV, lo que permite apreciar cómo la selección tecnológica responde a las necesidades fisiológicas y de manejo de cada cultivo en los casos de estudio analizados.

CUADRO IV  
CULTIVOS, TECNOLOGÍAS APLICADAS Y REQUERIMIENTOS ESPECÍFICOS POR CASO DE ESTUDIO

Caso	Especie cultivada	Tecnologías aplicadas	Requerimientos y manejo específico del cultivo
Zarcero	Lechuga	Ventilación pasiva, sombreo, estructuras metálicas	Prefiere T entre 15 °C y 20 °C, alta luminosidad, HR controlada; sensible al exceso de humedad
Empresa A	Culantro castilla	Riego por goteo, estación IoT, automatización básica	Necesita humedad constante, sombra parcial, control de malezas y plagas, riego preciso y condiciones ventiladas
Empresa B	Fresa (almácigos o producción)	Sensores climáticos, ventilación mecánica, sombra térmica	Requiere T moderada, alta luminosidad, buena aireación y humedad controlada en el sustrato
Empresa C	Hortalizas de hoja hidropónicas	Fertirriego automatizado, sensores de CE, pH y humedad en sustrato	Precisión en nutrientes, monitoreo constante del ambiente radicular, CE ideal entre 1.2 dS/m y 2.2 dS/m según cultivo

### C. *Patrones, similitudes y diferencias entre los casos de estudio*

El análisis de los cuatro casos de estudio (Zarcero, empresa A, empresa B y empresa C) reveló la presencia de patrones, similitudes y diferencias, que ofrecen una visión integral sobre el potencial de adopción de invernaderos climáticamente inteligentes (ICI) en la agricultura costarricense.

Estas investigaciones subrayaron la necesidad e importancia de realizar estudios agroclimáticos previos al diseño e implementación del proyecto de producción en invernaderos. Tanto en Zarcero como en la empresa B, la falta de análisis detallados de las condiciones agroclimáticas del sitio condujo a serios problemas relacionados con la humedad y el viento, lo que provocó problemas estructurales y fitopatológicos que afectaron los costos y el rendimiento de los cultivos. Dichos trabajos permiten el diseño de infraestructuras robustas junto con la selección de tecnologías adecuadas para evitar inversiones estructurales y tecnológicas innecesaria que únicamente contribuirían a elevar los costos de inversión inicial sin aportes significativos en la productividad.

Todos los casos destacaron la importancia de una infraestructura sólida para soportar las condiciones climáticas locales. Las estructuras de hierro galvanizado en Zarcero y los sistemas de ventilación y pantallas térmicas en la empresa B son ejemplos de cómo esta puede influir en el rendimiento de los

invernaderos. No obstante, la falta de estudios topográficos y de impacto ambiental en la empresa C y la nivelación del terreno en Zarcero indican que una planificación deficiente puede llevar a costos adicionales y problemas operativos.

Paralelo a los estudios agroclimáticos, se destaca la importancia de la validación de materiales genéticos que se adapten a las condiciones climáticas del sitio según sus requerimientos. Al mismo tiempo, destaca la necesidad de establecer proyectos piloto donde se adapte y valide la tecnología incluyendo la evaluación de genotipos, para una capacitación continua de los actores involucrados en el manejo agronómico de los cultivos y en la operatividad de las herramientas tecnológicas del invernadero. Adicionalmente, el seguimiento y soporte técnico es el complemento ideal a los procesos de capacitación para asegurar el éxito en la adopción e implementación de los ICI.

La ausencia de estudios técnicos, tales como el suelo, el clima y de materiales genéticos adecuados, generó una alta dependencia de tecnologías importadas que no necesariamente respondían a las necesidades locales. Por ejemplo, en el caso de Zarcero utilizaron infraestructuras diseñadas para climas europeos, lo que condujo a ineficiencias operativas debido a la falta de adaptación a las condiciones tropicales. En ambos casos, la falta de un análisis detallado de las necesidades locales, de capacitación y de seguimiento adecuado en el uso de la tecnología incrementó los costos operativos, por lo que se desaprovecharon las prestaciones tecnológicas de los invernaderos.

En todos los casos analizados, la ausencia de una capacitación adecuada y de un seguimiento técnico constante limitó el aprovechamiento de los sistemas de control climático, riego y monitoreo disponibles. Si bien en empresas como A y B se implementaron tecnologías de riego automatizado y sistemas de monitoreo basados en IoT, la falta de formación y de soporte especializado se mantuvo como un desafío recurrente. La experiencia de la empresa C, que operaba sin tecnologías avanzadas, refuerza la importancia de contar con procesos de capacitación continua y asistencia técnica para maximizar los beneficios de las tecnologías ICI.

En cuanto a mercado, resaltó la falta de alianzas estratégicas para realizar una comercialización más efectiva para asegurar la viabilidad y sostenibilidad económica del proyecto. En el caso de las empresas A y B se centraron en la producción comercial a gran escala y el suministro a supermercados. La empresa A destacó la importancia de estrategias de mercadeo y alianzas con supermercados, lo que complementa la falta de estudios de mercado globales en Zarcero y la inestabilidad de pedidos en la empresa C. Un patrón en común en todos los casos fue la necesidad de identificar nichos de mercado para productos de alto valor agregado, que permitan rentabilizar la alta inversión inicial en infraestructura y tecnología. Otro aspecto adicional de diferenciación al valor agregado del producto es la necesidad de capacitación en estrategias de manejo fitosanitario con productos biológicos que reduzcan la carga química y así poder ofrecer un producto más inocuo.

