

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO CON SENSORES E INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA OPTIMIZACIÓN HÍDRICA EN LOS CULTIVOS DE AGUACATE HASS EN EL DEPARTAMENTO DEL CAUCA.



Alejandro Betancourt Ballesteros
Jonatan Santiago Cujilema

Director:
Saúl Eduardo Ruiz Sarzosa

Corporación Universitaria Comfacaucá - Unicomfacaucá
Facultad de ingeniería, Ingeniería de Sistemas
Popayán - Cauca
2024

Resumen

El propósito de la investigación es implementar un sistema de seguimiento con sensores e inteligencia artificial (IA) para optimizar el uso del agua en los cultivos de aguacate Hass en el departamento de Cauca. Este proyecto tiene como objetivo tratar el problema de la gestión ineficaz de recursos hídricos en el cultivo de aguacate, incrementando la productividad y fomentando la adopción de tecnología.

La metodología se fundamentó en la incorporación de tecnologías de vanguardia. El diseño de una red de sensores se realizó para cuantificar factores esenciales como la humedad del terreno, la temperatura y las condiciones meteorológicas. Estos datos se procesan a través de algoritmos de inteligencia artificial, los cuales producen sugerencias a medida para mejorar el riego. Se realizó un trabajo de campo con los agricultores de la zona para analizar su actitud respecto a la adopción de nuevas tecnologías.

Los resultados señalan que el sistema sugerido disminuye el desperdicio de agua en un 30% y optimiza la toma de decisiones en la gestión del recurso hídrico. Igualmente, los productores agrícolas mostraron interés en estas tecnologías por sus ventajas económicas y medioambientales, resaltando la sencillez de manejo y el incremento en su eficiencia.

El sistema de vigilancia es una alternativa innovadora y asequible que tiene el potencial de cambiar las prácticas agrícolas convencionales, el método combina tecnología de punta con una correcta transmisión de saberes a los agricultores, promueve la sostenibilidad y competitividad en el cultivo de aguacate Hass asegurando un uso eficiente y sostenible del recurso hídrico.

Abstract

The research seeks to develop and implement a monitoring system that integrates sensors and artificial intelligence, capable of collecting and processing real-time data from Hass avocado crops in the department of Cauca. This system allows optimizing the management of water resources, improving the efficiency and sustainability of irrigation in the region.

It was supported with sensor theories to quantify essential factors such as soil moisture, temperature and weather conditions. These data are processed through artificial intelligence algorithms, which generate informed decisions to improve irrigation. The methodology used was qualitative and quantitative, and field work was carried out in the area to analyze the behavior of farmers with relation to the adoption of new technologies.

The results indicate that the suggested system reduces water waste and optimizes informed decision making in water resource management. Agricultural producers showed interest in these technologies for their economic and environmental advantages, highlighting the benefits and options for learning.

The monitoring system is an innovative and affordable alternative that has the potential to change conventional agricultural practices, combining innovative technologies with farmer training to promote sustainability and competitiveness in Hass avocado cultivation, ensuring efficient and sustainable use of water resources.

Keywords: Internet of things (IOT), sensors, intelligence, technologies, sustainability, competitiveness.

Tabla de Contenido

1. INTRODUCCIÓN	7
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
3. JUSTIFICACIÓN	11
4. OBJETIVOS	13
4.1 Objetivo General	13
4.2 Objetivos Específicos	13
5. MARCO DE REFERENCIA	14
5.1 Estado del Arte	14
5.2 Marco Contextual	135
5.3 Marco Teórico	137
5.4 Marco Conceptual	139
5.5 Marco Normativo	20
6. METODOLOGÍA	22
6.1 Fase 1: Análisis Situacional y Recopilación de Datos	22
6.2 Fase 2: Diseño y Desarrollo del Sistema de Monitoreo	23
6.3 Fase 3: Implementación y Pruebas en Campo	23
6.4 Fase 4: Evaluación y Optimización del Sistema	24
6.4 Fase 5: Conclusiones y Recomendaciones	24
Materiales y Arquitectura	25
Listado de figuras	29
7. RESULTADOS	39
8. CONCLUSIONES	47
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

Lista de Figuras

Figura 1. Sensor de humedad del suelo	29
Figura 2. Sensor de temperatura y humedad.....	29
Figura 3. Sensor de radiación solar... ..	30
Figura 4. Sensor de lluvia.....	30
Figura 5. ESP32.....	31
Figura 6. Heltec Wifi Lora 32.....	31
Figura 7. Raspberry Pi 4.....	32
Figura 8. <i>ThingSpeak</i>	32
Figura 9. Home Assistant.....	33
Figura 10. Flutter.....	33
Figura 11. <i>VueJs</i>	34
Figura 12. Django.....	34
Figura 13. Caracterización Aguacate Hass.....	35
Figura 14. Tiempo total fase vivero.....	35
Figura 15. Trazado lotes para siembra.....	36
Figura 16. Distancia de siembras.....	36
Figura 17. Prototipos y Mockups.....	37

Lista de Tablas

Tabla Datos No.2.40

Tabla Datos No.2.40

Tabla Datos No.3.40

Tabla Datos No.4.41

Tabla Datos No.5.41

Tabla Datos No.6.42

Tabla Datos No.7.43

Tabla Datos No.8.43

Tabla Datos No.9.44

Tabla Datos No.1044

Tabla Datos No.3146

1. INTRODUCCIÓN

El aguacate Hass es la principal variedad comercial del mundo. Originada en La Habra Heights, California, por Rudolph Hass. Introducida en 1936. Fruto de forma ovada piriforme; Pulpa de excelente sabor y calidad; Peso de frutos de 150 a 400 g. cáscara gruesa y rugosa de color verde, que se torna morada a negra al madurar. Semilla adherida a la cavidad. Árbol de producción precoz con crecimiento erecto, mediano y uniforme. Grupo floral A, con un periodo de flor a fruto cercano a los 12 meses, pudiendo permanecer en el árbol hasta 3 meses más, y en refrigeración, por hasta un mes [12].

El cultivo de aguacate Hass en Colombia ha vivido un incremento exponencial en los últimos diez años, motivado por una demanda global en aumento y la posición del país como el tercer principal exportador global de esta fruta, tras México y Perú. En este escenario, el departamento del Cauca ha surgido como una zona con gran potencial de producción, aportando de manera considerable a las exportaciones de aguacate de Colombia. No obstante, este crecimiento agrícola se topa con obstáculos críticos, siendo la administración del agua uno de los retos más urgentes en el panorama presente y venidero de la región.

Investigaciones llevadas a cabo por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) señalan que el Cauca se encuentra en circunstancias de gran variabilidad climática, se caracterizan por épocas de fuertes precipitaciones seguidas de extensas sequías, lo que provoca variaciones en la disponibilidad de agua, impactando la productividad y la calidad de los cultivos. En este escenario, la aplicación de sistemas de seguimiento precisos a través de sensores e inteligencia artificial (IA) se presenta como una táctica esencial para la optimización del agua y la sostenibilidad de los cultivos de aguacate Hass en el Cauca.

En el sector agrícola, la tecnología de sensores facilita la captura de información vital en tiempo real, tales como la humedad del terreno, la temperatura, los niveles de radiación solar y los patrones de evapotranspiración. Mediante la combinación de estos sensores con algoritmos sofisticados de Inteligencia Artificial, se pueden elaborar modelos de predicción que facilitan la toma de decisiones en función de las necesidades particulares de cada parcela, adaptando el riego de manera dinámica y personalizada.

Estudios de la Universidad de California en Davis en materia de agricultura de precisión han evidenciado que la implementación de sensores y modelos predictivos en los cultivos de aguacate puede disminuir el uso de agua en un 40% y potenciar el rendimiento de los árboles en un 20%, al concentrarse en las demandas específicas de agua de cada planta. Estas tecnologías no sólo perfeccionan la utilización del agua, sino que también disminuyen los costos relacionados con la

irrigación, fomentan la sostenibilidad y elevan la calidad de los frutos, un significativo beneficio competitivo en el mercado mundial.

En el Cauca, la implementación de la Inteligencia Artificial y los sistemas de vigilancia hídrica constituyen una oportunidad esencial para incrementar la eficacia de los pequeños y medianos agricultores, que representan más del 70% de la población productiva del sector. No obstante, la implementación de estas tecnologías se topa con obstáculos, tanto en lo que respecta a la inversión inicial como al grado de formación requerido para la implementación y gestión de estos sistemas.

Según el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, en Colombia existe una infraestructura limitada para la agricultura de precisión, particularmente en zonas rurales donde el acceso a tecnologías de vanguardia es limitado, esto ha provocado que los agricultores se apoyen en técnicas de riego convencionales y poco eficaces, lo que ha aumentado la susceptibilidad de sus cosechas a cambios climáticos severos y ha intensificado la carga sobre los recursos naturales de la zona.

El riego es un componente muy importante en el cultivo de aguacate. El agua es requerida por el árbol en momentos específicos cruciales como la floración, el periodo de cuajado de fruto en el desarrollo inicial de los mismos por su periodo de alta división celular y el momento de llenado de frutos para asegurar su tamaño [12].

El estudio sugerido tiene como objetivo poner en marcha un Sistema de Sensores e Inteligencia Artificial para la optimización del agua, además de valorar su efecto en cuanto a productividad, sostenibilidad y viabilidad financiera en el entorno local. Este sistema utilizará redes de sensores asequibles que recolectan información en tiempo real y emplean algoritmos de Inteligencia Artificial para prever las necesidades de irrigación basándose en factores climáticos, del suelo y del desarrollo de la planta.

La implementación de estos sistemas inteligentes facilita la generación de modelos de simulación que, a su vez, posibilitan a los agricultores del departamento del Cauca ajustarse a las variaciones climáticas y organizar el riego de forma eficaz, incluso durante épocas de sequía. Por lo tanto, el sistema no solo se transforma en un instrumento para la administración del agua, sino también en un medio para adaptarse al cambio climático que favorece la resistencia del cultivo de aguacate Hass en la zona.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El cultivo de aguacate en el departamento del Cauca representa una actividad económica y social clave para la región y el país. Sin embargo, este sector enfrenta desafíos críticos en cuanto a la gestión eficiente del agua, un recurso esencial para garantizar la sostenibilidad y productividad a largo plazo. La región del Cauca, caracterizada por su topografía variada y condiciones climáticas diversas, sufre de una disponibilidad hídrica que es frecuentemente limitada e inestable. Esta realidad dificulta el desarrollo agrícola y genera incertidumbre para los agricultores locales que dependen de una producción constante y de calidad.

