

## Agricultura 5.0: La gran convergencia

### *Demografía y tecnología en el futuro de la agricultura global*

*Ing. Agr. Ricardo Bartosik*

*Director de I&D de Compañía Ascariscer*

*ricardobartosik@ascariscer.com.ar*

### Resumen

Hacia mediados de la década de 2020 convergen dos procesos críticos: una transición demográfica sin precedentes y una ola tecnológica que está rediseñando, desde el suelo hasta el laboratorio, la forma de producir alimentos. Ninguno de estos dos procesos puede entenderse hoy de manera aislada. La población mundial, que alcanzó los 8.200 millones de personas en 2024 (Naciones Unidas, 2024), sigue creciendo, pero a su vez envejece y se concentra en ciudades, reduciendo la mano de obra disponible en el campo. Al mismo tiempo, 673 millones de personas pasan hambre y 2.600 millones no pueden costear una dieta saludable (FAO, FIDA, UNICEF, PMA y OMS, 2025). Para 2034, el sistema agroalimentario deberá producir un 14% más (OCDE y FAO, 2025), en un contexto de presión climática y escasez de mano de obra.

La respuesta que la agricultura global está construyendo combina cuatro tecnologías —sensores conectados, inteligencia artificial, robótica y biología sintética— integradas por una quinta pieza, los gemelos digitales, que las sincroniza en tiempo real. Este artículo repasa, de manera general, cada una de estas piezas. Artículos futuros de este espacio profundizarán en tecnologías y aplicaciones específicas, incluida la poscosecha de granos.

### 1. Una perspectiva histórica: la aceleración de los cambios

Como toda actividad humana, los avances en la agricultura se producen a medida que se acumula conocimiento y se potencia con la evolución de otras áreas de la ciencia de las cuáles se nutre. Desde sus comienzos, hace aproximadamente 12.000 años, su evolución se fue acelerando de manera vertiginosa hasta nuestros días. La Tabla 1 lista los principales hitos de la agricultura con sus fechas aproximadas y sus tecnologías dominantes. Si bien es una clasificación un tanto arbitraria, y seguramente incompleta, permite tener una idea del incremento en la velocidad de los cambios.

*Tabla 1. Hitos de la agricultura, fechas aproximadas y tecnologías dominantes (Mazoyer y Roudart, 2006; Overton, 1996; Wolfert, 2017; Saiz-Rubio y Rovira-Más, 2020).*

| <b>Revolución</b>                   | <b>Año</b>             | <b>Tecnología dominante</b>                                                   |
|-------------------------------------|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Neolítica                           | ~9500–7000<br>a.C.     | Domesticación de plantas y animales                                           |
| Antigua                             | ~3500 a.C.–500<br>d.C. | Regadío + arado + tracción animal                                             |
| Medieval                            | ~700/800–1300          | Arado de vertedera + collera rígida + rotación trienal                        |
| Primera revolución agrícola moderna | s. XVI–XIX             | Reducción del barbecho + forrajes + selección + especies del Nuevo Mundo      |
| Segunda revolución agrícola moderna | ~1850–1980             | Mecanización + abonos minerales + fitosanitarios + genética; Revolución Verde |
| Biotechnológica                     | ~1983–                 | Transgénesis y, desde 2012, edición génica (CRISPR)                           |
| De precisión                        | ~1990–                 | GPS/GNSS + sensores + dosis variable                                          |
| Digital / 4.0                       | ~2010–2020             | Big Data + IoT + conectividad                                                 |
| Convergencia / 5.0                  | 2020–<br>(emergente)   | IA + robótica + biología sintética + gemelos digitales                        |

Como se podrá apreciar, los hitos no siempre tienen una fecha precisa de comienzo y finalización, y los diferentes procesos se van solapando - ej la revolución Biotechnológica se solapa y camina en paralelo con la Agricultura de precisión en los últimos 30 años. Por otra parte, aun no hay un consenso en la comunidad académica para que la presente etapa reciba la denominación de “Agricultura 5.0”. Para ello habrá que esperar a que el proceso tome su dimensión histórica apropiada. Lo que sin dudas queda claro es que hay una serie de tecnologías que están convergiendo y que se disponen a moldear la agricultura de los próximos años.

## 2. Un planeta que envejece, se urbaniza y necesita producir más alimentos

Para dimensionar el desafío productivo de las próximas décadas primero hay que entender qué está pasando con la población mundial. Lejos de la imagen de crecimiento acelerado con la que suele hablarse del tema, la trayectoria demográfica global se está desacelerando: de los 8.200 millones de habitantes de 2024 se proyectan 9.700 millones para 2050, llegando a los 10.300 millones a mediados de la década de 2080, a partir del cual la población mundial comenzaría a descender (Naciones Unidas, 2024) (Figura 1).