Otro elemento en común fue las dificultades afrontadas en la búsqueda de financiamiento para realizar la alta inversión

inicial, lo cual, en todos los casos, representó un gran reto financiero. Sin embargo, las empresas que lograron desarrollar planes de inversión sólidos, como la A y la B, pudieron superar estos obstáculos mediante financiamiento externo y relaciones comerciales estables.

Las diferencias entre los casos de estudio se reflejan en la capacidad para enfrentar y resolver las dificultades afrontadas que determinaron el grado de éxito de cada proyecto. En el caso de Zarcero, enfrentó grandes dificultades debido a la falta de estudios agroclimáticos para realizar un adecuado diseño estructural con las herramientas tecnológicas requeridas y una apropiada selección de materiales genéticos mejor adaptados a las condiciones climáticas adversas. En el caso de la empresa A, enfrentó desafíos financieros y la necesidad de altos rendimientos para justificar la inversión inicial en una infraestructura robusta que resistiera los fuertes vientos alisios. La empresa B, aunque bien estructurada tecnológicamente, enfrentó problemas con la resistencia de los plásticos a los vientos fuertes, lo que no fue un problema en los otros casos. La empresa C, por su parte, sufrió de una falta generalizada de planificación y adaptación tecnológica, lo que resultó en problemas significativos por altos costos operativos y una baja productividad. En el caso de las empresas A y C, resalta la capacidad de establecer alianzas estratégicas para asegurar la comercialización del producto con cadenas de supermercados.

El CUADRO V agrupa los factores identificados como críticos para la adopción exitosa de tecnologías ICI en los casos de estudio, clasificados en dimensiones técnico-productivas, económicas, sociales e institucionales.

CUADRO V  
FACTORES CLAVE QUE INCIDEN EN LA ADOPCIÓN DE TECNOLOGÍAS ICI

Dimensión	Factores clave identificados
Técnico-productiva	Condiciones agroclimáticas locales, tipo de cultivo, infraestructura disponible
Económica	Costos iniciales de inversión, acceso a crédito, rentabilidad esperada
Social	Nivel educativo de los productores, experiencia previa, actitud frente a la innovación
Institucional	Programas de asistencia técnica, apoyo público, alianzas interinstitucionales

*D. Expectativas, desafíos y oportunidades de la adopción de invernaderos climáticamente inteligentes en el trópico costarricense*

La adopción de tecnologías en invernaderos climáticamente inteligentes en el trópico costarricense enfrenta desafíos significativos, incluyendo la necesidad de estudios agroclimáticos detallados, altos costos de implementación y la necesidad de capacitación técnica. Los desafíos financieros, aunque varían en naturaleza, son una constante, subrayando la necesidad de políticas públicas de apoyo y acceso a financiamiento para los productores.

Sin embargo, las expectativas y las oportunidades son prometedoras, con el potencial de transformar la agricultura costarricense en un sector más productivo, sostenible y competitivo a nivel global. La colaboración entre el sector público, privado y académico será crucial para superar los desafíos y aprovechar las oportunidades que los ICI ofrecen.

*1) Expectativas:*

La adopción de ICI en el trópico costarricense representa una evolución significativa en la agricultura nacional, alineada

con tendencias globales de sostenibilidad y eficiencia. En el corto plazo, se espera que los ICI mejoren la productividad agrícola con un uso eficiente de los recursos hídricos, insumos y energéticos, contribuyendo así a la sostenibilidad agrícola. La integración de tecnologías avanzadas, como la inteligencia artificial (IA) y el Internet de las cosas (IoT), permitirá una gestión más precisa y automatizada de las condiciones de cultivo, reduciendo las pérdidas y mejorando la calidad de los productos agrícolas [23], [9].

A largo plazo, se prevé que los ICI promueva la competitividad de los productos costarricenses en mercados internacionales, principalmente a través de la producción de cultivos de alto valor agregado con menor carga de agroquímicos. Una característica clave es la capacidad de los ICI para adaptarse rápidamente a los cambios climáticos y de mercado, lo cual potencia la transformación y competitividad de la agricultura costarricense, haciéndola más resiliente a las fluctuaciones globales [21].

## 2) Desafíos:

Uno de los principales desafíos en la adopción de ICI en el trópico costarricense, es la capacidad de realizar análisis agroclimáticos de grandes cantidades de datos históricos para identificar patrones que permitan el diseño de estructuras de invernadero con las tecnologías adaptadas a condiciones tropicales. Las variaciones en temperatura, humedad, vientos y radiación solar requieren soluciones específicas para cada región, lo que implica la necesidad de inversión en investigación y desarrollo. La falta de estos estudios ha causado serios problemas en la producción bajo invernadero, como sucedió en los casos de Zarcero y la empresa C, donde las condiciones climáticas adversas afectaron negativamente los cultivos.

Otro gran reto es la capacidad para afrontar los altos costos de inversión inicial en infraestructura y tecnología. La construcción de invernaderos robustos y la integración de innovaciones avanzadas según las necesidades locales requieren una inversión inicial elevada, que puede ser prohibitiva para pequeños y medianos productores. Además, los costos operativos, incluyendo el mantenimiento y la actualización de tecnologías, presentan una carga financiera continua que debe ser gestionada eficientemente para asegurar la viabilidad económica del proyecto [24]. Garantizar una capacitación sólida en el manejo agronómico y en el uso de las tecnologías constituye uno de los principales desafíos para lograr una adopción exitosa de los ICI. La carencia de conocimientos técnicos y habilidades por parte de los productores limita su capacidad para aprovechar los beneficios potenciales de estas tecnologías. Además, la dependencia de equipos y sistemas importados, sin una adecuada adaptación ni capacitación, incrementa la complejidad operativa y, en consecuencia, los riesgos, lo que puede derivar en pérdidas económicas, tal como se evidenció en varios de los casos analizados.

