

Red de Sensores Agroclimáticos con IA para Predicción de Enfermedades en Cultivos de Papa en Nariño

CONVOCATORIA COLOMBIA INTELIGENTE: CIENCIA Y TECNOLOGÍAS
CUÁNTICAS E INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LOS TERRITORIOS |
Convocatoria 966

Tabla de Contenido

1. Generalidades del Proyecto	3
2. Resumen Ejecutivo	3
3. Planteamiento del Problema y Justificación	4
4. Marco Teórico y Estado del Arte	5
4.1. <i>Introducción al Dominio</i>	5
4.2. <i>Revisión de la Literatura (Literature Review)</i>	5
4.3. <i>Tecnologías y Enfoques Actuales (State of the Art)</i>	6
4.4. <i>Brechas de Conocimiento y Oportunidades (Knowledge Gaps & Opportunities)</i>	7
5. Objetivos	7
6. Metodología Propuesta	9
7. Plan de Ejecución y Gestión	10
7.1. <i>Cronograma de Actividades</i>	10
7.2. <i>Matriz de Riesgos</i>	11
8. Resultados e Impactos Esperados	12
8.1. <i>Resultados Esperados (Entregables)</i>	12
8.2. <i>Impactos Esperados</i>	13
9. Referencias Bibliográficas	14

1. Generalidades del Proyecto

Título: Red de Sensores Agroclimáticos con IA para Predicción de Enfermedades en Cultivos de Papa en Nariño

Convocatoria: CONVOCATORIA COLOMBIA INTELIGENTE: CIENCIA Y TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS E INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LOS TERRITORIOS | Convocatoria 966

Programa: Por definir

Entidad/Persona: COTECMAR

Línea Temática: Tecnologías Cuánticas, Inteligencia Artificial, CTel, Territorios, Innovación, Investigación Aplicada

Duración: 24 meses

Área OCDE: Por definir

● **Descripción:** Los pequeños productores de papa en el departamento de Nariño sufren pérdidas significativas debido a enfermedades fungosas como el tizón tardío, exacerbadas por la variabilidad climática y la falta de sistemas de alerta temprana. Este proyecto propone el desarrollo y despliegue de una red de sensores de bajo costo para monitorear variables agroclimáticas críticas. Los datos recolectados alimentarán un modelo de inteligencia artificial (basado en aprendizaje profundo) capaz de predecir la probabilidad de aparición de enfermedades con antelación. Se realizará un piloto en parcelas de productores seleccionados en el altiplano Nariñense, capacitando a las comunidades en el uso de una interfaz móvil sencilla para acceder a las alertas y recomendaciones de manejo integrado de plagas. Se espera reducir las pérdidas por enfermedad en un 25% e incrementar la eficiencia en la aplicación de fungicidas, mejorando la rentabilidad y sostenibilidad de la agricultura local.

● **Palabras Clave:** Inteligencia Artificial, Agricultura de Precisión, Sensores IoT, Papa, Nariño, Modelos Predictivos, Enfermedades Agrícolas

2. Resumen Ejecutivo

La agricultura en Nariño enfrenta un desafío crítico: las pérdidas significativas en los cultivos de papa debido a enfermedades fungosas como el tizón tardío, agravadas por la variabilidad climática y la ausencia de sistemas de alerta temprana accesibles. Proponemos una solución transformadora: el desarrollo e implementación de una **Red de Sensores Agroclimáticos con IA para Predicción de Enfermedades en Cultivos de Papa en Nariño**. Esta iniciativa creará un sistema de alerta temprana de bajo costo, mejorando la resiliencia y sostenibilidad de la producción local.

Para lograrlo, nuestro plan se estructura en objetivos claros: desplegar una red de sensores de bajo costo en fincas de Nariño, desarrollar un modelo de Inteligencia Artificial de aprendizaje profundo para predecir el tizón

tardío con alta precisión, e implementar una plataforma de alerta y soporte a la decisión amigable para los agricultores. Utilizaremos el Modelo en V de Ingeniería de Sistemas, garantizando un desarrollo sistemático y pruebas rigurosas para la fiabilidad y precisión del sistema.

El éxito de este proyecto se traducirá en una **reducción del 25% en las pérdidas de cultivos de papa** y una **optimización del 20% en el uso de fungicidas**. Esto no solo aumentará la rentabilidad y resiliencia económica de los pequeños productores, sino que también generará un impacto social al empoderar a los agricultores con herramientas proactivas, un avance técnico/científico en la agricultura de precisión local, y un impacto ambiental significativo al reducir la contaminación.

Este proyecto es fundamental para catalizar la transformación digital y la sostenibilidad de la agricultura en Nariño, asegurando la seguridad alimentaria y el bienestar de sus comunidades.

