

## Técnicas de IA para el estudio de datos geomagnéticos y su implementación como precursores sísmicos: estado del arte

**Juan Antonio Murillo Vargas**

[mm21320016@acapulco.tecnm.mx](mailto:mm21320016@acapulco.tecnm.mx)

<https://orcid.org/0000-0002-7921-3783>

Tecnológico Nacional de México Campus Acapulco, México

**Eduardo De la Cruz Gámez**

[eduardo.dg@acapulco.tecnm.mx](mailto:eduardo.dg@acapulco.tecnm.mx)

<https://orcid.org/0000-0003-3318-788X>

Tecnológico Nacional de México Campus Acapulco, México

**Mario Hernández Hernández**

[mario.hh@chilpancingo.tecnm.mx](mailto:mario.hh@chilpancingo.tecnm.mx)

<https://orcid.org/0000-0001-8330-4779>

Tecnológico Nacional de México Campus Chilpancingo, México

**Francisco Javier Gutiérrez Mata**

[francisco.gm@acapulco.tecnm.mx](mailto:francisco.gm@acapulco.tecnm.mx)

<https://orcid.org/0000-0002-1753-5701>

Tecnológico Nacional de México Campus Acapulco, México

**Antonio Alfonso Rodríguez Rosales**

[antonio.rodriguez@icat.unam.mx](mailto:antonio.rodriguez@icat.unam.mx)

<https://orcid.org/0000-0002-2889-075X>

Centro de Investigación Científica y Tecnológica de Guerrero, A.C. México

### RESUMEN

Este trabajo presenta los resultados del desarrollo de un estado del arte con temas relacionados con el análisis de sistemas inteligentes utilizando datos geomagnéticos, presentes en la ionosfera, implementando técnicas de IA (Inteligencia Artificial) para el desarrollo de posibles precursores sísmicos; el trabajo mencionado tiene como objetivo la revisión de técnicas y/o algoritmos de IA, lenguajes de programación, parámetros de interés y bases de datos.

Como resultado de la investigación, se obtuvieron 106 documentos conformados por tesis, artículos de revistas, y exposiciones en congresos por medio de carteles, de carácter nacional e internacional; se concluyó que dentro de las técnicas y/o algoritmos investigados destacan las Redes Neuronales Convolucionales (ANN), Máquina Vectores de Soporte (SVM), Árboles de decisión y K-MEANS, estas técnicas son de utilidad para observar el comportamiento de los datos y encontrar patrones en la información.

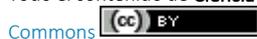
**Palabras clave:** precursor-sísmico; IA; geomagnetismo; aprendizaje-automático;

Correspondencia: [mm21320016@acapulco.tecnm.mx](mailto:mm21320016@acapulco.tecnm.mx)

Artículo recibido 28 enero 2023 Aceptado para publicación: 28 febrero 2023

Conflictos de Interés: Ninguna que declarar

Todo el contenido de **Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar**, publicados en este sitio están disponibles bajo Licencia [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



Cómo citar: Murillo Vargas, J. A., Gámez, E. D. la C., Hernández Hernández, M., Gutiérrez Mata, F. J., & Rodríguez Rosales, A. A. (2023). Técnicas de IA para el estudio de datos geomagnéticos y su implementación como precursores sísmicos: estado del arte. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(1), 9439-9451. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v7i1.5150](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.5150)

## AI techniques for the study of Geomagnetic data and their implementation as seismic precursors: state of the art

### ABSTRACT

This work presents the results of the development of a state of the art with topics related to the analysis of intelligent systems using geomagnetic data, present in the ionosphere, implementing AI (Artificial Intelligence) techniques for the development of possible seismic precursors; the mentioned work has as objective the revision of AI techniques and/or algorithms, programming languages, parameters of interest and databases.

As a result of the research, 106 documents were obtained, consisting of theses, journal articles, and exhibitions in congresses by means of posters, of national and international character; it was concluded that within the techniques and/or algorithms investigated, the Convolutional Neural Networks (ANN), Support Vector Machines (SVM), Decision Trees and K-MEANS stand out; these techniques are useful to observe the behavior of the data and to find patterns in the information.