Uno de los grandes retos es el aspecto financiero, el cual fue una constante en todos los estudios de caso y evidenció la necesidad de definir e implementar políticas públicas de apoyo y acceso a financiamiento para los productores. Sin un adecuado

apoyo financiero, muchos agricultores no podrán asumir los costos de inversión y gastos operativos iniciales de la implementación y operación de los ICI.

## 3) Oportunidades:

A pesar de los desafíos, las oportunidades para la adopción de ICI en Costa Rica son significativas. La producción agrícola representa una de las actividades más riesgosas debido a la incertidumbre que genera la alta variabilidad y extremos climáticos en el trópico relacionada con la alta incidencia y severidad de problemas de plagas y enfermedades. La tecnología asociada a los ICI puede reducir la incertidumbre mediante sistemas automatizados de monitoreo y control en tiempo real, lo que permite al productor disminuir riesgos al contar con una mayor capacidad de toma de decisiones para regular las condiciones internas del invernadero, con lo que se optimiza el rendimiento y la calidad de la producción, y minimizando los desperdicios.

La disponibilidad de financiamiento basado en estudios de factibilidad, mediante iniciativas gubernamentales y colaboraciones público-privadas pueden proporcionar los recursos necesarios para financiar los análisis agroclimáticos, desarrollar infraestructuras adecuadas y capacitar a los productores. Programas de subsidios y créditos blandos pueden reducir la barrera financiera para facilitar la adopción de ICI a nivel de pequeños y medianos productores [3].

El potencial de mercados de internacionales ante la creciente demanda de productos agrícolas de alta calidad y alto valor agregado representa una oportunidad clave para los productores costarricenses. La producción en ICI favorece la diferenciación de productos de alto valor mediante la certificación de prácticas sostenibles y la reducción del uso de agroquímicos. Por tanto, el desarrollo de estrategias de mercadeo efectivas y alianzas con grandes cadenas de distribución pueden asegurar un flujo constante de demanda, lo que mejoraría la estabilidad económica de los productores [13].

Finalmente, la innovación tecnológica y el desarrollo de capacidades locales a través de la colaboración con instituciones académicas y centros de investigación puede impulsar el desarrollo de soluciones locales innovadoras o la adaptación de tecnologías importadas acondicionadas a las necesidades según las condiciones locales. El establecimiento de proyectos piloto y programas de formación continua fortalecen el desarrollo de competencias técnicas de los productores para gestionar eficientemente los ICI y así adaptarse rápidamente a los cambios del entorno agrícola [25].

## E. Lecciones aprendidas en los estudios de caso de invernaderos en Costa Rica

Las lecciones aprendidas de los estudios de caso en Costa Rica proporcionan una base valiosa para guiar a una adopción más eficiente y exitosa de los ICI en la agricultura tropical costarricense.

### 1) *Lecciones en común:*

Entre las lecciones más comunes, resaltaron la necesidad de investigaciones agroclimáticas para el diseño de infraestructuras robustas y selección adecuada de genotipos, capacitación técnica continua, estrategias de mercadeo efectivas y gestión financiera rigurosa. Estos son componentes esenciales para asegurar el éxito y sostenibilidad en la implementación con conocimientos en los ICI para la agricultura del trópico costarricense.

Una de los aprendizajes que más sobresalió es la necesidad de realizar estudios agroclimáticos detallados previo al diseño e implementación de los ICI. La falta de datos precisos sobre variables como vientos, temperatura, humedad y radiación solar resultó en una inadecuada selección de tecnologías y genotipos, lo cual provocó pérdidas económicas significativas desde el inicio del proyecto. Por ejemplo, en Zarcero, la alta humedad junto a la baja luminosidad favoreció la incidencia y severidad de enfermedades que afectaron drásticamente los rendimientos e incrementaron los costos y consecuentemente la rentabilidad.

Esta lección resalta la importancia de adaptar las tecnologías de ICI a las condiciones específicas de cada región, ya que la utilización de paquetes tecnológicos diseñados para otro clima puede ser ineficaz o incluso perjudicial; además, puede implicar incurrir en costos innecesarios que pueden afectar la rentabilidad del proyecto.

Otra lección común es la necesidad de diseñar invernaderos robustos en función de las cargas por vientos críticos y altas precipitaciones características del trópico. El diseño, la planificación y la construcción de ICI debe considerar las condiciones climáticas locales para asegurar su necesidad, funcionalidad y durabilidad. Por ejemplo, en la empresa B, la pérdida de plásticos debido a vientos fuertes evidenció la importancia de usar materiales de alta resistencia y sistemas de soporte adecuados, sin sobredimensionar o minimizar los requerimientos estructurales y tecnológicos del invernadero. Un diseño de infraestructura y tecnología adecuada puede prevenir problemas operativos y reducir los costos de inversión inicial y a largo plazo, garantizando la durabilidad y funcionalidad de los invernaderos en el contexto del clima tropical.

Por otra parte, todos los casos de estudio destacaron la importancia de la capacitación y el soporte técnico para maximizar los beneficios de los componentes tecnológicos de los ICI y, así, garantizar que los productores puedan gestionar eficientemente los sistemas de monitoreo y control en tiempo real para el control del clima, del riego y la fertilización. Por ejemplo, en los casos de Zarcero y la empresa C, enfrentaron serias dificultades debido a la falta de capacitación técnica adecuada.

En la misma línea, se evidenció la necesidad de implementar proyectos piloto en colaboración entre el sector privado e instituciones académicas y centros de investigación, como una forma efectiva de proporcionar la capacitación necesaria para mejorar las competencias de los productores.

