

GEMELOS DIGITALES Y GESTIÓN ENERGÉTICA EN INVERNADEROS: REVISIÓN CRÍTICA Y PERSPECTIVA DE ADOPCIÓN EN MÉXICO

Cristian González Ruiz ^a, Araceli Guadalupe Romero Izquierdo ^a,
Fernando Israel Gómez Castro ^b, Marcela Vargas Hernández ^a, Oscar
Daniel Lara Montaña ^{a,*}

^a Universidad Autónoma de Querétaro, Carretera Amealco Atemascalcingo Km 1, Centro,
Amealco de Bonfil, Querétaro, 76850, México. od.laramontano@gmail.com

^b Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Guanajuato, Noria Alta s/n,
Guanajuato, Guanajuato, 36050, México.

Resumen

La agricultura protegida en México supera las 77,000 hectáreas, pero enfrenta costos energéticos que representan entre el 20% y el 40% de los gastos de producción. Este trabajo presenta una revisión narrativa crítica de la literatura científica y tecnológica sobre gemelos digitales aplicados a invernaderos, con énfasis en su potencial para la gestión energética. Se examina la evidencia internacional disponible (proveniente principalmente de Europa) con el propósito de evaluar las condiciones, oportunidades y barreras que condicionarían la adopción de esta tecnología en el contexto mexicano. En los casos documentados, los ahorros energéticos reportados oscilan entre el 5% y el 25%, aunque estos valores corresponden a invernaderos con alto nivel de digitalización y condiciones operativas que difieren sustancialmente del promedio mexicano. Se concluye que, si bien el gemelo digital constituye una herramienta con potencial para optimizar la gestión energética en invernaderos, su adopción en México dependerá de inversiones en infraestructura de sensorización, programas de capacitación técnica y colaboración entre universidades y productores. El trabajo reconoce como limitaciones el predominio de evidencia internacional, la diversidad de las fuentes consultadas y la escasez de estudios mexicanos de validación directa.

Palabras clave: gemelo digital; invernaderos; gestión energética; inteligencia artificial; agricultura protegida.

DIGITAL TWINS AND ENERGY MANAGEMENT IN GREENHOUSES: A CRITICAL REVIEW AND ADOPTION PERSPECTIVE FOR MEXICO

Abstract

Protected agriculture in Mexico exceeds 77,000 hectares, yet energy costs account for 20–40% of production expenses. This paper presents a critical narrative review of scientific and technological literature on digital twins applied to greenhouses, with emphasis on their potential for energy management. International evidence (primarily from Europe) is examined to assess adoption conditions, opportunities, and barriers within the Mexican context. In the documented cases, reported energy savings range from 5% to 25%, although these values correspond to greenhouses with high digitalization levels and operating conditions that differ substantially from the Mexican average. It is concluded that, while digital twins constitute a tool with potential for optimizing greenhouse energy management, their adoption in Mexico will depend on investments in sensor infrastructure, technical training programs, and university–producer collaboration. The study acknowledges as limitations the predominance of international evidence, the diversity of consulted sources, and the scarcity of direct validation studies from Mexico.

Keywords: digital twin; greenhouses; energy management; artificial intelligence; protected agriculture.

1. Introducción

La producción agrícola bajo ambiente controlado ofrece ventajas documentadas: regulación climática, reducción en el uso de agroquímicos y rendimientos que pueden triplicar los del cultivo a campo abierto (INEGI, 2023). Sin embargo, el mantenimiento de condiciones ambientales estables dentro de un invernadero implica un consumo energético considerable. Estimaciones internacionales indican que los gastos en climatización, calefacción e iluminación pueden representar hasta el 50% de los costos totales de producción, mientras que los sistemas de calefacción y enfriamiento concentran entre el 65% y el 85% de la demanda energética primaria de estas instalaciones (Ntinas y col., 2023). En contextos de clima frío, el gasto en calefacción puede superar el 90% de los costos operativos durante la temporada invernal (Wang y col., 2025).

En México, de acuerdo con el Censo Agropecuario 2022, la superficie bajo agricultura protegida supera las 77,000 hectáreas, distribuidas en más de 30,000 unidades de producción (INEGI, 2023). El sector ha experimentado un crecimiento notable: en 2007 se estimaban apenas 2,000 hectáreas, y hoy el jitomate concentra el 35%

de la superficie sembrada y genera el 62% del volumen de producción nacional de esta hortaliza (Imagen Agropecuaria, 2023). No obstante, los productores enfrentan costos energéticos que oscilan entre el 20% y el 40% del costo total de producción, dependiendo del nivel tecnológico y la región; además, se ha estimado que una desviación de un grado centígrado en la temperatura de referencia puede incrementar el consumo energético en un 10% (Salazar-Moreno y col., 2012).