**Keywords:** *earthquake pre-cursor; IA; geomagnetism; machine-learning.*

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, se considera de gran interés científico el estudio de los parámetros presentes en la ionosfera, debido a muchos fenómenos que ocurren dentro de esta capa, y tienen influencia en el planeta, un ejemplo resulta en las afectaciones a las telecomunicaciones y los satélites de geolocalización a causa de la interacción del viento solar producido por el sol. (¿Puede la actividad del Sol afectar las comunicaciones satelitales?, s. f.).

Diversos estudios han logrado correlacionar ciertos parámetros como el TEC (Total Electro Content por sus siglas en inglés) y el índice-DST (perturbación tormenta-tiempo, por sus siglas en inglés) con los eventos sísmicos ocurridos (Pulinets et al., 2005), debido a que existe una variación de sus parámetros antes, durante y después de ocurrir algún evento sísmico de gran magnitud.

Se le conoce como precursor sísmico a la capacidad de conocer la ubicación, magnitud y momento en el cual se puede producir un sismo (M. Herraiz.,2000). De manera general, hablar de dicha teoría, genera cierto grado de polémica en la comunidad de expertos dedicados al estudio de la sismología, sin embargo, se espera que con el tiempo y con estudios más profundos estas hipótesis puedan ser comprobadas.

M. Herraiz (2000), define que diversos autores han descrito como posibles precursores sísmicos distintas condiciones meteorológicas, el comportamiento animal y algunos tipos de comportamientos eléctricos.

Uno de los primeros indicios de precursores sísmicos tiene registro en el año de 1975 cuando sismólogos Chinos anunciaron con cierto grado de “precisión” el terremoto ocurrido en la provincia de la ciudad de Haicheng, gracias a la observación de diversos factores considerados como precursores sísmicos, entre los que destacan algunos tipos de señales geo eléctricas así como alteraciones en el nivel de gas Radón dentro de la ionosfera (Rodríguez, 2021), sin embargo, para un grupo de científicos este acierto se encuentra en estado de incertidumbre y generó cierta controversia durante esa época, ya que al año siguiente ocurrió un sismo en la región de Tangshan cerca de la ciudad de Pekín, el cual generó un estimado 600000 muertes, esto produjo un retroceso para los sismólogos y demostró que el estudio de estos posibles precursores están más allá de simples estimaciones aleatorias.

Los efectos que se producen en la ionosfera se le conocen generalmente como parámetros Geomagnéticos o electromagnéticos, ya que estos afectan los campos eléctricos y magnéticos (M. Herraiz, 2000). Se considera que estos parámetros tienen correlación con los sismos.

Diversas organizaciones conocidas como IAGA (Asociación Internacional de Geomagnetismo y Aeronomía) y la IASPEI en el año de 1987 han denominado a estos parámetros relacionados como “Efectos-sismo-magnéticos”, los cuales se dividen en dos tipos:

1. Las variaciones de los campos eléctricos y magnéticos originadas en la zona de ruptura y que se observan dentro de su entorno
2. Los fenómenos que tienen el mismo origen, pero se originan en la ionosfera o Magnetosfera.

La Inteligencia Artificial ha experimentado un progreso continuo a lo largo de estos años debido al avance de las ciencias de la computación. Hoy en día, gracias a estas técnicas, se han podido estudiar una gran variedad de fenómenos tanto físicos como sociales, y se han logrado elaborar métodos predictores de información. Esto es posible debido a que existen datos que sirven como material de entrenamiento para estas técnicas (Holgado, 2023).

Dentro del abundante contenido de técnicas y/o algoritmos de IA destacan las redes neuronales, artificiales (ANN) y/o convolucionales (CNN), aprendizaje automático (Machine Learning) y aprendizaje profundo (Deep Learning), debido a que se han objeto de uso para la predicción de fenómenos naturales como por ejemplo huracanes y sequias (Dabbakuti et al., 2020).

