

De la agricultura inteligente hacia la agricultura 5.0: Una revisión sobre la gestión de datos de cultivos

Verónica Saiz-Rubio *^{ORCID} and Francisco Rovira-Más^{ORCID}

Agricultural Robotics Laboratory (ARL), Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n. 46022 Valencia, Spain; frovira@dmta.upv.es

* Correspondence: vesairu@upv.es; Tel.: +34-963-877-291

Received: 2 December 2019; Accepted: 17 January 2020; Published: 3 February 2020

Resumen: La información que ofrecen los cultivos se convierte en decisiones rentables sólo cuando es manejada eficientemente. Los avances actuales en la gestión de datos están haciendo que la agricultura inteligente crezca exponencialmente, como así también, los datos se han convertido en el elemento clave de la agricultura moderna para ayudar a los productores en la toma de decisiones. Aparecen ventajas valiosas con información objetiva adquirida a través de sensores con el objetivo de maximizar la productividad y la sostenibilidad. Este tipo de granjas gerenciadas a partir de la gestión de datos pueden aumentar la eficiencia al evitar el mal uso de los recursos y la contaminación del entorno. La agricultura basada en datos, con la ayuda de soluciones robóticas que incorporan inteligencia artificial, sienta las bases para la agricultura sostenible del futuro. Este documento revisa el estado actual de los sistemas avanzados de gestión de campos revisando cada paso crucial, desde la adquisición de datos en cultivos hasta aplicaciones de tasa variable, para que los productores puedan optimizar sus decisiones para ahorrar dinero mientras se protege el medio ambiente y se transforma la producción de alimentos para igualar sosteniblemente el crecimiento demográfico.

Palabras clave: agricultura 4.0; big data; sistema de información de gestión agrícola (FMIS); robótica IoT; tecnología de velocidad variable (VRT); AI

1. Introducción

El sector agrícola está experimentando una transformación impulsada por las nuevas tecnologías, las cuales parecen muy prometedoras ya que permitirán que el sector primario pase al siguiente nivel de productividad y de rentabilidad [1]. La Agricultura de precisión, que consiste en aplicar insumos (lo que se necesita) cuando y donde se necesita, se ha convertido en la tercera ola de la revolución agrícola moderna (la primera fue la mecanización y la segunda la revolución verde con su modificación genética [2]). Hoy en día, se está mejorando a través de un aumento en los conocimientos de los sistemas agrícolas debido a la disponibilidad de mayores cantidades de datos. El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) ya informó (en octubre de 2016) que las tecnologías de agricultura de precisión aumentaron los rendimientos netos y las ganancias operativas [3]. También, al considerar el medio ambiente, las nuevas tecnologías se aplican cada vez más para mantener la sostenibilidad de la producción agrícola. Sin embargo, la adopción de estas tecnologías implica incertidumbre. Según un análisis de mercado, los factores que facilitarían la adopción de tecnologías agrícolas sostenibles incluye una mejor educación y capacitación de los agricultores, el intercambio de información, financiación y el aumento de la demanda de los consumidores por alimentos orgánicos y/o sustentables [4]. Al aplicar estas nuevas tecnologías, el desafío para recuperar datos de los cultivos debe salir como algo coherente y valioso, porque los datos en sí mismos no son útiles, solo los números o imágenes. Los establecimientos agrícolas que deciden ser impulsados por la tecnología, de alguna manera, muestran valiosas ventajas tales como ahorrar dinero y trabajo, tener una mayor producción y/o una reducción de costos con un mínimo esfuerzo, y produciendo alimentos de calidad con prácticas más amigables con el medio ambiente [5]. Sin embargo, llevar estas ventajas a la granja dependerá no solo de la disposición de los productores para adoptar nuevas tecnologías en sus campos, sino también del potencial específico de cada granja en términos de escala económica, a medida que el margen de ganancia aumenta con el tamaño de la granja. El USDA informó que, en promedio, el beneficio de los productores de maíz que adoptaron agricultura de precisión fue 163 u\$s/Ha superior que los no

adoptantes, teniendo en cuenta que las tasas de adopción más altas de las tres tecnologías (mapeos, banderilleros y equipos de tasa variable) estaban en campos de más de 1500 hectáreas [3]. Tales márgenes incluso pueden llegar hasta 272 dólares dependiendo del cultivo. Un mayor uso de los servicios de agricultura inteligente es vital no solo para mejorar el rendimiento financiero de un establecimiento agrícola, sino también para satisfacer las necesidades alimentarias de una población mundial en expansión [6].

El propósito final de este documento es demostrar cómo tomar decisiones con la agricultura moderna basada en datos puede conducir a una actuación sostenible y rentable para alimentar a las personas y reducir el daño al medio ambiente. Para evaluar cómo la agricultura moderna puede ayudar en un proceso de toma de decisiones sostenible, este artículo revisa los pasos principales de una agricultura basada en la información y se centra en los sistemas de gestión de datos mediante la revisión de las aplicaciones recientes relacionadas con cada paso crucial, desde la adquisición de datos a campos hasta la ejecución de tareas con equipos de dosis variable.

2. Agricultura basada en datos: Agricultura 4.0

Esta nueva filosofía centrada en los datos agrícolas se ha expresado con varios nombres: Agricultura 4.0, Agricultura Digital o Agricultura Inteligente, y nació cuando se combinaron la telemática y la gestión de datos en el hoy ya conocido concepto de agricultura de precisión, mejorando la exactitud de las operaciones [7]. Como resultado, la Agricultura 4.0 se basa en los principios de agricultura de precisión, con los productores utilizando sistemas que generan datos en sus campos, que se procesarán de manera tal de tomar sus propias decisiones estratégicas y operativas. Tradicionalmente, los agricultores han ido a sus campos para verificar el estado de sus cultivos y tomar decisiones basadas en su experiencia acumulada. Este enfoque ya no es sostenible ya que, entre otras razones, algunos campos son demasiado grandes para ser manejados eficientemente de acuerdo con los tres criterios que guiaran la agricultura en los próximos años: eficiencia, sostenibilidad y disponibilidad (para las personas). Los sistemas de gestión avanzados en el contexto de la agricultura inteligente proporcionan soluciones prácticas. Además, a pesar de que algunos agricultores tienen una larga experiencia acumulada después de muchos años de trabajo en el campo, la tecnología puede proporcionar una herramienta sistemática para detectar problemas imprevistos difíciles de notar mediante la inspección visual en controles ocasionales. En cuanto a la voluntad de adoptar tecnologías modernas, los jóvenes agricultores muestran una actitud más positiva que los mayores, ya que los primeros pueden apoyar su limitada experiencia con nuevas herramientas tecnológicas inteligentes que proporcionan información clave. Sin embargo, la edad promedio de los agricultores en las últimas décadas ha aumentado de manera alarmante: alrededor de 58 años en Estados Unidos y Europa, 60 en África subsahariana, 63 años en Japón [8,9]. Afortunadamente, esta tendencia se espera cambiar. Se están estableciendo varias políticas europeas para apoyar una renovación generacional, por ejemplo, facilitando el acceso a la inversión inicial, préstamos, asesoramiento comercial y capacitación [9]. Una renovación generacional en un contexto de desarrollo rural va más allá de una reducción en la edad promedio de los agricultores; también se trata de capacitar a una nueva generación de jóvenes agricultores altamente calificados para que traigan todos los beneficios de la tecnología para apoyar prácticas agrícolas sostenibles [10]. Esto implica que los jóvenes agricultores necesitarán transformar la situación actual en campos más modernos y competitivos con el propósito de mantener la producción de alimentos viables mientras se mejora la competitividad de la cadena agroalimentaria, porque con tecnologías avanzadas y nuevas ideas, los jóvenes pueden transformar el sector agrícola [8].

2.1. Internet de las cosas: colectando información

Internet de las cosas (IoT) en un contexto agrícola se refiere al uso de sensores y otros dispositivos para convertir cada elemento y acción involucrada en la agricultura en datos. Se ha informado una estimación que entre el 10% y 15% de los agricultores estadounidenses están utilizando soluciones de IoT en el campo, a través de 1,200 millones de hectáreas y 250,000 establecimientos [11]. IoT impulsa la agricultura 4.0 [12]; de hecho, las tecnologías IoT son una de las razones por las cuales la agricultura puede generar una gran cantidad de información valiosa, y el sector agrícola espera ser muy influenciado por los avances en estas tecnologías [13]. Se estima que, con nuevas técnicas, el IoT tiene el potencial de aumentar la productividad agrícola en un 70% para 2050 [14], lo cual es positivo, porque de acuerdo con Myklevy et al., el mundo necesita aumentar la producción mundial de alimentos en un 60% para 2050 debido a un crecimiento de la población de más de nueve mil millones de personas [15]. La principal ventaja del uso de IoT es

lograr mayores rendimientos de los cultivos con menores costos. Por ejemplo, estudios de OnFarm descubrieron que para una granja promedio que usa IoT, el rendimiento aumenta en 1.75% y los costos de energía caen 17 a 32 dólares por hectárea, mientras que el uso de agua para riego cae en un 8% [12].

2.2. Big Data: análisis de datos masivos

En la era actual basada en la tecnología, el concepto de big data está presente en muchos sectores económicos, pero ¿ya está disponible para la agricultura? La cantidad cada vez mayor de datos disponibles para la gestión del campo hace necesaria la implementación de algún tipo de proceso automático para extraer información. Sin embargo, el volumen de datos actualmente recopilados en la mayoría los campos agrícolas comerciales, posiblemente, aún no están en el nivel de ser considerados como big data. De acuerdo a Manyica y col. [16], big data tiene tres dimensiones: volumen, velocidad y variedad. Kunisch [17] agregó un cuarta V por veracidad. Finalmente, una quinta V fue agregada por Chi et al. para la valorización [18].

En general, las cinco V (dimensiones) de Big Data representan:

- El volumen se refiere a conjuntos de datos (datasets) cuyo tamaño está más allá de la capacidad de las herramientas de software de bases de datos típicas para capturar, almacenar, administrar y analizar información. Esta definición incluye una estimación de qué tamaño debe tener un conjunto de datos para ser considerado grande, y puede variar según el sector de estudio, dependiendo de las herramientas de software que están comúnmente disponibles y de los tamaños de los datasets, que generalmente comienzan en el rango de terabytes [16].
- La velocidad se refiere a la capacidad de adquirir, comprender e interpretar eventos a medida que ocurren. En agricultura, esto se referiría a aplicaciones en tiempo real, datos siendo procesados en el campo para aplicar tasas variables de productos químicos en equipos con tecnologías de aplicación de dosis variable.
- La variedad se refiere a los diferentes formatos de datos (videos, texto, voz) y los diversos grados de complejidad. Esta situación no es extraña en la agricultura cuando se utilizan diferentes fuentes de datos para trabajar en escenarios complejos como imágenes y sondas de suelo o clima.
- Veracidad se refiere a la calidad, fiabilidad y confianza general de los datos.
- La valorización es la capacidad de propagar el conocimiento, la apreciación y la innovación [18].

En el contexto del manejo de cultivos, Kunisch [17] concluyó que la big data solo es aplicable en algunos casos en agricultura, dependiendo de cada campo y su nivel de adopción de tecnología. Sin embargo, el informe Proagrica [19] confirmó que la big data está siendo aplicada cada vez más en el sector agrícola. Kamilaris et al [18] citaron 34 trabajos en los que se utilizó big data en aplicaciones agrícolas, y Wolfert et al [20] publicaron una revisión sobre aplicaciones de big data en Smart Farming. En línea con esta tendencia, el Consorcio de Centros Internacionales de Investigación Agrícola (CGIAR, Montpellier, Francia) creó una plataforma para Big Data en Agricultura con el propósito de usar enfoques de big data para resolver problemas de desarrollo agrícola más rápido, mejor y a mayor escala que antes [21].

