

# **AGRICULTURA DE PRECISIÓN:** Monitoreo inteligente con sensores

# Tabla de contenido

- Resumen** 5
- 1. Introducción** 6
- 2. Procesos de cultivo** 8
- 3. Variables de cultivo** 10
  - 3.1 Oportunidades de mejora en los procesos de cultivo** 10
    - 3.1.1 Adquisición de imágenes y datos mediante sensores 10
    - 3.1.2 Procesamiento de imágenes y análisis 11
    - 3.1.3 Aprendizaje automático y redes neuronales 12
    - 3.1.4 Integración con sistemas automatizados (EDS Robotics, 2021) 13
    - 3.1.5 Retroalimentación y mejora continua 13
  - 3.2 Beneficios de esta tecnología** 14
  - 3.3 Optimización de área de cultivos** 14
    - 3.3.1 Geolocalización y Sistemas de Información Geográfica (SIG), (EOS Data Analytics, marzo 2024) 15
    - 3.3.2 Teledetección y Análisis de Imágenes Satelitales 16
    - 3.3.3 Sensores Remotos y Drones (Daponte, 2019) 16
    - 3.3.4 Big Data y Análisis Predictivo 17
    - 3.3.5 Modelos Matemáticos y Algoritmos de Optimización 17

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| 3.3.6      | Uso de la Inteligencia Artificial y el Aprendizaje Automático  | 18        |
| 3.3.7      | Plataformas y Aplicaciones Móviles   | 18        |
| 3.3.8      | Internet de las Cosas (IoT)  | 19        |
| <b>3.4</b> | <b>Mejorar el sustrato de siembra teniendo en cuenta sus propiedades químicas y físicas</b>  | <b>20</b> |
| 3.4.1      | Análisis Químico del Sustrato  | 20        |
| 3.4.2      | Mejoras en las Propiedades Físicas del Sustrato  | 22        |
| 3.4.3      | Aplicación de Tecnología de Agricultura de Precisión   | 24        |
| 3.4.4      | Uso de Modelos Predictivos   | 25        |
| <b>3.5</b> | <b>Estado vegetativo de las plantas para detectar y eliminar malezas y para optimizar los procesos de recolección y acopio de productos agrícolas con sostenibilidad ambiental</b> | <b>25</b> |
| 3.5.1      | Identificación del Estado Vegetativo de las Plantas  | 25        |
| 3.5.2      | Detección y Eliminación de Malezas (Hasan, 2021)   | 26        |
| 3.5.3      | Optimización de los Procesos de Recolección y Acopio (Santos Valle, 2021)  | 28        |
| 3.5.4      | Sostenibilidad Ambiental en Todo el Proceso  | 29        |
| <b>4.</b>  | <b>Tecnología utilizable en la agroindustria</b>   | <b>30</b> |
| 4.1        | Sensores   | 30        |
| 4.2        | Automatización industrial  | 32        |
| 4.3        | Internet de las cosas (IoT)  | 32        |
| 4.4        | Inteligencia artificial  | 33        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>4.5 Blockchain</b>   | <b>34</b> |
| <b>4.6 Sistemas de trazabilidad alimentaria</b>                   | <b>34</b> |
| <b>5. Agricultura de precisión</b>                                | <b>36</b> |
| <b>6. Sensores de variables agrícolas</b>                         | <b>37</b> |
| <b>6.1 Sensores de suelo</b>                                      | <b>37</b> |
| <b>6.2 Sensores climáticos (Delgado Martorell, 2023)</b>          | <b>38</b> |
| <b>6.3 Sensores de estado fenológico</b>                          | <b>39</b> |
| <b>6.4 Sensores de nutrientes para fertirriego</b>                | <b>40</b> |
| 6.4.1 Sensores de Humedad del Suelo                               | 40        |
| 6.4.2 Sensores de Conductividad Eléctrica (CE)                    | 41        |
| 6.4.3 Sensores de pH del Suelo                                    | 41        |
| 6.4.4 Sensores de Temperatura y Humedad del Aire                  | 42        |
| 6.4.5 Sensores de Nivel de Nitrógeno                              | 42        |
| 6.4.6 Sensores de Flujo y Velocidad del Agua                      | 42        |
| 6.4.7 Sensores de Oxígeno Disuelto en el Agua                     | 43        |
| 6.4.8 Sensores de Nivel de Nutrientes (Específicos por Nutriente) | 43        |
| <b>7. Conclusiones</b>  | <b>44</b> |
| <b>8. Referencias</b>   | <b>45</b> |

# Agricultura de precisión: monitoreo inteligente con sensores

## Resumen

El crecimiento continuo de la población mundial plantea desafíos cada vez mayores, entre los que se destaca la garantía de un suministro adecuado de alimentos saludables. Si bien países como Colombia cuentan con extensas tierras cultivables, la baja productividad por hectárea limita su potencial agrícola afectando así el nivel de suministro. Para abordar este problema es fundamental la colaboración de ingenieros y profesionales del sector agro, quienes pueden aprovechar las tecnologías emergentes para desarrollar soluciones innovadoras.

Este documento analiza factores que inciden en la baja productividad agrícola y propone oportunidades para el desarrollo de proyectos tecnológicos como el uso de sistemas de agricultura de precisión. En primer lugar, se identifican las variables físicas claves que inciden en los procesos de cultivo. Posteriormente, se realiza una revisión de sistemas tecnológicos y el papel de los sensores en estos. Finalmente, se presentan ideas para impulsar proyectos de innovación tecnológica en el sector agropecuario, con el objetivo de mejorar la eficiencia y rentabilidad de la producción agrícola.

## Abstrac

The continuous growth of the world's population presents ever-increasing challenges, chief among them ensuring an adequate supply of healthy food. While countries like Colombia possess vast expanses of arable land, low productivity per hectare limits their agricultural potential, thereby affecting overall supply levels. Addressing this issue requires the collaboration of engineers and agricultural professionals who can leverage emerging technologies to develop innovative solutions.

This document examines the factors contributing to low agricultural productivity and explores opportunities for technological advancements, such as the implementation of precision agriculture systems. First, it identifies key physical variables that influence cultivation processes. Next, it reviews technological systems and the role of sensors within them. Finally, it presents ideas for fostering technological innovation in the agricultural sector to enhance efficiency and profitability in agricultural production.

## 1. Introducción

Para el año 2050, se estima que la población mundial llegue aproximadamente a los 10.000 millones de personas (Naciones Unidas: paz, dignidad e igualdad en un planeta sano). Esta abultada cifra genera muchas preocupaciones, siendo una de las más importantes la garantía de la alimentación para ese número de habitantes. Entre las posibles soluciones a este desafío se encuentra la optimización y/o aumento de la producción de suministros agrícolas en todos los países. En el caso de Colombia el reto es aún mayor, ya que, según las estadísticas, la producción por hectárea es inferior a la de muchos países, incluidos algunos de nuestros vecinos. Y aunque el país cuenta con la ventaja de poseer recursos naturales y terrenos aptos para el cultivo de diversos productos, se enfrenta a múltiples desafíos, entre ellos, a la incorporación de tecnología en los diferentes procesos productivos agrícolas.

Adicionalmente, la producción agropecuaria de un país no solo busca garantizar la seguridad alimentaria, sino también generar riqueza a través de la competitividad lograda mediante la eficiencia en todos sus procesos. En este contexto, la agricultura de precisión surge como una estrategia de gestión que recopila, procesa y analiza datos temporales, espaciales e individuales, combinándolos con otras fuentes de información para respaldar las decisiones de manejo según la variabilidad estimada. De esta manera, se mejora la eficiencia en el uso de recursos, la productividad, la calidad, la rentabilidad y la sostenibilidad de la producción agrícola.

En consecuencia, para disponer de herramientas que permitan analizar la información de los cultivos con el fin de mejorar la productividad, es fundamental recolectar datos de las variables del sustrato y del ambiente en donde se encuentran. Para este fin el primer elemento tecnológico utilizado son los sensores, cuya función es convertir variables físicas —como la temperatura, la humedad, el pH, la concentración de nutrientes o la velocidad del viento, entre otras— en señales eléctricas que a su vez pueden ser recolectadas y enviadas a un computador (o algún otro sistema de procesamiento de información) para su almacenamiento y análisis. Actualmente, es común utilizar servidores en la nube para el procesamiento y seguimiento de dicha información.

En cuanto a los procesos agrícolas, ya que estos son susceptibles de ser instrumentados, es decir, de incorporarles sensores para registrar información sobre variables del sustrato, del clima y del estado fenológico de las plantas, la cual puede ser enviada a un servidor mediante sistemas de comunicación especializados, como los habilitados por la tecnología del Internet de las Cosas (IoT). Una vez almacenada la información en el servidor, los datos pueden analizarse y emplearse para llevar a cabo acciones de control sobre el cultivo mediante equipos electrónicos que forman parte de la automatización agrícola, como bombas, aspersores, fumigadoras o calefactores, de

esta forma se logra automatizar el cultivo. Aún más, si se incorporan Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC), como la inteligencia artificial, es posible tomar decisiones integrando múltiples variables del cultivo, pudiendo mejorar así la producción de manera significativa.



Planta de arándano con condensación de agua en las hojas

**NOTA:** En este documento se presentan algunos ejemplos de sensores de diferente tipo y marca. Es importante aclarar que CINTEL no recomienda, ni sugiere el uso de ningún tipo de sensor o marca, incluido o no incluido en este documento. La referencia a los productos se hace solo para ilustración del lector.

## 2. Procesos de cultivo

El cultivo de productos agrícolas pasa por varias etapas:

### PREPARACIÓN DEL SUELO

Esta etapa es fundamental, ya que no solamente se requiere una adecuación de las condiciones físicas del terreno de cultivo sino también su preparación química desde el punto de vista de contenido de nutrientes y la eliminación de componentes nocivos para el crecimiento de las plantas. Esta tarea incluye otras acciones más sencillas como quitar la maleza y las hierbas para evitar que entorpezcan la siembra. El tipo de suelo también es importante, pues algunos requieren preparación superficial y otros necesitan un trabajo más profundo.

### SELECCIÓN DE SEMILLAS

Esta tarea puede ser una labor sencilla a primera vista, pero implica identificar y aislar las mejores semillas en términos de pureza, limpieza y sanidad para garantizar cultivos con plantas de la mejor calidad.

### SIEMBRA

En esta etapa la disposición de las semillas en un suelo debidamente acondicionado, su ubicación correcta y las condiciones climáticas adecuadas juegan un papel importante para el éxito del cultivo.

### GERMINACIÓN

Es el proceso de desarrollo de una semilla hasta convertirse en una planta. En esta etapa el embrión se hincha y rompe la cubierta de la semilla, aparecen pelos que absorben agua y sujetan la planta al suelo, la planta se alarga hasta salir a la luz.

### DESARROLLO VEGETATIVO

En este tiempo se desarrollan las hojas que realizarán la fotosíntesis. Es la fase de crecimiento en la que se produce un aumento de su biomasa, es decir, de sus hojas y tallos. Durante esta etapa, la planta desarrolla su sistema radicular y se produce un crecimiento importante.

### FLORACIÓN

Esta etapa se extiende desde la iniciación y desarrollo de las yemas florales, hasta la apertura de las flores. Luego de iniciada la floración en el tallo principal, ésta se generaliza hacia las ramas, avanzando ordenadamente hacia los nudos más altos en la medida que las plantas van creciendo.