## Evolución y proyección de la población mundial

Desde los inicios de la civilización hasta 2100 según Naciones Unidas

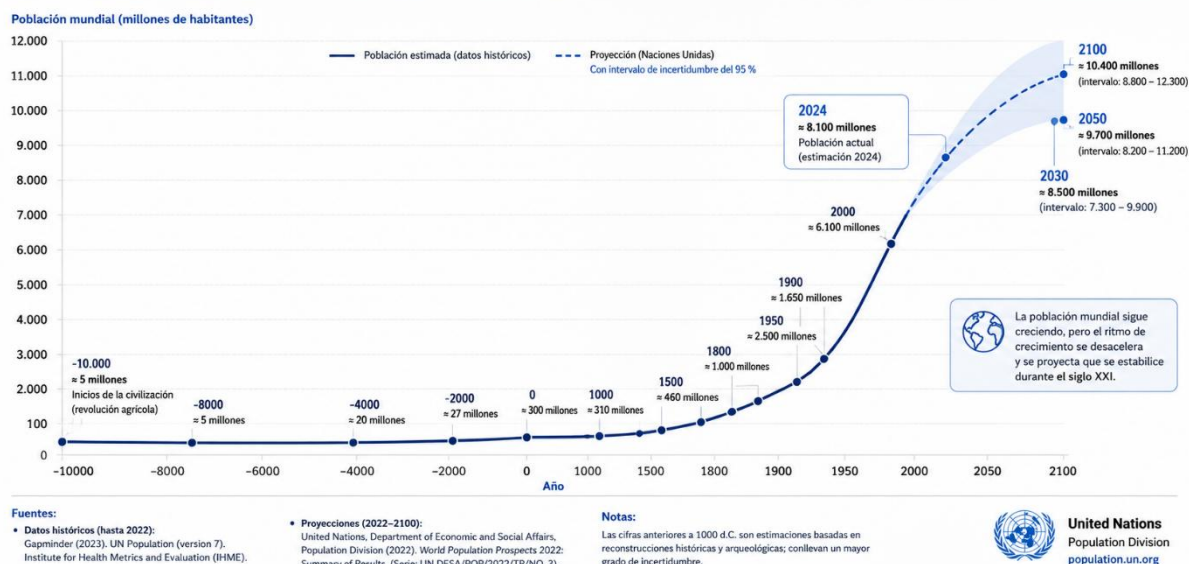


Figura 1. Evolución y proyección de la población mundial según datos de la ONU

Detrás de ese promedio hay una fuerte divergencia. Dos tercios de la población mundial ya viven en países con una tasa de fertilidad por debajo del nivel de reemplazo (2,1 hijos por mujer) (Naciones Unidas, 2024). China, Japón y Rusia enfrentan una contracción demográfica —China perdería unos 200 millones de habitantes hacia 2054—, mientras que el África subsahariana se duplicará hacia 2050 (Naciones Unidas, 2024). A esto se suma un envejecimiento acelerado: el grupo de personas mayores de 65 años es el que más rápido crece y, hacia la década de 2070, sus 2.200 millones de integrantes superarán en número a los menores de 18 años (Naciones Unidas, 2024). Para la agricultura, esto significa una competencia cada vez más dura por la mano de obra rural, justo cuando la producción necesita crecer.

El otro gran movimiento es la urbanización. Según UNO DESA (2025), el 45% de la población mundial vive actualmente en ciudades y otro 36% en pueblos o localidades; en conjunto, el 81% de la población mundial reside en asentamientos urbanos o semiurbanos. Pero el dato más relevante no es el crecimiento de las megaciudades: la mayoría de los habitantes urbanos vive en ciudades pequeñas e intermedias, que son los asentamientos de más rápido crecimiento en África y Asia y los que, en la práctica, van a concentrar buena parte de la nueva demanda de alimentos.

### 3. La paradoja alimentaria: hambre, sobrepeso y el costo de comer sano

El sistema alimentario global convive con una “doble carga” de malnutrición. En 2024, el 8,2% de la población mundial —673 millones de personas— pasaba hambre, y 2.600 millones no podían costear una dieta saludable (FAO et al., 2025). Entre 2020 y 2024, la inflación de los alimentos superó de

manera sostenida a la inflación general, afectando especialmente el acceso de los hogares vulnerables a una alimentación adecuada. Según FAO et al. (2025), un aumento del 10% en los precios de los alimentos se asocia con un incremento de entre 2,7% y 4,3% en la emaciación infantil y de entre 4,8% y 6,1% en la emaciación severa entre niños menores de cinco años (Figura 2).

En el otro extremo de esa doble carga, cerca de 1.130 millones de adultos vivirán con obesidad hacia 2030, dentro de un universo mucho más amplio de personas con sobrepeso que, según distintas proyecciones, podría acercarse a los 3.000 millones en el mismo horizonte (NCD Risk Factor Collaboration, 2024). No es casual que el mercado global de medicamentos para la obesidad — impulsado principalmente por las terapias basadas en incretinas, incluidos los agonistas del receptor GLP-1— se encuentre entre los segmentos de mayor crecimiento de la industria farmacéutica: se estima que podría alcanzar aproximadamente USD 95.000 millones en 2030 y hasta USD 120.000 millones en 2035 (Goldman Sachs Research, 2025).

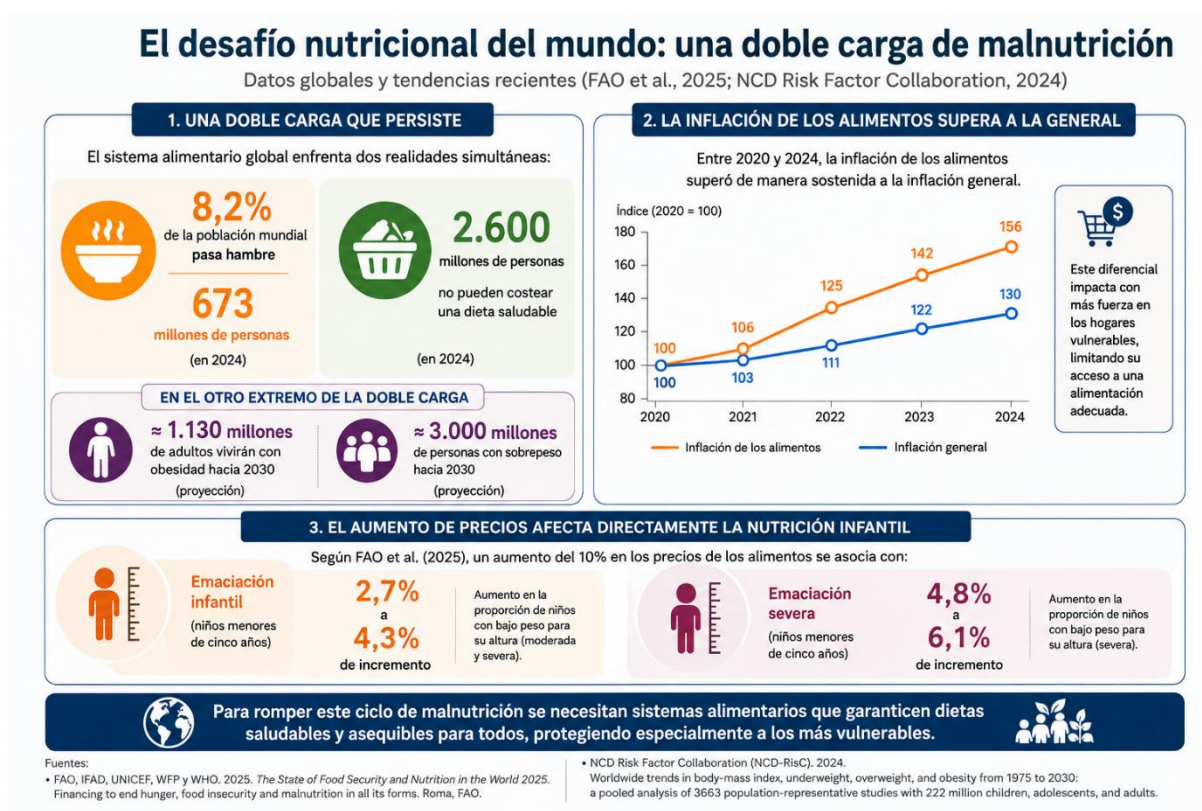


Figura 2. El hambre y el sobrepeso, dos extremos de una misma problemática

Por otra parte, también nos encontramos con crisis agudas que conviven con estos procesos estructurales. Conflictos y eventos climáticos mantienen a 295,3 millones de personas en niveles altos de inseguridad alimentaria en 53 países (FSIN, 2025).

