

Sistema inteligente para el control, diagnóstico y pronóstico de cosechas en cultivos agrícolas

Sector tecnológico

La presente invención se relaciona con sistemas ensamblados y procesos de aprendizaje automático adaptados e implementados en la administración y automatización de cultivos. Específicamente corresponde a un sistema con elementos de hardware y software combinados y retroalimentados mediante un elemento de inteligencia artificial para un control, diagnóstico y pronóstico de las cosechas en diferentes tipos de cultivos agrícolas.

Antecedentes a la Invención

El uso de tecnologías informáticas contemporáneas y modernas como la Inteligencia Artificial o por sus siglas en inglés IA y el internet de las cosas, IoT también por sus siglas en inglés, es crucial para el éxito de la industria agrícola. La agricultura es a menudo considerada como un componente esencial para la existencia sostenida de los humanos. Mejorar la eficiencia, calidad y cantidad de productos en la agricultura convencional incorporando más tecnología de IoT e IA en los procesos agrícolas existentes es posible.

Los aspectos más relevantes en los que este tipo de tecnologías pueden influir para conseguir elementos de administración de recursos inteligente y sostenible son entre otros la salud de los cultivos, la capacitación de los recursos humanos, las características del suelo, las condiciones del clima, el uso y características de los fertilizantes y otros productos agrícolas, la presencia de plagas, los parámetros de riego y en general de uso del agua, la maquinaria.

La adopción a gran escala de estas tecnologías tiene el potencial de automatizar y optimizar procesos agrícolas comunes y, a menudo, intensivos en recursos. Al permitir datos para ser recopilados en tiempo real y procesados por una IA que está constantemente aprendiendo y analizando las tendencias de estos datos, el consumo ideal de recursos como agua, pesticidas, alimentos y productos químicos que se

utilizan en cultivos y ganadería pueden determinarse y aumentar la eficiencia y la productividad. Esto resuena en todo el entorno agrícola donde la calidad del suelo se mantiene, se minimizan las enfermedades y se mejora la salud de los cultivos. Al permitir que estas tareas sean automatizadas mediante estas tecnologías, se reducen los costos y se mejora el rendimiento a largo plazo.

El desarrollo que aquí se propone contiene mejoras sustanciales sobre la aplicación de estas tecnologías en cultivos reales. Se han probado y validado prototipos que involucran la combinación de elementos de hardware (100) y software para monitoreo telemático de variables agronómicas, con aplicaciones específicas en el proceso de riego y nutrición de cultivos frutales, mostrando ser una alternativa confiable con buenos resultados de funcionamiento y de mejora en los indicadores de eficiencia y costos de los sistemas intervenidos. Sin embargo, consideramos que se puede seguir explorando desarrollos que incluyen otras funcionalidades, como una metodología de diagnóstico de estado de desarrollo de frutos, funciones de medición digital de cosechas por predio, uso de analítica de datos e inteligencia artificial para la caracterización y proyección de las cosechas.

Algunas clasificaciones del IPC importantes que pueden hablar de desarrollos con estas funcionalidades incluyen: G06F 16/00 relacionada estructuras de bases de datos para recuperación de información. También vale la pena mencionar la G06Q 50/00 que agrupa tecnologías de la información y la comunicación especialmente adaptadas para la implementación de procesos comerciales de sectores comerciales específicos, como es el sector agrícola en este caso.

Existen diferentes publicaciones que han tratado de abordar el problema tanto desde la academia con artículos científicos como en patentes buscando una aplicación de ciencia y tecnología en la vida real.

La solicitud NC2022/0012821 de la empresa Cenipalma, revela una tecnología que busca resolver un inconveniente sobre la clasificación de los frutos de palma en cuanto a su calidad en donde los criterios de dicha clasificación depende mucho de la percepción visual de racimos por parte del personal, asociando la clasificación a un criterio con alta subjetividad asociada al error humano por percepción y rotación del

personal. Para ello proponen un equipo que captura imágenes de racimos en diversas ubicaciones, dicha imagen es pretratada y filtrada digitalmente para validar la información mediante un modelo de predicción con algoritmos de inteligencia artificial para la clasificación de las imágenes con base en modelos pre entrenados con una base de datos de imágenes etiquetadas para cada condición y características a detectar.