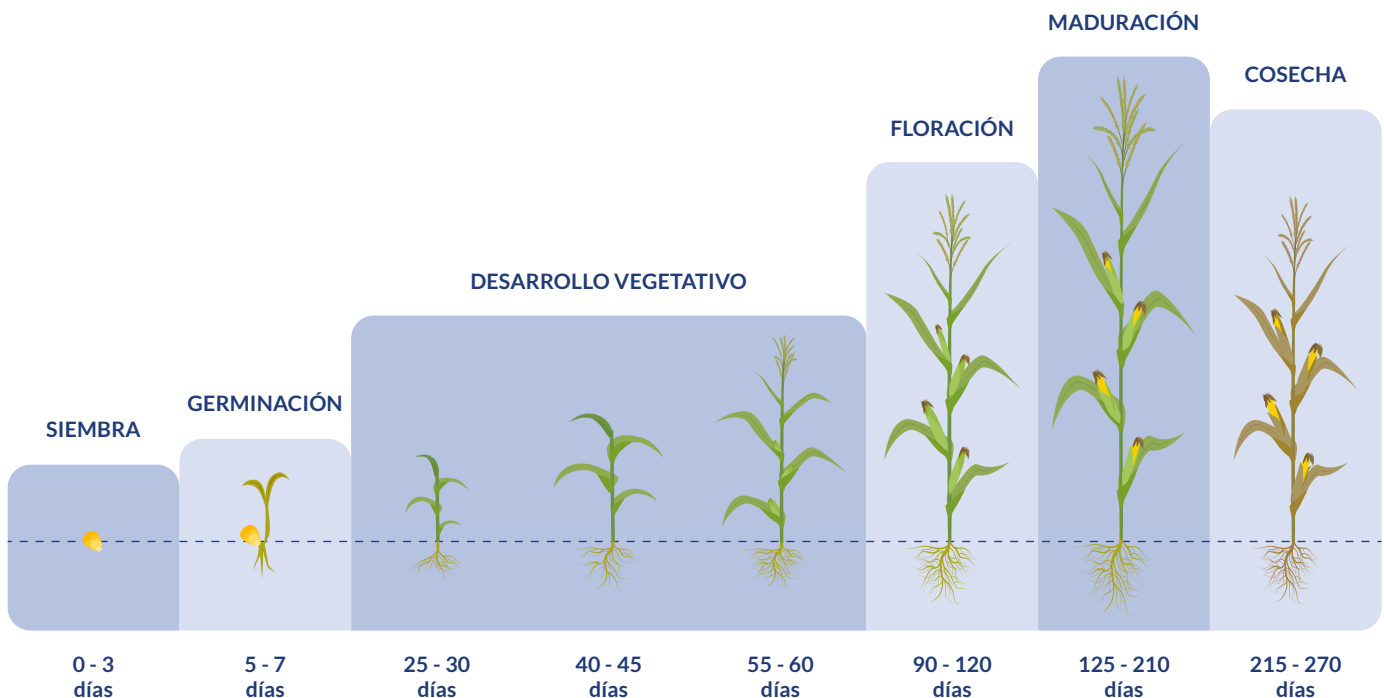
### MADURACIÓN

Etapa que transcurre desde el final de su crecimiento y desarrollo hasta el momento en que se torna senescente. En los frutos, la madurez de campo se alcanza cuando el fruto está listo para su consumo o procesamiento industrial.

### COSECHA

La etapa de cosecha es la etapa final del ciclo agrícola, en la que se recolectan los productos vegetales que están maduros para su posterior procesamiento y comercialización.

A continuación, se presentan las etapas para un cultivo de maíz.



Fuente: CESAVEG (2008).

## 3. Variables de cultivo

Existen diferentes variables que influyen en el éxito del cultivo en sus distintas etapas y se pueden agrupar en variables de sustrato (suelo) y variables climáticas. Las primeras incluyen el pH, la temperatura, la humedad, los nutrientes y la conductividad. Las segundas comprenden la temperatura ambiente, la humedad relativa, la velocidad del viento, la pluviosidad y la polución, entre otras. Adicionalmente, se pueden identificar variables relacionadas con el estado vegetativo de las plantas, tales como el área foliar, el color de las hojas y los frutos, la altura de la planta, el número de frutos y hojas, y el ancho del tallo. Estas variables proporcionan información clave sobre el desarrollo de las plantas, por tanto adquieren especial importancia en las tareas de seguimiento de cultivos.

Por su parte, el monitoreo y seguimiento de dichas variables pueden ser realizados tanto por los cultivadores como por máquinas equipadas con dispositivos como sensores específicos. Una ventaja del uso de computadores para el almacenamiento y visualización de las variables es que facilitan su trazabilidad y análisis mediante software especializado. Finalmente, esta misma información se convierte en el insumo más importante para automatizar procesos como el fertirriego, el control de pH, temperatura y humedad; tareas que pueden ser ejecutadas por un computador que, equipado con inteligencia y dispositivos adecuados, permite configurar una automatización completa del cultivo.

### 3.1 Oportunidades de mejora en los procesos de cultivo variables de cultivo

De acuerdo con el panorama presentado sobre las variables de un cultivo y la posibilidad de medir sus parámetros en las diferentes etapas de desarrollo de este, se pueden identificar oportunidades de mejora incorporando desarrollos tecnológicos en tareas como: **Selección automática de semillas mediante imágenes y otros sensores.**

#### 3.1.1 Adquisición de imágenes y datos mediante sensores

La selección automática de semillas mediante imágenes (visión por computadora) y otros sensores es una técnica avanzada que se utiliza para mejorar la eficiencia y precisión en la clasificación de semillas, ya sea en procesos de cultivo o en la industria de semillas para la venta. Este proceso combina tecnologías como el aprendizaje automático (Machine Learning-ML) y el uso de sensores específicos (Biosensores) (Kadian, 2023,100267). En términos generales, el proceso tiene tres etapas.

### CÁMARAS DE ALTA RESOLUCIÓN

Se utilizan cámaras RGB o cámaras multispectrales para capturar imágenes detalladas de las semillas. Las cámaras RGB capturan imágenes en el espectro visible, mientras que las cámaras multispectrales pueden capturar imágenes en diferentes longitudes de onda, proporcionando información adicional sobre las características físicas y químicas de las semillas (por ejemplo, la humedad, el contenido de aceite, etc.).

### CÁMARAS 3D (ESTÉREO O DE TIEMPO DE VUELO)

Para obtener información sobre la forma tridimensional de las semillas se pueden utilizar cámaras estéreo o de tiempo de vuelo (ToF), que ayudan a identificar semillas rotas, deformadas o con dimensiones no deseadas.

### SENSORES DE FLUORESCENCIA O ESPECTROSCOPIA

Algunos sistemas avanzados utilizan sensores espectroscópicos (como la espectroscopía de infrarrojo cercano (Marvern Panalytical, 2025)) para analizar la composición química de las semillas. Esto puede ser útil para identificar características internas de la semilla que no se ven a simple vista, como la presencia de enfermedades o defectos internos.

### SENSORES DE VIBRACIÓN O ACELERÓMETROS

Se utilizan para detectar la velocidad y el movimiento de las semillas en las cintas transportadoras o canales de selección. Su uso es importante para mejorar la precisión del proceso de clasificación y para garantizar que las semillas se clasifiquen correctamente en función de su tamaño, forma y otros parámetros físicos.

## 3.1.2 Procesamiento de imágenes y análisis

Una vez que se han capturado las imágenes y los datos de los sensores, el siguiente paso es procesar esa información para identificar y clasificar las semillas.

### PREPROCESAMIENTO DE IMÁGENES

Este paso incluye técnicas para mejorar la calidad de las imágenes, como la eliminación de ruido, la mejora del contraste y la corrección de distorsiones. También se puede realizar un recorte para centrar las semillas de manera más efectiva.

### SEGMENTACIÓN DE LA IMAGEN

Este proceso implica separar las semillas de su fondo para poder analizarlas de manera individual utilizando técnicas de umbralización, detección de bordes o algoritmos más avanzados como el clustering (que consiste en agrupar ítems en grupos con características similares y se utiliza para determinar patrones climáticos (UNIR, 2025)) para identificar las semillas de forma precisa.

### EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS

A partir de las imágenes se extraen características relevantes que describen las semillas. Algunas de las características comunes incluyen:

**Tamaño:** Diámetro, volumen, área, etc.

**Forma:** Aspecto general, circularidad, simetría.

**Color:** Diferentes colores pueden indicar diferentes tipos de semillas o características específicas.

**Textura:** La textura de la superficie puede ser útil para identificar defectos o tipos de semillas.

### CLASIFICACIÓN

Una vez que se han extraído las características relevantes, se emplean algoritmos de clasificación como k-NN (k-vecinos más cercanos), máquinas de soporte vectorial (SVM), redes neuronales o técnicas de aprendizaje profundo (deep learning) (Campos-Taberner, 2020, 35-48) para clasificar las semillas en categorías (por ejemplo, de acuerdo con su calidad, tipo, tamaño, forma, etc.).

## 3.1.3 Aprendizaje automático y redes neuronales

### MODELOS DE APRENDIZAJE SUPERVISADO

En estos modelos, se entrena a un algoritmo con un conjunto de datos etiquetados, en el sector agrícola con ejemplos de semillas con características conocidas (buena calidad, defectuosas, rotas, etc.). Así, el algoritmo aprende a identificar patrones en los datos y analizar la calidad de nuevas semillas basándose en esas características.

### REDES NEURONALES CONVOLUCIONALES (CNN)

Para tareas de clasificación complejas como la identificación de tipos específicos de semillas o la detección de pequeños defectos en su superficie, las redes neuronales convolucionales son

especialmente útiles, estas usan datos tridimensionales para clasificar imágenes y reconocimiento de objetos (IBM, 2025). Y con esos datos pueden aprender a identificar características visuales complejas sin necesidad de extraer manualmente características detalladas.

#### APRENDIZAJE NO SUPERVISADO Y CLUSTERING

En algunos casos, si no se tienen datos etiquetados, se pueden usar técnicas de clustering (como K-means o DBSCAN) para agrupar semillas con características similares, lo que puede ayudar a organizar las semillas según su apariencia o propiedades.

### 3.1.4 Integración con sistemas automatizados (EDS Robotics, 2021)

#### ROBOTS Y SISTEMAS DE MANIPULACIÓN

Una vez que las semillas han sido clasificadas mediante visión por computadora, los sistemas automatizados, como los robots de selección, pueden recoger y separar las semillas según la categoría definida (por ejemplo, semillas de buena calidad, defectuosas, rotas, etc.). Estos sistemas suelen tener brazos robóticos equipados con pinzas o succión para manipular las semillas.

#### SISTEMAS DE TRANSPORTE Y CLASIFICACIÓN

Las semillas clasificadas se pueden dirigir a diferentes compartimentos o contenedores mediante cintas transportadoras automatizadas, basándose en las decisiones del sistema de visión.

### 3.1.5 Retroalimentación y mejora continua

#### REENTRENAMIENTO DE MODELOS

Los sistemas pueden estar diseñados para mejorar continuamente a medida que recopilan más datos de nuevos lotes de semillas y así, con el tiempo, los modelos de aprendizaje automático pueden ajustarse para mejorar su precisión.

