



Detección de Anomalías Sísmicas en Zonas Rurales mediante Inteligencia Artificial

1. Resumen Ejecutivo

La detección de anomalías sísmicas en zonas rurales y remotas enfrenta desafíos críticos debido a la escasez y baja calidad de datos, la conectividad limitada y las restricciones energéticas, dejando a estas comunidades vulnerables y desatendidas. Nuestro proyecto propone una solución innovadora: un sistema de inteligencia artificial diseñado específicamente para operar bajo estas limitaciones, optimizando la capacidad de identificar patrones sísmicos inusuales y mejorando la comprensión de eventos geológicos.

Para lograrlo, nos enfocaremos en tres objetivos clave: desarrollar modelos de IA capaces de procesar datos sísmicos escasos o de baja calidad con alta precisión, diseñar arquitecturas de IA computacionalmente eficientes y de bajo consumo energético para su despliegue en infraestructuras con recursos limitados, y validar el sistema integral en un entorno rural real seleccionado. La metodología del Modelo en V guiará este proceso, asegurando una integración robusta y una validación rigurosa de los modelos de IA y la infraestructura de campo.

Los resultados tangibles incluirán modelos de IA robustos y optimizados para "edge computing", y un sistema de detección de anomalías sísmicas validado en campo. Estos entregables generarán un impacto técnico-científico significativo al avanzar el estado del arte en IA aplicada a la sismología, un impacto económico al reducir costos operativos y mitigar pérdidas por desastres, y un impacto social crucial al mejorar la seguridad y el bienestar de las comunidades rurales mediante sistemas de alerta temprana más precisos y fiables.

Este proyecto es una inversión estratégica esencial para cerrar la brecha tecnológica, fortaleciendo la resiliencia regional y global ante riesgos sísmicos y estableciendo un nuevo estándar para el monitoreo geofísico en entornos desafiantes.

2. Generalidades del Proyecto

- **Descripción:** El proyecto busca implementar un sistema para la detección de anomalías sísmicas. Utilizará inteligencia artificial para identificar patrones inusuales en la actividad sísmica, con un enfoque particular en su aplicación en zonas rurales.
- **Palabras Clave:** Detección de Anomalías, Sismología, Inteligencia Artificial, Zonas Rurales

3. Planteamiento del Problema y Justificación

La sismología es una ciencia fundamental para la comprensión de los fenómenos geofísicos y sus implicaciones en las poblaciones, siendo la detección y el análisis de la actividad sísmica cruciales para la evaluación de riesgos y la implementación de sistemas de alerta temprana. La capacidad de identificar y responder eficazmente a la actividad sísmica, especialmente en lo que respecta a la detección de anomalías, enfrenta desafíos inherentes que limitan una comprensión completa de los eventos geológicos y la protección de infraestructuras y comunidades. A pesar de los esfuerzos continuos por mejorar la instrumentación y las metodologías, la complejidad de los datos sísmicos y la diversidad de entornos geográficos demandan soluciones más avanzadas para optimizar el monitoreo.

Como la revisión de la literatura indica, la integración de la inteligencia artificial (IA) ha avanzado significativamente en el campo de la sismología. Trabajos pioneros como los de Sriram, Rahnamayan y Bourennani (2014) sentaron las bases para el uso de Redes Neuronales Artificiales (ANNs) en la predicción y detección de anomalías sísmicas. Más recientemente, Giunchi y Sadeghian (2019) exploraron el reconocimiento de fases sísmicas con arquitecturas de aprendizaje profundo como LSTMs, mientras que Yousefpour y Mojtahedi (2023) demostraron la eficacia de los AutoEncoders Convolucionales para la detección de anomalías estructurales. Estudios fundamentales de Lin et al. (2025) y Zhang et al. (2025) han abordado la detección de fallas en instrumentos y el manejo de datos contaminados. Sin embargo, a pesar de estos avances algorítmicos, existe una brecha crítica en la aplicación de estas sofisticadas soluciones de IA en el contexto específico de las zonas rurales y remotas. Estas áreas presentan desafíos únicos, como la escasez y baja calidad de datos, la conectividad limitada, las restricciones energéticas y una mayor probabilidad de datos sísmicos contaminados o incompletos, condiciones que los enfoques actuales no abordan completamente ni de manera optimizada.

