

Earthquake prediction using seismic precursors: proposed classification based on a systematic literature review

Harold Gaspar Cano Condori¹ 

¹Universidad Continental, Perú, hcano@continental.edu.pe

Abstract: This review aims to identify and classify the most relevant seismic precursors in recent scientific literature to contribute to research and the reduction of earthquake-related risks. To achieve this, studies from the SCOPUS database from the last 5 years were considered, and a total of 56 articles were selected and analyzed. As a result, a classification based on 13 new categories of seismic precursors is proposed, with "ionospheric phenomena," "rock deformation/stress," and "underground gases" being some of the most studied categories in the analyzed literature. However, while certain precursors have been explored, there are still approaches and types of precursors that require greater attention and development in future studies.

Keywords: Prediction, Earthquake, Precursor, Seism, Forecast.

Predicción de terremotos usando precursores sísmicos: clasificación propuesta a partir de una revisión sistemática de la literatura

Harold Gaspar Cano Condori¹

¹Universidad Continental, Perú, hcano@continental.edu.pe

Resumen: Esta revisión busca identificar y clasificar los precursores sísmicos más relevantes en la literatura científica reciente para así contribuir a la investigación y reducción del riesgo causado por terremotos. Para lograr esto se consideraron estudios de la base de datos de SCOPUS de los últimos 5 años, se eligieron y analizaron un total de 56 artículos. Como resultado se propone una clasificación basada en 13 nuevas categorías de precursores sísmicos, siendo los fenómenos "ionosféricos", "deformación/tensión en la roca" y "gases subterráneos" algunas de las categorías más estudiadas en la literatura analizada, se encontró que, aunque algunos precursores han sido estudiados, aún existen enfoques y tipos de precursores que requieren mayor atención y desarrollo en futuros estudios.

Palabras clave: Predicción, Terremoto, Precursor, Sismo, Pronóstico

I. INTRODUCCIÓN

Para hacer frente al peligro que representan eventos naturales como los sismos, las autoridades de defensa civil de todo el mundo necesitan pronosticar terremotos[1], una de las formas en las que la ciencia intenta acercarse a esa meta es a través de la identificación y aprovechamiento de los precursores sísmicos. Un "precursor sísmico" se define como aquel cambio cuantitativamente mensurable en un parámetro ambiental que se presenta antes de los sismos principales o que se cree está vinculado al proceso previo a la ocurrencia de un sismo principal [2][3]. El estudio de los precursores sísmicos es prometedor en la medida que permitiría la predicción de terremotos con días e incluso meses de anticipación[4].

El estudio de las anomalías que preceden a un sismo es complejo y, en ocasiones, controvertido[5]. Sin embargo, es lógico pensar que, siendo los sismos, eventos que liberan tanta energía, estos deben presentar un conjunto de señales previas a su ocurrencia.[6]. Numerosos estudios y el análisis de las causas de los sismos, han permitido identificar un conjunto de anomalías precursoras[2], [7], respecto a estas anomalías, algunos autores han cuestionado la calidad de ciertos tipos de precursores[8], mientras que otros consideran que hay anomalías precursoras confiables cuya relación con eventos sísmicos no se pone en duda [7]. Visiones críticas de los precursores afirman que la única forma en la que es posible hacer confiable su aprovechamiento práctico es a través de estudios multidisciplinarios y multiparamétricos [9], [10], [6]. A causa de la controversia en el estudio de los precursores sísmicos, actualmente no es posible su aplicación práctica a través de normas gubernamentales[11], a partir del debate actual sobre la fiabilidad de los precursores, esta claro que se

necesita conocer y organizar más y distintos tipos de precursores sísmicos [12], [13] para así poder entender la relación que hay entre ellos.

Actualmente el estudio de los precursores sísmicos evalúa un amplio conjunto de parámetros. Algunos investigadores incluyen la deformación mecánica de macizos rocosos, emisiones de gases, variaciones de niveles freáticos, fluctuaciones del campo electromagnético terrestre y variaciones de temperatura del suelo, entre otros [14]. Los precursores sísmicos han sido clasificados de varias maneras en el pasado, [15], [16], [17], [18], los clasifican en tres categorías: *precursores de superficie*, dentro de los que tenemos a la temperatura de la superficie terrestre y la SST (Sea Surface Temperature), *precursores atmosféricos*, como OLR(Outgoing Longwave Radiation), RH(relative humidity), AT(air temperatura) y *precursores ionosféricos*, que incluyen al TEC (Total Electron Content), perturbación del campo eléctrico y flujo de partículas de alta energía.

Para contribuir al conocimiento, organización e investigación de los precursores sísmicos, esta revisión muestra cuáles han sido los precursores más estudiados en los últimos 5 años. Además, se propone una nueva clasificación basada en 13 nuevas categorías de precursores sísmicos, con el objetivo de lograr una mejor representación de los diferentes tipos de precursores sísmicos, enfocándose en un registro más claro y detallado que permita evidenciar la gran variabilidad existente entre ellos y facilitar su análisis en contextos específicos.

II. METODOLOGIA

Para cumplir con los objetivos de esta investigación se usó la metodología PRISMA, esta permite tener un proceso transparente y auditable [19]. Como se sabe, el proceso tiene tres etapas principales, la identificación, el cribado y la fase de inclusión. Durante el proceso de *Identificación*, se planteó la pregunta: ¿Cuáles son los precursores más usados en estudios que intentan predecir sismos a través de la detección de anomalías?, de esta manera se realizó una búsqueda en la base de datos de Scopus, se consideró la siguiente ecuación de búsqueda: earthquake OR seism AND precursor OR anomaly AND prediction OR forecast, en esta primera etapa se obtuvieron 1376 investigaciones.

En la etapa de *cribado* se refino la búsqueda considerando estudios de entre los años 2019 y 2024, se consideraron estudios

solamente de las siguientes áreas de estudio: *Ciencias de la Tierra y Planetarias, Ciencias Ambientales, Ingeniería, Ciencias de la Computación, Física y Astronomía, Química, Matemáticas y Ciencia de Materiales*, en cuanto al tipo de documento elegido solo se consideraron artículos originales y se revisaron solo artículos escritos en idioma inglés, también se limitó la búsqueda a archivos de acceso abierto(open access), en esta etapa se obtuvieron un total de 70 estudios.

Para la *inclusión*, fueron descartados estudios que aparecían inicialmente como de acceso abierto, pero cuando se procedió a su descarga y revisión, se encontró que no lo eran, así mismo se encontraron investigaciones que no hablaban de un precursor específico, las cuales también fueron descartadas, luego de esta etapa se obtuvieron un total de 56 investigaciones. De esta manera de los 1376 estudios iniciales, nos quedamos con 56, estas cumplen por lo tanto con los criterios de inclusión que se muestran en la tabla I.

Un esquema del proceso descrito anteriormente se muestra en la Fig. 1.

TABLA I
CRITERIOS DE INCLUSIÓN CONSIDERADOS.