3. Planteamiento del Problema y Justificación

La agricultura moderna global enfrenta retos crecientes, particularmente la variabilidad climática y la propagación de enfermedades que amenazan la seguridad alimentaria y la estabilidad económica de los productores. Dentro de este contexto, la sostenibilidad y resiliencia de los sistemas agrícolas, especialmente en regiones dependientes de cultivos específicos, es fundamental. En el departamento de Nariño, Colombia, los pequeños productores de papa, un pilar de la economía local y la seguridad alimentaria regional, sufren pérdidas significativas debido a enfermedades fungosas, como el devastador tizón tardío (*Phytophthora infestans*), problemas exacerbados por patrones climáticos impredecibles y la ausencia de sistemas de alerta temprana eficaces. Si bien la literatura científica y los avances en la Agricultura de Precisión demuestran el potencial transformador de la Inteligencia Artificial (IA) y el Internet de las Cosas (IoT) para la detección y predicción de enfermedades agrícolas (Urbina Cienfuegos y Bravo Rivas, 2025; Tambe et al., 2023; Sharma et al., 2018), existe una brecha crítica en su implementación práctica. Las soluciones actuales, aunque tecnológicamente avanzadas y con altas precisiones en entornos controlados, a menudo conllevan costos de implementación prohibitivos para pequeños productores en economías emergentes, limitando su adopción masiva. Además, la mayoría de los modelos de predicción y detección carecen de una validación exhaustiva en condiciones agroclimáticas específicas y para variedades de cultivo locales, lo que resulta en una falta de sistemas de alerta temprana robustos y adaptados a las particularidades del altiplano Nariñense para el control del tizón tardío de la papa. Este proyecto se presenta como la respuesta directa e innovadora a estas limitaciones, proponiendo el desarrollo y despliegue de una "Red de Sensores Agroclimáticos con IA para Predicción de Enfermedades en Cultivos de Papa en Nariño". Mediante la integración de una red de sensores de bajo costo, diseñados para ser accesibles y sostenibles para pequeños agricultores, se recopilarán datos agroclimáticos críticos en tiempo real. Estos datos alimentarán un modelo de inteligencia artificial basado en aprendizaje profundo, entrenado específicamente con información local, que permitirá predecir con antelación la probabilidad de aparición y progresión del tizón tardío, superando las deficiencias de los enfoques genéricos y de alto costo. La implementación de este proyecto es estratégica y crucial, no solo por su capacidad de innovación tecnológica, sino por su profundo impacto socioeconómico. Al reducir las pérdidas por enfermedad en un 25% y optimizar la aplicación de fungicidas, el proyecto no solo mejorará la rentabilidad y la sostenibilidad ambiental de la agricultura local en Nariño, sino que también empoderará a los pequeños productores con herramientas de decisión proactiva. Constituye un paso fundamental hacia la resiliencia agrícola en la región, demostrando cómo la tecnología avanzada, adaptada y validada localmente, puede ser

un catalizador para el desarrollo sostenible y la seguridad alimentaria en comunidades vulnerables.

4. Marco Teórico y Estado del Arte

4.1. Introducción al Dominio

La agricultura moderna se enfrenta a desafíos crecientes, incluyendo la variabilidad climática y la propagación de enfermedades que amenazan la seguridad alimentaria y la sostenibilidad económica de los productores. En este contexto, la **Agricultura de Precisión** emerge como un paradigma fundamental, definido como un conjunto de tecnologías que buscan optimizar la producción agrícola a través del manejo de la variabilidad espacial y temporal dentro de los campos de cultivo (Universidad contexto, la **Agricultura de Precisión** emerge como un paradigma fundamental, definido como un conjunto de tecnologías que buscan optimizar la producción agrícola a través del manejo de la variabilidad espacial y temporal dentro de los campos de cultivo (Universidad de Antioquia, n.d.). Este enfoque se apoya en la recopilación y análisis de datos para tomar decisiones informadas, maximizando la eficiencia y la productividad agrícola.

Central a la agricultura de precisión es la **Inteligencia Artificial (IA)**, que permite el procesamiento avanzado de grandes volúmenes de datos para identificar patrones, predecir resultados y automatizar procesos. La IA puede apoyar prácticas agrícolas más sostenibles y resilientes, ayudando a los agricultores a aumentar la eficiencia y reducir los insumos (Comisión Europea, n.d.). Complementariamente, el **Internet de las Cosas (IoT)** en la agricultura se refiere al uso de sensores y dispositivos inteligentes conectados a internet para recopilar datos en tiempo real sobre el estado de los cultivos, el suelo y las condiciones ambientales (AgroTech Campus, n.d.). La integración de estas tecnologías permite el desarrollo de sistemas de monitoreo y alerta temprana que son cruciales para la gestión proactiva de riesgos agrícolas.

El **tizón tardío de la papa**, causado por el oomiceto *Phytophthora infestans*, es una de las enfermedades más destructivas del cultivo de papa a nivel mundial, capaz de provocar pérdidas económicas significativas (Acuña, n.d.). La rápida propagación de esta enfermedad, exacerbada por condiciones agroclimáticas específicas, subraya la necesidad crítica de sistemas predictivos y de alerta temprana que permitan a los agricultores implementar medidas de control oportunas y eficientes, mejorando así la rentabilidad y la sostenibilidad de sus cultivos.

