

# Detección de Anomalías Sísmicas con Inteligencia Artificial

## 1. Resumen Ejecutivo

La sismología moderna enfrenta el desafío crítico de procesar volúmenes masivos de datos geofísicos, especialmente en zonas rurales con instrumentación limitada y datos ruidosos, donde los métodos tradicionales son insuficientes para identificar patrones sísmicos sutiles. Nuestro proyecto, "Detección de Anomalías Sísmicas con Inteligencia Artificial", aborda esta brecha desarrollando y validando modelos de IA innovadores, robustos y adaptativos para la detección temprana y contextualizada de anomalías en estos entornos, mejorando significativamente la capacidad de monitoreo y mitigación de riesgos sísmicos.

Para lograrlo, nuestra metodología se centra en la recopilación y el preprocesamiento riguroso de datos sísmicos rurales, seguido por el diseño y la adaptación de algoritmos de aprendizaje automático y profundo, optimizados para la escasez y el ruido de los datos. Posteriormente, validaremos el rendimiento de estos modelos con eventos históricos y estableceremos un marco para la interpretación geofísica de las anomalías. Este plan se ejecutará bajo el marco sistemático CRISP-DM, garantizando un enfoque estructurado y eficiente.

Los resultados clave incluyen un conjunto de datos sísmicos rurales preprocesado, modelos de IA que mejoran la precisión de detección de anomalías en al menos un 15% y reducen los falsos positivos en un 10%, y un protocolo de interpretación geofísica validado por expertos. Estos entregables generarán un impacto técnico al avanzar el estado del arte en entornos desafiantes, un impacto económico al reducir pérdidas por desastres y crear oportunidades comerciales, y un impacto social crucial al mejorar la seguridad y resiliencia de las comunidades rurales.

Este proyecto representa una inversión estratégica vital que transformará nuestra capacidad de respuesta ante eventos sísmicos, fortaleciendo la seguridad regional y sentando las bases para una vigilancia geofísica de vanguardia y más eficaz.

## 2. Generalidades del Proyecto

- **Descripción:** El proyecto tiene como objetivo principal la detección de anomalías sísmicas. Se propone el uso de inteligencia artificial para identificar patrones inusuales en zonas rurales, contribuyendo a una mejor comprensión y alerta temprana de eventos sísmicos.
- **Palabras Clave:** Inteligencia Artificial, Detección de Anomalías, Sismología, Zonas Rurales

## 3. Planteamiento del Problema y Justificación

La sismología, como disciplina fundamental para la comprensión de la dinámica interna de la Tierra y la mitigación de los riesgos sísmicos, enfrenta desafíos crecientes ante el volumen masivo y la complejidad inherente de los datos geofísicos. La detección de anomalías sísmicas, crucial para identificar precursores o eventos inusuales, ha dependido tradicionalmente de la experiencia humana y métodos estadísticos, los

cuales resultan insuficientes para procesar eficientemente la vasta cantidad de información actual y revelar patrones sutiles que pueden ser indicativos de eventos críticos. Este escenario global demanda soluciones más avanzadas para una vigilancia sísmica efectiva.

Como la revisión de la literatura y el estado del arte (secciones 4.1, 4.2 y 4.3) indican, la Inteligencia Artificial (IA) ha emergido como una herramienta poderosa, con algoritmos de aprendizaje automático como One-Class SVM e Isolation Forest, y modelos de aprendizaje profundo como CNN+GRU y DeepAnT, demostrando su capacidad para mejorar la precisión en la detección de anomalías y la predicción sísmica. Sin embargo, persiste una brecha crítica, particularmente destacada en la sección 4.4 "Brechas de Conocimiento y Oportunidades", relacionada con la disponibilidad y calidad de los datos sísmicos en zonas rurales, que a menudo presentan instrumentación limitada y datos ruidosos o incompletos. Esta situación genera una necesidad imperante de modelos de IA que sean robustos ante estas limitaciones y capaces de adaptarse a las características geológicas y sísmicas específicas de dichos entornos, proporcionando una comprensión contextualizada más allá de la mera detección estadística.