El sistema de medición mencionado en la patente KR102522341B1 se refiere a una estructura automática de medición del crecimiento de cultivos que utiliza inteligencia artificial y que incluye: una cámara con sensor real que captura imágenes de los órganos del cultivo, incluidos frutos, hojas y tallos, y un cultivo completo; y un servidor que analiza imágenes de cultivos capturadas por una cámara para reconocer el tipo y órgano del cultivo, mide automáticamente el crecimiento de cada órgano del cultivo, convierte los resultados de la medición en un gráfico de serie temporal y determina anomalías en las mediciones o anomalías en el crecimiento del cultivo.

La solicitud de patente US20220183243A1 divulga un sistema de gestión de riego para predecir el agua disponible para el cultivo en una ubicación de cultivo, comprendiendo: un sensor de interfaz de red configurado para adquirir un valor de humedad del suelo en la ubicación del cultivo asociada con el sensor de interfaz de red; un dispositivo de comunicaciones de red configurado para recibir, a través de una red y en relación con la ubicación del cultivo, el valor de humedad del suelo y una señal de riego indicativa de un evento de riego; un componente de almacenamiento de datos digitales para almacenar el valor de humedad del suelo y la señal de riego a lo largo del tiempo y en asociación con la ubicación del cultivo; y un procesador de datos digitales operable para calcular, al menos en parte basándose en los valores de humedad del suelo almacenados y las señales de riego almacenadas para predecir un requerimiento de agua por cultivo futuro en la ubicación del cultivo.

La solicitud de patente US20230177330A1 se refiere a un método para implementar en un cultivo, que implica desplegar una pluralidad de sensores para medir una condición de cultivo actual del cultivo; recibir unas condiciones de operación históricas del cultivo asociadas con un rendimiento de cultivo histórico; aplicar un algoritmo para determinar una recomendación de operación para el cultivo basándose en la

condición de cultivo actual, el régimen de cultivo actual y el régimen de cultivo histórico; y alterar la operación del cultivo realizando la recomendación. En algunas realizaciones, la pluralidad de sensores comprende al menos aproximadamente 25 sensores que miden condiciones del clima, del suelo, de los frutos.

La patente US11321941B2 divulga un método para predecir el rendimiento de los cultivos de un campo agrícola. Este método incluye etapas de aplicar un modelo de pretemporada o datos históricos para proporcionar un modelo de predicción del rendimiento de los cultivos de pretemporada. También incluye la aplicación de imágenes espectrales para construir modelos estadísticos.

La patente CA3007202C se refiere a un método para predecir el rendimiento de cultivos. La tecnología se basa en un sistema informático que recibe datos a través de una red registros de datos agrícolas digitales, incluidas propiedades espectrales de plantas detectadas remotamente y registros de humedad del suelo. El sistema almacena series temporales geográficamente específicas durante un tiempo específico. El sistema informático selecciona características representativas de la serie temporal geoespecífica y crea, para cada área geográfica específica, una matriz de variables asignando un valor de probabilidad a un grupo de componentes para determinar los coeficientes de regresión.

La solicitud de patente WO2017085557A1 revela un sistema y un método para gestionar parte o la totalidad de un ecosistema agrícola. En un ejemplo, el método incluye obtener un nivel de humedad del suelo actual para múltiples zonas en una ubicación geográfica, donde a cada una de las zonas se le ha asignado un nivel de humedad del suelo mínimo deseado. Las zonas se clasifican en un programa de riego basado en un delta entre el nivel actual de humedad del suelo y el nivel mínimo de humedad del suelo deseado para cada zona. Para cada zona, en el orden basado en la clasificación de la zona, se abre al menos una válvula para suministrar agua a la zona y se cierra después de que se completa el riego de la zona. El agua puede entregarse en función del tiempo o del volumen. Si es por volumen, se calcula el volumen que necesita la zona.