Criterio	Descripción
C1	El estudio analiza el uso de uno o más precursores para predecir sismos
C2	¿El estudio está comprendido en el periodo de tiempo entre 2019 y 2024?
C3	El estudio tiene las palabras clave: earthquake, seism, precursor, anomaly, prediction, forecast
C4	El estudio está disponible en su versión completa (open access)
C5	El estudio está relacionado con las áreas de estudio: Ciencias de la Tierra y Planetarias, Ciencias Ambientales, Ingeniería, Ciencias de la Computación, Física y Astronomía, Química, Matemáticas y Ciencia de Materiales
C6	El estudio es de tipo artículo, no conference paper, no review
C7	El idioma del artículo es el inglés

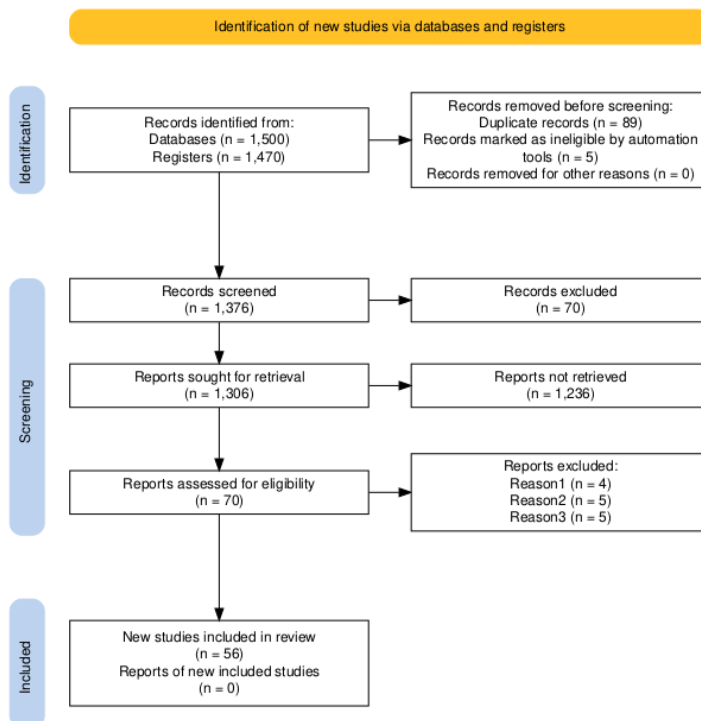


Fig. 1. Diagrama de flujo PRISMA 2020.

III. RESULTADOS

Los resultados de esta revisión se dividieron en dos categorías, resultados bibliométricos y resultados específicos, la lista completa de los 56 artículos incluidos en esta revisión se muestra en la Tabla II, en ella se muestran los artículos clasificados según el número de citas, de mayor a menor.

TABLA II
ARTÍCULOS SELECCIONADOS (ORDENADOS POR NÚMERO DE CITAS).

Autor	Título	Citas
Shreedharan et al.[20]	Preseismic Fault Creep and Elastic Wave Amplitude Precursors Scale With Lab Earthquake Magnitude for the Continuum of Tectonic Failure Modes	29
Bolton et al.[21]	Acoustic Energy Release During the Laboratory Seismic Cycle: Insights on Laboratory Earthquake Precursors and Prediction	29
Li et al.[22]	Hydrogeochemical characteristics of hot springs and their short-term seismic precursor anomalies along the Xiaojiang fault zone, southeast Tibet plateau	22
Filizzola et al.[23]	RST Analysis of Anomalous TIR Sequences in Relation with Earthquakes Occurred in Turkey in the Period 2004–2015	18
Zhou et al.[24]	Short-Term Seismic Precursor Anomalies of Hydrogen Concentration in Luojishan Hot Spring Bubbling Gas, Eastern Tibetan Plateau	17
Zhao et al.[25]	Weighted information models for the quantitative prediction and evaluation of the geothermal anomaly area in the plateau: A case study of the sichuan–tibet railway	17
Wu et al.[26]	Scrutinizing and rooting the multiple anomalies of Nepal earthquake sequence in 2015 with the deviation-time-space criterion and homologous lithosphere-coversphere-atmosphere-ionosphere coupling physics	17
Zhang et al.[27]	Temperature variations in multiple air layers before the Mw 6.2 2014 Ludian earthquake, Yunnan, China	16
Pulinets et al.[28]	Ionosphere Sounding for Pre-seismic Anomalies Identification (INSPIRE): Results of the Project and Perspectives for the Short-Term Earthquake Forecast	16
Chen et al.[29]	Universal precursor seismicity pattern before locked-segment rupture and evolutionary rule for landmark earthquakes	13
Snell et al.[30]	Modelling fluid flow in complex natural fault zones: Implications for natural and human-induced earthquake nucleation	12
Feng et al.[31]	Groundwater Radon Precursor Anomalies Identification by EMD-LSTM Model	12
Xiong et al.[32]	GNSS TEC-Based Earthquake Ionospheric Perturbation Detection Using a Novel Deep Learning Framework	12
Yu et al.[33]	Evaluation of pre-earthquake anomalies of borehole strain network by using receiver operating characteristic curve	11