El proyecto "Detección de Anomalías Sísmicas en Zonas Rurales mediante Inteligencia Artificial" surge como la respuesta directa e innovadora a esta brecha tecnológica y de conocimiento. Al implementar un sistema basado en inteligencia artificial diseñado específicamente para operar bajo las limitaciones inherentes a las zonas rurales, el proyecto busca optimizar la capacidad de identificar patrones inusuales en la actividad sísmica. Esto se logrará mediante el desarrollo y la adaptación de modelos de IA robustos que puedan procesar datos con escasez o baja calidad, y que sean eficientes en términos computacionales y energéticos, superando así las limitaciones de las metodologías actuales en estos entornos cruciales.

Este proyecto es oportuno y crítico, ya que la mejora en la detección de anomalías sísmicas en zonas rurales no solo fortalecerá la evaluación de riesgos y la capacidad de respuesta ante eventos geológicos en regiones a menudo desatendidas, sino que también contribuirá significativamente a la integridad de los datos sísmicos y al avance del conocimiento sismológico global. Su enfoque innovador en la adaptación de la IA a entornos con recursos limitados posiciona este proyecto como un catalizador para una gestión del riesgo sísmico más equitativa y efectiva, con un impacto sustancial en la seguridad de las comunidades y la sostenibilidad de las infraestructuras en el ámbito regional y nacional. Este esfuerzo es esencial para cerrar la brecha entre las capacidades tecnológicas avanzadas y las necesidades operativas en el terreno.

4. Marco Teórico y Estado del Arte

4.1. Introducción al Dominio

La sismología es la ciencia dedicada al estudio de los terremotos y la propagación de las ondas elásticas (sísmicas) a través de la Tierra (EcoExploratorio, n.d.). Su objetivo principal es comprender los fenómenos geofísicos que dan origen a estos eventos, así como sus implicaciones geológicas y el impacto en las poblaciones. La capacidad de detectar y analizar la actividad sísmica es fundamental para la evaluación de riesgos, la investigación geológica y la implementación de sistemas de alerta temprana.

En este contexto, la detección de anomalías sísmicas se refiere a la identificación de patrones, valores o eventos en los datos sísmicos que se desvían significativamente del comportamiento esperado o normal (Cienciadedatos.net, n.d.). Estas anomalías pueden indicar precursores sísmicos, eventos inusuales, fallas en equipos de monitoreo o cambios en las propiedades del subsuelo. La aplicación de la inteligencia artificial (IA) a este campo ha emergido como una herramienta poderosa para procesar grandes volúmenes de datos sísmicos y revelar patrones complejos que serían difíciles de discernir mediante métodos tradicionales, ofreciendo una nueva perspectiva para la comprensión y monitoreo de la actividad sísmica (Voz de América, n.d.).

4.2. Revisión de la Literatura (Literature Review)

La integración de la inteligencia artificial en la sismología ha avanzado significativamente en la última década, particularmente en la detección de anomalías. Sriram, Rahnamayan y Bourennani (2014) realizaron una revisión temprana sobre el uso de Redes Neuronales Artificiales (ANNs) para la detección de anomalías sísmicas y la predicción de terremotos. Su trabajo destacó el potencial de las ANNs para analizar múltiples precursores sísmicos, sentando las bases para futuras investigaciones en el campo.

Más recientemente, Giunchi y Sadeghian (2019) exploraron el reconocimiento de fases sísmicas utilizando redes Long Short-Term Memory (LSTM) en combinación con técnicas de detección de anomalías. Este enfoque subraya la capacidad de las arquitecturas de aprendizaje profundo para manejar datos de series temporales complejas y extraer características relevantes para la clasificación y la identificación de eventos sísmicos inusuales.

En la detección de anomalías estructurales o geológicas a partir de datos sísmicos, Yousefpour y Mojtahedi (2023) propusieron un método innovador para la detección temprana de la erosión interna en presas de tierra. Su investigación implementó AutoEncoders Convolucionales, un algoritmo de aprendizaje profundo no supervisado, para identificar patrones temporales en datos de monitoreo sísmico pasivo. Este estudio demuestra la eficacia de los autoencoders para aprender representaciones normales de los datos y señalar desviaciones que indican anomalías, lo cual es altamente relevante para el monitoreo de infraestructuras críticas.

Una contribución fundamental para la detección de anomalías en datos sísmicos de instrumentación es la de Lin et al. (2025), quienes propusieron un modelo de autoencoder profundo para la detección no supervisada de fallas en instrumentos sísmicos. Su modelo evalúa la calidad de los datos sin suposiciones previas sobre las anomalías, logrando identificar desviaciones que sugieren fallas incipientes en los equipos. Este enfoque es crucial para mantener la integridad de los datos en redes de monitoreo sísmico, especialmente en ubicaciones remotas donde el mantenimiento es desafiante.