2.3. Agricultura 5.0: Robótica e Inteligencia Artificial (IA) para ayudar con la nutrición de la población

Los grandes desafíos de la ingeniería típicamente estimulan grandes soluciones a través de tecnologías disruptivas, y la Agricultura 5.0 es probablemente la más importante en la primera mitad del siglo XXI. El concepto de Agricultura 5.0 implica que los campos están siguiendo los principios de Agricultura de Precisión y están utilizando equipos que involucran operaciones no tripuladas y sistemas autónomos de soporte de decisiones. Por lo tanto, Agricultura 5.0 implica el uso de robots y de algunas formas de IA [22]. Por tradición, las granjas han necesitado muchos trabajadores, en su mayoría estacionales, para cosechar y mantener las granjas productivas. Sin embargo, ha habido un gran cambio social. Se pasó de grandes cantidades de personas que vivían en zonas rurales a personas involucradas al ámbito agrícola que viven ahora en ciudades; como resultado, los establecimientos agrícolas se enfrentan al desafío de una escasez de mano de obra. Una solución para ayudar con esta escasez de trabajadores son los robots agrícolas que integran funciones de IA. Según un estudio de Forbes [23], los robots agrícolas incrementan la fuerza de trabajo humana y pueden cosechar cultivos a un mayor ritmo y volumen, y más rápido que los trabajadores humanos. Aunque todavía hay muchos casos en los que los robots no son tan rápidos como los humanos, la agricultura actualmente está desarrollando sistemas robóticos para trabajar en el campo y ayudar a los productores con tareas tediosas [24–27], empujando los sistemas agrícolas al nuevo concepto de Agricultura 5.0. De acuerdo con Reddy et al. [28] el

advenimiento de los robots en la agricultura aumentó drásticamente la productividad en varios países y redujo los costos operativos de la granja. Como se dijo antes, las aplicaciones robóticas para la agricultura están creciendo exponencialmente [27], ofreciendo soluciones prometedoras para la agricultura inteligente en el manejo de la escasez de mano de obra y de una rentabilidad decreciente desde hace ya mucho tiempo; sin embargo, como en la mayoría de las innovaciones, existen limitaciones importantes para hacer frente a las primeras etapas actuales. Estas tecnologías siguen siendo demasiado caras para la mayoría de los agricultores, especialmente para aquellos con pequeñas superficies agrícolas [29], porque la economía de escala hace que las pequeñas granjas individuales sean menos rentables [30]. Sin embargo, el costo de la tecnología disminuye con el tiempo, y los robots agrícolas seguramente serán implementados en el futuro como la alternativa para lograr una mayor producción [4,31]. La producción agrícola mundial y los rendimientos de los cultivos disminuyeron en 2015. El concepto de robótica agrícola fue introducido para superar estos problemas y satisfacer la creciente demanda de altos rendimientos. Las innovaciones robóticas están impulsando al mercado mundial de productos agrícolas, según el informe Verified Market Intelligence, los robots agrícolas serán capaces de completar tareas de campo con mayor eficiencia en comparación con los agricultores [32].

Las nuevas empresas de tecnología agrícola han recaudado más de 800 millones de dólares en los últimos cinco años [31]. Las mismas, comenzaron a ganar impulso en 2014, en línea con un creciente interés en AI [33], usando la robótica y el aprendizaje automático (machine learning) para resolver problemas en la agricultura. De hecho, la financiación de riesgo de capital en IA ha aumentado un 450% en los últimos 5 años [34]. Esta nueva agricultura pretende hacer más con menos, porque nutrir a las personas al tiempo que se incrementa la producción de manera sostenible y el cuidado del medio ambiente serán cruciales para los próximos años, como estima la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) que, en 2050, habrá una población mundial de 9.600 millones de personas [35]. Los sensores agrícolas de tecnología avanzada pueden ayudar a enfrentar el desafío; estos proporcionan información detallada sobre el suelo, el estado de los cultivos y condiciones ambientales para permitir aplicaciones precisas de productos fitosanitarios, lo que resulta en una reducción en el uso de herbicidas y pesticidas, mejora la eficiencia en el uso del agua y aumenta el rendimiento y calidad de los cultivos [2].

3. Gestión basada en datos para la agricultura avanzada: etapas principales

Las mediciones de los parámetros claves de los cultivos deben procesarse de manera eficiente para que números o imágenes se convierten, sin ambigüedades, en información valiosa. El manejo de los cultivos basado en datos ya ha evolucionado desde que la Agricultura de Precisión salió a la luz hace ya treinta años, pero ha sido profundamente transformado por la actual era de la información digital. Tradicionalmente, y en aquellos lugares donde aún la tecnología no ha llegado, la gestión del campo consiste en inspeccionar visualmente el desarrollo de los cultivos para llegar a un diagnóstico con el cual los agricultores toman decisiones y actúan dando diferentes tratamientos a sus cultivos. Este enfoque se basa en la experiencia de campo y en la información percibida a través de los ojos del agricultor. Además, los productores asociados pueden seguir las recomendaciones del técnico o ingeniero de la cooperativa contratado por la sociedad a la que pertenecen. En establecimientos agrícolas donde la tecnología avanzada se ha implementado, la gestión del campo varía según el ciclo operativo que se muestra en la Figura 1. Este sistema de gestión basado en datos objetivos de campo y la toma de decisiones inteligentes comienza con el actual cultivo para gestionar, aprovechando su variabilidad interna, tanto espacial como temporal. La plataforma se refiere a los medios físicos con los que se adquiere la información, siendo los sensores los elementos específicos a través del cual se obtienen datos objetivos. Los datos incluyen la información recibida directamente de parámetros medidos desde el cultivo, el suelo o el ambiente. Se pueden recibir los datos de los sensores de múltiples maneras, desde insertar un pen drive en un puerto USB para obtener los archivos [36] hasta recuperar datos de aplicaciones de software sincronizadas a Internet. El nexo entre los datos y la etapa de decisión implica rutinas de filtrado y algoritmos de IA para obtener solo los datos correctos y ayudar al productor a tomar decisiones correctas. Finalmente, la actuación se refiere a la ejecución física de una acción ordenada por el sistema de decisión, y generalmente se lleva a cabo con equipos avanzados que pueden recibir órdenes de una unidad de control computarizada. A medida que cada acción tiene lugar sobre el cultivo, el ciclo comienza y termina; la respuesta del cultivo es registrada por sensores especializados y el ciclo continúa sistemáticamente hasta el momento de la cosecha, que marca el final del ciclo de vida del cultivo.

Los siguientes párrafos y la Figura 1 explican el ciclo que involucra a un sistema de gestión basado en datos de la agricultura avanzada., incluidos ejemplos representativos para cada etapa. La Tabla 1 clasifica los trabajos científicos referenciados en este estudio en las diferentes categorías de la Figura 1.

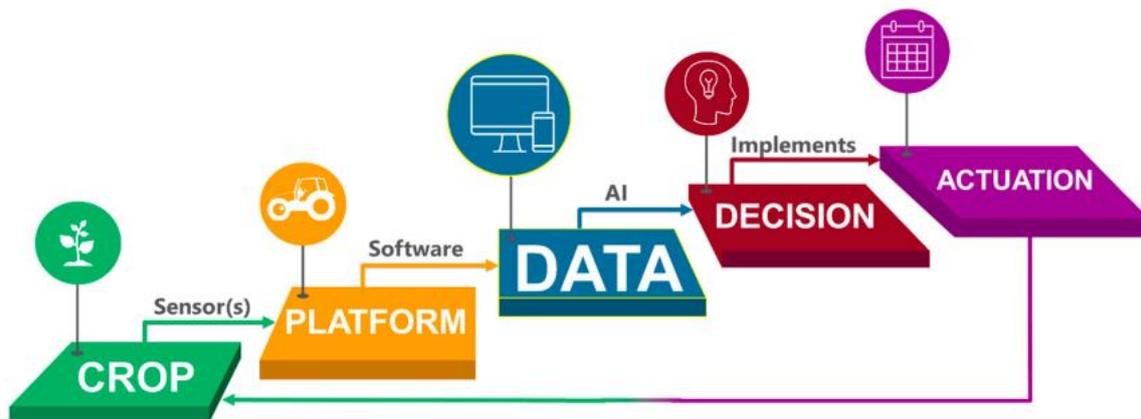


Figura 1. Ciclo de gestión basado en la información para la agricultura avanzada.

Tabla 1. Clasificación de los artículos de investigación a los que se hace referencia en el presente estudio.

Category	Subcategory	References
CROP 	Precision and Smart Farming	[2,4,7,29,35,37–40]
	Social and economic impact	[3,5,6,8–11,31]
	Management zones	[38,41–43]
PLATFORM 	Remote sensing (satellite and aircraft)	[44–46]
	Proximal sensing (ground vehicles)	[24–28,36,45–63]
DATA 	Big data	[1,16–21,30,32]
	Internet of Things (IoT)	[12–14,64]
	Mapping	[42,65–69]
	Information Systems (GIS, FMIS)	[64,70–80]
DECISION 	Artificial Intelligence (AI)	[22,23,33,34,81]
	Decision Support Systems (DSS)	[77,82–90]
ACTUATION 	Variable Rate Applications (VRA)	[91–93]

3.1. Etapa I: El cultivo como principio y fin del ciclo de gestión agrícola: análisis de variabilidad

Independientemente de cómo se gestionará el cultivo, se supone un cierto grado de variabilidad espacial para todos los campos por naturaleza. Según Searcy [37], la variabilidad natural está influenciada por el clima dentro de la etapa de crecimiento y de año en año; entonces, se pueden necesitar datos de varios años para determinar tendencias en los parámetros de interés y, por lo tanto, los datos se convierten en un ingreso normal al sistema de gestión de la granja. Por lo tanto, la necesidad de monitorear los cultivos proviene de la existencia de variabilidad, pero existe la necesidad para que el productor maneje esa variabilidad de una manera factible, y la forma ampliamente aceptada de hacerlo es mediante establecer zonas de gestión dentro del campo. Las zonas de gestión son áreas de dentro del campo que tienen propiedades y características homogéneas, por lo que las prácticas de campo se pueden personalizar para cada una de estas áreas, lo que resulta en un enfoque práctico y rentable para la agricultura de precisión [41]. La adopción de zonas de gestión podría reducir los costos de la fertilización, mejorar el rendimiento de

los cultivos, disminuir el uso de pesticidas, proporcionar mejores registros agrícolas que son esenciales para las ventas y proporcionan una mejor calidad de información para las decisiones de gestión [4]. Según Zhang et al. [38], el número de zonas de manejo se determina en una función de la variabilidad natural del campo, su tamaño y de ciertos factores de gestión. Si la variabilidad es alta, el tamaño mínimo de una zona está limitado por la posibilidad de que cada agricultor aplique prácticas de manejo diferenciales dentro de cada área, en términos económicos y de logística. Adicionalmente, a la hora de decidir el área de cada zona de trabajo, la selección de los parámetros específicos que deben rastrearse dentro de dichas zonas debe hacerse cuidadosamente al principio del proceso. Rovira-Más y Saiz-Rubio [65] clasificaron los rasgos biométricos de los cultivos en tres niveles de caracterización, dependiendo del foco de interés, en el nivel del suelo, el nivel de la planta o el nivel de producción. Esta división permitió la superposición de varias capas en un mapa estandarizado con el objetivo de determinar un índice de calidad del vino basado en datos, definido como el Índice de Potencial de Calidad (QPI) para cada área de subcampo en un viñedo. Sin embargo, puede haber casos específicos donde la variabilidad espacial de un campo es tan baja que un solo evento de mapeo puede ser suficiente, según lo informado por Klassen et al. [42] al caracterizar la variabilidad del suelo en campos de arroz.