En este escenario, el gemelo digital (digital twin) ha comenzado a explorarse en la literatura como una herramienta que podría contribuir a la optimización energética en sistemas de ambiente controlado. De manera intuitiva, un gemelo digital puede entenderse como una copia virtual del invernadero que reside en una computadora: recibe en tiempo real los datos de los sensores instalados en la instalación física (temperatura, humedad, radiación, concentración de CO₂) y, al reflejar con fidelidad lo que ocurre en el invernadero real, permite ensayar decisiones operativas, por ejemplo, adelantar la ventilación o apagar la calefacción, y anticipar su efecto sin necesidad de probarlas sobre el cultivo. En términos más formales, consiste en una representación virtual dinámica del invernadero, alimentada con datos en tiempo

real provenientes de sensores y asistida por algoritmos de inteligencia artificial, que permite simular escenarios y apoyar la toma de decisiones operativas. Originado en la industria aeroespacial y manufacturera, su aplicación en invernaderos ha comenzado a documentarse en los últimos años, con reportes que sugieren ahorros energéticos de entre el 5% y el 25% en casos específicos con alta madurez digital (Ma y col., 2021; GreenTech, 2024).

No obstante, la evidencia disponible proviene predominantemente de experiencias europeas, en invernaderos con niveles de digitalización superiores al promedio mexicano. Se identifica un vacío en la literatura respecto al análisis de las condiciones bajo las cuales esta tecnología podría adaptarse al contexto productivo de México, considerando su diversidad tecnológica, sus particularidades climáticas y sus restricciones económicas y formativas.

El objetivo de este artículo es examinar críticamente la literatura científica y tecnológica sobre gemelos digitales aplicados a invernaderos, analizar su potencial para la gestión energética, y discutir las condiciones, límites y oportunidades de adopción en México. El trabajo se presenta como una revisión narrativa crítica con enfoque

prospectivo, organizada en cuatro secciones: fundamentación teórica y metodología, resultados y discusión, prospectiva y conclusiones.

2. Fundamentación teórica y metodología

2.1. El concepto de gemelo digital

El término gemelo digital designa una representación virtual dinámica de un sistema físico que cumple, al menos, cuatro condiciones: (a) sincronización continua con datos del activo físico, (b) actualización operativa conforme cambian las condiciones reales, (c) capacidad analítica o predictiva, y (d) generación de información útil para la toma de decisiones (Ariesen-Verschuur y col., 2022). Conviene distinguir este concepto del monitoreo (registro sin modelado), la automatización (reglas sin predicción), la simulación (escenarios sin sincronización en tiempo real) y la inteligencia artificial aplicada al clima (sin representación virtual integrada). En la práctica, muchos desarrollos descritos en la literatura no cumplen plenamente estas condiciones y se ubican en un continuo entre monitoreo avanzado, modelado predictivo y gemelo digital propiamente dicho.

Resulta especialmente importante distinguir

el gemelo digital de la inteligencia artificial por sí sola. Un modelo de inteligencia artificial, por ejemplo una red neuronal entrenada con registros históricos, puede predecir la demanda energética del invernadero o recomendar una consigna de temperatura, pero lo hace sin mantener una representación virtual permanente de la instalación física y sin actualizarse de manera automática cuando cambian las condiciones reales (rotación de cultivo, deterioro de la cubierta, variación estacional). El gemelo digital, en cambio, incorpora estos algoritmos de inteligencia artificial como una de sus componentes, específicamente en la capa de decisión, pero los articula con una copia

virtual sincronizada del invernadero y con mecanismos de asimilación continua de datos que mantienen la fidelidad de la representación. Dicho de otro modo, la inteligencia artificial es una condición necesaria pero no suficiente: un gemelo digital la utiliza, sin agotarse en ella.

La revisión de Ariesen-Verschuur y col. (2022) identificó que los gemelos digitales aplicados a horticultura se encuentran en etapas tempranas de desarrollo, con un crecimiento acelerado en las publicaciones científico-tecnológicas desde 2019.