Este proyecto, "Detección de Anomalías Sísmicas con Inteligencia Artificial", se posiciona como la respuesta directa y necesaria para solventar esta brecha tecnológica y de conocimiento. Al proponer el uso de inteligencia artificial para identificar patrones inusuales en zonas rurales, el proyecto busca desarrollar o adaptar modelos de IA que no solo sean resilientes a las condiciones de datos desafiantes de estos entornos, sino que también permitan una interpretación geofísica localmente relevante. Esta aproximación innovadora representa el siguiente paso lógico para superar las limitaciones actuales y avanzar en la capacidad de monitoreo sísmico, ofreciendo una solución que los enfoques existentes no abordan de manera efectiva en estas regiones.

La relevancia estratégica de este proyecto es innegable, siendo oportuno y crítico en un contexto global de creciente preocupación por la preparación ante desastres naturales. Su implementación no solo fortalecerá la comprensión científica de los eventos sísmicos en regiones subestudiadas, sino que también tendrá un impacto directo en la mejora de los sistemas de alerta temprana, beneficiando a las comunidades rurales y a las organizaciones encargadas de la gestión de riesgos. Este enfoque innovador, centrado en la adaptación de la IA a desafíos específicos de datos y contexto, promete transformar la capacidad de respuesta y mitigación de riesgos sísmicos, contribuyendo significativamente a la seguridad y resiliencia regional.

## 4. Marco Teórico y Estado del Arte

### 4.1. Introducción al Dominio

La sismología, el estudio de los terremotos y las ondas sísmicas, es una disciplina fundamental para comprender la dinámica interna de la Tierra y mitigar los riesgos asociados a los eventos sísmicos. La detección de anomalías sísmicas se refiere a la identificación de patrones en los datos sísmicos que se desvían de un comportamiento normal o esperado. La dinámica interna de la Tierra y mitigar los riesgos asociados a los eventos sísmicos. La detección de anomalías sísmicas se refiere a la identificación de patrones en los datos sísmicos que se desvían de un comportamiento normal o esperado, lo cual puede ser indicativo de precursores sísmicos, eventos tectónicos inusuales o fallas en la instrumentación. Tradicionalmente, esta detección ha dependido en gran medida de la experiencia humana y de métodos

estadísticos complejos. Sin embargo, el volumen creciente de datos sísmicos y la complejidad inherente de los fenómenos geofísicos han impulsado la adopción de la Inteligencia Artificial (IA) como una herramienta poderosa para mejorar la precisión y la eficiencia de la detección de anomalías.

La integración de la IA en la sismología permite el procesamiento de grandes conjuntos de datos, la identificación de patrones sutiles que podrían pasar desapercibidos para los analistas humanos y la automatización de procesos de monitoreo. Esto es particularmente relevante en el contexto de la alerta temprana y la comprensión mejorada de eventos sísmicos, especialmente en regiones donde la infraestructura de monitoreo tradicional puede ser limitada o los patrones sísmicos son menos comprendidos, como las zonas rurales.

## **4.2. Revisión de la Literatura (Literature Review)**

La literatura reciente demuestra un interés creciente en la aplicación de técnicas de aprendizaje automático y aprendizaje profundo para la detección de anomalías sísmicas y la predicción de terremotos. Un estudio comparativo de Gregorius Airlangga (2024) evaluó algoritmos de aprendizaje automático como Local Outlier Factor (LOF), Isolation Forest y One-Class SVM para la detección de anomalías en datos sísmicos de Indonesia. Los resultados indicaron que One-Class SVM y Isolation Forest fueron los más efectivos, destacando la robustez de estos métodos para distinguir entre patrones sísmicos normales y anómalos. La investigación subrayó la importancia de seleccionar métodos apropiados para mejorar la precisión de los sistemas de predicción de terremotos.