Descripción de las figuras

La Figura 1 muestra un diagrama general del sistema y sus bloques de componentes

La Figura 2 presenta un esquema de la unidad de medición automatizada de diámetro de frutos

La Figura 3 presenta un esquema general de la forma en cómo se entrena el modelo de inteligencia artificial

La Figura 4 presenta un esquema de los datos claves que deben ser tomados en cuenta a la hora de entrenar la herramienta de inteligencia artificial.

Descripción resumida de la invención:

La presente descripción está orientada por los dibujos de la invención que corresponden a una versión preferida pero no limitativa de la tecnología.

En este caso, lo que se divulga en este documento en relación con el proyecto desarrollado, busca satisfacer una necesidad de incorporar innovaciones en el proceso de cosecha en cultivos agrícolas en el país y brindarle la posibilidad al agricultor de utilizar tecnologías relacionadas con la agricultura de precisión, asequibles y adaptadas a las necesidades específicas locales. El sistema como se puede ver en la Figura 1 corresponde a una plataforma que combina elementos de hardware (100) que toman información de los frutos (201) y en general de otros parámetros del entorno (suelo, clima y otras características) y software orientada a la optimización del proceso de medición y proyección de cosechas en diferentes cultivos, siendo validado específicamente en el cultivo de mango, con funcionalidades superiores en el proceso de captura y recopilación (301 y 302), transmisión, control y análisis de datos mediante un componente de inteligencia artificial (305).

El conjunto de elementos de hardware (100) tiene una doble funcionalidad: la capacidad para monitorear variables agronómicas relacionadas con el desarrollo de frutos y el proceso de cosecha, además de transmitir esta información de forma remota. De forma complementaria, el conjunto de elementos de hardware incluye un

dispositivo para acceder a un aplicativo móvil, desde la cual se puede gestionar la operación de forma remota como se observa en el esquema de la Figura 2.

El primer elemento de dicho hardware (100) fue diseñado para monitorear diversas variables productivas en los predios agrícolas, tales como clima, plagas, enfermedades, nutrientes y parámetros de productividad. Además, cuenta con la capacidad de llevar a cabo mediciones digitales de frutos (201) mediante sensores de dendrometría (202) y generar curvas de cosecha.

El segundo elemento funciona para la comunicación mediante un dispositivo de enlace (203) que actúa como punto de acceso a la red y que tiene un módulo de transmisión (204) para conectar la información entre Internet y los nodos que se comuniquen con él y viceversa. El módulo de transmisión (204) funciona bajo una especificación para redes de bajo consumo y área amplia o modulación de espectro ensanchado (*LoRa*) que permite conexión entre dispositivos e Internet. Este dispositivo permite la conexión de los datos generados por la red de sensores y una plataforma web y/o un aplicativo móvil (205).

Dentro de este conjunto de elementos de hardware (100) se incluye un dispositivo novedoso para la medición automatizada de diámetro de frutos (202), en complemento con el desarrollo de un sensor especializado en el conteo digital (401) de frutos por árbol y árboles por predio con potencial de cosecha.

En cuanto al desarrollo de software, los principales elementos constitutivos del conjunto corresponden a los siguientes:

- Un elemento de consulta telemática de variables productivas, tales como clima, plagas, enfermedades, nutrientes y parámetros de productividad.
- Una aplicación móvil para la consulta alterna de las variables diagnosticadas en campo.

Este enfoque metodológico, que abarca desde la recolección y procesamiento de datos hasta su visualización y control a través de una plataforma IoT, refleja una interconexión profunda entre tecnologías modernas y estrategias efectivas de gestión de datos como se puede ver en la Figura 3. La combinación de dispositivos automatizados y la pericia de profesionales altamente capacitados permiten obtener

una visión integral y detallada del entorno estudiado, otorgando información esencial para la toma de decisiones informadas.