### 2) *Lecciones específicas de cada caso:*

En Zarcero, una lección clave fue la importancia de seleccionar materiales genéticos adaptados a las condiciones locales. La introducción de cultivos sin pruebas previas de adaptabilidad y sin validación basada en estudios agroclimáticos provocó cuantiosas pérdidas económicas tanto al inicio como durante la ejecución del proyecto. La inadecuada selección de genotipos junto a la falta de información climática dificultó una adecuada planificación de control de potenciales fitopatógenos, que provocó una alta incidencia del hongo *Pseudoperonospora* sp., favorecida por la alta humedad ambiental y la susceptibilidad del material genético.

La experiencia de la empresa A mostró que la diferenciación de productos a través de certificaciones de prácticas sostenibles puede aumentar el valor y el posicionamiento de mercado, lo que mejora la competitividad. La comercialización de productos de alta calidad y con menor carga de agroquímicos permitió a la empresa posicionarse en el mercado, ya que respondió satisfactoriamente a las demandas de los consumidores en cadenas de supermercados. Esta lección destaca cómo las estrategias de mercadeo basado en los beneficios ambientales y de salud de los productos pueden ser efectivas para mejorar el acceso a determinados nichos de mercado.

La empresa C reveló la importancia de la planificación financiera y el registro de costos operativos y de mantenimiento, pues la falta de información imposibilitó la evaluación de costos y la rentabilidad del proyecto. Este caso acentúa la necesidad de una gestión financiera eficiente y la implementación de sistemas de monitoreo de costos para poder evaluar la viabilidad económica del proyecto a largo plazo.

### 3) *Análisis de lecciones aprendidas:*

Las lecciones aprendidas a partir de los diferentes estudios de casos pueden contribuir significativamente a la adopción exitosa de tecnologías de ICI en el trópico costarricense. La producción en ICI representa una valiosa oportunidad para mejorar la resiliencia y sostenibilidad de la agricultura protegida en Costa Rica, ya que favorece el uso eficiente de los recursos e incrementa significativamente el rendimiento y la calidad. Sin embargo, para una implementación exitosa, se requiere un enfoque integral que aborde aspectos técnicos, socioeconómicos, financieros, de mercado y de políticas públicas. Los resultados sugieren que, mediante subsidios gubernamentales para financiar infraestructura robusta y programas de capacitación técnica, los productores pueden adoptar ICI de manera sostenible y rentable. Asimismo, los aspectos técnicos deben incluir los estudios agroclimáticos y topográficos para una adecuada selección de la tecnología y de materiales genéticos.

En primera instancia, los estudios agroclimáticos detallados y previos proporcionan información fundamental sobre las condiciones locales, como temperatura, humedad, vientos y radiación solar. Estos contribuyen a un correcto diseño estructural

del invernadero y sus componentes tecnológicos, a una adecuada selección de cultivos y genotipos, así como a una planificación de estrategias de prevención y control de plagas o enfermedades, lo cual asegura la adaptabilidad del proyecto localmente. Esto reducirá los riesgos asociados con las condiciones climáticas adversas como la alta humedad y los vientos fuertes, evita costos de inversión innecesarios y permite una gestión más eficiente de los recursos, lo que asegura la viabilidad técnica del proyecto. La falta de estudios precisos sobre las variables climáticas en la localidad puede resultar en la selección inadecuada de cultivos, variedades y tecnologías, que incrementa innecesariamente los costos de inversión inicial, además, causa pérdidas significativas y problemas operativos. Es esencial adaptar las tecnologías ICI a las condiciones específicas de cada región para maximizar su efectividad y minimizar los riesgos.

La construcción de infraestructuras robustas debe estar diseñadas para soportar la variabilidad climática extremas de la localidad, utilizando materiales de alta resistencia y sistemas de soporte que permitan enfrentar las condiciones climáticas límite y, así, evitar pérdidas por daños estructurales. Una infraestructura adecuada no solo previene problemas operativos, sino que también reduce los costos de mantenimiento y reparación a largo plazo y asegura la durabilidad de las estructuras. Finalmente, una gestión financiera rigurosa y la implementación de sistemas de monitoreo de costos operativos y de mantenimiento son esenciales para asegurar la viabilidad económica a largo plazo. La gestión financiera eficiente permite a los productores evaluar y ajustar sus estrategias operativas, optimizando el uso de recursos y mejorando la rentabilidad. Además de los análisis de clima, el diseño estructural debe considerar los estudios topográficos y de impacto ambiental, lo que puede prevenir problemas operativos y reducir costos de largo plazo.

La capacitación continua y el soporte técnico resultan fundamentales para maximizar los beneficios de las tecnologías de los ICI, ya que, sin la formación técnica adecuada, los productores no podrán gestionar eficazmente las herramientas tecnológicas, lo que limitaría el impacto positivo de los ICI. La implementación de programas de formación técnica en colaboración con instituciones académicas y centros de investigación, contribuirían a mejorar las competencias de los productores y permitir una gestión más eficiente de los recursos, para maximizar la productividad de los cultivos bajo invernaderos. La capacitación técnica y operativa de los ICI es fundamental para reducir la incertidumbre en la toma de decisiones y optimizar el uso de recursos disponibles. Los patrones comunes identificados incluyen la necesidad de una validación técnica rigurosa y una capacitación continua con la participación de los productores durante el proceso de validación, implementación y evaluación del proyecto, para asegurar que las tecnologías adoptadas sean pertinentes y efectivas en contextos específicos. La generación de proyectos con decisiones derivadas únicamente del criterio profesional institucional podría reducir apreciablemente la probabilidad de éxito de los proyectos ICI, al no considerar la experiencia y aspectos socioculturales de los productores. En los proyectos con ICI, la implementación

de estrategias de mercadeo enfocadas a nichos de mercado con alto valor agregado junto a la diferenciación de productos con certificaciones de prácticas sostenibles, con menor carga de agroquímicos y de alta calidad, pueden mejorar significativamente la competitividad y mejorar el posicionamiento en los mercados nacionales e internacionales, proporcionando un valor agregado que atraiga a consumidores conscientes del medio ambiente y la salud. Esto contribuye a mejorar la sostenibilidad y la rentabilidad de este tipo de proyectos.