#### 4. La ecuación de la producción: cuánto hay que crecer y a qué costo ambiental

Frente a este escenario demográfico, el sistema agroalimentario global tiene un número concreto por delante: deberá incrementar su producción un 14% hacia 2034 (OCDE y FAO, 2025), impulsado sobre todo por el crecimiento de los países de ingresos medios. Ese crecimiento no será parejo entre alimentos: se proyecta que el consumo de productos de origen animal y pescado aumente un 13% a nivel global, pero hasta un 25% en los países de ingresos bajos y medios-bajos (OCDE y FAO, 2025), donde la mejora del poder adquisitivo se traduce, primero, en más proteína animal en la dieta (Figura 3).

La buena noticia es que la mayor parte de ese crecimiento vendrá de mejoras de productividad y no de la incorporación de nuevas tierras. La mala noticia es que las emisiones directas de gases de efecto invernadero de origen agrícola aumentarían igualmente un 6% hacia 2034 (OCDE y FAO, 2025). Existe, sin embargo, un escenario de mitigación: si la productividad crece un 15% —en lugar de mantener la tendencia actual— y ese aumento se combina con tecnologías de reducción de emisiones, como la agricultura de precisión y la gestión de nutrientes, sería posible eliminar el hambre y reducir las emisiones agrícolas por tonelada producida un 7% al mismo tiempo (OCDE y FAO, 2025). Por otra parte, es importante destacar que reducir las pérdidas y desperdicios de alimentos impactan doblemente de manera positiva: aumentando la oferta de alimentos y reduciendo las emisiones. En consecuencia, todo esfuerzo o iniciativa relacionada a reducir pérdidas y desperdicios es altamente positivo. Ese escenario, más que una promesa, es el argumento central para todo lo que sigue: la tecnología no es un lujo, sino la vía más consistente para producir más sin comprometer más recursos.



Figura 3. Desafíos productivos y ambientales que enfrenta la agricultura global

## 5. La respuesta tecnológica: cinco piezas que convergen

Para cerrar una brecha de esa magnitud, la agricultura está incorporando un conjunto de tecnologías que, tomadas por separado, ya existían hace años, pero que recién ahora empiezan a funcionar como un sistema integrado. Pueden ordenarse en cuatro capas funcionales —sentir (IoT), pensar (IA), actuar (Robótica) y rediseñar (Biología sintética)— más una quinta pieza, el tejido conectivo que las sincroniza entre sí (Gemelos digitales) (Figura 4).



Figura 4. Los pilares donde se apoya la Agricultura 5.0

### 5.1. Los sentidos del campo: el Internet de las Cosas

El Internet de las Cosas (IoT) constituye el sistema sensorial de la agricultura inteligente. No se trata de sensores aislados, sino de una red interconectada que recopila datos en tiempo real y permite que el productor “escuche” las necesidades exactas del suelo y del cultivo. Ejemplos de este tipo de sensores son: los de pH del suelo, que aseguran la biodisponibilidad de los nutrientes esenciales para el desarrollo de la planta; los de humedad del suelo, que evitan el estrés hídrico y el desperdicio de agua mediante el monitoreo constante de la zona radicular; los de temperatura y condiciones climáticas, que permiten anticipar patrones meteorológicos y proteger los cultivos mediante alertas tempranas; y los sistemas de monitoreos de granos almacenados basados en temperatura, humedad relativa y dióxido de carbono, que permiten identificar de manera temprana procesos de descomposición del grano y tomar medidas antes de que se traduzcan en una pérdida de calidad. Una vez capturadas, estas variables viajan a través de redes de conectividad hacia el núcleo del sistema, donde se transforman en información útil para la toma de decisiones.

### 5.2. El cerebro: inteligencia artificial y aprendizaje automático

Si el IoT recopila los datos, la inteligencia artificial (IA) y los modelos de aprendizaje automático actúan como el cerebro: procesan volúmenes masivos de información para identificar patrones invisibles al ojo humano, gestionar riesgos de forma proactiva y optimizar cada etapa del ciclo del cultivo (Tabla 2).

*Tabla 2. Tecnologías basadas en Inteligencia Artificial (IA) y aplicaciones prácticas en agricultura.*

| <b>Tecnología / modelo</b>  | <b>Aplicación práctica</b>                                                                                                                                                     |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Modelos predictivos         | Pronóstico de rendimiento, de condiciones de almacenamiento y análisis de riesgos climáticos extremos.                                                                         |
| Reconocimiento de imágenes  | Detección temprana de plagas y enfermedades foliares mediante visión computacional.                                                                                            |
| Genómica y fitomejoramiento | Identificación de genes asociados a la tolerancia a la sequía y desarrollo de cultivos resilientes.                                                                            |
| Algoritmos de optimización  | Determinación de dosis exactas de fertilizante y agua por metro cuadrado. Recomendaciones para encender la aireación de granos en función de parámetros del grano y del clima. |

Que podemos esperar que ocurra a futuro con esta tecnología? El tamaño que se le atribuye a este mercado varía bastante según la consultora y el alcance considerado —las estimaciones para 2030 van de unos 2.000 a cerca de 4.900 millones de dólares—, pero todas coinciden en una tasa de crecimiento anual de dos dígitos (en torno al 24% compuesto; MarketsandMarkets, 2024) y en que la IA dejó de ser una novedad para convertirse en una capa operativa cada vez más habitual: se estima que, hacia 2050, cada explotación agrícola podría generar millones de datos por día (World Bank, 2021).