4.2. Revisión de la Literatura (Literature Review)

La literatura científica reciente demuestra un interés creciente en la aplicación de la inteligencia artificial y el IoT para la detección y predicción de enfermedades en cultivos. **Urbina Cienfuegos y Bravo Rivas (2025)** desarrollaron una aplicación móvil que incorpora técnicas de Machine Learning para la detección temprana de plagas y enfermedades en cultivos básicos como maíz, frijol y sorgo en Nicaragua. Su modelo de reconocimiento de imágenes alcanzó una precisión del 95.8%, demostrando el potencial de las soluciones basadas en IA para ser accesibles y efectivas en contextos agrícolas, especialmente a través de interfaces móviles.

En el ámbito específico de la papa, **Tambe et al. (2023)** utilizaron Redes Neuronales Convolucionales (CNN) para clasificar enfermedades foliares de la papa, obteniendo una impresionante precisión del 99.1%. Este estudio resalta la capacidad del *Deep Learning* para identificar con alta fiabilidad diferentes tipos de enfermedades a partir de imágenes de hojas, un paso fundamental para el diagnóstico temprano.

Complementando este enfoque, **Duarte-Carvajalino et al. (2018)** exploraron la predicción cuantitativa de la severidad del tizón tardío en cultivos de papa mediante algoritmos de Machine Learning (incluyendo CNNs y *Random Forests*) y datos multiespectrales capturados por vehículos aéreos no tripulados. Sus resultados indicaron que las CNNs, *Random Forests* y los perceptrones multicapa podían predecir el nivel de afectación con una precisión aceptable, subrayando la viabilidad de la teledetección para la vigilancia de enfermedades.

La predicción del período epidémico del tizón tardío también ha sido abordada. **Hou et al. (2022)** combinaron la espectroscopia visible/infrarroja cercana (Vis/NIR) con métodos de Machine Learning y quimiométricos para la detección rápida y la predicción del período epidémico del tizón tardío en papa. Lograron precisiones de clasificación de hasta el 99% y el 95%, respectivamente, y una precisión del 88.5% en la predicción del período epidémico. Este trabajo es crucial porque no solo identifica la enfermedad, sino que también anticipa su desarrollo, lo que es vital para la implementación de estrategias de manejo. Finalmente, **Sharma et al. (2018)** investigaron la relación entre parámetros climáticos (temperatura máxima y mínima, humedad y lluvia) y la manifestación del tizón tardío utilizando un enfoque de Redes Neuronales Artificiales. Este estudio es particularmente relevante para el proyecto, ya que valida el uso de datos agroclimáticos como insumo principal para modelos predictivos de enfermedades.

4.3. Tecnologías y Enfoques Actuales (State of the Art)

El estado del arte en la predicción de enfermedades agrícolas se caracteriza por la convergencia de la **Inteligencia Artificial** (especialmente el *Deep Learning*) y el **Internet de las Cosas (IoT)**, aplicadas dentro del marco de la **Agricultura de Precisión**. Los modelos de *Deep Learning*, particularmente las Redes Neuronales Convolucionales (CNN), han demostrado una eficacia sobresaliente en la clasificación y detección de enfermedades de cultivos a partir de imágenes, alcanzando altas precisiones como se evidencia en los trabajos de Tambe et al. (2023) para enfermedades de la papa. Estos modelos son capaces de aprender características complejas de las imágenes para distinguir entre hojas sanas y enfermas, o incluso diferentes patógenos.

Paralelamente, los sistemas de sensores IoT constituyen la base para la recopilación de datos en tiempo real en la agricultura. Estos incluyen sensores agroclimáticos que miden temperatura, humedad del aire y del suelo, radiación solar y precipitaciones, así como sensores para la detección de patógenos o imágenes multiespectrales (Morales Villegas et al., 2025; Bojórquez-Delgado et al., 2023). La integración de estos sensores en redes inalámbricas (WSN) permite un monitoreo continuo y la transmisión de datos a plataformas centralizadas para su análisis (Mora Magallanes & Rosas Pari, 2019). Las redes LoRaWAN, por ejemplo, han demostrado ser una opción versátil en términos de alcance y equilibrio energético para la agricultura de precisión (Bojórquez-Delgado et al., 2023).

La combinación de estas tecnologías permite el desarrollo de sistemas de alerta temprana. Estos sistemas procesan los datos agroclimáticos y de salud de los cultivos utilizando modelos de IA para predecir la probabilidad de aparición o progresión de enfermedades (Sharma et al., 2018; Hou et al., 2022). La salida de estos modelos se traduce en alertas y recomendaciones que pueden ser entregadas a los agricultores a

través de interfaces amigables, como aplicaciones móviles (Urbina Cienfuegos & Bravo Rivas, 2025), facilitando una toma de decisiones proactiva y la implementación de un manejo integrado de plagas y enfermedades más eficiente.

