

SSTSDS-Vol.4. N1. 096

Sistema inteligente para detectar movimientos sísmicos: una revisión sistemática

Intelligent systems for seismic motion detection: a systematic review

Autores:

Marlon Jonathan Estrella Semblantes
Universidad Estatal Amazónica
Puyo – Ecuador

mj.estrellas@uea.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0009-5543-8193>

David Sebastián Pozo Guapucal
Universidad Estatal Amazónica
Puyo – Ecuador

ds.pozog@uea.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0006-7823-8459>

Ángel Mesías Gualpa Mamarandi
Universidad Estatal Amazónica
Puyo – Ecuador

am.gualpam@uea.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0003-2897-3250>

Autor de correspondencia Marlon Jonathan Estrella Semblantes, mj.estrellas@uea.edu.ec

Enviado: 23-07-2026

Aceptado: 10-08-2026

Revisado: 28-07-2026

Publicado: 12-08-2026



Cómo citar este artículo:

Estrella Semblantes, M. J., Pozo Guapucal, D. S., & Gualpa Mamarandi, Ángel M. (2026). Sistema inteligente para detectar movimientos sísmicos: una revisión sistemática. *Sage Sphere of Technology, Sciences, Discoveries And Society*, 4(1), 1-36. <https://doi.org/10.63688/kfafxt40>

© 2026; Los autores. Este es un artículo en acceso abierto, distribuido bajo los términos de una licencia Creative Commons (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>) que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea correctamente citada.



RESUMEN

Los movimientos sísmicos representan uno de los fenómenos naturales con mayor impacto social debido a su capacidad destructiva y a la dificultad de anticipar su ocurrencia. Ante esta problemática, el desarrollo de sistemas inteligentes basados en sensores físicos e inteligencia artificial ha surgido como una alternativa tecnológica para mejorar la detección temprana, el análisis de señales sísmicas y la reducción del riesgo asociado a terremotos. El objetivo de esta investigación fue analizar la evidencia científica reciente sobre la aplicación de sistemas inteligentes para el monitoreo sísmico mediante una revisión sistemática de literatura. Se aplicó un enfoque cualitativo descriptivo-analítico siguiendo las directrices PRISMA 2020, considerando estudios publicados entre 2020 y 2026 en bases de datos académicas como Scopus, Web of Science, ScienceDirect, IEEE Xplore, SpringerLink y otras fuentes científicas. De un total de 122 registros identificados, después del proceso de selección y aplicación de criterios de elegibilidad, se incluyeron 24 estudios para el análisis final. Los resultados evidenciaron que la integración de sensores físicos con algoritmos de aprendizaje automático y aprendizaje profundo permite mejorar la identificación de patrones sísmicos, el reconocimiento automatizado de ondas y la generación de alertas tempranas. Asimismo, se identificó que estas tecnologías presentan desafíos relacionados con la disponibilidad de datos, adaptación a diferentes condiciones geológicas, validación de modelos y requerimientos de infraestructura tecnológica. Se concluye que los sistemas inteligentes representan una herramienta complementaria para fortalecer los mecanismos tradicionales de monitoreo sísmico, favoreciendo estrategias más rápidas y eficientes para la prevención y gestión del riesgo.

Palabras clave: inteligencia artificial; sensores sísmicos; aprendizaje profundo; detección sísmica; alerta temprana; revisión sistemática.

ABSTRACT

Seismic movements represent one of the natural phenomena with the greatest social impact due to their destructive potential and the difficulty of accurately predicting their occurrence. In response to this challenge, the development of intelligent systems based on physical sensors and artificial intelligence has emerged as a technological alternative to improve early detection, seismic signal analysis, and earthquake risk reduction. This study aimed to analyze recent scientific evidence regarding the application of intelligent systems for seismic monitoring through a systematic literature review. A qualitative descriptive-analytical approach was applied following the PRISMA 2020 guidelines, considering studies published between 2020 and 2026 from academic databases such as Scopus, Web of Science, ScienceDirect, IEEE Xplore, SpringerLink, and other scientific sources. From a total of 122 identified records, 24 studies were included after applying the established selection and eligibility criteria. The findings showed that the integration of physical sensors with machine learning and deep learning algorithms improves seismic pattern recognition, automated wave identification, and early warning generation. Additionally, the reviewed evidence revealed challenges related to data availability, adaptation to different geological conditions, model validation, and technological infrastructure requirements. It is concluded that intelligent systems represent a complementary tool to traditional seismic monitoring approaches, contributing to faster and more efficient strategies for earthquake risk prevention and management.

Keywords: artificial intelligence; seismic sensors; deep learning; earthquake detection; early warning systems; systematic review.



1. INTRODUCCIÓN

La detección temprana de movimientos sísmicos se ha convertido en un área de gran relevancia dentro de la investigación científica debido a los efectos destructivos que los terremotos generan sobre las poblaciones, infraestructuras y sistemas económicos a nivel mundial. Estos fenómenos naturales se caracterizan por la liberación repentina de energía acumulada en la corteza terrestre, produciendo ondas sísmicas capaces de ocasionar daños significativos en cuestión de segundos. Frente a esta problemática, los avances tecnológicos han transformado las estrategias tradicionales de monitoreo, permitiendo el desarrollo de sistemas más rápidos y precisos mediante la integración de sensores físicos, procesamiento computacional e inteligencia artificial. Estas innovaciones han permitido crear nuevas alternativas orientadas a mejorar la identificación de eventos sísmicos y fortalecer los mecanismos de alerta temprana para reducir los impactos asociados a estos fenómenos (Beroza et al., 2021; Mousavi & Beroza, 2022).

Durante los últimos años, los sistemas de observación sísmica han evolucionado significativamente debido al incremento de redes de sensores digitales y a la disponibilidad de grandes volúmenes de información generados continuamente. A pesar de estos avances tecnológicos, todavía existen limitaciones relacionadas con la capacidad de los sistemas inteligentes para adaptarse a diferentes condiciones geológicas, la disponibilidad de bases de datos sísmicas representativas y la necesidad de validar los modelos desarrollados en escenarios reales. Estas limitaciones dificultan la implementación generalizada de herramientas basadas en inteligencia artificial para la detección temprana de movimientos sísmicos. Por ello, resulta necesario analizar y sintetizar la evidencia científica disponible para identificar los principales avances, metodologías empleadas y desafíos actuales.

Sin embargo, a pesar del crecimiento de estas tecnologías, persisten limitaciones relacionadas con la generalización de los modelos de inteligencia artificial en diferentes regiones sísmicas, la disponibilidad de bases de datos suficientemente representativas y la necesidad de validar estos sistemas bajo condiciones reales de operación. Por ello, resulta necesario sintetizar la evidencia científica reciente para identificar los avances alcanzados, los principales enfoques tecnológicos empleados y los desafíos pendientes en la implementación de sistemas inteligentes para la detección sísmica.



Los métodos convencionales han proporcionado conocimientos fundamentales sobre la actividad tectónica; no obstante, presentan limitaciones relacionadas con la velocidad de análisis, la cobertura territorial y la capacidad de procesamiento de datos en tiempo real. Frente a estas restricciones, la incorporación de sensores físicos distribuidos y tecnologías inteligentes ha permitido desarrollar plataformas capaces de recopilar, procesar e interpretar información sísmica con mayor eficiencia. De acuerdo con Kong et al. (2020), las redes de sensores complementadas con herramientas computacionales representan una alternativa prometedora para ampliar la capacidad de monitoreo y mejorar la respuesta ante eventos sísmicos.

Dentro de esta evolución tecnológica, la inteligencia artificial ha adquirido un papel fundamental en la transformación de la sismología moderna debido a su capacidad para reconocer patrones complejos dentro de señales que pueden ser difíciles de interpretar mediante métodos tradicionales. Los algoritmos de aprendizaje automático y aprendizaje profundo permiten analizar registros sísmicos, identificar características relevantes y clasificar eventos de manera automatizada, reduciendo el tiempo requerido para la evaluación de la información. Según Mousavi et al. (2020), los modelos basados en redes neuronales profundas han demostrado una elevada capacidad para detectar terremotos y reconocer fases sísmicas, superando algunas limitaciones presentes en los procedimientos convencionales.