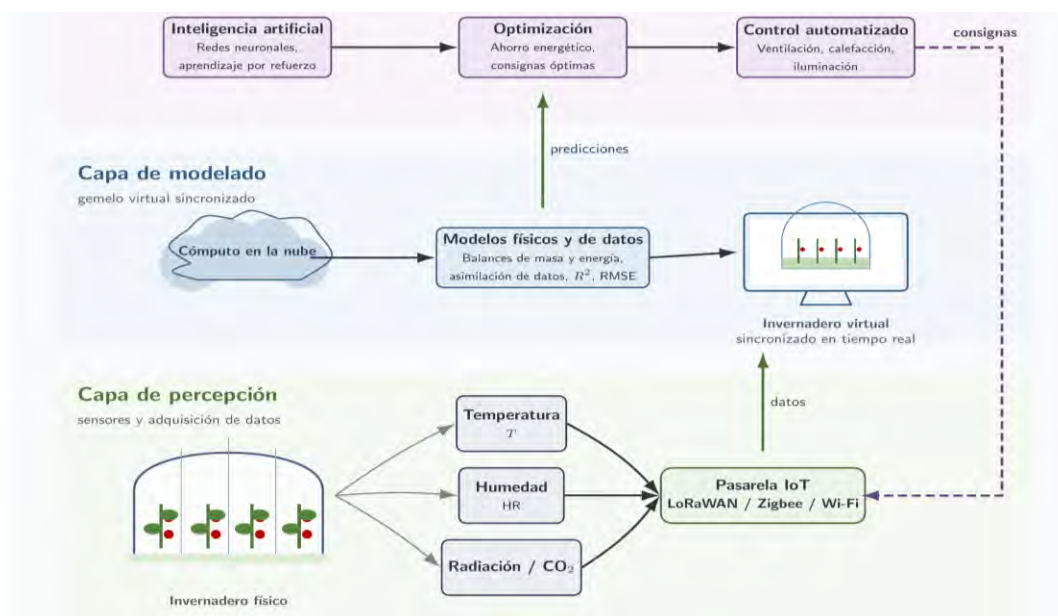


Figura 1. Arquitectura de un gemelo digital aplicado a invernaderos.

En la práctica, un gemelo digital aplicado a invernaderos opera mediante tres capas interconectadas (Figura 1). La primera es la capa de percepción: sensores distribuidos que miden variables como temperatura, humedad relativa, radiación solar, concentración de CO₂ y consumo eléctrico, conectados mediante protocolos del Internet de las Cosas (IoT) como LoRaWAN o Zigbee. Los avances en sensores de bajo costo han reducido las barreras de entrada para esta capa, incluso en invernaderos de mediana tecnología (Katzin y col., 2022; Slimani y col., 2025).

La segunda es la capa de modelado: ecuaciones matemáticas y algoritmos que representan los procesos físicos del invernadero, incluyendo la transferencia de calor a través de la cubierta, la transpiración vegetal, la dinámica del aire interior y el intercambio de humedad con el ambiente exterior. Katzin y col. (2022) documentaron la genealogía de más de 60 modelos climáticos de invernadero publicados entre 1985 y 2021. Lo distintivo del gemelo digital es que estos modelos se ajustan continuamente con datos de los sensores mediante un proceso de asimilación de datos, lo cual mantiene la fidelidad de la representación virtual.

La tercera es la capa de decisión, donde el gemelo digital funciona como herramienta predictiva. Mediante algoritmos de inteligencia artificial, el sistema puede simular escenarios futuros y sugerir estrategias que equilibren el ahorro energético con las condiciones óptimas del cultivo (Ma y col., 2021). Las técnicas empleadas incluyen redes neuronales artificiales, algoritmos genéticos y aprendizaje por refuerzo (Platero-Horcajadas y col., 2024). Esta capacidad de anticipación constituye la diferencia funcional respecto a un sistema de control convencional: mientras un controlador reactivo responde a desviaciones ya ocurridas, un gemelo digital puede prever cambios en las condiciones climáticas y programar los sistemas de climatización con antelación, lo que podría reducir los picos de consumo energético.

La validación de un gemelo digital implica comparar sus predicciones con mediciones reales del invernadero, empleando métricas como el error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de determinación (R^2). En la literatura revisada, se considera funcional un gemelo digital cuyo error de predicción de temperatura se mantiene por debajo de 1-2 °C y cuya estimación de consumo energético no difiere más de un 5-10% del valor real. La

calibración periódica resulta necesaria conforme cambian las estaciones, los cultivos y los materiales de cubierta.

2.2. Inteligencia artificial aplicada al control climático

Dentro de la capa de decisión, diversas técnicas de inteligencia artificial desempeñan un papel central. Las redes neuronales artificiales (RNA) permiten identificar patrones complejos a partir de datos históricos del invernadero. Una RNA entrenada con registros de temperatura, humedad, radiación solar y consumo eléctrico puede predecir, con horas de anticipación, la demanda energética bajo diferentes condiciones climáticas externas, lo que posibilita la programación anticipada de los equipos de climatización. Wang y col. (2025) confirman que la integración de redes neuronales con algoritmos de optimización constituye la tendencia predominante en el control climático de invernaderos.