Una de las aplicaciones más relevantes de esta tecnología —y sobre la que volveremos en futuros artículos— es su utilización como sistema de alerta temprana para prevenir pérdidas poscosecha. Mediante sensores que monitorean variables como la temperatura, la humedad y la concentración de dióxido de carbono en los silos, los algoritmos pueden detectar condiciones de riesgo, anticipar el deterioro de los productos almacenados y estimar su vida útil. Esta información permite tomar decisiones oportunas y planificar la logística de manera más eficiente, reduciendo el riesgo de pérdidas durante el almacenamiento (ej. <https://silchecks.com> y <https://co2ntrol.com.ar>).

### **5.3. Las manos: robótica y automatización**

La robótica agrícola es la extensión física de esta inteligencia de datos: busca reducir la dependencia de la labor manual pesada y elevar la velocidad y la precisión de las operaciones. En la siembra, los tractores autónomos permiten colocar cada semilla a la profundidad y distancia ideales, maximizando el potencial de germinación. En el manejo de plagas y malezas, robots desmalezadores distinguen entre cultivo y maleza y aplican agroquímicos solo donde es estrictamente necesario, mientras que en otros eslabones —como la automatización de la alimentación en tambos, un terreno donde

plataformas como Lely llevan más de una década de desarrollo (Barkema et al., 2015)— la robótica ya es una tecnología madura y de adopción extendida. En la cosecha de montes frutales, equipos como Agrobot usan visión computacional para identificar y recolectar solo frutos maduros (Xiong et al., 2020), minimizando el daño al producto y reduciendo las pérdidas en el campo. Además, todas estas aplicaciones convergen bajo el concepto de agricultura de precisión: un enfoque que busca que cada intervención sobre el cultivo sea exacta, eficiente y respetuosa del ambiente.

#### **5.4. El rediseño desde adentro: biología sintética**

Mientras las tres capas anteriores optimizan el manejo del cultivo existente, la biología sintética (SynBio) actúa un escalón más abajo: busca rediseñar la planta misma. A diferencia del fitomejoramiento convencional y de la ingeniería genética tradicional, la SynBio incorpora principios de ingeniería para diseñar, ensamblar y programar sistemas biológicos de manera modular y racional, mediante ciclos iterativos de diseñar, construir, probar y aprender (Design–Build–Test–Learn, DBTL). El desarrollo de componentes genéticos estandarizados, técnicas de ensamblaje modular y circuitos genéticos permite combinar múltiples genes y reconstruir o modificar rutas metabólicas completas, ampliando significativamente la capacidad de intervenir sobre características complejas de las plantas (Rizzo et al., 2023; Wang & Demirer, 2023). Sin embargo, la ingeniería de plantas continúa enfrentando una limitación importante: los ciclos DBTL son considerablemente más lentos que en microorganismos debido a la complejidad de los tejidos vegetales y al tiempo requerido para transformar, regenerar y evaluar las plantas. Por ello, una de las fronteras actuales de la SynBio vegetal es acelerar estos ciclos mediante plataformas de prototipado rápido, automatización y sistemas celulares o cell-free, que permitan evaluar múltiples diseños antes de avanzar hacia plantas completas en tiempos muy cortos (Wang & Demirer, 2023; Guo et al., 2026).

#### **Algunos ejemplos**

Dos de los desafíos más ambiciosos que la biología sintética busca abordar en agricultura son la captura y el almacenamiento de carbono y el aprovechamiento más eficiente del nitrógeno. En el primer caso, iniciativas como la “Harnessing Plants Initiative” buscan modificar cultivos para aumentar la biomasa y profundidad de sus raíces y su contenido de suberina, un polímero relativamente resistente a la descomposición que puede contribuir a retener carbono en el suelo. Esta estrategia apunta no solo a incrementar la captura de CO<sub>2</sub> mediante la fotosíntesis, sino también a aumentar la fracción de ese carbono que permanece almacenada durante períodos prolongados (Eckardt et al., 2022). En paralelo, la biología sintética permite explorar modificaciones de componentes de la maquinaria fotosintética, como Rubisco y SBPase, con el objetivo de mejorar la eficiencia de conversión del CO<sub>2</sub> en biomasa.

El nitrógeno representa un desafío aún mayor. La agricultura moderna depende en gran medida de fertilizantes nitrogenados sintéticos, cuya producción, transporte y utilización generan importantes emisiones de gases de efecto invernadero y pérdidas de nitrógeno hacia el ambiente. Menegat et al. (2022) estimaron que la cadena mundial de fertilizantes nitrogenados sintéticos fue responsable de

aproximadamente 1,13 Gt de CO<sub>2</sub> equivalente en 2018, equivalente al 2,1% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero. Frente a este problema, la biología sintética explora estrategias que van desde mejorar la eficiencia con la que los cultivos absorben y utilizan el nitrógeno disponible hasta incorporar mecanismos de fijación biológica de N<sub>2</sub>. Una de las fronteras más ambiciosas consiste en transferir los complejos genéticos de la nitrogenasa —responsables de convertir el N<sub>2</sub> atmosférico en formas biológicamente utilizables— a organismos que normalmente no realizan esta función, o en diseñar nuevas asociaciones entre cultivos y microorganismos fijadores de nitrógeno. Estas estrategias podrían reducir la dependencia de fertilizantes sintéticos y ampliar la capacidad de los cultivos para obtener nitrógeno directamente de la atmósfera (Mus et al., 2016; Bennett et al., 2023).

### La caja de herramientas

Esta caja de herramientas se completa con tecnologías que permiten intervenir sobre distintos niveles de la biología vegetal. **CRISPR-Cas9** y sus variantes permiten realizar edición genómica dirigida, mientras que metodologías de ensamblaje modular como **Golden Gate** facilitan la construcción de cassettes multigénicos y el apilamiento de múltiples genes o funciones en una misma planta (Mattiello et al., 2022; Kocaoglan et al., 2023). Los **promotores sintéticos y los circuitos genéticos** agregan otra capa de control, permitiendo programar la expresión de genes en determinados tejidos, etapas del desarrollo o en respuesta a señales ambientales específicas (Vazquez-Vilar et al., 2023). La **interferencia de ARN (RNAi)** permite silenciar genes específicos mediante moléculas de ARN de doble cadena (dsRNA) y ha abierto nuevas estrategias de protección de cultivos, incluyendo aplicaciones experimentales contra plagas como la mosca blanca, *Bemisia tabaci* (Grover et al., 2019). Finalmente, los **gene drives** representan una frontera todavía experimental: mediante mecanismos de herencia sesgada podrían, en principio, propagar determinadas variantes genéticas dentro de poblaciones de insectos y utilizarse para modificar o suprimir poblaciones de plagas. Su carácter potencialmente autosostenido constituye una de sus principales ventajas teóricas, pero también plantea interrogantes importantes sobre la evolución de resistencia, la dispersión fuera del área objetivo y las consecuencias ecológicas de su utilización (Legros et al., 2021).