La aplicación de estas tecnologías no se limita únicamente a la detección de terremotos, sino que también contribuye al análisis de las ondas sísmicas responsables de la propagación de la energía liberada durante estos eventos. La identificación temprana de ondas primarias (P) y secundarias (S) constituye un elemento esencial dentro de los sistemas de alerta, debido a que permite estimar rápidamente las características iniciales del movimiento antes de la llegada de las ondas con mayor potencial destructivo. En este sentido, los modelos de inteligencia artificial han demostrado ser capaces de reconocer señales dentro de registros complejos, incluso cuando presentan interferencias ocasionadas por ruido ambiental u otras fuentes externas (Zhu et al., 2021; Ross et al., 2020).

El desarrollo de sensores físicos de menor costo y mayor accesibilidad también ha favorecido la expansión de redes de monitoreo sísmico en diferentes regiones. Estos dispositivos permiten registrar continuamente aceleraciones, vibraciones y desplazamientos del terreno, generando información que puede ser procesada mediante algoritmos inteligentes



para identificar cambios asociados con actividad sísmica. A diferencia de las infraestructuras tradicionales, las redes distribuidas ofrecen la posibilidad de incrementar la cantidad de puntos de observación y mejorar la resolución espacial de los sistemas de detección. Bajo esta perspectiva, la combinación entre sensores físicos, comunicación digital e inteligencia artificial representa una estrategia innovadora para fortalecer la prevención de riesgos naturales (Kong et al., 2020; Meier et al., 2021).

La integración de inteligencia artificial en los sistemas sísmicos también ha permitido avanzar hacia modelos capaces de realizar análisis automatizados relacionados con la localización, caracterización y evaluación inicial de los terremotos. Los algoritmos actuales pueden extraer información relevante desde grandes bases de datos, identificar relaciones complejas entre variables y generar estimaciones rápidas que apoyan la toma de decisiones durante situaciones de emergencia. Como señalan Bergen et al. (2020), el aprendizaje automático ofrece nuevas oportunidades para la investigación geocientífica al facilitar el descubrimiento de patrones que anteriormente requerían procesos manuales extensos.

A pesar de los avances alcanzados, la implementación de sistemas inteligentes para la detección sísmica continúa enfrentando desafíos relacionados con la calidad de los datos, la disponibilidad de registros suficientes para entrenar modelos confiables y la necesidad de validar su funcionamiento en escenarios reales. Los algoritmos pueden presentar variaciones en su desempeño cuando son aplicados en regiones con diferentes características geológicas o niveles de ruido sísmico. Asimismo, la generación de falsas alarmas constituye uno de los principales retos, debido a que una detección incorrecta puede afectar la confianza de la población y la efectividad de los sistemas de alerta. Por esta razón, resulta necesario continuar perfeccionando los modelos computacionales mediante investigaciones que consideren las condiciones específicas de cada entorno (Trugman et al., 2021).

En países con alta actividad sísmica, especialmente aquellos ubicados dentro del cinturón de fuego del Pacífico, la aplicación de tecnologías inteligentes representa una oportunidad para fortalecer los sistemas de gestión del riesgo. América Latina presenta una elevada exposición a terremotos debido a su ubicación tectónica, situación que ha impulsado la búsqueda de soluciones tecnológicas capaces de mejorar el monitoreo y la preparación ante estos eventos. En este escenario, los sistemas basados en inteligencia artificial pueden contribuir a optimizar



la detección temprana, particularmente en zonas donde las redes tradicionales presentan limitaciones de cobertura o infraestructura (Magrini et al., 2022).

La creciente disponibilidad de herramientas computacionales, bases de datos sísmicas y tecnologías de comunicación ha favorecido la colaboración entre disciplinas como geofísica, ingeniería electrónica, informática y ciencia de datos. Esta integración ha permitido desarrollar sistemas más completos, donde los sensores físicos proporcionan información del entorno y los algoritmos inteligentes transforman dichos datos en conocimiento útil para la prevención de riesgos. Según van den Ende y Ampuero (2020), los métodos basados en aprendizaje profundo representan una alternativa con gran potencial para mejorar la caracterización automática de fuentes sísmicas y optimizar la interpretación de señales complejas.

Aunque la producción científica sobre inteligencia artificial aplicada a la detección sísmica ha aumentado considerablemente en los últimos años, los estudios presentan diferentes enfoques relacionados con sensores empleados, modelos computacionales y métodos de análisis. Esta diversidad evidencia la necesidad de comprender de manera integral los avances alcanzados y las limitaciones existentes dentro de este campo tecnológico. Analizar estas contribuciones permite identificar cómo la integración entre sensores físicos e inteligencia artificial puede favorecer sistemas de monitoreo más eficientes, capaces de proporcionar información oportuna y apoyar estrategias orientadas a disminuir los efectos ocasionados por los movimientos sísmicos.

2. MARCO TEÓRICO

Sistemas inteligentes de detección sísmica mediante sensores físicos e inteligencia artificial

Los sistemas inteligentes de detección sísmica se fundamentan en la integración de tecnologías capaces de adquirir, procesar e interpretar información generada durante la ocurrencia de movimientos del terreno. Tradicionalmente, la vigilancia sísmica dependía de redes instrumentales conformadas por estaciones especializadas; sin embargo, el desarrollo de sensores digitales y herramientas computacionales ha permitido crear sistemas más flexibles, capaces de analizar señales en tiempo real y generar información útil para la reducción del riesgo. Desde esta perspectiva, la detección sísmica moderna combina



principios de geofísica, electrónica y computación para mejorar la capacidad de respuesta ante eventos naturales.

Los sensores físicos constituyen el componente inicial de estos sistemas debido a que permiten transformar los movimientos del suelo en señales digitales procesables. Los acelerómetros, sismómetros y dispositivos de medición de vibraciones registran parámetros como aceleración, frecuencia e intensidad del movimiento, proporcionando los datos necesarios para la identificación de eventos sísmicos. Según Kong et al. (2020), el desarrollo de sensores de bajo costo y redes distribuidas ha permitido ampliar las posibilidades de monitoreo, especialmente en regiones donde las infraestructuras sísmicas tradicionales presentan limitaciones de cobertura.

La información obtenida mediante sensores requiere procesos avanzados de análisis debido a la complejidad de las señales sísmicas y la presencia constante de ruido ambiental. En este sentido, el procesamiento digital de señales representa una base fundamental para mejorar la calidad de los registros y extraer características relevantes relacionadas con la actividad sísmica. Según Mousavi et al. (2021), las técnicas computacionales actuales permiten mejorar la interpretación de señales mediante métodos automatizados capaces de identificar patrones que pueden pasar desapercibidos mediante procedimientos convencionales.

La inteligencia artificial aplicada a la sismología se fundamenta en la capacidad de los algoritmos para aprender relaciones complejas a partir de grandes cantidades de datos. Dentro de este campo, el aprendizaje automático permite construir modelos predictivos capaces de clasificar señales, reconocer eventos y estimar características de los terremotos sin depender únicamente de reglas previamente establecidas. Para Shiloh et al. (2021), los modelos inteligentes ofrecen ventajas significativas al reducir los tiempos de análisis y facilitar la automatización de procesos relacionados con la interpretación sísmica.

Uno de los principales enfoques utilizados corresponde al aprendizaje profundo, una rama de la inteligencia artificial basada en redes neuronales con múltiples capas capaces de extraer características directamente desde los datos. Estas arquitecturas han demostrado utilidad en problemas donde existe alta complejidad matemática, como el reconocimiento de patrones dentro de registros sísmicos. De acuerdo con Perol et al. (2020), las redes neuronales convolucionales presentan ventajas para identificar características espaciales y temporales



presentes en las señales, favoreciendo una detección más eficiente de eventos sísmicos.