En el pasado, muchos expertos en las zonas productoras de aguacate en el mundo señalaban que la muerte de los árboles se debía al exceso de agua en la zona de raíces, estudios posteriores en California, Florida y Chile, indicaron que la hipoxia o anoxia en suelos inundados o pobremente drenados dañaban las raíces y causaban mortalidad de árboles. Al igual en Colombia hasta hace unos años, la mortalidad de árboles sólo se atribuía a enfermedades asociadas al suelo, realizando manejos encaminados solo a el control de estas y no de su causa, dando controles erráticos, costosos y con resultados poco satisfactorios para los agricultores, ya que finalmente el decaimiento y muerte de los árboles se da meses o años después [12].

Actualmente, la gestión hídrica en los cultivos de aguacate del Cauca es deficiente, resultando en un uso inadecuado y poco eficiente del agua. Este problema no solo afecta el volumen de producción, sino también la calidad de los frutos, impactando negativamente en la rentabilidad y competitividad de los agricultores. La falta de tecnologías modernas, como sistemas de riego eficientes, sensores para monitoreo de condiciones del suelo y clima, y herramientas de inteligencia artificial para una toma de decisiones informada, limita la capacidad de los agricultores de gestionar el riego de manera óptima y sostenible.

A su vez, la poca adopción de tecnologías de monitoreo y optimización hídrica en esta región se ve agravada por factores como barreras económicas, falta de conocimiento y la escasa capacitación en el uso de herramientas avanzadas. Los agricultores enfrentan dificultades para acceder a los sistemas de monitoreo que les permitirían gestionar el riego de manera precisa y adaptativa, lo cual es fundamental para enfrentar los efectos de un clima cada vez más variable, donde las sequías y cambios en los patrones de precipitación son más frecuentes y extremos.

La limitada implementación de estas tecnologías en la región afecta no solo a los agricultores y la producción local, sino también a la sostenibilidad del ecosistema y el bienestar de las comunidades. La falta de gestión adecuada de los recursos hídricos puede llevar a la degradación del suelo, a la sobreexplotación del agua y a la disminución de la biodiversidad, lo que compromete la viabilidad

de la producción de aguacate Hass departamento del Cauca y su capacidad de adaptarse a las demandas y estándares del mercado global.

En este contexto, es urgente abordar los desafíos de gestión hídrica en el cultivo de aguacate del departamento a través de tecnologías de monitoreo y optimización hídrica, que permitan una utilización eficiente y sostenible del agua y contribuyan al desarrollo económico de la región.

Pregunta de Investigación: ¿Cómo pueden las tecnologías modernas de monitoreo y optimización hídrica mejorar la gestión del agua en el cultivo de aguacate Hass en el departamento del Cauca?

3. JUSTIFICACIÓN

La producción de aguacate en el departamento del Cauca es una actividad económica y social fundamental tanto a nivel local como nacional. Colombia se ha consolidado como uno de los principales países productores y exportadores de aguacate, especialmente de la variedad Hass, posicionándose detrás de líderes como México y Perú. Este cultivo, que ocupa el cuarto lugar en importancia dentro de los frutales producidos en el país, ha experimentado un crecimiento significativo en las últimas décadas. Según datos recientes, el área cultivada ha superado las 40.000 hectáreas, con una producción que continúa en ascenso, demostrando el impacto y potencial de esta actividad agrícola en la economía nacional.

En Colombia, el proceso de producción de plantas de aguacate en viveros, previo a su siembra en campo, oscila entre 6 y 8 meses dependiendo del piso térmico donde se desarrolle. Durante este tiempo se siembran las semillas de los patrones, se tiene un crecimiento de los mismos hasta su injertación y, luego de injertados, se debe esperar hasta que las copas de los árboles se desarrollen completamente, [12] la propagación del aguacate más adecuada por las condiciones climáticas y por la disponibilidad de material vegetal o patronaje de muy buena adaptación y resistencia, se realiza en viveros por injerto, si la siembra de la semilla se hace directa en campo sin un proceso de injertación, conlleva a la polinización cruzada, es decir que haya una variación genética del fruto.

No obstante, el cultivo de aguacate presenta desafíos críticos, particularmente en la gestión hídrica. Este frutal requiere grandes cantidades de agua para su desarrollo óptimo, y su manejo eficiente es clave para garantizar la sostenibilidad y la productividad. En el Cauca, una región caracterizada por su topografía variada y condiciones climáticas diversas, la disponibilidad hídrica es frecuentemente limitada e inestable, dificultando la implementación de prácticas agrícolas efectivas. La falta de tecnologías avanzadas para monitorear y optimizar el uso del agua aumenta la vulnerabilidad de los agricultores locales frente a los cambios climáticos y a las demandas del mercado.

El cultivo de aguacate ha pasado de ser manejado de manera tradicional, con métodos rudimentarios que dependían de la experiencia empírica, a requerir prácticas agrícolas más especializadas debido al incremento en las densidades de plantación y a la demanda de frutas de alta calidad. Actualmente, los sistemas de plantación en Colombia tienen densidades que varían desde 204 árboles por hectárea hasta más de 1.000 árboles por hectárea en cultivos modernos. Este cambio ha incrementado los retos en el manejo de recursos hídricos, siendo esencial contar con sistemas que permitan ajustar el riego de forma precisa, basada en las necesidades específicas de cada cultivo.

El agua desempeña un papel fundamental en el proceso de cultivo de aguacate, siendo un recurso crítico para el desarrollo, productividad y calidad del fruto. Desde la etapa inicial de establecimiento del árbol hasta el periodo de cosecha, el manejo hídrico adecuado es esencial para garantizar el éxito del cultivo. En particular, las fases de floración y formación del fruto son altamente sensibles al estrés hídrico, ya que una disponibilidad insuficiente de agua puede resultar en una menor tasa de cuajado, frutos de menor tamaño y calidad reducida. Además, el exceso de agua puede provocar asfixia radicular y la proliferación de enfermedades.

Desde el punto de vista ambiental, el uso ineficiente del agua y la falta de tecnologías adecuadas pueden provocar degradación del suelo, sobreexplotación de recursos y pérdida de biodiversidad. La implementación de un sistema de monitoreo hídrico, que utilice sensores avanzados e inteligencia artificial (IA), no solo optimiza el uso del agua, sino que también ayuda a prevenir estos impactos negativos. Estudios en otras regiones han demostrado que tecnologías como la teledetección, los sensores de humedad del suelo y los sistemas de información geográfica (SIG) pueden mejorar significativamente la eficiencia hídrica, reduciendo costos de producción y aumentando la competitividad agrícola.

Socialmente, la adopción de estas tecnologías puede mejorar las condiciones de vida de los agricultores. Al proporcionar información en tiempo real sobre la humedad del suelo, la temperatura y otros parámetros críticos, los agricultores pueden tomar decisiones informadas para maximizar la productividad y reducir pérdidas. Esto no solo fomenta el desarrollo económico local, sino que también genera empleo técnico, fortaleciendo las capacidades de las comunidades rurales en el Cauca.

A nivel global, el cambio climático plantea desafíos adicionales, como la variabilidad en las precipitaciones y el aumento de las temperaturas. Estas condiciones hacen que sea cada vez más necesario adoptar tecnologías innovadoras que permitan gestionar eficientemente los recursos hídricos y garantizar la sostenibilidad del cultivo de aguacate. Por ejemplo, el uso de inteligencia artificial puede facilitar el desarrollo de estrategias de riego adaptativas, anticipando periodos de sequía y ajustando el suministro de agua según las necesidades del cultivo.

En conclusión, el desarrollo de un sistema de monitoreo hídrico en los cultivos de aguacate Hass en el departamento del Cauca representa una solución integral a los problemas actuales de gestión de recursos y sostenibilidad agrícola. Este proyecto tiene el potencial de posicionar al Cauca como líder en producción sostenible, alineando sus prácticas agrícolas con las demandas globales de sostenibilidad y competitividad. Al abordar tanto los aspectos económicos como los ambientales y sociales, esta iniciativa no solo beneficiará a los agricultores locales, sino que también contribuirá al fortalecimiento de la economía nacional y a la preservación del entorno natural.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo General

Desarrollar un sistema de monitoreo basado en sensores e inteligencia artificial para optimizar la gestión hídrica en los cultivos de aguacate Hass en el departamento del Cauca, asegurando un uso eficiente y sostenible del recurso agua.

4.2 Objetivos Específicos

- Identificar tecnologías avanzadas y accesibles para monitoreo hídrico, incluyendo sensores IoT y sistemas basados en inteligencia artificial, que permitan capturar y procesar datos en tiempo real sobre la humedad del suelo y las condiciones relevantes para el riego en los cultivos de aguacate Hass en el departamento del Cauca.
- Diseñar e implementar una red de sensores para el monitoreo hídrico, optimizada para las características del cultivo de aguacate Hass en el departamento del Cauca, que garantice la conectividad y la recolección precisa de datos para decisiones informadas.
- Desarrollar un sistema inteligente de análisis y recomendaciones de riego, utilizando inteligencia artificial para interpretar los datos recolectados y generar estrategias que optimicen el uso del agua, minimicen el desperdicio y mejoren la sostenibilidad hídrica en el cultivo.
- Evaluar el impacto del sistema de monitoreo hídrico en el consumo de agua y la eficiencia del riego, mediante pruebas piloto en parcelas seleccionadas, analizando indicadores como la reducción del consumo de agua y la aceptación del sistema por parte de los agricultores.
- Capacitar a los agricultores en el uso e interpretación de las tecnologías implementadas, promoviendo la adopción de prácticas de riego eficientes basadas en las recomendaciones del sistema y fomentando la sostenibilidad del cultivo de aguacate Hass en el departamento del Cauca.