En el ámbito de la predicción de tiempo de terremotos, Utku y Akcayol (2024) propusieron un modelo híbrido de aprendizaje profundo, CNN+GRU, que superó a modelos tradicionales como RF y ARIMA, así como a CNN y GRU individuales, en la predicción del tiempo del próximo terremoto. Este trabajo resalta el potencial de las arquitecturas híbridas de aprendizaje profundo para capturar dependencias temporales y espaciales complejas en datos sísmicos, lo cual es crucial para la alerta temprana.

Para la detección de anomalías no supervisadas en series de tiempo, que es fundamental cuando los datos anómalos son escasos o no están etiquetados, Li et al. (2023) desarrollaron un modelo de reconstrucción de densidad basado en un espacio de estados profundo y robusto. Este enfoque es capaz de manejar series de tiempo contaminadas con ruido durante el entrenamiento, una condición común en datos sísmicos reales. De manera similar, Munir et al. (2019) presentaron DeepAnT, un enfoque de aprendizaje profundo no supervisado basado en redes neuronales convolucionales (CNN) para detectar anomalías de punto, contextuales y de discordancia en series de tiempo, demostrando su capacidad para aprender el comportamiento normal de los datos sin depender de etiquetas de anomalías.

Finalmente, Wang et al. (2023) exploraron la predicción de la velocidad absoluta acumulada (CAV) para sistemas de alerta temprana de terremotos utilizando un modelo basado en redes neuronales convolucionales (DLCav). Este modelo end-to-end demostró la capacidad de predecir rápidamente CAV con buena precisión, lo que contribuye a una mejor estimación del daño por terremotos en sistemas de alerta temprana.

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

El estado del arte en la detección de anomalías sísmicas con inteligencia artificial se caracteriza por la predominancia de enfoques de aprendizaje automático y, en particular, de aprendizaje profundo. Las redes neuronales convolucionales (CNN) y las redes neuronales recurrentes (RNN), a menudo en configuraciones híbridas como CNN-GRU, son ampliamente utilizadas por su capacidad para procesar datos de series de tiempo y extraer características complejas. Los modelos no supervisados, como One-Class SVM, Isolation Forest y arquitecturas de aprendizaje profundo para la reconstrucción de densidad, son cruciales para abordar la escasez de datos sísmicos anómalos etiquetados.

Estos enfoques permiten la automatización de la detección de anomalías en datos geofísicos, la ampliación de los catálogos de sismos mediante la identificación de eventos que los sismólogos podrían pasar por alto, y la mejora en la predicción de eventos geotécnicos críticos (Yahoo Noticias, 2023; geofisik.com, 2023). La integración con sistemas de información geográfica (SIG) también es una tendencia clave para el modelado 3D y la contextualización espacial de las anomalías. Además, la capacidad de la IA para manejar datos ruidosos y de gran volumen es vital para el monitoreo sísmico en tiempo real y la mejora de los sistemas de alerta temprana.

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

A pesar de los avances significativos, existen brechas de conocimiento y oportunidades en la aplicación de la IA para la detección de anomalías sísmicas, especialmente en zonas rurales. Una limitación clave es la disponibilidad y calidad de los datos sísmicos en estas regiones, que a menudo carecen de la densa instrumentación presente en áreas urbanas o con mayor interés geológico. Esto puede llevar a conjuntos de datos "contaminados" o escasos, lo que dificulta el entrenamiento de modelos de IA robustos. La necesidad de modelos que funcionen eficazmente con datos ruidosos o incompletos, como los abordados por Li et al. (2023), es, por tanto, una oportunidad crucial.

Otra brecha radica en la adaptación de los modelos de IA existentes a las características geológicas y sísmicas específicas de las zonas rurales, que pueden diferir significativamente de las regiones más estudiadas. La interpretación de "patrones inusuales" en este contexto requiere no solo la detección de anomalías estadísticas, sino también la comprensión de su relevancia geofísica local. El proyecto propuesto se posiciona para abordar estas brechas al enfocarse en la detección de patrones inusuales en zonas rurales, desarrollando o adaptando modelos de IA que sean resilientes a las limitaciones de los datos en estos entornos y que puedan proporcionar una comprensión contextualizada para una alerta temprana efectiva.

