



Organización de las Naciones
Unidas para la Alimentación
y la Agricultura

ISSN 1020-5810

Gestión integrada de
cultivos N. 24 | 2020

Agricultura 4.0

Robótica agrícola y equipos automatizados
para la producción agrícola sostenible



Agricultura 4.0

Robótica agrícola y equipos automatizados para la producción agrícola sostenible

Santiago Santos Valle, *Especialista en mecanización agrícola, FAO*

Josef Kienzle, *Ingeniero Agrónomo, FAO*

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
Roma, 2021

Cita requerida:

Santos Valle, S. y Kienzle, J. 2021. *Agricultura 4.0: Robótica agrícola y equipos automatizados para la producción agrícola sostenible*. Gestión integrada de cultivos, N. 24. Roma, FAO.

Las denominaciones empleadas en este producto informativo y la forma en que aparecen presentados los datos que contiene no implican, por parte de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), juicio alguno sobre la condición jurídica o nivel de desarrollo de países, territorios, ciudades o zonas, ni sobre sus autoridades, ni respecto de la demarcación de sus fronteras o límites. La mención de empresas o productos de fabricantes en particular, estén o no patentados, no implica que la FAO los apruebe o recomiende de preferencia a otros de naturaleza similar que no se mencionan.

Las opiniones expresadas en este producto informativo son las de su(s) autor(es), y no reflejan necesariamente los puntos de vista o políticas de la FAO

ISSN 1020-5810

© FAO, 2021



Algunos derechos reservados. Esta obra se distribuye bajo licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 3.0 Organizaciones intergubernamentales (CC BY-NC-SA 3.0 IGO; <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/igo/deed.es>).

De acuerdo con las condiciones de la licencia, se permite copiar, redistribuir y adaptar la obra para fines no comerciales, siempre que se cite correctamente, como se indica a continuación. En ningún uso que se haga de esta obra debe darse a entender que la FAO refrenda una organización, productos o servicios específicos. No está permitido utilizar el logotipo de la FAO. En caso de adaptación, debe concederse a la obra resultante la misma licencia o una licencia equivalente de Creative Commons. Si la obra se traduce, debe añadirse el siguiente descargo de responsabilidad junto a la referencia requerida: “La presente traducción no es obra de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). La FAO no se hace responsable del contenido ni de la exactitud de la traducción. La edición original en [idioma] será el texto autorizado”.

Todo litigio que surja en el marco de la licencia y no pueda resolverse de forma amistosa se resolverá a través de mediación y arbitraje según lo dispuesto en el artículo 8 de la licencia, a no ser que se disponga lo contrario en el presente documento. Las reglas de mediación vigentes serán el reglamento de mediación de la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual <http://www.wipo.int/amc/en/mediation/rules> y todo arbitraje se llevará a cabo de manera conforme al reglamento de arbitraje de la Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil Internacional (CNUDMI).

Materiales de terceros. Si se desea reutilizar material contenido en esta obra que sea propiedad de terceros, por ejemplo, cuadros, gráficos o imágenes, corresponde al usuario determinar si se necesita autorización para tal reutilización y obtener la autorización del titular del derecho de autor. El riesgo de que se deriven reclamaciones de la infracción de los derechos de uso de un elemento que sea propiedad de terceros recae exclusivamente sobre el usuario.

Ventas, derechos y licencias. Los productos informativos de la FAO están disponibles en la página web de la Organización (<http://www.fao.org/publications/es>) y pueden adquirirse dirigiéndose a publications-sales@fao.org. Las solicitudes de uso comercial deben enviarse a través de la siguiente página web: www.fao.org/contact-us/licence-request. Las consultas sobre derechos y licencias deben remitirse a: copyright@fao.org.

Cubierta: Art&Design srl

RESUMEN

Las tecnologías agrícolas están evolucionando rápidamente hacia un nuevo paradigma: la agricultura 4.0. Dentro de ese paradigma, la digitalización, la automatización y la inteligencia artificial juegan un papel importante en la producción de cultivos, incluyendo el control de malas hierbas y de plagas y el control de plagas. Esta evolución presenta desafíos y oportunidades a la vez, como el salto de tecnologías manuales y de tracción animal a equipos automatizados y mecanizados en países en vías de desarrollo y la reducción de la brecha digital. La mecanización agrícola tradicional, caracterizada por el uso de tractores y potencia motriz, se verá igualada e incluso superada por los equipos automatizados y la robótica y la precisión que pueden aportar en las operaciones agrícolas.

La agricultura de conservación es un enfoque que conlleva la diversificación de los cultivos, una cobertura permanente del suelo y la alteración mínima del suelo (por ejemplo, laboreo mínimo). La agricultura de conservación mejora la estructura del suelo y aumenta la materia orgánica de este, promueve una rica diversidad microbiana, retiene el agua y los nutrientes y maneja más adecuadamente las plagas y enfermedades, logrando que los suelos agrícolas sean más productivos y resilientes frente a los cambios de la variabilidad climática. Sin embargo, requiere equipos especializados, por ejemplo, para la siembra directa de semillas en el suelo, con la profundidad y densidad de siembra correctas. La robótica agrícola puede respaldar estas prácticas

sostenibles desde el punto de vista ambiental, permitiendo el deshierbe localizado y el manejo preciso de nutrientes, plagas, enfermedades y malezas mediante la eliminación mecánica o la aplicación localizada de productos químicos. Los robots agrícolas también podrán sustituir las labores pesadas, especialmente cuando la disponibilidad sea limitada, aumentando así la sostenibilidad social. El desarrollo de la agricultura 4.0 creará nuevas oportunidades que pueden atraer a los jóvenes y a los emprendedores al sector, abordando algunas de las causas de la migración del medio rural al urbano y contribuyendo al componente económico de la sostenibilidad.

Este informe analiza la aplicación de la robótica en el ámbito de la mecanización agrícola para la producción de cultivos, y su aplicabilidad específica en el contexto del desarrollo sostenible. Tiene en cuenta las dimensiones social, económica y ambiental de su adopción y explora su potencial. Presenta algunas de las características técnicas de la robótica y destaca los principales desafíos que habrán de superarse para que su adopción sea exitosa, como la infraestructura adecuada, la capacidad de las partes interesadas, la viabilidad económica y la propiedad de los datos. El presente informe ofrece un análisis de algunas de las principales esferas de intervención necesarias para las diferentes partes interesadas, incluyendo a los pequeños agricultores como los pequeños agricultores de los países en desarrollo.

ÍNDICE

PRÓLOGO	vii	LISTA DE FIGURAS
AGRADECIMIENTOS	viii	1. Tamaño medio de las explotaciones agrícolas, 1960–2000
SIGLAS Y ACRÓNIMOS	ix	2. Comparación entre una explotación agrícola inteligente (agricultura 4.0) y una explotación en pequeña escala (agricultura convencional)
1 ANTECEDENTES	1	3. Ciclo de gestión basado en la información para la agricultura avanzada
1.1 Finalidad del informe	3	4. Concepto gráfico de la agricultura 4.0 en el nivel de las operaciones agrícolas
2 AGRICULTURA 4.0: DRONES, ROBOTS Y TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LA COMUNICACIÓN (TIC)	5	5. Concepto de un robot agrícola que deshierba mecánicamente con un haz de luz
2.1 Robótica agrícola	7	6. Robot alimentado por energía solar
2.2 Uso de robots agrícolas	8	7. Plataforma autoalimentada
3 FACTORES QUE IMPULSAN LA ADOPCIÓN	11	8. Pequeño robot para deshierbe
3.1 Desafíos	12	9. Robot agrícola especializado para recolección de fresas
4 LOS PAÍSES EN DESARROLLO Y PERSPECTIVAS DE LA ROBÓTICA AGRÍCOLA	15	10. Cobertura de señal de la tecnología 3G en Francia y Zambia
4.1 Aplicaciones agrícolas	15	11. Proyecto “Hands Free Hectare” (Hectárea de manos libres): una cosechadora de la década de 1980 y un pequeño tractor convencional de cuatro ruedas que arrastra un remolque
4.2 Opciones para los agronegocios	16	12. Objetivos de Desarrollo Sostenible a los que puede contribuir la robótica agrícola
4.3 Reducción de la carga de trabajo de los pequeños agricultores	17	
4.4 Contribución a la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible	17	
5 CONCLUSIÓN	19	
REFERENCIAS	21	
ANEXO - Lista de tipologías y ejemplos de robots agrícolas	23	



PRÓLOGO

La mecanización es un importante motor de la eficiencia de los sistemas de explotación agrícola. Permite la transición de la agricultura de subsistencia a la agricultura orientada al mercado, proporciona empleo rural no agrícola que resulta atractivo para las mujeres y los jóvenes y cataliza el desarrollo rural. Las opciones de mecanización incluyen herramientas, equipos y maquinaria agrícola para la preparación de la tierra, el manejo de los cultivos, las actividades de cosecha y poscosecha, la elaboración y todas las acciones de la cadena de valor agroalimentaria.

Existe la idea errónea de que la mecanización desplaza a la mano de obra agrícola y fomenta la migración del medio rural al urbano, pero sucede lo contrario: la mecanización mejora el bienestar y aumenta las oportunidades de empleo decente. Por ejemplo, la preparación de la tierra y el deshierbe requieren menos tiempo y esfuerzo, con lo que se reduce el trabajo pesado y se libera tiempo para actividades no agrícolas. Además, las actividades rurales no agrícolas, como la fabricación, el mantenimiento y el alquiler de equipos, así como las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) y la digitalización, ofrecen a las mujeres y a los jóvenes interesantes oportunidades de empleo.

La mecanización ha recorrido un largo camino desde la Revolución Industrial y la invención de la máquina de vapor, pero en los últimos 15 años se han producido mejoras radicales. El diseño optimizado de la maquinaria agrícola, combinado con la gestión digital de datos, permite a los pequeños agricultores acceder a equipos automatizados y semiautónomos.

Las innovaciones digitales en las tecnologías de mecanización pueden lograr que la agricultura sea más atractiva para los jóvenes rurales, especialmente en los países en desarrollo. Con la infraestructura rural, las cadenas de suministro, los servicios y la capacitación necesarios, se pueden crear nuevos y más atractivos puestos de trabajo para beneficiar a las zonas rurales que se quedaron atrás cuando la agricultura dependía de herramientas manuales rudimentarias.