#### VALIDACIÓN MANUAL

Aunque el proceso es automático se suele realizar una validación manual periódica para garantizar que el sistema esté funcionando correctamente y para corregir cualquier error en la clasificación.

## 3.2 Beneficios de esta tecnología

#### EFICIENCIA

La automatización de la selección de semillas permite clasificar grandes volúmenes de semillas a una velocidad mucho mayor que los métodos manuales.

#### PRECISIÓN

Los sistemas basados en visión por computadora pueden identificar pequeños defectos o características que no son fácilmente visibles para el ojo humano.

#### REDUCCIÓN DE COSTOS

Minimiza la necesidad de intervención manual y reduce los errores asociados con la clasificación de semillas.

#### MEJORA DE LA CALIDAD

Los sistemas basados en visión por computadora pueden identificar pequeños defectos o características que no son fácilmente visibles para el ojo humano.

Este proceso, aunque avanzado, sigue siendo un área activa de investigación y desarrollo, y con el tiempo se espera que los sistemas mejoren en precisión y capacidad para manejar diferentes tipos de semillas y condiciones ambientales.

## 3.3 Optimización de área de cultivos

Optimizar el cálculo del área de cultivo con tecnologías modernas es crucial para la gestión eficiente de los recursos agrícolas, la planificación del uso del suelo, la monitorización del rendimiento y la toma de decisiones informadas sobre riego, fertilización, siembra y cosecha. Hoy en día, existen varias tecnologías que permiten realizar estos cálculos de manera más precisa y eficiente, reduciendo los errores humanos y mejorando la productividad agrícola. Algunas tecnologías clave son:

### 3.3.1 Geolocalización y Sistemas de Información Geográfica (SIG), (EOS Data Analytics, marzo 2024)

#### GPS (SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL)

Los GPS son fundamentales para determinar la ubicación precisa de los límites de las parcelas de cultivo. Equipos de alta precisión, como los que emplean RTK (Real Time Kinematic), permiten obtener coordenadas exactas, con errores de solo unos pocos centímetros, al tiempo que sus datos se integran en aplicaciones de SIG para mapear el área de cultivo de manera detallada.

#### SIG (SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA)

El SIG es una herramienta clave para analizar y gestionar datos espaciales. Se utiliza para crear mapas detallados de los campos agrícolas que incluyen información sobre la extensión de las parcelas, la topografía, el tipo de suelo, las zonas de riego, etc. A partir de los datos obtenidos con GPS y otras fuentes, los SIG permiten calcular el área exacta de los cultivos, así como realizar análisis geoespaciales complejos.

#### DRONES Y SATÉLITES

Los drones equipados con cámaras multiespectrales, térmicas y de alta resolución pueden realizar levantamientos topográficos precisos del área cultivada. Además, los satélites proporcionan imágenes periódicas que, cuando se procesan, permiten calcular el área de cultivo y monitorear su evolución a lo largo del tiempo. Imágenes satelitales de alta resolución y la tecnología de teledetección también permiten identificar de manera más precisa las fronteras de las parcelas.



### 3.3.2 Teledetección y Análisis de Imágenes Satelitales

#### IMÁGENES DE SATÉLITE

Los drones equipados con cámaras multiespectrales, térmicas y de alta resolución pueden realizar levantamientos topográficos precisos del área cultivada. Además, los satélites proporcionan imágenes periódicas que, cuando se procesan, permiten calcular el área de cultivo y monitorear su evolución a lo largo del tiempo. Imágenes satelitales de alta resolución y la tecnología de teledetección también permiten identificar de manera más precisa las fronteras de las parcelas.

#### ÍNDICES DE VEGETACIÓN (NDVI), (AURAVANT, 2024)

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) es una medida basada en imágenes satelitales que ayuda a identificar áreas de cultivo activas y su densidad de vegetación. Aunque su principal aplicación es la monitorización de la salud de los cultivos, también puede ayudar a identificar con precisión las áreas cultivadas.

### 3.3.3 Sensores Remotos y Drones (Daponte, 2019)

#### DRONES CON SENSORES MULTIESPECTRALES

Los drones equipados con cámaras o sensores multiespectrales pueden capturar imágenes detalladas de las parcelas proporcionando información precisa sobre el estado de los cultivos, el tipo de vegetación y la delimitación exacta de las áreas cultivadas. Estos sensores pueden detectar diferencias sutiles en el terreno, permitiendo calcular el área de cultivo de manera más exacta, especialmente en terrenos no planos o de difícil acceso.

#### LIDAR (LIGHT DETECTION AND RANGING) (WASSER, 2024)

La tecnología LIDAR se utiliza en drones o en plataformas terrestres para realizar escaneos de alta resolución del terreno. Este método permite obtener modelos 3D detallados del campo agrícola que facilitan una medición precisa del área cultivada, incluso en terrenos irregulares o con diferentes tipos de cultivos. Además, puede ayudar a identificar los contornos y características del terreno que afectan al área utilizable para cultivo.



### 3.3.4 Big Data y Análisis Predictivo

#### PLATAFORMAS DE ANÁLISIS DE BIG DATA

El uso de plataformas basadas en Big Data para recopilar y analizar datos de diversas fuentes (GPS, satélites, drones, sensores en el campo) permite generar mapas precisos de los campos y calcular el área cultivada en tiempo real. Estos sistemas también pueden combinar datos históricos sobre el clima, el uso del suelo y los cultivos anteriores para hacer predicciones más precisas sobre el rendimiento y las necesidades futuras de cada parcela.

#### SOFTWARE DE GESTIÓN AGRÍCOLA

Algunas aplicaciones de software agrícolas combinan datos de GPS, SIG, sensores y otras fuentes para ofrecer cálculos automáticos del área de cultivo y recomendaciones personalizadas. Estas plataformas ayudan a los agricultores a gestionar la tierra de manera más eficiente, optimizando el uso del suelo y la asignación de recursos.

### 3.3.5 Modelos Matemáticos y Algoritmos de Optimización

#### MODELOS MATEMÁTICOS

En algunos casos, los algoritmos matemáticos basados en mallas o modelos de optimización espacial se utilizan para calcular áreas más precisas en terrenos irregulares o con bordes complejos. Estos modelos pueden tomar en cuenta la geometría del terreno, las curvas de nivel y otros factores para realizar estimaciones precisas del área cultivada.

### ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN ESPACIAL

Los algoritmos avanzados de optimización pueden integrar múltiples fuentes de datos (imágenes satelitales, GPS, drones...) para calcular el área cultivada de manera eficiente y con alta precisión, ajustándose a las irregularidades del terreno.

## 3.3.6 Uso de la Inteligencia Artificial y el Aprendizaje Automático

### DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE LÍMITES DE CULTIVO

Con el uso de aprendizaje automático, los sistemas pueden ser entrenados para identificar y clasificar áreas de cultivo a partir de imágenes o datos de sensores, por ejemplo, los algoritmos de visión por computadora, como las redes neuronales convolucionales (CNN), pueden detectar límites de parcelas agrícolas de manera precisa, incluso en campos complejos.

### ANÁLISIS DE IMÁGENES PARA DELIMITACIÓN DE PARCELAS

Utilizando técnicas de visión artificial, las redes neuronales pueden identificar las fronteras de un área de cultivo en imágenes aéreas o satelitales, y calcular con precisión el área disponible. Los modelos también pueden identificar obstáculos o áreas no cultivables dentro de la parcela, lo que ayuda a determinar el área efectiva para el cultivo.

## 3.3.7 Plataformas y Aplicaciones Móviles

### APLICACIONES MÓVILES

Permiten a los agricultores medir el área de cultivo en el campo en tiempo real utilizando el GPS integrado en sus dispositivos. Estas aplicaciones pueden ofrecer herramientas de medición de áreas, generar mapas interactivos y proporcionar datos de forma instantánea. Algunas de estas plataformas están conectadas con SIG o con plataformas de gestión agrícola, lo que facilita la recopilación y el análisis de datos.



### 3.3.8 Internet de las Cosas (IoT)

#### SENSORES DE IOT

Sensores de temperatura, humedad, suelo y otros parámetros en el campo, conectados a través de redes de Internet de las Cosas (IoT) pueden proporcionar datos precisos sobre las condiciones del terreno y de los cultivos. Estos datos, combinados con imágenes satelitales o aéreas, permiten hacer cálculos más precisos sobre el área cultivada, la productividad de la parcela y las condiciones del suelo.

#### Beneficios de la Optimización del Cálculo del Área de Cultivo

##### PRECISIÓN

Estas tecnologías ofrecen una medición más precisa del área cultivada, incluso en terrenos difíciles de mapear con métodos tradicionales.

##### EFICIENCIA

Permiten realizar los cálculos de manera rápida y automática, eliminando la necesidad de mediciones manuales y reduciendo los errores humanos.

##### PLANIFICACIÓN MEJORADA

Los datos precisos sobre el área cultivada ayudan a planificar mejor el uso de los recursos agrícolas, como el riego, la fertilización y la cosecha.

##### MONITOREO EN TIEMPO REAL

Las tecnologías permiten un monitoreo continuo y en tiempo real, lo que ayuda a detectar problemas a tiempo (como malas hierbas, plagas o daños por inundaciones) y tomar decisiones rápidas.

##### AHORRO DE COSTOS

Al hacer un uso más eficiente de los recursos y optimizar las labores agrícolas, se pueden reducir costos operativos y aumentar la productividad.

En resumen, la combinación de tecnologías como GPS, SIG, drones, satélites, IoT y Big Data está revolucionando la forma en que se calcula y optimiza el área de cultivo, brindando a los agricultores herramientas precisas y eficientes para gestionar sus tierras de manera más rentable y sostenible.



### 3.4 Mejorar el sustrato de siembra teniendo en cuenta sus propiedades químicas y físicas

Mejorar el sustrato de siembra en la agricultura de precisión implica un enfoque integral que considere tanto las propiedades físicas como químicas del suelo. El objetivo es optimizar el entorno de crecimiento de las plantas para maximizar el rendimiento y la eficiencia en el uso de recursos como agua, fertilizantes y energía. La agricultura de precisión utiliza tecnologías avanzadas y adquisición y procesamiento de datos en tiempo real para ajustar las condiciones del sustrato a las necesidades específicas de cada parcela de cultivo. Se puede mejorar el sustrato de siembra teniendo en cuenta los siguientes factores:

#### 3.4.1 Análisis Químico del Sustrato

Las propiedades químicas del suelo incluyen el pH, la conductividad eléctrica, la disponibilidad de nutrientes (como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio), la presencia de microelementos, y la concentración de compuestos tóxicos o contaminantes. Para acceder a este tipo de análisis se usan diferentes herramientas:

## a. Monitoreo de Nutrientes

### SENSORES DE NUTRIENTES

Usando sensores específicos (por ejemplo, sensores de nitratos o fosfatos) se puede medir en tiempo real la concentración de nutrientes en el suelo, lo cual permitirá aplicar fertilizantes de manera precisa: cuando y donde se necesiten.

### TELEDETECCIÓN Y ANÁLISIS DE IMÁGENES

Con imágenes satelitales o drones equipados con sensores multiespectrales, se pueden identificar áreas del cultivo que tengan deficiencias en nutrientes. Los índices de vegetación como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) pueden ayudar a evaluar la salud del cultivo y correlacionarlo con los nutrientes presentes en el sustrato.