El aprendizaje por refuerzo (*reinforcement learning*) representa un enfoque complementario. Un agente de inteligencia artificial aprende a tomar decisiones de control mediante ensayo y error en el entorno virtual del gemelo digital, modificando valores de referencia de ventilación,

calefacción e iluminación, y buscando un equilibrio entre condiciones ambientales adecuadas y minimización del gasto energético (Platero-Horcajadas y col., 2024). Este enfoque permite evaluar múltiples estrategias en el modelo virtual sin riesgo para el cultivo real.

La optimización basada en modelos, mediante técnicas como la programación lineal entera mixta (MILP) o algoritmos metaheurísticos, permite determinar combinaciones óptimas de variables de operación: por ejemplo, el momento de compra de energía de la red eléctrica, su almacenamiento en un búfer térmico y su utilización posterior.

Un aspecto crítico es la dependencia de datos de calidad. Un modelo de redes neuronales requiere varios meses de registros continuos con frecuencias de muestreo del orden de minutos, incluyendo variables internas (temperatura, humedad, CO₂), condiciones meteorológicas externas (irradiación, viento, temperatura) y estados de los actuadores (ventanas, calefacción, ventiladores). La ausencia de cualquiera de estas variables reduce significativamente la capacidad predictiva del modelo, lo que explica por qué la adopción de gemelos digitales avanza con mayor facilidad en invernaderos que ya

cuentan con sistemas de control automatizado.

2.3. Metodología de revisión

El presente trabajo adopta el formato de revisión narrativa crítica de la literatura sobre gemelos digitales aplicados a invernaderos, centrada en la dimensión energética. Se consultaron las bases de datos Scopus, Web of Science y Google Scholar, empleando combinaciones de términos como “*digital twin*” AND “*greenhouse*”, “*digital twin*” AND “*energy*” AND “*greenhouse*”, y “*gemelo digital*” AND “*invernadero*”. Se incluyeron de forma complementaria fuentes sectoriales (GreenTech, Priva) cuando aportaban datos cuantitativos aplicados, así como reportes institucionales de carácter ilustrativo.

Se priorizaron publicaciones del periodo 2021–2025, dado que la producción científica sobre gemelos digitales en horticultura se ha concentrado en estos años (Ariesen-Verschuur y col., 2022). Se incorporaron trabajos anteriores cuando resultaban necesarios para la fundamentación teórica o el contexto histórico mexicano.

Los resultados se organizan en tres ejes: (1) experiencias internacionales con resultados cuantitativos en gestión energética, (2)

panorama productivo y tecnológico de la agricultura protegida en México, y (3) barreras, facilitadores y oportunidades de adopción. En la valoración de la evidencia se distinguen tres niveles: evidencia principal (artículos científicos arbitrados), evidencia complementaria (reportes técnicos o sectoriales) y evidencia ilustrativa (casos corporativos o analógicos de otros sectores).

3. Resultados y discusión

3.1. Experiencias internacionales documentadas

La revisión identificó casos de implementación de gemelos digitales —o de sistemas cercanos a ese concepto— con resultados cuantitativos en la gestión energética de invernaderos y edificios con condiciones térmicas análogas. La evidencia se presenta a continuación conforme a los tres niveles definidos en la metodología.

En cuanto a evidencia científica arbitrada, Ma y col. (2021) documentan el proyecto *Greenhouse Industry 4.0* en Dinamarca, que desarrolló una plataforma de gemelo digital con IoT, inteligencia artificial y cómputo en la nube para invernaderos comerciales de plantas ornamentales. El sistema optimiza

conjuntamente producción, consumo energético y costos laborales. El sector danés consume alrededor de 4,200 TJ de energía al año, y las estimaciones del proyecto sugieren una reducción factible de entre el 5% y el 15% del consumo de fuentes no renovables (210–630 TJ anuales). Estos resultados, sin embargo, corresponden a un sector con alta madurez digital y condiciones climáticas y de mercado específicas. Por su parte, Platero-Horcajadas y col. (2024) demostraron que la combinación de sensores IoT con algoritmos de aprendizaje por refuerzo puede superar al control basado en puntos de ajuste fijos, tanto en regulación térmica como en consumo eléctrico. Kafi y col. (2025) desarrollaron un gemelo digital predictivo que integra redes neuronales profundas y XGBoost, mostrando la viabilidad de implementar estos sistemas en dispositivos con capacidad de procesamiento limitada.