Finalmente, Zhang et al. (2025) presentaron un enfoque de "Codificación y Descomposición" para la detección no supervisada de anomalías en series temporales con datos de entrenamiento contaminados. Aunque no es exclusivo de la sismología, este método es altamente aplicable a datos sísmicos de zonas rurales, donde la calidad de los datos puede ser variable y la presencia de ruido o anomalías menores en el conjunto de entrenamiento es común. Su trabajo aborda un desafío clave en la aplicación de modelos de aprendizaje automático en entornos reales con datos imperfectos.

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

El estado del arte en la detección de anomalías sísmicas mediante inteligencia artificial se caracteriza por el predominio de técnicas de aprendizaje profundo y no supervisado. Los **AutoEncoders** son ampliamente utilizados, como lo demuestran Yousefpour y Mojtahedi (2023) y Lin et al. (2025), debido a su capacidad para aprender una representación compacta de los datos "normales" y detectar anomalías como desviaciones de esta representación. Los **AutoEncoders Convolucionales (CAE)** son particularmente efectivos para datos sísmicos en series temporales, ya que pueden capturar características espaciales y temporales simultáneamente.

Las **Redes Neuronales Recurrentes (RNNs)**, especialmente las **Long Short-Term Memory (LSTM)**, son fundamentales para el análisis de series temporales sísmicas, como se vio en el trabajo de Giunchi y Sadeghian (2019). Estas redes son capaces de modelar dependencias a largo plazo en los datos, lo que es esencial para identificar patrones anómalos en secuencias sísmicas.

El aprendizaje no supervisado es un pilar en este campo, ya que la etiquetación manual de anomalías sísmicas es costosa y a menudo ambigua. Enfoques como el de Zhang et al. (2025) que manejan la contaminación en los datos de entrenamiento son vitales para la robustez de los modelos en entornos reales. Además, la IA ha demostrado una capacidad sin precedentes para identificar sismos de baja magnitud que anteriormente pasaban desapercibidos, mejorando significativamente la resolución de los catálogos sísmicos (Yahoo Noticias, n.d.).

Otros enfoques emergentes incluyen la combinación de IA con análisis cepstral para la detección de sismos (TFM_borrador_final_poster.pdf, n.d.) y la aplicación de IA para el análisis estructural en respuesta a eventos

sísmicos (Scientia Andes, n.d.), lo que indica una diversificación de las aplicaciones de la IA en la sismología. La capacidad de la IA para procesar imágenes satelitales y registros sísmicos también se utiliza en el monitoreo de actividad volcánica, un campo relacionado con la sismología (flypix.ai, n.d.).

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

A pesar de los avances significativos, existen brechas importantes en la aplicación de la detección de anomalías sísmicas mediante IA, especialmente en el contexto de las zonas rurales. La mayoría de los estudios se centran en la mejora algorítmica y la aplicación en datos de alta calidad, a menudo de redes sísmicas densas y bien mantenidas. Sin embargo, las **zonas rurales y remotas** presentan desafíos únicos, como la escasez de estaciones de monitoreo, la conectividad limitada para la transmisión de datos en tiempo real, las restricciones energéticas para los equipos y la mayor probabilidad de datos sísmicos contaminados o incompletos. Si bien se reconoce la importancia de estas zonas para la recopilación de información sísmica histórica (sisplade.oaxaca.gob.mx, n.d.), la implementación de sistemas de detección de anomalías con IA en estos entornos específicos aún no está completamente desarrollada.

La oportunidad radica en desarrollar y adaptar modelos de IA que sean robustos ante la escasez y la baja calidad de los datos, que puedan operar con recursos computacionales y energéticos limitados, y que integren fuentes de datos heterogéneas relevantes para entornos rurales. El proyecto propuesto busca abordar esta brecha, desarrollando un sistema de detección de anomalías sísmicas basado en IA que esté específicamente diseñado y optimizado para las condiciones y limitaciones inherentes a las zonas rurales, contribuyendo así a una comprensión más completa y una mejor gestión del riesgo sísmico en estas regiones.

5. Objetivos

Objetivo General

Optimizar la detección de anomalías sísmicas en zonas rurales y remotas mediante el desarrollo e implementación de modelos de inteligencia artificial robustos y eficientes, adaptados a las limitaciones inherentes de estos entornos.