4.4. Brechas de Conocimiento y Oportunidades (Knowledge Gaps & Opportunities)

A pesar de los avances significativos en la aplicación de IA e IoT en la agricultura, existen brechas importantes que el presente proyecto busca abordar. Una de las principales limitaciones radica en los **costos de implementación** de muchas de estas tecnologías avanzadas, lo que las hace inaccesibles para pequeños productores en regiones en desarrollo (Agroperú, n.d.; Sigma Agro, n.d.). Las soluciones actuales a menudo están diseñadas para la agricultura a gran escala o tecnificada, dejando un vacío en la adaptación de estas herramientas a las realidades socioeconómicas y tecnológicas de comunidades con recursos limitados, como los pequeños productores de papa en Nariño.

Otra brecha crucial es la **especificidad contextual y la validación en campo**. Si bien existen modelos de IA con alta precisión para la detección de enfermedades, muchos de ellos se desarrollan en entornos controlados o con conjuntos de datos globales que pueden no reflejar las condiciones agroclimáticas, las variedades de cultivo o las cepas de patógenos específicas de una región particular. La falta de sistemas de alerta temprana robustos y validados localmente para enfermedades como el tizón tardío de la papa en el altiplano Nariñense representa una oportunidad significativa. El desarrollo de una red de sensores de bajo costo y un modelo de IA entrenado con datos locales, capaz de proporcionar predicciones precisas y oportunas a través de una interfaz móvil sencilla, llenaría esta brecha, empoderando a los pequeños productores y mejorando su resiliencia frente a las pérdidas por enfermedades.

5. Objetivos

Objetivo General

Mejorar la resiliencia y sostenibilidad de los cultivos de papa en Nariño mediante el desarrollo y la implementación de un sistema de alerta temprana de bajo costo, basado en sensores agroclimáticos e inteligencia artificial, para la predicción precisa del tizón tardío.

Objetivos Específicos

1. **Objetivo:** Diseñar, desarrollar e implementar una red de sensores agroclimáticos de bajo costo y alta fiabilidad en fincas de productores de papa en Nariño.

● **Específico (S):** El equipo técnico diseñará, construirá e instalará 15 nodos de sensores agroclimáticos de bajo costo y robustos en fincas seleccionadas de pequeños productores de papa en Nariño, cubriendo variables como temperatura, humedad relativa, precipitación y humedad foliar.

● **Medible (M):** Se habrán desplegado y puesto en operación 15 nodos de sensores, transmitiendo datos en tiempo real con una tasa de éxito de transmisión superior al 95% durante un periodo continuo de 6 meses.

- **Alcanzable (A):** Es alcanzable dada la madurez de la tecnología IoT de bajo costo y la experiencia del equipo en desarrollo de hardware, asegurando la sostenibilidad económica para pequeños agricultores.
- **Relevante (R):** Este objetivo es fundamental para recopilar los datos agroclimáticos locales y en tiempo real necesarios para entrenar y validar el modelo de IA, abordando la carencia de sistemas de alerta temprana eficaces y adaptados.
- **Plazo (T):** Completado dentro de los primeros 9 meses del proyecto.

2. **Objetivo:** Desarrollar y validar un modelo de Inteligencia Artificial basado en aprendizaje profundo para la predicción temprana del tizón tardío en cultivos de papa en las condiciones agroclimáticas de Nariño.

- **Específico (S):** Se diseñará, entrenará y validará un modelo de IA (red neuronal profunda) utilizando los datos recopilados de la red de sensores agroclimáticos y datos históricos de incidencia del tizón tardío específicos de la región de Nariño.
- **Medible (M):** El modelo de IA alcanzará una precisión de predicción de al menos el 90% para la ocurrencia del tizón tardío con una antelación de 72 horas, validado mediante pruebas de campo y comparación con observaciones fitopatológicas.
- **Alcanzable (A):** Es alcanzable gracias a los avances en el aprendizaje profundo y la disponibilidad de un conjunto de datos robusto y localmente relevante generado por la red de sensores y registros históricos.
- **Relevante (R):** Aborda directamente la necesidad crítica de un sistema de alerta temprana robusto y adaptado localmente, superando las deficiencias de los enfoques genéricos y de alto costo.
- **Plazo (T):** Completado dentro de los 15 meses de inicio del proyecto.

3. **Objetivo:** Implementar una plataforma de alerta temprana y soporte a la decisión accesible y amigable para pequeños productores de papa en Nariño.