3.2. Etapa II: Plataformas que soportan sensores

Los sensores son los dispositivos universales para monitorear los cultivos y obtener información objetiva de ellos. Por lo general, están integrados en una plataforma, que es el término general utilizado en la Figura 1 para nombrar las estructuras donde se colocan y transportan los sensores. Estas plataformas pueden estar unidas a vehículos todo terreno o fijados al suelo dentro de dispositivos tales como estaciones meteorológicas locales. Uno de los desafíos más urgentes para los próximos años es obtener una gama más amplia de sensores no invasivos capaces de medir sobre la marcha. Este enfoque estaría más cerca de Agriculture 5.0, ya que estos sensores podrían conectarse a plataformas autónomas y robots. Hoy en día, no se pueden medir todos los parámetros de interés no invasivamente y a distancia del objetivo; sin embargo, algunas tecnologías como las imágenes multiespectrales o las imágenes hiperespectrales están haciendo mejoras significativas.

3.2.1. Plataformas de Teledetección: Satélites

La teledetección ha desempeñado un papel clave en el progreso de la agricultura inteligente cuando los datos del campo se convirtieron en accesible desde satélites artificiales. Los satélites importantes que proporcionan información agrícola son los satélites americanos de Landsat (ocho satélites toman datos espectrales de la Tierra cada 16 a 18 días), el sistema de satélite europeo Sentinel 2 (proporciona datos multiespectrales a una resolución de 10 m por píxeles para NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada: imágenes, suelo y cubierta de agua cada diez días), la Constelación RapidEye (cinco satélites proporcionan imágenes RGB multiespectrales, así como borde rojo y NIR, bandas a 5 m de resolución), el sistema GeoEye-1 (captura datos RGB multiespectrales y datos NIR a una resolución de 1,84 m por píxel) y WorldView-3 (recopila datos multiespectrales de las bandas RGB, incluidos el borde rojo, dos bandas NIR y 8 bandas SWIR con una resolución de 1,24 m por píxel). IKONOS y QuickBird ya se han dado de baja. Existen varias revisiones sobre las aplicaciones de la detección satelital, teniendo estudios recientes enfocados en las aplicaciones potenciales de tecnologías térmicas usando teledetección [44] y estado nutricional de cultivos [45].

3.2.2. Sistemas de aeronaves

La distancia entre cultivos y satélites es considerable, normalmente alrededor de 700 km, y se puede obtener información más específica cuando los sensores permanecen más cerca de los objetivos. Para sistemas de aeronaves, la distancia a tierra puede ser de alrededor de 100 m. Por ejemplo, hay un límite legal de 120 m sobre el suelo en España para vehículos de vuelo no tripulados. Los vehículos aéreos no tripulados (UAV) y las aeronaves pilotadas a distancia (RPA) pueden ser básicamente de dos tipos: aeronaves de ala fija y aeronaves multirrotor. Los UAV de ala giratoria son más estables, ya que son capaces de despegar y aterrizar verticalmente; sin embargo, son más lentos y no pueden cubrir tanta área durante la vida útil de la batería. Los vehículos de ala fija, por otro lado, pueden cubrir más área por vuelo y transportar cargas útiles más grandes, pero tienden a ser más caros y se rompen más fácilmente después de múltiples aterrizajes [45]. En comparación con la teledetección, las ventajas de los UAV para la agricultura de precisión son su flexibilidad en frecuencia (tiempo de revisión de los satélites) y mejores resoluciones espaciales.

En comparación con los vehículos terrestres, los UAV pueden obtener datos de lugares inaccesibles donde el equipo convencional no puede operar; sin embargo, requieren una planificación profesional de la ruta de vuelo de antemano, y ciertas aplicaciones de visión artificial pueden requerir volar al mediodía para evitar sombras en el suelo que causen

errores con los datos de imágenes. Además, el procesamiento posterior de los datos y el mosaico de imágenes a menudo es bastante desafiante. Una desventaja importante de los UAV es la carga útil limitada que pueden transportar, que a menudo limita el conjunto de sensores a bordo, así como la incapacidad de volar con viento fuerte.

3.2.3. Detección proximal: sistemas autónomos terrestres: el gran impulso para la agricultura 5.0

Cuando las plataformas de monitoreo operan desde el suelo, la distancia desde los sensores hasta el cultivo objetivo disminuye a menos de 2 m. Debido a la proximidad del sensor a la planta, cuando se adquieren datos desde plataformas terrestres, se llama detección proximal. Los vehículos terrestres son polivalentes en relación con la carga útil de los sensores. A medida que estos vehículos se mueven cerca del cultivo, los datos adquiridos aumentan en precisión, y las resoluciones de una o más muestras por metro son factibles, estando limitadas solo por las especificaciones de los sensores particulares implementados. Cuando se utilizan sensores activos, las condiciones climáticas, como la luz solar intensa o la iluminación deficiente, ya no son un problema grave y, en caso de procesamiento sobre la marcha, son posibles las aplicaciones en tiempo real, como rociar malezas con la detección previa de plaga [47]. Ha habido un impulso significativo en los últimos cinco años para el caso particular en el que los datos se recuperan de una plataforma autónoma (vehículo terrestre no tripulado o UGV) [48-52]. Aravind y col. [48] revisaron los robots de tierra para labranza, análisis de suelo, siembra, trasplante, exploración de cultivos, control de plagas, eliminación de malezas y cosecha, donde la exploración de cultivos se ha definido como el proceso de monitorear continuamente el campo para obtener información sobre el estado de la planta, la incidencia de enfermedades e infestaciones que afectan el crecimiento de los cultivos. Shamshiri y col. [27] describió los logros recientes de los UGV para el control de malezas, la exploración de campos y la cosecha, destacando que, si se integran e implementan con éxito, los robots de exploración de campos pueden desempeñar un papel clave en la reducción de los costos de producción, el aumento de la productividad y la calidad, y al permitir tratamientos personalizados de cultivos. La Comisión Europea (CE) ha respaldado recientemente la relevancia de la tecnología robótica para la agricultura inteligente mediante el financiamiento de cuatro proyectos que involucran la construcción de UGV para la gestión avanzada de viñedos: VineRobot, Vinbot, GRAPE y VineScout.

En 2016, el proyecto europeo VineRobot [53] entregó un prototipo de robot de monitoreo en un estado de Nivel de preparación tecnológica (TRL) entre 6 y 7 (TRL1 representa un concepto de etapa temprana y TRL9 es la etapa lista para la producción), allanando el camino para su terminación conceptual en el proyecto VineScout [54]. La versión 2019 de VineScout se muestra en la Figura 2. Este robot funciona de forma autónoma al monitorear viñedos con la ayuda de sensores de percepción local (cámara estéreo, sensores lidar y de ultrasonido) para navegación y protección. Recopila datos del dosel de las vides con el objetivo de crear mapas de estado del agua de la planta y mapas de estado nutricional. Con el fin de cumplir su misión en un plazo razonable, establecido por los usuarios finales a razón de 6 ha por día, este robot monitorea las copas de los viñedos de manera no invasiva, lo que implica varios desafíos. Con respecto al hardware, los sensores rápidos y robustos se configuraron para funcionar de manera no invasiva y en movimiento, a la vez que tenían un precio rentable para el sector agrícola. Con respecto al software, el desafío era la integración ágil de todos los dispositivos de detección de cultivos y la validación sobre el terreno en varias estaciones de los modelos desarrollados en el campo.

Además de la exploración de robots, la introducción de la robótica en la granja también está siendo liderada por la industria en tareas agrícolas específicas. Naïo Technologies, por ejemplo, ha desarrollado el robot Oz para desmalezado mecánico [55], y el pulverizador autónomo GUSS recibió el Premio Davidson en 2019 [56]. RowBot Systems LLC (Minneapolis, MN, EE. UU.) Patentó una plataforma robótica cuya estructura se configuró para realizar varias tareas de campo, como la aplicación selectiva de fertilizantes, el mapeo de zonas de crecimiento o la siembra de cultivos de cobertura [57]. Durante el siglo XX, la productividad agrícola se ha incrementado a través del aumento del tamaño de las máquinas, lo que ha llevado a equipos pesados y de gran tamaño. Para invertir esta tendencia, los investigadores y productores han comenzado a pensar en alternativas a los tractores para evitar la compactación del suelo.

Shamshiri y col. [27] sugirió usar varias máquinas en lugar de una máquina pesada. En la misma línea, Hameed [58] propuso una tecnología que permitió a un solo agricultor controlar un equipo de vehículos automatizados, y Ball et al. [59] utilizaron robots cooperativos como medida para controlar las malas hierbas. De hecho, ha habido varios proyectos que implementaron más de una máquina que funcionan en trabajo colaborativo, como el proyecto europeo

Flourish que combina UAV y UGV para recuperar información para el soporte de decisiones [46], o el proyecto RHEA donde una flota de robots autónomos realizó tratamientos en cultivos [82].

3.3. Etapa III: datos

Una de las diferencias fundamentales entre la agricultura tradicional y la moderna es, además del nivel de mecanización, los datos recopilados directamente desde los cultivos. En las granjas tradicionales donde los productores juzgan por evaluación visual, las decisiones son relativas y subjetivas. La agricultura moderna ofrece evaluación mediante datos cuantitativos que producen decisiones objetivas. Los sensores permiten la adquisición de datos en el campo, pero el caso especial de las tecnologías no invasivas en combinación con la detección sobre la

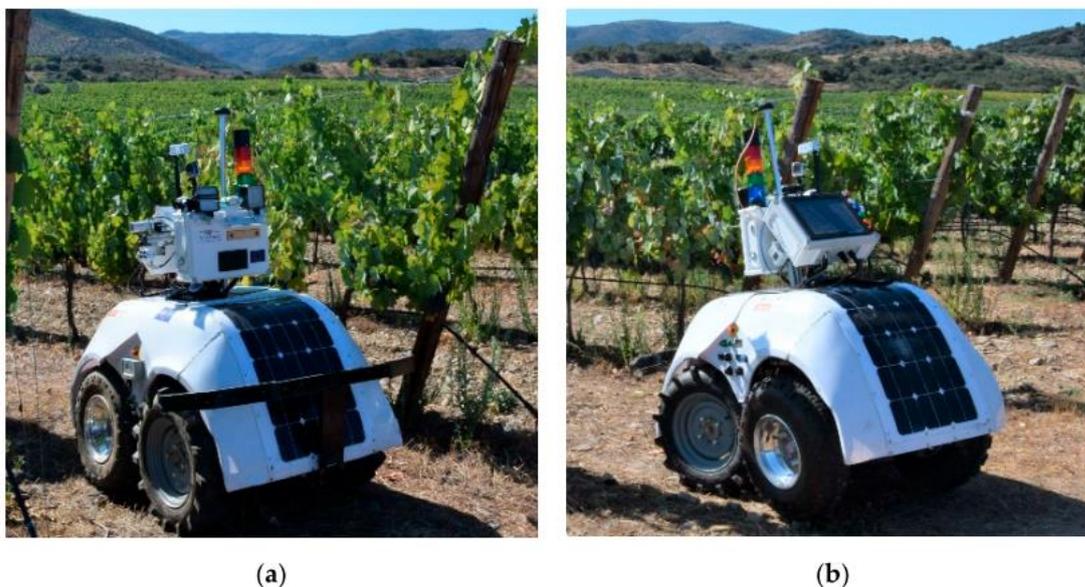
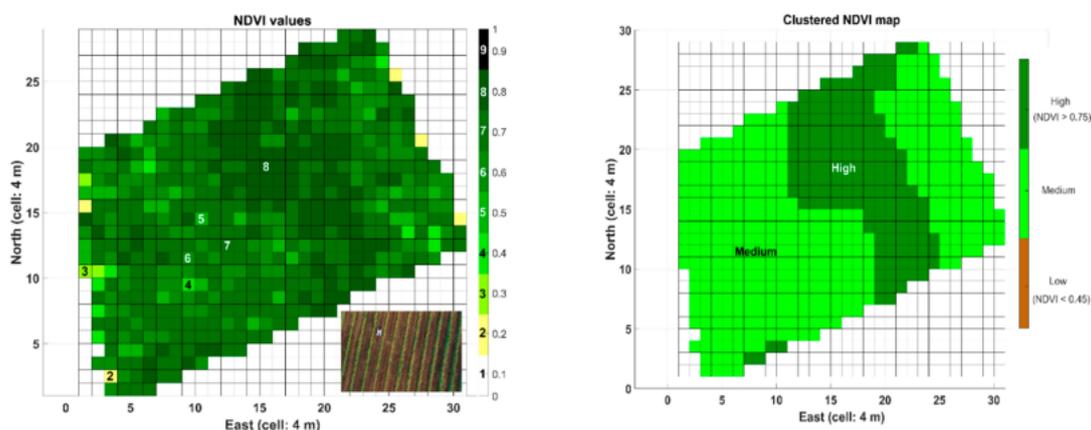


Figura 2. Versión II (2019) del robot autónomo VineScout: Delantero (a) y trasero (b).

marcha desde plataformas móviles ha abierto la ventana a la recolección masiva de datos, un precursor de la big data en la agricultura.