El soporte arquitectónico de red que le da estructura a este conjunto de elementos de software incluye elementos como:

- Un servidor de red que corresponde a la parte central de una red *LoRa*, que es la tecnología de modulación inalámbrica utilizada para la comunicación a larga distancia. Esta red recibe paquetes de datos enviados por el dispositivo de enlace (203). Actúa como intermediario entre los nodos finales y el servidor de aplicaciones. Se encarga de realizar la deduplicación de los paquetes que le llegan (elimina paquetes redundantes), así como de realizar comprobaciones de seguridad antes de enviar la información al servidor de aplicación. Entre otras actividades realiza las siguientes: descripta las tramas, revisa esquemas de autenticación y envía la información descriptada a un servidor privado virtual (303) o *VPS*.
- El *VPS* (303) corresponde a un sistema de alojamiento web, en el cual un servidor físico se particiona en varios servidores virtuales, ofreciendo un desempeño equiparable al de un servidor dedicado. Las principales características del *VPS* (303) implementados dentro de los elementos de software, consideran los siguientes atributos: plataforma en la nube, aloja el *Backend* (son los datos y la infraestructura que permiten que la aplicación funcione) y el *Frontend* (lo que ven los usuarios e incluye elementos visuales o interfaz hombre-máquina (304)), estos últimos conectados entre sí mediante un esquema de microservicios.
- La interfaz hombre-máquina (304) sirve para el monitoreo de variables productivas y está basado en una plataforma IoT de código abierto para la recolección de datos, procesamiento, visualización y administración de dispositivos. Este componente permite dentro de la arquitectura, la visualización y monitoreo de la información de los diferentes dispositivos IoT implementados a través del conjunto de elementos de hardware.

De manera complementaria se desarrolló un componente de software basado en inteligencia artificial (305) diseñado para prever la productividad de los predios agrícolas utilizando datos reales recopilados durante el ciclo de desarrollo del cultivo.

Descripción detallada de la invención:

El desarrollo del conjunto de elementos de hardware (100) consideró la generación de una arquitectura de dispositivos de captura, registro y comunicación de datos de campo con incidencia en el proceso de diagnóstico y pronóstico de cosechas, el cual se compone de los siguientes componentes:

- Una unidad de medición automatizada de diámetros de frutos (202), con funciones de emisión de alarmas en caso de lograr las dimensiones requeridas para cosecha comercial.
- Una unidad de medición de variables de calidad nutricional de suelo y follaje, basado en el uso de dispositivos portátiles, en conjunto con una red de colectores de datos de monitoreo de variables de nutrición de suelo.
- Una unidad de medición manual de variables de calidad sanitaria de frutos con registro manual de datos en una plataforma de almacenamiento de datos y archivos.
- Una unidad de comunicación que tiene un dispositivo de enlace (203) que trabaja con un módulo de transmisión (204) mediante un protocolo *LoRaWAN* que es el protocolo de comunicación de más alto nivel que utiliza *LoRa* como base y que permite la conexión de los datos generados por la red de colectores de datos y la plataforma web o aplicativo móvil (205).

Dentro de este conjunto de elementos, se hace especial énfasis en una unidad novedosa de medición automatizada de diámetros de frutos, con funciones de emisión de alarmas en caso de lograr las dimensiones requeridas para cosecha comercial como se ve en la Figura 2. Esta unidad tiene como propósito el monitoreo del diámetro de frutos (201) mediante la instalación en campo de un conjunto de sensores tipo dendrómetro (202). Con esta variable es posible determinar las variaciones diarias en el diámetro, con lo cual es posible estimar las fechas de cosechas de un predio específico a partir del nivel de desarrollo del tamaño del fruto (201).