Objetivos Específicos

1. **Objetivo:** Desarrollar y entrenar modelos de IA capaces de procesar y detectar anomalías sísmicas eficazmente a partir de datos escasos o de baja calidad, característicos de zonas rurales.

- **Específico (S):** Se refiere al desarrollo de algoritmos de IA (ej., AutoEncoders Convolucionales, redes neuronales adaptadas) que puedan manejar datos sísmicos incompletos, ruidosos o limitados en cantidad, utilizando técnicas de aumento de datos y aprendizaje por transferencia si es necesario.
- **Medible (M):** Los modelos deberán alcanzar una precisión de detección de anomalías del 85% y una tasa de falsos positivos inferior al 10% en conjuntos de datos simulados y reales de baja calidad, evaluados mediante métricas como F1-score y AUC.

- **Alcanzable (A):** Es alcanzable dada la capacidad de la IA para aprender de patrones complejos y la existencia de técnicas avanzadas de preprocesamiento de datos y aprendizaje con datos limitados, como se ha demostrado en la literatura reciente.
- **Relevante (R):** Aborda directamente una de las principales brechas (escasez y baja calidad de datos) mencionadas en el problema, siendo fundamental para la viabilidad del sistema en zonas rurales y contribuyendo al objetivo general de optimizar la detección.
- **Plazo (T):** Este objetivo se completará dentro de los primeros 12 meses del proyecto.

2. **Objetivo:** Diseñar e implementar modelos de inteligencia artificial computacionalmente eficientes y de bajo consumo energético para su despliegue en infraestructuras con recursos limitados en zonas rurales.

- **Específico (S):** Implica la selección y optimización de arquitecturas de IA (ej., modelos ligeros, cuantificación de modelos) y el desarrollo de estrategias de inferencia que minimicen los requisitos de procesamiento y consumo de energía, compatibles con dispositivos de bajo costo y autónomos.
- **Medible (M):** Los modelos implementados deberán demostrar una reducción del 30% en el consumo de energía y un aumento del 25% en la velocidad de inferencia en comparación con modelos estándar de rendimiento similar, medido en plataformas de hardware prototipo.
- **Alcanzable (A):** Es alcanzable mediante la aplicación de técnicas de optimización de modelos (ej., poda, cuantificación) y el uso de hardware especializado de bajo consumo, siguiendo las tendencias actuales en IA "edge computing".
- **Relevante (R):** Responde directamente a las limitaciones de conectividad y energía en zonas rurales, siendo crucial para la sostenibilidad y escalabilidad del sistema propuesto y para la consecución del objetivo general.
- **Plazo (T):** Este objetivo se logrará dentro de los 18 meses del inicio del proyecto.

3. **Objetivo:** Validar el sistema de detección de anomalías sísmicas basado en IA mediante su implementación y prueba en un entorno rural real seleccionado.

- **Específico (S):** Se refiere a la instalación de sensores sísmicos y del sistema de IA desarrollado en al menos una zona rural piloto, la recopilación de datos en tiempo real y la evaluación de su rendimiento operativo en condiciones reales.
- **Medible (M):** El sistema deberá operar de manera continua durante al menos 3 meses en el sitio piloto, demostrando una disponibilidad del 90% y una capacidad para detectar el 75% de las anomalías sísmicas registradas por la instrumentación de referencia. Se generarán informes de rendimiento detallados.
- **Alcanzable (A):** Es alcanzable con una planificación logística adecuada y la colaboración con comunidades locales o entidades gubernamentales para la selección y acceso al sitio, apoyado por la robustez de los modelos desarrollados en objetivos previos.
- **Relevante (R):** Es el paso final y crucial para demostrar la viabilidad y eficacia del proyecto en el mundo real, validando la solución a la brecha tecnológica y contribuyendo directamente al objetivo general.

- **Plazo (T):** La fase de implementación y validación en campo se completará en los últimos 6 meses del proyecto (meses 19-24).

6. Metodología Propuesta

Framework Seleccionado: Modelo en V de Ingeniería de Sistemas

La metodología del Modelo en V se selecciona por su idoneidad para proyectos que combinan el desarrollo de software (modelos de IA) con la integración de hardware y sistemas, especialmente donde la verificación y validación rigurosas son críticas. Este enfoque garantiza que los requisitos definidos se validen sistemáticamente a lo largo de cada fase, lo cual es esencial para un sistema de detección de anomalías sísmicas que operará en entornos rurales con recursos limitados. Permite una integración robusta de los modelos de IA desarrollados y optimizados (Objetivos 1 y 2) con la infraestructura de campo, asegurando que el sistema final cumpla con los estándares de rendimiento, eficiencia y fiabilidad requeridos para su validación en un entorno real (Objetivo 3).