Como evidencia complementaria de carácter sectorial, la empresa Priva reporta que su sistema Energy Cost Optimizer, basado en tecnología de gemelo digital, ha generado ahorros superiores al 25% en costos energéticos en invernaderos comerciales de los Países Bajos (GreenTech, 2024; Priva, 2024). El sistema gestiona la compra de

energía según precios del mercado, la almacena en un búfer térmico y opera con base en pronósticos meteorológicos. Al provenir del propio desarrollador, esta cifra debe interpretarse con las reservas propias de la evidencia comercial.

A modo de evidencia ilustrativa, la cadena IKEA digitalizó 37 tiendas en Asia Oriental conectando 7,000 puntos de datos a un gemelo digital, con una reducción reportada del 30% en el consumo de climatización (World Economic Forum, 2024). Si bien se trata de edificios comerciales y no de invernaderos, los principios de modelado térmico y ajuste dinámico presentan analogías; no obstante, la transferencia directa de estos resultados al sector agrícola requiere cautela.

Tabla 1. Comparación de experiencias internacionales con gemelos digitales.

Caso / País	Tecnología clave	Ahorro energético	Escala	Fuente
Greenhouse Industry 4.0 / Dinamarca	IoT + IA + nube	5-15%	Comercial	Ma y col. (2021)
Priva ECO / Países Bajos	Gemelo digital + búfer térmico	>25%	Comercial	GreenTech (2024)
IKEA Asia Oriental	Gemelo digital + IoT	30%	37 tiendas	World Economic Forum (2024)
IoT + RL / España	Aprendizaje por refuerzo	Supera control fijo	Piloto	Platero-Horcajadas y col. (2024)
PGDT / Qatar	DNN + XGBoost + IoT	Predicción de rendimiento	Investigación	Kafi y col. (2025)

La Tabla 1 sintetiza las experiencias identificadas. Conviene destacar dos observaciones transversales. Primera: los ahorros reportados no provienen de intervenciones aisladas, sino de la integración de múltiples optimizaciones (encendido de equipos, ciclos de ventilación, consignas nocturnas, gestión de almacenamiento térmico). Segunda: la magnitud de los ahorros varía según el nivel tecnológico previo, las condiciones climáticas, el tipo de cultivo y el nivel de evidencia de la fuente, lo cual limita la generalización a otros contextos. En particular, los porcentajes de ahorro más elevados (>25%) provienen de fuentes complementarias o ilustrativas, mientras que

la evidencia arbitrada reporta rangos más moderados o métricas de desempeño relativas.

3.2. El panorama mexicano: infraestructura productiva y brecha digital

La Figura 2 ilustra un invernadero tecnificado con sensores ambientales, ventilación forzada, inyección de CO₂ y panel de monitoreo. Sin embargo, en México este nivel de instrumentación no es representativo de la mayoría de las unidades productivas. De las más de 77,000 hectáreas bajo agricultura protegida, los invernaderos representan el 28% de la superficie, seguidos por la malla sombra (28%), el macrotúnel (20%) y la casa

sombra (10%) (Imagen Agropecuaria, 2023).



Figura 2. Invernadero tecnificado con sensores de temperatura, humedad y CO₂ integrados a un panel de monitoreo.

El panorama tecnológico presenta una marcada dualidad. Los invernaderos de alta tecnología, concentrados en estados como Sinaloa, Baja California y Jalisco, logran rendimientos elevados, pero dependen de sistemas de calefacción, ventilación forzada e iluminación suplementaria con alto consumo energético, donde los costos de energía representan entre el 20% y el 40% de los costos totales de producción (Salazar-Moreno y col., 2012). En el otro extremo, los invernaderos de baja y media tecnología, frecuentes en el centro y sur del país, carecen en muchos casos de instrumentación básica, lo que dificulta cualquier estrategia de optimización basada en datos. La evidencia disponible sugiere que el nivel de desarrollo

digital estatal se correlaciona con la competitividad de las unidades de producción (López-Bedolla, 2025).

Esta disparidad tiene implicaciones directas para cualquier estrategia de adopción de gemelos digitales, que difícilmente sería uniforme. Los invernaderos de exportación con alta tecnología presentan las condiciones previas más favorables: disponen de sensorización multiparamétrica, controladores automatizados y conectividad operativa, lo que les permite generar los flujos de datos que un gemelo digital requiere para su funcionamiento. Además, su escala productiva y sus márgenes de operación les otorgan mayor capacidad para absorber los

costos de integración tecnológica. Las variables energéticas prioritarias para este segmento serían la demanda de calefacción, el consumo de ventilación forzada y la gestión de picos eléctricos, que concentran el mayor gasto operativo. En contraste, las pequeñas y medianas unidades, que representan la mayoría numérica, carecen en general del umbral mínimo de digitalización (sensorización continua, registro automatizado de datos, conectividad interna) que haría viable un gemelo digital, por lo que quedarían fuera de cualquier escenario de adopción en el corto plazo.