La ausencia de políticas públicas que incentiven la inversión en investigación y desarrollo (I+D), la capacitación técnica y el acceso a financiamiento limita la creación de condiciones favorables para superar los principales desafíos en la adopción de ICI. Las experiencias exitosas subrayan la relevancia de establecer alianzas estratégicas entre empresas y de fortalecer la colaboración entre los sectores público y privado. Resulta decisivo conformar un entorno político y financiero que impulse la inversión en tecnologías de ICI, entendiendo que su implementación exitosa no depende únicamente de la tecnología, sino también de un marco que promueva la innovación y la cooperación entre los distintos actores del sector agrícola.

Finalmente, una planificación financiera rigurosa y la implementación de sistemas de registros de costos operativos y de mantenimiento es indispensable para evaluar la viabilidad económica y la rentabilidad a largo plazo. La gestión financiera eficiente permite a los productores evaluar y ajustar sus estrategias operativas, optimizando el uso de recursos y mejorando la rentabilidad. Los estudios de caso han demostrado que el éxito de los proyectos ICI está directamente relacionado con una adecuada planificación financiera y el monitoreo continuo de los costos asociados con la operación y mantenimiento de las infraestructuras.

Una limitación del estudio fue la falta de datos sobre los rendimientos de los cultivos en ICI bajo condiciones del trópico costarricense. Investigaciones futuras podrían centrarse en evaluar estos sistemas a largo plazo y en diferentes regiones tropicales, integrando aspectos tecnológicos, de variabilidad agroclimática y de viabilidad técnica y financiera.

Respecto a los requerimientos agroclimáticos del cultivo y la justificación técnica para implementar ICI, es importante reconocer que cada cultivo hortícola presenta necesidades específicas de temperatura, humedad relativa, radiación y fotoperíodo. En zonas tropicales, las variaciones climáticas bruscas pueden afectar de manera significativa la fisiología de las plantas, incidiendo en procesos como la fotosíntesis, la floración, el cuajado de frutos, la sanidad vegetal y, en consecuencia, el rendimiento y la calidad del producto.

Por ejemplo, en Zarcero se han registrado temperaturas nocturnas cercanas a 10 °C, combinadas con alta humedad, condiciones que favorecen enfermedades como el mildiu. Ante este contexto, un ICI debe responder mediante sistemas automáticos de control de ventilación, calefacción o sombreado inteligente, con el fin de mantener un ambiente radicular y aéreo óptimo para el desarrollo del cultivo.

Esta secuencia de pasos se sintetiza en la Fig. 2, que ilustra la ruta técnica para la adopción efectiva de ICI basada en los requerimientos agroclimáticos y fisiológicos del cultivo.

El esquema inicia con la identificación de los factores agroclimáticos y las limitaciones fisiológicas del cultivo a campo abierto, continúa con un diagnóstico específico de las necesidades agronómicas y climáticas; asimismo,

avanza hacia el diseño y configuración de tecnologías inteligentes que permitan optimizar el ambiente radicular y aéreo. Posteriormente, se plantea la validación experimental con genotipos adaptados, complementada con capacitación técnica y acompañamiento financiero, culminando en una adopción gradual y sostenible del ICI por parte del productor.



Fig. 2. Ruta técnica para la adopción efectiva de ICI basada en requerimientos agroclimáticos y fisiológicos del cultivo.

En cuanto a las necesidades de los productores para la implementación de ICI, persisten desafíos asociados al mantenimiento de condiciones estables dentro del invernadero, lo cual influye directamente en el desarrollo radicular y foliar. La incorporación de sensores de humedad de sustrato, temperatura y radiación solar posibilita el ajuste automatizado del riego, el sombreado y la nebulización, contribuyendo a reducir el estrés fisiológico. No obstante, la adopción de estas tecnologías requiere estudios previos de compatibilidad agroclimática y validación experimental con variedades adaptadas a las condiciones tropicales locales.

La validación agronómica de genotipos adecuados resulta esencial. Para ello, se recomienda la realización de estudios

piloto que evalúen distintos materiales genéticos bajo condiciones controladas en ICI y contrasten diferentes configuraciones tecnológicas (como sistemas de nebulización, ventilación forzada y riego inteligente) y su efecto en la productividad, la eficiencia en el uso del agua y la calidad del producto. Estos resultados constituirán insumos clave para la toma de decisiones técnicas y la formulación de políticas públicas.

En la Fig. 3, se sintetizan los componentes estratégicos que integran estas acciones, articulando la caracterización agroclimática, el diseño y configuración de tecnologías, la validación experimental y las estrategias de capacitación y financiamiento para una adopción eficiente y sostenible de ICI en zonas tropicales.