**Sin embargo, la IA también cuenta con ciertas carencias o problemáticas, algunos ejemplos son los siguientes:**

- La gran cantidad de información para poder realizar un entrenamiento adecuado (a mayores datos mejor es el grado de exactitud de los resultados).
- La capacidad de procesamiento del CPU donde se realizan los entrenamientos (existen algoritmos que debido a sus cálculos complejos afectan el procesamiento y rendimiento del procesador).

Diversos estudios donde se implementa la inteligencia artificial como ejercicio para resolver conflictos han comprobado hipótesis presentes sobre perturbaciones presentes

en la ionosfera con los sismos (Banna et al., 2020), lo que espera que en un futuro se logren comprobar estas teorías.

La ciudad de Acapulco, Guerrero es azotada constantemente por eventos sísmicos debido a su gran actividad tectónica producto de la brecha de Guerrero (zona geográfica que comprende los estados de Guerrero y Oaxaca donde convergen dos placas de importancia sísmica), por esta razón, se considera de gran relevancia realizar un estudio a profundidad acerca de estos eventos de correlación y de tener la posibilidad, construir precursores sísmicos de gran fiabilidad (Investigan si la «Brecha de Guerrero» puede ocasionar un terremoto devastador, 2021), con esto se podría dar aviso a la población con mayor tiempo de antelación previniendo la menor pérdida de vidas humanas, implementándolo no solo la región, sino en cualquier zona geográfica donde se presente gran actividad sísmica.

Se han realizado múltiples estudios sobre los efectos del TEC en distintas zonas donde existe actividad sísmica relevante, (estado de Oaxaca, después del terremoto de 8.1 en el año 2017) (Melgarejo-Morales, 2020), sin embargo, en el estado de Guerrero no se han realizado algún tipo de investigación acerca de esta correlación sísmica.

## **METODOLOGÍA**

### **A. Selección del tema**

“Estudio de los parámetros geomagnéticos presentes en la ionosfera implementando técnicas de IA para el desarrollo de posibles precursores sísmicos”

### **B. Definiendo los límites espacio temporales**

Se deben definir ciertos criterios antes de iniciar una búsqueda de los documentos científicos a analizar, de los cuales se optó por las siguientes condiciones:

**Tiempo:** Se tomó como criterio analizar documentos menores a 10 años a partir de la fecha de la investigación.

**Origen de los documentos:** Se tomaron en cuenta como prioridad los documentos donde los estudios se realicen en países donde exista una actividad sísmica considerable.

**Idioma:** se tomaron en cuenta los documentos escritos en idioma inglés o español.

**Bases de datos:** se tomaron bases de datos de importancia académica, esta información debe ser de acceso libre (“open source”). Algunos de estos repositorios destacan los siguientes:

- Nature

- ResearchGate
- Scopus
- IEEE
- Science direct

**Autores:** Se investigó también la trayectoria de los autores, para ver su perfil académico y/o de investigación, con el fin de ubicar más artículos de interés que se presenten en su autoría o coautoría.

**Técnicas y/o algoritmos:** Los escritos deben destacar la implementación de técnicas de Inteligencia Artificial sin importar el tipo, con el fin de estudiar su posible implementación a futuro.

### **C. Definiendo las palabras clave o keywords**

Las keywords o palabras clave hacen referencia a los términos (compuestos por una o más palabras), que se emplean para realizar búsquedas dentro del mundo digital.

Como resultado final, las keywords fueron divididas en los siguientes temas:

Ciencias de la computación: IA, Machine Learning, SVM, Deep Learning, Random Forest, CNN, ANN.

Geomagnetismo: ionosphere, radiation, TEC, DST, earthquake, GPS, GNSS.

### **D. Elección de los subtemas**

El tema es la idea principal del objetivo que se está abordando, los subtemas son las ideas que parten del tema principal, bajo esta idea se abordaron las siguientes ideas a la hora de seleccionar los escritos adecuados.

- Inteligencia Artificial
- Precursores sísmicos
- Estudio de la ionosfera
- Ciencia de datos
- Geomagnetismo

### E. Recolección de información

En la tabla 1 se muestra el total de artículos, documentos y/o tesis con base al tema de investigación.