Adicionalmente, se agrega la posibilidad del conteo de árboles frutales a partir de imágenes multi-espectrales tomadas desde drones (401), la cual permite validar

geográficamente el número de árboles existentes en el perímetro de los predios, así como el nivel de desarrollo vegetativo de los mismos con el propósito de mejorar la estimación de la productividad por predio y por cosecha.

Por otro lado, el desarrollo de los elementos de software se realizaron de acuerdo con un enfoque metodológico que inició con una estratégica planificación para la recopilación de datos de entrada, los cuales son monitoreados en entornos de campo en un esquema que se observa en la Figura 3. Esta recolección se lleva a cabo de manera automatizada a través de dispositivos pertenecientes a la red del Internet de las Cosas (IoT), así como también de manera manual por técnicos altamente capacitados, quienes ejecutan la toma de muestras con un nivel de complejidad significativo. Estas muestras, representativas de variables críticas, se almacenan en bases de datos especialmente diseñadas para cada caso. En el contexto de las muestras adquiridas por los técnicos se registran en hojas de cálculo (301) alojadas en una plataforma para almacenamiento de datos y archivos, mientras que para los dispositivos IoT, los datos son depositados en sistemas de almacenamiento basados en estas tecnologías (302).

Los datos recopilados, independientemente de su origen, son procesados y consumidos en una infraestructura centralizada, específicamente en un Servidor Virtual Privado o VPS (303) que alberga y sustenta la totalidad de la solución implementada. La funcionalidad del VPS (303) abarca desde la manipulación y automatización de los datos, hasta la administración de la plataforma integral de control y monitoreo, donde se hace una traducción a un lenguaje visual de las tendencias y variables derivadas de las consultas a las bases de datos (301) y las interfaces de programación de aplicaciones (302).

Para facilitar la interacción con los datos, se ha optado por emplear una plataforma IoT de código abierto para la recopilación, el procesamiento, la visualización y la gestión de dispositivos de datos donde la interacción se da a través de una interfaz hombre-máquina (304). Este entorno, caracterizado por ser un proyecto de código abierto, se orienta hacia la satisfacción de necesidades en entornos industriales y corporativos. Su propósito principal radica en agilizar la creación de paneles de control personalizables, mediante la incorporación de un artilugio o microaplicación que corresponde a una pequeña aplicación o programa, usualmente presentado en

archivos o ficheros pequeños adaptables a diversas aplicaciones y requerimientos específicos.

Para una interacción del usuario con los datos y su respectiva visualización, se diseñaron paneles de control, segmentando las diversas variables en múltiples categorías. Esta táctica simplifica tanto la comprensión como la visualización de los datos destinados a los técnicos responsables del monitoreo y la gestión de los procesos agrícolas en el campo. Su enfoque principal radica en simplificar la creación de paneles de control personalizables, a través de la incorporación de microaplicaciones adaptables que se usan en una variedad de aplicaciones y requisitos específicos. Esta elección reafirma el compromiso de proporcionar una experiencia de visualización y administración de datos optimizada y versátil en el contexto de la tecnología IoT.

La recopilación de datos abarca un total de 38 variables sometidas a seguimiento en el entorno de campo. Dichas variables se hallan divididas en seis secciones claramente definidas que son: clima, hojas, suelo, plagas, enfermedades y productividad. Cada una de estas secciones se encuentra intrínsecamente relacionada con un aspecto esencial del proceso agrícola y ofrece una visión pormenorizada del estado y el rendimiento de dichos factores.

1. Sección: Clima

En esta sección, se aglutinan 9 variables que son sometidas a seguimiento constante:

<i>Variable</i>	<i>Forma de recolección de datos</i>
Temperatura máxima diaria (°C)	Recopilación automatizada.
Temperatura media diaria (°C)	Recopilación automatizada.
Temperatura mínima diaria (°C)	Recopilación automatizada.