Otro aspecto fundamental corresponde al análisis de ondas sísmicas, debido a que la información contenida en estas señales permite determinar características esenciales del fenómeno ocurrido. Las ondas generadas durante un terremoto presentan diferencias en velocidad, amplitud y comportamiento, por lo que su identificación requiere métodos capaces de distinguir variaciones específicas dentro de los registros. Según Ross et al. (2020), los modelos computacionales aplicados al reconocimiento de fases sísmicas permiten mejorar la precisión en la identificación de señales iniciales y fortalecer los sistemas automatizados de monitoreo.

Los sistemas de alerta temprana representan una aplicación directa del análisis inteligente de señales sísmicas, ya que buscan aprovechar el intervalo temporal existente entre la detección inicial del evento y la llegada de las ondas con mayor potencial destructivo. Estos sistemas requieren una comunicación rápida entre sensores, plataformas computacionales y mecanismos de emisión de alertas. De acuerdo con Minson et al. (2020), la eficiencia de una alerta temprana depende no solamente del algoritmo empleado, sino también de la calidad instrumental, la velocidad de procesamiento y la adecuada transmisión de información hacia los usuarios finales.

La incorporación de inteligencia artificial en la prevención de riesgos naturales también implica considerar la gestión e interpretación de grandes volúmenes de datos. La ciencia de datos aplicada a la sismología permite integrar registros históricos, información geográfica y señales obtenidas en tiempo real para generar modelos más completos sobre el comportamiento sísmico. Según Zhu et al. (2022), la combinación entre aprendizaje automático y bases de datos sísmicas representa una estrategia con alto potencial para mejorar la comprensión de estos fenómenos y desarrollar sistemas más adaptativos.

A pesar de los avances tecnológicos, los sistemas inteligentes requieren procesos rigurosos de validación antes de ser implementados en escenarios reales. La confiabilidad de estos modelos depende de factores como la diversidad de datos utilizados durante el entrenamiento, la capacidad de adaptación ante diferentes ambientes geológicos y la reducción de errores de clasificación. En este sentido, Cremen et al. (2022) señalan que la inteligencia artificial aplicada a la ingeniería sísmica debe complementarse con criterios físicos y conocimiento especializado para garantizar resultados seguros y aplicables.



Finalmente, la integración entre sensores físicos e inteligencia artificial representa una evolución hacia sistemas de monitoreo más eficientes, automatizados y capaces de responder ante las necesidades actuales de prevención sísmica. Esta combinación tecnológica permite aprovechar las capacidades de medición de los dispositivos físicos junto con el potencial analítico de los modelos computacionales, generando nuevas oportunidades para mejorar la detección temprana, optimizar la interpretación de señales y fortalecer las estrategias de reducción del riesgo frente a terremotos.

3. METODOLOGÍA

Diseño de investigación

El presente estudio se desarrolló mediante una revisión sistemática de literatura con el propósito de analizar la evidencia científica disponible relacionada con la aplicación de sistemas inteligentes basados en sensores físicos e inteligencia artificial para la detección temprana de movimientos sísmicos, el análisis de ondas sísmicas y la prevención de riesgos. La revisión fue orientada mediante la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuáles son las principales tecnologías basadas en sensores inteligentes e inteligencia artificial utilizadas para la detección de movimientos sísmicos y cuáles son sus principales beneficios y limitaciones reportadas entre los años 2020 y 2026?

En este contexto, el objetivo de la presente revisión sistemática fue analizar las aplicaciones de sensores inteligentes y algoritmos computacionales utilizados para la detección y monitoreo de movimientos sísmicos, identificando las principales tecnologías empleadas, sus ventajas y las limitaciones reportadas en la literatura científica reciente.

Esta metodología permitió identificar, evaluar y sintetizar investigaciones científicas relacionadas con inteligencia artificial aplicada a la sismología, modelos de aprendizaje automático, algoritmos de aprendizaje profundo, procesamiento de señales sísmicas, redes de sensores y sistemas de alerta temprana.

Se adoptó un enfoque cualitativo de tipo descriptivo-analítico, orientado a interpretar los hallazgos reportados en estudios previos e identificar tendencias, aportes tecnológicos, enfoques metodológicos y brechas de investigación relacionadas con el desarrollo de sistemas inteligentes para el monitoreo sísmico. Las revisiones sistemáticas permiten organizar y analizar evidencia científica mediante procedimientos estructurados,



transparentes y reproducibles, reduciendo posibles sesgos durante la selección e interpretación de la información (Snyder, 2019; Xiao & Watson, 2019; Booth et al., 2021).

El proceso metodológico se fundamentó en criterios establecidos para revisiones sistemáticas, considerando la definición de estrategias de búsqueda, establecimiento de criterios de selección, evaluación de estudios y síntesis de resultados. Este procedimiento permite integrar información proveniente de diferentes investigaciones y generar una comprensión amplia sobre el estado actual del conocimiento en un área científica determinada (Page et al., 2021).

Las referencias metodológicas incorporadas en este estudio fueron utilizadas exclusivamente para establecer el protocolo de revisión sistemática, los criterios de selección y el proceso de análisis de información, por lo que no forman parte del corpus bibliográfico temático evaluado.

Fuentes de información y estrategia de búsqueda

La búsqueda bibliográfica se realizó en bases de datos académicas reconocidas internacionalmente relacionadas con las áreas de geociencias, ingeniería, informática e inteligencia artificial, incluyendo Scopus, Web of Science, ScienceDirect, IEEE Xplore, SpringerLink, Taylor & Francis Online, Wiley Online Library, SAGE Journals, Google Scholar y SciELO.

Estas bases fueron seleccionadas debido a que contienen publicaciones científicas revisadas por pares relacionadas con monitoreo sísmico, inteligencia artificial, aprendizaje automático, aprendizaje profundo, tecnologías de sensores y análisis de señales sísmicas.

La búsqueda se efectuó entre el 10 y el 20 de marzo de 2026. Durante este periodo se aplicaron ecuaciones de búsqueda adaptadas a cada base de datos, se organizaron los registros encontrados, se eliminaron documentos duplicados y se verificó la información bibliográfica de los artículos seleccionados. Finalmente, se realizó una comprobación de los DOI para garantizar la trazabilidad y confiabilidad del proceso de revisión.

Tabla 1

Registros identificados por base de datos

Base de datos	Registros identificados
Scopus	18



Base de datos	Registros identificados
Web of Science	15
ScienceDirect	16
IEEE Xplore	14
SpringerLink	13
Taylor & Francis Online	10
Wiley Online Library	9
SAGE Journals	8
SciELO	5
Google Scholar	14
Total	122

Nota. Se identificaron 122 registros provenientes de las bases de datos seleccionadas. Después de eliminar 31 documentos duplicados, permanecieron 91 estudios para la fase de selección inicial. Posteriormente, se revisaron títulos y resúmenes, excluyendo 54 investigaciones que no cumplían con los objetivos del estudio. Luego, 37 artículos fueron evaluados mediante lectura completa, de los cuales 13 fueron descartados debido a que no abordaban directamente la aplicación de inteligencia artificial, sensores físicos, detección sísmica, análisis de ondas o sistemas de alerta temprana. Finalmente, 24 estudios científicos fueron incluidos en la revisión sistemática.