En protección de cultivos, estas herramientas se complementan con tecnologías transgénicas ya consolidadas. Los cultivos Bt, que expresan proteínas insecticidas derivadas de *Bacillus thuringiensis*, han contribuido a reducir el daño causado por diversas plagas y, en determinados sistemas productivos, la necesidad de aplicaciones de insecticidas convencionales; sin embargo, la evolución de resistencia en algunas poblaciones de insectos constituye una limitación creciente (Gassmann & Reisig, 2023; Tabashnik et al., 2023). Nuevas generaciones de rasgos, como ThryvOn en algodón, extienden esta estrategia hacia insectos picadores y han demostrado reducir la presión de trips (Lee et al., 2026). En paralelo, los avances en genómica, bioinformática y transformación vegetal permiten identificar y aislar genes de resistencia y combinarlos mediante estrategias de ingeniería genética. El creciente número de genes de resistencia caracterizados abre la posibilidad de realizar apilamientos

multigénicos (**multi-gene stacking**), con el objetivo de ampliar el espectro y aumentar la durabilidad de la resistencia frente a patógenos capaces de evolucionar rápidamente, como las royas y los oídios que afectan al trigo y la cebada (Dracatos et al., 2023). La Figura 5 describe las cinco herramientas básicas de la biología sintética, o SynBio.

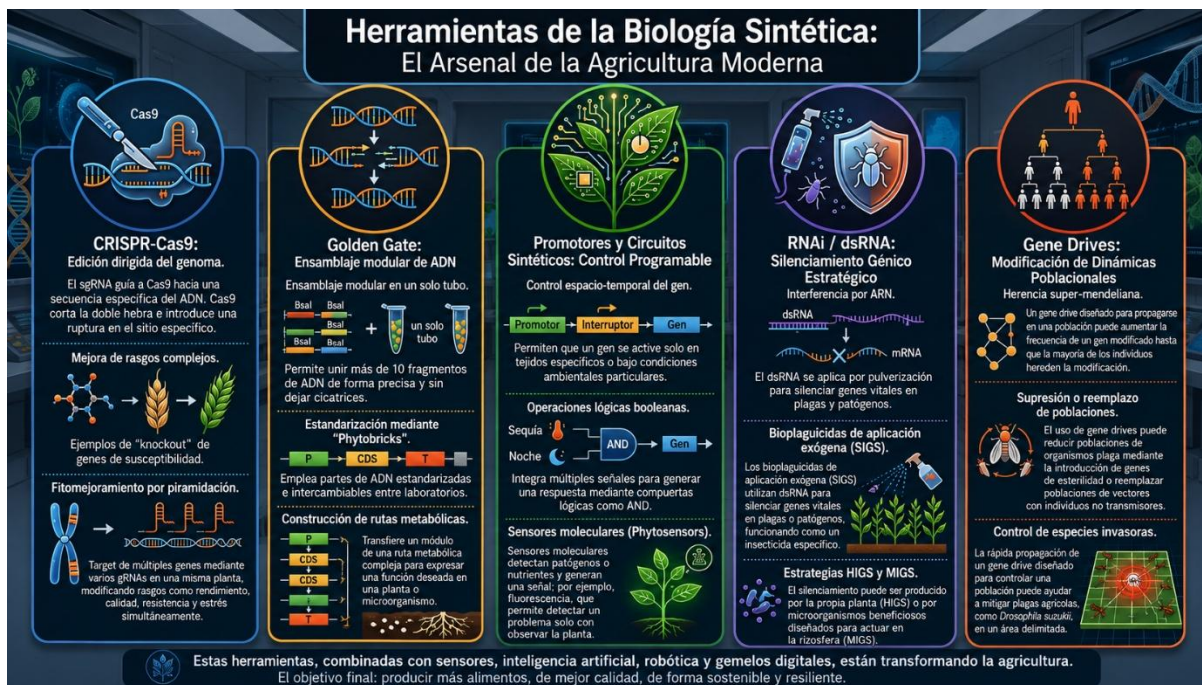


Figura 5. Las cinco herramientas de la Biología Sintética (SynBio)

El marco regulatorio constituye, sin embargo, uno de los factores que pueden condicionar la velocidad de adopción de estas tecnologías. A escala internacional, los enfoques regulatorios aplicados a las nuevas técnicas genómicas siguen siendo heterogéneos y continúan evolucionando: mientras algunos países basan la clasificación principalmente en las características del producto obtenido, otros otorgan mayor importancia al proceso mediante el cual fue desarrollado. Esta diversidad se traduce en diferencias en los requisitos de evaluación, autorización y comercialización, y puede generar dificultades para el desarrollo y el intercambio internacional de productos obtenidos mediante edición génica (Menz et al., 2020; Turnbull et al., 2021).

La falta de armonización también introduce incertidumbre para los desarrolladores y productores que operan en múltiples mercados, ya que un mismo producto puede recibir tratamientos regulatorios diferentes según la jurisdicción. En este contexto, el diseño de los marcos regulatorios no constituye simplemente una etapa administrativa posterior a la innovación, sino que puede influir sobre las decisiones de investigación, desarrollo e inversión. Procedimientos previsibles y criterios regulatorios claros pueden reducir la incertidumbre asociada al desarrollo de nuevos productos y favorecer su llegada al mercado (Whelan et al., 2020). El desafío, por lo tanto, será construir marcos regulatorios capaces de garantizar una evaluación adecuada de los riesgos, pero que al mismo tiempo sean

suficientemente previsibles y adaptables para acompañar la velocidad con la que evolucionan las tecnologías biológicas.