Sin embargo, el exceso de datos también es un gran desafío para enfrentar, ya que la información vital puede quedar enmascarada por el ruido. Las mediciones de NDVI realizadas para trazar los mapas de la Figura 3 [94] fueron recolectadas con dos sensores trabajando simultáneamente (sensores SRS, METER Group, Inc., Pullman, WA, EUA) y colocados en el robot de la Figura 2. Uno de los sensores señaló el cielo y las estimaciones de NDVI corregidas con la luz incidente del sol, y el otro sensor apuntó lateralmente al dosel para recolectar datos de las hojas a una distancia aproximada de 0.5 m. La foto cenital insertada en la esquina inferior derecha de la Figura 3a muestra al robot autónomo VineScout tomando datos entre dos filas en un viñedo. El algoritmo interno promedió las mediciones locales individuales de NDVI en celdas cuadradas de 16 m² clasificadas en nueve niveles de NDVI entre 0 y 1 (Figura 3a). El mapa de cuadrícula de la Figura 3a, a pesar de ser informativo, no está operativo, por lo que es necesaria una mayor simplificación de los datos antes de que un productor pueda encontrarlos útiles. La Figura 3b es el resultado de aplicar un filtro de agrupamiento a la Figura 3a. Muestra dos zonas de manejo basadas en el vigor de la vid (medio-alto) para que el agricultor tome decisiones, junto con mapas de estado del agua, sobre la fertilización y la cosecha diferencial.



3.3.1 Mapas que contienen características de campo relevantes

La visualización de datos en un formato coherente es clave para que los usuarios finales entiendan lo que está sucediendo en el campo. La forma más común de mostrar datos agrícolas ha sido en el formato de mapas, ya que el mapeo es útil para definir tendencias espaciales y zonas homogéneas. Sin embargo, mostrar información agronómica en mapas hermosos no debería ser el objetivo de la generación de mapas. Los mapas deben ser útiles para tomar decisiones, deben ser una ayuda para responder una pregunta, proporcionando una interpretación de la información espacial [39].

El objetivo de construir mapas es obtener unas pocas zonas de manejo con los parámetros de interés para que un tratamiento pueda aplicarse de manera eficiente. Para obtener zonas de manejo plausibles, **kriging** es una de las técnicas de interpolación más utilizadas para delimitar áreas de tamaños manejables [43]. Teniendo en cuenta la considerable cantidad de datos que genera la Agricultura Inteligente, hay muchas aplicaciones de software para hacer frente a la interpolación, en general, o kriging en particular [66]. Además, al construir un mapa, se debe proporcionar un sistema de coordenadas junto con el mapa. Una alternativa ideal para los mapas agrícolas es el sistema de coordenadas del Plano Tangente Local (LTP), que presenta geometría euclidiana, permite orígenes establecidos por el usuario y emplea el marco de coordenadas intuitivo este-norte. Con respecto a la codificación y visualización de datos en los mapas, las cuadrículas permiten la cuantificación sistemática del sistema de coordenadas LTP para gestionar la información de producción de cultivos de manera más eficiente, facilitando el intercambio de información entre campañas agrícolas sucesivas y la comparación de múltiples parámetros en el mismo campo [67]. En la Figura 3 se muestra un ejemplo práctico de mapas basados en cuadrículas que utilizan coordenadas LTP.

Teniendo en cuenta la función clave de los sistemas de posicionamiento, un enfoque basado en mapas es el método mediante el cual un Sistema de posicionamiento global (**GPS**), o cualquier otro Sistema de navegación global por satélite (**GNSS**), recibe un registrador de datos (por ejemplo, una computadora a bordo) se utilizan para registrar la posición de una medición particular (datos georreferenciados), por lo que se pueden generar y procesar varios mapas junto con otras capas de información variables espacialmente [68]. En general, los receptores GNSS son los dispositivos de posición universal utilizados para construir mapas; sin embargo, en algunos casos, por ejemplo, en invernaderos o campos densos de árboles altos, GNSS no es la mejor opción para usar debido a la dificultad de obtener señales con precisión confiable; entonces, en algunos casos, se deben implementar soluciones alternativas como la visión artificial [69].

3.3.2. Software de gestión de datos para facilitar el proceso de toma de decisiones

Una forma popular de administrar los datos de campo que se muestran en los mapas y culminar con una solución práctica es mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Este conjunto de herramientas informáticas (o plataformas de datos) permiten almacenar, analizar, manipular y mapear cualquier tipo de información georreferenciada.

Se desarrolló un sistema SIG específico llamado Sistema de información geográfica (FIS) a nivel de campo para aplicaciones de agricultura de precisión [70], pero se configuró para sistemas operativos informáticos antiguos como Windows 3.1 x, 95, 98 o NT [71]. La versión actualizada de FIS es el sistema de información de gestión de la granja (FMIS), que según Burlacu et al. [72] es un sistema de información de gestión diseñado para ayudar a los agricultores con diversas tareas, que van desde la planificación operativa, la implementación y la documentación hasta la evaluación del trabajo de campo realizado. El propósito de FMIS es reducir los costos de producción, cumplir con los estándares agrícolas y mantener una alta calidad y seguridad del producto, guiando a los productores a tomar las

mejores decisiones posibles [95]. Las soluciones de software de gestión de granja admiten automatización de la adquisición y procesamiento de datos, monitoreo, planificación, toma de decisiones, documentación y administración de las operaciones agrícolas [64], e incluye funciones básicas para el mantenimiento de registros como tasas de producción de cultivos (cosechas y rendimientos), ganancias y pérdidas, programación de tareas agrícolas, predicción del clima, seguimiento de nutrientes del suelo y mapeo de campo, hasta funcionalidades más complejas para automatizar el campo, contabilidad de gestión para granjas y agronegocios (contabilidad, gestión de inventarios o contratos laborales). En muchos casos, los productores no necesitan tener fluidez en la gestión de datos porque el software puede construir mapas o modelos de toma de decisiones con información básica introducida por los productores. Además, una característica crítica de estas aplicaciones es que incluso ayudan en la alerta temprana de los peligros relacionados con el clima que permite a los agricultores, los encargados de formular políticas y las agencias de ayuda mitigar su exposición al riesgo [83].

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la eficiencia de una recomendación para un agente en particular dependerá de los factores incluidos en los algoritmos del software (técnico, económico, seguridad...) En este sentido, un DSSAT (Sistema de apoyo a la decisión para la transferencia de agrotecnología) proporciona resultados con datos experimentales para la evaluación de modelos de cultivos, lo que permite a los usuarios comparar resultados simulados con resultados observados, lo cual es crítico si las decisiones o recomendaciones del mundo real se basan en resultados modelados [84]. La Tabla 2 reúne un conjunto representativo de programas de FMIS disponibles comercialmente específicamente configurados para manejar los datos usuales generados en la granja. Incluye el nombre de cada programa de aplicación, la empresa que lo comercializa con su sede central y las principales características del programa. La tabla se centra en los programas que administran los datos de cultivos como la herramienta principal, y su propósito no es la compilación de todo el software FMIS disponible, lo cual sería inútil dado que nuevas aplicaciones se lanzan constantemente, pero brinda una prueba del esfuerzo global realizado en la última década para implementar Agricultura Inteligente en granjas reales, acelerando el paso de los académicos al agronegocio. Los ejemplos muestran que algunas aplicaciones de teléfonos inteligentes y tabletas ya incluyen características complejas para que los productores puedan insertar datos directamente en el campo; otras empresas, por el contrario, prefieren tener una aplicación básica para dispositivos móviles para aumentar la complejidad en la versión de escritorio basada en la nube. En la mayoría de los casos, no es necesario tener una conexión inalámbrica mientras el productor ingresa datos en el campo, porque tan pronto como el dispositivo móvil encuentra una conexión inalámbrica a Internet, sincroniza los datos introducidos previamente por el productor en el campo, con los datos almacenados de forma segura en la nube. Muchos de los programas enumerados a continuación ofrecen la opción de actualizar el software según las necesidades específicas del productor, aumentando el precio en consecuencia. Las herramientas más avanzadas incluyen características para la gestión financiera y de maquinaria, ayudan en el proceso de toma de decisiones, advertencias de lanzamiento o incluso proponer consejos de gestión. En muchos casos, estas aplicaciones de software no solo están dirigidas al productor o empresario rural, sino también a otras partes interesadas en la agricultura, como proveedores de insumos, proveedores de servicios y distribuidores de alimentos, lo que hace una diferencia para Smart Farming, donde están conectados múltiples agentes agrícolas. En cuanto a los derechos de explotación, se han patentado varios sistemas de gestión agrícola, como el software de The Climate Corp. para generar prescripciones agrícolas [85], que se asoció con AGCO Corporation en 2017 [4]. Decisive Farming Corp. [73,74], AgVerdict Inc. [75] o Trimble [86] también han patentado sus soluciones comerciales.

Tabla 2. Aplicaciones de software de gestión de datos de cultivos y sus características principales [31,77-79,91].