5. MARCO DE REFERENCIA

5.1 Estado del Arte

El cultivo de aguacate ha ganado importancia global, especialmente en regiones de clima cálido donde los desafíos hídricos son críticos. En áreas con climas mediterráneos, estudios señalan la necesidad de adaptar el riego para manejar la salinidad y disponibilidad limitada de agua. Kourgialas y Dokou. [1] destacan que el uso de sistemas avanzados de riego y la selección adecuada de patrones de raíz pueden mejorar la sostenibilidad en regiones donde el recurso hídrico es escaso, optimizando la producción de aguacate sin comprometer la calidad del suelo.

Los cultivos comerciales de aguacate requieren de plantas injertadas. La injertación es la única forma de asegurar que el material sembrado, corresponde a una copia o reproducción de un árbol madre que presenta atracción en el mercado o se adapta satisfactoriamente a las condiciones de los sitios donde se establecerá [12]. En el aguacate, la injertación de las plantas se realiza de 12 a 14 semanas luego de la siembra de las semillas de patrón en las bolsas y cuando las plantas tienen aproximadamente 40 cm de altura total, 1 – 1.5 cm de diámetro del tallo y un desarrollo adecuado con hojas maduras. [13].

La agricultura de precisión ha emergido como una solución clave para mejorar la sostenibilidad mediante el uso de datos en tiempo real que optimizan la toma de decisiones. El análisis de Saiz-Rubio y Rovira-Más. [2] señala que el uso de sensores IoT y algoritmos de inteligencia artificial ayuda a maximizar la eficiencia en el uso de agua y otros recursos, reduciendo el impacto ambiental y costos asociados. Estas tecnologías ofrecen ventajas claras en áreas rurales como el departamento del Cauca, donde la disponibilidad hídrica varía y el acceso a tecnología avanzada aún es limitado.

Por su parte, la teledetección y el uso de imágenes satelitales se han posicionado como herramientas poderosas en la agricultura moderna. Sishodia et al. [3] detallan cómo estas tecnologías permiten una planificación precisa del riego al monitorear el estado hídrico del suelo, la vegetación y las condiciones climáticas. Estas técnicas han demostrado ser eficaces en el monitoreo de cultivos de aguacate en diferentes regiones, permitiendo ajustes en el riego en función de las necesidades específicas del cultivo.

En la misma línea, la Agricultura 4.0 incorpora sistemas de apoyo a la decisión para una gestión de recursos eficiente y adaptación al cambio climático. Zhai et al. [4] enfatizan el rol de los sistemas de información avanzados que permiten procesar grandes volúmenes de datos provenientes de estaciones meteorológicas y sensores, lo cual contribuye a mejorar la eficiencia

hídrica y la sostenibilidad en el contexto agrícola. Este tipo de sistema es crucial para afrontar los retos de variabilidad hídrica en el departamento del Cauca.

La adopción de inteligencia artificial (IA) en la agricultura permite optimizar aún más la gestión del agua, especialmente en cultivos sensibles a las condiciones hídricas como el aguacate. Bestelmeyer et al [5] explican cómo las herramientas basadas en IA pueden proporcionar alertas tempranas y mejorar la toma de decisiones en la gestión de recursos naturales, lo cual es especialmente relevante en el contexto de cambio climático que afecta directamente la disponibilidad de agua en el departamento del Cauca.

En California, los productores de aguacate han adoptado tecnologías avanzadas de riego como respuesta a la escasez de agua. El estudio de Reints et al. [6] muestra que la implementación de sistemas de riego por goteo, junto con un monitoreo constante de la salinidad del agua, ha permitido una gestión más eficiente del recurso hídrico, mejorando la sostenibilidad y rentabilidad de los cultivos. Este enfoque podría aplicarse en el departamento del Cauca, donde las condiciones de disponibilidad de agua y calidad varían notablemente.

Para finalizar, el uso de riego por goteo ha mostrado ser una estrategia efectiva para optimizar el agua y mejorar la productividad agrícola en zonas con escasez hídrica. Zhang et al. [7] encontraron que el riego por goteo minimiza el desperdicio de agua, reduce la lixiviación de nutrientes y permite mantener altos niveles de rendimiento en los cultivos. La adopción de esta tecnología en el departamento del Cauca podría ser clave para enfrentar las condiciones de agua limitadas y mejorar la sostenibilidad del cultivo de aguacate.

Este Estado del Arte establece una base para entender cómo las tecnologías de monitoreo y riego pueden ser adoptadas en el cultivo de aguacate Hass en el departamento del Cauca, optimizando la gestión del agua y promoviendo prácticas agrícolas sostenibles.

5.2 Marco Contextual:

El departamento del Cauca se caracteriza por su diversidad geográfica y climática, lo que le permite ser una región apta para el cultivo de aguacate, en especial de la variedad Hass. Esta actividad agrícola se ha consolidado como un sector económico relevante para la región, dado su potencial en mercados nacionales e internacionales. Sin embargo, la producción enfrenta desafíos particulares, especialmente en lo que respecta a la disponibilidad y gestión del agua, debido a la variabilidad en la oferta hídrica y los efectos del cambio climático.

El uso de agua en la agricultura representa un factor crucial en la sostenibilidad de los cultivos. La topografía del departamento, que incluye valles, montañas y planicies, condiciona la distribución de los recursos hídricos, haciendo que el acceso al agua para riego sea inestable en algunas zonas. Este problema se ve acentuado en temporadas secas, en las que los agricultores deben enfrentar restricciones en el suministro de agua. Las prácticas tradicionales de riego en el cultivo de aguacate, en muchos casos, no permiten optimizar el uso del recurso, lo que genera desperdicios y afecta la productividad.

En este contexto, la introducción de tecnologías de monitoreo de humedad del suelo, sensores IoT, y sistemas de riego por goteo han demostrado ser soluciones efectivas para mejorar la eficiencia hídrica. Sin embargo, la adopción de estas tecnologías en el departamento del Cauca ha sido limitada, principalmente por razones económicas y de capacitación técnica. Muchos pequeños y medianos agricultores de la región carecen de los recursos financieros y el conocimiento necesarios para implementar estos sistemas, lo que limita la modernización del sector y afecta la competitividad de sus productos en mercados que demandan prácticas agrícolas sostenibles.

La sostenibilidad ambiental es también una preocupación creciente en la región. La aplicación de sistemas de información geográfica (SIG) y tecnologías de teledetección puede facilitar la planificación del riego y la gestión hídrica en el contexto de variabilidad climática que afecta al departamento. Estas herramientas permitirían a los agricultores tomar decisiones informadas, reduciendo el impacto ambiental de la actividad agrícola mediante un uso más racional del agua y una menor dependencia de prácticas intensivas en recursos. Sin embargo, al igual que en el caso de las tecnologías de riego, la aplicación de estas herramientas enfrenta barreras asociadas al desconocimiento y la falta de inversión en infraestructura tecnológica.

En conclusión, el contexto regional del departamento del Cauca plantea un reto importante en cuanto a la gestión hídrica para el cultivo de aguacate Hass. La necesidad de implementar tecnologías avanzadas para optimizar el uso del agua en el sector agrícola resulta fundamental para garantizar la sostenibilidad económica y ambiental de la actividad en la región. La adopción de tecnologías de monitoreo y sistemas de riego eficientes no sólo permitiría mejorar la productividad y rentabilidad de los cultivos, sino también contribuiría a un uso más consciente de los recursos naturales, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que promueven una agricultura sostenible y responsable.

5.3 Marco Teórico:

La tecnología del Internet de las Cosas (IoT) ha revolucionado la agricultura, permitiendo la integración de sensores que monitorean variables ambientales en tiempo real. En el contexto agrícola, el IoT facilita la captura de datos sobre el suelo y el clima, lo cual es fundamental para la toma de decisiones informadas en cultivos como el aguacate. La implementación de redes de sensores en el campo permite monitorear variables como la humedad del suelo, la temperatura y la radiación solar, datos que son procesados en tiempo real para optimizar la gestión del agua en los cultivos [3].

En particular, la tecnología IoT proporciona una infraestructura de comunicación continua que permite la integración con sistemas de inteligencia artificial y sistemas de información geográfica (SIG), creando un entorno de agricultura de precisión que responde a las condiciones cambiantes de los cultivos en tiempo real [4]. Estos sensores también permiten reducir el desperdicio de agua al ajustar los sistemas de riego en función de las necesidades hídricas de cada planta, promoviendo así un uso más sostenible de los recursos en áreas como el departamento del Cauca, donde la disponibilidad de agua es variable.

La inteligencia artificial ha abierto nuevas oportunidades en la agricultura de precisión al permitir la implementación de algoritmos de aprendizaje automático que analizan grandes volúmenes de datos. En el cultivo de aguacate, la IA puede procesar información histórica y en tiempo real para predecir las necesidades hídricas y optimizar el riego [2]. La capacidad de la IA para procesar datos climáticos, edáficos y de crecimiento permite personalizar las estrategias de riego, generando recomendaciones específicas que se adaptan a las condiciones particulares de cada parcela de cultivo.

En regiones afectadas por variaciones climáticas, como el departamento del Cauca, la IA ofrece la posibilidad de mitigar los efectos de la escasez de agua al ajustar las estrategias de riego de manera anticipada. La adopción de IA en sistemas de riego permite reducir el consumo de agua y mejorar la eficiencia en el uso de recursos, contribuyendo a la sostenibilidad del cultivo a largo plazo [5].

En Colombia se ha reportado el hongo *Phytophthora cinnamomi* Rands, como el causante de pérdidas en viveros del 30-50% de los árboles y durante los dos primeros años de establecimiento del cultivo. Sumado a esto otras enfermedades como *Verticillium* sp. Nees, *Armillaria mellea* Kumm, *Rosellinia* sp De Not, entre otras, se reportan como presentes en los cultivos de aguacate en Colombia [14]. Estas enfermedades siempre se encuentran ligadas a condiciones de alta humedad del suelo, y en todos los casos presentan síntomas similares de expresión, con un decaimiento generalizado, estancamiento de desarrollo, marchitez, pérdida de vigor,

amarillamiento, pérdida de color y brillo de las hojas y finalmente en estados avanzados, muerte de los árboles [13].

La teledetección, junto con los Sistemas de Información Geográfica (SIG), ha mejorado significativamente la capacidad de los agricultores para gestionar sus cultivos de manera precisa y eficiente. La teledetección emplea imágenes satelitales y drones para captar información detallada sobre el estado de los cultivos, como la salud de las plantas, la disponibilidad de agua en el suelo y la eficiencia del riego [3]. Estas tecnologías permiten a los agricultores monitorear extensas áreas de cultivo sin necesidad de visitas físicas, lo cual es particularmente útil en zonas de difícil acceso o con grandes superficies.