### FERTILIZACIÓN VARIABLE

Teniendo en cuenta los análisis de nutrientes del suelo, se pueden usar sistemas de fertilización de tasa variable (VRT, Variable Rate Technology) que ajusten automáticamente la cantidad de fertilizante aplicado en función de las necesidades del suelo en diferentes zonas de la parcela.

## b. Optimización del pH del Suelo

### MEDICIÓN DEL PH

El pH del suelo es crucial para la disponibilidad de nutrientes y el pH ideal varía según el tipo de cultivo, pero en general, uno cercano a 6-7 es adecuado para la mayoría de los cultivos. Si el pH es demasiado ácido o alcalino, los nutrientes pueden volverse inactivos o tóxicos para las plantas.

### APLICACIÓN DE ENMIENDAS

Usando la información obtenida a través de los sensores y análisis químicos, se pueden aplicar enmiendas como cal (para aumentar el pH de suelos ácidos) o azufre (para suelos alcalinos), de manera localizada y precisa, evitando su uso excesivo.

## c. Control de Contaminantes y Salinidad

### ANÁLISIS DE SALINIDAD

La conductividad eléctrica (CE) del suelo es un buen indicador de la salinidad; si esta es excesiva puede dañar las plantas, reduciendo la absorción de agua y nutrientes. Por eso los sensores de conductividad eléctrica permiten monitorear la salinidad en tiempo real y tomar medidas para reducirla (como la aplicación de riego con agua de menor salinidad o la incorporación de enmiendas).

### REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS

Si el suelo tiene contaminantes (metales pesados, pesticidas, etc.), se pueden utilizar tecnologías como la fitorremediación (uso de plantas para absorber contaminantes) o procesos químicos (por ejemplo, el uso de quelantes o productos que capturen metales).

## 3.4.2 Mejoras en las Propiedades Físicas del Sustrato

Las propiedades físicas del suelo afectan la estructura, la porosidad, la aireación, la retención de agua, y la capacidad de drenaje del mismo, de ahí que al mejorar estas propiedades se garantice que las raíces de las plantas puedan crecer adecuadamente y que el agua y los nutrientes estén disponibles para ellas.

### a. Monitoreo de la Estructura y Compactación del Suelo

#### SENSORES DE COMPACTACIÓN Y PENETRÓMETROS

Pueden medir la densidad del suelo y detectar zonas con compactación excesiva, lo cual limita el crecimiento de las raíces. Con esta información, se aplican medidas correctivas como el uso de arados de subsolado o técnicas de labranza de conservación para mejorar la aireación y reducir la compactación.

#### USO DE TECNOLOGÍAS DE DRONES Y LIDAR

Las plataformas aéreas con LIDAR (Light Detection and Ranging) pueden generar mapas topográficos detallados que ayuden a detectar áreas con mala estructura del suelo, como zonas de drenaje deficiente o áreas propensas a inundaciones.

## b. Mejorar la Textura y la Porosidad del Suelo

### INCORPORACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA

A través del uso de compost, estiércol, o abonos verdes, se puede mejorar la textura del suelo, aumentando su capacidad de retención de agua y mejorando la aireación. La materia orgánica también ayuda a mejorar la actividad microbiana, que a su vez beneficia la disponibilidad de nutrientes.

### RELLENO CON ENMIENDAS

Dependiendo de las propiedades del suelo (por ejemplo, suelos arenosos o arcillosos), se pueden aplicar enmiendas específicas como arcillas para mejorar la retención de agua o arena para mejorar el drenaje. El monitoreo de la textura del suelo utilizando sensores de humedad, temperatura y conductividad permite ajustar las aplicaciones de estas enmiendas de manera precisa.

## c. Mejoramiento de la Capacidad de Retención de Agua

### SENSORES DE HUMEDAD

Su uso en el suelo permite monitorear de manera precisa el contenido de agua en las distintas capas del suelo, información que se puede utilizar para optimizar el riego, evitando el exceso o la falta de agua.

### USO DE HIDROGEL O POLÍMEROS ABSORBENTES

En suelos con baja capacidad de retención de agua (como los suelos arenosos), se pueden utilizar hidrogeles o polímeros absorbentes que retienen agua y liberan lentamente a las raíces de las plantas según sea necesario.

## d. Monitoreo y Control de Temperatura del Suelo

### SENSORES DE TEMPERATURA DEL SUELO

Permiten monitorear la temperatura del sustrato, que tiene un impacto significativo en la germinación y el crecimiento de las plantas. En función de los datos obtenidos, se pueden aplicar estrategias para mitigar temperaturas extremas, como el uso de coberturas de mulching o sistemas de riego que enfríen el suelo.



### 3.4.3 Aplicación de Tecnología de Agricultura de Precisión

#### SISTEMAS DE RIEGO POR GOTEO DE TASA VARIABLE

Los sistemas de riego automatizados con tecnología de tasa variable (VRT) permiten ajustar la cantidad de agua aplicada en función de la humedad real del suelo, optimizando el uso del agua y evitando encharcamiento o sequedad excesiva.

#### MAPAS DE VARIABILIDAD DEL SUELO

Utilizando datos geospaciales obtenidos mediante GPS y SIG, se pueden crear mapas detallados que muestren la variabilidad en las propiedades físicas y químicas del suelo en diferentes partes del campo. Esto permite ajustar las prácticas de manejo (fertilización, riego, siembra, etc.) en función de las necesidades específicas de cada zona.

#### FERTILIZACIÓN DE TASA VARIABLE (VRT)

Los fertilizantes se aplican de manera localizada, ajustando las dosis según los mapas de fertilidad del suelo generados a partir de los análisis químicos, con lo cual se mejora la eficiencia del uso de fertilizantes y se reduce el impacto ambiental de la agricultura.

#### SENSORES DE CLIMA Y SUELO

Estos miden variables como temperatura, humedad, velocidad del viento y radiación solar y pueden integrarse para optimizar la gestión de cultivos y mejorar las condiciones del sustrato a lo largo del ciclo de cultivo.

### 3.4.4 Uso de Modelos Predictivos

Modelos de predicción de crecimiento de cultivos: Utilizando datos históricos y en tiempo real sobre las propiedades químicas y físicas del suelo, los modelos predictivos pueden ayudar a estimar cómo las condiciones actuales del sustrato afectarán el crecimiento de los cultivos en el futuro y así ayudar a tomar decisiones informadas sobre la gestión de recursos y la intervención en el sustrato.

## 3.5 Estado vegetativo de las plantas para detectar y eliminar malezas y para optimizar los procesos de recolección y acopio de productos agrícolas con sostenibilidad ambiental

La identificación del estado vegetativo de las plantas, la detección y eliminación de malezas, y la optimización de los procesos de recolección y acopio son aspectos clave en la agricultura de precisión. Estos procesos no solo buscan mejorar la eficiencia y reducir los costos, sino también apoyar la sostenibilidad ambiental, minimizando el uso de insumos (fertilizantes, pesticidas, agua) y protegiendo el ecosistema agrícola. A continuación, se detallan diversas tecnologías y métodos que se pueden utilizar para llevar a cabo estas tareas de manera más eficiente, precisa y sostenible.

### 3.5.1 Identificación del Estado Vegetativo de las Plantas

El estado vegetativo de las plantas se refiere a su fase de crecimiento y salud general, e influye directamente en su manejo agrícola: riego, fertilización y aplicación de pesticidas. Para identificar este estado de manera precisa se pueden usar varias tecnologías:

#### a. Sensores de Vegetación (Índices de Vegetación), (Auravant, 2024).

##### NDVI (ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA)

A través del uso de compost, estiércol, o abonos verdes, se puede mejorar la textura del suelo, aumentando su capacidad de retención de agua y mejorando la aireación. La materia orgánica también ayuda a mejorar la actividad microbiana, que a su vez beneficia la disponibilidad de nutrientes.

#### CÁMARAS HIPERESPECTRALES

Estas capturan una gama amplia de longitudes de onda que permiten un análisis más detallado del estado de las plantas, con el cual se identifican cambios sutiles en el estado vegetativo que provienen de factores como sequía, deficiencia nutricional, plagas, o enfermedades antes de que se vean a simple vista.

#### SENSORES DE FLUORESCENCIA DE CLOROFILA

Detectan la fluorescencia de la clorofila en las plantas aportando información sobre su actividad fotosintética, así ayudan a identificar el estado de salud de las plantas y a prever problemas como deficiencias de nutrientes o estrés.

### b. Monitoreo Continuo con Drones (Sun, 2021)

#### DRONES CON CÁMARAS MULTIESPECTRALES O HIPERESPECTRALES

Estos obtienen imágenes precisas de grandes áreas en poco tiempo, las cuales, al ser analizadas con software de procesamiento de imágenes, proporcionan mapas detallados del estado de las plantas facilitando la identificación de zonas con deficiencias, estrés, o plantas fuera de su fase vegetativa óptima.

### c. Sensores IoT en el Campo (Fondo europeo de desarrollo regional, 2023, 9)

#### SENSORES DE HUMEDAD, TEMPERATURA Y NUTRICIÓN

Sensores instalados en el suelo o en la planta que monitorean el estado de las plantas en tiempo real. Por ejemplo, sensores de humedad del suelo indican cuándo las plantas están en estrés por falta de agua, mientras los sensores de nutrientes indican deficiencias en el suelo.

#### SENSORES DE ESTRÉS

Diseñados específicamente para detectar señales de estrés en las plantas, como cambios en la transpiración o en los niveles de clorofila, que pueden ser causados por condiciones subóptimas de crecimiento.

### 3.5.2 Detección y Eliminación de Malezas (Hasan, 2021)

Las malezas compiten con los cultivos por agua, nutrientes y luz, en consecuencia, afectan negativamente los rendimientos agrícolas. Por esta razón, detectarlas y eliminarlas de manera eficiente es decisivo para maximizar la productividad de los cultivos. Entre las tecnologías identificadas para realizar estas tareas están:

## a. Tecnologías de Visión por Computadora y Aprendizaje Automático

### CÁMARAS Y VISIÓN ARTIFICIAL

Estos equipos de visión por computadora se montan en tractores o drones para identificar malezas con precisión. Por ejemplo, se usan cámaras multiespectrales o RGB (visibles), combinadas con algoritmos de aprendizaje automático (machine learning) para identificar y diferenciar entre las plantas cultivadas y las malezas, incluso en etapas tempranas de crecimiento. Esto permite aplicar herbicidas de manera selectiva, o dirigir maquinaria para eliminar las malezas, reduciendo uso de pesticidas y evitar daños a los cultivos.

### ALGORITMOS DE RECONOCIMIENTO DE IMÁGENES

Estos obtienen imágenes precisas de grandes áreas en poco tiempo, las cuales, al ser analizadas con software de procesamiento de imágenes, proporcionan mapas detallados del estado de las plantas facilitando la identificación de zonas con deficiencias, estrés, o plantas fuera de su fase vegetativa óptima.

## b. Sistemas de Eliminación de Malezas de Tasa Variable (EOS, diciembre 2024)

### SISTEMAS DE APLICACIÓN DE HERBICIDAS DE TASA VARIABLE (VRT)

Son equipos agrícolas avanzados que pueden aplicar herbicidas en las áreas limitadas donde se detecta la presencia de malezas, reduciendo significativamente la cantidad de químicos utilizados y limitando su impacto ambiental. Estos sistemas ajustan la dosis de herbicida según las necesidades específicas de la zona, lo que mejora la eficiencia en el control de malezas y protege el medio ambiente.