SOFTWARE	EMPRESA	SEDE	CARACTERÍSTICAS RELEVANTES
ADAPT	AgGatekeeper	Washington DC, USA	Traductor de entrada / salida para gestionar datos entre controladores, equipos de campo y sistema de información de gestión agrícola (FMIS) en un formato adecuado. El sistema de código abierto se ofrece sin costo para que los desarrolladores lo adopten en sus propios sistemas .
AGERmetrix	AGERpoint	Florida, USA	Plataforma de datos y análisis de cultivos con interfaz de mapeo. Capaz de escanear y recopilar datos de cultivos de alta resolución a través de LiDAR y otras técnicas colaborativas. Permite tomar datos en dispositivos móviles.
AgHub	GiSC	Texas, USA	Solución independiente por una cooperativa. Recopila y almacena datos de forma segura. Los datos se pueden compartir con asesores de confianza. Integración de las operaciones meteorológicas de IBM, Main Street Data Validator, y Market Vision.
Agrivi	Agrivi	United Kingdom	Clima, mapeo de campo, plan de inventario. Gestión de cultivos, maquinaria y personal (notificaciones e informes). Versiones web y móviles. Actualizaciones y complementos.
Agroptima	Agroptima	Spain	Aplicación móvil como un cuaderno electrónico para registrar actividades de campo, productos aplicados, trabajadores implicados, tiempo de trabajo o uso de maquinaria. Los datos pueden descargarse en Excel y almacenarse de forma segura en la nube. [En español]
AgroSense	Corizon	Netherlands and Spain	Fuente abierta. El trabajo realizado, los datos de campo y los horarios se pueden compartir con contratistas o empleados. Automatice la importación e interpretación de tareas realizadas a través de ISOBUS. Exportar en varios formatos.
AgVerdict	AgVerdict (Wilbur-Ellis)	California, USA	Aplicación de escritorio y móvil. Permite la entrega de datos a agencias reguladoras o empacadores, expedidores y procesadores. Seguridad de datos, toma de decisiones, posibilidad de VRA, análisis de suelos y recomendaciones de cultivos.
Akkerweb	(Several providers)	The Netherlands	Plataforma de consultoría independiente para organizar planes de campo y rotación de cultivos. Información en una geo-plataforma central. Varias aplicaciones [En holandés]
APEX™ JDLink	John Deere	Illinois, USA	Herramientas en línea que permiten el acceso a granjas, máquinas y datos agronómicos. Permite decisiones de colaboración del mismo conjunto de información para optimizar la logística, los planes y el trabajo directo en el campo.
CASE IH AFS software	CASE IH	Wisconsin, USA	Paquete de software único e integrado. Vea, edite, administre, analice y utilice datos de agricultura de precisión para generar mapas de rendimiento o VR. Los mapas e informes se pueden compartir en diferentes formatos.
Connected Farm	Trimble Agriculture	California, USA	Ingrese, acceda, comparta registros (imágenes, informes) en tiempo real. Integra todo el sistema: exploración de cultivos, muestreo de cuadrícula, gestión de flotas, contratos. Farm Core conecta todos los aspectos de la operación agrícola.
Cropio	New Science Technologies	New York, USA	Sistema de gestión de productividad. Monitoreo remoto de suelos. Actualizaciones en tiempo real sobre el campo actual y las condiciones del cultivo; previsión de cosecha. Servicio basado en web y aplicación móvil. Entrenamiento incluido.
Cropwin Vintel	itk	France	Herramienta personalizable para el manejo integrado de cultivos. Observación, análisis y optimización. Vintel: herramienta de apoyo a la decisión para viñedos. Rastrea el estado del agua, el cultivo de cobertura y el manejo de nutrientes.

SOFTWARE	EMPRESA	SEDE	CARACTERÍSTICAS RELEVANTES
Farmbrite	Farmbrite	Colorado, USA	Calendario de la granja de un vistazo o en detalle. El horario se puede compartir para configurar tareas diarias o recurrentes. Pronóstico del tiempo disponible. Lista de tareas, recordatorios, eventos y citas.
FarmCommand	FarmersEdge	Manitoba, Canada	Plataforma de gestión agrícola. Proporciona hardware (es decir, estación meteorológica) y software para soporte de decisiones en el campo. Disponible como una herramienta basada en la web y una aplicación móvil.
Farmleap	Farmleap	France	Comparación del rendimiento del campo a nivel local y nacional. Informa el tiempo dedicado por tipo de operación, análisis de rendimiento, costos de producción, seguimiento de riego, clima detallado, intercambio de datos, gestión de empleados (en francés).
FarmLogic/ FarmPAD	TapLogic	Kentucky, USA	Mantenimiento de registros ag basado en la web. Mapeo de campo del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) para dibujar límites, marcar puntos, mediciones, etc.; informes personalizados para distribución, base de datos de pesticidas, registros de mantenimiento y creación de órdenes de trabajo.
Farm Management Pro	Smart farm software	Ireland	Aplicación móvil para registros de granjas, contabilidad de costos y gastos, manejo de tractores, manejo de cultivos, aplicaciones de fertilizantes y aspersiones, hojas de tiempo, manejo de documentos. No hay una versión de escritorio disponible.
Farmplan (Gatekeeper)	Proagrica	United Kingdom	Para cultivos (Gatekeeper), ganado y negocios. Intercambio de datos, configuración de planes de trabajo, datos meteorológicos, almacenamiento de datos, informes instantáneos, información sobre pesticidas. Varias actualizaciones. Compatibilidad con otras marcas.
FieldView™	The Climate Corporation	California, USA	Conectividad y visualización de datos, análisis de rendimiento de cultivos, imágenes de salud de campo. Ofrece prescripciones y manejo de fertilidad basado en modelos.
Granular	DowDuPont	California, USA	Software diferente según las necesidades. Combinación de varias fuentes para construir modelos de toma de decisiones. Servicios de asesoramiento y formación. Soporte para más de 230 subespecies de cultivos. Basado en la nube.
KSAS	Kubota	Japan	Servicio de soporte de gestión agrícola basado en la nube integrado por maquinaria Kubota. Para teléfonos inteligentes y PC. Gestión de la granja mediante la recopilación y utilización de datos de maquinaria compatible.
Mapgrower	Agropreciso	Chile	Plataforma orientada a la empresa que permite la planificación automatizada, la gestión del trabajo, la trazabilidad, las estadísticas en línea, la gestión de cuentas o la visualización en mapas. Disponible para teléfonos inteligentes.
Myeasyfarm	MyEasyFarm	France	Permite definir los campos y sus operaciones, planificar el trabajo de la campaña y compartirlo con un equipo, ver el progreso en tiempo real y analizar los resultados.
My Farm Manager	Decisive Farming	Alberta, Canada	Dispositivos móviles. Paquetes disponibles para VRA, agronomía y pruebas de suelo. Asesoramiento de expertos. Planes de marketing. Inventario y tarea programada en la aplicación Cromptivity.
Phoenix	Agdata	Queensland Australia	Es modular para que los agricultores puedan construir su solución. Disponible en la nube o escritorio. Entrenamiento incluido. Los agricultores pueden crear mapas (formatos .shp, gpx, pdf, bmp y jpg), agregar datos y actualizarlos.
PLM Connect	New Holland	Italy	Permite la conexión con maquinaria de campo. Mapa y análisis de datos de cultivos / suelos, rendimiento de rendimiento, prescripción de VR, inventario y registros contables de suministros, semillas, productos químicos y fertilizantes.
SST software	Proagrica	United Kingdom	Recopile y gestione datos en el campo. Informes de análisis estadístico, herramientas de toma de decisiones. PaaS 2 (plataforma agX®) para la industria agrícola que proporciona infraestructura geoespacial.
SMS	AgLeader	Iowa, USA	Muestreo de suelos, grillas y regiones. La semilla con un potencial de rendimiento más alto se puede elegir en función del rendimiento histórico, informes, operaciones de registro, mapas VRA y recetas. Aplicación móvil disponible.

SOFTWARE	EMPRESA	SEDE	CARACTERÍSTICAS RELEVANTES
SpiderWeb GIS	Agrisat Iberia	Spain	Permite consultas, gestión y análisis. Imágenes de satélite y otras capas de referencia espacial. Los datos correspondientes a cada píxel se pueden descargar en forma de tablas y gráficos temporales.
Telematics	Claas	Germany	Recopila datos operativos importantes para una cosechadora autopropulsada y los transfiere a una plataforma web. Acceso ilimitado con conexión a internet.
TAP TM	Topcon	Japan	Compatible con equipos de Topcon y otras compañías. Trazabilidad y conectividad. Gestión de datos para agricultores, análisis de datos para agrónomos, gestión de datos multiusuario, gestión de datos basada en la nube.
Visual Green	Visual NaCert	Spain	Plataforma web para almacenar los datos de los agricultores. Compatibilidad GreenStar y MyJohnDeere, control de costos, datos de agroclima, cuaderno de campo oficial (obligatorio en España), productos autorizados.
WinGIS	ProGIS Software	Austria	SIG: mapas ráster / vectoriales, krigging, importación / exportación en DXF o shp, imágenes rápidas de Sentinel. Con su propio entorno de desarrollo (SDK) que permite a los programadores vincular sus aplicaciones de bases de datos a mapas.

El uso de sistemas de gestión de datos comerciales, como los que se enumeran en la Tabla 2, a menudo implica que los productores necesiten compartir sus datos de cultivos con una plataforma de software administrada por empresas privadas. Este hecho crea cierta controversia con respecto a la propiedad de los datos. En el Acuerdo de Servicios de Software (SSA), se establece que la persona o entidad que proporciona los datos a la compañía de software deberá poseer y retener todos los derechos, títulos e intereses sobre sus datos. [76] Sin embargo, cuando los datos se agregan con los datos de otros productores, los datos combinados generalmente pasan a ser propiedad de la compañía de software [96]. La lista de aplicaciones incluidas en la Tabla 2 demuestra que existe un interés global en el desarrollo de software para la gestión de datos agrícolas, y la mayoría de las características solicitadas por los usuarios finales son similares en todas partes. Esta tabla también da una idea del interés suscitado en la industria por los sistemas de gestión basados en software. Sin embargo, muchas aplicaciones usan sus propios formatos, lo que complica la distribución de datos entre los distintos sistemas. Se necesita un esfuerzo de estandarización entre los desarrolladores y proveedores de software. El kit de herramientas ADAPT de la Tabla 2 [77] es un ejemplo de cómo enfrentar este desafío, ya que proporciona una aplicación de código abierto que elimina barreras para el amplio uso de los datos de Agricultura de Precisión al permitir la interoperabilidad entre diferentes aplicaciones de hardware y software.

.4. Etapa IV: Toma de decisiones

En situaciones donde muchos parámetros de campo necesitan ser considerados, las personas encuentran dificultades prácticas en el manejo de información compleja para tomar decisiones efectivas. En tales casos, la inteligencia artificial (IA) puede ayudar con técnicas como *deep learning* (aprendizaje profundo) o redes neuronales, lógica difusa, algoritmos genéticos o sistemas expertos. La IA, con sus capacidades de modelado y razonamiento, puede desempeñar un papel clave en la agricultura, ayudando a dar sentido a todos los datos disponibles. La lógica difusa, por nombrar un ejemplo dentro de la IA, se asemeja al razonamiento humano que imita la forma de tomar decisiones que implican varias posibilidades en lugar de alternativas "verdaderas" o "falsas"; Esta técnica utiliza variables lingüísticas que encajan bien con la complejidad de los desafíos planteados por la diversidad de la toma de decisiones agrícolas. Según Dengel [20], la agricultura ofrece una amplia área de aplicación para todo tipo de tecnologías centrales de IA como agentes que operan en entornos no controlados. Giusti y Marsili-Libellia [81] diseñaron un sistema de apoyo a las decisiones (DSS) basado en la definición difusa que toma como variables de entrada el pronóstico de humedad y lluvia del suelo para el kiwi, el maíz y la papa.

Del mismo modo, el DSS desarrollado por Navarro-Hellín et al. [87] de estimación de riego semanal para huertos de cítricos teniendo en cuenta las variables climáticas y del suelo; En ese trabajo, las mediciones en tiempo real de los parámetros del suelo en un esquema de control de circuito cerrado fueron decisivas para evitar el efecto acumulativo

debido a errores en las estimaciones semanales consecutivas, ya que se permitió al DSS adaptarse a las perturbaciones locales. Del mismo modo, Lindsay Corporation (Omaha, Nebraska, EE. UU.) fue premiada por su solución FieldNET Advisor™ [91] que proporciona decisiones de gestión de riego para los productores. El DSS puede ser más robusto y confiable cuando se consideran diferentes variables, pero algunos procedimientos siguen siendo controvertidos ya que los objetivos pueden conducir a diferentes soluciones en diferentes momentos en función de la prioridad establecida por los tomadores de decisiones u otras personas involucradas en el procedimiento [88].