Humedad relativa máxima (%)	Recopilación automatizada.
Humedad relativa mínima (%)	Recopilación automatizada.
Humedad relativa promedio (%)	Recopilación automatizada.
Velocidad del viento promedio (m/s)	Recopilación automatizada.
Evapotranspiración	Recopilación automatizada.
Grados día	Recopilación automatizada.

2. Sección: Hojas

Dentro de esta sección se presentan 3 variables bajo seguimiento, segmentadas en 4 áreas distintas:

Variable	Forma de recolección de datos
Nitrato foliar	Recopilación manual
Potasio foliar	Recopilación manual
Calcio foliar	Recopilación manual

3. Sección: Suelo

La sección de suelo consta de 8 variables distribuidas en 4 áreas distintas:

<i>Variable</i>	<i>Forma de recolección de datos</i>
Nitrato edáfico	Recopilación manual
Fosfato edáfico	Recopilación manual
Potasio edáfico	Recopilación manual
Calcio edáfico	Recopilación manual
Magnesio edáfico	Recopilación manual
pH edáfico	Recopilación manual
Potencial matrico - 10 cm	Recopilación automatizada
Potencial matrico - 30 cm	Recopilación automatizada

4. Sección: Plagas

En esta sección se monitorizan 6 variables relacionadas con plagas:

<i>Variable</i>	<i>Forma de recolección de</i>
------------------------	---------------------------------------

	<i>datos</i>
Hormiga arriera	Recopilación manual
Picudos	Recopilación manual
Thrips	Recopilación manual
Cochinillas	Recopilación manual
Comején	Recopilación manual
Mosca de la fruta	Recopilación manual

5. Sección: Enfermedades

En la sección de enfermedades, se controlan 4 variables:

<i>Variable</i>	<i>Forma de recolección de datos</i>
<i>Lasioidiploidia</i>	Recopilación manual
<i>Gomosis- Phytophthora sp</i>	Recopilación manual
<i>Antracnosis- Colletotrichum sp.</i>	Recopilación manual

<i>Mancha algal - Cephaleuros virescens</i>	Recopilación manual
---	---------------------

6. Sección: Productividad

En la última sección, se monitorean 6 variables relacionadas con la productividad:

Variable	Forma de recolección de datos
Largo de fruto	Recopilación automatizada
Ancho de fruto	Recopilación automatizada
No. de frutos/árbol	Recopilación automatizada
No. de árboles en estado de floración	Recopilación manual
No. de árboles en estado de fructificación	Recopilación manual
Índice NDVI	Recopilación manual

La solución se ha diseñado para que todos los datos se puedan acceder mediante dos alternativas complementarias: mediante la plataforma web, los usuarios pueden acceder y visualizar los datos recopilados de manera conveniente y desde cualquier dispositivo con acceso a la web. Por otro lado, la implementación de la aplicación móvil brinda la posibilidad de llevar consigo la plataforma en dispositivos móviles, lo

que conlleva una mayor comodidad y flexibilidad para monitorear los valores desde cualquier ubicación. La información en tiempo real, disponible tanto en la web como en la aplicación móvil, facilita la toma de decisiones informadas y oportunas. Al poder acceder a los datos de manera más rápida y sencilla, los operadores pueden optimizar la gestión de los recursos, resolver problemas y tomar acciones correctivas con mayor agilidad. Esto, a su vez, incrementa la eficacia general de la operación y contribuye a un aumento en la productividad esperada.

Frente al componente de software basado en inteligencia artificial (305), el diseño responde a la prevención-predicción de la productividad de los predios agrícolas utilizando datos reales recopilados durante el ciclo de desarrollo del cultivo. Para el desarrollo de este componente se utilizó un conjunto de técnicas y tecnologías para realizar la definición, exploración, explotación y modelización de datos obtenidos en campo a través del prototipo, con la finalidad de determinar patrones de comportamiento, que permitan comprender la estructura y el funcionamiento de los datos dentro de un contexto de operación determinado.