### TECNOLOGÍAS DE ELIMINACIÓN MECÁNICA

Los sistemas de robótica agrícola y herramientas mecánicas pueden eliminar malezas sin necesidad de productos químicos. Estas tecnologías incluyen motores de alta precisión que pueden detectar y arrancar malezas en función de su forma, tamaño y ubicación.

## c. Drones para Control de Malezas

Los drones también pueden ser utilizados para identificar malezas en áreas difíciles de alcanzar, en terrenos irregulares o de difícil acceso. Además, pueden estar equipados con herramientas de pulverización de herbicidas lo que permite un control localizado de malezas en áreas específicas.

### 3.5.3 Optimización de los Procesos de Recolección y Acopio (Santos Valle, 2021)

Una vez que el cultivo ha alcanzado su estado óptimo de madurez, la recolección eficiente y el acopio son cruciales para reducir pérdidas y mejorar la calidad del producto. Las tecnologías de precisión han logrado pueden que estos procesos sean más eficientes, reduciendo costos y mejorando el rendimiento global de la cosecha.

#### a. Sensores para Monitorear el Estado de Madurez de los Cultivos

##### SENSORES ÓPTICOS Y DE COLOR

Ya que el color es un buen indicador de la madurez de muchos cultivos (por ejemplo, tomates, frutas, granos), se usan sensores como cámaras RGB o multiespectrales para medir el color de la fruta o la planta y determinar el punto óptimo de madurez para la recolección.

##### SENSORES DE FIRMEZA Y DENSIDAD

Algunos sensores pueden medir la firmeza o la densidad de los cultivos para ayudar a determinar si los productos están listos para la cosecha, lo cual es muy útil en cultivos como frutas u hortalizas.

#### b. Optimización de la Recolección mediante Robots y Maquinaria Autónoma

##### ROBOTS DE COSECHA AUTÓNOMOS

En algunos cultivos, en especial los de frutas, existen robots de cosecha que utilizan visión por computadora y algoritmos de IA para identificar los frutos maduros y recolectarlos sin dañar la planta ni el producto, además están diseñados para trabajar en diferentes condiciones del campo, lo que reduce la necesidad de intervención humana.

##### MÁQUINAS COSECHADORAS AUTOMATIZADAS

Tractores y cosechadoras autónomas equipados con sensores y sistemas de navegación avanzados que permiten la recolección eficiente en el momento adecuado para que la cosecha se realice sin dañar el terreno o los cultivos. También pueden estar equipados con sensores para medir la calidad del grano o la fruta durante la cosecha.

## c. Sistemas de Almacenaje Inteligente

### SISTEMAS DE MONITOREO EN TIEMPO REAL PARA ACOPIO

El Internet de las Cosas (IoT) se utiliza para monitorear el estado de los productos agrícolas durante el acopio a través de: sensores de temperatura, humedad y gas que proporcionan datos sobre las condiciones de almacenaje para evitar que los productos se deterioren. Por ejemplo, en la cosecha de frutas el almacenamiento en condiciones óptimas es crucial para prevenir la descomposición o la pérdida de calidad.

### SOFTWARE DE GESTIÓN DE INVENTARIOS

Utiliza plataformas de Big Data e inteligencia artificial para gestionar y planificar el acopio de productos agrícolas de manera más eficiente, optimizando el espacio en los almacenes y procurando que los productos se mantengan en condiciones ideales hasta su distribución.

## 3.5.4 Sostenibilidad Ambiental en Todo el Proceso

### REDUCCIÓN DEL USO DE PESTICIDAS Y FERTILIZANTES

Al utilizar tecnologías de precisión, como los sensores para la detección de malezas y el monitoreo del estado vegetativo, se reduce significativamente el uso de insumos, ya que los tratamientos se aplican solo cuando son necesarios y, a su vez, se reduce el impacto ambiental y aumenta la eficiencia en el uso de recursos.

### CONSERVACIÓN DEL AGUA

Con tecnologías como el riego de precisión se optimiza el uso del agua en función de las necesidades reales del cultivo, así se contribuye a la sostenibilidad y al ahorro de este recurso tan valioso.

### MINIMIZACIÓN DE RESIDUOS

La recolección y el acopio preciso y la eliminación dirigida de malezas, ayudan a reducir las pérdidas y el desperdicio de productos, contribuyendo a lograr una agricultura más sostenible y eficiente.

## 4. Tecnología utilizable en la agroindustria

El desarrollo tecnológico a nivel global actúa en múltiples ámbitos, sin embargo, para el caso objeto de este estudio se abordan los que se pueden aplicar en soluciones para la agricultura, que en concreto están dentro de las áreas de electrónica, mecánica e informática principalmente. Por eso, en este documento se hará énfasis en las tecnologías de sensores electrónicos, internet de las cosas (IoT), inteligencia artificial, Blockchain y sistemas de trazabilidad de información. A continuación, se describen los fundamentos de cada una de estas:

### 4.1 Sensores

Un sensor eléctrico de forma general se define como:

*...un dispositivo diseñado para captar un estímulo de su entorno y traducir esa información que recibe. Esa información recibida es normalmente convertida a un impulso eléctrico que posteriormente es procesado por una serie de circuitos que generan una acción predeterminada en un aparato, sistema o máquina. Es un artefacto que en algunas aplicaciones transforma una clase de información en otra que se quiere medir o controlar. (SDI, 2022)*

Es decir, que un sensor dentro del campo de la agricultura captura datos de luz, sonido, temperatura, radiación solar, CO<sub>2</sub>, humedad, pH, fuerza, luz, conductividad eléctrica, concentración de nutrientes (Nitrato, Potasio, Calcio), y para hacerlo reacciona a los cambios en las condiciones físicas alterando sus propiedades eléctricas como resistencia, capacitancia e inductancia.

De acuerdo con la variable física a medir se pueden encontrar varios tipos de sensores, entre ellos se pueden relacionar los siguientes:

#### TÉRMICOS

Utilizados para medir temperatura y se encuentran en una gran variedad de aplicaciones, como la climatización de interiores, la producción de plásticos, y en la maquinaria industrial. Existen seis tipos de sensor de temperatura: termopares, RTD y termistores, radiadores infrarrojos, dispositivos bimetalicos, dispositivos de dilatación de líquido, y dispositivos de cambio de estado (OMEGA, 2025).

## ÓPTICOS

Este tipo de sensores pueden interpretar los datos en un dispositivo GPS cuando se ingresa un destino. También guían al satélite GPS manteniendo su órbita para proporcionar direcciones confiables. Por ejemplo, en un automóvil, los fotodiodos ópticos se ayudan a prevenir colisiones cuando se da marcha atrás, miden la velocidad y las distancias hasta su destino, también las comunicaciones de alta velocidad se facilitan con los sensores ópticos (cables de fibra óptica o del aire) usando la comunicación óptica de espacio libre (FSOC). Estos sensores incluso pueden distinguir colores interpretando la frecuencia con la que la luz se refleja en la superficie de un objeto. Igualmente, los sensores de proximidad mejoran la calidad de la mayoría de los productos de consumo al automatizar un ensamblaje e inspección precisos (TE Connectivity, 2025).

## ELÉCTRICOS

Miden propiedades eléctricas como la conductividad, la capacitancia o la resistencia. Ejemplos de estos sensores son: los de luminosidad, que cambian su resistencia en función de la cantidad de luz; los sensores inductivos y capacitivos, que se utilizan para detectar la presencia de objetos o materiales y que se diferencian en el tipo de campo que crean y el tipo de material que pueden detectar.

Otro aspecto relevante en relación con los sensores es su evaluación, que se puede llevar a cabo según algunas características del desempeño como son:

**Rango:** Es el valor mínimo y máximo de la variable física que el sensor puede percibir o medir.

**Rango dinámico:** Es la diferencia entre los valores máximos y mínimos de entrada.

**Exactitud:** Se define como la diferencia entre el valor medido y el valor real.

**Precisión:** Se define como la cercanía entre un conjunto de valores de la misma medición.

**Sensibilidad:** Relación entre el valor de la salida y el valor de la entrada.

**Histéresis:** Diferencia en la salida cuando la entrada varía de dos maneras, aumentando y disminuyendo.

**Resolución:** Es el cambio mínimo en la entrada que puede ser detectado por el sensor.

**Reproducibilidad:** Se define como la capacidad del sensor de producir la misma salida cuando se aplica la misma entrada.

**Repetibilidad:** Capacidad del sensor de producir la misma salida cada vez que se aplica la misma entrada y todas las condiciones físicas y de medición se mantienen iguales, incluyendo el operador, el instrumento, las condiciones ambientales, etc.

**Tiempo de respuesta:** Se expresa generalmente como el tiempo en que la salida alcanza un cierto porcentaje de su valor final en respuesta a un cambio de paso de la entrada (SDI, 2022).

## 4.2 Automatización industrial

Una de las definiciones más generalizadas de la automatización industrial es: "... un proceso mediante el cual se busca ayudar a las personas en sus tareas repetitivas y rutinarias, teniendo como objetivo mejorar la productividad y competitividad de las empresas, ya que permite reducir costos y aumentar la calidad de los productos" (Cortes Calva, s.f., 5), es decir que la automatización dentro de la industria es una forma de mecanizar procesos repetitivos como por ejemplo los procesos de embotellado, ensamblado y empaçado, y se ha implementado desde mediados del siglo pasado<sup>1</sup>.

Con la automatización industrial se puede identificar las siguientes ventajas:

Mayor precisión y repetitividad en las tareas. Esto se debe a que las máquinas son capaces de realizar tareas de manera más rápida y eficiente, lo que permite un incremento en la calidad y cantidad de los productos.

Cambio de mano de obra por menor número de personal especializado en tecnología en determinadas tareas logrando eficiencia y mejor calidad.

Mejor control de procesos productivos. Gracias a la incorporación de sensores e información de los procesos de forma continua se mejoran los procesos de monitorización y control de la producción, como consecuencia se mejora la detección y solución de problemas.

## 4.3 Internet de las cosas (IoT)

Internet de las Cosas (IoT) es: "...el proceso que permite conectar los elementos físicos cotidianos al Internet: desde los objetos domésticos comunes, como las bombillas de luz, hasta los recursos para la atención de la salud, como los dispositivos médicos; las prendas y los accesorios personales inteligentes; e incluso los sistemas de las ciudades inteligentes (Red Hat, 2023)", es un paradigma tecnológico que engloba la interconexión de dispositivos, objetos o personas a través de internet a través de la asignación de una identificación única. Todos los dispositivos conectados por IoT están diseñados para recopilar datos y realizar acciones de manera autónoma, y tienen como finalidad el satisfacer necesidades específicas o facilitar la toma de decisiones.