Srivastava y Singh [80] destacaron la importancia de incorporar la parte gráfica del SIG al DSS, que se demostró para los escenarios de gestión del agua en la India. La importancia de usar SIG para DSS agrícolas radica en el uso de interfaces gráficas fáciles de usar para los productores. El resultado de un cuestionario distribuido por los miembros del proyecto VineScout [36] a los asistentes a una demostración de campo en Portugal (octubre de 2019), evidenció el alto valor dado a las interfaces gráficas de usuario (GUI). Teniendo en cuenta que el prototipo está en fase de investigación y aún no es comercial, el 84% de los asistentes concluyó que la GUI del robot que se muestra en la Figura 4 era simple de entender y fácil de usar (investigación no publicada). Rupnik y col. [89] desarrollaron un sistema basado en la nube para permitir a los productores cargar sus propios datos, utilizar varios métodos de análisis de datos y finalmente presentar sus resultados como decisiones para aplicar. Esta vez, su caso de uso se centró en la planificación del rociado para combatir las plagas en viñedos y huertos. Rose y col. [90] realizó una encuesta sobre DSS y llegó a la conclusión de que 15 factores fueron influyentes para convencer a los productores y asesores del Reino Unido de usar DSS, incluida la usabilidad, la rentabilidad, el rendimiento, la relevancia para el usuario y la compatibilidad con las demandas de cumplimiento. Además, descubrieron que el 49% de los agricultores del Reino Unido usaban algún tipo de DSS, y las formas de entrega mencionadas eran software (28%), herramientas basadas en papel (22%) y aplicaciones móviles (10%). Estos resultados muestran que el uso de software para administrar decisiones está creciendo, pero su porcentaje aún es bajo y comparable a aquellos que prefieren las herramientas basadas en papel. La elección de software y aplicaciones móviles para tomar decisiones agrícolas puede considerarse beneficiosa porque las herramientas digitales aumentan la eficiencia de gestión en comparación con las herramientas basadas en papel; sin embargo, todavía hay un largo camino para que las herramientas basadas en tecnología sean lo suficientemente atractivas (fáciles de entender, intuitivas y agradables) para que las adopten los productores. Por el lado del productor, es importante tener acceso a la capacitación adecuada hasta que estas tecnologías se puedan manejar cómodamente.



Figura 4. Interfaz gráfica de usuario (GUI) para el robot VineScout.

3.5. Etapa V: Actuación a través de la tecnología de tasa variable

El último paso para cerrar el ciclo completo de manejo del cultivo de la Figura 1 es la actuación física en el cultivo. Se entiende por actuación a la ejecución de alguna acción sobre el cultivo o relacionada con él, y esto se puede hacer tomando decisiones justo después de obtener información (aplicaciones en tiempo real) o en otro momento diferido en el tiempo (en línea). Para que los agricultores ejecuten decisiones, necesitan equipos avanzados que puedan recibir órdenes de una unidad de control computarizada. Las máquinas de tasa variable pueden ejecutar una serie de tareas agrícolas impulsadas por un sistema inteligente [60]. La tecnología de tasa variable (VRT) aplicada en el manejo de cultivos específicos (SSCM) tiene el potencial de aumentar las ganancias y disminuir el impacto ambiental [61] ya que solo se aplica lo que realmente se necesita. Colaço y Molin [92] realizaron un estudio a largo plazo durante seis años con el objetivo de evaluar los efectos de la fertilización a tasa variable en el consumo de fertilizantes, la fertilidad del suelo y el rendimiento en cítricos. Los resultados de comparar tasas variables y uniformes mostraron que el primero logró mayores rendimientos al usar menos fertilizante: al usar nitrógeno, el rendimiento de fruta (kg de naranjas) con respecto a la cantidad de fertilizante testigo resultó en un aumento del rendimiento del 32% en el campo 1 y del 38% en el campo 2. Cuando se usa potasio, el aumento del rendimiento incluso alcanzó el 40% en el campo 1. En el caso del fósforo, la tasa de crecimiento fue aproximadamente del 20% para ambos campos. Una revisión reciente dirigida por Nawar et al. [93] confirmaron que, cuando se utilizaron técnicas de delimitación de zonas de manejo para la aplicación de nutrientes a tasa variable, la eficiencia de la granja aumentó en todos los casos en comparación con las aplicaciones tradicionales de tasa uniforme, y se redujo el impacto ambiental. Los fabricantes de maquinaria lideran el desarrollo de soluciones comerciales que implementan VRT. Thomasson y col. [62] describió los sistemas comerciales de VRT ofrecidos por los principales fabricantes de maquinaria agrícola, como CLAAS, que usaron el sensor de cultivo ISARIA para la aplicación de fertilizante a base de nitrógeno a tasa variable, o el CEBIS MOBILE ISOBUS, que, además de tener otras funciones de Agricultura de Precisión, es un terminal compatible para integrar el sensor ISARIA. Otro tipo prometedor de actuación variable es la recolección diferencial automática o la recolección a tasa variable (VRH), que intenta la recolección de acuerdo con zonas de manejo previamente definidas. En cultivos especializados, Sethuramasamyraja [40] trabajó en la recolección diferencial para viñedos utilizando sensores de infrarrojo cercano para determinar la calidad de la uva en el campo en función del contenido de antocianinas de las bayas. Los tres pasos para este sistema VRH incluyeron la detección del contenido de antocianinas de las uvas, el uso de estos datos para producir un mapa de calidad basado en un nivel umbral de antocianinas y la alimentación del mapa de calidad a la cosechadora para su control. CLAAS fue galardonado por implementar VRH en cosechadoras de granos y de forrajes [91] al fusionar la tecnología de detección de precisión con el control autónomo de la máquina. El objetivo era maximizar la productividad y optimizar automáticamente el rendimiento de la cosechadora, de acuerdo con las condiciones cambiantes del suelo, las plantas, el grano y la humedad en el campo cosechado. Un análisis estadístico del USDA realizado en 2010 [3] mostró que las tecnologías de tasa variable tuvieron adopciones de tasa positivas, pero pequeñas, del 1% debido a su dificultad de uso. Además de la eficiencia y la utilidad, el costo también es un parámetro crítico a considerar para la adopción de esta tecnología. En este sentido, la disponibilidad ubicua de productos electrónicos de bajo costo favorecerá la introducción de tales aplicaciones digitales. De hecho, los avances en la tecnología de conducción autónoma para automóviles, incluidas las capacidades de detección de objetos a través de sistemas multicámara, ya han reducido el costo de desarrollar máquinas agrícolas automatizadas [22].

4. Discusión

Después de la Revolución Industrial, principalmente desde el advenimiento de la mecanización, y a lo largo de la Revolución Verde, los humanos y las máquinas han colaborado eficientemente para cultivar y alimentar a las personas.

Sin embargo, para enfrentar el crecimiento de la población en los próximos años, se necesita un esfuerzo adicional para tener éxito, no solo para alimentar a las personas aumentando la productividad, sino también para hacerlo de la manera más eficiente y ambientalmente amigable posible, es decir, producir de manera sostenible. Para enfrentar este desafío, han aparecido avances notables en la tecnología durante las últimas décadas, en particular el acceso a datos agrícolas confiables y técnicas informáticas avanzadas para obtener el significado óptimo de ellos, obteniendo eventualmente los máximos beneficios mientras se respeta el medio ambiente. Este nuevo enfoque impulsado por la tecnología digital implica que los productores deben actuar como supervisores de sus cultivos en lugar de trabajadores, en un intento de evitar tareas de campo repetitivas, físicamente exigentes y tediosas. En este moderno

marco agronómico, DATA es la clave, y el ciclo de gestión basado en la información descrito anteriormente proporciona el enfoque práctico que une conceptos y tareas. Los siguientes puntos resumen algunas de las ideas específicas extraídas de este estudio:

- La agricultura de precisión, que consiste en aplicar lo que se necesita cuando y donde se necesita, ha mejorado aún más la eficiencia de la gestión de las granjas con la adición de sistemas digitales basados en datos que aumentan el conocimiento de los productores sobre sus campos; Esto se conoce como Agricultura 4.0 o Agricultura Digital. Cuando estas granjas basadas en datos incorporan robótica con algoritmos de IA en sus sistemas, el concepto general se denomina Agricultura 5.0. Algunos estudios informan que los robots agrícolas que integran formas de IA pueden realizar ciertas tareas más rápido que los humanos [23]. A pesar de que existen otros estudios que contradicen esta afirmación [63], la robótica es una economía en crecimiento y existe un gran potencial para muchas aplicaciones dentro de la agricultura.
- Una mayor adopción de la agricultura digital por parte de los productores profesionales es vital no solo para mejorar el rendimiento financiero de una granja, sino también para satisfacer las necesidades alimentarias de una población en expansión [6]. Las pequeñas granjas incorporarán constantemente tecnología básica, mientras que los grandes campos probablemente invertirán en equipos sofisticados, pero la gestión basada en la intuición sin datos ya no representará el modus operandi de las granjas profesionales en el futuro. Esto debería considerarse una fuente de oportunidades, especialmente para una nueva generación de jóvenes agricultores acostumbrados a la tecnología digital, que son los que tienen la capacidad de equilibrar el envejecimiento de la población en las zonas rurales, principalmente en los países industrializados.
- Después del rápido crecimiento de los UAV se está alcanzando una meseta, inducido principalmente por el hecho de que el análisis de los datos y la validación a campo han resultado mucho más complejos y delicados que la adquisición de la imagen y el manejo de plataformas. Esto ha promovido la expansión de la detección proximal y la exploración de combinar ambas fuentes de datos, aérea y terrestre, para una mejor comprensión de la fisiología de las plantas y los árboles.
- Los mapas, como la forma más común de representar datos agrícolas, tendrían que estandarizarse. GIS, FMIS y otras aplicaciones de software generan mapas coloreados intensamente interpolados, pero al momento de comparar datos con la precisión suficiente para otorgar significación estadística, a menudo se convierte en una misión imposible sin estandarización. La Figura 3, por ejemplo, utiliza la representación plana proporcionada por el plano tangente local (LTP) y formateada en una cuadrícula regular. Otros programas usan proyecciones UTM, e incluso hay imágenes solo dadas en coordenadas geodésicas. Ante la necesidad de mapas superpuestos, se necesita un gran esfuerzo para que todos los datos sean compatibles. No solo la forma en que se representan las coordenadas necesita un estándar, sino también las unidades, los intervalos e incluso los colores en los que se muestran los parámetros. La combinación de datos aéreos y terrestres, por ejemplo, se beneficiará enormemente de dicha estandarización en la forma en que los datos se visualizan para que el productor promedio los entienda.
- La Tabla 2 proporciona una compilación representativa de aplicaciones de software para la administración de granjas. La lista no es exhaustiva y, sin embargo, incluye empresas de cuatro continentes y 14 países, lo que demuestra el hecho de que la digitalización agrícola es, de hecho, un movimiento global.
- Con respecto a las aplicaciones de tasa variable, los niveles de adopción deben aumentar, y para hacerlo, los agricultores deben encontrar por sí mismos el valor de esta tecnología para sus cultivos. Solo después de mantener registros espaciales precisos y analizar datos de campo se pueden crear prescripciones efectivas de tasa variable [39] para abordar tareas particulares.