Li et al.[34]	Two Large Earthquakes Registered by the CSES Satellite during Its Earthquake Prediction Practice in China	11
Fidani C.[35]	West Pacific Earthquake Forecasting Using NOAA Electron Bursts With Independent L-Shells and Ground-Based Magnetic Correlations	11
Inyurt et al.[36]	Monitoring potential ionospheric changes caused by the Van earthquake (Mw7.2)	9
Zhai et al.[37]	Detecting thermal anomalies of earthquake process within outgoing longwave radiation using time series forecasting models	8
Warden et al.[38]	Statistical Analysis of Pre-earthquake Electromagnetic Anomalies in the ULF Range	8
Yue et al.[39]	TEC Anomalies Detection for Qinghai and Yunnan Earthquakes on 21 May 2021	7
Chelidze et al.[40]	Earthquake Forecast as a Machine Learning Problem for Imbalanced Datasets: Example of Georgia, Caucasus	6
Vasilev et al.[41]	New Possible Earthquake Precursor and Initial Area for Satellite Monitoring	6
Sadhukhan et al.[42]	Climatic and seismic data-driven deep learning model for earthquake magnitude prediction	6
Uyanik et al.[43]	A Multi-Input Convolutional Neural Networks Model for Earthquake Precursor Detection Based on Ionospheric Total Electron Content	5
Sornette et al.[44]	Revisiting the predictability of the haicheng and tangshan earthquakes	5
Freund et al.[45]	Atmospheric Storm Anomalies Prior to Major Earthquakes in the Japan Region	5
Wang et al.[46]	Assessment of a claimed ultra-low frequency electromagnetic (ULFEM) earthquake precursor	5
Zhu S.[47]	Estimation of seismic hazard around the Ordos Block of China based on spatial and temporal variations of b-values	4
Jiao et al.[48]	Consecutive statistical evaluation framework for earthquake forecasting: Evaluating satellite surface temperature anomaly detection methods	4
Pulinets et al.[49]	Radon Variability as a Result of Interaction with the Environment	3
Petrescu et al.[50]	Prospective Neural Network Model for Seismic Precursory Signal Detection in Geomagnetic Field Records	3
Abdullayev et al.[51]	Optimization of quantitative indicators of complex seismo-hydrogeochemical monitoring with the purpose of forecasting strong earthquakes	3
Anagnostopoulos G.[52]	On the Origin of ULF Magnetic Waves Before the Taiwan Chi-Chi 1999 Earthquake	3
Yue et al.[53]	Statistical and Comparative Analysis of Multi-Channel Infrared Anomalies before Earthquakes in China and the Surrounding Area	2
Huang et al.[54]	Feasibility Study on Earthquake Prediction Based on Impending Geomagnetic Anomalies	2
Yue et al.[55]	Pre-Seismic Anomaly Detection from Multichannel Infrared Images of FY-4A Satellite	2
Břizová et al.[56]	Methods for the evaluation of the stochastic properties of the ionosphere for earthquake prediction-random matrix theory	2
Bornyakov et al.[57]	new approach to strong earthquake prediction in the south baikal region on the basis of rock deformation monitoring data: methodology and results;	2
Zhan et al.[58]	Application of 3D Error Diagram in Thermal Infrared Earthquake Prediction: Qinghai-Tibet Plateau	2
Luo et al.	Strain fields of Ms >6.0 earthquakes in Menyuan, Qinghai, China	1
Jiao et al.[59]	A Bayesian Approach for Forecasting the Probability of Large Earthquakes Using Thermal Anomalies from Satellite Observations	1
Nasirbekovich et al.[60]	Models (form) of long-, medium- and short-term earthquake precursors	1
Lu et al.[61]	Earthquake geochemical scientific expedition and research	1
Wu et al.[62]	Detection and characterization of geomagnetic anomaly waveforms	1
Li et al.[63]	Research on thermal infrared anomaly characteristics of moderate strong earthquakes in northeast China	0
Suleyev et al.	The «activation-lull» method for medium-strength earthquakes	0
Zhu et al.[64]	Anomaly Detection Using Machine Learning in Hydrochemical Data From Hot Springs: Implications for Earthquake Prediction	0
Gao et al.[65]	Low-intensity anomaly involving $ML \geq 4$ events preceding strong earthquakes in Tibet	0
Li et al.[66]	Electromagnetic Short-Term to Imminent Forecast Indices for $M \geq 5.5$ Earthquakes in the Gansu-Qinghai-Sichuan Region of China	0
Luo et al.[67]	Spatio-temporal characteristics of seismic strain anomalies reveal seismic risk zones along the Longmenshan fault zone and adjacent areas	0
Xie et al.[68]	Weekly earthquake prediction in a region of China based on an intensive precursor network AETA	0
Arnact et al.[69]	Correlability of Solar Wind with Seismic Events in the Balkan Peninsula Zone	0
Toader et al.[70]	The Results and Developments of the Radon Monitoring Network in Seismic Areas	0
Zhou H.[71]	Application of Intelligent Optimization Algorithms to the Design of Automatic Generation of Software Tests for Data Anomaly Identification	0
Wang et al.[72]	MaxEnt SeismoSense Model: Ionospheric Earthquake Anomaly Detection Based on the Maximum Entropy Principle	0
Nagao et al.[73]	Development and Preliminary Analysis of a VLF-Band Electromagnetic-Wave Observation System for Short-Term Earthquake Precursory Monitoring	0

A. Resultados bibliométricos

La Fig. 2 muestra la evolución del número de publicaciones por año desde 2019 hasta 2024. En 2019, se registraron 2 publicaciones, número que aumentó a 7 en 2020. Este crecimiento continuó en 2021, con 13 publicaciones, alcanzando su punto máximo en 2022 con 16 publicaciones.

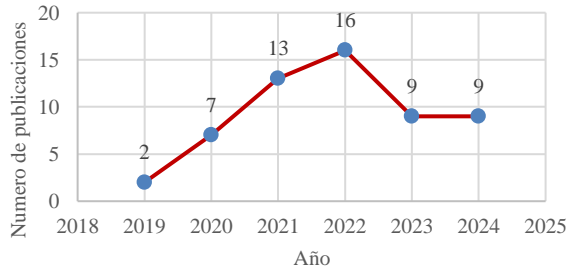


Fig. 2. Evolución del número de publicaciones a lo largo del tiempo.

La tabla III y la Fig. 3, muestran el número de publicaciones y citas asociadas al país de origen de la investigación. China es el país con más publicaciones con un total de 28 y 175 citas, lo que refleja su alta productividad e impacto académico. Italia sigue con 5 publicaciones y 71 citas, mientras que Estados Unidos cuenta con 3 publicaciones y 42 citas, ambos mostrando un buen nivel de influencia. Rusia, con 3 publicaciones y 21 citas, tiene un impacto moderado. Turquía y Japón, con 2 publicaciones cada uno, presentan diferencias en impacto, ya que Turquía recibió 14 citas y Japón 5. Uzbekistán también tiene 2 publicaciones, pero con solo 4 citas. Países como Rumania, Grecia, India, Georgia, Bulgaria y Finlandia, con 1 o 2 publicaciones cada uno, tienen citas que oscilan entre 2 y 7. Por otro lado, Kazajistán y Serbia, aunque tienen una publicación cada uno, no han recibido ninguna cita.

Tabla III
NÚMERO DE PUBLICACIONES POR PAÍS Y NÚMERO DE CITAS.

País	Publicaciones	Citas
China	28	175
Italia	5	71
Federación Rusa	3	21
Estados Unidos	3	42
Turquía	2	14
Rumania	2	3
Uzbekistán	2	4
Japón	2	5
Kazajistán	1	0
Georgia	1	6
Bulgaria	1	6
República Checa	1	2
Serbia	1	0
Finlandia	1	7
Irán	1	5
Grecia	1	3
India	1	6

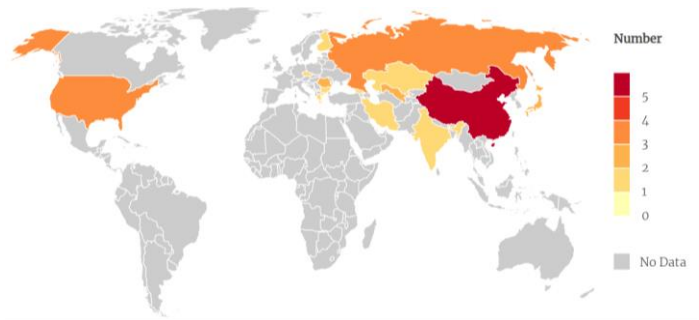


Fig. 3. Artículos según el país de origen

La tabla IV muestra el número de citas recibidas por artículos en diferentes revistas científicas. “Frontiers in Earth Science” encabeza la lista con 13 citas, seguida de “Remote Sensing” con 9, y “Atmosphere” con 5 citas, lo que indica que estas revistas tienen un impacto significativo. Otras revistas como “Applied Sciences (Switzerland)”, “News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan”, y “Water (Switzerland)” han recibido 2 citas cada una, mostrando un impacto moderado. Aunque algunas revistas tienen un mayor número de citas, la mayoría de las publicaciones están distribuidas en una amplia gama de revistas con un impacto variado.