En el ámbito de la producción de alimentos y en general dentro de toda la cadena de suministro de estos, la cual es cada vez más globalizada y compleja, la implementación de tecnologías como IoT

<sup>1</sup>Se identifica el inicio de la automatización industrial desde 1947 con la invención del primer transistor en los laboratorios de Bell, donde se desarrolló el motor controlado Alquist, el cual revolucionó los procesos de rebobinado y así la tecnología de automatización. Luego siguieron varios descubrimientos en el campo de la electrónica, hasta llegar a la fábrica digital y la simulación virtual (Manufactura Latam, 2024).

presenta beneficios significativos como: permite un seguimiento preciso de los productos desde su origen hasta el consumidor final; facilita la identificación de posibles contaminaciones; impacta positivamente la seguridad alimentaria; y por su capacidad de acceder a información en tiempo real, coadyuva a prevenir enfermedades transmitidas por alimentos y proteger la salud pública.

Sin embargo, la creciente adopción de IoT, a la par de los beneficios, plantea también nuevos desafíos, especialmente en materia de ciberseguridad, ya que la cantidad de datos sensibles que circulan por estas redes requieren una certera y eficaz protección para incrementar la confianza de los consumidores, y en este sentido, tecnologías como blockchain ofrecen una solución prometedora “...para mejorar la eficiencia, la transparencia y la seguridad de la cadena de suministro, mediante la descentralización y registro inmutable de la información y la eliminación de intermediarios (Alzate y Giraldo, 2023)”, y de esta manera asegurar la integridad y trazabilidad de la información en la cadena de suministro alimentaria.

## 4.4 Inteligencia artificial

El uso de las diferentes herramientas tecnológicas presentadas que se integran a través del procesamiento y análisis de datos provenientes de sensores y a la implementación de la automatización, ha impulsado el desarrollo de la inteligencia artificial (IA) en el sector agrícola, ya que la IA, al hacer uso de tecnologías como el aprendizaje automático, la visión por computadora y el análisis de datos, permite optimizar el uso de los recursos, aumentar la productividad y mejorar la toma de decisiones en tiempo real (Agrotech Campus, 2024). Esto se traduce en múltiples aplicaciones en la agricultura:

**Siembra:** Optimización en la detección de la época de siembra y cálculo del espaciamiento óptimo entre semillas.

**Desarrollo vegetativo:** Localización temprana de plagas y enfermedades, proyección de rendimientos mediante el análisis de datos históricos y actuales, y monitoreo del estado de los cultivos utilizando drones y robots equipados con IA.

**Recolección:** Clasificación y selección de frutos en tiempo real, procurando una calidad homogénea del producto final.

En conclusión, la IA se convierte en una poderosa herramienta para los agricultores que impacta en la tomar decisiones que con sus datos son más informadas y eficientes, aumentando la productividad y minimizando el impacto ambiental, toda vez que al recopilar y analizar grandes volúmenes de datos, la IA permite identificar patrones, predecir tendencias y optimizar el uso de recursos.

## 4.5 Blockchain

El Blockchain es una tecnología que funciona – retomando conceptos más tradicionales - como el libro de un escribano o de un notario, ya que sirve para: “...asentar, certificar y garantizar la integridad y disponibilidad de un activo y es comúnmente utilizada para registrar transacciones y rastrear un activo dentro de una red sin necesidad de intermediarios (Pastorino, 2022)”.

Metodológicamente, un libro de registro de blockchain consta de bloques interconectados, cada uno con una cabecera y datos de transacciones. La marca de tiempo de un bloque se utiliza para calcular un valor hash único, que sirve como una huella digital, al tiempo que se vincula al hash del bloque anterior, creando una cadena inmutable. Para agregar un nuevo bloque a la cadena, la mayoría de los nodos de la red deben validar su hash a través de un proceso de consenso, por eso, si se intenta modificar un bloque, se invalidaría toda la cadena, garantizando así la integridad de los datos, y por eso funciona como una herramienta de seguridad de datos e información.

En la trazabilidad alimentaria esta tecnología se aplica permitiendo rastrear el origen y el recorrido de los productos desde la producción hasta el consumidor final: registra de forma segura y transparente toda la información relevante, contribuye a combatir la falsificación y la contaminación de alimentos. De igual manera, al requerir el uso de sensores para recopilar datos, fomenta la adopción de prácticas agrícolas más precisas y eficientes, cumpliendo con su objetivo principal centrado en garantizar la autenticidad y la seguridad de la cadena de suministro alimentaria, protegiendo tanto a los productores como a los consumidores.

## 4.6 Sistemas de trazabilidad alimentaria

La globalización del comercio de alimentos, exacerbada por brotes de enfermedades zoonóticas como la gripe aviar o la enfermedad de las vacas locas, ha puesto de manifiesto la importancia crítica de la seguridad alimentaria:

*El mal de "las vacas locas", que fue el nombre popular que se dio a la Encefalopatía Espongiforme Bovina (EEB), no fue una enfermedad más de origen animal que se transmitió a los humanos, sino más bien un punto de inflexión en la cadena alimentaria de la Unión Europea, puesto que a raíz de entonces se implantó la trazabilidad "del campo a la mesa." Este cambio ha hecho que el sistema alimentario comunitario sea uno de los más seguros del mundo, ya que en el momento en el que se conoce una alerta sanitaria, se ponen en funcionamiento toda una red de avisos y de procedimientos de control para frenar cuanto antes las posibles consecuencias y problemas (Ceva Salud Animal, 2022).*

Ante este escenario, la trazabilidad se ha convertido en una herramienta indispensable para verificar el origen, buenas prácticas y la seguridad de los productos agroalimentarios a lo largo de toda la cadena de suministro. Toda vez que el objetivo principal de la trazabilidad es identificar el origen, el proceso de producción y los ingredientes de cada alimento, permitiendo así rastrear cualquier producto en caso de problemas de calidad o seguridad. Para atender esta tarea se han desarrollado los sistemas de trazabilidad, basados en tecnologías como el Internet de las Cosas y el Blockchain, que facilitan la captura, el almacenamiento y el análisis de datos en tiempo real, permitiendo mayor eficiencia en la detección y resolución de incidentes.

Adicionalmente, se han requerido acciones de impacto global como la adopción de estándares internacionales de trazabilidad, desde los cuales se ha impulsado la interconexión de las cadenas de suministro a nivel global, mejorando la calidad y la seguridad de los alimentos y la digitalización de los procesos con la cual se han superado las barreras geográficas, permitiendo el acceso a la información desde cualquier lugar y en cualquier momento. Así, los sistemas de trazabilidad contribuyen a reducir costos operativos al minimizar las pérdidas de productos y optimizar los procesos logísticos.

Sin embargo, a pesar de los beneficios que ofrecen, los sistemas de trazabilidad aún enfrentan desafíos en materia de ciberseguridad que deben abordarse para garantizar la protección de los datos y la continuidad de las operaciones.

## 5. Agricultura de precisión

Las herramientas tecnológicas mencionadas en la sección anterior y los procesos productivos en la agricultura convergen en lo que se conoce como agricultura de precisión, la cual: “...mide las cualidades de los cultivos, del suelo y los factores climáticos para aplicar el mejor tratamiento en el lugar y el momento justos. La agricultura de precisión hace seguimientos por satélite, analiza ingentes datos y pone robots a trabajar (BBVA, 2024)”. En términos generales, busca integrar elementos de diversas tecnologías para mejorar la productividad por hectárea en cultivos de cualquier tipo y tamaño.

En la práctica, la agricultura de precisión implica tareas como medir las características de los cultivos, del suelo y de los factores climáticos para aplicar el tratamiento adecuado o implementar un proceso en el lugar y momento preciso, y todo lo hace teniendo en cuenta la información aportada por diversas herramientas tecnológicas: uso de seguimientos por satélite, imágenes RGB o multiespectrales, análisis de grandes volúmenes de datos y la capacidad de actuar mediante la modificación de procesos automatizados del cultivo enviando tractores con GPS o robots a realizar las labores correspondientes. Un ejemplo concreto es la aplicación de compuestos fitosanitarios únicamente en los lugares donde son necesarios, evitando excesos o carencias



Drone con cámara multiespectral haciendo vigilancia de cultivos de lechuga en invernadero

De esta manera la agricultura de precisión facilita una mayor trazabilidad de los productos, proporcionando al consumidor información veraz que le permite decidir su compra según criterios de cercanía o sostenibilidad, su uso no solo beneficia el desarrollo del sector agrícola, sino que también genera confianza en los consumidores finales de los productos.

Entre las tecnologías aplicadas a la agroindustria tienen especial importancia los sensores, ya que permiten adquirir información del cultivo para su posterior procesamiento. Ya que medir todas las variables que afectan la producción es fundamental para lograr el objetivo de mejorar la competitividad de los productos agrícolas. Dada su relevancia se presenta una relación de los sensores más utilizados para recopilar este grupo de variables.

## 6. Sensores de variables agrícolas

Para optimizar los cultivos es necesario primero tener los datos, luego transportarlos para almacenarlos y procesarlo en un servidor que por lo general está conectado a Internet. Posteriormente, se analiza el cultivo y se generan orientaciones que apoyan al cultivador a tomar decisiones tendientes siempre a mejorar la productividad.

**NOTA:** En este capítulo se presentan algunos ejemplos de sensores de diferente tipo y marca. Es importante aclarar que CINTEL no recomienda, ni sugiere el uso de ningún tipo de sensor o marca, incluido o no incluido en este documento. La referencia a los productos se hace solo para ilustración del lector.

### 6.1 Sensores de suelo

Teniendo en cuenta la composición del suelo en cuatro componentes principales: partículas minerales de diferentes tamaños, materiales orgánicos procedentes de restos de plantas y animales muertos, agua que llena los espacios porosos abiertos, y aire que llena los espacios porosos abiertos. En este grupo de sensores se encuentran:

**Humedad:** Miden el contenido de agua en el suelo, esencial para optimizar el riego.

**Temperatura:** Indican la temperatura del suelo, que influye en la actividad microbiana y la germinación de semillas.

**Conductividad y TDS:** Proporciona información sobre la salinidad del suelo y la disponibilidad de nutrientes.

**pH:** Mide la acidez o alcalinidad del suelo que afecta la disponibilidad de nutrientes para las plantas.



**Nutrientes:** Detectan la presencia de nutrientes específicos en el suelo, como nitrógeno, fósforo y potasio.

La siguiente imagen muestra tres sensores de suelo de bajo costo que se pueden adquirir comercialmente.



Sensores de suelo: a) Sensor de temperatura y conductividad, b) sensor de pH, y c) sensor de humedad de suelo, temperatura y conductividad.

En el mercado se pueden encontrar una diversidad amplia de sensores con diferentes características de funcionamiento. La tabla a continuación presenta algunos de ellos, así como sus características:

| Fabricante                | Referencia   | Variables   | Especificaciones   | Imagen de referencia  |
|---------------------------|--|---|--|---|
| <b>Andes Technologies</b> | DG-HTEC-ST   | Temperatura, humedad y conductividad                    | Conductividad 0-20000uS/cm<br>Humedad del suelo 0-100%<br>Temperatura del suelo -40°-85°                               |  |
| <b>JXCT</b>               | 7 in 1 Integrated Soil Sensor EC PH NPK Moisture Temperature Meter | Conductividad, pH, NPK, temperatura y humedad del suelo | Conductividad 0-10000uS/cm<br>Humedad del suelo 0-100%<br>Temperatura del suelo -45°-115°<br>pH 3-9<br>NPK 0-1999mg/kg |  |

Otros ejemplos de sensores pueden ser consultados en la siguiente página web: <https://www.firstratesensor.com/>

## 6.2 Sensores climáticos (Delgado Martorell, 2023)

Estos recolectan datos sobre:

- Temperatura del aire
- Humedad relativa
- Radiación solar
- Velocidad y dirección del viento
- Temperatura del aire
- Pluviosidad

Para medir la humedad en un cultivo los sensores climáticos tienen en cuenta el Déficit de punto de vapor (DVP); medida que relaciona la diferencia de presión entre el vapor de agua en el aire y el punto de saturación del aire, y cuyo uso principal está en conocer las condiciones de estrés hídrico de las plantas, ya que los datos recolectados sirven para determinar mejor las necesidades de calefacción,

reduciendo los gastos innecesarios de energía y disminuyendo el riesgo de hongos y enfermedades en las plantas. Este índice se calcula como  $DVP = \text{Presión de vapor (saturación)} - \text{Presión de vapor (aire)}$ .