Tres factores podrían favorecer, bajo ciertas condiciones, una adopción gradual: la reducción sostenida de costos de sensores, la disponibilidad de cómputo en la nube y las altas tasas de irradiación solar del país (entre 4.5 y 6.5 kWh/m²/día (SENER, 2023)), que abren la posibilidad de vincular gemelos digitales con generación distribuida de energía renovable. No obstante, la barrera formativa sigue siendo considerable: la brecha no es sólo de equipamiento sino de competencias técnicas para interpretar datos y traducirlos en decisiones de manejo. En síntesis, una estrategia de adopción realista debería concentrar los esfuerzos iniciales en los invernaderos de exportación de Sinaloa,

Baja California y Jalisco (donde ya existen la infraestructura digital y los márgenes económicos necesarios), y postergar la extensión al resto del sector hasta que los costos de sensorización y los programas de formación técnica reduzcan la brecha actual.

3.3. Barreras y facilitadores para la adopción

El análisis conjunto de la evidencia internacional y del panorama mexicano permite identificar un conjunto de barreras y facilitadores para la adopción de gemelos digitales en invernaderos del país.

Entre las barreras destacan: (a) las limitaciones de conectividad en zonas rurales, si bien datos del IFT-SADER (2022) indican que el 97% de las unidades en agricultura protegida cuenta con cobertura móvil (3G o 4G), lo que sugiere que la restricción podría estar menos en las telecomunicaciones externas que en la infraestructura digital interna del invernadero; (b) la ausencia de estándares de interoperabilidad entre equipos de distintos fabricantes, lo que genera dependencia de proveedores específicos; (c) la falta de bases de datos climáticas locales con resolución suficiente para alimentar los modelos; (d) los costos de inversión inicial, que podrían resultar prohibitivos para pequeños y medianos productores; y (e) la

percepción por parte de algunos productores de que la tecnología digital es innecesariamente compleja.

Entre los facilitadores se identifican: el interés creciente de gobiernos estatales por la modernización agrícola (Guanajuato, por ejemplo, incrementó en 2026 su presupuesto para el campo en un 108% con énfasis en tecnificación; Gobierno del Estado de Guanajuato, 2025), la disponibilidad de plataformas de cómputo en la nube, el ecosistema de empresas agrotecnológicas en México, y la presencia de universidades con capacidad de investigación aplicada. Estas instituciones podrían contribuir mediante el desarrollo de prototipos a escala piloto con resultados documentados, aunque su impacto dependería de la articulación efectiva con el sector productivo.

3.4. Integración con energías renovables: una oportunidad condicionada

Un aspecto que merece consideración es la posible integración del gemelo digital con sistemas de generación de energía renovable. En estados con alta concentración de invernaderos, como Querétaro, Jalisco y Guanajuato, las condiciones de irradiación solar favorecen la instalación de sistemas fotovoltaicos (SENER, 2023). En principio,

un gemelo digital podría operar como sistema de gestión de un esquema híbrido que combine red eléctrica, paneles solares y almacenamiento, seleccionando en cada periodo la fuente que minimice costos y emisiones.

Este enfoque ha sido explorado en Europa. En los Países Bajos, los invernaderos con sistemas de cogeneración gestionan la compra y venta de electricidad según los precios del mercado, una estrategia que los gemelos digitales pueden optimizar de forma automatizada (Ma y col., 2021; GreenTech, 2024). La adaptación de esta lógica al contexto mexicano, sustituyendo cogeneración por paneles solares con almacenamiento, podría ofrecer al productor mayor autonomía energética, aunque su viabilidad dependerá de factores como los costos de almacenamiento, la regulación del mercado eléctrico y la disponibilidad de financiamiento.

La viabilidad técnica de esta integración requiere que el gemelo digital anticipe simultáneamente la demanda energética del invernadero y la generación solar disponible. Los modelos de predicción climática que alimentan al gemelo digital pueden estimar la radiación solar esperada y, por tanto, la producción fotovoltaica probable. Esta

información, combinada con la predicción de demanda térmica, permitiría decidir si almacenar energía, consumirla inmediatamente o precalentar el invernadero durante las horas de mayor generación solar para reducir el consumo en periodos de mayor demanda.