Tabla IV
REVISTAS CON MÁS PUBLICACIONES Y NÚMERO DE CITAS.

Journal	Citas
Frontiers in Earth Science	13
Remote Sensing	9
Atmosphere	5
Applied Sciences (Switzerland)	2
News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences	2
Water (Switzerland)	2
Annales Geophysicae	1
Water Resources Research	1
Geoscience Frontiers	1
Geophysical Research Letters	1
Geomatics, Natural Hazards and Risk	1
Earth and Planetary Science Letters	1
Machine Learning and Knowledge Extraction	1
Annals of Geophysics	1
Journal of Geophysical Research: Space Physics	1
Sensors	1
Journal of Geophysical Research: Solid Earth	1
Geoloski Anali Balkanskoga Poluostrva	1
Geodynamics and Tectonophysics	1
Applied Mathematics and Nonlinear Sciences	1
Geodesy and Geodynamics	1
Earthquake Research Advances	1
Journal of Asian Earth Sciences: X	1
Symmetry	1
Natural Hazards and Earth System Sciences	1
Journal of Asian Earth Sciences	1
Sustainability (Switzerland)	1
Geophysical Journal International	1
IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing	1

B. Resultados específicos

La clasificación de los precursores se realizó en base a la información de la tabla V, esta consistió en agrupar aquellas investigaciones que consideraron los mismos tipos de precursor, para que, en base a esto, se definan las 13 categorías que se muestran en la tabla VI.

La relevancia de las categorías propuestas se mide en base a dos indicadores, el primero es el número de investigaciones que han estudiado un precursor y segundo, el número de citas asociadas con una determinada clasificación.

**TABLA V
INVESTIGACIONES Y TIPOS DE PRECURSORES**

autor	clasificación	precursores	citado por	año
Li et al. 2023	radiaciones en superficie	temperatura de brillo / anomalías de radiación infrarroja TIR	0	2023
Uyamk et al. 2023	Ionosférico	contenido total de electrones (TEC) ionosférico	5	2023
Zhou et al. 2021	gases subterráneos	hidrogeno / isotopos de hielo / gases (He, H2, Co2, CH4, Ar, y N2)	17	2021
Luo et al. 2023	deformación/tensión en la roca	anomalías de isolíneas espaciales	1	2023
Yue et al. 2022	radiaciones en superficie	radiaciones infrarrojas en la superficie terrestre	2	2022
Inyurt et al. 2019	Ionosférico	cambios en la capa de la ionosfera	9	2019
Suleyev et al. 2020	estadística espacio temporal	patrones espacio -temporales de distribución de terremotos	0	2020
Pulinets et al. 2024	gases subterráneos	radón 222Rn	3	2024
Zhu et al. 2024	geofluidos	anomalías químicas en fluidos de aguas termales	0	2024
Yu et al. 2021	deformación/tensión en la roca	anomalías de deformación (datos de deformación del pozo)	11	2021
Huang et al. 2024	datos geomagnéticos	anomalías geomagnéticas	2	2024
Chen et al. 2022	estadística espacio temporal	terremotos precursores	13	2022
Shreedharan et al. 2020	ondas sísmicas	variaciones en la velocidad y amplitud de las ondas elásticas	29	2020
Gao et al. 2023	estadística espacio temporal	quietud sísmica	0	2023
Chelidze et al. 2022	datos geomagnéticos	variaciones del nivel de agua / series temporales geomagnéticas	6	2022
Zhu et al. 2021	estadística espacio temporal	valores b relacionados con la ley de gutenberg richter	4	2021
Vasilev et al. 2021	gases subterráneos	filtraciones de agua y gases subterráneos / gas metano	6	2021
Zhang et al. 2021	atmosféricos	datos de temperatura del aire	16	2021
Snell et al. 2020	geofluidos	sobrepresiones de fluidos de poros en sistemas de fallas activas	12	2020
Petrescu et al. 2022	Electromagnetismo	emisiones electromagnéticas causadas por la carga de tensión en las rocas	3	2022
Zhai et al. 2020	radiaciones en superficie	anomalías en la radiación infrarroja saliente de onda larga	8	2020
Warden et al. 2020	Electromagnetismo	anomalías electromagnéticas en el rango de la frecuencia ultra baja (ULF)	8	2020
Li et al. 2024	Electromagnetismo	índices y anomalías electromagnéticas	0	2024
Bolton et al. 2020	Emisiones acústicas	estadísticas de emisiones acústicas	29	2020
Yue et al. 2023	radiaciones en superficie	anomalías en la radiación infrarroja	2	2023
Luo et al. 2024	deformación/tensión en la roca	variación temporal del campo de deformación	0	2024
Břizová et al. 2019	Ionosférico	precursores ionosféricos	2	2019
Li et al. 2022	Ionosférico	densidad de O+ y densidad de electrones / ionosférico	11	2022
Xie et al. 2022	Emisiones acústicas	300 estaciones que monitorean datos geoacusticos) datos electromagnéticos)	0	2022
Jiao et al. 2024	temperatura en superficie	anomalías térmicas derivadas de observaciones satelitales para pronosticar grandes terremotos	1	2024
Arnact et al. 2021	Ionosférico	variaciones en la velocidad del viento solar y la densidad y velocidad de protones	0	2021
Abdullayev et al. 2020	geofluidos	varias decenas de parámetros de agua subterránea	3	2020
Toader et al. 2023	gases subterráneos	radón / co2	0	2023
Bornyakov et al. 2022	deformación/tensión en la roca	deformaciones de rocas	2	2022
Yue et al. 2022	Ionosférico	contenido total de electrones (TEC) ionosférico	7	2022
Zhou et al. 2024	deformación/tensión en la roca	movimiento de la corteza y geoquímica a lo largo de años de observaciones a largo plazo	0	2024
Nasirbekovich et al. 2022	deformación/tensión en la roca	precursores geomagnéticos/ Observaciones magnetométricas a largo plazo	1	2022

Pulinets et al. 2021	deformación/tensión en la roca	movimientos de la corteza terrestre, emisiones de radón, ionización del aire, anomalías térmicas y atmosféricas, generación de campos eléctricos y emisiones electromagnéticas, variaciones en el plasma ionosférico, TEC vertical, perfiles verticales de concentración de electrones	16	2021
Zhao et al. 2021	temperatura en superficie	anomalías geotérmicas de alta temperatura	17	2021
Fidani et al. 2021	Ionosférico	anomalías ionosféricas	11	2021
Lu et al. 2023	geofluidos	geofluidos	1	2023
Jiao et al. 2022	temperatura en superficie	temperatura atmosférica	4	2022
Feng et al. 2022	gases subterráneos	radón en aguas subterráneas	12	2022
Sornette et al. 2021	multiparamétrico	nivelación, magnetismo, resistividad del suelo, corrientes terrestres, gravedad, estrés de la tierra, radón de agua del pozo, nivel de agua del pozo,	5	2021
Wu et al. 2023	deformación/tensión en la roca	campo de tensión de la corteza / reducción dieléctrica de microondas / radiación infrarroja adicional / ionización atmosférica	17	2023
Li et al. 2021	gases subterráneos	cambios hidro geoquímicos, isótopos de hidrógeno, oxígeno	22	2021
Wu et al. 2024	datos geomagnéticos	anomalías geomagnéticas	1	2024
Freund et al. 2022	atmosféricos	tormentas y perturbaciones atmosféricas	5	2022
Wang et al. 2022	Electromagnetismo	pulsos electromagnéticos de frecuencia ultra baja anómalos ULFEM	5	2022
Anagnostopoulos et al. 2021	Electromagnetismo	ondas electromagnéticas de frecuencia ultra baja ULF	3	2021
Sadhukhan et al. 2023	atmosféricos	temperatura global	6	2023
Zhan et al. 2022	temperatura en superficie	anomalías térmicas	2	2022
Filizzola et al. 2022	temperatura en superficie	secuencias significativas de anomalías térmicas SSTA	18	2022
Xiong et al. 2022	Ionosférico	contenido total de electrones (TEC) ionosférico	12	2022
Wang et al. 2024	Ionosférico	datos ionosféricos	0	2024
Nagao et al. 2021	Electromagnetismo	pulsos electromagnéticos presísmicos VLF	0	2021