### 6.3 Sensores de estado fenológico

La fenología es el estudio de los fenómenos biológicos que ocurren en las plantas y los animales, y de cómo se relacionan con el clima y las interacciones ecológicas, en este contexto, los sensores de este tipo permiten monitorizar el ritmo de crecimiento de la planta, y ponerlo en relación con las condiciones meteorológicas y se pueden encontrar los siguientes:


#### ÍNDICES DE VEGETACIÓN

Existen índices de este tipo que se calculan a partir del procesamiento de imágenes multiespectrales y para ello utilizan la información de varias bandas espectrales. Entre estos el índice más conocido es el NDVI, el cual mide la densidad y el verdor de la vegetación a partir de imágenes de satélite (Auravant, 2024). Existen otros índices que tiene un mejor desempeño como GNDVI (Vegetación de Diferencia Normalizada Verde), EVI (Índice de vegetación mejorado), SAVI (índice de vegetación ajustado al suelo), ARVI (Índice de vegetación resistente a la atmósfera), GCI (Índice de clorofila verde), NBR (Índice de calcinación normalizado) entre otros. La información de estos índices se ve reflejada en una imagen y tiene diferentes usos, por ejemplo, con el NVDI se pueden identificar surcos en un cultivo.

#### SENSOR DE HUMEDAD DE HOJAS (LWS)

Este sensor mide la constante dieléctrica de la superficie superior del sensor, y puede detectar la presencia de agua o hielo en cualquier parte de la superficie del sensor.

En el mercado se pueden encontrar algunos sensores de este tipo como los siguientes:

| Fabricante          | Referencia | Variables            | Especificaciones  | Imagen de referencia  |
|---------------------|------------|----------------------|---|---|
| Campbell Scientific | LWS sensor | Seco, helado, mojado | Tiempo de medición: 10 ms<br>Salida: 250 to 1500 mV (millivolt reading relates to moisture state) |  |

| Fabricante | Referencia | Variables                                       | Especificaciones   | Imagen de referencia  |
|------------|------------|---|--|---|
| Micasense  | RedEdge-P  | Imagen multiespectral en 5 bandas de frecuencia | Resolución: 2 cm por pixel a 60 m. Cinco bandas multiespectrales: azul, verde, rojo, borde rojo, infrarrojo cercano. |  |

## 6.4 Sensores de nutrientes para fertirriego

Los sensores utilizados en fertirriego (sistema que combina la irrigación con la aplicación de fertilizantes) son fundamentales para optimizar el uso de agua y nutrientes, asegurando un crecimiento saludable de los cultivos mientras se reduce el desperdicio de recursos. Estos sensores miden diferentes parámetros como la humedad del suelo, la conductividad eléctrica (CE), la temperatura, los niveles de nutrientes y otros factores cruciales para gestionar eficazmente el fertirriego.

A continuación, se presenta una lista de sensores clave para fertirriego y algunos enlaces donde se pueden consultar sus características:

### 6.4.1 Sensores de Humedad del Suelo

**Descripción:** Miden el contenido de agua en el suelo para asegurar que las plantas reciban la cantidad adecuada de riego. Son fundamentales para evitar el riego excesivo o insuficiente.

#### EJEMPLO Decagon Devices (now METER Group) - 5TM Soil Moisture Sensor

**Características:** Sensor capacitivo, mide humedad en el suelo, tiene alta precisión y es adecuado para uso en suelos agrícolas.

**Enlace:** <https://dorgean.com/en/product/5TM.html>

#### EJEMPLO Irrometer - Watermark Soil Moisture Sensor

**Características:** Sensor resistivo, mide la tensión del agua en el suelo, fácil de instalar y usar, ideal para la gestión de riego.

**Enlace:** <https://www.irrometer.com/sensors.html>

## 6.4.2 Sensores de Conductividad Eléctrica (CE)

**Descripción:** Miden la concentración de sales en el agua de riego, lo que ayuda a controlar la fertilización, ya que el exceso de sales puede ser perjudicial para los cultivos.

### EJEMPLO Hansatech - Conductivity Sensor

**Características:** Sensor de conductividad eléctrica para medir la concentración de nutrientes y sales en la solución nutritiva.

**Enlace:** <https://dicsa.es/assets/downloads/Hansatech.pdf>

### EJEMPLO CropX - Soil Sensor

**Características:** Sensor de conductividad eléctrica en el suelo para medir la cantidad de fertilizantes disponibles en el suelo y optimizar el fertirriego.

**Enlace:** <https://cropx.com/es/cropx-system/hardware/>

## 6.4.3 Sensores de pH del Suelo

**Descripción:** Miden la acidez o alcalinidad del suelo, lo que es crucial para entender cómo los nutrientes están siendo absorbidos por las plantas y para ajustar el pH del agua de riego.

### EJEMPLO AquaCheck - pH Meter

**Características:** Mide el pH del agua o del suelo ayudando a garantizar que el pH esté dentro del rango óptimo para la absorción de nutrientes.

**Enlace:** <https://dicsa.es/assets/downloads/Hansatech.pdf>

### EJEMPLO CropX - Soil Sensor

**Características:** Sensor de conductividad eléctrica en el suelo para medir la cantidad de fertilizantes disponibles en el suelo y optimizar el fertirriego.

**Enlace:** <https://www.top-whirlpool.ch/en/water-care/to-measure/aquachek-trutest-digital-test-strip-reader-ph-meter>

#### 6.4.4 Sensores de Temperatura y Humedad del Aire

**Descripción:** Miden condiciones ambientales como temperatura y humedad relativa del aire, lo que afecta la transpiración de las plantas y la eficiencia del riego.

##### EJEMPLO Campbell Scientific - HMP60 Humidity and Temperature Sensor

**Características:** Sensor robusto para medir la humedad y temperatura en el aire, utilizado en la agricultura de precisión y en sistemas de fertirriego.

**Enlace:** <https://www.campbellsci.es/hmp60>

##### EJEMPLO Onset - HOBO U30 USB Weather Station

**Características:** Estación meteorológica que mide temperatura, humedad y otras variables climáticas para optimizar la programación de fertirriego.

**Enlace:**

<https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/u30-nrc?srsItd=AfmBOoo-XkxIPsg-ccfefeCsMunloGJZr0DyCoXwOZllyxblug0wbNO>

#### 6.4.5 Sensores de Nivel de Nitrógeno

**Descripción:** Miden la cantidad de nitrógeno en el agua de riego o en el suelo. El control de estos niveles es fundamental para evitar la sobrefertilización y minimizar el impacto ambiental.

##### EJEMPLO Yara - N-Sensor

**Características:** Mide la cantidad de nitrógeno en el campo en tiempo real y ajusta la dosis de fertilizantes según las necesidades de las plantas.

**Enlace:** <https://www.yara.com.co/nutricion-vegetal/portafolio-digital/n-sensor/>

#### 6.4.6 Sensores de Flujo y Velocidad del Agua

**Descripción:** Monitorean la cantidad de agua que fluye a través de las tuberías de riego. Esenciales para ajustar el riego en función de las necesidades del cultivo y para evitar el desperdicio de agua.

**EJEMPLO** AquaFlow - Flow Meter

**Características:** Mide el flujo de agua en sistemas de riego y fertirriego, ideal para la automatización de la distribución de agua y fertilizantes.

**Enlace:**

[https://www.acarpsvalve.com/waterflowsensor/?gad\\_source=1&gclid=Cj0KCQiAo5u6BhDJARIsAAVoDWunP-T\\_OIAtTXov7CQuW\\_ECKExhgus3Tt0uwyMpW\\_rEo0CCisWHuPoaAnZDEALw\\_wcB](https://www.acarpsvalve.com/waterflowsensor/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQiAo5u6BhDJARIsAAVoDWunP-T_OIAtTXov7CQuW_ECKExhgus3Tt0uwyMpW_rEo0CCisWHuPoaAnZDEALw_wcB)

### 6.4.7 Sensores de Oxígeno Disuelto en el Agua

**Descripción:** Miden los niveles de oxígeno en el agua de riego, los cuales en parámetros adecuados son necesarios para la salud de las raíces y la absorción eficiente de nutrientes.

**EJEMPLO** Omega Engineering - DO Sensor

**Características:** Sensor de oxígeno disuelto en agua, ideal para monitorear las condiciones del agua de riego en sistemas hidropónicos y fertirriego.

**Enlace:**

[https://www.boquinstruments.com/online-dissolved-oxygen-sensor/?keyword=oxygen%20dissolved%20sensor&matchtype=p&gad\\_source=1&gclid=Cj0KCQiAo5u6BhDJARIsAAVoDWvJXX4TlisM4df4GNmYmk6GhVj\\_d9FocWzYU5sN3AEDs7wvU14NnwwaAoyyEALw\\_wcB](https://www.boquinstruments.com/online-dissolved-oxygen-sensor/?keyword=oxygen%20dissolved%20sensor&matchtype=p&gad_source=1&gclid=Cj0KCQiAo5u6BhDJARIsAAVoDWvJXX4TlisM4df4GNmYmk6GhVj_d9FocWzYU5sN3AEDs7wvU14NnwwaAoyyEALw_wcB)

### 6.4.8 Sensores de Nivel de Nutrientes (Específicos por Nutriente)

**Descripción:** Sensores específicos para medir la concentración de diferentes nutrientes (como potasio, fósforo, calcio, etc.) en el suelo o el agua, ayudando a ajustar la fertilización de manera precisa.

**EJEMPLO** Rootwave - RootWave PRO

**Características:** Sensor para medir la concentración de nutrientes en el suelo y ajustar la dosificación de fertilizantes.

**Enlace:** <https://rootwave.com/>

## 7. Conclusiones

Los procesos de siembra, cuidado, recolección y acopio de productos agrícolas se pueden ver impactados positivamente con el empleo de tecnologías digitales como la detección remota, sensores IoT, robots autónomos e inteligencia artificial. Estas tecnologías permiten monitorear de manera precisa el estado de los cultivos, detectar plagas y malezas de forma eficiente para su posterior eliminación, y mejorar los procesos culturales de los cultivos, la recolección y el almacenamiento, reduciendo el uso de insumos químicos y optimizar los recursos naturales, como el agua y el suelo, con lo cual se contribuye a una agricultura más sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

Los procesos apoyados con tecnología digital es lo que se ha denominado la agricultura de precisión, que requiere una combinación de geolocalización, monitoreo constante, análisis de la información recolectada y tecnología para actuar sobre los cultivos y su ambiente, con un enfoque personalizado para cada parcela de cultivo con lo cual es posible ajustar las condiciones del suelo y medio ambiente para optimizar el crecimiento y producción de las plantas, reducir costos y minimizar el impacto ambiental. La clave radica en obtener datos precisos y oportunos y utilizar esa información para tomar decisiones informadas que mejoren tanto las propiedades químicas como físicas del sustrato para la siembra.