Repositorio	Total	Artículos/revistas	Tesis/otros
IEEE	20	20	
NATURE	10	10	
RESEARCH GATE	40	39	1
SCIENCE DIRECT	12	12	
REMOTE SENSING	6	6	
OTROS	18	15	3

### F. Análisis de los escritos obtenidos con base a los siguientes criterios

Con el objetivo de dar un mejor entendimiento a los escritos obtenidos se implementó un análisis con base a los siguientes criterios:

- Año de publicación
- Técnicas implementadas
- Variables usadas para realizar los entrenamientos

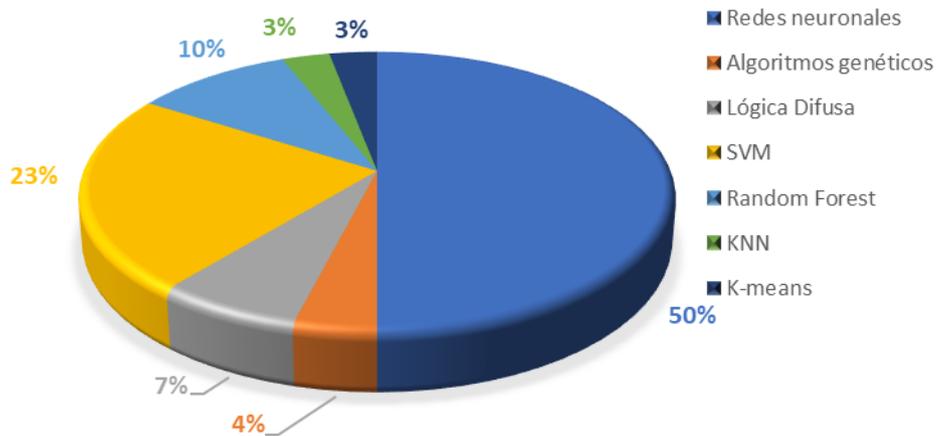
En la figura 1 se muestra una relación de los escritos con base a su fecha de publicación, estos periodos comprenden del 2022-2016, 2016-2012 e inferiores, si bien se tomó como un criterio de búsqueda escritos menores a 10 años de publicación, si los escritos con fechas anteriores son de gran relevancia en estos estudios se tomarán en cuenta.

**Figura 1:** Histograma de los escritos con base a su fecha de publicación.



Con la finalidad de dar una mejor interpretación al análisis de las técnicas de IA implementadas en los escritos, se implementó una gráfica de tipo circular donde se plasman los resultados. (véase figura 2).

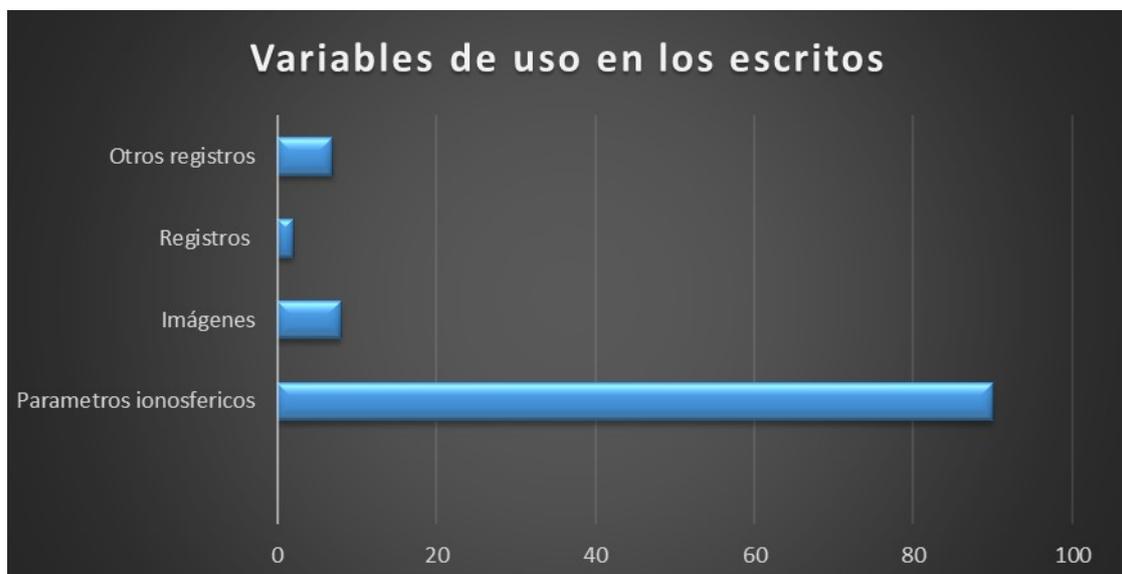
**Figura 2:** Gráfica circular con el porcentaje de las técnicas implementadas en los escritos.