- **Específico (S):** Se desarrollará y desplegará una plataforma (web/móvil) que integre las predicciones del modelo de IA, proporcionando alertas claras y recomendaciones de manejo del tizón tardío a los agricultores participantes, con interfaces intuitivas y en español.
- **Medible (M):** La plataforma será utilizada activamente por al menos el 80% de los agricultores participantes, con una tasa de satisfacción del usuario superior al 85% en cuanto a la claridad, utilidad y facilidad de acceso de las alertas y recomendaciones.
- **Alcanzable (A):** Es alcanzable mediante el uso de metodologías de desarrollo ágil y diseño centrado en el usuario, asegurando que la tecnología sea adoptable por la población objetivo.
- **Relevante (R):** Transforma la capacidad predictiva en una herramienta práctica y empoderadora para los agricultores, facilitando la toma de decisiones proactiva y la optimización del uso de fungicidas.
- **Plazo (T):** Completado dentro de los 18 meses de inicio del proyecto.

4. **Objetivo:** Demostrar una reducción significativa en las pérdidas de cultivos de papa y la optimización en el uso de fungicidas gracias a la implementación del sistema de alerta temprana.

-
- **Específico (S):** Se realizarán ensayos de campo controlados en las fincas participantes para evaluar el impacto directo del sistema de alerta temprana en la incidencia del tizón tardío, la producción de papa y el volumen de fungicidas aplicados.
 - **Medible (M):** Se documentará una reducción de al menos el 25% en las pérdidas de cultivos de papa debido al tizón tardío y una optimización (reducción o aplicación más precisa) del 20% en el uso de fungicidas en los grupos de intervención, en comparación con los grupos de control.
 - **Alcanzable (A):** Es alcanzable considerando el potencial de las predicciones precisas para habilitar intervenciones oportunas y focalizadas, mejorando la eficacia del manejo de la enfermedad.
 - **Relevante (R):** Este objetivo valida el impacto socioeconómico y ambiental del proyecto, cumpliendo con la promesa de mejorar la rentabilidad y sostenibilidad de la agricultura local en Nariño.
 - **Plazo (T):** Completado para el final del proyecto (24 meses).

6. Metodología Propuesta

Framework Seleccionado: Modelo en V de Ingeniería de Sistemas

Este proyecto implica la compleja integración de componentes de hardware (red de sensores), firmware, sistemas de adquisición de datos, desarrollo avanzado de software (modelo de IA) y una plataforma de usuario final. El Modelo en V proporciona un marco robusto que enfatiza el desarrollo sistemático y las pruebas rigurosas en cada etapa, asegurando que todos los componentes sean verificados contra los requisitos y que el sistema integrado sea validado contra los objetivos generales del proyecto. Este enfoque es crucial para lograr la alta fiabilidad de la red de sensores (Objetivo 1), la precisión del modelo de IA (Objetivo 2), la funcionalidad de la plataforma de alerta temprana (Objetivo 3) y, en última instancia, el impacto demostrado en la salud de los cultivos y el uso de fungicidas (Objetivo 4). El enfoque inherente del Modelo en V en la garantía de calidad y la mitigación de riesgos se alinea perfectamente con la naturaleza de I+D de esta propuesta, donde la integridad y el rendimiento del sistema son primordiales.

Fases Principales de la Metodología:

- **Fase 1: Análisis de Requisitos del Sistema** - Definición exhaustiva de las necesidades funcionales y no funcionales para la red de sensores, el modelo de IA y la plataforma de alerta temprana, estableciendo los criterios de éxito del proyecto.
- **Fase 2: Diseño de la Arquitectura y Componentes** - Elaboración del diseño conceptual y detallado de la red de sensores, la arquitectura del sistema de IA (incluyendo la selección de algoritmos y fuentes de datos), y el diseño de la plataforma web/móvil.
- **Fase 3: Desarrollo e Implementación de Módulos** - Construcción e implementación de los nodos de sensores agroclimáticos, desarrollo del modelo de IA, y creación de los módulos de la plataforma de alerta temprana, incluyendo la interfaz de usuario.

- **Fase 4: Pruebas Unitarias y de Integración** - Verificación individual de cada componente (hardware, software, modelo de IA) y pruebas de su interacción para asegurar que los módulos funcionan correctamente juntos y cumplen con sus especificaciones de diseño.
- **Fase 5: Pruebas del Sistema y Validación en Campo** - Evaluación del sistema integrado en su totalidad, asegurando que cumple con los requisitos definidos y realizando pruebas de campo para validar su rendimiento, precisión (IA) y fiabilidad en el entorno real de los cultivos de papa.
- **Fase 6: Despliegue y Monitoreo Piloto** - Implementación del sistema completo en las fincas piloto, seguido de un período de monitoreo y recopilación de retroalimentación para identificar mejoras y asegurar la adopción por parte de los usuarios finales.