En conclusión, se puede afirmar que la agricultura de precisión con el uso sensores, satélites, drones y sistemas GIS para monitorizar y analizar las condiciones del suelo, el clima y el estado de los cultivos, además con la inclusión de IoT y de Inteligencia Artificial en la industria agrícola está: "... revolucionando la gestión agrícola al integrar tecnologías avanzadas para optimizar la producción" (Belenguer, 2024), logrando beneficios significativos tanto para los cultivadores, productores, comerciantes, distribuidores, como para los consumidores de alimentos e insumos.

## 8. Referencias

### Agricultura de Precisión y Sensores

BBVA (14 de julio de 2024). ¿Qué es la agricultura de precisión? La gestión digital del campo. BBVA. En: <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-la-agricultura-de-precision-la-gestion-digital-del-campo/>

Belenguer, J. (12 de junio de 2024). Innovación y sostenibilidad en la agricultura de precisión: el ejemplo del proyecto AGRISME. Ainia. En: <https://www.ainia.com/ainia-news/innovacion-sostenibilidad-agricultura-precision/>

Daponte, P., De Vito, L., Glielmo, L., Iannelli, L., Liuzza, D., Picariello, F., & Silano, G. (2019, May). A review on the use of drones for precision agriculture. In IOP conference series: earth and environmental science (Vol. 275, No. 1, p. 012022). IOP Publishing. En: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/275/1/012022/meta>

Delgado Martorell, S., (5 de mayo de 2023). Sensores climáticos para la agricultura: 10 cosas que debes saber. Prismab. En: <https://prismab.com/blog/sensores-climaticos-para-la-agricultura-10-cosas-que-debes-saber/>

Kadian, S., Kumari, P., Shukla, S., & Narayan, R. (2023). Recent advancements in machine learning enabled portable and wearable biosensors. *Talanta Open*, 8, 100267. En: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666831923000875>

Li, J., & Luan, J. (2017). Precision agriculture: Sensors and technologies. *Sensors*, 17(10), 2260. En: <https://doi.org/10.3390/s17102260>

OMEGA (2025). Sensor de temperatura. OMEGA: a Dwyeromega Brand. En: <https://es.omega.com/prodinfo/medicion-temperatura.html#>

SDI (2022). ¿Cómo funcionan los sensores? SDI: Industrial Store. En: <https://sdindustrial.com.mx/blog/sensores/>

Sharma, R., & Bhattacharya, A. (2020). Precision agriculture using drones: A review. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*, 11(1), 12-23.

TE Connectivity (2025). Sensores ópticos. TE Connectivity. En: <https://www.te.com/es/products/sensors/optical-sensors.html?tab=pgp-story>

Tewolde, H., & Duniway, M. C. (2019). The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for precision agriculture. *Agronomy*, 9(6), 327. En: <https://doi.org/10.3390/agronomy9060327>

Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. *Precision Agriculture*, 13(6), 693-712. En: <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9274-5>

## Tecnologías Aplicadas al Agro

Afonso, J. R., et al. (2021). Advances in precision farming technologies and their potential for improving sustainability. *Sustainable Agriculture*, 3(1), 1-19. En: <https://doi.org/10.1007/s41760-020-00021-x>

Auravant (2024). Índices de vegetación y su interpretación: NDVI, GNDVI, MSAVI2, NDRE y NDWI. Auravant. En: <https://www.auravant.com/blog/agricultura-de-precision/indices-de-vegetacion-y-como-interpretarlos/>

Badr, A., & Ramadan, R. (2020). The application of blockchain technology in agriculture: Challenges and opportunities. *International Journal of Agriculture and Biosciences*, 9(6), 209-214.

Campos-Taberner, M., García-Haro, F. J., Martínez, B., & Gilabert, M. A. (2020). Deep learning para la clasificación de usos de suelo agrícola con Sentinel-2. *Revista de Teledetección*, (56), 35-48. En: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7667720>

De, P. R., & Sahoo, G. (2019). Application of technology in modern agriculture: Challenges and future perspectives. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(1), 2070-2084. En: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.801.237>

EDS ROBOTICS (12 de noviembre de 2021). Agricultura automatizada y robótica agrícola. EDS Robotics. En: <https://www.edsrobotics.com/blog/agricultura-automatizada-y-robotica-agricola/>

EOS Data Analytics (21 de marzo de 2024). SIG en la agricultura: mejores prácticas en el sector. EOS Data Analytics. En: <https://eos.com/es/blog/sig-en-la-agricultura/#:~:text=El%20uso%20de%20los%20SIG,la%20automatizaci%C3%B3n%20de%20las%20explotaciones.>

EOS Data Analytics (09 de diciembre de 2024). Tecnología De Tasa Variable: Ventajas Y Cómo Funciona. EOS Data Analytics. En: <https://eos.com/es/blog/tecnologia-de-tasa-variable/>

Fondo europeo de desarrollo regional (abril, 2023). IoT en la agricultura: cómo mejorar la eficiencia en la producción agrícola con la tecnología IoT. Acelera pyme. En: [https://www.acelerapyme.gob.es/sites/acelerapyme/files/2023-11/IoT%20en%20la%20agricultura\\_c%C3%B3mo%20mejorar%20la%20eficiencia%20en%20la%20producci%C3%B3n%20agr%C3%ADcola%20con%20la%20tecnolog%C3%ADa%20IoT.pdf](https://www.acelerapyme.gob.es/sites/acelerapyme/files/2023-11/IoT%20en%20la%20agricultura_c%C3%B3mo%20mejorar%20la%20eficiencia%20en%20la%20producci%C3%B3n%20agr%C3%ADcola%20con%20la%20tecnolog%C3%ADa%20IoT.pdf)

HASAN, A.S.M.M.; SOHEL, F.; DIEPEVEEN, D.; LAGA, H.; JONES, M.G.K.: "A survey of deep learning techniques for weed detection from images". Computers and Electronics in Agriculture, 184, 2021. ScienceDirect. En: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106067>

IBM (2025). ¿Qué son las redes neuronales convolucionales? IBM. En: <https://www.ibm.com/es-es/topics/convolutional-neural-networks>

Jain, S. K., & Tiwari, R. (2020). Review of AI-based solutions for smart farming. Artificial Intelligence in Agriculture, 1, 20-27. En: <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2020.07.001>

Jha, S. K., & Mishra, A. (2021). Application of artificial intelligence and IoT in precision agriculture: A review. IoT and Smart Technologies for Agriculture, 1(1), 10-20.

Kaur, P., & Chandel, R. (2019). Application of IoT in agriculture: A systematic review. International Journal of Applied Engineering Research, 14(19), 3407-3414.

Marvern Panalytical (2025). Espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR). Marvern Panalytical: a spectrics company. En: <https://www.malvernpanalytical.com/es/products/technology/spectroscopy/near-infrared-spectroscopy>

UNIR (2025). Clustering: qué es y cuál es su uso en Big Data. UNIR: La universidad de internet. En: <https://www.unir.net/revista/ingenieria/clustering/#:~:text=El%20clustering%20consiste%20en%20agrupar,temas%20o%20para%20segmentar%20clientes>

Wasser, L. A. (2020). The basics of LiDAR-light detection and ranging-remote sensing. Neon: operated by battelle. En: <https://www.neonscience.org/resources/learning-hub/tutorials/lidar-basics>

## Trazabilidad Alimentaria mediante IoT

- Alzate, P. M., & Giraldo, D. (2023). Tendencias de investigación del blockchain en la cadena de suministro: transparencia, trazabilidad y seguridad. *Revista Universidad & Empresa*, 25 (44), 1-29. En: <https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/empresa/a.12451>
- Ceva Salud Animal (12 de diciembre de 2022). Las “vacas locas”, el origen de la trazabilidad alimentaria. Ceva. En: <https://ruminants.ceva.pro/es/vacas-locas>
- Hamid, M. H., & Karim, M. (2020). IoT-based traceability and smart monitoring for sustainable agriculture. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 22(4), 1-12.
- Hamid, R., & Fong, C. (2019). Applications of IoT for food safety and traceability in agriculture. *Internet of Things*, 8, 100150. En: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2019.100150>
- Garcia Nieto, J., Hassan, S., et al., (2019). Precision Agriculture Techniques and Practices: From Considerations to Applications. *Sensors*, 19(17), 3796. En: <https://doi.org/10.3390/s19173796>
- Red Hat (20 de enero de 2023). ¿Qué es el internet de las cosas (OIT)? Red Hat. En: <https://www.redhat.com/es/topics/internet-of-things/what-is-iot>
- Zhang, X., & Cheng, X. (2021). Blockchain-based food traceability system with IoT technology. *International Journal of Computer Science and Network Security*, 21(9), 107-116.

## Inteligencia Artificial y Blockchain en Agricultura

- Agrotech Campus (2024). Big data e Inteligencia Artificial en la agricultura. Agrotech Campus. En: <https://agrotechcampus.com/blog/big-data-e-inteligencia-artificial-en-la-agricultura/>
- Pastorino, Cecilia (13 de mayo de 2022). Blockchain: qué es y cómo funciona esta tecnología. Welivesecurity. En: <https://www.welivesecurity.com/la-es/2022/05/13/blockchain-que-es-como-funciona-y-como-se-esta-usando-en-el-mercado/>
- Zhiqiang, Z., & Min, W. (2020). Artificial intelligence and blockchain technology in precision agriculture: Trends, applications, and challenges. *AI in Agriculture*, 2, 1-8.

## Referencias de contexto

CESAVEG (2008). Imagen etapas del cultivo de maíz para la Campaña de Manejo Fitosanitario de Maíz. Comité Estatal de Sanidad Vegetal Guanajuato. Guanajuato, México. 20p. Intagri. En: <https://www.intagri.com/articulos/fitosanidad/la-fenologia-del-maiz-y-su-relacion-con-la-incidencia-de-plagas>

Naciones Unidas (s.f.). Desafíos globales: población. Naciones Unidas: Paz, dignidad e igualdad en un planeta sano En: <https://www.un.org/es/global-issues/population>

Cortes Calva, Dharla X., (s.f.). 5. Automatización industrial. Soluciones tecnológicas. En: [https://read.bookcreator.com/ZGXvdOMS14aLgF31sjvqSuVAJ-gE3/g-2IHDO\\_RPy0j8AM9O9EqQ/ZdUVM1joRc2qGlrLE80ctg-right](https://read.bookcreator.com/ZGXvdOMS14aLgF31sjvqSuVAJ-gE3/g-2IHDO_RPy0j8AM9O9EqQ/ZdUVM1joRc2qGlrLE80ctg-right)

Manufactura Latam (27 de julio de 2024). Evolución de la automatización industrial. En: <https://www.manufactura-latam.com/es/noticias/evolucion-de-la-automatizacion-industrial>

Santos Valle, S., & Kienzle, J. (2021). Agricultura 4.0-Robótica agrícola y equipos automatizados para la producción agrícola sostenible. Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura. En: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bits-streams/1d748bb5-2c0c-4daf-b640-14b6544c3d02/content>