## **5. Objetivos**

### **Objetivo General**

Desarrollar y validar modelos de Inteligencia Artificial innovadores, robustos y adaptativos para la detección temprana y contextualizada de anomalías sísmicas en zonas rurales con datos limitados y ruidosos, mejorando significativamente la capacidad de monitoreo y la mitigación de riesgos sísmicos.

### **Objetivos Específicos**

1. **Objetivo:** Recopilación y Preprocesamiento de Datos Sísmicos Rurales.

- **Específico (S):** Establecer una metodología rigurosa para la recopilación, curación y preprocesamiento de datos sísmicos heterogéneos y ruidosos provenientes de zonas rurales específicas (ej. Andes Centrales de Perú/Chile), abordando las limitaciones de instrumentación y la calidad de los datos para preparar un conjunto de datos apto para el entrenamiento de IA.

- **Medible (M):** Compilar un conjunto de datos sísmicos preprocesado de al menos 500 GB, con una reducción del ruido promedio del 20% y una tasa de completitud de datos del 85% para las estaciones seleccionadas, validado por expertos geofísicos, dentro de los primeros 6 meses del proyecto.

- **Alcanzable (A):** Sí, es alcanzable. Existen técnicas avanzadas de procesamiento de señales y la colaboración con instituciones sismológicas locales permitirá acceder y mejorar la calidad de los datos existentes, a pesar de las limitaciones iniciales.

- **Relevante (R):** Este objetivo es fundamental ya que aborda directamente la brecha crítica de la disponibilidad y calidad de datos en zonas rurales, siendo el paso inicial indispensable para el desarrollo de cualquier modelo de IA eficaz y relevante para el problema planteado.

- **Plazo (T):** Dentro de los primeros 6 meses de ejecución del proyecto.

## 2. **Objetivo:** Desarrollo y Adaptación de Modelos de IA para Detección de Anomalías.

- **Específico (S):** Diseñar, desarrollar y adaptar al menos dos algoritmos de aprendizaje automático o profundo (ej. una combinación de One-Class SVM/Isolation Forest y un modelo de Deep Learning como CNN+GRU o DeepAnT) que sean robustos ante la escasez y el ruido de los datos sísmicos rurales, optimizándolos para la identificación de patrones anómalos.

- **Medible (M):** Implementar modelos de IA que demuestren una mejora mínima del 15% en la precisión de detección de anomalías y una reducción del 10% en la tasa de falsos positivos en comparación con los métodos estadísticos tradicionales, evaluados en el conjunto de datos rurales preprocesado, al final del mes 12.

- **Alcanzable (A):** Sí, es alcanzable. La literatura actual y el estado del arte demuestran la viabilidad de aplicar y adaptar estos modelos de IA a problemas de series temporales y detección de anomalías, y la optimización específica para datos ruidosos es un foco clave del proyecto.

- **Relevante (R):** Este objetivo es el núcleo del proyecto, ya que se enfoca en la creación de la solución tecnológica (modelos de IA robustos) para superar las limitaciones de los métodos actuales y la brecha de conocimiento en la detección de anomalías en entornos desafiantes.

- **Plazo (T):** Al finalizar el mes 12 de ejecución del proyecto.

## 3. **Objetivo:** Validación y Contextualización Geofísica de los Resultados.

- **Específico (S):** Validar el rendimiento de los modelos de IA desarrollados utilizando eventos sísmicos históricos conocidos en las regiones rurales de estudio y establecer un marco para la interpretación geofísica de las anomalías detectadas, asegurando su relevancia contextual.

- **Medible (M):** Validar los modelos con una tasa de éxito del 90% en la identificación de al menos 10 eventos sísmicos históricos significativos en las zonas de estudio. Adicionalmente, se desarrollará un protocolo de interpretación geofísica que permita contextualizar el 80% de las anomalías detectadas, siendo este aprobado por un panel de tres geofísicos expertos, al final del mes 18.
- **Alcanzable (A):** Sí, es alcanzable. La colaboración con expertos en sismología y geofísica permitirá la revisión y validación de los resultados, así como el desarrollo de criterios de interpretación basados en el conocimiento del terreno.
- **Relevante (R):** Este objetivo asegura que las detecciones de IA no solo sean estadísticamente correctas, sino también geofísicamente significativas y útiles para la toma de decisiones, cerrando la brecha de una "comprensión contextualizada más allá de la mera detección estadística". Contribuye directamente a la mejora de la capacidad de monitoreo.
- **Plazo (T):** Al finalizar el mes 18 de ejecución del proyecto.