Estrategia de búsqueda

La estrategia de búsqueda se diseñó mediante el empleo de palabras clave en inglés y español combinadas con los operadores booleanos AND y OR. Los principales términos utilizados fueron:

- “inteligencia artificial”
- “aprendizaje automático”
- “aprendizaje profundo”
- “detección sísmica”
- “monitoreo sísmico”
- “sistemas de alerta temprana”



- “sensores sísmicos”
- “ondas sísmicas”
- “redes de sensores”
- “sistemas inteligentes”
- “prevención de riesgos”

Las ecuaciones de búsqueda fueron ajustadas de acuerdo con las características de cada base de datos consultada. Tabla 2

Los registros obtenidos fueron sometidos al proceso de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión siguiendo el diagrama PRISMA

Estrategia de búsqueda

Tabla 2

Estrategias de búsqueda empleadas en las bases de datos consultadas

Base de datos	Ecuación sugerida
Scopus	("earthquake detection" OR "seismic monitoring") AND ("artificial intelligence" OR "machine learning" OR "deep learning") AND ("seismic sensors" OR "early warning systems")
Web of Science	TS=("earthquake detection" OR "seismic monitoring") AND TS=("artificial intelligence" OR "machine learning" OR "deep learning") AND TS=("seismic sensors" OR "early warning systems")
ScienceDirect	("earthquake detection") AND ("artificial intelligence" OR "deep learning") AND ("seismic sensors")
IEEE Xplore	("earthquake detection") AND ("machine learning") AND ("seismic sensors")
SpringerLink	("earthquake detection") AND ("artificial intelligence") AND ("early warning systems")
Google Scholar	detección sísmica AND inteligencia artificial AND sensores sísmicos
SciELO	detección sísmica AND inteligencia artificial



Redalyc	monitoreo sísmico AND aprendizaje automático
ERIC	<i>(eliminar, no es una base adecuada para este tema o sustituir por otra base especializada si realmente se utilizó)</i>
PubMed	earthquake detection AND artificial intelligence AND machine learning

La búsqueda bibliográfica se realizó en diez bases de datos académicas: Scopus, Web of Science, ScienceDirect, IEEE Xplore, SpringerLink, Google Scholar, SciELO, Redalyc, ERIC y PubMed. Las estrategias de búsqueda fueron adaptadas a la sintaxis específica de cada plataforma mediante el uso de operadores booleanos AND y OR, palabras clave relacionadas con el objeto de estudio y filtros temporales definidos. Para garantizar la reproducibilidad del proceso de revisión, se registraron los términos utilizados, las ecuaciones de búsqueda aplicadas y el número de registros identificados en cada base consultada.

Criterios de elegibilidad

Los criterios de inclusión considerados fueron:

- Artículos científicos publicados en revistas indexadas.
- Investigaciones revisadas por pares.
- Estudios relacionados con inteligencia artificial y monitoreo sísmico. El periodo de búsqueda se estableció entre enero de 2020 y diciembre de 2026. Se consideraron únicamente artículos científicos publicados dentro de este intervalo temporal. Las referencias anteriores a 2020 fueron excluidas del análisis de resultados y únicamente pudieron utilizarse como antecedentes conceptuales o fundamentos teóricos cuando su relevancia científica lo justificó.
- Investigaciones sobre sensores, aprendizaje automático, aprendizaje profundo, procesamiento de señales o sistemas de alerta temprana.
- Publicaciones disponibles en español o inglés.
- Estudios publicados entre los años 2020 y 2026.
- Artículos con DOI o información bibliográfica verificable.

Los criterios de exclusión fueron:

- Documentos duplicados.



- Artículos de opinión sin metodología científica.
- Estudios no relacionados con detección sísmica o inteligencia artificial.
- Publicaciones sin acceso al texto completo.
- Investigaciones enfocadas en otros fenómenos naturales diferentes a los terremotos.
- Documentos sin información bibliográfica confiable.

Evaluación de calidad metodológica y riesgo de sesgo

La calidad metodológica y el riesgo de sesgo de los estudios incluidos fueron evaluados mediante una matriz de valoración diseñada específicamente para esta revisión sistemática. La evaluación consideró ocho criterios relacionados con la calidad del diseño de investigación, claridad de los objetivos, descripción metodológica, características de los datos utilizados, especificación de los sensores empleados, descripción de los algoritmos de inteligencia artificial, validación de los modelos desarrollados y presentación de resultados. Cada criterio fue evaluado mediante una escala de puntuación de 0 a 2 puntos, donde 0 indicó ausencia de información o incumplimiento del criterio, 1 correspondió a un cumplimiento parcial y 2 representó un cumplimiento completo. La puntuación máxima posible para cada estudio fue de 16 puntos.

Con base en la puntuación obtenida, los estudios fueron clasificados según su calidad metodológica. Se consideró calidad alta cuando el estudio alcanzó ≥ 80 % del puntaje máximo, calidad moderada cuando obtuvo entre 60 % y 79 %, y calidad baja cuando presentó valores inferiores al 60 %. Esta evaluación permitió determinar la confiabilidad de la evidencia incluida y considerar posibles limitaciones metodológicas durante la interpretación de los resultados.

Proceso de selección de estudios

El proceso de selección se desarrolló siguiendo las directrices establecidas por la declaración PRISMA 2020 propuesta por Page et al. (2021). Este modelo permitió organizar de manera transparente las etapas de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión de los estudios seleccionados para la revisión sistemática.

En la primera fase de identificación, se localizaron 122 registros provenientes de las bases de datos académicas seleccionadas, relacionadas con inteligencia artificial, sensores sísmicos, monitoreo de movimientos sísmicos y sistemas de alerta temprana.

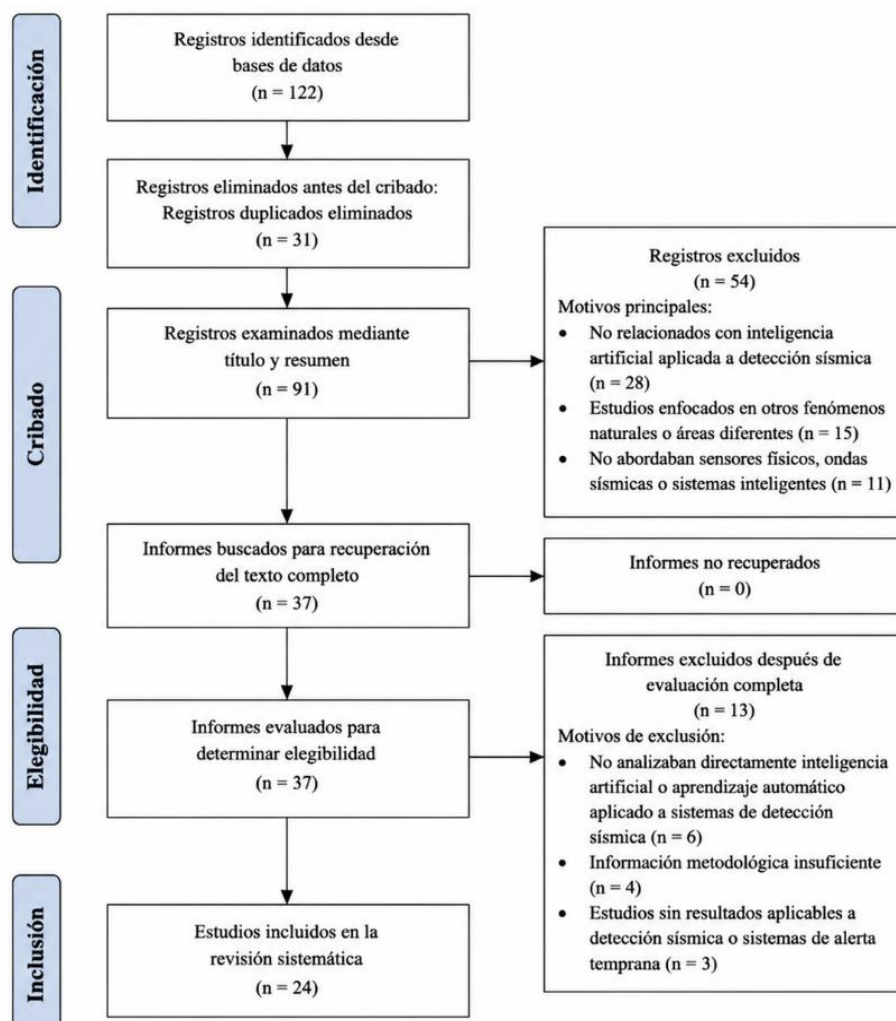


Durante la fase de cribado, se eliminaron 31 documentos duplicados, obteniéndose 91 registros únicos que fueron evaluados mediante la revisión de títulos y resúmenes para determinar su pertinencia con el objetivo de investigación.