### 5.5. El tejido conectivo: gemelos digitales

La quinta pieza es la que sincroniza a todas las demás. Un gemelo digital es una representación virtual de un sistema físico que se actualiza mediante flujos de datos y que, en sus formas más avanzadas, permite no solo reflejar el estado del sistema, sino también simular escenarios, apoyar decisiones y generar acciones sobre la entidad física que representa. En agricultura, esta tecnología todavía se encuentra en una etapa relativamente temprana de desarrollo y adopción, aunque el número de aplicaciones y casos de estudio ha crecido rápidamente en los últimos años (Verdouw et al., 2021; Pylidianis et al., 2021; Purcell & Neubauer, 2023).

Conviene distinguir tres niveles de madurez, según el tipo de intercambio de datos entre la entidad física y su representación virtual (Tabla 3):

*Tabla 3. Diferentes tipos de representaciones digitales de sistemas biológicos complejos, desde los más simples hasta los gemelos digitales.*

| Nivel          | Definición                                                                                                                                   | Característica principal                                                                                        |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Modelo digital | Representación digital sin intercambio automatizado de datos.                                                                                | El flujo de datos es manual.                                                                                    |
| Sombra digital | Representación digital actualizada mediante un flujo automatizado y unidireccional de datos desde el sistema físico hacia el modelo virtual. | Los cambios en el sistema físico se reflejan automáticamente en el modelo.                                      |
| Gemelo digital | Representación virtual conectada al sistema físico mediante flujos de datos automatizados y bidireccionales.                                 | La información generada por el modelo puede desencadenar decisiones o acciones que modifican el sistema físico. |

Para alcanzar el nivel de gemelo digital propiamente dicho, un sistema agrícola necesita cuatro componentes: una entidad física —plantas, animales, maquinaria o paisajes productivos—; una entidad virtual —modelos que representan su estado y comportamiento—; una conexión físico-a-virtual —mediante sensores IoT, teledetección satelital o drones, telemetría y otras fuentes de datos—; y una conexión virtual-a-física, mediante actuadores, sistemas de soporte de decisiones, maquinaria autónoma o robótica (Verdouw et al., 2021; Purcell & Neubauer, 2023). Dicho de otro modo, el gemelo digital no agrega necesariamente una tecnología nueva, sino que integra en un mismo sistema las diferentes capas tecnológicas descriptas anteriormente.

Las aplicaciones actuales abarcan distintas etapas de la producción y la cadena agroalimentaria. En cultivos, se han desarrollado aplicaciones orientadas al monitoreo del crecimiento, la gestión del riego,

la fertilización y el manejo de enfermedades. En ganadería, los gemelos digitales pueden integrar información sobre comportamiento, ambiente y estado sanitario para mejorar el monitoreo y la toma de decisiones. En maquinaria agrícola, se utilizan modelos digitales para simular el funcionamiento de equipos, apoyar el mantenimiento predictivo y optimizar su configuración. Un ejemplo particularmente ilustrativo es el denominado ‘Digital Potato’, un dispositivo equipado con sensores que acompaña a los tubérculos durante la cosecha, registra impactos y rotaciones y proporciona información en tiempo real para evaluar el daño y ayudar a ajustar los parámetros de la cosechadora (Kampker et al., 2019). Finalmente, en las cadenas de suministro, los gemelos digitales permiten simular la evolución de la calidad de productos perecederos en función de las condiciones de transporte y almacenamiento, abriendo nuevas posibilidades para la gestión dinámica de la cadena de frío (Shoji et al., 2022; Shrivastava et al, 2022).

El valor potencial de los gemelos digitales frente a la agricultura de precisión tradicional surge de su capacidad para integrar información, modelos y acciones dentro de un mismo entorno. Esto permite adaptar la representación digital a las características particulares de cada explotación, automatizar determinados flujos de trabajo, fusionar fuentes de información heterogéneas —sensores de suelo, estaciones meteorológicas, imágenes satelitales, telemetría de maquinaria— y explorar escenarios del tipo “¿qué pasaría si...?”. Esta capacidad de combinar datos en tiempo real con modelos de simulación puede transformar al gemelo digital de una herramienta de monitoreo en un sistema de apoyo continuo a la toma de decisiones (Verdouw et al., 2021; Purcell & Neubauer, 2023).

Pero la aplicación de esta tecnología a la agricultura enfrenta desafíos particulares. A diferencia de muchos sistemas industriales, las plantas, los animales y los agroecosistemas son sistemas vivos, dinámicos y altamente dependientes de su interacción con el ambiente. Sus procesos pueden desarrollarse a escalas que van desde una planta individual hasta una explotación o una región completa, y presentan dinámicas temporales muy diferentes. Capturar adecuadamente estas interacciones y mantener una representación virtual suficientemente actualizada constituye uno de los principales desafíos para los gemelos digitales agrícolas (Pylianidis et al., 2021). A esto se suman problemas de interoperabilidad entre plataformas, disponibilidad y transferencia de datos en tiempo real, conectividad, escalabilidad, costos y gobernanza de los datos (Purcell & Neubauer, 2023).

A partir de estas limitaciones, puede plantearse una hoja de ruta conceptual que avance en cinco niveles crecientes de complejidad: 1) un nivel básico de monitoreo y análisis, centrado en variables como los microclimas de un invernadero; 2) un nivel intermedio de control y actuación, que incorpore actuadores para el riego, la ventilación o el manejo de instalaciones; 3) un nivel avanzado de simulación y soporte de decisiones, que permita pronosticar enfermedades o evaluar virtualmente diferentes configuraciones de maquinaria antes de implementarlas; 4) un nivel de aprendizaje continuo, en el que los modelos se actualicen a partir de datos históricos y en tiempo real para optimizar decisiones como el uso de fertilizantes; y, como horizonte de largo plazo, 5) una visión de “tierra digital” que interconecte los gemelos de explotaciones individuales para representar y gestionar dinámicas a escala

de paisaje, como el flujo de agua, el movimiento de nutrientes o las interacciones entre campos vecinos.

## 6. Conclusión: hacia la gran convergencia

Los procesos descritos a lo largo de este artículo —el demográfico y el tecnológico— no avanzan en paralelo por casualidad: se retroalimentan y, juntos, están redefiniendo la agricultura. Una población que envejece, se urbaniza y concentra cada vez más su demanda de alimentos ejerce una presión creciente sobre la disponibilidad de mano de obra rural, al mismo tiempo que la producción deberá aumentar para responder a una demanda mundial de alimentos que, según las proyecciones de la OCDE y la FAO, crecerá un 14% hacia 2034 (OCDE & FAO, 2025). Y todo esto deberá ocurrir bajo una restricción cada vez más determinante: producir más sin seguir expandiendo indefinidamente el uso de tierra, agua y otros recursos naturales.