Los SIG permiten el análisis y la visualización de datos espaciales, lo cual facilita la planificación de estrategias de riego más precisas y ajustadas a las necesidades de cada sector del cultivo [4]. En el contexto del departamento del Cauca, los SIG pueden integrarse con la teledetección para proporcionar una visión completa de los patrones de humedad y las necesidades hídricas del suelo, optimizando así la eficiencia del riego y la sostenibilidad de los cultivos de aguacate Hass en la región.

El riego de precisión es una práctica agrícola que maximiza la eficiencia del agua al aplicar cantidades específicas en áreas precisas, minimizando el desperdicio. En el cultivo de aguacate, el riego de precisión es esencial para mantener la productividad en zonas con recursos hídricos limitados, como el departamento del Cauca [6]. Las técnicas de riego de precisión, como el riego por goteo, han demostrado ser eficaces en la reducción del consumo de agua, ya que suministran agua directamente a las raíces, reduciendo la evaporación y aumentando la absorción de nutrientes [7].

El riego de precisión, complementado con sensores y sistemas de monitoreo, permite realizar ajustes en tiempo real, adaptándose a las necesidades de cada planta y contribuyendo a la sostenibilidad de los cultivos. Además, reduce los costos operativos al disminuir la cantidad de agua utilizada y la necesidad de fertilizantes, promoviendo así un modelo de agricultura más respetuoso con el medio ambiente [10].

El cambio climático ha intensificado los desafíos para la agricultura, especialmente en cuanto a la disponibilidad de agua para el riego. Las temperaturas en aumento y la irregularidad en las precipitaciones han exacerbado la escasez hídrica en muchas regiones, incluyendo el departamento del Cauca. Esta situación requiere la adopción de estrategias avanzadas de gestión hídrica para asegurar la sostenibilidad del cultivo de aguacate en el largo plazo [6].

Las tecnologías de IoT y la inteligencia artificial permiten adaptarse a estos desafíos, al ofrecer predicciones precisas sobre las necesidades de riego en función de los patrones climáticos actuales y futuros. Esta capacidad de adaptación es fundamental para mitigar los efectos del cambio climático en el cultivo de aguacate Hass, permitiendo una planificación anticipada que optimice el uso del agua y minimice el impacto ambiental [2].

5.4 Marco Conceptual

En el desarrollo de este proyecto, varios conceptos fundamentales permiten entender y contextualizar la implementación de un sistema de monitoreo para la optimización hídrica en cultivos de aguacate Hass en el departamento del Cauca. Estos conceptos ayudan a definir los elementos técnicos y las tecnologías avanzadas en agricultura, como el Internet de las Cosas (IoT), la inteligencia artificial (IA) y los sistemas de agricultura de precisión.

El Internet de las Cosas (IoT) se refiere a la interconexión de dispositivos inteligentes y sensores que recopilan y transmiten datos en tiempo real, permitiendo un monitoreo constante y detallado de diversas variables agrícolas. En el contexto de este proyecto, el IoT es esencial para capturar información relevante, como la humedad del suelo y las condiciones ambientales, facilitando una toma de decisiones más informada y precisa en la gestión hídrica de los cultivos. Esta tecnología se convierte en el pilar de la agricultura de precisión al permitir una gestión de datos integral que optimiza los recursos y reduce el impacto ambiental [3].

Por otro lado, la inteligencia artificial (IA) desempeña un rol crucial en la interpretación de los datos generados por los sensores de IoT. A través de algoritmos y técnicas de aprendizaje automático, la IA procesa grandes volúmenes de información, lo cual permite predecir las necesidades hídricas del cultivo de aguacate en función de factores como el clima y el estado del suelo. Estas predicciones ayudan a ajustar el riego en tiempo real, optimizando así el uso del agua y mejorando la sostenibilidad de los recursos naturales.

El concepto de sensores de humedad y teledetección se enfoca en los dispositivos utilizados para monitorear las condiciones de los cultivos. Los sensores de humedad proporcionan datos detallados sobre el estado hídrico del suelo, mientras que la tecnología de teledetección, que incluye drones y satélites, permite captar imágenes en alta resolución de las áreas de cultivo. Estos datos ayudan a los agricultores a ajustar las prácticas de riego de manera precisa y adaptativa, maximizando los rendimientos y reduciendo costos [2].

Riego por gravedad, este sistema es adecuado para el riego del cultivo de aguacate, sin embargo, para su adopción se debe hacer un cálculo preciso de las pérdidas por percolación y evaporación del agua. Además de esto se debe tener mucho cuidado de no hacer movimiento de tierras muy

fuertes en los suelos, para no predisponer el cultivo a problemas de asfixia radicular o dañar las raíces al hacer las canales de riego [12].

Tuberías a presión (riego por aspersión sub-arbóreo), dependiendo de la zona este tipo de riego se podría utilizar, pero las pérdidas por evaporación y el riesgo de desarrollo de problemas sanitarios por exceso de humedad en la canopia, lo podrían hacer ineficiente y perjudicial [12].

Tubería a presión (microaspersión), en el caso de requerirse un riego por periodos largos de tiempo, este es el mejor método de riego, ya que permite una dispersión del agua bajo la copa del árbol libre de pérdidas altas por evaporación y una distribución más uniforme en la zona de raíces si están bien ubicadas. Su costo es alto por lo que se debe hacer un análisis técnico y económico profundo en cada caso o huerto específico [12].

Tubería a presión (goteo), este tipo de riego es válido para los primeros meses de edad del cultivo mientras los árboles no presentan una copa muy amplia, sin embargo, a medida que el cultivo se va desarrollando se vuelve ineficiente y antieconómico por el corto cubrimiento de los emisores y por el alto número que se llegaría a necesitar en caso de querer cubrir toda la zona de raíces [12].

Asimismo, el proyecto se enmarca dentro de la agricultura de precisión, un enfoque que permite gestionar los cultivos basándose en información específica y en tiempo real. Esta estrategia no solo contribuye a optimizar el uso del agua y mejorar la productividad, sino que también permite reducir el desperdicio de insumos agrícolas, promoviendo una producción más eficiente y sostenible [4]. Finalmente, el concepto de riego de precisión destaca la importancia de ajustar el riego en función de las necesidades exactas de la planta y del suelo, lo cual, en el caso del cultivo de aguacate Hass en el departamento del Cauca, resulta crucial para enfrentar los desafíos de la disponibilidad hídrica.

5.5 Marco Normativo

El Marco Normativo de este proyecto abarca las regulaciones y normativas relevantes para la implementación de tecnologías avanzadas en el sector agrícola, especialmente en la gestión sostenible del agua. Estas regulaciones aseguran que el proyecto se desarrolle en conformidad con las leyes ambientales y de recursos naturales de Colombia, protegiendo tanto el entorno como a las comunidades involucradas.

En primer lugar, las normativas sobre el uso sostenible del agua en la agricultura establecen lineamientos para asegurar un uso eficiente de este recurso en los sectores con altos niveles de consumo, como el cultivo de aguacate. Colombia cuenta con políticas que promueven prácticas responsables en la gestión hídrica, buscando mitigar el impacto ambiental y reducir el consumo de

agua en el sector agrícola, lo cual es especialmente relevante en el contexto del departamento del Cauca.

Asimismo, la legislación nacional regula el uso de tecnologías de monitoreo, como los sensores IoT y los sistemas de información geográfica (SIG), para proteger la privacidad y seguridad de los datos. Estas regulaciones son esenciales en proyectos que involucran la recopilación y el procesamiento de información ambiental, garantizando que las tecnologías empleadas cumplan con los estándares legales y éticos en cuanto a protección de datos y uso responsable de los recursos tecnológicos.

El marco normativo también incluye políticas de agricultura sostenible que incentivan el uso de prácticas agrícolas amigables con el medio ambiente. Estas políticas no solo buscan reducir el impacto ambiental de la actividad agrícola, sino también promover el desarrollo de proyectos que implementen tecnologías sostenibles como los sistemas de riego de precisión. Además, se encuentran las normativas que regulan el uso de drones y teledetección en el ámbito agrícola, las cuales son fundamentales para el proyecto ya que aseguran que el monitoreo remoto cumpla con los estándares de seguridad y respeto al medio ambiente.

Se estima que entre 8.000 y 12.000 toneladas anuales de aguacate Hass fresco, es el potencial de exportación que tiene Colombia, el trámite para la actualización e inscripción de los predios se debe realizar en la oficina del ICA más cercana al predio. El área sembrada de aguacate Hass en los principales departamentos productores es de aproximadamente 14.084 hectáreas, el Plan Operativo de Trabajo, POT, es el documento que define los deberes y responsabilidades de cada participante y en él se explican claramente las acciones de mitigación de plagas, necesarias para asegurar la integridad fitosanitaria [12].

Dentro de los requisitos para exportación de aguacate Hass desde Colombia, existen varias certificaciones que pueden ser necesarias. Estas incluyen certificaciones orgánicas, de buenas prácticas agrícolas (BPA), y otras relacionadas con la sostenibilidad y el comercio justo. Cada una de estas certificaciones tiene sus propios criterios y procesos de evaluación, y pueden variar según el mercado de destino [15].

Finalmente, el proyecto también debe alinearse con regulaciones que fomenten la educación y capacitación de los agricultores en el uso de nuevas tecnologías. La colaboración entre instituciones académicas y organizaciones agrícolas es esencial para que los agricultores del departamento del Cauca puedan adoptar e implementar eficazmente las innovaciones tecnológicas, asegurando el éxito y sostenibilidad a largo plazo de este proyecto.

6. METODOLOGÍA

Tipo de estudio:

El presente estudio se desarrollará bajo un enfoque mixto, combinando técnicas cualitativas y cuantitativas para obtener una comprensión integral del problema y evaluar la efectividad de la solución propuesta. La metodología está estructurada en cuatro fases clave, incorporando elementos adicionales como el análisis situacional, diseño, implementación y evaluación, asegurando una cobertura completa del proceso.