Varios autores clasifican los precusores sísmicos en tres categorías, precusores de superficie, atmosféricos e ionosféricos,[15], [16], [17], [18]. Sin embargo, esta clasificación no describe adecuadamente la gran variedad de elementos precusores que son estudiados actualmente, en tal sentido se propone la clasificación que se muestra en la tabla VI, en ella se aprecian trece categorías, en las columnas de la derecha se puede leer el número de publicaciones y citas asociadas con cada una de ellas.

TABLA VI
CLASIFICACION PROPUESTA (ORDENADA POR EL NÚMERO DE PUBLICACIONES)

Nº	clasificación propuesta	publicaciones	citas
1	Ionosférico	9	57
2	deformación/tensión en la roca	8	48
3	gases subterráneos	6	60
4	Electromagnetismo	6	19
5	temperatura en superficie	5	42
6	radiaciones en superficie	4	12
7	estadística espacio temporal	4	17
8	geofluidos	4	16
9	datos geomagnéticos	3	9
10	atmosféricos	3	27
11	Emisiones acústicas	2	29
12	ondas sísmicas	1	29
13	multiparamétrico	1	5

La agrupación propuesta considera que en la categoría “*Ionosférico*”, se encuentran artículos que estudian el contenido

total de electrones (TEC) ionosféricos, además de cambios en la capa ionosférica como la densidad de O⁺, densidad de electrones ionosféricos, variaciones de velocidad del viento solar, densidad y velocidad de protones, entre otras anomalías ionosféricas, esta clasificación tiene un total de 57 citas. La clasificación llamada “*deformación/tensión en la roca*”, agrupa a los precusores que consideran anomalías en la corteza terrestre que pueden medirse a través de deformaciones del macizo rocoso, mediciones en el campo de deformación, medición del movimiento de la corteza terrestre, variación de campos geomagnéticos, análisis del campo de tensión de la corteza terrestre, este grupo de publicaciones consideran 48 citas en total.

La clasificación “*gases subterráneos*”, considera estudios que miden variaciones de hidrógeno, isótopos de helio, gases como (He, H₂, CO₂, CH₄, Ar, y N₂), radón ²²²Rn, filtraciones de gas metano, isótopos de hidrógeno, oxígeno y gases subterráneos en general, esta clasificación agrupa el mayor número de citas con un total de 60. En la categoría “*Electromagnetismo*”, se consideran emisiones electromagnéticas, que pueden ser causadas por cambios en la tensión de las rocas, anomalías electromagnéticas en distintas frecuencias como la ULF, también puede incluir el análisis de pulsos, frecuencias y ondas electromagnéticas en general, aquí el número de citas llega a ser de 19.

Mientras que la categoría “*Temperatura en superficie*”, incluye el análisis de anomalías térmicas que pueden ser observadas a través de imágenes satelitales y otras

herramientas, también puede incluir anomalías geotérmicas y análisis de la temperatura atmosférica, el número de citas para esta categoría es de 42. Las “radiaciones en superficie” incluyen análisis del brillo en superficie, radiación infrarroja TIR, radiaciones de onda larga y radiación infrarroja en la superficie en general, en esta categoría se tiene un total de 12 citas.

En la agrupación “estadística espacio temporal”, se consideran cambios en patrones espacio temporales de distribución de terremotos a lo largo del tiempo, esto puede incluir clasificaciones de terremotos considerados como precursoros, análisis de quietud sísmica, aquí se agruparon 17 citas. La categoría “geofluidos” considera anomalías químicas en fluidos como aguas termales, cambios en la presión de fluidos, presión de poros en sistemas de fallas activas y geofluidos en general, aquí se tienen 16 citas.

Para la categoría “datos geomagnéticos” se agrupan anomalías geomagnéticas y análisis de series temporales de datos geomagnéticos en general, aquí el número de citas es de 9. La categoría “atmosféricos” agrupa datos de temperatura del aire, tormentas y perturbaciones atmosféricas en general, el número de citas es de 27.

En “emisiones acústicas” se toman en cuenta estadísticas de emisiones acústicas, puede incluir a estaciones que monitorean datos geoacústicos, las citas aquí son 29. La categoría “ondas sísmicas” consideran variaciones en la velocidad y amplitud de ondas sísmicas en general, aquí se tienen 29 citas.

Finalmente, los estudios multiparamétricos, consideran una combinación de varios de los parámetros o precursoros descritos anteriormente, aquí se tienen 5 citas.

IV. CONCLUSIONES

En base al análisis de los artículos seleccionados se ha podido identificar los precursoros sísmicos más investigados y que más citas han recibido en los últimos 5 años, además de proponer una clasificación basada en 13 nuevas categorías.

La clasificación propuesta considera las siguientes 13 categorías: *ionosférico, deformación/tensión en la roca, gases subterráneos, electromagnetismo, temperatura en superficie, radiaciones en superficie, estadística espacio temporal, geofluidos, datos geomagnéticos, atmosféricos, emisiones acústicas, ondas sísmicas y multiparamétrico*. Estas están basadas en el elemento, sustancia o propiedad que se mide y no en el método de medición asociado.

Entre los precursoros analizados, los fenómenos “ionosféricos” y “deformación/tensión en la roca” fueron los más investigados, representando el 35% y el 30% de las citas totales, respectivamente. Esto sugiere que estos tipos de precursoros han sido los que más atención han recibido en los últimos 5 años por la comunidad científica. Sin embargo, la alta cantidad de citas en categorías como “gases subterráneos” y “emisiones acústicas” indica que estos precursoros también

tienen un impacto significativo, lo que podría abrir nuevas vías de investigación.

Aunque la categoría “multiparamétrico”, no destaca por el número de publicaciones o citas, si lo hace por lo pertinente de su enfoque, en ellas los investigadores afirman de manera acertada que el reto de la predicción sísmica se debe abordar considerando el mayor número de variables involucradas en el fenómeno.