Los parámetros de entrada se consideran de suma importancia para la investigación, ya que en conjunto con los algoritmos de ML tienen la finalidad de detectar patrones de interés y servir de predictores de información.

En la figura 3 se muestra un histograma con los parámetros que utilizaron los autores de los escritos.

**Figura 3:** Histograma de los parámetros de entrada utilizados para alimentar los entrenamientos.



## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Del total de 106 escritos consultados se tomaron en cuenta los siguientes resultados:

De todas las bases de datos consultadas se observó que ReseachGate fue la que tiene una colección más extensa, y facilidad para su búsqueda y obtención.

Durante el desarrollo se observó que a partir del año 2016 los escritos tuvieron un mayor crecimiento, esto se debe a que con el paso del tiempo estas teorías han sido aceptadas por la comunidad de sismólogos, si bien dichas teorías datan de un poco más de 50 años de conocerse, se espera que con el pasar de los años puedan ser comprobadas.

Aunque se tomó como criterio de búsqueda escritos menores a 10 años a partir de la realización de la investigación dentro de la búsqueda se encontró documentación que data de la segunda mitad del siglo XX, por lo que se consideran los precursores en estas teorías (mayormente los documentos actuales citan estas investigaciones).

La mayor parte de los artículos hacen referencias a técnicas de Machine Learning, si bien también el uso de Redes Neuronales Convolucionales (CNN) tiene mayor aceptación por los autores de dichas investigaciones, se pretende implantar diversas técnicas con el fin de seleccionar las que muestren un mejor grado de precisión.

La mayoría de las investigaciones implementan dentro de sus entrenamientos los parámetros TEC y DST presentes en la ionosfera, además que estos datos en su mayoría se obtienen de forma "open source" por medio de plataformas provenientes de instituciones gubernamentales, (SpaceWeather de la NOAA, NASA y la Agencia Espacial Europea), por lo que la calidad de la información proviene de instituciones confiables.

Aunque no se menciona en la mayoría de los escritos los lenguajes de programación para su uso, otros autores citan a lenguajes como R, MATLAB y Python, siendo este último el más usado por la comunidad de desarrolladores para Inteligencia Artificial, además que mencionan las librerías adecuadas para su desarrollo.

## CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Gracias al desarrollo de esta investigación se logró comprender la naturaleza de la problemática que se pretende resolver, los parámetros que serán de utilidad para realizar el entrenamiento de los algoritmos, y las diferentes técnicas que se pueden utilizar para el desarrollo de la investigación.

Se debe tener en cuenta que el campo de estudio de los precursores sísmicos es de reciente creación, por lo que se debe tener un cuidado especial con la información que

se difunda resultado de esta investigación.

Al contar con precursores sísmicos más eficaces se podrá alertar a la población ante un posible evento catastrófico de gran magnitud, con la finalidad de lograr la menor pérdida de vidas en general.

Uno de los grandes retos para el desarrollo de una aplicación Web en tiempo real se debe a que el estado de Guerrero no cuenta con receptores de navegación GPS/GNSS (por estos receptores con base a cálculos obtenidos se obtiene el TEC) por lo que se deben obtener estos datos de constelaciones de satélites SWARN obtenidos de la ESA (Agencia Espacial Europea) y estaciones GPS cercanas (Oaxaca, Michoacán, México) por lo que la información para dicha zona geográfica será limitada y se tendrá que presentar más datos para realizar un entrenamiento correcto.