4. Prospectiva

La volatilidad de los precios energéticos, la competencia internacional y la presión por reducir emisiones configuran un contexto en el que la eficiencia energética adquiere relevancia creciente para la agricultura protegida. A partir de la evidencia revisada, es posible delinear trayectorias condicionadas de adopción. Con el fin de delimitar el alcance de las afirmaciones que siguen, cabe distinguir dos tipos de enunciados: (i) tendencias respaldadas por la evidencia revisada en las secciones previas y (ii) escenarios hipotéticos cuya realización depende de condiciones que aún no se han verificado en el contexto mexicano. En cada horizonte que se discute a continuación se especifica, cuando corresponde, el grado de respaldo empírico disponible.

Sobre la base de la evidencia internacional y de la oferta comercial documentada, en el

corto plazo (dos a cuatro años) los invernaderos de alta tecnología en México podrían incorporar componentes parciales asociados al concepto de gemelo digital, particularmente monitorización continua y visualización de datos energéticos. Plataformas comerciales como Priva, Ridder y Hoogendoorn ya ofrecen funcionalidades de predicción y optimización que se aproximan a este concepto, aunque sin implementarlo de forma completa (GreenTech, 2024; Priva, 2024). La adopción en esta etapa dependería de la capacidad de demostrar retornos de inversión verificables y de la disposición de los productores a integrar herramientas digitales en su operación cotidiana.

Como escenario condicionado, en el mediano plazo (cinco a diez años) podrían desarrollarse gemelos digitales con las tres capas operativas en invernaderos piloto vinculados a universidades y centros de investigación, siempre que se cumplan condiciones como la disponibilidad de datos de calidad, financiamiento para prototipos y personal técnico capacitado. El principal riesgo en este horizonte sería que los desarrollos académicos no logren traducirse en herramientas replicables para el sector productivo.

En un horizonte de más largo plazo, y a modo de escenario exploratorio, la confluencia de energía solar con almacenamiento, modelos de inteligencia artificial que requieran menos datos y conectividad rural mejorada podría favorecer una mayor autonomía energética en invernaderos. No obstante, este escenario supone avances simultáneos en infraestructura, regulación, costos y formación, por lo que constituye una posibilidad condicionada, no una tendencia asegurada.

Desde la perspectiva de política pública, los programas de apoyo a la agricultura protegida podrían considerar la incorporación de criterios de eficiencia energética y digitalización en la evaluación de subsidios. Asimismo, la creación de bancos de datos climáticos abiertos, con resolución temporal y espacial adecuada, facilitaría el desarrollo de modelos adaptados a las condiciones de cada región productora.

5. Conclusiones

La revisión realizada permite derivar tres conclusiones principales. Primera: la evidencia internacional muestra que los gemelos digitales pueden contribuir a reducir costos energéticos en invernaderos, pero los

ahorros reportados —entre el 5% y el 25%— corresponden a contextos con alta madurez digital, y las cifras más elevadas provienen de fuentes sectoriales cuyo rigor difiere del de los estudios arbitrados.

Segunda: la diversidad tecnológica del sector mexicano condiciona de forma decisiva cualquier estrategia de adopción. Los invernaderos de exportación con sensorización previa constituirían el segmento con mayor factibilidad inicial; las unidades de menor tecnología quedarían, en el escenario actual, fuera de esta posibilidad.

Tercera: la adopción no depende exclusivamente de la disponibilidad tecnológica, sino de la convergencia de inversiones en sensorización, capacitación técnica y mecanismos de transferencia entre universidades y productores.

Las universidades y centros de investigación podrían contribuir al desarrollo de prototipos piloto y a la documentación de resultados que permitan evaluar la pertinencia de esta tecnología en condiciones mexicanas reales, aunque su incidencia en el sector productivo dependerá de mecanismos efectivos de transferencia.

Es necesario explicitar las limitaciones de este trabajo. La evidencia revisada es

predominantemente internacional, con escasez de estudios mexicanos de validación directa. Las fuentes son diversas en rigor y alcance, e incluyen desde artículos arbitrados hasta reportes comerciales. La transferencia de resultados entre contextos productivos distintos (en clima, escala, cultivos y nivel tecnológico) debe considerarse con cautela. Adicionalmente, la variabilidad de las definiciones operativas de “gemelo digital” en la literatura dificulta la comparación directa entre estudios; varios de los casos revisados se ubican en un continuo entre monitoreo avanzado y gemelo digital propiamente dicho.

A partir de estas consideraciones, se identifican al menos cuatro líneas para investigación futura: (a) validación empírica de prototipos en condiciones productivas reales en México, (b) evaluación diferenciada de costos y beneficios según nivel tecnológico de invernadero, (c) desarrollo de modelos simplificados con menor requerimiento de infraestructura de datos, y (d) análisis de esquemas de financiamiento y transferencia que consideren las restricciones del pequeño y mediano productor.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen al Fondo para el Fortalecimiento de la Investigación, Vinculación y Extensión de la Universidad Autónoma de Querétaro (FONFIVE-UAQ-2025, proyecto FIN2025109) por el financiamiento otorgado para la realización de este trabajo. Asimismo, se agradece a la Universidad Autónoma de Querétaro y a la Universidad de Guanajuato por las facilidades otorgadas.