## 6. Metodología Propuesta

**Framework Seleccionado:** CRISP-DM (Cross-Industry Standard Process for Data Mining)

El marco CRISP-DM se selecciona por su idoneidad inherente para proyectos de investigación y desarrollo centrados en la minería de datos y el aprendizaje automático. Su naturaleza iterativa y sus fases claramente definidas se alinean perfectamente con los objetivos del proyecto "Detección de Anomalías Sísmicas con Inteligencia Artificial". Permite una comprensión profunda del problema geofísico (Objetivo General), asegura una gestión rigurosa de los datos sísmicos ruidosos y limitados (Objetivo Específico 1), facilita el desarrollo y la adaptación sistemática de modelos de IA (Objetivo Específico 2), y garantiza una evaluación exhaustiva y una contextualización geofísica crítica de los resultados (Objetivo Específico 3), minimizando riesgos y maximizando la relevancia de la solución propuesta.

### Fases Principales de la Metodología:

- **Fase 1: Comprensión del Negocio (Business Understanding)** - Definición de los objetivos del proyecto desde una perspectiva geofísica y de ingeniería, identificando los requisitos clave para la detección temprana y contextualizada de anomalías sísmicas en zonas rurales.
- **Fase 2: Comprensión de los Datos (Data Understanding)** - Recopilación inicial de datos sísmicos disponibles, exploración de sus características y calidad, e identificación de los desafíos inherentes a los datos rurales limitados y ruidosos.
- **Fase 3: Preparación de los Datos (Data Preparation)** - Implementación de metodologías rigurosas de curación, limpieza, preprocesamiento y transformación de los datos sísmicos para crear un conjunto de datos robusto y apto para el entrenamiento de modelos de IA.
- **Fase 4: Modelado (Modeling)** - Diseño, desarrollo y adaptación de algoritmos de Inteligencia Artificial (aprendizaje automático y profundo) para la detección de patrones anómalos en los datos sísmicos preprocesados, con un enfoque en la robustez ante el ruido y la escasez de datos.

- **Fase 5: Evaluación (Evaluation)** - Validación exhaustiva del rendimiento de los modelos de IA desarrollados utilizando eventos sísmicos históricos conocidos y métricas de detección de anomalías, asegurando que cumplen con los objetivos de precisión y reducción de falsos positivos.
- **Fase 6: Despliegue (Deployment)** - Establecimiento de un marco para la interpretación geofísica de las anomalías detectadas por los modelos, asegurando su relevancia contextual y preparando la integración de los resultados para mejorar la capacidad de monitoreo sísmico.

## 7. Plan de Ejecución y Gestión

### Cronograma de Actividades

#### 7.1. Cronograma de Actividades

Fase	Actividad / Hito Clave	Entregable Principal	Duración Estimada (Semanas)
<b>Fase 1: Comprensión del Negocio</b>	<i>Definición de objetivos del proyecto, requisitos clave y criterios de éxito iniciales desde una perspectiva geofísica y de ingeniería.</i>	<b>2</b>	
1.1. Revisión de literatura y estado del arte en detección de anomalías sísmicas y IA.	Informe de Revisión Bibliográfica	1	
1.2. Definición detallada de requisitos técnicos y operativos del sistema.	Documento de Requisitos Técnicos	1	
<b>Fase 2: Comprensión de los Datos</b>	<i>Recopilación inicial de datos sísmicos, exploración de sus características y calidad, e identificación de desafíos inherentes a los datos rurales limitados y ruidosos.</i>	<b>4</b>	
2.1. Identificación y contacto con fuentes de datos sísmicos en zonas rurales.	Lista de Fuentes de Datos y Acuerdos de Acceso	2	
2.2. Recopilación inicial de conjuntos de datos sísmicos brutos y metadatos.	Dataset Sísmico Bruto Inicial	1	
2.3. Análisis exploratorio de datos (EDA) para evaluar calidad, ruido y completitud.	Informe de Análisis Exploratorio de Datos	1	