La metodología usada para el desarrollo del componente de inteligencia artificial (305) para el análisis predictivo de cosecha tiene un objetivo definido en conjunto con expertos en fruticultura, donde se planteó predecir de forma precisa mediante variables relacionadas como el clima el foliar el suelo entre otras el rendimiento de la productividad en la cosecha. Una vez identificados los tiempos y la ruta de trabajo se establecieron criterios de medición para evaluar varios datos claves que deben ser tomados en cuenta a la hora de entrenar la herramienta y que se pueden ver en el esquema de la Figura 4.

Los datos más relevantes para el análisis de la cosecha corresponden a:

- Las condiciones climáticas (306) son uno de los factores más importantes a considerar en la predicción de cosechas agrícolas. Los datos climáticos a medir pueden incluir temperatura, humedad, precipitación, radiación solar, viento y evapotranspiración. Estos datos se pueden medir mediante el uso de estaciones meteorológicas o instrumentos portátiles.
- La calidad del suelo (307) es otro factor clave a considerar en la predicción de cosechas agrícolas. Los datos a medir pueden incluir la acidez, el contenido

de nutrientes, la materia orgánica, la capacidad de retención de agua y la densidad aparente del suelo. Estos datos se pueden medir mediante análisis de muestras de suelo.

- La elección de la variedad de cultivos (308) también puede afectar la producción agrícola. Los datos a medir pueden incluir la tasa de germinación de semillas, la tasa de crecimiento, la resistencia a enfermedades y plagas y la productividad. Estos datos se pueden obtener de registros de cultivos y experimentos de campo.
- La fertilización y el manejo de cultivos (309) también pueden afectar la producción agrícola. Los datos a medir pueden incluir la cantidad de fertilizante aplicado, la frecuencia y el momento de la aplicación de fertilizantes y pesticidas, y el riego. Estos datos se pueden obtener a través de registros de cultivos y observaciones de campo.
- La demanda del mercado (310) también es importante en la predicción de cosechas agrícolas. Los datos a medir pueden incluir el precio de los productos agrícolas, la demanda de los consumidores y las tendencias del mercado. Estos datos se pueden obtener a través de análisis de mercado y encuestas a consumidores.

El algoritmo de inteligencia artificial se puede desarrollar basado en modelos de regresión, árboles de decisión y algoritmos de aprendizaje profundo. La elección depende de si se buscan predecir valores continuos (como el rendimiento de la cosecha) o realizar clasificaciones (como la calidad del mango).

Ejemplo de aplicación práctica o forma preferida de la invención

El punto de partida de la implementación consideró la generación de un análisis técnico de telemetría en la zona de experimentación en el municipio de Chimichagua (Cesar). En este caso, el objetivo principal fue evaluar la cobertura, redundancia, profundidad y extensión de la señal de radiofrecuencia que se comunica mediante el protocolo *LoRaWAN*, que permite transmitir los datos del dendrómetro (202) de manera eficiente y confiable.

Durante este análisis, se identificaron los posibles obstáculos y fuentes de interferencia en el entorno, considerando elementos como la topografía del terreno y

la presencia de estructuras metálicas o vegetación densa. El software de simulación demostró una cobertura completa y sin interrupciones en el área de producción, garantizando comunicación confiable y fluida para la implementación de la solución.

Debido a que no se cuenta con acceso a internet local en el área de producción ni cercano a este, otro aspecto fundamental fue la evaluación de la cobertura de las redes móviles 2G y 3G en el área seleccionada para la instalación del dendrómetro (202). Para ello, se examinaron las señales proporcionadas por diferentes operadores de datos móviles, con el propósito de determinar cuál ofrecía la intensidad de señal más óptima para asegurar una transmisión de datos confiable y constante para que los datos recopilados por el dendrómetro (202) se transmitieran de manera eficiente y sin interrupciones a la plataforma central.