En este contexto emerge la gran convergencia: la integración de tecnologías que durante algunos años evolucionaron de manera relativamente independiente. Los sensores y el IoT permiten observar; la inteligencia artificial transforma datos en conocimiento y decisiones; la robótica convierte esas decisiones en acciones; la biología sintética amplía nuestra capacidad de intervenir sobre los sistemas biológicos; y los gemelos digitales comienzan a proporcionar el tejido conectivo capaz de integrar información, modelos y acciones en un mismo sistema. El cambio más profundo, por lo tanto, no está en cada tecnología individual, sino en lo que ocurre cuando todas ellas empiezan a funcionar de manera integrada.

Pero la convergencia tecnológica, por sí sola, no garantiza una agricultura mejor. Su impacto dependerá de que estas capacidades puedan llegar efectivamente a los territorios y ser utilizadas por quienes producen. Para que la transformación sea productiva, sostenible e inclusiva, serán necesarios al menos tres pilares:

- Educación: desarrollar capacidades y alfabetización digital que permitan a productores, técnicos y trabajadores rurales comprender, evaluar y utilizar estas nuevas herramientas, participando activamente de la transición y no limitándose a ser receptores de tecnologías desarrolladas por terceros.
- Infraestructura: asegurar conectividad, energía, capacidad de procesamiento y acceso a servicios digitales, especialmente en las regiones rurales donde las limitaciones de infraestructura pueden convertirse en una nueva forma de brecha tecnológica.
- Gobernanza y ética de los datos: establecer reglas claras sobre quién genera, posee, utiliza y se beneficia de los datos producidos en el campo, garantizando transparencia, seguridad y condiciones que permitan que la digitalización genere valor también para quienes producen la información.

La gran convergencia, entonces, no significa simplemente incorporar más tecnología a la agricultura. Significa pasar de sistemas productivos en los que las tecnologías funcionan como herramientas relativamente aisladas a sistemas capaces de percibir, interpretar, decidir y actuar de manera integrada. Es allí donde puede producirse el verdadero salto de productividad: no solamente haciendo más eficientes las operaciones existentes, sino transformando la manera en que entendemos y gestionamos sistemas biológicos complejos.

Este artículo buscó ofrecer un panorama general de esa transformación. En los próximos textos de este espacio iremos descendiendo desde esta visión global hacia aplicaciones concretas, comenzando por un eslabón particularmente relevante y, al mismo tiempo, todavía con enorme potencial de innovación: la poscosecha de granos y el manejo fitosanitario del almacenamiento. Allí, sensores, inteligencia artificial, automatización y nuevos modelos de gestión pueden converger para resolver un desafío tan antiguo como actual: conservar mejor lo que ya producimos.

## Referencias

- Barkema, H. W., von Keyserlingk, M. A. G., Kastelic, J. P., Lam, T. J. G. M., Luby, J. P., Roy, J.-P., LeBlanc, S. J., Keefe, G. P., & Kelton, D. F. (2015). Changes in the dairy industry affecting dairy cattle health and welfare. *Journal of Dairy Science*, 98(11), 7426–7445. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8804>
- Bennett, E. M., Murray, J. W., & Isalan, M. (2023). Engineering nitrogenases for synthetic nitrogen fixation: From pathway engineering to directed evolution. *BioDesign Research*, 5, 0005. <https://doi.org/10.34133/bdr.0005>
- Dracatos, P. M., Lu, J., Sánchez-Martín, J., & Wulff, B. B. H. (2023). Resistance that stacks up: Engineering rust and mildew disease control in the cereal crops wheat and barley. *Plant Biotechnology Journal*, 21(10), 1938–1951. <https://doi.org/10.1111/pbi.14106>
- Eckardt, N. A., Ainsworth, E. A., Antonangelo, J., Bardhan, S., Busch, W., Carpita, N. C., Castrillo, G., Chory, J., DeHaan, L. R., Duarte, C. M., Henry, A., Jagadish, S. V. K., Langdale, J., Leahey, A. D. B., Liao, J. C., Lu, K.-J., McCann, M. C., McKay, J. K., Odeny, D. A., ... Zhang, X. (2022). Climate change challenges, plant science solutions. *The Plant Cell*, 35(1), 24–50. <https://doi.org/10.1093/plcell/koac303>
- FAO, IFAD, UNICEF, WFP y WHO (2025) (Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Fund for Agricultural Development, United Nations Children's Fund, United Nations World Food Programme, & World Health Organization). The state of food security and nutrition in the world 2025: Addressing high food price inflation for food security and nutrition. FAO.

- Gassmann, A. J., & Reisig, D. D. (2023). Management of insect pests with Bt crops in the United States. *Annual Review of Entomology*, 68, 31–49.  
<https://doi.org/10.1146/annurev-ento-120220-105502>
- Goldman Sachs Research. (2025). The anti-obesity drug market may prove smaller than expected. Goldman Sachs.
- Grover, S., Jindal, V., Banta, G., Taning, C. N. T., Smagghe, G., & Christiaens, O. (2019). Potential of RNA interference in the study and management of the whitefly, *Bemisia tabaci*. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, 100(2), e21522.  
<https://doi.org/10.1002/arch.21522>
- Guo, Q., Kong, C., Zhang, J., Cao, P., Fu, S., & Wang, B. (2026). Plant synthetic biology: From modular design to artificial intelligence-driven engineering. *Model Organisms Research*, 1(1), 100008. <https://doi.org/10.1016/j.mores.2026.100008>.
- Kampker, A., Stich, V., Jussen, P., Moser, B., & Kuntz, J. (2019). Business models for industrial smart services – The example of a digital twin for a product-service-system for potato harvesting. *Procedia CIRP*, 83, 534–540.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.114>
- Kocaoglan, E. G., Radhakrishnan, D., & Nakayama, N. (2023). Synthetic developmental biology: Molecular tools to re-design plant shoots and roots. *Journal of Experimental Botany*, 74(13), 3864–3876. <https://doi.org/10.1093/jxb/erad169>
- Lee, J. M., Snider, J. L., Roberts, P. M., Hand, L. C., Porter, W. M., Collins, G. D., Hobby, S., Parkash, V., Yates, M. E. M., & Wisekal, B. J., II. (2026). Cotton growth, development, and yield when utilizing ThryvOn under high thrips pressure. *Agronomy Journal*, 118(2), e70339. <https://doi.org/10.1002/agj2.70339>
- Legros, M., Marshall, J. M., Macfadyen, S., Hayes, K. R., Sheppard, A., & Barrett, L. G. (2021). Gene drive strategies of pest control in agricultural systems: Challenges and opportunities. *Evolutionary Applications*, 14(9), 2162–2178.  
<https://doi.org/10.1111/eva.13285>
- MarketsandMarkets. (2024). *Artificial intelligence in agriculture market – Global forecast to 2030*. MarketsandMarkets.
- Mattiello, L., Rütgers, M., Sua-Rojas, M. F., Tavares, R., Soares, J. S., Begcy, K., & Menossi, M. (2022). Molecular and computational strategies to increase the efficiency of CRISPR-based techniques. *Frontiers in Plant Science*, 13, 868027.  
<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.868027>