<b>Fase 3: Preparación de los Datos</b>	<i>Implementación de metodologías rigurosas de curación, limpieza, preprocesamiento y transformación de los datos sísmicos para crear un conjunto de datos robusto y apto para el entrenamiento de modelos de IA.</i>	<b>18</b>	
3.1. Diseño e implementación de pipelines de preprocesamiento de datos sísmicos (filtrado, denoising).	Pipeline de Preprocesamiento de Datos (Código)	6	
3.2. Curación y limpieza de datos: manejo de valores faltantes y anomalías conocidas.	Dataset Sísmico Curado y Limpio	6	
3.3. Normalización y transformación de datos para modelos de IA.	Conjunto de Datos Sísmicos Preprocesado (min. 500 GB)	4	
3.4. Validación del conjunto de datos preprocesado con expertos geofísicos.	Informe de Validación de Datos por Expertos	2	
<b>Fase 4: Modelado</b>	<i>Diseño, desarrollo y adaptación de algoritmos de Inteligencia Artificial para la detección de patrones anómalos en los datos sísmicos preprocesados, con un enfoque en la robustez ante el ruido y la escasez de datos.</i>	<b>24</b>	
4.1. Selección y diseño de arquitecturas de modelos de IA (ej. One-Class SVM/Isolation Forest, CNN+GRU/DeepAnT).	Documento de Diseño de Modelos de IA	4	
4.2. Implementación y entrenamiento inicial de los modelos de IA.	Prototipos de Modelos de IA (v1.0)	10	
4.3. Optimización de hiperparámetros y ajuste de modelos para robustez y escasez de datos.	Modelos de IA Optimizados	8	
4.4. Desarrollo de métricas de rendimiento específicas para detección de anomalías sísmicas.	Informe de Métricas de Rendimiento	2	

<b>Fase 5: Evaluación</b>	<i>Validación exhaustiva del rendimiento de los modelos de IA desarrollados utilizando eventos sísmicos históricos conocidos y métricas de detección de anomalías, asegurando que cumplen con los objetivos de precisión y reducción de falsos positivos.</i>	<b>12</b>	
5.1. Diseño y ejecución de pruebas de validación con eventos sísmicos históricos conocidos.	Plan de Pruebas y Casos de Uso	3	
5.2. Análisis de rendimiento de los modelos y comparación con métodos tradicionales.	Informe de Resultados de Evaluación de Modelos	5	
5.3. Refinamiento iterativo de modelos basado en los resultados de la evaluación.	Modelos de IA Validados (v2.0)	4	
<b>Fase 6: Despliegue</b>	<i>Establecimiento de un marco para la interpretación geofísica de las anomalías detectadas por los modelos, asegurando su relevancia contextual y preparando la integración para mejorar la capacidad de monitoreo sísmico.</i>	<b>12</b>	
6.1. Desarrollo de un protocolo para la interpretación geofísica de anomalías detectadas.	Protocolo de Interpretación Geofísica	4	
6.2. Colaboración con geofísicos expertos para la validación y contextualización de las anomalías.	Informe de Contextualización de Anomalías (Validado por Expertos)	4	
6.3. Preparación de recomendaciones para la integración de los modelos en sistemas de monitoreo existentes.	Recomendaciones de Integración del Sistema	2	
6.4. Redacción del informe final del proyecto y difusión de resultados.	Informe Final del Proyecto y Presentación de Resultados	2	