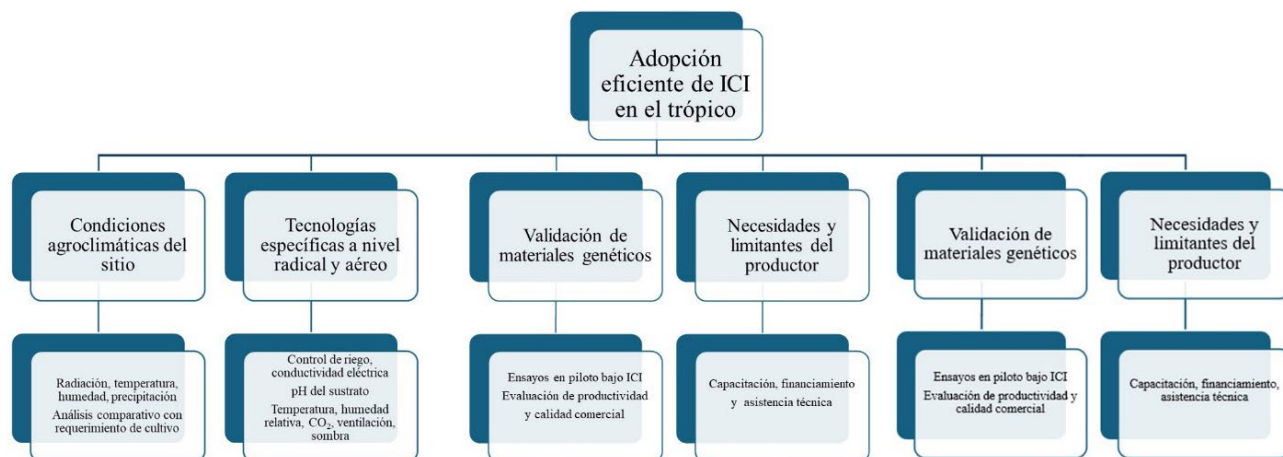


Fig. 3. Componentes estratégicos para la adopción eficiente de invernaderos climáticamente inteligentes (ICI) en zonas tropicales.

#### IV. CONCLUSIONES

La adopción de ICI en Costa Rica representa una solución integral y una oportunidad clave para mejorar la sostenibilidad, eficiencia y resiliencia de la agricultura protegida. Sin embargo, para un proceso exitoso, se requiere un enfoque integral que abarque aspectos técnicos y agronómicos de los cultivos, financieros y de mercado, priorizando en la capacitación técnica, fortalecimiento de las políticas públicas y las alianzas estratégicas entre los sectores público, académico y privado.

Como parte del estudio técnico, los estudios agroclimáticos detallados son fundamentales para garantizar que las infraestructuras y sus tecnologías asociadas se adapten a las condiciones locales, minimizando los riesgos y optimizando el uso de recursos. Paralelamente, la capacitación técnica continua y la validación de materiales genéticos juegan un papel central en la implementación de los ICI, ya que asegura que los productores cuenten con las competencias necesarias para manejar eficientemente las tecnologías y maximizar la productividad.

Las estrategias de mercadeo que promueven la diferenciación de productos, como las certificaciones de prácticas sostenibles, permiten acceder a nichos de mercado con alto valor agregado

que asegura la competitividad y rentabilidad de los proyectos. Desde un punto de vista financiero, una planificación rigurosa y un monitoreo continuo de costos operativos son esenciales para asegurar la viabilidad económica a largo plazo.

Finalmente, la creación de políticas públicas favorables y las alianzas estratégicas entre el sector público y privado son indispensables para superar los obstáculos relacionados con la falta de inversión en investigación y desarrollo, así como para fomentar un entorno propicio que apoye la innovación y adopción de tecnologías avanzadas en la agricultura costarricense.

#### V. IMPLICACIONES PRÁCTICAS

Para facilitar la adopción efectiva de ICI en la agricultura costarricense, se recomienda implementar un enfoque integral que aborde las dimensiones técnicas, económicas y políticas del proceso. A continuación, se presentan las recomendaciones específicas, sintetizadas y ordenadas lógicamente.

A partir del análisis, se proponen estrategias concretas que pueden guiar la implementación efectiva de ICI en zonas tropicales, considerando acciones clave en diversas áreas de intervención (CUADRO VI).

CUADRO VI  
ESTRATEGIAS PROPUESTAS PARA FACILITAR LA ADOPCIÓN DE ICI EN COSTA RICA.

Área de intervención	Estrategias propuestas
Tecnología	Validación agronómica local, desarrollo de soluciones adaptadas al trópico
Formación y capacitación	Programas continuos de formación técnica, pasantías y talleres prácticos
Financiamiento	Subvenciones estatales, créditos con tasas preferenciales, fondos concursables
Política pública	Incentivos fiscales, regulación sobre infraestructura, inclusión en agendas nacionales
Articulación institucional	Proyectos colaborativos universidad-sector privado-MAG, clústeres de innovación

### A. Capacitación técnica y operativa continua

Se recomienda desarrollar programas de capacitación técnica continua para los productores, centrados en el uso y mantenimiento de las tecnologías avanzadas de los ICI, como el control climático automatizado, la fertirrigación y el manejo integrado de plagas. Esta capacitación debe adaptarse a las condiciones locales y ser ofrecida por centros de investigación y universidades, en colaboración con el sector privado, para asegurar una implementación eficaz y sostenible a largo plazo.

### B. Acceso a financiamiento asequible

Para facilitar la adopción de los ICI, se debe promover el acceso a financiamiento favorable a través de alianzas con entidades financieras que ofrezcan condiciones atractivas, como tasas de interés reducidas y plazos de pago flexibles. Asimismo, es crucial la implementación de incentivos fiscales y subsidios que disminuyan los costos iniciales de inversión en infraestructura y tecnología, lo cual favorecería tanto a pequeños como a medianos productores.

### C. Desarrollo de políticas públicas de apoyo

Resulta fundamental que el gobierno establezca políticas claras y coherentes que impulsen la adopción de tecnologías ICI. Estas políticas deben contemplar marcos regulatorios que fomenten la investigación y el desarrollo de tecnologías agrícolas avanzadas, así como incentivos económicos que estimulen a los productores a implementarlas. La colaboración público-privada se vuelve un pilar esencial para crear un entorno propicio que favorezca tanto la inversión como la adopción efectiva de los ICI.