Existe una gran diferencia entre la maquinaria de alta tecnología con soporte digital y las herramientas manuales sencillas de baja tecnología. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y sus asociados deben proporcionar a los gobiernos el apoyo técnico necesario para transformar la agricultura de forma sostenible y crear un entorno propicio para esta industria dirigida por el sector privado. Además, la iniciativa está en consonancia con los marcos para la mecanización de la agricultura sostenible en África y en Asia, y apoya los esfuerzos por desarrollar servicios de pequeña escala de alquiler de equipos mecanizados para garantizar que los agricultores tengan acceso a servicios de mecanización.

Esta publicación ofrece un panorama general oportuno de la próxima generación de maquinaria agrícola, centrándose en la robótica para la producción agrícola con el fin de acelerar el desarrollo rural.

Jingyuan Xia

XIA, Jingyuan

Director

División de Producción y Protección Vegetal



AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer las contribuciones de quienes ayudaron elaborar este documento a lo largo de dos años. Se agradece a Fenton Beed, jefe del Equipo de cultivos rurales y urbanos y sistemas de mecanización, de la División de Producción y Protección Vegetal de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), su continuo apoyo y sus ideas, que contribuyeron a hacer realidad este informe.

Salah Sukkarieh, de la Universidad de Sidney, aportó valiosas ideas en las primeras etapas del documento y apoyo durante el proceso de revisión.

Brian Sims y Karim Houmy, expertos internacionales en mecanización sostenible, ofrecieron su sabia orientación en las primeras etapas de preparación de esta publicación.

Shane Harnett, consultor de comunicaciones de la FAO, realizó una revisión exhaustiva del borrador consolidado y su revisión editorial constructiva del texto y la estructura ayudó a mejorar todo el documento.

Verónica Sáiz Rubio y Francisco Rovira Más, de la Universidad Politécnica de Valencia, permitieron el uso del contenido de sus publicaciones revisadas por pares.

Nuestro agradecimiento a Allan Hruska y David Hughes por su contribución respecto a las aplicaciones de la FAO que utilizan inteligencia artificial para el control de plagas.

Joseph Mpagalille, Ingeniero Agrónomo de la FAO, ofreció importantes aportaciones durante la fase de revisión final.



SIGLAS Y ACRÓNIMOS

3D	Tridimensional
CGIAR	Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional
CIMMYT	Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo
FAO	Organización para la Alimentación y la Agricultura de las Naciones Unidas
FIDA	Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola
FIRA	Foro Internacional de la Robótica Agrícola
GPS	Sistema de posicionamiento global
GSMA	Asociación del Sistema Global de Comunicaciones Móviles
IA	inteligencia artificial
IdC	Internet de las cosas
MMS	Servicio de mensajería multimedia
NOAA	Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica
ODS	Objetivo de Desarrollo Sostenible
SMS	servicio de mensajes cortos
TI	tecnología de la información
TIC	tecnologías de la información y la comunicación
WaPOR	Base de datos de acceso libre sobre la productividad del agua

1. ANTECEDENTES

La mecanización agrícola proporciona la energía y los equipos necesarios para preparar el suelo y establecer, mantener, almacenar y procesar los cultivos agrícolas en el campo y en la explotación agrícola. A lo largo de los años, ha evolucionado desde herramientas manuales básicas y aperos de tracción animal hasta sofisticados equipos con motor. Lamentablemente, las herramientas manuales y la tracción animal siguen siendo de uso común en los países en desarrollo, lo que dificulta la productividad agrícola y afecta negativamente los medios de vida de los pequeños agricultores. Los adelantos en mecanización están, por tanto, impulsados por el deseo de reducir la carga de trabajo y eliminar el trabajo duro durante los períodos de mayor trabajo (preparación de la tierra, deshierbe, cosecha, transporte, etc.).

La disponibilidad de equipos adecuados y eficientes y su uso oportuno son factores fundamentales en la transformación de la agricultura de subsistencia a la agricultura orientada al mercado. La siembra temprana y las condiciones óptimas de siembra (suelo, temperatura y humedad) son especialmente importantes, sobre todo teniendo en cuenta los patrones de precipitaciones y temperatura cada vez más erráticos. La agricultura basada en datos, con la ayuda de soluciones robóticas que incorporan técnicas de inteligencia artificial (IA), es la base de la agricultura sostenible del futuro (Sáiz-Rubio y Rovira-Más, 2020).

La Asamblea General de las Naciones Unidas instó a los Estados Miembros, a las organizaciones competentes de las Naciones Unidas y a otros interesados a realizar mayores esfuerzos para mejorar el desarrollo de tecnologías agrícolas sostenibles y su transferencia y difusión, en condiciones mutuamente convenidas a los países en desarrollo, especialmente a los países menos adelantados, en particular a nivel

bilateral y regional, y a prestar apoyo a las iniciativas nacionales dirigidas a fomentar la utilización de conocimientos especializados y tecnologías agrícolas locales, promover la investigación sobre tecnologías agrícolas y el acceso al conocimiento y a la información mediante estrategias adecuadas de comunicación para el desarrollo y permitir que las mujeres, los hombres y los jóvenes de zonas rurales puedan incrementar su productividad agrícola sostenible, reducir las pérdidas después de las cosechas y mejorar la seguridad alimentaria y nutricional.

Hasta la fecha, el uso de la energía agrícola motorizada ha predominado en los países desarrollados, donde el tractor es la principal fuente de energía agrícola. En los últimos años, se ha tendido a aumentar el tamaño y la potencia de los tractores y otros equipos (por ejemplo, las cosechadoras) a fin mejorar la eficiencia y satisfacer las necesidades de las explotaciones agrícolas cada vez más grandes de los países desarrollados. Sin embargo, la realidad en la mayor parte del mundo es bastante diferente, ya que el tamaño de las explotaciones está disminuyendo en los países de ingresos bajos (Figura 1).

A veces, se considera que la falta de energía agrícola es la causa de la pérdida de cultivos, el bajo rendimiento de los cultivos y la carga de trabajo de las tareas agrícolas y la agricultura de subsistencia (Murray *et al.*, 2016). Sin embargo, esta no es la única razón, ya que muchos otros factores – por ejemplo, el clima, la calidad de las semillas, las prácticas adoptadas, las plagas y las enfermedades – condicionan el rendimiento final de los cultivos. Además, la apremiante necesidad de aumentar la producción para alimentar a una población creciente dentro de una zona limitada está ejerciendo aún más presión sobre los sistemas agrícolas y su productividad.



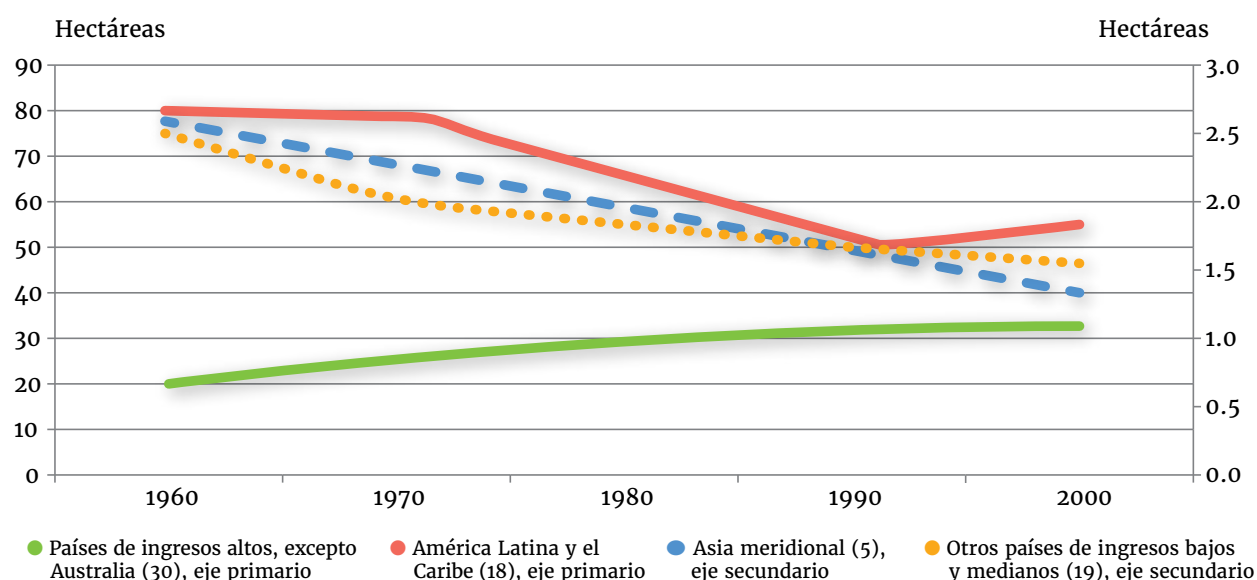


Figura 1. Tamaño medio de las explotaciones agrarias

Notas: Los números entre paréntesis indican el número de países considerados en la región respectiva.

Fuente: Lowder, Scoet y Raney (2016).

La mecanización se asocia habitualmente con los tractores. Sin embargo, el tractor no es más que una fuente de energía móvil universal con capacidad para arrastrar, empujar o poner en marcha una serie de aperos, equipos y herramientas que realizan las operaciones agrícolas; para que un tractor logre su potencial, debe ir acompañado del equipo adecuado. La mecanización comprende numerosas operaciones durante el ciclo de producción de cultivos y en toda la cadena de valor: “mecanización” no es sinónimo de “tractorización”. Cuando se aplica correctamente, la mecanización puede reducir la mano de obra, mejorar la sincronización de las operaciones, aumentar el rendimiento de los cultivos, aplicar insumos costosos con mayor precisión y eficiencia y generar valor añadido.

Esta asociación tradicional entre la mecanización y el tractor manejado por un agricultor no perdurará en los próximos decenios: el desarrollo de tecnologías nuevas e innovadoras con capacidad para aumentar la eficiencia de la producción de cultivos a niveles sin precedentes gracias a la automatización de la maquinaria y los equipos ya ha puesto en marcha

un cambio. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) está promoviendo actualmente la mecanización sostenible en los países en desarrollo, con el objetivo específico de llegar a los pequeños agricultores que pueden beneficiarse de la mecanización mediante servicios de alquiler, centrándose en los tractores (de dos ruedas, de cuatro ruedas, de tamaño pequeño a mediano), al tiempo que ayuda a los empresarios rurales a establecer empresas de servicios de alquiler.¹

¹ En 2018, la FAO y el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) publicaron los materiales de capacitación titulados *Hire services as a business enterprise* (Los servicios de alquiler como una empresa comercial) (FAO, 2018), para ayudar a capacitar a los proveedores, reales y potenciales, de servicios de mecanización agrícola. Esta publicación se centra en los aspectos técnicos y de gestión empresarial con el objetivo de aumentar la capacidad de los empresarios rurales y fomentar la puesta en práctica de servicios que puedan contribuir al desarrollo rural y a una mayor productividad de los cultivos.