6.1 Fase 1: Análisis Situacional y Recopilación de Datos

- **Identificación del contexto:** Realizar un diagnóstico de las condiciones actuales en los cultivos de aguacate Hass del departamento del Cauca, enfocándose en las prácticas de riego, disponibilidad hídrica y limitaciones tecnológicas. Se utilizarán entrevistas, encuestas y visitas de campo para obtener información detallada.
- **Revisión bibliográfica:** Analizar investigaciones, artículos científicos y casos de éxito en el uso de tecnologías como sensores IoT, inteligencia artificial y herramientas de monitoreo hídrico aplicadas a cultivos agrícolas.
- **Mapeo de necesidades:** Identificar las principales limitaciones de los agricultores en términos de acceso a tecnologías y conocimiento sobre prácticas de gestión hídrica.
- **Priorización de soluciones:** Clasificar las tecnologías según su viabilidad técnica, económica y adaptabilidad al contexto agroclimático del departamento del Cauca.

6.2 Fase 2: Diseño y Desarrollo del Sistema de Monitoreo

- Diseño del sistema: Crear un plan detallado para la instalación de sensores IoT (como sensores de humedad del suelo) y una red de comunicación eficiente. Se considerará la topografía, tamaño de las parcelas y accesibilidad en las zonas rurales del departamento del Cauca.
- Desarrollo del modelo tecnológico: Integrar las tecnologías seleccionadas en un sistema que recoja datos en tiempo real y los procese mediante algoritmos de inteligencia artificial para generar recomendaciones precisas de riego.
- Validación inicial: Construir un prototipo funcional y realizar pruebas en laboratorio para asegurar la precisión y confiabilidad del sistema.

6.3 Fase 3: Implementación y Pruebas en Campo

- Instalación en parcelas piloto: Implementar el sistema de monitoreo en cultivos seleccionados, asegurando su integración con las prácticas agrícolas existentes.
- Pruebas de funcionalidad: Evaluar el desempeño del sistema en condiciones reales, verificando la precisión de los datos recolectados y la utilidad de las recomendaciones generadas.
- Capacitación de agricultores: Entrenar a los agricultores participantes en el uso del sistema, enfatizando la interpretación de los datos y su aplicación en estrategias de riego.

6.4 Fase 4: Evaluación y Optimización del Sistema

- Recopilación de datos: Medir indicadores clave como la reducción en el consumo de agua, mejoras en la eficiencia hídrica y la percepción de los agricultores sobre el sistema.
- Análisis de resultados: Comparar los resultados obtenidos con los datos iniciales para determinar la efectividad del sistema y las áreas que requieren ajustes.
- Optimización del sistema: Incorporar mejoras basadas en los hallazgos de la evaluación y retroalimentación de los agricultores.
- Propuesta de escalabilidad: Generar un plan para la adopción del sistema en otras zonas agrícolas del departamento del Cauca, considerando aspectos económicos, sociales y técnicos.

6.4 Fase 5: Conclusiones y Recomendaciones

- Documentación de hallazgos: Elaborar un informe final que resuma los resultados, las lecciones aprendidas y las recomendaciones para mejorar la gestión hídrica en el cultivo de aguacate Hass en el departamento del Cauca.
- Propuesta de políticas: Presentar sugerencias a entidades gubernamentales y organizaciones agrícolas sobre estrategias para fomentar la adopción de tecnologías avanzadas en el sector agrícola del departamento del Cauca.

Materiales y Arquitectura

1. Capa de Aplicaciones:

- Aplicación Móvil (Flutter).
- Panel Web (VueJs, Django).

2. Capa de Apoyo y Servicios:

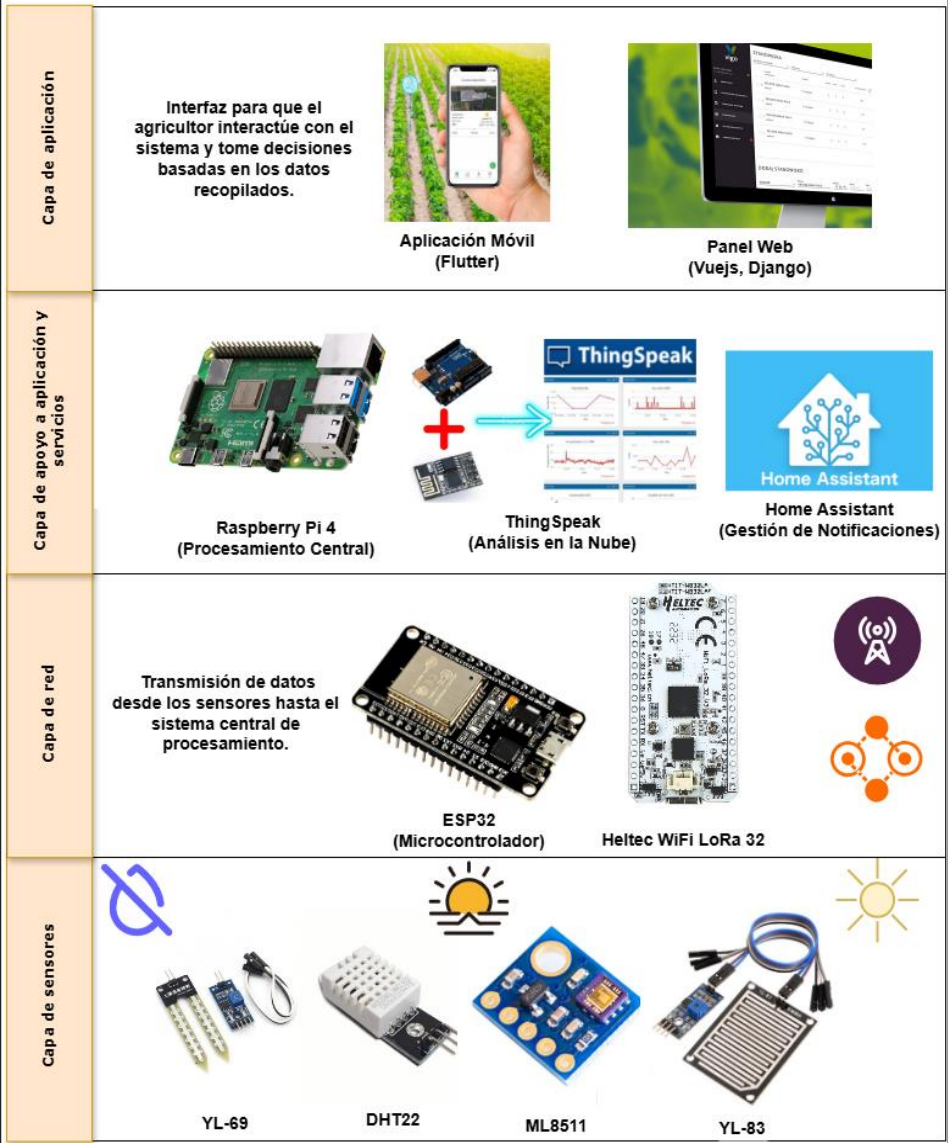
- Raspberry Pi 4.
- ThingSpeak.
- Home Assistant.

3. Capa de Red:

- Microcontrolador ESP32.
- Heltec WiFi LoRa 32.

4. Capa de Sensores:

- Sensor YL-69.
- Sensor DHT22.
- Sensor ML8511.
- Sensor YL-83.



Capa de Sensores

1. **Sensor YL-69 (Sensor de Humedad del Suelo):** Es un dispositivo diseñado para medir la humedad en el suelo, proporcionando datos esenciales para determinar la necesidad de riego en los cultivos. Este sensor emite una señal eléctrica basada en la resistencia del suelo, que varía según la cantidad de agua presente. Su función principal es optimizar el uso del agua en el riego, evitando desperdicios y garantizando que las plantas reciban la cantidad necesaria de hidratación.
2. **Sensor DHT22 (Sensor de Temperatura y Humedad):** Es un sensor digital que mide la temperatura y la humedad ambiental con alta precisión. Es ideal para monitorear las condiciones climáticas alrededor de los cultivos, ayudando a ajustar estrategias de riego y prevenir condiciones de estrés hídrico. Su facilidad de uso y bajo consumo energético lo convierten en una herramienta valiosa en sistemas agrícolas inteligentes.
3. **Sensor ML8511 (Sensor de Radiación Solar):** Este sensor mide la intensidad de la luz ultravioleta, un dato crucial para calcular la evapotranspiración de las plantas. Los valores obtenidos permiten ajustar las estrategias de riego en función de la exposición solar, asegurando un uso más eficiente del agua y una mejor salud de los cultivos.
4. **Sensor YL-83 (Sensor de Lluvia):** Detecta la presencia de lluvia mediante la medición de la conductividad eléctrica en su superficie. En el sistema, se utiliza para evitar el riego automático durante o después de lluvias, asegurando que no haya desperdicio de agua y que las condiciones del suelo sean óptimas.

Capa de Red

1. **Microcontrolador ESP32:** Es un microcontrolador versátil y de bajo consumo que integra conectividad Wi-Fi y Bluetooth. En este proyecto, actúa como el cerebro local que recopila datos de los sensores y los transmite al Gateway mediante LoRa. Su capacidad de procesamiento y conectividad lo hace ideal para entornos donde se requiere comunicación eficiente y rápida entre dispositivos.
2. **Heltec WiFi LoRa 32 (Gateway LoRa):** Este dispositivo es un gateway que combina la conectividad LoRa y Wi-Fi, permitiendo la transmisión de datos desde los sensores hacia la Raspberry Pi 4. Su tecnología LoRa permite cubrir grandes distancias con bajo consumo de energía, lo que lo hace ideal para terrenos agrícolas amplios como los del Cauca.