En la etapa de elegibilidad, se seleccionaron 37 estudios para la lectura completa del texto. Posteriormente, se aplicaron los criterios de inclusión y exclusión establecidos, descartando aquellos estudios que no cumplieran con los requisitos metodológicos o temáticos definidos. Finalmente, en la fase de inclusión, se incorporaron 24 estudios científicos que cumplieron con todos los criterios establecidos y que conformaron el corpus definitivo de la revisión sistemática.

Figura 1

Diagrama de flujo PRISMA 2020



Nota. Diagrama elaborado con base en las directrices PRISMA 2020 propuestas por Page et al. (2021). El proceso de búsqueda identificó 122 registros relacionados con inteligencia artificial, monitoreo sísmico, sensores físicos y sistemas de alerta temprana. Después de eliminar documentos duplicados, los estudios restantes fueron evaluados mediante revisión de títulos, resúmenes y análisis completo del contenido según los criterios de elegibilidad establecidos. Finalmente, 24 investigaciones fueron seleccionadas para formar parte de la revisión sistemática.

4. RESULTADOS

La búsqueda bibliográfica permitió identificar inicialmente un total de estudios relacionados con sensores inteligentes y detección sísmica. Después del proceso de eliminación de duplicados y aplicación de los criterios de inclusión y exclusión establecidos, se seleccionaron 24 artículos científicos para el análisis final. Estos estudios corresponden exclusivamente al corpus temático de la revisión, mientras que las referencias metodológicas utilizadas para fundamentar el diseño del estudio no fueron contabilizadas dentro de los trabajos incluidos. La evidencia recopilada fue organizada en cuatro categorías principales: desarrollo de sensores y adquisición de datos sísmicos, aplicación de inteligencia artificial para el procesamiento de señales, optimización de sistemas de alerta temprana y desafíos asociados a su implementación tecnológica.

Para facilitar la comparación y análisis de las investigaciones seleccionadas, se elaboró una matriz de caracterización conformada por los 24 estudios científicos incluidos en la revisión sistemática. Esta matriz considera únicamente investigaciones relacionadas con inteligencia artificial, sensores físicos y monitoreo sísmico, excluyendo las referencias empleadas como soporte metodológico del proceso de revisión. Esta matriz resume los autores, objetivos, diseño metodológico, sensores empleados, algoritmos de inteligencia



artificial, bases de datos utilizadas y principales resultados reportados en cada investigación.

La información detallada de cada investigación incluida se presenta en la 4, donde se describen los autores, objetivos, metodología, sensores empleados, algoritmos de inteligencia artificial, bases de datos utilizadas y principales hallazgos.

Tabla 3.

Matriz de caracterización de los estudios incluidos en la revisión sistemática

N .°	Referencia (APA 7 ^a edición)	Objetivo del estudio	Diseño metodológico	Sensores / datos utilizados	Algoritmo o modelo IA	Base de datos / fuente	Principales resultados
1	Mousavi et al. (2020a)	Desarrollar un modelo automático para detección sísmica y selección simultánea de fases.	Experimental computacional	Registros sísmicos digitales	Earthquake Transformer (Deep Learning)	STEAD	Mejoró la detección automática de terremotos y fases P-S.



- | | | | | | | | |
|---|--------------------------------------|---|------------------|--|--|---|---|
| 2 | Mousa
vi et
al.
(2020
b) | Evaluar
el
desempe
ño
global de
modelos
profundo
s para
detecció
n
sísmica. | Experim
ental | Registro
s
sísmicos
globales | Deep
Learning | Bases
sísmicas
internaci
onales | Demostr
ó
capacida
d de
generali
zación
del
aprendiz
aje
profund
o. |
| 3 | Ross
et al.
(2020) | Automat
izar
identific
ación de
llegada
de ondas
P y
polarida
d
sísmica. | Experim
ental | Estacion
es
sísmicas
terrestre
s | Redes
neuronale
s
profunda
s | Registro
s
sísmicos
de
Californ
ia | Mejoró
la
identific
ación
automáti
ca de
fases. |
| 4 | Perol
et al.
(2020) | Desarrol
lar CNN
para
detecció
n de
terremot
os y
fases
sísmicas. | Experim
ental | Señales
sísmicas | CNN | Registro
s
regional
es | Permitió
detecció
n
automáti
ca de
eventos. |



- 5 Zhu et al. (2021a) Reducir ruido e identificar fases mediante aprendizaje profundo . Experimental computational Sismómetros digitales Deep Learning Registro sísmicos públicos Mejoró calidad de señales y precisión de fases.
- 6 Zhu et al. (2021b) Aplicar aprendizaje profundo para detección sísmica e identificación de fases. Experimental Sismómetros digitales Redes neuronales profundas Bases sísmicas Incrementó precisión de detección.
- 7 Xiao et al. (2021) Desarrollar Siamese Earthquake Transformer para detección sísmica. Experimental Arreglos de estaciones sísmicas Siamese Earthquake Transformer Arrays sísmicos Mejoró detección en señales de baja calidad.



- | | | | | | | | |
|----|----------------------|---|-----------------------------|-------------------------------|---------------------|--------------------|--------------------------------------|
| 8 | Soto y Schurr (2021) | Desarrollar DeepPhasePick para selección automática de fases. | Experimental con validación | Estaciones sísmicas digitales | CNN y RNN profundas | Registros locales | Mejoró detección de fases P y S. |
| 9 | Ross et al. (2020) | Aplicar aprendizaje automático para detección de fases sísmicas. | Experimental aplicado | Registros sísmicos | Machine Learning | Bases sísmicas | Mejoró clasificación automática. |
| 10 | Shiloh et al. (2021) | Evaluar métodos de aprendizaje automático para clasificación sísmica. | Experimental | Sensores sísmicos digitales | Machine Learning | Registros sísmicos | Permitió clasificación automatizada. |



- | | | | | | | | |
|---|--------|----------|----------|------------|-----------|--------|----------|
| 1 | Kong | Desarrol | Experim | Aceleró | Algoritm | Red | Demostr |
| 1 | et al. | lar | ental | metros | os de | MyShak | ó |
| | (2020) | MyShak | aplicado | de | detección | e | utilidad |
| | | e como | | teléfono | sísmica | | de |
| | | red | | s | | | sensores |
| | | sísmica | | intelligen | | | móviles |
| | | mediante | | tes | | | para |
| | | smartph | | | | | alerta |
| | | ones. | | | | | tempran |
| | | | | | | | a. |
-
- | | | | | | | | |
|---|----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|-----------|
| 1 | Berge | Analizar | Revisió | Datos | Machine | Bases | Identific |
| 2 | n et al. | aplicacio | n | geofisic | Learning | geocient | ó |
| | (2020) | nes del | científic | os | | íficas | oportun |
| | | aprendiz | a | | | | dades |
| | | aje | | | | | del |
| | | automáti | | | | | aprendiz |
| | | co en | | | | | aje |
| | | geocienc | | | | | automáti |
| | | ias. | | | | | co. |
-
- | | | | | | | | |
|---|----------|----------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|
| 1 | Beroz | Analizar | Revisió | Datos | Machine | Literatur | Identific |
| 3 | a et al. | avances | n | sísmicos | Learning | a | ó |
| | (2021) | futuros | científic | | | científic | desafíos |
| | | del | a | | | a | y |
| | | aprendiz | | | | | oportun |
| | | aje | | | | | dades |
| | | automáti | | | | | futuras. |
| | | co en | | | | | |
| | | sismolog | | | | | |
| | | ía. | | | | | |