7. Plan de Ejecución y Gestión

Cronograma de Actividades

7.1. Cronograma de Actividades

Fase	Actividad / Hito Clave	Entregable Principal	Duración Estimada (Semanas)
Fase 1: Análisis de Requisitos del Sistema	<i>Definición exhaustiva de las necesidades funcionales y no funcionales para la red de sensores, el modelo de IA y la plataforma de alerta temprana, estableciendo los criterios de éxito del proyecto.</i>		6
	1.1. Recopilación y análisis de requisitos para la red de sensores, IA y plataforma.	Documento de Requisitos del Sistema (SRS)	3
	1.2. Definición de especificaciones técnicas detalladas para los nodos de sensores.	Especificaciones Técnicas de Hardware y Firmware v1.0	2
	1.3. Establecimiento de criterios de rendimiento y calidad para el modelo de IA y la plataforma.	Matriz de Criterios de Éxito y KPIs	1
Fase 2: Diseño de la Arquitectura y Componentes	<i>Elaboración del diseño conceptual y detallado de la red de sensores, la arquitectura del sistema de IA, y el diseño de la plataforma web/móvil.</i>		10
	2.1. Diseño detallado de la arquitectura de la red de sensores y comunicación.	Documento de Diseño de Arquitectura de Sensores	4
	2.2. Diseño de la arquitectura del modelo de IA (algoritmos, preprocesamiento de datos).	Documento de Diseño del Modelo de IA	3
	2.3. Diseño de la interfaz de usuario (UX/UI) y arquitectura de la plataforma de alerta temprana.	Prototipos UX/UI y Documento de Arquitectura de Plataforma	3
Fase 3: Desarrollo e Implementación de Módulos	<i>Construcción e implementación de los nodos de sensores agroclimáticos, desarrollo del modelo de IA, y creación de los módulos de la plataforma de alerta temprana.</i>		20

	3.1. Prototipado, ensamblaje y programación de los nodos de sensores agroclimáticos.	15 Nodos de Sensores Funcionales (Prototipos)	8
	3.2. Desarrollo, entrenamiento y ajuste inicial del modelo de IA con datos históricos.	Modelo de IA Entrenado v1.0	7
	3.3. Desarrollo de los módulos backend y frontend de la plataforma de alerta temprana.	Plataforma de Alerta Temprana (Módulos Base)	5
Fase 4: Pruebas Unitarias y de Integración	<i>Verificación individual de cada componente y pruebas de su interacción para asegurar que los módulos funcionan correctamente juntos.</i>		12
	4.1. Pruebas unitarias de hardware, firmware y calibración de los nodos de sensores.	Informes de Pruebas Unitarias de Sensores	4
	4.2. Pruebas de integración entre sensores, sistema de adquisición de datos y modelo de IA.	Informe de Pruebas de Integración del Sistema	5
	4.3. Pruebas funcionales, de rendimiento y usabilidad de la plataforma de alerta temprana.	Informe de Pruebas de Plataforma	3
Fase 5: Pruebas del Sistema y Validación en Campo	<i>Evaluación del sistema integrado en su totalidad, asegurando que cumple con los requisitos definidos y realizando pruebas de campo para validar su rendimiento y precisión.</i>		12
	5.1. Despliegue de los 15 nodos de sensores en fincas piloto y monitoreo de transmisión de datos.	Red de Sensores Operacional en Campo	4
	5.2. Recopilación de datos de campo y validación de la precisión del modelo de IA.	Informe de Validación del Modelo de IA (Precisión >90%)	5
	5.3. Pruebas de usabilidad y retroalimentación inicial de la plataforma con agricultores.	Informe de Retroalimentación de Usuarios (Fase Piloto)	3
Fase 6: Despliegue y Monitoreo Piloto	<i>Implementación del sistema completo en fincas piloto, seguido de un período de monitoreo y recopilación de retroalimentación para identificar mejoras y asegurar la adopción.</i>		36
	6.1. Monitoreo continuo de la red de sensores y aseguramiento de la fiabilidad de datos (6 meses).	Datos Agroclimáticos Continuos y Fiables	24
	6.2. Implementación final de la plataforma de alerta temprana y capacitación a usuarios.	Plataforma de Alerta Temprana Operacional y Usuarios Capacitados	6
	6.3. Evaluación del impacto del sistema en pérdidas de cultivos y uso de fungicidas.	Informe de Impacto (Reducción Pérdidas y Fungicidas)	4
	6.4. Generación de informe final del proyecto y lecciones aprendidas.	Informe Final del Proyecto	2

Matriz de Riesgos

7.2. Matriz de Riesgos

#	Riesgo Potencial	Probabilidad	Impacto	Estrategia de Mitigación
---	------------------	--------------	---------	--------------------------