Fases Principales de la Metodología:

- **Fase 1: Definición de Requisitos del Sistema** - Se establecerán y documentarán exhaustivamente los requisitos funcionales y no funcionales del sistema de detección de anomalías sísmicas, incluyendo criterios de rendimiento para los modelos de IA y especificaciones para la operación en entornos rurales.
- **Fase 2: Análisis y Diseño de Arquitectura** - Se descompondrán los requisitos del sistema en especificaciones detalladas para los componentes de software (modelos de IA) y hardware, definiendo la arquitectura general del sistema para garantizar la eficiencia computacional y el bajo consumo energético.
- **Fase 3: Diseño Detallado de Componentes** - Se elaborarán los diseños específicos para cada módulo del sistema, incluyendo la selección de algoritmos de IA, las estrategias de preprocesamiento de datos y las interfaces para la integración con sensores y plataformas de bajo consumo.
- **Fase 4: Implementación y Desarrollo** - Se procederá con el desarrollo y entrenamiento de los modelos de IA, la optimización de sus arquitecturas para eficiencia y la implementación de los componentes de software y hardware según los diseños detallados.
- **Fase 5: Pruebas Unitarias y de Integración** - Se realizarán pruebas exhaustivas de cada componente individual (pruebas unitarias) y de la interacción entre ellos (pruebas de integración) para asegurar que funcionen correctamente y se comuniquen eficientemente.
- **Fase 6: Pruebas del Sistema** - Se verificará el sistema completo e integrado contra los requisitos de diseño y funcionales, evaluando su rendimiento general, robustez y eficiencia en condiciones controladas.
- **Fase 7: Validación y Despliegue en Campo** - Se realizará la validación final del sistema en un entorno rural real, desplegando la solución y monitoreando su operación continua para confirmar que cumple con los objetivos de detección de anomalías y los requisitos operativos en condiciones reales.

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: Definición de Requisitos del Sistema	<i>Establecimiento de requisitos funcionales y no funcionales, incluyendo criterios de rendimiento de IA y especificaciones operativas rurales.</i>	6	
1.1. Recopilación y análisis de requisitos funcionales y no funcionales (operabilidad rural, limitaciones de recursos).	Documento de Requisitos del Sistema (SRS)	3	
1.2. Definición de especificaciones de datos sísmicos y criterios de rendimiento iniciales para modelos de IA.	Especificaciones de Datos y Rendimiento de IA	2	
1.3. Estudio de viabilidad técnica para la integración de sensores y plataformas de bajo consumo.	Informe de Viabilidad Técnica	1	
Fase 2: Análisis y Diseño de Arquitectura	<i>Descomposición de requisitos en especificaciones detalladas de software y hardware, definiendo la arquitectura general para eficiencia y bajo consumo energético.</i>	8	
2.1. Diseño de la arquitectura general del sistema (hardware y software), incluyendo módulos de IA, sensores y comunicación.	Documento de Arquitectura del Sistema	4	
2.2. Selección preliminar de tecnologías y frameworks para modelos de IA (manejo de datos escasos, eficiencia).	Informe de Selección Tecnológica	2	
2.3. Especificación de interfaces entre componentes de hardware y software.	Especificaciones de Interfaz	2	

Fase 3: Diseño Detallado de Componentes	<i>Elaboración de diseños específicos para cada módulo, incluyendo algoritmos de IA, estrategias de preprocesamiento de datos e interfaces para integración con sensores de bajo consumo.</i>	10	
3.1. Diseño detallado de modelos de IA (algoritmos, preprocesamiento y aumento de datos para escasez/ruido).	Documento de Diseño Detallado de Modelos de IA	4	
3.2. Diseño de estrategias de optimización de modelos de IA para eficiencia computacional y bajo consumo (poda, cuantificación).	Plan de Optimización de Modelos	3	
3.3. Diseño de la infraestructura de recolección y transmisión de datos sísmicos en entornos rurales.	Diseño de Infraestructura de Datos	3	
Fase 4: Implementación y Desarrollo	<i>Desarrollo y entrenamiento de modelos de IA, optimización de arquitecturas para eficiencia, e implementación de componentes de software y hardware según diseños detallados.</i>	24	
4.1. Desarrollo y entrenamiento inicial de modelos de IA con datos sísmicos (simulados/reales de baja calidad), aplicando técnicas para datos escasos.	Modelos de IA entrenados v1.0	10	
4.2. Implementación de optimizaciones de modelos de IA para eficiencia y bajo consumo energético.	Modelos de IA optimizados v1.0	6	
4.3. Desarrollo de módulos de software para interfaz con sensores y gestión de datos.	Módulos de Software desarrollados	4	
4.4. Prototipado y ensamblaje de componentes de hardware (plataforma de procesamiento, sensores).	Prototipo de Hardware	4	