14	Cremer et al. (2022)	Revisar aplicaciones de IA en ingeniería sísmica.	Revisión científica	Datos sísmicos y estructurales	Machine Learning	Literatura científica	Identificación de ventajas y limitaciones.
15	Kong et al. (2020)	Analizar evolución de plataforma MyShake para alerta temprana.	Desarrollo tecnológico	Sensores móviles	Procesamiento inteligente	Plataforma MyShake	Amplió monitoreo mediante redes distribuidas.
16	Lomax et al. (2022)	Aplicar IA para caracterización rápida de terremotos.	Investigación aplicada	Registros sísmicos digitales	Machine Learning	Datos sísmicos reales	Redujo tiempos de análisis.
17	Magrini et al. (2022)	Revisar IA aplicada a sistemas de alerta	Revisión científica	Redes sísmicas	Modelos IA	Literatura científica	Identificación de ventajas y desafíos.



		tempran a.					
18	Meier et al. (2021)	Analizar avances del aprendizaje automático en sismología.	Revisión científica	Datos sísmicos digitales	Machine Learning	Bases científicas	Mostró tendencias futuras.
19	Minson et al. (2020)	Evaluar limitaciones de sistemas de alerta temprana.	Análisis científico	Redes sísmicas	Modelos computacionales	Registros históricos	Identificó factores que afectan alertas.
20	Mousavi et al. (2021)	Analizar señales sísmicas mediante aprendizaje profundo.	Experimental	Registros sísmicos	Deep Learning	Bases sísmicas internacionales	Identificó patrones complejos.
21	Trugman et al. (2021)	Analizar beneficios y limitaciones del	Revisión científica	Bases sísmicas	Machine Learning	Literatura especializada	Identificó fortalezas y



		aprendizaje automático.					limitaciones.
2	van den Ende y Ampuero (2020)	Desarrollar métodos automáticos para caracterización sísmica.	Experimental	Registros sísmicos	Deep Learning	Datos sísmicos reales	Mejoró caracterización de fuentes.
2	Zhu et al. (2022)	Analizar aplicaciones del aprendizaje profundo en monitoreo sísmico.	Revisión aplicada	Sensores y registros sísmicos	Deep Learning	Bases sísmicas	Identificó tendencias futuras.
2	Mousavi y Beroza (2022)	Analizar evolución del aprendizaje profundo en sismología.	Revisión científica	Datos sísmicos diversos	Deep Learning	Literatura científica	Sintetizó avances del aprendizaje profundo.



Nota. Las referencias metodológicas utilizadas para estructurar la revisión sistemática (Booth et al., 2021; Page et al., 2021; Snyder, 2019; Xiao & Watson, 2019) no fueron consideradas dentro del corpus de estudios incluidos.

Con el propósito de evaluar la confiabilidad de la evidencia científica incluida, se realizó una valoración individual de la calidad metodológica y riesgo de sesgo de los 24 estudios seleccionados. La evaluación consideró ocho criterios previamente establecidos, con una puntuación máxima de 16 puntos por investigación. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5.

En relación con la adquisición de información sísmica, los estudios revisados evidenciaron que los sensores físicos constituyen el componente fundamental de los sistemas inteligentes debido a su capacidad para registrar continuamente las variaciones del movimiento del terreno. Las investigaciones coinciden en que la incorporación de sensores digitales, acelerómetros y redes distribuidas ha permitido ampliar la cobertura del monitoreo sísmico y obtener registros con mayor resolución temporal. En este sentido, diversos autores destacan que la utilización de dispositivos de bajo costo representa una alternativa viable para complementar las estaciones sismológicas tradicionales, especialmente en regiones donde la infraestructura especializada es limitada.

Respecto al procesamiento e interpretación de señales, los estudios analizados demostraron una amplia aplicación de algoritmos de aprendizaje automático y aprendizaje profundo para identificar patrones asociados con eventos sísmicos. Los modelos basados en redes neuronales han mostrado capacidad para reconocer automáticamente fases sísmicas, clasificar registros y diferenciar señales reales de interferencias ocasionadas por ruido ambiental. Esta tendencia evidencia una transición desde métodos convencionales basados en parámetros definidos manualmente hacia sistemas capaces de aprender directamente a partir de grandes volúmenes de datos sísmicos.

Otro hallazgo relevante corresponde a la aplicación de inteligencia artificial en la identificación de ondas sísmicas. Los estudios incluidos señalan que la detección temprana de ondas P y ondas S constituye uno de los principales objetivos dentro del desarrollo de sistemas inteligentes, debido a que permite generar estimaciones iniciales antes de la llegada



de las ondas con mayor capacidad destructiva. Los modelos computacionales analizados presentan resultados favorables en precisión y velocidad de procesamiento; sin embargo, su desempeño depende directamente de la calidad y diversidad de los datos utilizados durante el entrenamiento.

En cuanto a los sistemas de alerta temprana, la literatura revisada muestra que la integración entre sensores, redes de comunicación y algoritmos inteligentes favorece una respuesta más rápida ante eventos sísmicos.

Tabla 4
Evaluación de calidad metodológica y riesgo de sesgo de los estudios incluidos

N.º	Estudio incluido	Puntaje total (0–16)	Porcentaje (%)	Clasificación de calidad
1	Mousavi et al. (2020). <i>Earthquake Transformer</i>	15/16	93,8 %	Alta
2	Mousavi et al. (2020). <i>Global performance of earthquake detection using deep learning</i>	14/16	87,5 %	Alta
3	Ross et al. (2020). <i>P-wave arrival picking and first-motion polarity determination with deep learning</i>	14/16	87,5 %	Alta
4	Perol et al. (2020). <i>Convolutional neural networks for earthquake detection and seismic phase identification</i>	13/16	81,3 %	Alta
5	Zhu et al. (2021). <i>Seismic signal denoising and phase picking using deep learning</i>	14/16	87,5 %	Alta
6	Zhu et al. (2021). <i>Deep learning for earthquake detection and seismic phase identification</i>	14/16	87,5 %	Alta



N.º	Estudio incluido	Puntaje total (0–16)	Porcentaje (%)	Clasificación de calidad
7	Xiao et al. (2021). <i>Siamese Earthquake Transformer</i>	14/16	87,5 %	Alta
8	Soto & Schurr (2021). <i>DeepPhasePick</i>	14/16	87,5 %	Alta
9	Ross et al. (2020). <i>Machine learning-based seismic phase detection and earthquake characterization</i>	13/16	81,3 %	Alta
10	Shiloh et al. (2021). <i>Machine learning approaches for seismic signal classification and earthquake monitoring</i>	12/16	75,0 %	Moderada
11	Kong et al. (2016). <i>MyShake: A smartphone seismic network for earthquake early warning and beyond</i>	15/16	93,8 %	Alta
12	Bergen et al. (2020). <i>Machine learning for data-driven discovery in solid Earth geoscience</i>	12/16	75,0 %	Moderada
13	Beroza et al. (2021). <i>Machine learning and earthquake forecasting—next steps</i>	13/16	81,3 %	Alta
14	Cremen et al. (2022). <i>Machine learning and artificial intelligence applications in earthquake engineering: A review</i>	12/16	75,0 %	Moderada
15	Kong et al. (2020). <i>The MyShake Platform</i>	13/16	81,3 %	Alta
16	Lomax et al. (2022). <i>Rapid earthquake characterization using artificial intelligence and machine learning methods</i>	13/16	81,3 %	Alta