5. Conclusiones

Este análisis confirma que el conocimiento constante sobre las granjas conduce a decisiones óptimas. Los sistemas de gestión agrícola pueden manejar los datos de la granja de tal manera que los resultados se orquestan para abordar soluciones personalizadas para cada empresa agropecuaria. Esta ayuda para los agricultores en forma de soluciones digitales combina fuerzas con robótica e inteligencia artificial para lanzar la inminente idea de Agricultura 5.0. Después de treinta años de grandes expectativas —y decepciones— por la aplicación de la robótica a la agricultura, el momento parece correcto por primera vez. Sin embargo, para aprovechar al máximo las ventajas de la Agricultura 5.0, se debe brindar capacitación exhaustiva a los usuarios, idealmente jóvenes agricultores ansiosos por aprender y aplicar tecnologías modernas a la agricultura y otorgando una renovación

generacional aún por venir. Parece que es el momento adecuado para avanzar hacia una agricultura moderna y sostenible que sea capaz de mostrar todo el poder de la gestión basada en datos para enfrentar los desafíos que plantea la producción de alimentos en el siglo XXI. La evolución a la Agricultura 5.0 está en la agenda de la mayoría de los principales fabricantes de equipos agrícolas para la próxima década y, por lo tanto, los fabricantes de equipos desempeñarán un papel clave en este movimiento si los robots agrícolas se consideran como la próxima generación de máquinas agrícolas más inteligentes.

Contribuciones de los autores: V.S.-R. y F.R.-M. contribuyeron a la redacción y edición del artículo. Las ilustraciones y tablas fueron creadas por V.S.-R. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiación: este artículo de investigación es parte de un proyecto que ha recibido financiación del programa de investigación e innovación Horizon 2020 de la Unión Europea en virtud del acuerdo de subvención N°737669. Las opiniones expresadas reflejan solo la opinión de los autores. Ni la Comisión Europea, ni la agencia de financiación, ni sus servicios son responsables del uso que pueda hacerse de la información que contiene esta publicación.

Conflictos de intereses: los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

1. Himesh, S. Digital revolution and Big Data: A new revolution in agriculture. *CAB Rev.* 2018, 13, 1–7.
2. Zhang, Y. The Role of Precision Agriculture. *Resource* 2019, 19, 9.
3. Schimmelpfennig, D. Farm Profits and Adoption of Precision Agriculture. *USDA* 2016, 217, 1–46.
4. Grand View Research. Precision Farming Market Analysis. Estimates and Trend Analysis; Grand View Research Inc.: San Francisco, CA, USA, 2019; pp. 1–58.
5. Díez, C. Hacia una agricultura inteligente (Towards and intelligent Agriculture). *Cuaderno de Campo* 2017, 60, 4–11.
6. Accenture Digital. Digital Agriculture: Improving Profitability. Available online: https://www.accenture.com/_acnmedia/accenture/conversion-assets/dotcom/documents/global/pdf/digital_3/accenture-digital-agriculture-point-of-view.pdf (accessed on 29 December 2019).
7. CEMA. Digital Farming: What Does It Really Mean? Available online: <http://www.cema-agri.org/publication/digital-farming-what-does-it-really-mean> (accessed on 17 September 2019).
8. Nierenberg, D. Agriculture Needs to Attract More Young People. Available online: <http://www.gainhealth.org/knowledge-centre/worlds-farmers-age-new-blood-needed> (accessed on 18 September 2019).
9. European Commission. Generational Renewal in EU Agriculture: Statistical Background; DG Agriculture & Rural Development: Economic analysis of EU agriculture unit: Brussels, Belgium, 2012; pp. 1–10.
10. Paneva, V. Generational Renewal. Available online: https://enrd.ec.europa.eu/enrd-thematic-work/generational-renewal_en (accessed on 28 December 2019).
11. Alpha Brown. What is IoT in Agriculture? Farmers Aren't Quite Sure Despite \$4bn US Opportunity—Report. Available online: <https://agfundernews.com/iot-agriculture-farmers-arent-quite-sure-despite-4bn-us-opportunity.html> (accessed on 28 December 2019).
12. Gralla, P. Precision Agriculture Yields Higher Profits, Lower Risks. Available online: <https://www.hpe.com/us/en/insights/articles/precision-agriculture-yields-higher-profits-lower-risks-1806.html> (accessed on 29 December 2019).
13. Tzounis, A.; Katsoulas, N.; Bartzanas, T.; Kittas, C. Internet of Things in agriculture, recent advances and

future challenges. *Biosyst. Eng.* 2017, 164, 31–48. [CrossRef]

14. Sarni, W.; Mariani, J.; Kaji, J. From Dirt to Data: The Second Green Revolution and IoT. Deloitte insights. Available online: <https://www2.deloitte.com/insights/us/en/deloitte-review/issue-18/second-green-revolution-and-internet-of-things.html#endnote-sup-9> (accessed on 18 September 2019).

15. Myklevy, M.; Doherty, P.; Makower, J. *The New Grand Strategy*; St. Martin's Press: New York, NY, USA, 2016; p. 271.

16. Manyica, J.; Chui, M.; Brown, B.; Bughin, J.; Dobbs, R.; Roxburgh, C.; Hung Byers, A. *Big Data: The Next Frontier for Innovation, Competition, and Productivity* | McKinsey. Available online: <https://www.mckinsey.com/business-functions/mckinsey-digital/our-insights/big-data-the-next-frontier-for-innovation> (accessed on 21 November 2019).

17. Kunisch, M. Big Data in Agriculture—Perspectives for a Service Organization. *Landtechnik* 2016, 71, 1–3. [CrossRef]

18. Kamilaris, A.; Kartakoullis, A.; Prenafeta-Boldú, F.X. A review on the practice of big data analysis in agriculture. *Comput. Electron. Agric.* 2017, 143, 23–37. [CrossRef]

19. Proagrica. How Big Data Will Change Agriculture. Available online: <https://proagrica.com/news/how-big-data-will-change-agriculture/> (accessed on 21 November 2019).

20. Wolfert, S.; Ge, L.; Verdouw, C.; Bogaardt, M.-J. Big Data in Smart Farming—A review. *Agric. Syst.* 2017, 153, 69–80. [CrossRef]

21. CIAT & IFPRI. Big Data Coordination Platform. Proposal to the CGIAR Fund Council. Available online: <https://cgspace.cgiar.org/handle/10947/4303> (accessed on 17 September 2019).

22. Zambon, I.; Cecchini, M.; Egidi, G.; Saporito, M.G.; Colantoni, A. Revolution 4.0: Industry vs. Agriculture in a Future Development for SMEs. *Processes* 2019, 7, 36. [CrossRef]

23. Walch, K. How AI Is Transforming Agriculture. Available online: <https://www.forbes.com/sites/cognitiveworld/2019/07/05/how-ai-is-transforming-agriculture/> (accessed on 1 January 2020).

24. Bechar, A.; Vigneault, C. Agricultural robots for field operations: Concepts and components. *Biosyst. Eng.* 2016, 149, 94–111. [CrossRef]

25. Bechar, A.; Vigneault, C. Agricultural robots for field operations. Part 2: Operations and systems. *Biosyst. Eng.* 2017, 153, 110–128. [CrossRef]

26. Bergerman, M.; Billingsley, J.; Reid, J.; van Henten, E. Robotics in Agriculture and Forestry. In *Springer Handbook of Robotics*; Siciliano, B., Khatib, O., Eds.; Springer Handbooks; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2016; pp. 1463–1492. ISBN 978-3-319-32552-1.

27. Shamshiri, R.R.; Weltzien, C.; Hameed, I.A.; Yule, I.J.; Grift, T.E.; Balasundram, S.K.; Pitonakova, L.; Ahmad, D.; Chowdhary, G. Research and development in agricultural robotics: A perspective of digital farming. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 2018, 11, 1–14. [CrossRef]

28. Reddy, N.; Reddy, A.; Kumar, J. A critical review on agricultural robots. *Int. J. Mech. Eng. Technol. (IJMET)* 2016, 7, 6.
29. Lamborelle, A.; Fernández Álvarez, L. Farming 4.0: The Future of Agriculture? Available online: <https://www.euractiv.com/section/agriculture-food/infographic/farming-4-0-the-future-of-agriculture/> (accessed on 21 November 2019).
30. Sonka, S. Big Data and the Ag Sector: More than Lots of Numbers. *Int. Food Agribus. Manag. Rev.* 2014, 17, 1–20.
31. CBINSIGHTS. Ag Tech Deal Activity More Than Triples. Available online: <https://www.cbinsights.com/research/agriculture-farm-tech-startup-funding-trends/> (accessed on 18 February 2019).
32. Verified Market Intelligence. Global Agriculture Robots. Market Size, Status and Forecast to 2025; Verified Market Intelligence Inc.: Boonton, NJ, USA, 2018; pp. 1–79.
33. Varadharajan, D. AI, Robotics, And the Future of Precision Agriculture. Available online: <https://www.cbinsights.com/research/ai-robotics-agriculture-tech-startups-future/> (accessed on 21 November 2019).
34. Murugesan, R.; Sudarsanam, S.K.; Malathi, G.; Vijayakumar, V.; Neelanarayanan, V.; Venugopal, R.; Rekha, D.; Summit, S.; Rahul, B.; Atishi, M.; et al. Artificial Intelligence and Agriculture 5. 0. *Int. J. Recent Technol. Eng. (IJRTE)* 2019, 8, 8.
35. Zhang, Q. Precision Agriculture Technology for Crop Farming, 1st ed.; CRC Press and Taylor & Francis Group: Boca Raton, FL, USA, 2015; ISBN 978-1-4822-5107-4.
36. Rovira-Más, F. (Coordinator). VineScout European Project. Available online: www.vinescout.eu (accessed on 21 November 2019).
37. Searcy, S.W. Precision Farming: A New Approach to Crop Management. Available online: <http://agpublications.tamu.edu/pubs/eng/I5177.pdf> (accessed on 21 November 2019).
38. Zhang, N.; Wang, M.; Wang, N. Precision agriculture—A worldwide overview. *Comput. Electron. Agric.* 2002, 36, 113–132. [CrossRef]
39. Brasse, T. Precision Agriculture, 1st ed.; Thomson Delmar Learning: Clifton Park, NY, USA, 2006; ISBN 1-4018-8105-X.
40. Sethuramasamyraja, B. Precision Ag Research at California State University, Fresno. *Resource* 2017, 24, 18–19.
41. Miao, Y.; Mulla, D.J.; Robert, P.C. An integrated approach to site-specific management zone delineation. *Front. Agric. Sci. Eng.* 2018, 5, 432–441. [CrossRef]
42. Klassen, S.P.; Villa, J.; Adamchuk, V.; Serraj, R. Soil mapping for improved phenotyping of drought resistance in lowland rice fields. *Field Crops Res.* 2014, 167, 112–118. [CrossRef]
43. Buttafuoco, G.; Lucà, F. The Contribution of Geostatistics to Precision Agriculture. *Ann. Agric. Crop Sci.* 2016, 1, 1008–1009.
44. Khanal, S.; Fulton, J.; Shearer, S. An overview of current and potential applications of thermal remote sensing

in precision agriculture. *Comput. Electron. Agric.* 2017, 139, 22–32. [CrossRef]

45. Rudd, J.D.; Roberson, G.T.; Classen, J.J. Application of satellite, unmanned aircraft system, and ground-based sensor data for precision agriculture: A review. In *Proceedings of the 2017 ASABE Annual International Meeting; American Society of Agricultural and Biological Engineers, Spokane, WA, USA, 16–19 July 2017.*

46. Liebisch, F.; Pfeifer, J.; Khanna, R.; Lottes, P.; Stachniss, C.; Falck, T.; Sander, S.; Siegwart, R.; Walter, A.; Galceran, E. Flourish—A robotic approach for automation in crop management. In *Proceedings of the 22 Workshop Computer-Bildanalyse und Unbemannte autonom fliegende Systeme in der Landwirtschaft, Postdam, Germany, 27 April 2017; pp. 1–11.*

47. Lameski, P.; Zdravevski, E.; Kulakov, A. Review of Automated Weed Control Approaches: An Environmental Impact Perspective. In *Proceedings of the ICT Innovations 2018 Engineering and Life Sciences; Kalajdziski, S., Ackovska, N., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2018; pp. 132–147.*

48. Aravind, K.R.; Raja, P.; Pérez-Ruiz, M. Task-based agricultural mobile robots in arable farming: A review. *Span. J. Agric. Res.* 2017, 15, 1–16. [CrossRef]

49. Roldán, J.J.; del Cerro, J.; Garzón-Ramos, D.; Garcia-Aunon, P.; Garzón, M.; de León, J.; Barrientos, A. Robots in Agriculture: State of Art and Practical Experiences. In *Service Robots; Neves, A.J.R., Ed.; IntechOpen: Rijeka, Croatia, 2017.* [CrossRef]

50. Gonzalez-de-Santos, P.; Ribeiro, A.; Fernandez-Quintanilla, C.; Lopez-Granados, F.; Brandstötter, M.; Tomic, S.; Pedrazzi, S.; Peruzzi, A.; Pajares, G.; Kaplanis, G.; et al. Fleets of robots for environmentally-safe pest control in agriculture. *Precis. Agric.* 2017, 18, 574–614. [CrossRef]

51. Tobe, F. What's Slowing the Use of Robots in the Ag Industry? Available online: <https://www.therobotreport.com/whats-slowing-the-use-of-robots-in-the-ag-industry/> (accessed on 21 November 2019).