#### LISTA DE REFERENCIAS

- Akhoondzadeh, M. (2013b). Genetic algorithm for TEC seismo-ionospheric anomalies detection around the time of the Solomon (Mw=8.0) earthquake of 06 February 2013. *Advances in Space Research*, 52(4), 581-590. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.04.012>
- Akyol, A. A., Arikan, O., & Arikan, F. (2020). A Machine Learning-Based Detection of Earthquake Precursors Using Ionospheric Data. *Radio Science*, 55(11). <https://doi.org/10.1029/2019rs006931>
- Asaly, S., Gottlieb, L., & Reuveni, Y. (2020). Using Support Vector Machine (SVM) and Ionospheric Total Electron Content (TEC) Data for Solar Flare Predictions. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 1469-1481. <https://doi.org/10.1109/jstars.2020.3044470>
- Asencio-Cortés, G., Martínez-Álvarez, F., Morales-Esteban, A., Reyes, J., & Troncoso, A. (2017). Using principal component analysis to improve earthquake magnitude prediction in Japan. *Logic Journal of the IGPL*, 25(6), 949-966. <https://doi.org/10.1093/jigpal/jzx049>
- Banna, M. H. A., Taher, K. A., Kaiser, M. S., Mahmud, M., Rahman, M. S., Hosen, A. S. M. S., & Cho, G. H. (2020). Application of Artificial Intelligence in Predicting Earthquakes: State-of-the-Art and Future Challenges. *IEEE Access*, 8, 192880-192923. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3029859>

- Beroza, G. C., Segou, M., & Mousavi, S. M. (2021). Machine learning and earthquake forecasting—next steps. *Nature Communications*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24952-6>
- Brissaud, Q., & Astafyeva, E. (2022). Near-real-time detection of co-seismic ionospheric disturbances using machine learning. *Geophysical Journal International*, 230(3), 2117-2130. <https://doi.org/10.1093/gji/ggac167>
- Dabbakuti, J. R. K. K., Jacob, A., Veeravalli, V. R., & Kallakunta, R. K. (2020). Implementation of IoT analytics ionospheric forecasting system based on machine learning and ThingSpeak. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 14(2), 341-347. <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2019.0394>
- De Santis, A., Marchetti, D., Spogli, L., Cianchini, G., Pavón-Carrasco, F. J., De Franceschi, G., Di Giovambattista, R., Perrone, L., Qamili, E., Cesaroni, C., De Santis, A., Ippolito, A., Piscini, A., Campuzano, S. A., Sabbagh, D., Amoroso, L., Carbone, M., Santoro, F., Abbattista, C., & Drimaco, D. (2019). 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*, 10(7), 371. <https://doi.org/10.3390/atmos10070371>
- Erdogan, E., Schmidt, M., Seitz, F., & Durmaz, M. (2017). Near real-time estimation of ionosphere vertical total electron content from GNSS satellites using B-splines in a Kalman filter. *Annales Geophysicae*, 35(2), 263-277. <https://doi.org/10.5194/angeo-35-263-2017>
- Fuying, Z., Yun, W., & Ningbo, F. (2011). Application of Kalman filter in detecting pre-earthquake ionospheric TEC anomaly. *Geodesy and Geodynamics*, 2(2), 43-47. <https://doi.org/10.3724/sp.j.1246.2011.00043.1>
- Gleisner, H., & Lundstedt, H. (2001). A neural network-based local model for prediction of geomagnetic disturbances. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 106(A5), 8425-8433. <https://doi.org/10.1029/2000ja900142>
- Herraiz, M. (2000). Una aproximación crítica a la propuesta de fenómenos ionosféricas como precursores sísmicos. *Física de la tierra*. <http://revistas.ucm.es/index.php/FITE/article/view/FITE0000110319A>
- Holgado, R. (2023, 16 enero). Investigadores españoles crean un sistema basado en IA para predecir huracanes