1	Precisión del Modelo de IA Insuficiente Relacionado con: Fase 3.2. Desarrollo, entrenamiento y ajuste inicial del modelo de IA; Fase 5.2. Recopilación de datos de campo y validación de la precisión del modelo de IA.	Medium	High	Realizar un análisis exhaustivo de datos históricos antes del entrenamiento. Implementar técnicas de IA robustas y ensambles de modelos. Establecer un proceso de validación iterativo con métricas claras y un plan de contingencia para el ajuste de algoritmos o la recolección de datos adicionales si la precisión inicial es inferior al 90%.
2	Fallas de Hardware en Nodos de Sensores en Campo Relacionado con: Fase 3.1. Prototipado, ensamblaje y programación de los nodos de sensores; Fase 5.1. Despliegue de los 15 nodos de sensores en fincas piloto; Fase 6.1. Monitoreo continuo de la red de sensores.	Medium	High	Seleccionar componentes de grado industrial resistentes a condiciones agroclimáticas. Realizar pruebas de estrés y durabilidad en laboratorio antes del despliegue. Diseñar los nodos con modularidad para facilitar el mantenimiento y reemplazo rápido. Establecer un protocolo de mantenimiento preventivo y de respuesta a fallos.
3	Baja Adopción de la Plataforma por Agricultores Relacionado con: Fase 5.3. Pruebas de usabilidad y retroalimentación inicial de la plataforma con agricultores; Fase 6.2. Implementación final de la plataforma de alerta temprana y capacitación a usuarios.	Medium	High	Involucrar a los agricultores desde las fases de diseño (Fase 2.3) a través de encuestas y prototipos. Realizar sesiones de capacitación exhaustivas y crear material de apoyo claro y conciso. Establecer un canal de soporte técnico continuo y recopilar retroalimentación constante para mejoras iterativas de la interfaz de usuario y funcionalidades.
4	Retrasos Críticos en el Desarrollo de Módulos Relacionado con: Fase 3: Desarrollo e Implementación de Módulos (general).	Medium	Medium	Adoptar una metodología de desarrollo ágil con sprints cortos y revisiones periódicas. Asignar recursos adicionales o reasignar tareas en caso de cuellos de botella identificados. Establecer hitos intermedios claros y un seguimiento semanal del progreso para detectar desviaciones tempranas y aplicar correcciones.
5	Problemas de Integración entre Componentes del Sistema Relacionado con: Fase 4.2. Pruebas de integración entre sensores, sistema de adquisición de datos y modelo de IA.	Medium	Medium	Definir interfaces y protocolos de comunicación estándar desde la Fase 2. Realizar pruebas de integración incrementales y continuas a medida que se desarrollan los módulos (Fase 3). Utilizar un entorno de integración continua para automatizar las pruebas y detectar incompatibilidades de forma temprana.

8. Resultados e Impactos Esperados

8.1. Resultados Esperados (Entregables)

- **Red de Sensores Agroclimáticos Operativa:** Implementación y puesta en marcha de 15 nodos de sensores de bajo costo y alta fiabilidad en fincas de productores de papa en Nariño, transmitiendo datos

agroclimáticos en tiempo real. (Corresponde al Objetivo Específico 1)

- **Modelo de IA Validado para Predicción de Tizón Tardío:** Un modelo de aprendizaje profundo entrenado y validado, con una precisión de al menos el 90%, para la predicción temprana del tizón tardío en cultivos de papa en las condiciones agroclimáticas de Nariño. (Corresponde al Objetivo Específico 2)
- **Plataforma de Alerta Temprana y Soporte a la Decisión:** Una aplicación web/móvil funcional, accesible y amigable, que integre las predicciones del modelo de IA y proporcione alertas claras y recomendaciones de manejo del tizón tardío a los agricultores. (Corresponde al Objetivo Específico 3)
- **Informe de Evaluación de Impacto y Sostenibilidad:** Un documento técnico que valide la reducción de al menos el 25% en las pérdidas de cultivos de papa debido al tizón tardío y una optimización del 20% en el uso de fungicidas, comparando grupos de intervención y control, y detallando la viabilidad del sistema. (Corresponde al Objetivo Específico 4)

8.2. Impactos Esperados

● Impacto Técnico/Científico:

Este proyecto establecerá un precedente en la aplicación de tecnologías IoT de bajo costo y aprendizaje profundo para la agricultura de precisión en Nariño, generando un nuevo cuerpo de conocimiento sobre la predicción del tizón tardío bajo condiciones agroclimáticas locales. La creación de un robusto conjunto de datos agroclimáticos y de incidencia de enfermedades específico de la región, junto con un modelo de IA adaptado, representará un avance significativo sobre enfoques genéricos, sentando las bases para futuras investigaciones y desarrollos en sistemas de alerta temprana para otros cultivos.

● Impacto Económico:

La implementación del sistema de alerta temprana resultará en una reducción directa de al menos el 25% en las pérdidas de cultivos de papa debido al tizón tardío, lo que se traducirá en un aumento significativo de los ingresos y la rentabilidad para los pequeños productores de Nariño. Adicionalmente, la optimización del 20% en el uso de fungicidas reducirá los costos de producción y mejorará la eficiencia económica. Esto contribuirá a una mayor resiliencia económica de los agricultores, mejorando su competitividad en el mercado y reduciendo su vulnerabilidad a los riesgos fitosanitarios.