1.1 Finalidad del informe

Este informe presenta y analiza las oportunidades que los nuevos avances tecnológicos relacionados con la automatización y la agricultura de precisión (por ejemplo, la robótica) pueden ofrecer a la agricultura en los países en desarrollo. Estas tecnologías están destinadas principalmente a brindar apoyo a los agricultores que tienen dificultades debido al costo de la mano de obra durante la cosecha de los cultivos y a hacer frente a la disminución de la disponibilidad de mano de obra para las operaciones generales de cultivo. El ahorro, tanto en términos de costos como de tiempo (gracias a la precisión en el uso de los insumos), representa un punto de entrada para los productores comerciales. Sin embargo, estas tecnologías también podrían estar dirigidas a los pequeños agricultores, que – dadas las tendencias irreversibles de la migración

urbana – constituyen un grupo de población en disminución, encabezado por mujeres y que envejece. Estos agricultores podrían beneficiarse de las tecnologías e innovaciones en aquellos lugares donde la agricultura sigue siendo un medio de subsistencia más que una actividad generadora de ingresos. El efecto positivo de las tecnologías adecuadas puede empoderar a las mujeres rurales para lograr condiciones de igualdad en la sociedad, así como atraer a los jóvenes al sector.

Este informe explora las posibles aplicaciones de la tecnología agrícola, presenta las tendencias actuales y describe algunos de los principales desafíos para la adopción exitosa de la mecanización agrícola sostenible en los países en desarrollo. En el **Cuadro 1** se indican términos específicos relacionados con la agricultura 4.0.

CUADRO 1. Términos relevantes relacionados con la agricultura 4.0

Agricultura 4.0 Una agricultura que integra una serie de innovaciones para producir productos agrícolas. Estas innovaciones engloban la agricultura de precisión, el IdC y macrodatos para lograr una mayor eficiencia en la producción.

Agricultura de precisión Concepto de gestión agrícola basado en la observación, la medición y la respuesta a la variabilidad de los cultivos en cada campo y en diferentes campos. La investigación en agricultura de precisión pretende definir un sistema de apoyo a la toma de decisiones para la gestión de toda la explotación con el objetivo de optimizar el rendimiento de los insumos, al tiempo que se preservan los recursos.

Inteligencia artificial (IA) La capacidad de un ordenador digital o de un robot controlado por ordenador para realizar tareas comúnmente asociadas a seres inteligentes (Encyclopaedia Britannica, 2020). La IA pueden consistir en programas que se comportan como seres humanos, operan como seres humanos, piensan como seres humanos o tienen su propia forma racional de procesar la información o el comportamiento. Sus aplicaciones son infinitas en las múltiples facetas del desarrollo tecnológico.

Teledetección La ciencia de la obtención de información sobre objetos o zonas a distancia, normalmente desde aeronaves o satélites (NOAA, 2020). Las imágenes pueden obtenerse en diferentes longitudes de onda del espectro luminoso por medio de sensores activos o pasivos. Los sensores pasivos registran la luz tal y como se refleja en la superficie de la Tierra, mientras que los sensores activos utilizan sus propios estímulos para producir la imagen, como la luz láser. Las aplicaciones de la teledetección en la gestión de los recursos naturales (por ejemplo, para el uso de las tierras agrícolas) son útiles para vigilar, entre otras cosas, la producción agrícola, el rendimiento y las sequías.

Tecnología de cadenas de bloques System in which a growing list of records – known as blocks – are linked using cryptography. Each block contains a cryptographic hash of the previous block, a timestamp and transaction data. This distributed database holds records (represented by the blocks) of all transactions or digital events that have been executed and shared among participating parties (Crosby et al., 2015).

Internet de las cosas (IdC) Infraestructura de red mundial en la que los objetos físicos y virtuales con identidades únicas se descubren y se integran sin fisuras (teniendo en cuenta cuestiones de seguridad y privacidad) en la red de información asociada, en la que pueden ofrecer y recibir servicios que son elementos de los procesos empresariales definidos en el entorno en el que se activan (Kiritzis, 2010). En el contexto de la agricultura, cualquier elemento que intervenga en la cadena de valor de los cultivos producirá datos que posteriormente podrán ser procesados con diversos fines.

Tecnologías de la información y la comunicación (TIC) Diferentes tipos de tecnologías que transmiten información a los usuarios a través de telecomunicaciones. Las tecnologías incluyen las redes inalámbricas, Bluetooth, Internet, teléfonos móviles, SMS y MMS.

LIDAR o sistema lidar Método que combina diferentes sensores de varias frecuencias y tipos de luz para medir distancias que luego pueden utilizarse para crear imágenes 3D. La luz láser se utiliza para crear la luz que se refleja en la superficie y luego es captada por un sensor. Los tipos de luz utilizados son ultravioleta, visible e infrarrojo cercana. Es una tecnología habitual en los vehículos y equipos autónomos.

2. AGRICULTURA 4.0

Drones, robots y tecnologías de la información y la comunicación (TIC)

La agricultura evoluciona con la ciencia y la tecnología, y es solo cuestión de tiempo que el Internet de las cosas (IdC) llegue a los paisajes agrícolas. Las mejoras técnicas de las nuevas tecnologías agrícolas deberían:

- ▶ optimizar la eficiencia de la producción;
- ▶ optimizar la calidad;
- ▶ minimizar el impacto ambiental;
- ▶ minimizar los riesgos relacionados con la producción.

Algunos ejemplos de estas mejoras son: la agricultura de precisión, la adopción de la tecnología de cadenas de bloques en las cadenas de valor (por ejemplo, en el transporte, almacenamiento, lavado, clasificación, envasado, etiquetado o procesamiento), la IA para el diagnóstico de plagas y enfermedades y las opciones de control, la teledetección (imágenes por satélite y de drones) y la utilización de sensores en el terreno (de suelo, de cultivo o estaciones meteorológicas) o equipos automatizados para las operaciones agrícolas. En la **Figura 2** se presenta



Figura 2. Comparación entre una explotación agrícola inteligente (agricultura 4.0) y una explotación en pequeña escala (agricultura convencional)

Notas: El término “robótica” se refiere a los sistemas o máquinas en los que se añaden mayores niveles de inteligencia a la máquina para su trabajo autónomo, o bien al desarrollo de una nueva máquina inteligente para una aplicación existente.

“Equipos automatizados” se refiere a los sistemas existentes, en los que algunos elementos se han automatizado para el transporte o el trabajo sin intervención humana.



una comparación conceptual entre la agricultura convencional actual y la agricultura 4.0.

Los actores clave de este cambio no son solo las industrias de equipos agrícolas tradicionales, sino también los agricultores. La teledetección, el procesamiento de datos, las telecomunicaciones, la IA y la robótica, junto con el creciente abanico de usos disponibles, requieren nuevos enfoques que tengan en cuenta no solo la agronomía, sino también factores relacionados con la infraestructura, la legislación y los conocimientos. Cuestiones como la privacidad, la propiedad de los datos generados en las explotaciones, el uso de la geolocalización, el seguro de los vehículos no tripulados y la información encriptada formarán parte de la agricultura digitalizada. Para ilustrar de qué manera la gestión de la información jugará un papel clave en esta nueva forma de agricultura, la **Figura 3** muestra las diferentes etapas y elementos que intervienen en la agricultura digital: los sensores monitorizan el cultivo para generar datos captados por una plataforma; estos datos son procesados por software específico e IA; se ofrecen opciones de intervención; el agricultor decide cómo actuar sobre el cultivo (directamente con su propio equipo o indirectamente a través de equipos automatizados). La robótica agrícola puede combinar todas las etapas en una plataforma o especializarse en alguna de ellas; es una tecnología compleja y no es fácil que el usuario final del robot (el agricultor) tenga

los conocimientos especializados necesarios y esté familiarizado con todo el proceso y los elementos que intervienen en el ciclo.

En el paradigma de la agricultura 4.0, la interacción entre el agricultor y la máquina es fundamental para el funcionamiento de la explotación, y el agricultor toma decisiones y maneja equipos interconectados que funcionan de forma autónoma basándose en el proceso de información antes mencionado. El agricultor comercial de hoy en día, que domina plenamente las habilidades y los conocimientos agrícolas existentes, tendrá que convertirse en una especie de gestor de tecnología de la información (TI) que trabaje desde una oficina o delante de una pantalla (ordenador, teléfono móvil, tableta, etc.), en lugar de ser un operador de máquinas que trabaja en el campo, conduciendo una máquina y ajustando el equipo manualmente. Para la gestión del ganado, se seguirán necesitando operadores cualificados, pero con nuevos conjuntos de competencias relacionadas con las TIC y la automatización. Esta es la visión prevista para los países con un sector agrícola altamente desarrollado; sin embargo, está muy lejos de la realidad de la mayor parte de los países y de la mayoría de los pequeños agricultores.