### D. Fortalecimiento de la infraestructura para los ICI

Se debe invertir en infraestructura robusta y adecuada para los ICI, adaptada a las condiciones locales del trópico costarricense. Esto incluye la implementación de sistemas de control climático, riego automatizado y manejo integrado de plagas. Además, se debe priorizar el uso de energías renovables para mejorar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental de las instalaciones.

### E. Realización de estudios de mercado exhaustivos

Para asegurar la viabilidad económica de los cultivos en ICI, es crucial realizar estudios de mercado que identifiquen cultivos de alto valor agregado, tanto para mercados nacionales como internacionales. Estos deben considerar las tendencias del mercado, las condiciones agroclimáticas locales y las preferencias de los consumidores, lo que permitirá desarrollar estrategias de comercialización sólidas que garanticen la rentabilidad y sostenibilidad de las empresas agrícolas.

### F. Fomento a la innovación y desarrollo tecnológico

La creación de centros de investigación especializados en invernaderos inteligentes, en colaboración con universidades y el sector privado, es clave para impulsar la innovación tecnológica. Estos centros deben enfocarse en adaptar y mejorar las tecnologías existentes para las condiciones locales, que promuevan la reducción de costos operativos y la optimización de la producción agrícola a través de la investigación y el desarrollo continuo.

### G. Implementación de estudios agroclimáticos detallados

Los estudios agroclimáticos exhaustivos son esenciales para determinar las condiciones específicas de cada región donde se planea implementar ICI. Estos estudios deben incluir variables como temperatura, humedad, radiación solar y patrones de precipitación, lo que permitirá seleccionar materiales genéticos adecuados y diseñar sistemas de control climático que optimicen las condiciones del cultivo y maximicen la producción.

### H. Gestión financiera rigurosa

Se debe implementar un sistema de gestión financiera que monitoree de manera continua los costos operativos y de mantenimiento de los ICI, permitiendo a los productores ajustar sus estrategias operativas para mejorar la rentabilidad. La planificación financiera rigurosa permitirá optimizar el uso de recursos, lo que es esencial para garantizar la sostenibilidad económica a largo plazo de los proyectos agrícolas.

### I. Desarrollo de estrategias de mercadeo efectivas

Para mejorar la competitividad de los productos cultivados en ICI, es importante desarrollar estrategias de mercadeo que resalten sus beneficios ambientales y de salud. La diferenciación de productos mediante certificaciones de sostenibilidad puede aumentar su valor de mercado, atrayendo a consumidores conscientes del medio ambiente y de la calidad del producto. Estas tácticas también deben promover alianzas con grandes cadenas de distribución y supermercados para asegurar una demanda constante y estable.

## AGRADECIMIENTOS

Esta contribución fue posible gracias al apoyo del Instituto Avanzado de Ciencia y Tecnología de Corea (KAIST) – Centro de Comercialización Global. El proyecto abordó la iniciativa “Aprovechamiento de tecnologías para apoyar al gobierno de Costa Rica en el desarrollo de una estrategia de invernadero inteligente y comercialización climáticamente inteligente”, financiado por el Banco Centroamericano de Integración Económica (BCIE). Shinhan A TEC (Corea) desempeñó un papel crucial como proveedor de tecnología responsable, supervisando los aspectos generales, con contribuciones académicas de KAIST y la UCR.

Agradecemos a todas las partes involucradas por su colaboración y apoyo a lo largo de este proyecto.

#### ROLES DE LAS PERSONAS AUTORAS

José Francisco Aguilar Pereira: Conceptualización, Adquisición de fondos, Administración del proyecto, Recursos, Supervisión, Investigación, Validación, Visualización, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición.

Freddy Soto-Bravo: Conceptualización, Supervisión, Investigación, Validación, Visualización, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición.

Prayag L Yadav: Conceptualización, Supervisión, Validación.

Jong Heung Park: Conceptualización, Supervisión, Validación.

Diana Oviedo: Conceptualización, Redacción – revisión y edición.