Fase 5: Pruebas Unitarias y de Integración	<i>Realización de pruebas exhaustivas de cada componente individual y de la interacción entre ellos para asegurar funcionamiento y comunicación eficiente.</i>	12	
5.1. Pruebas unitarias de modelos de IA (precisión de detección, falsos positivos) en datos controlados.	Informes de Pruebas Unitarias de IA	5	
5.2. Pruebas de rendimiento y consumo energético de modelos de IA y hardware en prototipos.	Informes de Pruebas de Rendimiento y Consumo	4	
5.3. Pruebas de integración de módulos de software y hardware (comunicación, flujo de datos).	Informe de Pruebas de Integración	3	
Fase 6: Pruebas del Sistema	<i>Verificación del sistema completo e integrado contra requisitos de diseño y funcionales, evaluando rendimiento, robustez y eficiencia en condiciones controladas.</i>	12	
6.1. Pruebas funcionales y de rendimiento del sistema integrado en laboratorio (simulando condiciones rurales).	Informe de Pruebas del Sistema (Funcional y Rendimiento)	6	
6.2. Evaluación de la robustez del sistema y su capacidad para manejar variaciones en la calidad de datos.	Informe de Robustez del Sistema	3	
6.3. Verificación del consumo energético total y velocidad de inferencia en condiciones de operación simuladas.	Informe de Verificación de Eficiencia Energética	3	
Fase 7: Validación y Despliegue en Campo	<i>Validación final del sistema mediante implementación y prueba en un entorno rural real, monitoreando su operación continua para confirmar el cumplimiento de objetivos.</i>	24	
7.1. Planificación logística y selección del sitio piloto en zona rural (acuerdos con comunidades/entidades).	Plan de Despliegue en Campo	4	
7.2. Instalación y configuración del sistema de detección de anomalías sísmicas en el sitio piloto.	Sistema Desplegado en Sitio Piloto	4	

7.3. Monitoreo continuo y recopilación de datos de rendimiento del sistema en condiciones reales (3 meses).	Informes de Monitoreo de Campo (Mensuales)	12	
7.4. Análisis de datos de campo y evaluación de la disponibilidad y precisión de detección de anomalías.	Informe Final de Validación en Campo	4	

Matriz de Riesgos

7.2. Matriz de Riesgos

#	Riesgo Potencial	Probabilidad	Impacto	Estrategia de Mitigación
1	Rendimiento insuficiente del Modelo de IA <i>Relacionado con: Fase 4 (4.1, 4.2), Fase 5 (5.1, 5.2), Fase 6 (6.1, 6.2), Fase 7 (7.3, 7.4)</i>	Alta	Alto	Implementar técnicas avanzadas de preprocesamiento y aumento de datos para manejar la escasez y el ruido desde la Fase 3. Establecer criterios de rendimiento de IA realistas y escalonados desde la Fase 1 y revisarlos continuamente. Explorar arquitecturas de IA robustas y adaptativas (e.g., aprendizaje por transferencia, modelos de ensemble) que puedan generalizar mejor con datos limitados. Tener planes de contingencia para algoritmos alternativos o enfoques híbridos si el rendimiento inicial es insuficiente.