52. Bogue, R. Robots poised to revolutionise agriculture. *Ind. Robot* 2016, 43, 450–456. [CrossRef]

53. Diago, M.P.; Rovira-Más, F.; Saiz-Rubio, V.; Faenzi, E.; Evain, S.; Ben Ghazlen, N.; Labails, S.; Stoll, M.; Scheidweiler, M.; Millot, C.; et al. The “eyes” of the VineRobot: Non-destructive and autonomous vineyard monitoring on-the-go. In *Proceedings of the 62nd German Winegrowers' Congress, Stuttgart, Germany, 27–30 November 2016.*

54. Saiz-Rubio, V.; Diago, M.; Rovira-Más, F.; Cuenca, A.; Gutiérrez, S.; Tardáguila, J. Physical requirements for vineyard monitoring robots. In *Proceedings of the XIX World Congress of CIGR, Antalya, Turkey, 22–25 April 2018; pp. 1–4.*

55. Naïo Technologies. Features & Benefits OZ Weeding Robot. Available online: <https://www.naio-technologies.com/en/agricultural-equipment/weeding-robot-oz/> (accessed on 21 November 2019).

56. Thomson, G. The global unmanned spray system (GUSS). *Resource* 2019, 26, 9–10.

57. Cavender-Bares, K.; Lofgren, J.B. Robotic Platform and Method for Performing Multiple Functions in Agricultural Systems. U.S. Patent US9265187B2, 23 February 2016.

58. Hameed, I.A. A Coverage Planner for Multi-Robot Systems in Agriculture. In Proceedings of the IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR), Kandima, Maldives, 1–5 August 2018; pp. 698–704.
59. Ball, D.; Ross, P.; English, A.; Patten, T.; Upcroft, B.; Fitch, R. Robotics for Sustainable Broad-Acre Agriculture. Available online: https://www.researchgate.net/publication/283722961_Robotics_for_Sustainable_Broad-Acre_Agriculture (accessed on 21 November 2019).
60. Tobe, F. The Ultimate Guide to Agricultural Robotics. Available online: https://www.roboticsbusinessreview.com/agriculture/the_ultimate_guide_to_agricultural_robotics/ (accessed on 21 November 2019).
61. Kweon, G.; Lund, E.; Maxton, C. Soil organic matter and cation-exchange capacity sensing with on-the-go electrical conductivity and optical sensors. *Geoderma* 2013, 199, 80–89. [CrossRef]
62. Thomasson, A.; Baillie, C.; Antile, D.; Lobsey, C.; McCarthy, C. Autonomous Technologies in Agricultural Equipment: A Review of the State of the Art. In Proceedings of the 2019 Agricultural Equipment Technology Conference, Louisville, KY, USA, 11–13 February 2019; American Society of Agricultural and Biological Engineers: St. Joseph, MI, USA, 2019. ASABE Publication Number 913C0119.
63. Sennaar, K. Agricultural Robots—Present and Future Applications (Videos Included). Available online: <https://emerj.com/ai-sector-overviews/agricultural-robots-present-future-applications/> (accessed on 1 January 2020).
64. Köksal, Ö.; Tekinerdogan, B. Architecture design approach for IoT-based farm management information systems. *Precis. Agric.* 2019, 20, 926–958. [CrossRef]
65. Rovira-Más, F.; Saiz-Rubio, V. Crop Biometric Maps: The Key to Prediction. *Sensors* 2013, 13, 12698–12743. [CrossRef]
66. Oliver, M.; Webster, R. A tutorial guide to Geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. *Catena* 2014, 113, 56–69. [CrossRef]
67. Saiz-Rubio, V.; Rovira-Más, F. Proximal sensing mapping method to generate field maps in vineyards. *Agric. Eng. Int. CIGR J.* 2013, 15, 47–59.
68. Adamchuk, V.I.; Hummel, J.W.; Morgan, M.T.; Upadhyaya, S.K. On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Comput. Electron. Agric.* 2004, 44, 71–91. [CrossRef]
69. Cossell, S.; Whitty, M.; Liu, S.; Tang, J. Spatial Map Generation from Low Cost Ground Vehicle Mounted Monocular Camera. *IFAC PapersOnLine* 2016, 49, 231–236. [CrossRef]
70. Zhang, N.; Taylor, R.K. Applications of a Field-Level Geographic Information System (FIS) in Precision Agriculture. *Appl. Eng. Agric.* 2001, 17, 885–892. [CrossRef]
71. Runquist, S.; Zhang, N.; Taylor, R.K. Development of a field-level geographic information system. *Comput. Electron. Agric.* 2001, 31, 201–209. [CrossRef]
72. Burlacu, G.; Costa, R.; Sarraipa, J.; Jardim-Golcalves, R.; Popescu, D. A Conceptual Model of Farm

- Management Information System for Decision Support. In Proceedings of the Technological Innovation for Collective Awareness Systems; Camarinha-Matos, L.M., Barrento, N.S., Mendonça, R., Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2014; pp. 47–54.
73. Schmaltz, R.; Coolidge, M.; Donald, G. Agricultural Enterprise Management Method and System. Canada Patent CA2967518A1, 11 May 2017.
74. Coolidge, M.; Schmaltz, R.; Schmaltz, T. Crop Management Method and System. U.S. Patent WO/2018/187870, 4 October 2018.
75. Wilbur, M.; Ellsworth, J.; Oommen, T.; Mohapatra, A.; Thayer, D. Systems and Methods for Cloud-Based Agricultural Data Processing and Management. U.S. Patent US9667710B2, 30 May 2017.
76. Granular Farm Management Software, Precision Agriculture, Agricultural Software. Available online: <https://granular.ag/> (accessed on 21 March 2019).
77. Ruland, S. AgGateway's Agricultural Data Application Programming Toolkit (ADAPT). Resource 2019, July/August 2019.
78. Capterra Inc. Capterra. Farm Management Software. Available online: www.capterra.com (accessed on 21 March 2019).
79. PAT RESEARCH. Top 9 Farm Management Software—Compare Reviews, Features, Pricing in 2019. Available online: <https://www.predictiveanalyticstoday.com/top-farm-management-software/> (accessed on 21 November 2019).
80. Srivastava, P.K.; Singh, R.M. GIS based integrated modelling framework for agricultural canal system simulation and management in Indo-Gangetic plains of India. *Agric. Water Manag.* 2016, 163, 37–47. [CrossRef]
81. Giusti, E.; Marsili-Libelli, S. A Fuzzy Decision Support System for irrigation and water conservation in agriculture. *Environ. Model. Softw.* 2015, 63, 73–86. [CrossRef]
82. Drenjanac, D.; Tomic, S.; Hinterhofer, T. User interactions and network monitoring ease decision-making in a robotic fleet for Precision Agriculture. In Proceedings of the Second International Conference on Robotics and Associated High-technologies and Equipment for Agriculture and Forestry (RHEA 2014), Madrid, Spain, 21–23 May 2014.
83. Asfaw, D.; Black, E.; Brown, M.; Nicklin, K.J.; Otu-Larbi, F.; Pinnington, E.; Challinor, A.; Maidment, R.; Quaipe, T. TAMSAT-ALERT v1: A new framework for agricultural decision support. *Geosci. Model Dev.* 2018, 11, 2353–2371. [CrossRef]
84. Hoogenboom, G.; Porter, C.H.; Shelia, V.; Boote, K.J.; Singh, U.; White, J.W.; Hunt, L.A.; Ogoshi, R.; Lizaso, J.; Koo, J.; et al. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.7.5; DSSAT Foundation: Gainesville, FL, USA. Available online: <https://dssat.net> (accessed on 1 January 2020).
85. Rupp, C.E.; Kull, A.C.S.; Pitstick, S.R.; Dumstorff, P.L. Generating an Agriculture Prescription. U.S. Patent

US9974226B2, 22 May 2018.

86. Lindores, R.J. Generating a Crop Recommendation. U.S. Patent US20140012732A1, 9 January 2014.

87. Navarro-Hellín, H.; Martínez-del-Rincon, J.; Domingo-Miguel, R.; Soto-Valles, F.; Torres-Sánchez, R. A decision support system for managing irrigation in agriculture. *Comput. Electron. Agric.* 2016, 124, 121–131. [CrossRef]

88. Kumar, A.; Sah, B.; Singh, A.R.; Deng, Y.; He, X.; Kumar, P.; Bansal, R.C. A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 69, 596–609. [CrossRef]

89. Rupnik, R.; Kukar, M.; Vračar, P.; Košir, D.; Pevec, D.; Bosnić, Z. AgroDSS: A decision support system for agriculture and farming. *Comput. Electron. Agric.* 2019, 161, 260–271. [CrossRef]

90. Rose, D.C.; Sutherland, W.J.; Parker, C.; Lobley, M.; Winter, M.; Morris, C.; Twining, S.; Ffoulkes, C.; Amano, T.; Dicks, L.V. Decision support tools for agriculture: Towards effective design and delivery. *Agric. Syst.* 2016, 149, 165–174. [CrossRef]

91. ASABE AE50 Awards. *Resour. Eng. Technol. Sustain. World* 2019, 19, 4–16.

92. Colaço, A.F.; Molin, J.P. Variable rate fertilization in citrus: A long term study. *Precis. Agric.* 2017, 18, 169–191. [CrossRef]

93. Nawar, S.; Corstanje, R.; Halcro, G.; Mulla, D.; Mouazen, A.M. Delineation of Soil Management Zones for Variable-Rate Fertilization. *Adv. Agron.* 2017, 143, 175–245. [CrossRef]

94. Saiz-Rubio, V.; Rovira-Más, F. VineScout_ROBOTdata_22July2019_TN102. Zenodo 2019. [CrossRef]

95. Fountas, S.; Carli, G.; Sørensen, C.G.; Tsiropoulos, Z.; Cavalaris, C.; Vatsanidou, A.; Liakos, B.; Canavari, M.; Wiebensohn, J.; Tisserye, B. Farm management information systems: Current situation and future perspectives. *Comput. Electron. Agric.* 2015, 115, 40–50. [CrossRef]

96. Kritikos, M. Precision Agriculture in Europe: Legal, Social and Ethical Considerations—Think Tank. Available online: [http://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document.html?reference=EPRS_STU\(2017\)603207](http://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document.html?reference=EPRS_STU(2017)603207) (accessed on 21 November 2019).

© 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