## Matriz de Riesgos

### 7.2. Matriz de Riesgos

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

1	<b>Acceso y Calidad de Datos Sísmicos Rurales Limitados</b> Relacionado con: Fase 2: Comprensión de los Datos (2.1, 2.2, 2.3)	Medium	High	Establecer acuerdos de colaboración con múltiples instituciones desde el inicio. Desarrollar un plan de contingencia para la adquisición de datos alternativos (ej. datos sintéticos o de fuentes secundarias). Realizar un análisis exploratorio de datos (EDA) riguroso y temprano para identificar problemas de calidad y ruido, y priorizar la implementación de pipelines de preprocesamiento robustos.
2	<b>Rendimiento Insuficiente del Modelo de IA</b> Relacionado con: Fase 4: Modelado (4.2, 4.3) y Fase 5: Evaluación (5.2, 5.3)	Medium	High	Adoptar un enfoque iterativo y comparativo, comenzando con modelos de IA más sencillos como línea base antes de avanzar a arquitecturas complejas. Implementar técnicas de validación cruzada y desarrollo de métricas de rendimiento específicas para datos ruidosos y escasos. Asignar tiempo extra para la optimización de hiperparámetros y el refinamiento iterativo de modelos basado en la evaluación.

3	<b>Retrasos en la Fase de Preparación y Curación de Datos</b>  Relacionado con: Fase 3: Preparación de los Datos (3.1, 3.2, 3.3)	High	Medium	Desglosar la fase en hitos más pequeños y manejables con entregables intermedios. Asignar un equipo dedicado a la ingeniería de datos con experiencia en el manejo de grandes volúmenes de datos sísmicos. Incorporar revisiones periódicas con expertos geofísicos para validar la calidad y el formato de los datos preprocesados de manera temprana.
4	<b>Discrepancia o Desacuerdo en la Validación por Expertos Geofísicos</b>  Relacionado con: Fase 3: Preparación de los Datos (3.4), Fase 5: Evaluación (5.1), Fase 6: Despliegue (6.2)	Medium	Medium	Establecer un protocolo claro y consensuado para la validación y contextualización de datos y anomalías desde las primeras fases del proyecto. Realizar talleres regulares con los expertos para asegurar la alineación de expectativas y criterios de evaluación. Documentar detalladamente todos los criterios de decisión y las interpretaciones para referencia futura.
5	<b>Desafíos en la Integración y Escalabilidad del Sistema de Monitoreo</b>  Relacionado con: Fase 6: Despliegue (6.3, 6.4)	Medium	High	Diseñar los modelos y protocolos con una arquitectura modular y APIs bien definidas para facilitar la integración. Involucrar a los equipos de TI y operaciones de los sistemas de monitoreo existentes desde la Fase 1 para entender las restricciones técnicas y los requisitos de compatibilidad. Realizar pruebas piloto de integración en un entorno controlado antes del despliegue final.

6	<b>Disponibilidad de Recursos Humanos Clave y Expertos</b>  >Relacionado con: Todas las Fases	Low	High	Documentar exhaustivamente todos los procesos, el código y las metodologías desarrolladas para mitigar el impacto de la pérdida de personal clave. Fomentar la capacitación cruzada dentro del equipo para distribuir el conocimiento. Identificar consultores externos o expertos de respaldo que puedan intervenir si es necesario.
---	---	-----	------	---

## 8. Resultados e Impactos Esperados

### #### 8.1. Resultados Esperados (Entregables)

- **Conjunto de Datos Sísmicos Rurales Preprocesado:** Un dataset compilado de al menos 500 GB de datos sísmicos rurales, curado y preprocesado con una reducción del ruido promedio del 20% y una completitud del 85%, validado por expertos geofísicos. Este entregable es fundamental para el Objetivo Específico 1.
- **Modelos de Inteligencia Artificial para Detección de Anomalías Sísmicas:** Al menos dos algoritmos de IA (ej. One-Class SVM/Isolation Forest y un modelo de Deep Learning como CNN+GRU o DeepAnT) desarrollados y adaptados, demostrando una mejora mínima del 15% en la precisión de detección de anomalías y una reducción del 10% en la tasa de falsos positivos. Este es el resultado clave del Objetivo Específico 2.
- **Informe de Validación de Modelos de IA y Protocolo de Interpretación Geofísica:** Un informe detallado que valida los modelos de IA con una tasa de éxito del 90% en la identificación de eventos sísmicos históricos. Incluye un protocolo de interpretación geofísica aprobado por un panel de expertos, permitiendo contextualizar el 80% de las anomalías detectadas. Corresponde al Objetivo Específico 3.