● Impacto Social:

El proyecto empoderará a los pequeños agricultores de papa de Nariño al proporcionarles acceso a tecnología avanzada y herramientas de toma de decisiones proactivas, mejorando sus capacidades de gestión de cultivos y fomentando la adopción de prácticas agrícolas basadas en datos. Esto contribuirá a la seguridad alimentaria local y al mejoramiento de las condiciones de vida de las comunidades rurales. La reducción en el uso de fungicidas también tendrá un impacto positivo en la salud de los agricultores y sus familias, al disminuir su exposición a productos químicos.

● Impacto Ambiental:

La optimización en el uso de fungicidas (reducción del 20%) conllevará a una disminución considerable de la carga química en el medio ambiente, reduciendo la contaminación del suelo y las fuentes hídricas en la región

de Nariño. Esto promoverá prácticas agrícolas más sostenibles y ecológicas, contribuyendo a la conservación de la biodiversidad y la salud de los ecosistemas locales. El uso más eficiente de recursos también reducirá la huella ambiental general de la producción de papa en la región.

9. Referencias Bibliográficas

Acuña, I. (n.d.). *EL TIZÓN TARDÍO DE LA PAPA*. INIA.

<https://tizon.inia.cl/assets/boletines/22-el%20tiz%C3%B3n%20tardio%20de%20la%20papa.pdf>

Agroperú. (n.d.). *Retos, desafíos y oportunidades de la inteligencia artificial en la agricultura*. Recuperado de <https://www.agroperu.pe/retos-desafios-y-oportunidades-de-la-inteligencia-artificial-en-la-agricultura/>

AgroTech Campus. (n.d.). *Agricultura e Internet de las Cosas*. Recuperado de <https://agrotechcampus.com/blog/agricultura-e-internet-de-las-cosas/>

Bojórquez-Delgado, G., Bojorquez-Delgado, J., & Flores-Rosales, M. A. (2023). Evaluación Comparativa de Redes IoT en Agricultura de Precisión. *Revista Iberoamericana de Tecnología Aplicada*, 1(1), e230101.

Comisión Europea. (n.d.). *Liberar el potencial de la inteligencia artificial para una agricultura sostenible y resiliente*. Recuperado de

<https://digital-strategy.ec.europa.eu/es/library/unlocking-potential-artificial-intelligence-sustainable-agriculture>

Duarte-Carvajalino, J., Alzate, D. F., Ramirez, A. A., Santa-Sepulveda, J. D., Fajardo-Rojas, A. E., & Soto-Suárez, M. (2018). Evaluating Late Blight Severity in Potato Crops Using Unmanned Aerial Vehicles and Machine Learning Algorithms. *Sensors*, 18(9), 2971. <https://doi.org/10.3390/s18092971>

Hou, B., Hu, Y., Zhang, P., & Hou, L. (2022). Potato Late Blight Severity and Epidemic Period Prediction Based on Vis/NIR Spectroscopy. *Sensors*, 22(23), 9405. <https://doi.org/10.3390/s22239405>

Mora Magallanes, H. V., & Rosas Pari, J. L. (2019). *Diseño, desarrollo e implementación de una red de sensores inalámbricos (WSN) para el control, monitoreo y toma de decisiones aplicado en la agricultura de precisión basado en internet de las cosas (IOT). – Caso de estudio cultivo de frijol* [Tesis de pregrado]. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.

Morales Villegas, H. V., Orozco Morocho, D. J., Morales Barreno, A. S., Pinto Muñoz, F. P., & Duque Fernandez, I. S. (2025). Agricultura de precisión de un invernadero a través de virtualización y comunicación IoT. *Tecnología en Marcha*, 38(1), 17–31.

Sharma, P. J., Singh, B. K., & Singh, R. (2018). Prediction of Potato Late Blight Disease Based Upon Weather Parameters Using Artificial Neural Network Approach. *International Journal of Computer Applications*, 180(3), 29–33. <https://doi.org/10.5120/ijca2018916388>

Sigma Agro. (n.d.). *Los Desafíos en la Implementación de Tecnología en el Agro*. Recuperado de <https://sigma-agro.com/los-desafios-en-la-implementacion-de-tecnologia-en-el-agro/>

Tambe, U. Y., Shobanadevi, A., Shanthini, A., & Hsu, H. C. (2023). Potato Leaf Disease Classification using Deep Learning: A Convolutional Neural Network Approach. *arXiv preprint arXiv:2311.02102*.

Universidad de Antioquia. (n.d.). *Agricultura de precisión*. Recuperado de https://www.udea.edu.co/wps/portal/udea/web/inicio/extencion/portafoliotecnologico/articulos/Agricultura_de_precision

Urbina Cienfuegos, S. M., & Bravo Rivas, J. J. (2025). Inteligencia Artificial: Machine Learning, para Detección Temprana de Plagas y Enfermedades de Cultivos Básicos, Nicaragua. *Revista Científica de la FAREM-Estelí*, 1(1), 1–15.