Capa de Apoyo y Servicios

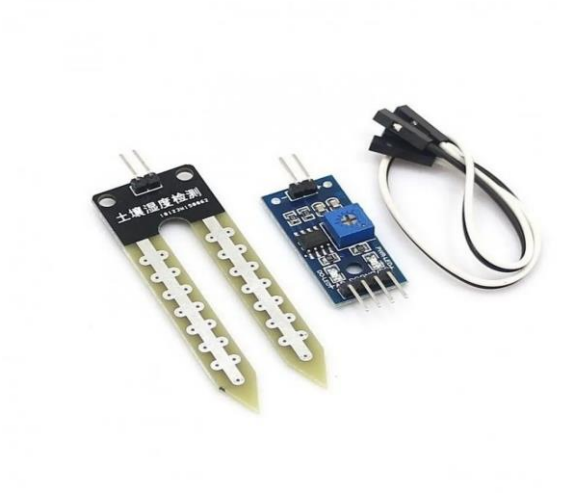
1. **Raspberry Pi 4:** Este miniordenador se utiliza como centro de procesamiento central del sistema. Recibe los datos del Gateway LoRa, ejecuta scripts de análisis en Python, y los envía a plataformas como ThingSpeak para análisis más avanzados. Su flexibilidad y capacidad de procesamiento permiten integrar múltiples sistemas y gestionar grandes volúmenes de datos de forma eficiente.
2. **ThingSpeak (Servicio en la Nube):** Es una plataforma IoT que almacena y analiza los datos recopilados por los sensores. Proporciona herramientas para la visualización en tiempo real y la generación de gráficos históricos, lo que facilita la identificación de tendencias y la toma de decisiones basadas en datos.
3. **Home Assistant:** Este sistema de automatización permite la gestión de notificaciones y alertas. En el proyecto, Home Assistant notifica al agricultor sobre condiciones críticas en tiempo real, como niveles bajos de humedad o condiciones climáticas adversas, mejorando la capacidad de respuesta y la eficiencia en el manejo del cultivo.

Capa de Aplicaciones

1. **Aplicación Móvil (Flutter):** Una aplicación móvil desarrollada con Flutter ofrece al agricultor acceso en tiempo real a los datos de los sensores y recomendaciones basadas en análisis. Es una herramienta intuitiva que permite a los usuarios monitorear sus cultivos desde cualquier lugar y tomar decisiones informadas sobre el riego.
2. **Panel Web (VueJs, Django):** Este panel web combina una interfaz visual desarrollada con VueJs y una lógica de backend en Django. Permite a los agricultores y técnicos visualizar gráficos históricos, configurar parámetros del sistema, y realizar análisis detallados desde cualquier navegador web, proporcionando una visión completa del estado del cultivo.

Listado de figuras

Figura 1



Sensor de humedad del suelo (YL-69)

Fuente. Google

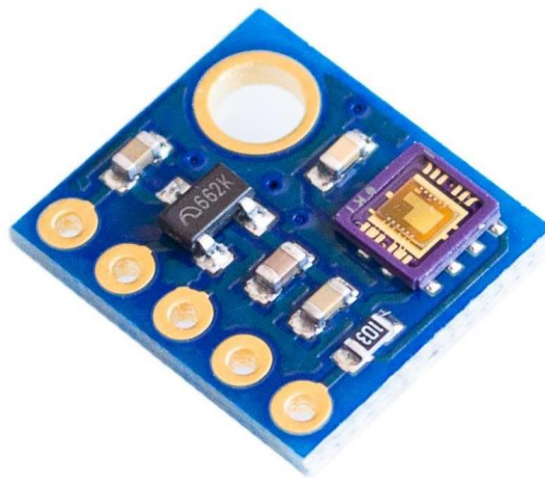
Figura 2



Sensor de temperatura y humedad (DHT22)

Fuente. Google

Figura 3



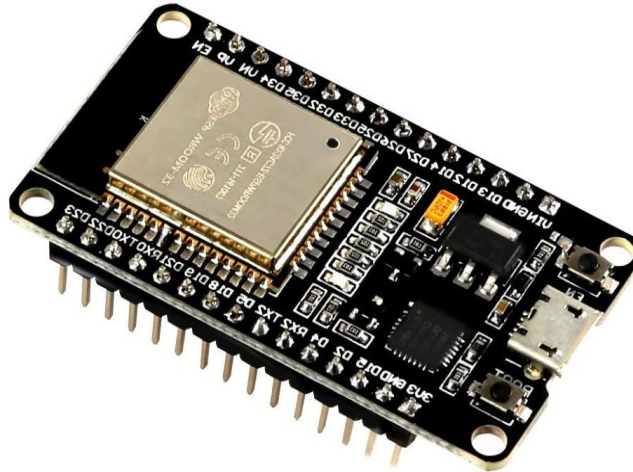
Sensor de radiación solar (ML8511)
Fuente. Google

Figura 4



Sensor de lluvia (YL-83)
Fuente. Google

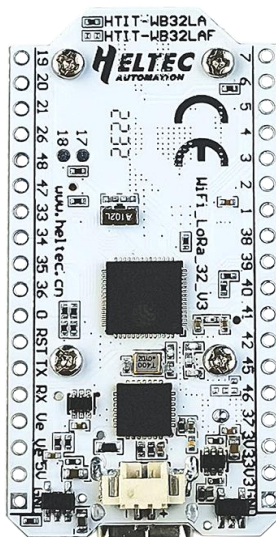
Figura 5



ESP32

Fuente. Google

Figura 6



Heltec WiFi Lora 32

Fuente. Google

Figura 7



Raspberry Pi 4
Fuente. Google

Figura 8



ThingSpeak
Fuente. Google

Figura 9



Home Assistant

Fuente. Google

Figura 10



Flutter

Flutter

Fuente. Google

Figura 11



VueJs

Fuente. Google

Figura 12



Django

Fuente. Google

Figura 13

Tabla 2	Raza	Antillana
	Tipo de flor	A
	Adaptación (msnm)	1.200 - 1.300
	Peso (g)	285 g
	Producción potencial	32,5 ton/ha
	Color corteza	Rojo amarillo oscuro
	Grasa (%)	1/8
	Pulpa (%)	69,92
	Fibra (%)	7,23

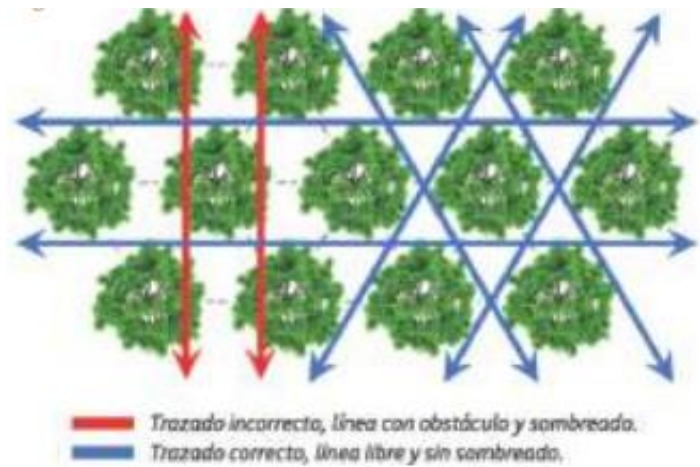
Caracterización Aguacate Hass
Manual tecnológico Asohofrucol

Figura 14

Fase	No. de días	Promedio	Acumulado días
Siembra a germinación	20-35	25	25
Desarrollo del patrón de injertación	60-80	70	95
Injertación a levante de cubierta	20-35	25	120
Desarrollo de la copa injertada	40-60	50	170
Adaptación condiciones del huerto	10-15	10	180
Tiempo total fase de vivero			180 días

Tiempo total fase vivero
Manual tecnológico Asohofrucol

Figura 15



Trazado de lotes para siembra
Manual tecnológico Asohofrucol

Figura 16

Distancia	No. de árboles al cuadro	No. de árboles al Tresbolillo
5m x 5m	400	464
6m x 6m	278	322
7m x 6m	238	276
7m x 7m	204	237
7m x 7m	178	207
8m x 8m	156	181

Distancia de siembras
Manual tecnológico Asohofrucol



Desarrollo de un Sistema de Monitoreo con Sensores e Inteligencia Artificial para la Optimización Hídrica en los Cultivos de Aguacate Hass en el Departamento del Cauca



7. RESULTADOS

Se diseñó una simulación con datos generados artificialmente para representar el monitoreo en cultivos de aguacate. El dataset simulado incluyó información proveniente de cuatro sensores y un sistema de recomendación de riego basado en condiciones ambientales. Cada registro del dataset contiene:

Humedad del Suelo (Sensor YL-69): Medida en porcentaje (%) que indica la cantidad de agua presente en el suelo.

Temperatura (Sensor DHT22): Medida en grados Celsius (°C), relevante para evaluar el estrés térmico en los cultivos.

Radiación Solar (Sensor ML8511): Medida en vatios por metro cuadrado (W/m^2), representa la energía solar incidente en la superficie del cultivo.

Presencia de Lluvia (Sensor YL-83): Valor binario (1: lluvia, 0: no lluvia) que registra si hubo precipitación.

Recomendación de Riego: Variable objetivo calculada en función de los otros sensores. Si la humedad del suelo es baja o la radiación solar es alta sin lluvia reciente, se recomienda riego (1). En otros casos, no se recomienda riego (0).

Desarrollo de un Sistema de Monitoreo con Sensores e Inteligencia Artificial para la Optimización Hídrica en los Cultivos de Aguacate Hass en el Departamento del Cauca

	Humedad_Suelo	Temperatura	Radiacion_Solar	Presencia_Uluvia	Recomendacion_Riego
1	39.963	16.034	368.935	0	0
2	86.057	25.627	478.59	0	0
3	68.56	25.813	377.01	0	0
4	57.893	27.749	288.703	0	0
5	22.481	29.522	320.636	0	1
6	22.48	34.517	660.779	1	0
7	14.647	25.326	406.334	1	0
8	79.294	21.459	564.27	0	0
9	58.089	30.904	703.417	0	0
10	66.646	20.417	890.395	0	0
11	11.647	23.779	239.312	0	1
12	87.593	16.569	999.41	0	0
13	76.595	15.507	827.9	0	0
14	26.987	34.253	281.759	0	1
15	24.546	31.72	1073.579	0	1
16	24.672	28.919	1120.872	0	1
17	34.339	23.179	261.078	0	0
18	51.981	18.466	476.878	1	0
19	44.556	18.129	1006.201	1	1

Tabla No.1

20	33.298	20.005	948.26	0	1
21	58.948	25.985	384.521	1	0
22	21.16	29.292	409.349	0	1
23	33.372	28.204	570.472	1	0
24	39.309	20.599	684.523	1	0
25	46.486	34.097	818.255	0	0
26	72.814	29.758	568.914	0	0
27	25.974	26.087	662.535	0	1
28	51.139	27.234	947.471	0	1
29	57.393	23.392	236.683	0	0
30	13.716	19.955	452.437	0	1
31	58.604	22.119	913.35	0	1
32	23.642	30.157	1095.207	1	0
33	15.204	15.288	711.677	1	0
34	85.911	17.321	732.113	0	0
35	87.251	15.92	307.172	0	0
36	74.672	15.815	647.412	0	0
37	34.369	32.109	732.617	0	0
38	17.814	29.073	442.471	1	0

Tabla No.2

Creación del Dataset: Se generaron 300 registros con valores aleatorios dentro de rangos realistas para cada sensor.