### #### 8.2. Impactos Esperados

#### • Impacto Técnico/Científico:

Este proyecto avanzará significativamente el estado del arte en la detección de anomalías sísmicas, particularmente en entornos desafiantes con datos limitados y ruidosos. Se desarrollarán metodologías innovadoras para el preprocesamiento de datos sísmicos en zonas de baja instrumentación y se crearán modelos de IA robustos y adaptativos que superarán las limitaciones de los métodos estadísticos tradicionales. La validación geofísica de los resultados no solo confirmará la eficacia de la IA, sino que también establecerá un nuevo paradigma para la interpretación contextualizada de eventos sísmicos, cerrando la brecha entre la detección algorítmica y la comprensión geofísica.

- **Impacto Económico:**

La mejora en la detección temprana y contextualizada de anomalías sísmicas resultará en una mayor capacidad de preparación y mitigación de riesgos, lo que puede traducirse en una reducción significativa de las pérdidas económicas asociadas a desastres sísmicos en zonas rurales. La tecnología desarrollada podría ser licenciada o comercializada, generando nuevas oportunidades de negocio y fortaleciendo la competitividad de las instituciones involucradas en el monitoreo sísmico. Además, la optimización de los sistemas de monitoreo podría llevar a una asignación más eficiente de recursos y una reducción de los costos operativos a largo plazo.

- **Impacto Social:**

El impacto social de este proyecto es sustancial, ya que la detección temprana de anomalías sísmicas mejorará directamente la seguridad y la resiliencia de las comunidades rurales en regiones sísmicamente activas, como los Andes Centrales. Al proporcionar alertas más precisas y contextualizadas, se facilitará una mejor toma de decisiones por parte de las autoridades de protección civil y las comunidades, permitiendo evacuaciones más oportunas y la implementación de medidas preventivas. Esto no solo reducirá la pérdida de vidas y lesiones, sino que también disminuirá la ansiedad y el estrés en poblaciones vulnerables, fomentando una mayor confianza en los sistemas de alerta temprana y contribuyendo a un desarrollo más seguro y sostenible de estas regiones.

## 9. Referencias Bibliográficas

- Airlangga, G. (2024). *ADVANCED MACHINE LEARNING TECHNIQUES FOR SEISMIC ANOMALY DETECTION IN INDONESIA: A COMPARATIVE STUDY OF LOF, ISOLATION FOREST, AND ONE-CLASS SVM.*
- Airlangga, G. (2024). *ANALYSIS OF MACHINE LEARNING ALGORITHMS FOR SEISMIC ANOMALY DETECTION IN INDONESIA: UNVEILING PATTERNS IN THE PACIFIC RING OF FIRE.*
- geofisik.com. (2023). *Integración de IA y machine learning en la interpretación geofísica.* Recuperado de <https://geofisik.com/blog/innovacion-tecnologica/tendencias-2025-integracion-ia-machine-learning-interpretacion-geofisica/>
- Li, L., Yan, J., Wen, Q., Jin, Y., & Yang, X. (2023). Learning Robust Deep State Space for Unsupervised Anomaly Detection in Contaminated Time-Series.
- Munir, M., Siddiqui, S. A., Dengel, A., & Ahmed, S. (2019). DeepAnT: A Deep Learning Approach for Unsupervised Anomaly Detection in Time Series.
- Utku, A., & Akcayol, M. A. (2024). Hybrid Deep Learning Model for Earthquake Time Prediction.
- Wang, Y., Zhao, Q., Qian, K., Wang, Z., Cao, Z., & Wang, J. (2023). Cumulative absolute velocity prediction for earthquake early warning with deep learning.
- Yahoo Noticias. (2023). *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>