La agricultura 4.0 ofrece muchas posibilidades. Los drones y otras plataformas de detección pueden proporcionar información en tiempo real, producen imágenes, captan diferentes

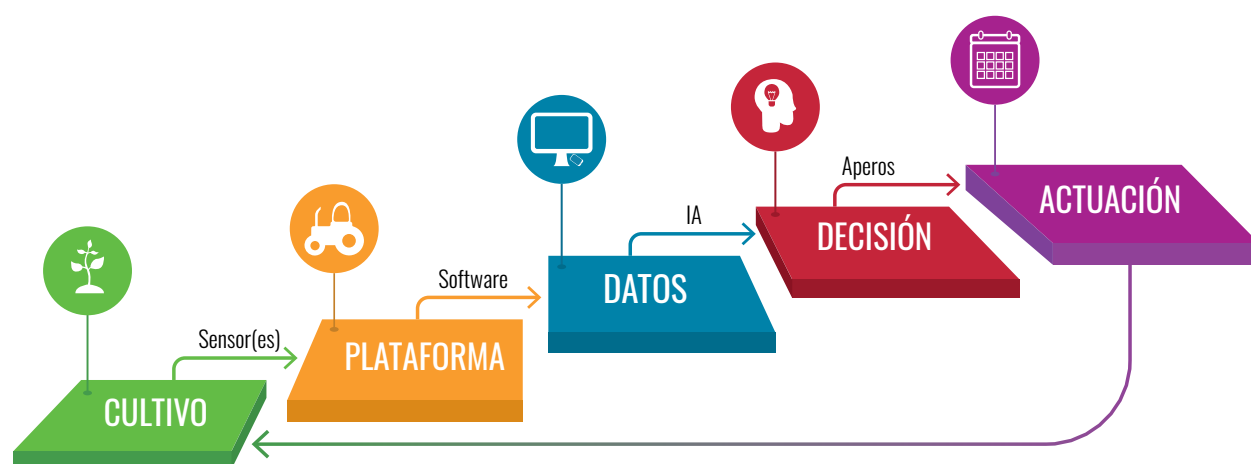


Figura 3. Ciclo de gestión basado en la información para la agricultura avanzada

Fuente: Sáiz-Rubio y Rovira-Más (2020).

parámetros agronómicos y alertan a los agricultores sobre el progreso de un cultivo, el estado del suelo, la aparición o el riesgo de plagas y enfermedades y el crecimiento de malezas. El estado de interconectividad será algo nuevo en la agricultura, con altos niveles de captura, análisis y procesamiento de información entre los distintos equipos y los sistemas. Toda esta información debe ser procesada por el agricultor, que luego podrá evaluar la solución o la acción óptima requerida. El agricultor puede utilizar tecnologías convencionales o equipos autónomos para intervenir en el campo o en instalaciones agrícolas controladas, como invernaderos o granjas verticales. El equipo puede hacer uso de los datos detectados para optimizar el uso de insumos según las necesidades específicas del campo, el cultivo o el suelo. En la **Figura 4** se muestra una imagen conceptual relacionada.

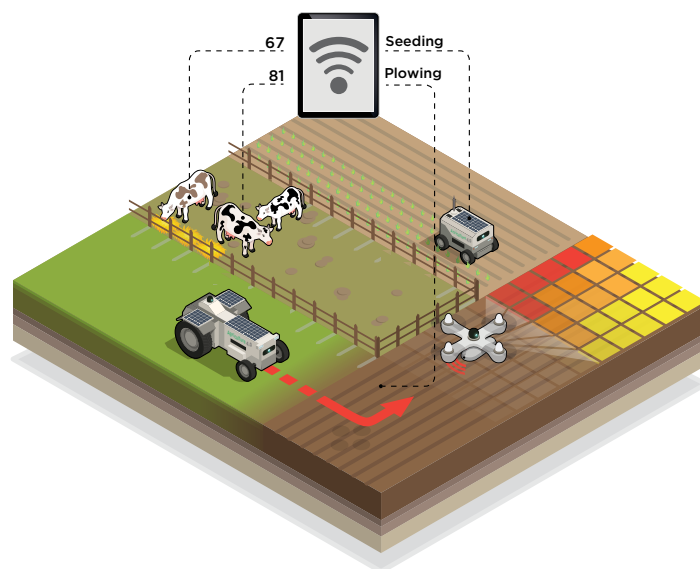


Figura 4. Concepto gráfico de la agricultura 4.0 en el nivel de las operaciones agrícolas

Fuente: Art&Design srl

No deben subestimarse las dificultades para el agricultor. Asimismo, los sectores público y privado enfrentarán nuevos desafíos en cuanto a la creación de capacidad en torno a estas nuevas tecnologías.

2.1 Robótica agrícola

No existe una definición formal del término “robot agrícola” ni un reconocimiento oficial de la función de los robots que realizan operaciones agrícolas. Lowenberg-DeBoer *et. al.* (2019) proponen la siguiente definición de trabajo para un robot que funciona en el campo: un dispositivo mecatrónico móvil, autónomo y con capacidad de decisión que realiza tareas de producción de cultivos (por ejemplo, preparación del suelo, siembra, trasplante, deshierbe, control de plagas y cosecha) bajo supervisión humana, pero sin trabajo humano directo. Según Bechar y Vigneault (2017), los robots agrícolas son máquinas programables perceptivas que realizan una variedad de tareas agrícolas, como cultivo, trasplante, pulverización y cosecha selectiva (**Figura 5**). El término “obot agrícola o agrobot” es sin duda una descripción ajustada de las máquinas autónomas que tienen capacidad para realizar diferentes tareas agrícolas repetitivas en una explotación agrícola – desde la preparación de la tierra hasta la cosecha – sin intervención humana directa.

Los agricultores y los profesionales de la agricultura tendrán que adquirir nuevas competencias para gestionar todos estos nuevos sistemas y evaluar la mejor manera de realizar las operaciones agrícolas en función de todos los parámetros posibles.

En entornos dinámicos y desestructurados, los robots agrícolas pueden producir a menudo resultados inadecuados debido a las incertidumbres inherentes, los ajustes operacionales desconocidos y la imprevisibilidad de los acontecimientos y las condiciones ambientales. En 2019, según se explicó en el Foro Internacional de la Robótica Agrícola (FIRA), un evento anual realizado en Toulouse, se conocían más de 60 proyectos de todo el mundo sobre el desarrollo de robots agrícolas (FIRA, 2018), y este número sigue aumentando. Comprenden una amplia gama de tamaños, están diseñados para una variedad de usos y aplican diferentes tecnologías. Solo un pequeño número se encuentra actualmente en fase comercial, pero en los próximos años se verán nuevos proyectos y una mayor disponibilidad. Como la tecnología está en su fase inicial, pretende responder a las exigencias actuales de los agricultores centrados en la agricultura comercial orientada a la producción intensiva, un sector que puede permitirse invertir en esta tecnología. Sin embargo, la demanda de robots agrícolas debe estar

impulsada por las necesidades de los agricultores, que pueden ser bastante específicas. Según la FAO (2019b), cerca del 90 % de los agricultores de todo el mundo trabajan a pequeña escala y la tecnología debe ser accesible para este enorme grupo.

2.2 Uso de robots agrícolas

Un robot agrícola puede realizar una gran variedad de tareas. Los primeros robots agrícolas disponibles en el mercado realizan tres tareas principales: eliminación de malezas, vigilancia de plagas y enfermedades y cosecha de cultivos especializados (bayas u hortalizas). Un robot agrícola ofrece oportunidades de ahorros de costos, ya que reduce las necesidades de mano de obra (deshierbe y cosecha), limita el uso de insumos (fitosanitarios) y reduce las pérdidas de rendimiento debido a la detección tardía de plagas y enfermedades. Las **figuras 6 a 8** muestran ejemplos de robots especializados disponibles en el mercado.

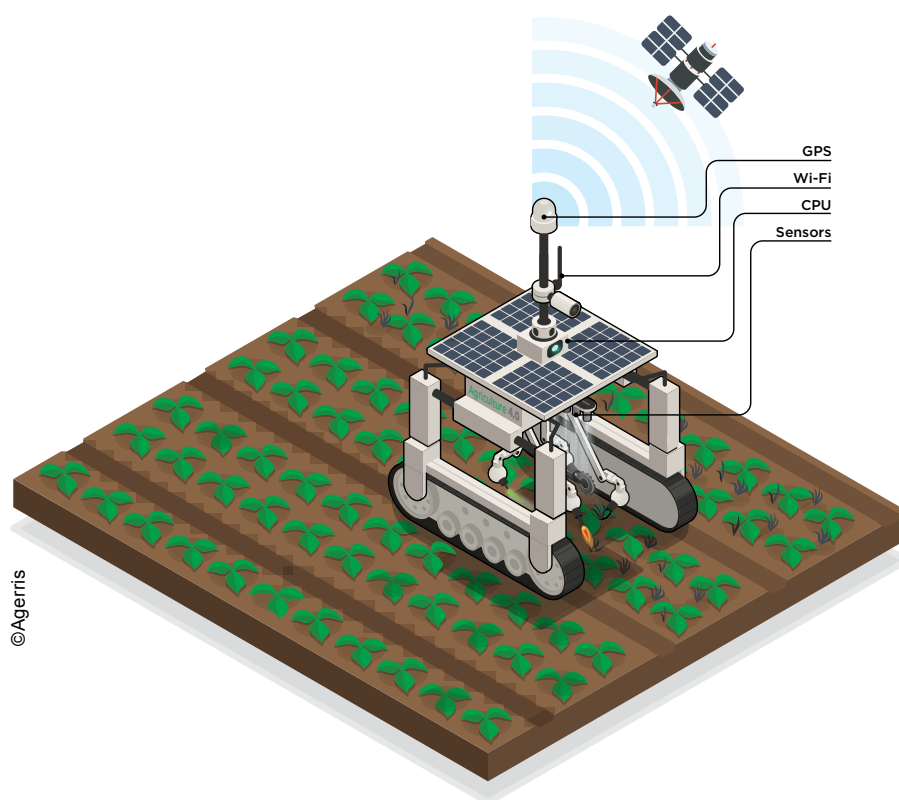


Figura 5. Concepto de un robot agrícola que deshierba mecánicamente con un haz de luz

Fuente: Art&Design srl



Figura 6. Robot alimentado por energía solar (Agerris Farmhand, Australia)

Notas: puede controlar las malezas por medio del deshierbe mecánico individualizado.

Fuente: Agerris (2020).



Figura 7. Plataforma autoalimentada (Agrointelli, Dinamarca)

Notas: Puede preparar, sembrar o deshierbar cultivos convencionales utilizando los aperos tradicionales de los tractores.

Fuente: Agrointelli (2018).



Figura 8. Pequeño robot para deshierbe (OZ, Francia)

Notas: Puede deshierbar en cultivos en hileras y huertos.

Fuente: Naio Technologies (2016).

Hay tantos posibles usos de los robots agrícolas como tareas agrícolas. Ya existen prototipos que pueden preparar el suelo, sembrar, controlar las plagas y cosechar cultivos de cereales (por ejemplo, cebada o maíz). La automatización de los equipos agrícolas puede adoptar varios enfoques, desde hacer que la maquinaria existente sea autónoma (es decir, sin conductor) hasta desarrollar nuevas plataformas autónomas capaces de realizar tareas. Estas nuevas plataformas tienden a ser muy sofisticadas y se están desarrollando continuamente nuevos tipos de equipos; sin embargo, los robots agrícolas simples, diseñados para tareas básicas y sencillas, ya pueden

ayudar a los agricultores en una amplia variedad de operaciones.