Imágenes del dataset muestran la distribución y la relación entre las variables.

```
[2] # Importar librerías necesarias
import pandas as pd

# Cargar el dataset desde tu directorio en Colab
from google.colab import files

# Subir el archivo CSV
uploaded = files.upload()

# Leer el archivo CSV
dataset = pd.read_csv(next(iter(uploaded.keys())))

# Mostrar las primeras filas del dataset
print("Primeras filas del dataset:")
print(dataset.head())

# Información general del dataset
print("\nInformación general del dataset:")
print(dataset.info())

# Resumen estadístico
print("\nResumen estadístico del dataset:")
print(dataset.describe())
```

Tabla No.3

simulated-sensor.csv

simulated-sensor.csv(text/csv) - 7844 bytes, last modified: 11/28/2024 - 100% done

Saving simulated-sensor.csv to simulated-sensor.csv

Primeras filas del dataset:

	Humedad_Suelo	Temperatura	Radiacion_Solar	Presencia_Lluvia	
0	39.963	16.034	368.935	0	
1	86.057	25.627	478.590	0	
2	68.560	25.813	377.010	0	
3	57.893	27.749	288.703	0	
4	22.481	29.522	320.636	0	

Recomendacion_Riego

0	0
1	0
2	0
3	0
4	1

Información general del dataset:

<class 'pandas.core.frame.DataFrame'>

RangeIndex: 300 entries, 0 to 299

Data columns (total 5 columns):

#	column	Non-Null Count	Dtype
0	Humedad_Suelo	300 non-null	float64
1	Temperatura	300 non-null	float64
2	Radiacion_Solar	300 non-null	float64
3	Presencia_Lluvia	300 non-null	int64
4	Recomendacion_Riego	300 non-null	int64

dtypes: float64(3), int64(2)

memory usage: 11.8 KB

None

Resumen estadístico del dataset:

	Humedad_Suelo	Temperatura	Radiacion_Solar	Presencia_Lluvia	
count	300.000000	300.000000	300.000000	300.000000	
mean	49.616367	25.216593	671.088923	0.326667	
std	23.547235	6.051809	283.427442	0.469778	
min	10.405000	15.217000	204.632000	0.000000	
25%	29.126500	19.992500	409.769750	0.000000	
50%	50.937000	25.434000	652.864500	0.000000	
75%	70.548750	30.466500	916.988250	1.000000	
max	89.204000	34.994000	1196.874000	1.000000	

Recomendacion_Riego

count	300.000000
mean	0.280000
std	0.449749
min	0.000000
25%	0.000000
50%	0.000000
75%	1.000000
max	1.000000

Tabla 4

Preprocesamiento: Se dividieron los datos en conjuntos de entrenamiento (80%) y prueba (20%) para garantizar un modelo balanceado.

Entrenamiento del Modelo: Se probaron tres algoritmos de clasificación:

Regresión Logística: Precisión de 85%.

Bosques Aleatorios: Precisión perfecta (100%).

Máquina de Soporte Vectorial (SVM): Precisión de 71.7%.

[3] from sklearn.model_selection import train_test_split

Dividir en variables predictoras (X) y objetivo (y)

X = dataset.drop("Recomendacion_Riego", axis=1) # Variables predictoras

y = dataset["Recomendacion_Riego"] # Variable objetivo

Dividir el dataset en conjuntos de entrenamiento (80%) y prueba (20%)

X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42, stratify=y)

Mostrar las dimensiones de los conjuntos

print("Dimensiones del conjunto de entrenamiento (X_train, y_train):", X_train.shape, y_train.shape)

print("Dimensiones del conjunto de prueba (X_test, y_test):", X_test.shape, y_test.shape)

Dimensiones del conjunto de entrenamiento (X_train, y_train): (240, 4) (240,)

Dimensiones del conjunto de prueba (X_test, y_test): (60, 4) (60,)

Tabla 5

```
[4] from sklearn.linear_model import LogisticRegression
from sklearn.ensemble import RandomForestClassifier
from sklearn.svm import SVC
from sklearn.metrics import accuracy_score

# Crear y entrenar un modelo de Logistic Regression
logistic_model = LogisticRegression(random_state=42)
logistic_model.fit(X_train, y_train)
logistic_pred = logistic_model.predict(X_test)

# Crear y entrenar un modelo de Random Forest
random_forest_model = RandomForestClassifier(random_state=42)
random_forest_model.fit(X_train, y_train)
rf_pred = random_forest_model.predict(X_test)

# Crear y entrenar un modelo de SVM
svm_model = SVC(random_state=42)
svm_model.fit(X_train, y_train)
svm_pred = svm_model.predict(X_test)

# Evaluar los modelos
logistic_acc = accuracy_score(y_test, logistic_pred)
rf_acc = accuracy_score(y_test, rf_pred)
svm_acc = accuracy_score(y_test, svm_pred)

print(f"Precisión de Logistic Regression: {logistic_acc:.3f}")
print(f"Precisión de Random Forest: {rf_acc:.3f}")
print(f"Precisión de SVM: {svm_acc:.3f}")
```

Precisión de Logistic Regression: 0.850
Precisión de Random Forest: 1.000
Precisión de SVM: 0.717

Tabla No.6

La gráfica de barras muestra la importancia de cada característica en las predicciones del modelo Random Forest.

Humedad del Suelo: Principal característica para determinar si se debe regar, ya que un nivel bajo de humedad es el principal indicador de necesidad de riego.

Radiación Solar: Tiene un impacto significativo, especialmente cuando la humedad está en niveles moderados y la radiación es alta.

Temperatura: Contribuye al modelo, pero su importancia es menor en comparación con la humedad y la radiación.

Presencia de Lluvia: Aporta información, pero tiene el menor impacto, dado que las condiciones de humedad y radiación suelen ser suficientes para decidir.

```
from sklearn.metrics import confusion_matrix, classification_report
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns

# Importancia de las características
importances = random_forest_model.feature_importances_
features = X.columns
plt.figure(figsize=(8, 6))
sns.barplot(x=importances, y=features)
plt.title("Importancia de las características")
plt.show()

# Matriz de confusión
conf_matrix = confusion_matrix(y_test, rf_pred)
plt.figure(figsize=(6, 5))
sns.heatmap(conf_matrix, annot=True, fmt='d', cmap='Blues', xticklabels=["No Riego", "Riego"], yticklabels=["No Riego", "Riego"])
plt.xlabel("Predicción")
plt.ylabel("Real")
plt.title("Matriz de Confusión - Random Forest")
plt.show()

# Reporte de clasificación
print("Reporte de Clasificación - Random Forest:")
print(classification_report(y_test, rf_pred))
```

Tabla 7

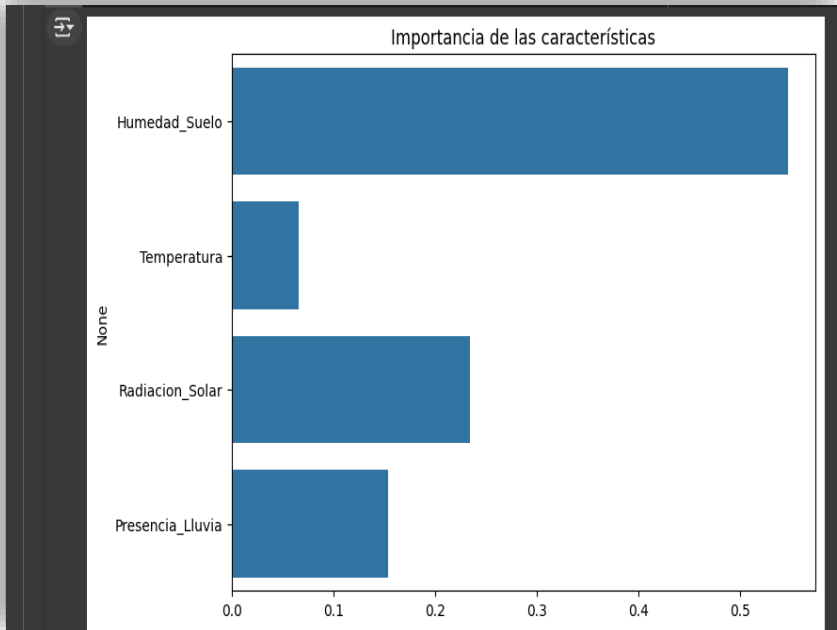


Tabla 8

Matriz de Confusión:

La diagonal principal representa los casos correctamente clasificados:

- 43 instancias de "No Riego" clasificadas correctamente.
- 17 instancias de "Riego" clasificadas correctamente.

No hay errores de clasificación (valores fuera de la diagonal), lo que confirma el desempeño perfecto del modelo.

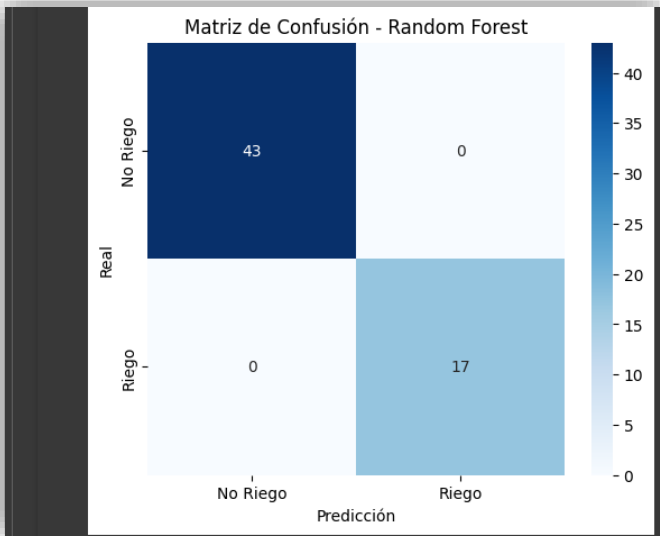


Tabla 9

Precisión (Precision): Proporción de predicciones correctas para cada clase.