- Mazoyer, M., & Roudart, L. (2006). *A history of world agriculture: From the neolithic age to the current crisis* (J. H. Membrez, Trad.). Monthly Review Press.
- Menegat, S., Ledo, A., & Tirado, R. (2022). Greenhouse gas emissions from global production and use of nitrogen synthetic fertilisers in agriculture. *Scientific Reports*, 12, 14490. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18773-w>
- Menz, J., Modrzejewski, D., Hartung, F., Wilhelm, R., & Sprink, T. (2020). Genome edited crops touch the market: A view on the global development and regulatory environment. *Frontiers in Plant Science*, 11, 586027. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.586027>
- Mus, F., Crook, M. B., Garcia, K., Garcia Costas, A., Geddes, B. A., Kouri, E. D., Paramasivan, P., Ryu, M.-H., Oldroyd, G. E. D., Poole, P. S., Udvardi, M. K., Voigt, C. A., Ané, J.-M., & Peters, J. W. (2016). Symbiotic nitrogen fixation and the challenges to its extension to nonlegumes. *Applied and Environmental Microbiology*, 82(13), 3698–3710. <https://doi.org/10.1128/AEM.01055-16>
- Naciones Unidas, Departamento de Asuntos Económicos y Sociales, División de Población. (2024). *World population prospects 2024: Summary of results* (UN DESA/POP/2024). Naciones Unidas.
- NCD Risk Factor Collaboration. (2024). Worldwide trends in underweight and obesity from 1990 to 2022. *The Lancet*, 403(10431), 1027–1050. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(23\)02750-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(23)02750-2)
- OCDE, & FAO. (2025). *OECD-FAO agricultural outlook 2025–2034*. OECD Publishing. [https://doi.org/10.1787/agr\\_outlook-2025-en](https://doi.org/10.1787/agr_outlook-2025-en)
- Overton, M. (1996). *Agricultural revolution in England: The transformation of the agrarian economy, 1500–1850*. Cambridge University Press.
- Pylaniadis, C., Osinga, S., & Athanasiadis, I. N. (2021). Introducing digital twins to agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 184, 105942. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105942>
- Purcell, W., & Neubauer, T. (2023). Digital twins in agriculture: A state-of-the-art review. *Smart Agricultural Technology*, 3, 100094. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100094>
- Rizzo, P., Chavez, B. G., Dias, S. L., & D'Auria, J. C. (2023). Plant synthetic biology: From inspiration to augmentation. *Current Opinion in Biotechnology*, 79, 102857. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2022.102857>

Saiz-Rubio, V., & Rovira-Más, F. (2020). From smart farming towards agriculture 5.0: A review on crop data management. *Agronomy*, 10(2), 207.

<https://doi.org/10.3390/agronomy10020207>

Shoji, K., Schudel, S., Shrivastava, C., Onwude, D., & Defraeye, T. (2022). Optimizing the postharvest supply chain of imported fresh produce with physics-based digital twins. *Journal of Food Engineering*, 329, 111077.

<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111077>

Shrivastava, C., Berry, T., Cronje, P., Schudel, S., & Defraeye, T. (2022). Digital twins enable the quantification of the trade-offs in maintaining citrus quality and marketability in the refrigerated supply chain. *Nature Food*, 3(6), 413–427.

<https://doi.org/10.1038/s43016-022-00497-9>

Tabashnik, B. E., Fabrick, J. A., & Carrière, Y. (2023). Global patterns of insect resistance to transgenic Bt crops: The first 25 years. *Journal of Economic Entomology*, 116(2), 297–309.

<https://doi.org/10.1093/jee/toac183>

Turnbull, C., Lillemo, M., & Hvorslef-Eide, T. A. K. (2021). Global regulation of genetically modified crops amid the gene edited crop boom—A review. *Frontiers in Plant Science*, 12, 630396.

<https://doi.org/10.3389/fpls.2021.630396>

UN DESA (United Nations, Department of Economic and Social Affairs), Population Division. (2025). World urbanization prospects 2025: Summary of results (UN DESA/POP/2025/TR/No. 12). United Nations.

Vazquez-Vilar, M., Selma, S., & Orzaez, D. (2023). The design of synthetic gene circuits in plants: New components, old challenges. *Journal of Experimental Botany*, 74(13), 3791–3805.

<https://doi.org/10.1093/jxb/erad167>

Verdouw, C., Tekinerdogan, B., Beulens, A., & Wolfert, S. (2021). Digital twins in smart farming. *Agricultural Systems*, 189, 103046.

<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.103046>

Wang, Y., & Demirer, G. S. (2023). Synthetic biology for plant genetic engineering and molecular farming. *Trends in Biotechnology*, 41(9), 1182–1198.

<https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2023.03.007>

Whelan, A. I., Gutti, P., & Lema, M. A. (2020). Gene editing regulation and innovation economics. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 303.

<https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00303>

Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M.-J. (2017). Big data in smart farming – A review. *Agricultural Systems*, 153, 69–80.

<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>

World Bank. (2021). A roadmap for building the digital future of food and agriculture. World Bank.

Xiong, Y., Ge, Y., Grimstad, L., & From, P. J. (2020). An autonomous strawberry-harvesting robot: Design, development, integration, and field evaluation. *Journal of Field Robotics*, 37(2), 202–224. <https://doi.org/10.1002/rob.21889>