- <https://www.20minutos.es/tecnologia/emprendimiento/investigadores-espanoles-crean-un-sistema-basado-en-ia-para-predecir-huracanes-5092456/>  
Investigan si la «Brecha de Guerrero» puede ocasionar un terremoto devastador. (2021, 25 noviembre). SWI swissinfo.ch. [https://www.swissinfo.ch/spa/m%C3%A9xico-terremoto\\_investigacion-si-la-brecha-de-guerrero-puede-ocasionar-un-terremoto-devastador/47141128](https://www.swissinfo.ch/spa/m%C3%A9xico-terremoto_investigacion-si-la-brecha-de-guerrero-puede-ocasionar-un-terremoto-devastador/47141128)
- Martínez-Álvarez, F., Reyes, J., Morales-Esteban, A., & Rubio-Escudero, C. (2013). Determining the best set of seismicity indicators to predict earthquakes. Two case studies: Chile and the Iberian Peninsula. *Knowledge-Based Systems*, 50, 198-210. <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2013.06.011>
- Melgarejo-Morales, A. (2020, 2 septiembre). Examination of seismo-ionospheric anomalies before earthquakes of  $M_w \geq 5.1$  for the period 2008–2015 in Oaxaca, Mexico using GPS-TEC. SpringerLink. [https://link.springer.com/article/10.1007/s11600-020-00470-9?error=cookies\\_not\\_supported&code=a86e9dd7-86bb-4fa3-adb8-30ee5543fd2f](https://link.springer.com/article/10.1007/s11600-020-00470-9?error=cookies_not_supported&code=a86e9dd7-86bb-4fa3-adb8-30ee5543fd2f)
- Morales-Esteban, A., Martínez-Álvarez, F., Troncoso, A., Justo, J., & Rubio-Escudero, C. (2010). Pattern recognition to forecast seismic time series. *Expert Systems with Applications*, 37(12), 8333-8342. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.05.050>
- ¿Puede la actividad del Sol afectar las comunicaciones satelitales? (s. f.). Satelital-Móvil. <https://www.satelital-movil.com/2012/04/puede-la-actividad-del-sol-afectar-las.html>
- Pulinets, S. A., Leyva-Contreras, A., Bisiacchi-Giraldi, G., & Ciralo, C. (2005). Total electron content variations in the ionosphere before the Colima, Mexico, earthquake of 21 January 2003. *Geofísica Internacional*, 44(4), 369-377. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2005.44.4.237>
- Rodríguez, L. G. (2021). Aspectos teórico-metodológicos sobre la predicción de terremotos. *Boletín de ciencias de la tierra*, 49, 39-46. <https://doi.org/10.15446/rbct.n49.93823>
- Ruano, A. E., Madureira, G., Barros, O., Khosravani, H., Da Graça Ruano, M., & Ferreira, P. G. (2014). Seismic detection using support vector machines. *Neurocomputing*, 135, 273-283. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2013.12.020>

- Ruano, A., Madureira, G., Barros, O., Khosravani, H., Ruano, M., & Ferreira, P. (2014). Seismic detection using support vector machines. *Neurocomputing*, 135, 273-283. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2013.12.020>
- Shah, M., Ahmed, A., Ehsan, M., Khan, M., Tariq, M. A., Calabia, A., & Rahman, Z. U. (2020). Total electron content anomalies associated with earthquakes occurred during 1998–2019. *Acta Astronautica*, 175, 268-276. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.06.005>
- Shang, X., Li, X., Morales-Esteban, A., Asencio-Cortés, G., & Wang, T. (2018). Data Field-Based K-Means Clustering for Spatio-Temporal Seismicity Analysis and Hazard Assessment. *Remote Sensing*, 10(3), 461. <https://doi.org/10.3390/rs10030461>
- Tariq, M. A., Shah, M., Hernández-Pajares, M., & Iqbal, T. (2019). Pre-earthquake ionospheric anomalies before three major earthquakes by GPS-TEC and GIM-TEC data during 2015–2017. *Advances in Space Research*, 63(7), 2088-2099. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.12.028>
- Wonsathan, R., Seedadan, I., Nunloon, N., & Kitibut, J. (2014). Prediction of Evaluation Learning by Using Neuro-Fuzzy System. *Advanced Materials Research*, 931–932, 1482-1487. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.931-932.1482>
- Zhukov, A., Sidorov, D., Mylnikova, A., & Yasyukevich, Y. (2018). Machine Learning Methodology for Ionosphere Total Electron Content Nowcasting. *International journal of artificial intelligence*, 16(1), 144-157. <http://www.>