El dendrómetro (202) representa una herramienta vital para obtener mediciones precisas del crecimiento de frutas (201). En este paso se llevó a cabo el ensamblaje de cada uno de los dendrómetros (202), directamente al dispositivo de enlace (203), asegurando una instalación adecuada para garantizar mediciones confiables y precisas. Durante el proceso de configuración, se ajustaron parámetros como los intervalos de muestreo y los valores de referencia entregados por el fabricante para obtener datos significativos y representativos del desarrollo de frutos.

Una vez que el ensamblaje y la configuración del dendrómetro (202) se completó de manera satisfactoria, se procedió a la integración con el protocolo *LoRaWAN* del módulo de transmisión (204). En esta etapa, se activó el sensor en el servidor en ciertas frecuencias para la conectividad del sensor. La integración también incluyó la configuración de los canales para establecer una comunicación eficiente y sin pérdidas con los principales canales de telemetría del sistema.

Una vez que el dendrómetro (202) se integró a la infraestructura, se procedió a realizar las pruebas iniciales. Durante las pruebas iniciales, se detectó que el sensor se conecta correctamente y con cierto ajuste en la configuración el sensor envía datos sin inconvenientes. La información obtenida en estas pruebas es fundamental para realizar ajustes finos en la configuración y calibración del dendrómetro (202), asegurando mediciones precisas del crecimiento de frutas.

Los dendrómetros (202) son unos sensores que permiten medir el diámetro del tronco de una planta o del fruto (201) para conseguir un seguimiento efectivo del cultivo. Uno de los dendrómetros utilizados en campo corresponde a un sensor resistivo que mide el diámetro del tronco de una planta con un rango de 0 a 20 Kohm. Otro caso puede ser el dendrómetro de medición de diámetro de fruto que presenta el mismo rango de resistencia de salida que el de tronco.

En cuanto a la validación de la inteligencia artificial (305), después de realizar el análisis y limpieza de los datos, se implementaron diferentes modelos de aprendizaje automático como redes neuronales, máquinas de soporte vectorial entre otros, para analizar y aprender patrones complejos en los datos recopilados.

Estos modelos se entrenan con el conjunto de datos históricos y validados mediante técnicas de validación cruzada, permitiendo que la herramienta refine su capacidad predictiva. Se incorporan funciones de visualización para presentar de manera comprensible los resultados de los modelos, brindando una visión clara de las tendencias y posibles variabilidades a la hora de entrenar.

El modelo fue ajustado con el 80% de los datos para entrenamiento y un 20% para test. Los resultados de esta primera aproximación tienen una exactitud del 67% y un error absoluto medio (MAE) de $\pm 3.4\%$ de la media de la variable de salida. Basados en lo anterior se pueden aplicar técnicas más avanzadas que mejoran el performance de la clasificación así como indicios de un mejor preprocesamiento de los datos de entrada.

Avanzando con la elección del mejor modelo y partiendo de la base anterior donde se evidencio que el conjunto de datos se ajustó perfectamente después del preprocesamiento de los datos, se decide realizar una búsqueda por varios modelos de machine learning que generalicen mejor la predicción.

Referencias

AlZubi, A. A., & Galyna, K. (2023). Artificial intelligence and internet of things for sustainable farming and smart agriculture. IEEE Access.

De Abreu, C. L., & van Deventer, J. P. (2022). The application of artificial intelligence (AI) and internet of things (IoT) in agriculture: a systematic literature review. In Southern African Conference for Artificial Intelligence Research (pp. 32-46). Springer, Cham.

Kevrešan, Ž., Mastilović, J., Kukolj, D., Ubiparip Samek, D., Kovač, R., Đerić, M., ... & Stankovski, S. (2023). Insights from a Patent Portfolio Analysis on Sensor Technologies for Measuring Fruit Properties. *Horticulturae*, 10(1), 30.

Hernández Rojas, D., Mazon Olivo, B., & Escudero, C. (2018). Internet de las cosas (IoT). Machala: Universidad Técnica de Machala.