No se descarta la interacción existente entre los precursoros aquí clasificados, es posible que estos formen parte de un conjunto de fenómenos previos a la ocurrencia de eventos sísmicos, cuyo detalle y flujo de acontecimientos aún no se ha determinado por completo.

La categorización, análisis y profundización del conocimiento de los precursoros sísmicos, puede tener un efecto dramático en la predicción de eventos sísmicos y por lo tanto en la seguridad de las comunidades que se ven expuestas a ello.

REFERENCES

- [1] G. Martinelli, “Previous, current, and future trends in research into earthquake precursors in geofluids,” May 01, 2020, *MDPI AG*. doi: 10.3390/geosciences10050189.
- [2] M. Akhondzadeh, A. De Santis, D. Marchetti, and X. Shen, “Swarm-TEC Satellite Measurements as a Potential Earthquake Precursor Together With Other Swarm and CSES Data: The Case of Mw7.6 2019 Papua New Guinea Seismic Event,” *Front Earth Sci (Lausanne)*, vol. 10, Feb. 2022, doi: 10.3389/feart.2022.820189.
- [3] M. Wiss, “valuation of Proposed Earthquake Precursors; American Geophysical Union: Washington, DC, USA,” 1991.
- [4] Q. Bletery and J.-M. Nocquet, “The precursory phase of large earthquakes.” [Online]. Available: <https://www.science.org>
- [5] P. Picozza, L. Conti, and A. Sotgiu, “Looking for Earthquake Precursors From Space: A Critical Review,” Jul. 14, 2021, *Frontiers Media S.A.* doi: 10.3389/feart.2021.676775.
- [6] A. De Santis *et al.*, “A Multiparametric Approach to Study the Preparation Phase of the 2019 M7.1 Ridgecrest (California, United States) Earthquake,” *Front Earth Sci (Lausanne)*, vol. 8, Nov. 2020, doi: 10.3389/feart.2020.540398.
- [7] A. De Santis *et al.*, “Magnetic field and electron density data analysis from Swarm Satellites searching for ionospheric effects by great earthquakes: 12 case studies from 2014 to 2016,” *Atmosphere (Basel)*, vol. 10, no. 7, Jul. 2019, doi: 10.3390/atmos10070371.
- [8] L. Wang and R. Burgmann, “Statistical Significance of Precursory Gravity Changes Before the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki Earthquake,” *Geophys Res Lett*, vol. 46, no. 13, pp. 7323–7332, Jul. 2019, doi: 10.1029/2019GL082682.
- [9] L. Conti, P. Picozza, and A. Sotgiu, “A Critical Review of Ground Based Observations of Earthquake Precursors,” Jul. 06, 2021, *Frontiers Media S.A.* doi: 10.3389/feart.2021.676766.
- [10] A. De Santis *et al.*, “A Multiparametric Approach to Study the Preparation Phase of the 2019 M7.1 Ridgecrest (California, United States) Earthquake,” *Front Earth Sci (Lausanne)*, vol. 8, Nov. 2020, doi: 10.3389/feart.2020.540398.
- [11] G. Martinelli, “Previous, current, and future trends in research into earthquake precursors in geofluids,” May 01, 2020, *MDPI AG*. doi: 10.3390/geosciences10050189.
- [12] M. Akhondzadeh, A. De Santis, D. Marchetti, and X. Shen, “Swarm-TEC Satellite Measurements as a Potential Earthquake Precursor Together With Other Swarm and CSES Data: The Case of Mw7.6 2019 Papua New Guinea Seismic Event,” *Front Earth Sci (Lausanne)*, vol. 10, Feb. 2022, doi: 10.3389/feart.2022.820189.
- [13] P. Picozza, L. Conti, and A. Sotgiu, “Looking for Earthquake Precursors From Space: A Critical Review,” Jul. 14, 2021, *Frontiers Media S.A.* doi: 10.3389/feart.2021.676775.