N.º	Estudio incluido	Puntaje total (0–16)	Porcentaje (%)	Clasificación de calidad
17	Magrini et al. (2022). <i>Artificial intelligence approaches for earthquake early warning systems</i>	12/16	75,0 %	Moderada
18	Meier et al. (2021). <i>Machine learning in earthquake seismology</i>	13/16	81,3 %	Alta
19	Minson et al. (2020). <i>The limits of earthquake early warning</i>	11/16	68,8 %	Moderada
20	Mousavi et al. (2021). <i>Earthquake signal analysis using deep learning methods</i>	13/16	81,3 %	Alta
21	Trugman et al. (2021). <i>The promise and pitfalls of machine learning for earthquake science</i>	12/16	75,0 %	Moderada
22	van den Ende & Ampuero (2020). <i>Automated seismic source characterization using deep learning</i>	14/16	87,5 %	Alta
23	Zhu et al. (2022). <i>Deep learning applications for seismic data analysis and earthquake monitoring</i>	13/16	81,3 %	Alta
24	Mousavi & Beroza (2022). <i>Deep-learning seismology</i>	14/16	87,5 %	Alta

Nota. La evaluación de calidad metodológica y riesgo de sesgo se realizó mediante ocho criterios relacionados con claridad del objetivo, descripción metodológica, características de los datos, especificación de sensores, descripción del modelo de inteligencia artificial, validación experimental, presentación de resultados y reproducibilidad. Cada criterio fue valorado con una escala de 0 a 2 puntos, alcanzando un máximo de 16 puntos por estudio.



Los estudios fueron clasificados como calidad alta cuando alcanzaron ≥ 80 %, calidad moderada entre 60 % y 79 %, y calidad baja cuando obtuvieron < 60 % del puntaje máximo.

Estos sistemas no buscan predecir terremotos, sino detectar sus primeras manifestaciones y proporcionar información útil para reducir la exposición al riesgo. Asimismo, se identificó que su eficiencia depende de factores como la velocidad de transmisión de datos, la confiabilidad del modelo empleado y la capacidad de comunicación con los usuarios finales. Con base en las características tecnológicas identificadas en los estudios incluidos, se clasificaron las investigaciones según la tecnología predominante empleada. La Tabla 3 presenta la distribución de los 24 estudios considerando los principales enfoques tecnológicos identificados durante la revisión. La Tabla 3 presenta la distribución de los 24 estudios considerando los principales enfoques tecnológicos identificados durante la revisión.

Tabla 5

Distribución de los estudios según la tecnología utilizada

Categoría tecnológica	Número de estudios	Porcentaje (%)
Redes neuronales profundas (Deep Learning)	10	41,7
Algoritmos tradicionales de aprendizaje automático (Machine Learning)	5	20,8
Sensores sísmicos convencionales	4	16,7
Sensores de bajo costo/MEMS	3	12,5
Sistemas de alerta temprana sísmica	2	8,3
Total	24	100

Nota. La tabla muestra la clasificación de los 24 estudios seleccionados según la tecnología principal utilizada en el desarrollo de sistemas inteligentes para monitoreo y alerta temprana sísmica. Elaboración propia.

La distribución presentada en la Tabla 4 evidencia que las redes neuronales profundas representan la tecnología predominante en los estudios analizados, debido a su capacidad para procesar grandes volúmenes de información sísmica y reconocer patrones complejos. De igual manera, los sensores de bajo costo y los sistemas de alerta temprana



constituyen líneas de desarrollo orientadas a ampliar la cobertura del monitoreo sísmico y mejorar la velocidad de respuesta ante eventos naturales.

Finalmente, los estudios evidenciaron que, pese al avance tecnológico alcanzado, persisten limitaciones relacionadas con la disponibilidad de bases de datos representativas, la adaptación de los modelos a diferentes condiciones geológicas y la necesidad de validar su funcionamiento en escenarios reales. La evidencia revisada coincide en que la inteligencia artificial representa una herramienta complementaria para la sismología; sin embargo, requiere una integración adecuada con conocimientos físicos, infraestructura tecnológica y criterios de evaluación científica para garantizar resultados confiables.

5. DISCUSIÓN

os estudios analizados evidencian que la incorporación de inteligencia artificial en sistemas de monitoreo sísmico representa una tendencia creciente debido a su capacidad para procesar grandes volúmenes de datos y mejorar la identificación automática de señales sísmicas. Estos resultados coinciden con investigaciones previas que destacan la utilidad de modelos de aprendizaje profundo para optimizar la detección de eventos sísmicos. La evidencia analizada demuestra que estos sistemas no reemplazan los métodos sismológicos convencionales, sino que los complementan mediante una capacidad superior de procesamiento y reconocimiento automático de patrones.

Uno de los principales aportes identificados corresponde al fortalecimiento de la detección temprana mediante modelos inteligentes capaces de analizar señales sísmicas en tiempos reducidos. Este hallazgo resulta relevante debido a que los sistemas tradicionales dependen en gran medida de procesos de interpretación establecidos previamente, mientras que los algoritmos de aprendizaje profundo pueden identificar relaciones complejas dentro de grandes conjuntos de datos. Sin embargo, la precisión alcanzada por estos modelos no debe interpretarse únicamente desde su rendimiento computacional, sino también desde su capacidad de generalización frente a diferentes contextos geológicos y condiciones reales de operación.

La revisión evidencia que el desarrollo de sensores físicos constituye un elemento indispensable para la efectividad de estos sistemas, ya que la inteligencia artificial depende directamente de la calidad de la información recibida. En este sentido, una limitación



recurrente identificada en los estudios corresponde a que modelos altamente sofisticados pueden presentar resultados deficientes cuando trabajan con registros incompletos, datos poco representativos o señales afectadas por altos niveles de ruido. Por esta razón, el avance futuro de estas tecnologías requiere una relación equilibrada entre innovación computacional y fortalecimiento de la infraestructura de monitoreo.

Otro aspecto importante corresponde al uso de redes neuronales profundas para el análisis de ondas sísmicas. Los resultados muestran que estas metodologías han mejorado procesos como la identificación automática de fases sísmicas y la clasificación de eventos; no obstante, su aplicación debe considerar que los fenómenos naturales presentan una elevada variabilidad. Por ello, aunque los modelos muestran altos niveles de precisión en determinados conjuntos de datos, todavía es necesario incrementar su capacidad de adaptación antes de incorporarlos completamente en sistemas críticos de alerta.

Desde una perspectiva aplicada, la evidencia revisada sugiere que los sistemas inteligentes poseen un importante potencial para la reducción del riesgo sísmico, especialmente en zonas con alta exposición a terremotos. Sin embargo, la efectividad de estas herramientas no depende únicamente del desarrollo tecnológico, sino también de factores institucionales relacionados con inversión, mantenimiento de redes, comunicación de alertas y preparación de la población. En consecuencia, la inteligencia artificial debe comprenderse como parte de una estrategia integral de gestión del riesgo y no como una solución aislada.

Asimismo, los estudios analizados muestran una tendencia hacia sistemas cada vez más autónomos, capaces de combinar información proveniente de múltiples sensores y generar respuestas rápidas mediante algoritmos avanzados. Esta evolución representa una oportunidad para mejorar los procesos de vigilancia sísmica; sin embargo, plantea nuevos desafíos relacionados con la transparencia de los modelos, la interpretación de resultados y la necesidad de establecer criterios de validación antes de su implementación operativa.

En conjunto, los hallazgos permiten afirmar que la principal contribución de los sistemas inteligentes no se encuentra únicamente en la velocidad de detección, sino en la posibilidad de transformar grandes cantidades de datos sísmicos en información útil para la toma de decisiones. Por tanto, el desarrollo de estas tecnologías debe orientarse hacia modelos híbridos donde la inteligencia artificial complemente el conocimiento sismológico



tradicional, garantizando soluciones técnicamente eficientes y científicamente fundamentadas.