Exhaustividad (Recall): Capacidad del modelo para encontrar todas las instancias de cada clase.

F1-Score: Media armónica de precisión y recall, equilibrando ambas métricas.

Reporte de Clasificación - Random Forest:					
	precision	recall	f1-score	support	
0	1.00	1.00	1.00	43	
1	1.00	1.00	1.00	17	
accuracy			1.00	60	
macro avg	1.00	1.00	1.00	60	
weighted avg	1.00	1.00	1.00	60	

Tabla 10

El modelo entrenado (Random Forest) se guardó en un archivo llamado random_forest_model.pkl utilizando la biblioteca joblib.

El modelo fue cargado desde el archivo guardado para realizar predicciones con nuevos datos.

Predicciones con nuevos datos

Ejemplo 1:

Humedad del Suelo: 40%

Temperatura: 20°C

Radiación Solar: 600 W/m²

Presencia de Lluvia: No (0)

Predicción: No Riego, ya que las condiciones no indican la necesidad de riego.

Ejemplo 2:

Humedad del Suelo: 25%

Temperatura: 30°C

Radiación Solar: 950 W/m²

Presencia de Lluvia: No (0)

Predicción: Riego, ya que la baja humedad y alta radiación solar justifican la recomendación de riego.

Desarrollo de un Sistema de Monitoreo con Sensores e Inteligencia Artificial para la Optimización Hídrica en los Cultivos de Aguacate Hass en el Departamento del Cauca

```
[6] import joblib

# Guardar el modelo Random Forest en un archivo
joblib.dump(random_forest_model, "random_forest_model.pkl")

print("El modelo ha sido guardado como 'random_forest_model.pkl'")
```

↔ El modelo ha sido guardado como 'random_forest_model.pkl'

```
[8] # Cargar el modelo guardado
loaded_model = joblib.load("random_forest_model.pkl")

# Crear un DataFrame con los mismos nombres de columnas que los datos de entrenamiento
import pandas as pd
nuevos_datos_df = pd.DataFrame(
    [[40, 20, 600, 0]], # Ejemplo de entrada: [Humedad_Suelo, Temperatura, Radiacion_Solar, Presencia_Lluvia]
    columns=["Humedad_Suelo", "Temperatura", "Radiacion_Solar", "Presencia_Lluvia"]
)

# Realizar predicción
prediccion = loaded_model.predict(nuevos_datos_df)
print(f"La predicción para los nuevos datos es: {'Riego' if prediccion[0] == 1 else 'No Riego'})
```

↔ La predicción para los nuevos datos es: No Riego

```
nuevos_datos_df = pd.DataFrame(
    [[25, 30, 950, 0]], # Ejemplo de entrada: [Humedad_Suelo, Temperatura, Radiacion_Solar, Presencia_Lluvia]
    columns=["Humedad_Suelo", "Temperatura", "Radiacion_Solar", "Presencia_Lluvia"]
)

# Realizar predicción
prediccion = loaded_model.predict(nuevos_datos_df)
print(f"La predicción para los nuevos datos es: {'Riego' if prediccion[0] == 1 else 'No Riego'})
```

↔ La predicción para los nuevos datos es: Riego

Tabla No.11

8. CONCLUSIONES

El sistema de monitoreo basado en sensores e inteligencia artificial demostró ser eficaz para optimizar la gestión hídrica en los cultivos de aguacate Hass en el departamento del Cauca. La implementación de sensores IoT permitió la captura precisa de datos en tiempo real, lo que facilitó ajustes dinámicos en las prácticas de riego, reduciendo significativamente el consumo de agua y mejorando la eficiencia hídrica. Un muy buen drenaje interno es el criterio más importante en los suelos donde se implanta el cultivo de aguacate.

La arquitectura diseñada, dividida en capas (sensores, red, servicios y aplicaciones), permitió integrar tecnologías accesibles como el ESP32 y Heltec WiFi LoRa 32, junto con plataformas como ThingSpeak y Home Assistant. Este diseño fue clave para superar las barreras tecnológicas y económicas propias de las zonas rurales del departamento, asegurando la conectividad y la recolección de datos incluso en áreas con infraestructura limitada.

Con estos datos se debe hacer cálculos permanentes de la disponibilidad de agua en el suelo para hacer riegos en el momento que el cultivo lo requiera mediante balances hídricos, apoyados en muestreos directos de la humedad del suelo, donde de presentarse niveles por debajo de la capacidad de campo, se deberá recurrir a este.

El uso del sistema de monitoreo hídrico benefició la productividad agrícola, contribuyó a la sostenibilidad ambiental, al minimizar el uso excesivo de agua y prevenir problemas como la salinización del suelo, el proyecto promovió prácticas agrícolas responsables que protegen los recursos naturales y mejoran la resiliencia del ecosistema local.

Las pruebas piloto en parcelas seleccionadas validaron la eficacia del sistema en condiciones reales, destacando su capacidad para mejorar la calidad y cantidad del cultivo de aguacate. Estos resultados crean bases para la escalabilidad del sistema en otras regiones agrícolas del Cauca y del país, adaptándolo a diferentes contextos agroclimáticos.

El modelo predictivo basado en sensores demostró su eficacia para optimizar el riego en cultivos de aguacate, logrando alta precisión al usar datos ambientales. Esto resalta el potencial de las tecnologías inteligentes para aumentar la productividad y sostenibilidad agrícola.

La integración de tecnologías avanzadas y sistemas inteligentes posiciona al departamento del Cauca como un referente en innovación agrícola, este proyecto mejora la competitividad de los agricultores, cumpliendo con altos estándares de calidad y seguridad que ha establecido el gobierno colombiano para la exportación del aguacate Hass. Estas leyes abarcan desde las prácticas de cultivo hasta los procesos de exportación, asegurando que cumpla con las expectativas de los mercados internacionales.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] N. N. Kourgialas and Z. Dokou, "Water management and salinity adaptation approaches of Avocado trees: A review for hot-summer Mediterranean climate," *Agric. Water Manag.*, vol. 252, p. 106923, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106923>.
- [2] V. Saiz-Rubio and F. Rovira-Más, "From smart farming towards agriculture 5.0: A review on crop data management," *Agronomy*, vol. 10, no. 2, 2020, doi: <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/2/207>
- [3] R. P. Sishodia, R. L. Ray, and S. K. Singh, "Applications of remote sensing in precision agriculture: A review," *Remote Sens.*, vol. 12, no. 19, pp. 1–31, 2020, doi: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/19/3136>.
- [4] Z. Zhai, J. F. Martínez, V. Beltran, and N. L. Martínez, "Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 170, p. 105256, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105256>.
- [5] B. T. Bestelmeyer et al., "Scaling Up Agricultural Research With Artificial Intelligence," *IT Prof.*, vol. 22, no. 3, pp. 33–38, 2020, doi: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9098013/>.
- [6] J. Reints, A. Dinar, and D. Crowley, "Dealing with water scarcity and salinity: Adoption of water efficient technologies and management practices by California Avocado growers," *Sustain.*, vol. 12, no. 9, 2020, doi: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/9/3555>.
- [7] Yang, P., Wu, L., Cheng, M., Fan, J., Li, S., Wang, H., & Qian, L. (2023). Review on Drip Irrigation: Impact on Crop Yield, Quality, and Water Productivity in China. *Water*, 15(9), 1733. <https://www.mdpi.com/2073-4441/15/9/1733>
- [8] Taramuel-Taramuel, Juan P. Jiménez-Hernández, Claudia Nelcy Barrios, Dursun, "Precision agriculture in avocado production: Mapping the landscape of scientific and technological developments," *Agric. Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, vol. 18, 2024, doi:https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ciencias_hortícolas/article/view/17428.
- [9] Erazo, W. (2022). Desarrollo de aplicación Android móvil utilizando Visión Artificial y Deep Learning para la identificación de Aguacates Hass con la plaga Monalonion, en la finca "Las Palmas", ubicada en el municipio de San Agustín, Huila. 1–

89. <https://repositorio.uan.edu.co/server/api/core/bitstreams/527520bc-a536-445c-86d0-ba9b5a3c8c69/content>
- [10] Bustamante, C., Lopez, F. A., Bustamante-Encina, R., Fuentealba, D., & Gatica, G. (2024). Analysis and Simulation of an IoT System for Measuring Soil Moisture in Avocado Plantations. In O. Gervasi, B. Murgante, C. Garau, D. Taniar, A. M. A. C. Rocha, & M. N. Faginas Lago (Eds.), Computational Science and Its Applications -- ICCSA 2024 Workshops (pp. 3–17). Springer Nature Switzerland. https://www.researchgate.net/publication/382690048_Analysis_and_Simulation_of_an_IoT_System_for_Measuring_Soil_Moisture_in_Avocado_Plantations
- [11] Vargas, L. M. T., Pérez, A. H., & Hernández, A. S. DINÁMICA DE LA HUMEDAD EN LA ZONA RADICULAR, EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL (ETR) Y RIEGO EFICIENTE EN EL AGUACATERO DE MICHOACÁN. <https://repositorio.uan.edu.co/server/api/core/bitstreams/527520bc-a536-445c-86d0-ba9b5a3c8c69/content>
- [12] Manual tecnológico Asohofrucol. <https://www.asohofrucol.com.co/img/pdflibros/17libro.pdf>
- [13] Y Lynce-Duque, D. (2011). Poda del Aguacate en Colombia. Proceedings VII World Avocado Congress 2011 (Actas VII Congreso Mundial del Aguacate 2011) (pág. 10). Cairns, Australia: WAC 2011.
- [14] Bernal E, J. A., & Diaz D, C. A. (2005). Tecnología para el Cultivo de Aguacate. Manual Técnico 5. Rionegro, Antioquia, Colombia: Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, CORPOICA, Centro de Investigación la Selva.
- [15] Fruty Green Packing. <https://frutygreen.com/requisitos-para-exportacion-de-aguacate-hass-desde-colombia/>