Como ocurre con cualquier equipo tecnológico, el nivel de complejidad está estrechamente relacionado con el costo y los requisitos de mantenimiento. La adopción de estas tecnologías sobre el terreno requiere que los agricultores adapten sus prácticas agrícolas y su capacidad según se requiera.

En el Anexo 1 se presentan ejemplos de proyectos avanzados de robots agrícolas disponibles en el mercado.

Recuadro 1.

Dino, el robot que deshierba cultivos



Dino es solo uno de los pocos robots que Naïo Technologies (Francia) ha desarrollado para la agricultura. Este robot está especializado en el deshierbe mecanizado de cultivos hortícolas; reconoce las malezas en las hileras de cultivo y puede discriminar entre la planta comercial y la maleza por medio de IA aplicada al reconocimiento de imágenes. Ya está en producción, y se han vendido más de 100 unidades a agricultores que producen cultivos hortícolas de alto valor. El deshierbe mecanizado elimina los costos y los riesgos relacionados con el uso de herbicidas. También ahorra costos de mano de obra, ya que una persona puede controlar simultáneamente hasta tres robots.

Dado que la tecnología está todavía en sus primeras fases, los costos son elevados y esta no ha alcanzado su pleno potencial; el próximo desafío es dotarla de IA que pueda identificar las plantas a fin de que pueda deshierbar entre las plantas en la hilera de cultivo.

Fuente: **Bloch, S.** 2019. Robotic weeders are racing to replace glyphosate and dicamba. In: *The Counter* [en línea]. Nueva York. [Consultado el 4 de agosto de 2020]. <https://newfoodeconomy.org/robot-weeders-glyphosate-dicamba-herbicide-replacement/>



3. FACTORES QUE IMPULSAN LA ADOPCIÓN

En la actualidad, los principales factores impulsores para que los agricultores inviertan en robots agrícolas se relacionan con aspectos **económicos y ambientales**.

La adopción de robots agrícolas en las explotaciones comerciales ofrece importantes oportunidades de ahorro de costes. Muchos agricultores comerciales tienen dificultades para encontrar suficiente mano de obra para cubrir las necesidades de trabajo durante la época de cosecha, especialmente en las plantaciones de frutas y hortalizas. Los robots agrícolas pueden llenar este vacío y reducir el costo de la mano de obra especializada. Además, pueden operar durante períodos prolongados, ya que no están sujetos a las limitaciones físicas y legales de los seres humanos. En la cosecha, algunos modelos pueden incluso recoger las frutas u hortalizas individualmente, en función del estado de maduración (Figura 9).

Los robots agrícolas permiten al agricultor reducir los insumos – plaguicidas, herbicidas y fertilizantes – con una repercusión positiva en el medio ambiente. El control mecanizado de malezas ya es una realidad; otras funciones que se están desarrollando son la microaplicación de insumos y la detección precoz de plagas, lo que disminuirá considerablemente, o incluso eliminará, la necesidad de insumos. Además, los robots agrícolas son más livianos que la maquinaria convencional (es decir, tractores con aperos o equipos específicos para pulverización o cosecha), por lo que pueden aliviar los problemas relacionados con la compactación del suelo y pueden acceder a campos no aptos para maquinaria pesada (por ejemplo, viñedos en pendiente o terrenos afectados por condiciones de humedad).



Figura 9. Robot agrícola especializado para la recolección de fresas

Notas: Diferentes brazos situados entre las ruedas recogen las bayas individualmente. *Fuente:* Agrobot (2020).

3.1 Desafíos

La implantación de cualquier tecnología conlleva desafíos. A continuación se describen los principales desafíos para la adopción de la robótica agrícola:

Propiedad y gestión de los datos digitales

Las tecnologías digitales requieren la recopilación de datos individuales. Al igual que en otros sectores, los datos producidos por los sensores de los equipos agrícolas son utilizados por las empresas para su modelo empresarial; de hecho, el análisis y el procesamiento de datos son fundamentales para el funcionamiento y la operación correctos de los robots agrícolas. Es necesario contar con **leyes y reglamentos** claros, que deben estar siempre del lado del agricultor/individuo para evitar el uso indebido por parte de terceros. Sin embargo, la continua necesidad de datos para perfeccionar, diseñar o ejecutar la IA en que se basan los programas informáticos que hacen funcionar los equipos autónomos también puede suponer una oportunidad para que los agricultores **moneticen los datos** generados. Además, la generación de datos es una forma de **hacer un seguimiento de los servicios ecosistémicos o los indicadores ambientales** (por ejemplo, la fijación de carbono).

Capacidad

Con la irrupción de cualquier nueva tecnología, la tasa de adopción depende de factores clave: **conocimientos, capacidad y habilidad**. Es posible que muchos agricultores no estén capacitados para manejar los robots agrícolas o no entiendan cómo funcionan. Un buen profesional de la agricultura no es necesariamente experto en tecnologías digitales y automatización, y lo mismo ocurre con los extensionistas y los proveedores de servicios. Por lo tanto, es esencial **crear capacidad** para la adopción de equipos automatizados y su uso correcto; solo si cuentan con capacidad podrán los agricultores liberar el pleno potencial de los robots agrícolas.

En un informe publicado por el Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola (FIDA) y Grow Asia (Asociación Grow Asia, 2019) se destacó que la adopción de tecnologías digitales entre los pequeños agricultores se producía en cinco etapas:

- ▶ Trato presencial
- ▶ Llamada telefónica

- ▶ Diálogo en grupo
- ▶ Descubrimiento activo
- ▶ Contratación del servicio digital

El proceso no es sencillo; debe lograrse el apoyo de varios actores que adopten una serie de metodologías. A falta de incentivos externos (por ejemplo, políticas o precios de mercado), el principal motor del cambio es la **disposición para la adaptación y adopción**.

La creación de capacidad debe ir más allá de los actuales agricultores. Es importante preparar a los jóvenes, los agricultores del futuro, para que se dediquen a la agricultura, familiarizándolos con las nuevas tecnologías durante su escolarización (la programación y la robótica forman parte de los planes de estudio de muchas escuelas secundarias hoy en día). Orientando su interés por las tecnologías digitales hacia las aplicaciones agrícolas, se puede atraer a personas con nuevas ideas al sector de la robótica agrícola. Es fundamental **adaptar los programas académicos y educativos** para que los países dispongan de la mano de obra cualificada necesaria para operar, mantener y desarrollar la tecnología. Además, la adquisición de conocimientos no debe limitarse a los usuarios finales: la creación de capacidad debe llegar a todas las partes interesadas, desde los responsables de formular políticas destinadas a crear el entorno adecuado mediante leyes, incentivos o programas de capacitación (educación, industria y agricultura) hasta los extensionistas, los técnicos y los agricultores.

Adaptación de los sistemas de explotación agrícola

Para los agricultores que introducen robots agrícolas en su sistema de producción, hacer que el robot funcione correctamente no siempre resulta sencillo. Es un error común pensar que los robots simplemente sustituirán los equipos existentes y cumplirán inmediatamente su función en el sistema. En la práctica, sucede lo contrario y, para conseguir los mejores resultados, el **sistema de explotación debe adaptarse al robot**. Los agricultores tienen que adaptarse, tanto en términos de tempística como de mentalidad. Por ejemplo, en el caso de la separación entre hileras o la nivelación del terreno, un agricultor acostumbrado a una determinada separación entre cultivos o a una estructura de cultivo específica (por ejemplo, la arquitectura de los árboles frutales) tiene que adaptar la separación/estructura para asegurarse de que esta se ajuste exactamente a los parámetros operacionales del robot agrícola cuando se mueve entre los cultivos. Ya



hay pruebas de que los agricultores que se adaptan según se requiera consiguen mejores resultados y rentabilidad gracias al buen rendimiento de los robots agrícolas (FIRA, 2018). En la actualidad, los robots agrícolas no son baratos en comparación con las prácticas y los equipos convencionales; como ocurre con cualquier tecnología nueva, el precio de los primeros modelos disponibles es muy elevado. Los robots agrícolas son de interés para agricultores que trabajan en todo tipo de situaciones en una gran variedad de lugares. Sin embargo, algunos robots pueden estar diseñados específicamente para un lugar determinado, en función de los parámetros de una explotación agrícola concreta; esto limita la facilidad de uso de los equipos y compromete los modelos empresariales que incluyen insumos compartidos o la prestación de servicios.

Precio de compra

El **precio de compra** o los **gastos operacionales** pueden superar los recursos disponibles, por lo que la producción no resulta rentable. Por otro lado, en las grandes explotaciones agrícolas de orientación comercial que producen cultivos hortícolas de alto valor, donde los costos de la mano de obra son elevados durante la temporada de cosecha (debido a las grandes necesidades de mano de obra o a la falta de disponibilidad de mano de obra humana), los agricultores encuentran lucrativo y cada vez más

rentable el uso de robots agrícolas especializados, que reducen los costos y la dependencia de mano de obra humana escasa. Aunque los robots agrícolas ya se utilizan en algunas explotaciones hortícolas altamente especializadas, lo que demuestra que es posible lograr menores costos de oportunidad mediante la automatización, es necesario encontrar modelos empresariales rentables en los que el agricultor no sea necesariamente propietario del robot, pero pueda beneficiarse de la tecnología. Dos posibles soluciones, ya establecidas en muchos sistemas agrícolas, son la prestación de servicios y la propiedad cooperativa.