- [14] L. Conti, P. Picozza, and A. Sotgiu, "A Critical Review of Ground Based Observations of Earthquake Precursors," Jul. 06, 2021, *Frontiers Media S.A.* doi: 10.3389/feart.2021.676766.
- [15] J. Y. Liu *et al.*, "Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements," 2004.
- [16] S. Y. Aleksandrin *et al.*, "High-energy charged particle bursts in the near-Earth space as earthquake precursors," 2003.
- [17] M. Shah, A. C. Aibar, M. A. Tariq, J. Ahmed, and A. Ahmed, "Possible ionosphere and atmosphere precursory analysis related to Mw > 6.0 earthquakes in Japan," *Remote Sens Environ*, vol. 239, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.rse.2019.111620.
- [18] M. U. Draz, M. Shah, P. Jamjareegulgarn, R. Shahzad, A. M. Hasan, and N. A. Ghamry, "Deep Machine Learning Based Possible Atmospheric and Ionospheric Precursors of the 2021 Mw 7.1 Japan Earthquake," *Remote Sens (Basel)*, vol. 15, no. 7, Apr. 2023, doi: 10.3390/rs15071904.
- [19] M. S. Akhoirshieda, K. M. Naim Ku Khalif, and S. Awang, "Artificial intelligence in the United Arab Emirates public sector: a systematic literature review," *IAES International Journal of Artificial Intelligence (IJ-AI)*, vol. 13, no. 3, p. 2472, Sep. 2024, doi: 10.11591/ijai.v13.i3.pp2472-2481.
- [20] S. Shreedharan, D. C. Bolton, J. Rivière, and C. Marone, "Preseismic Fault Creep and Elastic Wave Amplitude Precursors Scale With Lab Earthquake Magnitude for the Continuum of Tectonic Failure Modes," *Geophys Res Lett*, vol. 47, no. 8, Apr. 2020, doi: 10.1029/2020GL086986.
- [21] D. C. Bolton, S. Shreedharan, J. Rivière, and C. Marone, "Acoustic Energy Release During the Laboratory Seismic Cycle: Insights on Laboratory Earthquake Precursors and Prediction," *J Geophys Res Solid Earth*, vol. 125, no. 8, Aug. 2020, doi: 10.1029/2019JB018975.
- [22] C. Li, X. Zhou, Y. Yan, S. Ouyang, and F. Liu, "Hydrogeochemical characteristics of hot springs and their short-term seismic precursor anomalies along the Xiaojiang fault zone, southeast Tibet plateau," *Water (Switzerland)*, vol. 13, no. 19, Oct. 2021, doi: 10.3390/w13192638.
- [23] C. Filizzola *et al.*, "RST Analysis of Anomalous TIR Sequences in Relation with Earthquakes Occurred in Turkey in the Period 2004–2015," *Remote Sens (Basel)*, vol. 14, no. 2, Jan. 2022, doi: 10.3390/rs14020381.
- [24] X. Zhou, Y. Yan, W. Fang, W. Wang, H. Shi, and P. Li, "Short-Term Seismic Precursor Anomalies of Hydrogen Concentration in Luojishan Hot Spring Bubbling Gas, Eastern Tibetan Plateau," *Front Earth Sci (Lausanne)*, vol. 8, Jan. 2021, doi: 10.3389/feart.2020.586279.
- [25] W. Zhao *et al.*, "Weighted information models for the quantitative prediction and evaluation of the geothermal anomaly area in the plateau: A case study of the sichuan–tibet railway," *Remote Sens (Basel)*, vol. 13, no. 9, May 2021, doi: 10.3390/rs13091606.
- [26] L. Wu *et al.*, "Scrutinizing and rooting the multiple anomalies of Nepal earthquake sequence in 2015 with the deviation-time-space criterion and homologous lithosphere-coversphere-atmosphere-ionosphere coupling physics," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 23, no. 1, pp. 231–249, Jan. 2023, doi: 10.5194/nhess-23-231-2023.
- [27] Y. Zhang, Q. Meng, Z. Wang, X. Lu, and D. Hu, "Temperature variations in multiple air layers before the Mw 6.2 2014 Ludian earthquake, Yunnan, China," *Remote Sens (Basel)*, vol. 13, no. 5, pp. 1–17, Mar. 2021, doi: 10.3390/rs13050884.
- [28] S. Pulineti *et al.*, "Ionosphere Sounding for Pre-seismic Anomalies Identification (INSPIRE): Results of the Project and Perspectives for the Short-Term Earthquake Forecast," *Front Earth Sci (Lausanne)*, vol. 9, Apr. 2021, doi: 10.3389/feart.2021.610193.
- [29] H. Chen, S. Qin, L. Xue, B. Yang, and K. Zhang, "Universal precursor seismicity pattern before locked-segment rupture and evolutionary rule for landmark earthquakes," *Geoscience Frontiers*, vol. 13, no. 3, May 2022, doi: 10.1016/j.gsf.2021.101314.
- [30] T. Snell, N. De Paola, J. van Hunen, S. Nielsen, and C. Collettini, "Modelling fluid flow in complex natural fault zones: Implications for natural and human-induced earthquake nucleation," *Earth Planet Sci Lett*, vol. 530, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.epsl.2019.115869.
- [31] X. Feng *et al.*, "Groundwater Radon Precursor Anomalies Identification by EMD-LSTM Model," *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 1, Jan. 2022, doi: 10.3390/w14010069.
- [32] P. Xiong, C. Long, H. Zhou, X. Zhang, and X. Shen, "GNSS TEC-Based Earthquake Ionospheric Perturbation Detection Using a Novel Deep Learning Framework," *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens*, vol. 15, pp. 4248–4263, 2022, doi: 10.1109/JSTARS.2022.3175961.
- [33] Z. Yu *et al.*, "Evaluation of pre-earthquake anomalies of borehole strain network by using receiver operating characteristic curve," *Remote Sens (Basel)*, vol. 13, no. 3, Jan. 2021, doi: 10.3390/rs13030515.
- [34] M. Li, H. Wang, J. Liu, and X. Shen, "Two Large Earthquakes Registered by the CSES Satellite during Its Earthquake Prediction Practice in China," *Atmosphere (Basel)*, vol. 13, no. 5, May 2022, doi: 10.3390/atmos13050751.
- [35] C. Fidani, "West Pacific Earthquake Forecasting Using NOAA Electron Bursts With Independent L-Shells and Ground-Based Magnetic Correlations," *Front Earth Sci (Lausanne)*, vol. 9, Aug. 2021, doi: 10.3389/feart.2021.673105.
- [36] S. Inyurt, S. Peker, and C. Mekik, "Monitoring potential ionospheric changes caused by the Van earthquake (Mw7.2)," *Ann Geophys*, vol. 37, no. 2, pp. 143–151, Mar. 2019, doi: 10.5194/angeo-37-143-2019.
- [37] D. Zhai, X. Zhang, and P. Xiong, "Detecting thermal anomalies of earthquake process within outgoing longwave radiation using time series forecasting models," *Annals of Geophysics*, vol. 63, no. 5, pp. 1–18, 2020, doi: 10.4401/ag-8057.
- [38] Sheldon Warden, Laura MacLean, Jim Lemon, and Dan Schneider, "Statistical analysis of ULF seismomagnetic phenomena at Kakioka, Japan, during 2001–2010," *J Geophys Res Space Phys*, vol. 119, no. 6, pp. 4998–5011, 2014, doi: 10.1002/2014JA019789.
- [39] Y. Yue, H. Koivula, M. Bilker-Koivula, Y. Chen, F. Chen, and G. Chen, "TEC Anomalies Detection for Qinghai and Yunnan Earthquakes on 21 May 2021," *Remote Sens (Basel)*, vol. 14, no. 17, Sep. 2022, doi: 10.3390/rs14174152.
- [40] T. Chelidze, T. Kiria, G. Melikadze, T. Jimsheladze, and G. Kobzev, "Earthquake Forecast as a Machine Learning Problem for Imbalanced Datasets: Example of Georgia, Caucasus," *Front Earth Sci (Lausanne)*, vol. 10, Mar. 2022, doi: 10.3389/feart.2022.847808.
- [41] A. Vasilev *et al.*, "New Possible Earthquake Precursor and Initial Area for Satellite Monitoring," *Front Earth Sci (Lausanne)*, vol. 8, Feb. 2021, doi: 10.3389/feart.2020.586283.
- [42] B. Sadhukhan, S. Chakraborty, S. Mukherjee, and R. K. Samanta, "Climatic and seismic data-driven deep learning model for earthquake magnitude prediction," *Front Earth Sci (Lausanne)*, vol. 11, 2023, doi: 10.3389/feart.2023.1082832.
- [43] H. Uyanik *et al.*, "A Multi-Input Convolutional Neural Networks Model for Earthquake Precursor Detection Based on Ionospheric Total Electron Content," *Remote Sens (Basel)*, vol. 15, no. 24, Dec. 2023, doi: 10.3390/rs15245690.
- [44] D. Sornette, E. Mearns, and S. Wheatley, "Revisiting the predictability of the haicheng and tangshan earthquakes," *Symmetry (Basel)*, vol. 13, no. 7, Jul. 2021, doi: 10.3390/sym13071206.
- [45] F. T. Freund, M. R. Mansouri Daneshvar, and M. Ebrahimi, "Atmospheric Storm Anomalies Prior to Major Earthquakes in the Japan Region," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 16, Aug. 2022, doi: 10.3390/su141610241.
- [46] C. Wang, L. E. Christman, S. L. Klemperer, J. M. Glen, D. K. McPhee, and B. Chen, "Assessment of a claimed ultra-low frequency electromagnetic (ULFEM) earthquake precursor." [Online]. Available: <https://purl.stanford.edu/qm389py5036>
- [47] S. Zhu, "Estimation of seismic hazard around the Ordos Block of China based on spatial and temporal variations of b-values," *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 12, no. 1, pp. 2048–2069, 2021, doi: 10.1080/19475705.2021.1949394.
- [48] Z. H. Jiao and X. Shan, "Consecutive statistical evaluation framework for earthquake forecasting: Evaluating satellite surface