Referencias

- Ariesen-Verschuur, N., Verdouw, C. y Tekinerdogan, B. (2022). Digital Twins in greenhouse horticulture: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 199, 107183. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107183>
- Gobierno del Estado de Guanajuato (2025). Paquete Fiscal 2026: incremento del 108% al presupuesto destinado al campo [Boletín de prensa]. <https://boletines.guanajuato.gob.mx/tag/paquete-fiscal-2026/>

GreenTech (2024). Optimizing greenhouse efficiency with digital twins.

<https://www.greentech.nl/news/optimizing-greenhouse-efficiency-with-digital-twins>

Imagen Agropecuaria (2023). Agricultura protegida, 15 años de crecimiento exponencial en México. <https://imagenagropecuaria.com/2023/agricultura-protegida-15-anos-de-crecimiento-exponencial-en-mexico/>

Instituto Federal de Telecomunicaciones [IFT] y Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural [SADER] (2022). Cuarto Reporte de Cobertura del Servicio Móvil en las Zonas Agrícolas de México. <https://www.ift.org.mx/usuarios-y-audiencias/cobertura-del-servicio-movil-en-las-zonas-agricolas-de-mexico-2022>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI] (2023). Censo Agropecuario 2022: Resultados definitivos. Comunicado de prensa número 667/23.

Kafi, A. I., Sanfilippo, A. P., Jovanovic, R. y Shannak, S. A.-H. A. (2025). A Predictive Greenhouse Digital Twin for Controlled Environment Agriculture. En *Proceedings of the 27th International Conference on Enterprise Information Systems (ICEIS 2025)*, 1, 980-987. <https://doi.org/10.5220/0013479900003929>

Katzin, D., van Henten, E. J. y van Mourik, S. (2022). Process-based greenhouse climate models: Genealogy, current status, and future directions. *Agricultural Systems*, 198, 103388. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2022.103388>

López-Bedolla, M. G. (2025). Índice de desarrollo digital y competitividad en pequeños productores de agricultura protegida. Análisis de correlación. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 31(2), 224-246. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2025.02.003>

Ma, Z., Christensen, K. y Jorgensen, B. N. (2021). Greenhouse industry 4.0 – digital twin technology for commercial greenhouses. *Energy Informatics*, 4(Suppl 2), 37. <https://doi.org/10.1186/s42162-021-00161-9>

Ntinas, G. K., Dannehl, D., Kläring, H.-P. y Schmid, K. J. (2023). Agricultural greenhouses: Resource management technologies and perspectives for zero greenhouse gas emissions. *Agriculture*, 13(7), 1464. <https://doi.org/10.3390/agriculture13071464>

Platero-Horcajadas, M., Ruiz-Canales, A., Ferrández-Villena García, M. y López-Marín, J. (2024). Enhancing greenhouse efficiency: Integrating IoT and reinforcement learning for optimized climate control. *Sensors*,

24(24), 8109.
<https://doi.org/10.3390/s24248109>

Priva (2024). Priva ECO: Substantial savings on greenhouse energy costs.
<https://www.priva.com/horticulture/solutions/digital-services/priva-eco>

Salazar-Moreno, R., López-Cruz, I. L. y Rojano-Aguilar, A. (2012). Eficiencia en el uso de la energía en invernaderos mexicanos. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 18(3), 365-383.
<https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2011.03.020>

Secretaría de Energía [SENER] (2023). *Inventario Nacional de Energías Limpias*.
<https://dgel.energia.gob.mx/INEL/>

Slimani, H., El Mhamdi, J. y Jilbab, A. (2025). Real-time greenhouse management using IoT, digital twin, and augmented reality for optimal control and decision-making. *Acta IMEKO*, 14(2), 1-15.
<https://doi.org/10.21014/actaimeko.v14i2.1988>

Wang, C., Zhang, Y., Li, X. y Chen, J. (2025). A review of environmental control strategies and models for modern agricultural greenhouses. *Agriculture*, 15(3), 285.
<https://doi.org/10.3390/agriculture15030285>

and digital twin technology to cut emissions.
<https://www.weforum.org/stories/2024/03/how-digital-twin-technology-can-work-with-ai-to-boost-buildings-emissions-reductions/>

World Economic Forum (2024). Pairing AI