Infraestructura de TI

El concepto de agricultura 4.0 está estrechamente vinculado al uso de las TIC y depende en gran medida de la disponibilidad de una infraestructura de TI adecuada para **adquirir, procesar y compartir datos**. Los robots agrícolas dependen de la disponibilidad de la infraestructura adecuada y, para trabajar autónomamente, se basan en los datos proporcionados por sensores incorporados, sensores remotos (por ejemplo, imágenes vía satélite), sensores externos (imágenes de drones, sondas de suelo), actuadores programados y muchos parámetros agronómicos almacenados en sus programas informáticos. Toda esta información debe ser adquirida y compartida, y es fundamental

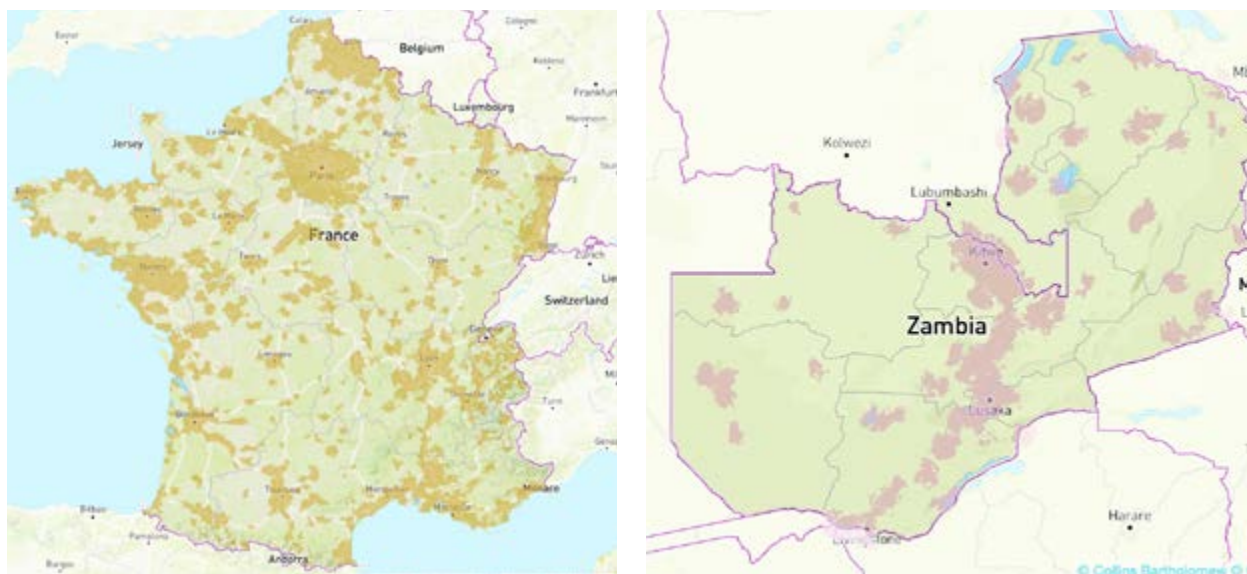


Figura 10. Cobertura de señal de la tecnología 3G en Francia y Zambia

Notas: Las zonas de color representan la cobertura de señal: 675 417 km² en Francia y 752 614 km² en Zambia. *Fuente:* GSMA (2020).

contar con acceso a una infraestructura de IT fiable, con la cobertura de señal, el suministro de energía y la intensidad de señal adecuados para soportar la transferencia de datos, no solo para el posicionamiento por satélite (por ejemplo, como sistema de posicionamiento global [GPS]), sino también para la señal telefónica o de radio. No solo hay que alimentar al robot agrícola con datos para que funcione, sino que el administrador de la explotación y los operarios deben controlar el robot agrícola, procesar los datos que produce mientras funciona y tomar decisiones basadas en la información disponible. Se trata de un desafío importante, ya que el ancho de banda de la señal telefónica no llega a todas las zonas rurales, especialmente en los países en desarrollo (Figura 10). Para adaptar las TIC de los robots agrícolas a las condiciones de los países en desarrollo, pueden requerirse soluciones de ingeniería para entornos y escenarios difíciles.

Mantenimiento y servicio técnico

Para que la adopción de los robots agrícolas sea exitosa, se debe disponer de un **servicio técnico y posventa** adecuado. Al igual que con otras nuevas tecnologías, es una pérdida de tiempo y recursos adquirir una nueva tecnología o un equipo automatizado y descubrir al poco tiempo que no hay piezas de repuesto disponibles a una distancia o dentro de un plazo razonables. Lo mismo ocurre con los técnicos especializados y cualificados que se necesitan para reparar los equipos y brindar apoyo de mantenimiento; además, en el caso de los robots agrícolas, no solo se necesitan mecánicos, sino también ingenieros de TIC y técnicos en robótica.



4. LOS PAÍSES EN DESARROLLO Y PERSPECTIVAS DE LA ROBÓTICA AGRÍCOLA

4.1 Aplicaciones agrícolas

Teniendo en cuenta el amplio abanico de características de los robots agrícolas y a pesar de las dificultades que se enfrentan, la automatización ofrece un gran potencial en muchas aplicaciones en los países en desarrollo.

En la actualidad, existen dos tendencias principales en cuanto a la automatización de las operaciones en los campos agrícolas:

- **Creación desde cero de nuevos equipos** que pueden realizar diferentes operaciones agrícolas especializadas o servir de plataforma de usos múltiples para una serie de tareas similares a las que realiza un tractor cuando se le conecta el apero adecuado para una actividad agrícola determinada.
- **Conversión de equipos agrícolas estándar** en equipos autónomos, mediante el uso de sensores y sistemas automatizados diseñados para sustituir la intervención física del agricultor.

El enfoque que consiste en la automatización de la flota existente de equipos agrícolas estándar cuenta con la aceptación de los agricultores y aprovecha los aperos que ya están disponibles en las explotaciones (Figura 11), y actualmente hay varios proyectos en marcha. Por ejemplo, un tractor convencional puede convertirse en un vehículo automatizado con capacidad para sembrar un campo de forma autónoma. Sin embargo, debido al bajo nivel de mecanización y de utilización de maquinaria en muchos países en desarrollo, no hay maquinaria ampliamente disponible para su transformación en equipos autónomos; por lo tanto, la conversión de equipos no es necesariamente un buen punto de entrada. Por el contrario, la creación de equipos puede ser más eficaz en aquellas zonas donde el uso de maquinaria no está aún generalizado.

Sin embargo, en algunos países en desarrollo —principalmente en Asia— la industria nacional de máquinas y motores pequeños, lo que incluye la reparación y el mantenimiento de la maquinaria, se ha expandido en los últimos decenios y tiene



Figura 11. Proyecto “Hands Free Hectare” (Hectárea de manos libres): una cosechadora de la década de 1980 y un pequeño tractor convencional de cuatro ruedas que arrastra un remolque

Notas: Las dos máquinas trabajan juntas y de forma autónoma para la cosecha de trigo de invierno.

Fuente: Harper Adams University (2020).



posibilidades convertirse en la base de una industria local de equipos autónomos (Justice y Biggs, 2020).

Hasta la fecha, la mayoría de las aplicaciones de los robots agrícolas se han centrado en el control de malezas y la monitorización de los cultivos. Por cierto, una batería eléctrica tiene limitaciones en cuanto a potencia y peso, lo que complica el uso de los robots agrícolas para el laboreo o la preparación del suelo. Sin embargo, si la industria puede diseñar robots agrícolas que puedan sembrar en suelos sin laboreo, la preservación del suelo con la aplicación de la siembra directa y el mantenimiento de la cobertura del suelo presentarían posibles ventajas.

Las opciones de control de malezas van desde opciones mecanizadas (robot con un brazo que las elimina físicamente) hasta opciones químicas (dosis bajas de herbicida aplicadas directamente en las malezas); también se están considerando otras opciones como los rayos infrarrojos y el láser. La tecnología disminuye considerablemente la necesidad de insumos de herbicidas y plaguicidas, reduciendo también los riesgos ambientales y sanitarios que supone su uso indebido.

Los robots agrícolas para la agricultura sin laboreo o de siembra directa con deshierbe localizado combinado (químico y mecanizado) serían un enorme paso adelante; incluso para los pequeños agricultores, significaría que un robot agrícola autónomo podría aplicar un sistema agronómico mecanizado de acuerdo con los principios generales de intensificación sostenible, que también se promueven mediante el paradigma “Ahorrar para crecer”² basado fundamentalmente en los principios de la agricultura de conservación.³ Según Sims *et al.* (2018), pronto se dispondrá de máquinas robóticas comerciales que utilizan GPS cinemático en tiempo real para el control localizado de malezas mediante

una combinación de herbicidas y láser; también existe la posibilidad de crear sistemas de control mecanizado de malezas sin volteo del suelo para los cultivos sin laboreo. Las máquinas robóticas de deshierbe son livianas y económicas y pueden prácticamente eliminar la dañina compactación del suelo ocasionada por el paso de equipos de pulverización pesados durante las operaciones de control de malas hierbas.

4.2 Opciones para los agronegocios

Los pequeños robots a un precio de compra o alquiler asequible representan una posible alternativa en zonas donde la mano de obra es escasa y donde no hay maquinaria convencional disponible o esta es demasiado costosa para los pequeños agricultores. Aunque los agricultores son tradicionalmente propietarios de la mayoría de los equipos agrícolas, en el caso de la robótica, el arrendamiento o un modelo de prestación de servicios puede ofrecer ventajas tanto para los agricultores como para los proveedores de equipos (Lowenberg-DeBoer *et al.*, 2019). Una de las tareas más arduas para los pequeños agricultores es el deshierbe manual; los jóvenes y adolescentes se niegan a realizar este duro trabajo manual, pierden el interés por la agricultura manual rural y abandonan sus pueblos en busca de fuentes de ingresos alternativas en centros urbanos más grandes u otros lugares. Por lo tanto, la introducción y adopción de pequeños robots agrícolas capaces de realizar este tipo de trabajos de forma más eficiente, en menos tiempo y a un precio asequible puede ofrecer un modelo empresarial muy interesante para los jóvenes emprendedores de las zonas rurales. Gracias a la mecanización rural y la automatización parcial, con la aparición de nuevos tipos de empleos, la robótica podría despertar el interés de la juventud rural por las tecnologías agrícolas innovadoras. Los posibles beneficios para los agricultores son numerosos: aumento de la eficiencia, reducción del trabajo pesado y probables mejoras en la producción, lo que se traduce en rendimientos más elevados o sostenidos. El tiempo ahorrado podría dedicarse a otras tareas o negocios de la explotación agrícola, como la avicultura, los huertos u otras oportunidades de ingresos relacionadas con la cadena de valor. Con una estructura de TI estable, los robots agrícolas no requieren la presencia de un ser humano para realizar el trabajo físico: mientras el robot trabaja, el agricultor puede estar realizando otras tareas.

El servicio posventa y los requisitos de infraestructura de TI pueden convertirse en dos grandes obstáculos

² “Ahorrar para crecer” es un paradigma promovido por la FAO que fomenta la producción agrícola intensiva y es a un tiempo sumamente productivo y sostenible desde el punto de vista ambiental. Es posible obtener más información en el enlace siguiente:

<http://www.fao.org/ag/save-and-grow/es/index.html>.