#### REFERENCIAS

- [1] R. Ruben y F. Saenz-Segura, “Farmers, Markets and Contracts: Chain Integration of Smallholder Producers in Costa Rica”, *European Review of Latin American and Caribbean Studies*, no. 85, pp. 61-80, oct. 2008, doi:10.18352/ER-LACS.9619.
- [2] H. A. AL-agele, L. Nackley y C. W. Higgins, “A Pathway for Sustainable Agriculture”, *Sustainability*, vol. 13, no. 8, Art. no. 4328, abr. 2021, doi: 10.3390/su13084328.
- [3] FAO, ONU, Roma, Italia. *Climate-smart agriculture sourcebook*. (2013). [En línea]. Disponible en: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/b21f2087-f398-4718-8461-b92afc82e617/content>
- [4] C. Bersani, A. Ouammi, R. Sacile, A. Soussi y E. Zero, “Model predictive control of Smart Greenhouses as the path towards near zero energy consumption”, *Energies*, vol. 13, no. 14, Art. no. 3647, jul. 2020, doi: 10.3390/en13143647.
- [5] G. van Straten, G. van Willigenburg, E. van Henten y R. van Ooteghem, *Optimal Control of Greenhouse Cultivation*. Boca Ratón, FL, Estados Unidos: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011, doi: 10.1201/b10321.
- [6] [6] C. Bersani, C. Ruggiero, R. Sacile, A. Soussi y E. Zero, “Internet of Things Approaches for Monitoring and Control of Smart Greenhouses in Industry 4.0”, *Energies*, vol. 15, no. 10, Art. no. 3834, may. 2022, doi: 10.3390/en15103834/en15103834.
- [7] N. Chamhuri, A. Hamid y M. H. Ismail, “Automated irrigation and fertilization for efficient greenhouse management”, *Journal of Agricultural Engineering*, vol. 42, no. 1, pp. 55-68, 2016.
- [8] Y. Li, L. Wang y H. Zhang, “Energy-efficient management in automated greenhouse systems: Insights from control optimization”, *Energy Build*, vol. 8, no. 7, pp. 123-130, 2019.
- [9] I. A. García Torres, R. E. Castillo León, W. R. Navas Espín y J. G. Veintimilla Andrade, “El Uso de la Inteligencia Artificial en un Invernadero”, *Ciencia Latina. Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 8, no. 4, pp. 910-930, ago. 2024, doi: 10.37811/cl\_rcm.v8i4.12331.
- [10] M. Rosas Leutenegger y P. Villasana López, “Adopción de tecnologías en sistemas de producción agroalimentario: una revisión de literatura”, *RIVAR*, vol. 9, no. 26, may. 2022, doi: <https://doi.org/10.35588/rivar.v9i26.5579>.
- [11] S. E. Luna Arauz, A. A. Andrade Vallejo, P. Guevara López y J. E. Rubiñoz Panta, “Supervisión de temperatura y humedad para el cálculo de balance energético en un invernadero con tiempos de muestreo obtenidos de forma experimental”, *Pistas Educativas*, vol. 39, no. 18, pp. 1014-1027, feb. 2018. [En línea]. Disponible en: <https://pistaseducativas.celaya.tecnm.mx/index.php/pistas/article/view/1178>
- [12] A. Kavga, V. Thomopoulos, P. Barouchas, N. Stefanakis y A. Liopa-Tsakalidi, “Research on innovative training on smart greenhouse technologies for economic and environmental sustainability”, *Sustainability*, vol. 13, no. 19, oct. 2021, doi: 10.3390/su131910536.
- [13] J. Lee, “Farmer participation in a climate-smart future: Evidence from the Kenya agricultural carbon market project”, *Land Use Policy*, vol. 68, pp. 72–79, nov. 2017, doi: 10.1016/j.landusepol.2017.07.020.
- [14] A. Khatri-Chhetri, P. K. Aggarwal, P. K. Joshi y S. Vyas, “Farmers’ prioritization of climate-smart agriculture (CSA) technologies”, *Agric. Syst.*, vol. 151, pp. 184-191, feb. 2017, doi: 10.1016/j.agsy.2016.10.005.
- [15] G. Cevikbilen, “Slope Stability of Soils”, en *Handbook of Research on Trends and Digital Advances in Engineering Geology*, N. Ceryan, Ed. Hershey, PA, Estados Unidos: IGI Global Scientific Publishing, 2018, pp. 380-415, doi: 10.4018/978-1-5225-2709-1.ch011.
- [16] FAO, ONU, Roma, Italia. *Leveraging COVID-19 recovery strategies to build climate-smart agrifood systems in developing countries*. (2022). [En línea]. Disponible en: <https://openknowledge.fao.org/items/8b0a381a-3478-4178-9cad-304b04b2e22a>
- [17] D. B. Lobell, G. L. Hammer, G. McLean, C. Messina, M. J. Roberts y W. Schlenker, “The impact of climate variability on global crop yields”, *Nat. Clim. Chang.*, vol. 8, no. 7, pp. 600-606, 2018.
- [18] E. J. van Henten et al., “An autonomous robot for harvesting cucumbers in greenhouses”, *Auton. Robots*, vol. 13, no. 3, pp. 241-258, 2002, doi: 10.1023/A:1020568125418.
- [19] G. Bagagiolo, G. Matranga, E. Cavallo y N. Pampuro, “Greenhouse Robots: Ultimate Solutions to Improve Automation in Protected Cropping Systems—A Review”, *Sus-*

- tainability, vol. 14, no. 11, Art. no. 6436 may. 2022, doi: 10.3390/su14116436.
- [20] D. Despommier, "Vertical farming systems for urban agriculture", en *Achieving sustainable urban architecture*, J. S. C. Wiskerke, Ed. Cambridge, Reino Unido: Burleigh Dodds, 2020, pp. 143-172, doi: 10.19103/as.2019.0063.10.
- [21] J. Pretty et al., "Global assessment of agricultural system redesign for sustainable intensification", *Nat. Sustain.*, vol. 1, no. 8, pp. 441-446, ago. 2018, doi: 10.1038/s41893-018-0114-0.
- [22] R. R. Shamshiri et al., "Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture", *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 1-22, 2018, doi: 10.25165/j.ijabe.20181101.3210.
- [23] I. A. García Torres, R. E. Castillo León, W. R. Navas Espín y J. G. Veintimilla Andrade, "El Uso de la Inteligencia Artificial en un Invernadero," *Ciencia Latina. Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 8, no. 4, pp. 910-930, ago. 2024, doi: 10.37811/cl\_rcm.v8i4.12331.
- [24] J. A. Valenciano et al., "Financing systems in rural agricultural chains: an unsuccessful case in producing cucumbers in Zarcero, Costa Rica", *Revista ABRA*, vol. 33, no. 46, pp. 13-29, oct. 2013. [En línea]. Disponible en: <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/abra/article/view/5111>
- [25] J. M. Vargas Canales, M. I. Palacios Rangel, J. H. Camacho Vera, J. Aguilar Ávila y J. G. Ocampo Ledesma, "Factores de innovación en agricultura protegida en la región de Tulancingo, México", *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 6, no. 4, pp. 826-840, may. 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/2631/263138102013.pdf>