2	Problemas de integración de Hardware y alto consumo energético <i>
Relacionado con: Fase 1 (1.3), Fase 2 (2.1), Fase 3 (3.3), Fase 4 (4.4), Fase 5 (5.2, 5.3), Fase 6 (6.3)</i>	Media	Alto	Realizar pruebas de viabilidad técnica exhaustivas en la Fase 1 y 2 para la selección de componentes y tecnologías. Diseñar interfaces de hardware y software con especificaciones claras y estándares desde la Fase 2 y 3. Monitorear el consumo energético de cada componente desde la fase de prototipado (Fase 4) y realizar optimizaciones iterativas. Considerar el uso de hardware modular y fácilmente reemplazable para mitigar fallos de integración.
3	Escasez y baja calidad de los datos sísmicos <i>
Relacionado con: Fase 1 (1.2), Fase 3 (3.1), Fase 4 (4.1), Fase 7 (7.3, 7.4)</i>	Alta	Alto	Establecer colaboraciones tempranas con instituciones geológicas o sismológicas para acceder a bases de datos existentes o planificar campañas de recolección de datos preliminares. Investigar y aplicar activamente técnicas de aumento de datos (data augmentation) y aprendizaje semi-supervisado o no supervisado desde la Fase 3. Diseñar el modelo de IA para ser robusto ante datos ruidosos y escasos. Considerar la generación de datos sintéticos realistas si los datos reales son extremadamente limitados, validando su representatividad.

4	Desafíos logísticos y de despliegue en campo <i>Relacionado con: Fase 7 (7.1, 7.2, 7.3)</i>	Media	Medio	Iniciar la planificación logística y los acuerdos con comunidades/entidades desde fases tempranas (Fase 6). Realizar estudios de campo preliminares para evaluar la accesibilidad, infraestructura y condiciones ambientales de los sitios potenciales. Desarrollar un plan de despliegue detallado que incluya contingencias para transporte, energía y comunicación. Capacitar a personal local para tareas de monitoreo y mantenimiento básico.
5	Retrasos en el cronograma del proyecto <i>Relacionado con: Todas las fases, especialmente transiciones entre ellas.</i>	Media	Medio	Establecer hitos claros y realistas con márgenes de tiempo adecuados en el cronograma inicial. Implementar una gestión de proyectos ágil con revisiones periódicas del progreso y ajustes del plan. Identificar y gestionar proactivamente las dependencias críticas entre actividades y fases. Mantener una reserva de contingencia de tiempo y recursos para absorber retrasos menores. Comunicación constante y efectiva entre los equipos y con los stakeholders.

8. Resultados e Impactos Esperados

8.1. Resultados Esperados (Entregables)

- **Modelos de IA robustos y adaptados:** Modelos de inteligencia artificial entrenados y validados para la detección de anomalías sísmicas en datos escasos y de baja calidad, cumpliendo con los umbrales de precisión y falsos positivos establecidos. (Corresponde al Objetivo Específico 1).

- **Modelos de IA optimizados para Edge Computing:** Versiones optimizadas y cuantificadas de los modelos de IA, con una reducción demostrada en el consumo energético y un aumento en la velocidad de inferencia, listos para su despliegue en plataformas de hardware con recursos limitados. (Corresponde al Objetivo Específico 2).
- **Sistema de Detección de Anomalías Sísmicas validado en campo:** Un sistema integral de detección de anomalías sísmicas basado en IA, implementado y operando de manera continua en al menos un entorno rural real seleccionado, demostrando la disponibilidad y capacidad de detección requeridas. (Corresponde al Objetivo Específico 3).
- **Informe Técnico de Desarrollo y Optimización de Modelos:** Documentación exhaustiva que detalla las arquitecturas de IA desarrolladas, las estrategias de entrenamiento con datos limitados, las técnicas de optimización aplicadas y los resultados de las pruebas de laboratorio y comparativas de rendimiento.
- **Informe de Validación en Entorno Real:** Un informe detallado que documenta el proceso de implementación en el sitio piloto, la operación del sistema en condiciones reales, los resultados de rendimiento, la disponibilidad, las anomalías detectadas y las lecciones aprendidas durante la fase de validación en campo.

8.2. Impactos Esperados

• Impacto Técnico/Científico:

El proyecto avanzará significativamente el estado del arte en la aplicación de la inteligencia artificial para la detección de anomalías sísmicas, especialmente en contextos de datos limitados y baja calidad, que son predominantes en zonas rurales. Se desarrollarán y validarán metodologías innovadoras para el entrenamiento de modelos de IA con datos escasos y para su optimización para operar en entornos de "edge computing" con recursos computacionales y energéticos restringidos. Esto sentará las bases para futuras investigaciones en monitoreo geofísico asistido por IA en condiciones desafiantes y abrirá nuevas vías para la implementación de soluciones de IA robustas y eficientes en otros dominios con limitaciones similares.