³ La agricultura de conservación es un sistema de cultivo que fomenta el mantenimiento de una cobertura permanente del suelo, la menor alteración posible del suelo (esto es, sin laboreo) y la diversificación de especies vegetales. Potencia la biodiversidad y los procesos biológicos naturales por encima y por debajo de la superficie del suelo, lo que contribuye a un mayor aprovechamiento del agua y una mayor eficiencia en el uso de nutrientes, así como a la mejora y sostenibilidad de la producción de cultivos. Es posible obtener más información en el enlace siguiente:

<http://www.fao.org/conservation-agriculture/es/>

para la introducción y adopción de los robots agrícolas en los países en desarrollo. Por lo tanto, es útil realizar un análisis para comprender qué tipos de robots agrícolas son apropiados y se ajustan al contexto. La tecnología es muy adaptable y puede simplificarse en gran medida, logrando que las máquinas sean fáciles de manejar y mantener. Por ejemplo, un robot diseñado para pulverizar herbicidas en cultivos en hileras puede ser complejo, con múltiples sensores para identificar las malezas y pulverizar cada una de ellas, o bien puede simplificarse para que solo detecte las hileras de cultivo y pulverice junto a ellas (los requisitos de mantenimiento de esta opción son mucho más básicos).

Los robots agrícolas pueden diseñarse para que las piezas de repuesto se obtengan mediante impresión 3D, lo que permite una producción descentralizada y facilita la logística relacionada. También abre oportunidades para el desarrollo de nuevos negocios relacionados con la impresión 3D y el diseño de robots en los países donde se utilizan, en lugar de depender de tecnologías innovadoras de países extranjeros. La introducción de las nuevas tecnologías de los robots agrícolas puede actuar como un ancla para los jóvenes de las zonas rurales, haciendo más atractiva la actividad agrícola y creando nuevas oportunidades para que los empresarios e innovadores ayuden a las pequeñas industrias y empresas.

Un factor clave para el éxito de la adopción de robots agrícolas en los países en desarrollo es diseñar y ofrecer soluciones técnicas de bajo costo (asequibles) pero de gran impacto. Este puede relacionarse con el rendimiento de los cultivos, la reducción de los costos de mano de obra, la puntualidad de las operaciones agrícolas o la reducción del trabajo pesado. Los robots agrícolas de deshierbe simples, así como las tecnologías para mejorar la eficiencia en el uso de los insumos, ofrecen un gran potencial en los países en desarrollo; por ejemplo, mediante robots que distribuyen el fertilizante según las dosis requeridas o que siembran semillas a voleo.

4.3 Reducción de la carga de trabajo de los pequeños agricultores

Las múltiples aplicaciones y posibles usos de los robots agrícolas pueden suponer un importante apoyo para los medios de vida rurales, especialmente una vez que avance el desarrollo del IdC. Por ejemplo,

unas sencillas plataformas con ruedas que sigan a una persona que lleva un teléfono inteligente podrían ayudar a transportar mercancías, agua potable o herramientas pesadas, reduciendo considerablemente el trabajo pesado y aumentando la productividad de una persona que depende de su propia fuerza muscular. El desarrollo de una tecnología de este tipo podría tener una gran repercusión, ya que el transporte de agua potable suele formar parte de la rutina diaria de las mujeres (y les lleva hasta 2 o 3 horas al día) en los países en desarrollo, así como el transporte de mercancías hacia y desde los mercados locales también requiere mucho tiempo. Los robots automatizados también podrían eliminar la necesidad del deshierbe mecanizado, otra tarea manual que suele recaer en las mujeres en el contexto de la agricultura en pequeña escala.

Considerando el costo de compra y la especialización necesaria para manejar y mantener este tipo de equipos, la forma más rentable de que los agricultores consigan estos beneficios puede ser a través de servicios de alquiler, en los que un operador especializado que posee el equipo o trabaja para el propietario del equipo realiza la tarea (por ejemplo, el deshierbe) a cambio de una tarifa de servicio. De este modo, los agricultores pueden beneficiarse de los robots agrícolas sin necesidad de solicitar grandes préstamos o realizar gastos considerables en equipos cuyo uso requiere conocimientos especializados. El modelo de servicio de arrendamiento también crea una entrada para los empresarios de las zonas rurales que cuentan con los conocimientos o el capital y están dispuestos a invertir en el equipo.

4.4 Contribución a la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible

La robótica agrícola puede desempeñar un papel importante en el desarrollo sostenible. De hecho, la tecnología puede contribuir a alcanzar varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas (Figura 12):

- **Mejora de los medios de vida.** La reducción del trabajo pesado mejora directamente los medios de vida de los agricultores, especialmente de los pequeños agricultores. La mejora del rendimiento de los cultivos (en comparación con los que se obtienen con las prácticas tradicionales) aumenta tanto los ingresos como la ingesta de alimentos.



► **Soberanía alimentaria y nutrición adecuada.**

El aumento de la producción de cultivos y la diversificación de los tipos de cultivos gracias a la optimización del sistema de cultivo pueden contribuir a reducir la dependencia de alimentos procedentes de zonas de producción lejanas. Además, la diversificación del consumo de alimentos puede mejorar la ingesta alimentaria y la nutrición general de los agricultores.

► **Repercusión en la dinámica de la migración del medio rural al urbano.** La creación de nuevos tipos de empresas rurales centradas en la producción agrícola, la asistencia técnica y el funcionamiento y mantenimiento de robots agrícolas crea una oportunidad para revitalizar a los jóvenes instruidos y alentarlos a permanecer en las zonas rurales.

► **Creación de empleo y empresas.** La necesidad de mano de obra cualificada y capacitada para manejar y mantener todos los elementos de la tecnología (mecánica, telecomunicaciones, gestión de datos) crea un nuevo nicho de empleo para los jóvenes capacitados y los empresarios rurales para establecer empresas destinadas a una producción de cultivos más eficiente y la prestación de servicios de mano de obra agrícola mecanizada, y también para proporcionar el apoyo técnico relacionado para el funcionamiento y mantenimiento. De este modo, surgirán nuevos tipos de modelos empresariales.

► **Reducir la brecha tecnológica.** La integración de distintos tipos de tecnologías, como el aprendizaje

automático, el posicionamiento por satélite o los sistemas automatizados, contribuye a reducir la brecha entre los países desarrollados y los países en desarrollo. La robótica es intrínsecamente adaptable, lo que facilita la adopción de la tecnología en diferentes contextos. Esto implica la posibilidad de dejar atrás la evolución tecnológica de las operaciones mecanizadas para la producción de cultivos, pasando directamente de la agricultura de subsistencia basada en el trabajo manual o la tracción de animales de tiro a la producción agrícola comercial basada en la agricultura de precisiónthe technological evolution of mechanized operations for crop production, passing directly from subsistence farming based on manual labour or draught animal power to commercial farming based on precision agriculture.

► **Intensificación de la producción sostenible.** La adopción de procedimientos de agricultura de precisión a fin de optimizar el uso de los recursos y aumentar la puntualidad de las operaciones de cultivo mediante, por ejemplo, la siembra directa, el deshierbe mecanizado a nivel individual o la pulverización a muy bajo volumen, permite a los agricultores producir más con menos.

► **Gestión sostenible de los recursos.** La reducción del uso de insumos, la limitación de la alteración del suelo y el aumento de la producción sin comprometer los recursos naturales existentes pueden mejorar los medios de vida de los agricultores y la población rural de forma sostenible.



Figure 12. Objetivos de Desarrollo Sostenible a los que puede contribuir la robótica agrícola.

5. CONCLUSIÓN

Aunque los robots agrícolas aún están en sus inicios, hay muestras muy claras de su potencial. Los desafíos por delante no son solo técnicos, sino también socioeconómicos, sobre todo en lo que respecta a la creación de capacidad y a la necesidad de comprender plenamente los principios y las tecnologías en cuestión. Sin embargo, dada su versatilidad, los robots agrícolas podrán realizar tareas en condiciones que, por naturaleza, requieren mucha mano de obra, por lo que contribuirán en gran medida a mejorar la producción agrícola sostenible y los medios de vida de los pequeños agricultores de los países en desarrollo. Los robots agrícolas representan una oportunidad para aumentar la

eficiencia de la producción de cultivos, mejorar la sostenibilidad agrícola y llevar la innovación y las tecnologías avanzadas a nuevas esferas. La FAO desempeña un papel importante en este proceso, impulsando el desarrollo inclusivo de esta tecnología y garantizando que las nuevas tecnologías agrícolas, en la forma de herramientas automatizadas y robots, ayuden a mejorar y promover los principios de intensificación sostenible de la agricultura. La FAO tiene por objetivo ayudar a que la tecnología sea accesible para los pequeños agricultores, velando por que se elaboren y apliquen políticas y marcos adecuados a ese fin.