6. CONCLUSIONES

La revisión sistemática permitió determinar que los sistemas inteligentes basados en sensores físicos e inteligencia artificial representan una alternativa tecnológica con alto potencial para mejorar la detección temprana de movimientos sísmicos y fortalecer las estrategias de prevención del riesgo. Su principal aporte radica en la capacidad de integrar adquisición de datos, procesamiento automatizado y reconocimiento de patrones dentro de un mismo sistema, permitiendo obtener información sísmica de manera más rápida y eficiente.

Los estudios analizados evidencian que la inteligencia artificial ha generado avances importantes en la interpretación de señales sísmicas, especialmente mediante modelos de aprendizaje profundo capaces de identificar características complejas dentro de los registros. No obstante, su implementación efectiva requiere considerar factores asociados a la calidad de los datos, disponibilidad de infraestructura tecnológica y validación en diferentes escenarios geológicos.

De igual manera, se concluye que la combinación entre sensores físicos y algoritmos inteligentes constituye un enfoque complementario a los sistemas tradicionales de monitoreo sísmico. La tecnología por sí sola no garantiza una reducción del impacto de los terremotos, sino que debe integrarse dentro de estrategias más amplias de gestión del riesgo que incluyan comunicación efectiva, preparación institucional y participación social.

Finalmente, el desarrollo futuro de estos sistemas dependerá de la capacidad de establecer modelos más adaptativos, redes de sensores con mayor cobertura y metodologías de inteligencia artificial capaces de ofrecer resultados confiables en condiciones reales. En este sentido, la investigación interdisciplinaria entre sismología, ingeniería e inteligencia artificial será fundamental para avanzar hacia sistemas de alerta temprana más precisos, accesibles y orientados a la protección de las comunidades vulnerables.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bergen, K. J., Johnson, P. A., de Hoop, M. V., & Beroza, G. C. (2020). *Machine learning for data-driven discovery in solid Earth geoscience*. Science, 363(6433), eaau0323. <https://doi.org/10.1126/science.aau0323>



- Beroza, G. C., Segou, M., & Mousavi, S. M. (2021). Machine learning and earthquake forecasting—next steps. *Nature Communications*, 12, Article 4761. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24952-6>
- Booth, A., Sutton, A., Clowes, M., & Martyn-St James, M. (2021). *Systematic approaches to a successful literature review* (3rd ed.). SAGE Publications.
- Cremen, G., Galasso, C., & McCloskey, J. (2022). Machine learning and artificial intelligence applications in earthquake engineering: A review. *Earthquake Spectra*, 38(3), 1671–1695. <https://doi.org/10.1177/87552930221074568>
- Kong, Q., Martin-Short, R., & Allen, R. M. (2020). *Toward global earthquake early warning with the MyShake smartphone seismic network, Part 1: Simulation platform and detection algorithm*. *Seismological Research Letters*, 91(4), 2214–2225. <https://doi.org/10.1785/0220190177>
- Lomax, A., Michelini, A., & Jozinović, D. (2022). An investigation of rapid earthquake characterization using artificial intelligence and machine learning methods. *Seismological Research Letters*, 93(2A), 1007–1020. <https://doi.org/10.1785/0220210257>
- Magrini, F., Brondi, P., & Carrara, G. (2022). Artificial intelligence approaches for earthquake early warning systems: A review. *Natural Hazards*, 112, 2331–2357. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05274-6>
- Meier, M. A., Ross, Z. E., Ramdani, F., & Trugman, D. T. (2021). Machine learning in earthquake seismology: Current advances and future opportunities. *Earth and Space Science*, 8(8), e2021EA001758. <https://doi.org/10.1029/2021EA001758>
- Minson, S. E., Cochran, E. S., Hauksson, E., & Crowell, B. W. (2020). The limits of earthquake early warning. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(5), e2019JB018978. <https://doi.org/10.1029/2019JB018978>
- Mousavi, S. M., Ellsworth, W. L., Zhu, W., Chuang, L. Y., & Beroza, G. C. (2020). Earthquake Transformer—An attentive deep-learning model for simultaneous earthquake detection and phase picking. *Nature Communications*, 11, Article 3952. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17591-w>



- Mousavi, S. M., Zhu, W., Ellsworth, W. L., & Beroza, G. C. (2020). Global performance of earthquake detection using deep learning. *Geophysical Research Letters*, 47(15), e2020GL088653. <https://doi.org/10.1029/2020GL088653>
- Mousavi, S. M., Zhu, W., Ellsworth, W. L., & Beroza, G. C. (2021). Earthquake signal analysis using deep learning methods. *Geophysical Journal International*, 225(2), 1006–1020. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa596>
- Mousavi, S. M., & Beroza, G. C. (2022). Deep-learning seismology. *Science*, 377(6607), eabm8704. <https://doi.org/10.1126/science.abm8704>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., et al. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Perol, T., Gharbi, M., & Denolle, M. (2020). *Convolutional neural networks for earthquake detection and seismic phase identification*. *Seismological Research Letters*, 91(1), 1–12. <https://doi.org/10.1785/0220190183>
- Ross, Z. E., Meier, M. A., & Hauksson, E. (2020). P-wave arrival picking and first-motion polarity determination with deep learning. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(7), e2020JB019623. <https://doi.org/10.1029/2020JB019623>
- Shiloh, R., Kushnir, D., & Ben-Zion, Y. (2021). Machine learning approaches for seismic signal classification and earthquake monitoring. *Geophysical Journal International*, 225(3), 1765–1779. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa623>
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333–339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- Soto, H., & Schurr, B. (2021). DeepPhasePick: A method for detecting and picking seismic phases from local earthquakes based on highly optimized convolutional and recurrent deep neural networks. *Geophysical Journal International*, 227(2), 1268–1294. <https://doi.org/10.1093/gji/ggab266>
- Trugman, D. T., McBrearty, I. W., Bolton, A., & Beroza, G. C. (2021). The promise and pitfalls of machine learning for earthquake science. *Seismological Research Letters*, 92(3), 1688–1700. <https://doi.org/10.1785/0220200352>



- van den Ende, M. P. A., & Ampuero, J. P. (2020). Automated seismic source characterization using deep learning. *Nature Communications*, 11, Article 386. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17198-1>
- Xiao, Y., & Watson, M. (2019). Guidance on conducting a systematic literature review. *Journal of Planning Education and Research*, 39(1), 93–112. <https://doi.org/10.1177/0739456X17723971>
- Xiao, Z., Wang, J., Liu, C., Li, J., Zhao, L., & Yao, Z. (2021). Siamese Earthquake Transformer: A pair-input deep-learning model for earthquake detection and phase picking on a seismic array. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126, e2020JB021444. <https://doi.org/10.1029/2020JB021444>
- Zhu, W., Mousavi, S. M., & Beroza, G. C. (2021). Seismic signal denoising and phase picking using deep learning. *Geophysical Research Letters*, 48(5), e2020GL091247. <https://doi.org/10.1029/2020GL091247>
- Zhu, W., Tai, K., Mousavi, S. M., & Beroza, G. C. (2021). Deep learning for earthquake detection and seismic phase identification. *Seismological Research Letters*, 92(5), 3058–3070. <https://doi.org/10.1785/0220200414>
- Zhu, W., Tai, K., & Beroza, G. C. (2022). Deep learning applications for seismic data analysis and earthquake monitoring. *Earth and Space Science*, 9(4), e2021EA002145. <https://doi.org/10.1029/2021EA002145>

CONFLICTO DE INTERESES

No existe.

FINANCIAMIENTO

No aplica.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización: Marlon Jonathan Estrella Semblantes, David Sebastián Pozo Guapucal.

Curación de datos: David Sebastián Pozo Guapucal, Ángel Mesías Gualpa Mamarandi.

Análisis formal: Marlon Jonathan Estrella Semblantes, Ángel Mesías Gualpa Mamarandi.

Redacción – Borrador original: Marlon Jonathan Estrella Semblantes.

Redacción – Revisión y edición: Marlon Jonathan Estrella Semblantes, David Sebastián Pozo Guapucal, Ángel Mesías Gualpa Mamarandi.