• Impacto Económico:

La implementación de este sistema de detección de anomalías sísmicas basado en IA en zonas rurales generará un impacto económico positivo al reducir los costos operativos asociados con el monitoreo sísmico tradicional. Los modelos eficientes y de bajo consumo energético permitirán el uso de hardware más asequible y autónomo, disminuyendo la necesidad de infraestructura costosa y mantenimiento frecuente. Además, una detección más temprana y precisa de anomalías sísmicas puede mitigar significativamente las pérdidas económicas causadas por desastres naturales, protegiendo infraestructuras críticas y fomentando la estabilidad económica en regiones vulnerables al permitir una mejor planificación y respuesta.

• Impacto Social:

El principal impacto social de este proyecto será la mejora sustancial de la seguridad y el bienestar de las comunidades rurales y remotas expuestas a riesgos sísmicos. Al proporcionar un sistema de alerta temprana más preciso y fiable, se reducirá la vulnerabilidad de estas poblaciones, permitiendo una mejor preparación y una respuesta más eficaz ante eventos sísmicos. Esto contribuirá a salvar vidas, proteger propiedades y

reducir la ansiedad en las comunidades. Adicionalmente, el proyecto puede fomentar el desarrollo de capacidades locales en el manejo de tecnologías avanzadas y la colaboración entre entidades científicas y comunidades, fortaleciendo la resiliencia regional frente a desastres naturales.

9. Referencias Bibliográficas

- Cienciadedatos.net. (n.d.). *Detección de anomalías en series temporales*. Recuperado de <https://cienciadedatos.net/documentos/py62-deteccion-anomalias-series-temporales>
- EcoExploratorio. (n.d.). *¿Qué son los Terremotos?*. Recuperado de <https://ecoexploratorio.org/amenazas-naturales/terremotos/que-son-los-terremotos/>
- flypix.ai. (n.d.). *Evaluación integral de riesgos geológicos: integración de IA y* Recuperado de <https://flypix.ai/es/geohazard-risk-assessment/>
- Giunchi, C., & Sadeghian, R. (2019). Seismic Phases Recognition Based on Long Short Term Memory Networks and Anomaly Detection. *Proceedings of the 2019 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*.
- Lin, J. T., Aguiar, A. C., Kong, Q., Price, A. C., & Myers, S. C. (2025). Anomaly Detection in Seismic Data with Deep Learning: Application for Instrument Failure Detection and Forecasting. *Preprint*.
- sisplade.oaxaca.gob.mx. (n.d.). *PELIGROS DE ORIGEN GEOLÓGICO Y LOCALIZACIÓN DE* Recuperado de <https://sisplade.oaxaca.gob.mx/sisplade/PeligrosDocs/Tomo1/tomo1%20cap.1%20%20peligros%20de%20origen%20geologico%20y%20localizacion%20en%20zonas%20vulnerables.pdf>
- Scientia Andes. (n.d.). *Inteligencia Artificial Aplicada al Análisis Estructural*. Recuperado de <https://scientiaandes.org/index.php/1/article/download/9/8>
- Sriram, A., Rahnamayan, S., & Bourennani, F. (2014). Artificial Neural Networks for Earthquake Anomaly Detection. *International Journal of Computer Applications*, 97(14), 1-5.
- TFM_borrador_final_poster.pdf. (n.d.). *Detección de sismos utilizando análisis cepstral y algoritmos de* Recuperado de https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/pfigshare-u-files/17457584/TFM_borrador_final_poster.pdf
- Voz de América. (n.d.). *Terremotos: cómo la inteligencia artificial está cambiando la detección*. Recuperado de <https://www.vozdeamerica.com/a/panorama-terremotos-cpmo-la-inteligencia-artificial-esta-cambiando-la-deteccion-/7491197.html>
- Yahoo Noticias. (n.d.). *La IA está cambiando nuestra comprensión de los terremotos*. Recuperado de <https://es-us.noticias.yahoo.com/ia-cambiando-comprensi%C3%B3n-terremotos-140000443.html>
- Yousefpour, N., & Mojtahedi, F. F. (2023). Early detection of internal erosion in earth dams: combining seismic monitoring and convolutional AutoEncoders. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*.

- Zhang, B., Kieu, T., Qiu, X., Guo, C., Hu, J., Zhou, A., ... & Yang, B. (2025). An Encode-then-Decompose Approach to Unsupervised Time Series Anomaly Detection on Contaminated Training Data--Extended Version. *arXiv preprint arXiv:2510.XXXXX*. (Note: Year 2025 is based on ArXiv publication date, actual publication might be later or already happened).