- temperature anomaly detection methods,” *Journal of Asian Earth Sciences: X*, vol. 7, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.jaesx.2022.100096.
- [49] S. Pulinet, I. Mironova, P. Miklyaev, T. Petrova, A. Shitov, and A. Karagodin, “Radon Variability as a Result of Interaction with the Environment,” *Atmosphere (Basel)*, vol. 15, no. 2, Feb. 2024, doi: 10.3390/atmos15020167.
- [50] L. Petrescu and I. A. Moldovan, “Prospective Neural Network Model for Seismic Precursory Signal Detection in Geomagnetic Field Records,” *Mach Learn Knowl Extr*, vol. 4, no. 4, pp. 912–923, Dec. 2022, doi: 10.3390/make4040046.
- [51] Abdullayev Abdulaziz and Yusupov Sh., “ISSN 2518-170X (Online), ISSN 2224-5278 (Print) SERIES OF GEOLOGY AND TECHNICAL SCIENCES 2 (440).” [Online]. Available: <http://www.geolog-technical.kz/index.php/en/>
- [52] G. Anagnostopoulos, “On the Origin of ULF Magnetic Waves Before the Taiwan Chi-Chi 1999 Earthquake,” *Front Earth Sci (Lausanne)*, vol. 9, Nov. 2021, doi: 10.3389/feart.2021.730162.
- [53] Y. Yue, F. Chen, and G. Chen, “Statistical and Comparative Analysis of Multi-Channel Infrared Anomalies before Earthquakes in China and the Surrounding Area,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 16, Aug. 2022, doi: 10.3390/app12167958.
- [54] Y. Huang, P. Zhu, and S. Li, “Feasibility Study on Earthquake Prediction Based on Impending Geomagnetic Anomalies,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.3390/app14010263.
- [55] Y. Yue, F. Chen, and G. Chen, “Pre-Seismic Anomaly Detection from Multichannel Infrared Images of FY-4A Satellite,” *Remote Sens (Basel)*, vol. 15, no. 1, Jan. 2023, doi: 10.3390/rs15010259.
- [56] L. Břizová, J. Kříž, F. Studnička, and J. Šlégr, “Methods for the evaluation of the stochastic properties of the ionosphere for earthquake prediction-random matrix theory,” *Atmosphere (Basel)*, vol. 10, no. 7, Jul. 2019, doi: 10.3390/atmos10070413.
- [57] S. A. Bornyakov, A. I. Miroshnichenko, G. V. Vstovsky, A. E. Sintsov, and D. V. Salko, “NEW APPROACH TO STRONG EARTHQUAKE PREDICTION IN THE SOUTH BAIKAL REGION ON THE BASIS OF ROCK DEFORMATION MONITORING DATA: METHODOLOGY AND RESULTS,” *Geodynamics and Tectonophysics*, vol. 13, no. 2, 2022, doi: 10.5800/GT-2022-13-2-0588.
- [58] C. Zhan *et al.*, “Application of 3D Error Diagram in Thermal Infrared Earthquake Prediction: Qinghai–Tibet Plateau,” *Remote Sens (Basel)*, vol. 14, no. 23, Dec. 2022, doi: 10.3390/rs14235925.
- [59] Z. Jiao and X. Shan, “A Bayesian Approach for Forecasting the Probability of Large Earthquakes Using Thermal Anomalies from Satellite Observations,” *Remote Sens (Basel)*, vol. 16, no. 9, May 2024, doi: 10.3390/rs16091542.
- [60] A. K. Nasirbekovich and Y. V. Rustamovich, “Models (form) of long-, medium- and short-term earthquake precursors,” *Geod Geodyn*, vol. 13, no. 6, pp. 609–618, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.geog.2022.07.002.
- [61] C. Lu *et al.*, “Earthquake geochemical scientific expedition and research,” *Earthquake Research Advances*, vol. 3, no. 4, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.eqrea.2023.100239.
- [62] Z. Wu, J. Xia, B. Tan, B. Wang, Q. Zhao, and S. He, “Detection and characterization of geomagnetic anomaly waveforms,” *J Asian Earth Sci*, vol. 259, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.jseaes.2023.105837.
- [63] M. Li, Z. Zhang, S. Yang, X. Kong, and M. Jiao, “Research on thermal infrared anomaly characteristics of moderate strong earthquakes in northeast China,” *Front Earth Sci (Lausanne)*, vol. 11, 2023, doi: 10.3389/feart.2023.1082707.
- [64] R. Zhu *et al.*, “Anomaly Detection Using Machine Learning in Hydrochemical Data From Hot Springs: Implications for Earthquake Prediction,” *Water Resour Res*, vol. 60, no. 6, Jun. 2024, doi: 10.1029/2023WR034748.
- [65] J. Gao *et al.*, “Low-intensity anomaly involving $M \geq 4$ events preceding strong earthquakes in Tibet,” *Front Earth Sci (Lausanne)*, vol. 11, Jan. 2023, doi: 10.3389/feart.2023.1043468.
- [66] X. Li, Y. Zhu, L. Feng, Y. Ji, and W. Zhu, “Electromagnetic Short-Term to Imminent Forecast Indices for $M \geq 5.5$ Earthquakes in the Gansu–Qinghai–Sichuan Region of China,” *Sensors*, vol. 24, no. 12, Jun. 2024, doi: 10.3390/s24123734.
- [67] G. Luo, Y. Xu, H. Luo, F. Ding, and W. Li, “Spatio-temporal characteristics of seismic strain anomalies reveal seismic risk zones along the Longmenshan fault zone and adjacent areas,” *Front Earth Sci (Lausanne)*, vol. 12, 2024, doi: 10.3389/feart.2024.1269753.
- [68] J. Xie *et al.*, “Weekly earthquake prediction in a region of China based on an intensive precursor network AETA,” *Front Earth Sci (Lausanne)*, vol. 10, Sep. 2022, doi: 10.3389/feart.2022.902745.
- [69] F. Arnact, D. J. Vučković, I. Vasiljević, and V. Cvetkov, “Correlability of Solar Wind with Seismic Events in the Balkan Peninsula Zone,” *Geoloski Anali Balkanskoga Poluostrva*, vol. 82, no. 2, pp. 69–83, 2021, doi: 10.2298/GABP211029008A.
- [70] V. E. Toader *et al.*, “The Results and Developments of the Radon Monitoring Network in Seismic Areas,” *Atmosphere (Basel)*, vol. 14, no. 7, Jul. 2023, doi: 10.3390/atmos14071061.
- [71] H. Zhou, “Application of Intelligent Optimization Algorithms to the Design of Automatic Generation of Software Tests for Data Anomaly Identification,” *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, vol. 9, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.2478/amns.2023.2.01713.
- [72] L. Wang, Z. Li, Y. Chen, J. Wang, and J. Fu, “MaxEnt SeismoSense Model: Ionospheric Earthquake Anomaly Detection Based on the Maximum Entropy Principle,” *Atmosphere (Basel)*, vol. 15, no. 4, Apr. 2024, doi: 10.3390/atmos15040419.
- [73] T. Nagao *et al.*, “Development and Preliminary Analysis of a VLF-Band Electromagnetic-Wave Observation System for Short-Term Earthquake Precursory Monitoring,” *Front Earth Sci (Lausanne)*, vol. 9, May 2021, doi: 10.3389/feart.2021.658825.