REFERENCIAS

- Agerris.** 2020. *Agerris* [online]. Chippendale, Australia. [Cited 10 September 2020]. <https://agerris.com/>
- Agrobot.** 2020. *Agrobot* [online]. Huelva, Spain. [Cited 4 August 2020]. <https://www.agrobot.com/>
- Agrointelli.** 2018. *Agrointelli* [online]. Aarhus, Denmark. [Cited 4 August 2020]. <http://agrointelli.com>
- Aubert, B.A., Schroeder, A. & Grimaudo, J.** 2012. IT as enabler of sustainable farming: An empirical analysis of farmers' adoption decision of precision agriculture technology. *Decision Support Systems*, 54(1): 510–520.
- Barnes, A.P., Soto, I., Eory, V., Beck, B., Balafoutis, A., Sanchez, B., Vangeyte, J., Fountas, S., van der Wal, T. & Gomez-Barbero, M.** 2019. Exploring the adoption of precision agricultural technologies: a cross regional study of EU farmers. *Land Use Policy*, 80: 163–174.
- Bechar, A. & Vigneault, C.** 2016. Agricultural robots for field operations: Concepts and components. *Biosystems Engineering*, 149: 94–111.
- Bechar, A. & Vigneault, C.** 2017. Agricultural robots for field operations. Part 2: Operations and systems. *Biosystems Engineering*, 153: 110–128.
- Crosby, M., Nachiappan, Pattanayak, P., Verma, S. & Kalyanaraman, V.** 2015. *BlockChain technology. Beyond Bitcoin*. Sutardja Center for Entrepreneurship & Technology. University of California. (also available at <https://scet.berkeley.edu/wp-content/uploads/BlockchainPaper.pdf>).
- Emmi, L., Gonzalez-de-Soto, M., Pajares, G. & Gonzalez-de-Santos, P.** 2014. New trends in robotics for agriculture: Integration and assessment of a real fleet of robots. *The Scientific World Journal*, Volume 2014: ID 404059 [online]. [Cited 21 July 2020]. <https://doi.org/10.1155/2014/404059>
- Encyclopedia Britannica.** 2020. *Encyclopedia Britannica* [online]. [Cited 4 August 2020] <https://www.britannica.com/>
- FAO.** 2015. *Decent work indicators for agricultural and rural areas: Conceptual issues, data collection challenges and possible areas for improvement*. FAO Statistics Division. Working Paper Series ESS 15–10. Rome. 80 pp. (also available at <http://www.fao.org/3/a-i5060e.pdf>).
- FAO.** 2018. Hire services as a business enterprise: A training manual for small-scale mechanization service providers. Rome. (also available at <http://www.fao.org/3/I9207EN/i9207en.pdf>).
- FAO.** 2019a. *Counting crops + Drops: using remote sensing to help grow the future together* [video]. [Cited 4 August 2020]. <https://www.youtube.com/watch?v=ZX7SOhk97hA>
- FAO.** 2019b. Smallholders and family farming. In: *Family Farming Knowledge Platform* [online]. Rome. [Cited 21 July 2020]. <http://www.fao.org/family-farming/themes/small-family-farmers/en/>
- FIRA.** 2018. FIRA – *International Forum of Agricultural Robotics* [video]. [Cited 4 August 2020]. <https://www.youtube.com/watch?v=23Vvlgijug>
- Grow Asia Partnership.** 2019. *Driving agritech adoption: Insights from Southeast Asia's farmers* (also available at <http://exchange.growasia.org/system/files/Driving%20AgriTech%20Adoption%20-%20Insights%20from%20Southeast%20Asia%27s%20Farmers.pdf>).
- GSMA.** *Mobile coverage maps* [online]. [Cited 4 August 2020]. <https://www.mobilecoveragemaps.com/#minimaps>.
- Hands Free Hectare.** 2020. *Hands Free Hectare* [online]. [Cited 8 September 2020]. https://www.handsfreehectare.com/uploads/1/1/4/0/11403595/hfh2-harvest-9_1_orig.jpg



Justice, S. & Biggs, S. 2020. The spread of smaller engines and markets in machinery services in rural areas of South Asia. *Journal of Rural Studies*, 73: 10–20.

Kiritsis, D. 2011. Closed-loop PLM for intelligent products in the era of the Internet of things. *Computer-Aided Design*, 43: 479–501 [online]. [Cited 21 July 2020]. doi:10.1016/j.cad.2010.03.002

Lowder, S.K., Scoet, J. & Raney, T. 2016. The number, size, and distribution of farms, smallholder farms, and family farms worldwide. *World Development*, 87: 16–29.

Lowenberg-DeBoer, J., Huang, I.Y., Grigoriadis, V. & Blackmore, S. 2019. Economics of robots and automation in field crop production. *Precision Agriculture*, 21: 278–299.

Murray, U., Gebremedhin, Z., Brychkova, G. & Spillane, C. 2016. Smallholder farmers and climate smart agriculture: Technology and labor-productivity constraints amongst women smallholders in Malawi. *Gender, Technology and Development*, 20(2): 117–148.

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). 2020. What is remote sensing? In *National Ocean Service* [online]. [Cited 21 July 2020]. <https://oceanservice.noaa.gov/facts/remotesensing.html>

Naio Technologies. 2016. *Naio Technologies* [online]. Escalquens, France. [Cited 4 August 2020]. https://www.naio-technologies.com/wp-content/uploads/2016/02/naoi-oz-lafranceagricole.fr_.jpg

Pierpaoli, E., Carli, G., Pignatti, E. & Canavari, M. 2013. Drivers of precision agriculture technologies adoption: A literature review. *Procedia Technology*, 8: 61–69.

PlantVillage. 2013. *PlantVillage* [online]. State College, PA, USA. [Cited 4 August 2020]. <https://plantvillage.psu.edu/>

Sáiz-Rubio, V. & Rovira-Más, F. 2020. From smart farming towards agriculture 5.0: A review on crop data management. *Agronomy*, 10(2): 207 [online]. [Cited 21 July 2020]. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020207>

Sims, B., Corsi, S., Gbehounou, G., Kienzle, J., Taguchi, M. & Friedrich, T. 2018. Sustainable weed management for conservation agriculture: Options for smallholder farmers. *Agriculture*, 8(8): 118 [online]. [Cited 21 July 2020]. <https://doi.org/10.3390/agriculture8080118>

Vasconez, J.P., Kantor, G.A. & Auat Cheein, F.A. 2019. Human–robot interaction in agriculture: A survey and current challenges. *Biosystems Engineering*, 179: 35–48.

Voutier, P. 2019. *Driving AgriTech adoption: Insights from Southeast Asia's farmers*. IFAD and GrowAsia. (also available at <http://exchange.growasia.org/system/files/Driving%20AgriTech%20Adoption%20-%20Insights%20from%20Southeast%20Asia%27s%20Farmers.pdf>).



ANEXO

Lista de tipologías y ejemplos de robots agrícolas

Esta lista no es exhaustiva y puede quedar obsoleta en unos pocos años, ya que la tecnología evoluciona rápidamente. La intención es mostrar los distintos tipos de productos disponibles actualmente para que los lectores puedan familiarizarse con los productos de robótica agrícola. La inclusión de un fabricante en esta lista no significa que sus productos estén respaldados o recomendados por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

CUADRO A1.1

Robots de una sola función, especializados en un trabajo o tarea específicos

Producto	Función	Tareas realizadas y otra información	Sitio web
Cerescon	Robot recolector de espárragos	Recolecta espárragos; cubre la escasez de mano de obra especializada para la cosecha manual	https://www.cerescon.com/EN/home
Deserbiocut	Robot deshierbador	Deshierba y mantiene las cubiertas del suelo; prototipo de robot deshierbador mecánico alimentado por energía solar	https://deserbiocut.com/
Jackal	Plataforma de investigación	Explora y supervisa; está equipada con sensores de muchos tipos diferentes	https://www.clearpathrobotics.com/jackal-small-unmanned-ground-vehicle/
HV-100	Robot de manipulación de materiales	Manipula materiales verdes y plantas contenidas en macetas	https://www.public.harvestai.com/
Swarm Farm	Robot de protección de cultivos	Pulveriza productos para la protección de los cultivos; puede trabajar en "enjambres" de equipos	https://www.swarmfarm.com/
Ecorobotix	Robot deshierbador	Deshierba y mantiene las cubiertas del suelo; prototipo de robot deshierbador mecánico alimentado por energía solar	https://www.ecorobotix.com/en/autonomous-robot-weeder/
Dino	Robot deshierbador	Deshierba cultivos de hortalizas	https://www.naio-technologies.com/en/agricultural-equipment/large-scale-vegetable-weeding-robot/
Ted	Robot deshierbador	Deshierba cultivos de hortalizas	https://www.naio-technologies.com/en/agricultural-equipment/vineyard-weeding-robot/
Oz	Robot deshierbador	Deshierba cultivos protegidos	https://www.naio-technologies.com/en/agricultural-equipment/weeding-robot-oz/
Harvest Croo	Robot recolector de fresas	Inspecciona y recoge las fresas maduras; cubre la escasez de mano de obra especializada para la recolección manual	https://harvestcroo.com/
Vitirover	Robot segador	Corta las cubiertas permanentes en cultivos perennes	https://www.vitirover.fr/en-robot
Agrobot	Robot autónomo recolector de fresas	Cosecha fresas en cultivos en hileras	https://www.agrobot.com
Guss	Robot pulverizador autónomo	Se desplaza por los huertos sin necesidad de un operario a bordo utilizando una sofisticada combinación de GPS, sistema lidar, sensores del vehículo y programas informáticos propios	https://gussag.com
Vinerobot	Robot autónomo de exploración de viñedos	Explora los viñedos y supervisa los parámetros del suelo y de los cultivos para asesorar sobre el riego, los tratamientos y el estado de los cultivos	https://www.youtube.com/watch?v=O13z10vwM3Y

Notas: GPS – Sistema de posicionamiento global.



CUADRO A1.2

Plataformas para usos múltiples: pueden realizar dos o más tareas simultáneamente o de forma intercambiable

Producto	Función	Tareas realizadas y otra información	Sitio web
Digital Farmhand Robot/Agerris	Plataforma de usos múltiples	Se acopla a los aperos convencionales, diseñados para la agricultura en pequeña escala	www.agerris.com/
DOT	Plataforma de usos múltiples	Se acopla a aperos convencionales	www.seedtorun.com
Farmdroid	Plataforma sembradora-deshierbadora	Alimentada con energía solar	http://farmdroid.dk/
Husky	Plataforma de desarrollo	Plataforma autónoma utilizada para transportar carga útil, llevar sensores o servir para otros tipos de operaciones	https://www.clearpathrobotics.com/husky-unmanned-ground-vehicle-robot/
Robotti	Plataforma para aperos	Plataforma con motor diésel que puede manejar equipos de laboreo, sembradoras y deshierbadoras	http://agrointelli.com/robotti-diesel.html#rob.diesel
CEOL	Plataforma para aperos	Plataforma autónoma que puede transportar aperos convencionales para la preparación del suelo, la siembra, el deshierbe y la pulverización	https://www.agreenculture.fr/

CUADRO A1.3

Equipos agrícolas automatizados: equipos convencionales que pueden trabajar sin personal con la instalación de conjuntos de comunicación y control

Producto	Función	Tareas realizadas y otra información	Sitio web
Hands Free Hectare	Automatización de los equipos existentes	Este proyecto de la Universidad Harper Adams ha explotado 1 ha durante tres años cultivando cereales sin ninguna intervención humana directa sobre el terreno y utilizando equipos agrícolas automatizados ya existentes. Actualmente está ampliando y probando la tecnología con los agricultores de la zona.	http://www.handsfreehectare.com/
Bear Flag	Tecnología de conducción autónoma para tractores y aperos	La empresa ha desarrollado una tecnología que convierte los tractores y aperos convencionales en equipos autónomos autodirigidos.	http://bearflagrobotics.com/
University of Hokkaido	Automatización de los equipos existentes	El Instituto de Investigación Agrícola, en colaboración con fabricantes de maquinaria japoneses, ha desarrollado una tecnología que permite a los tractores y equipos existentes trabajar en "enjambres" de equipos y realizar operaciones agrícolas de forma autónoma.	https://youtu.be/pvzez_CWztQ







