



Implementación del Modelo ETAS para la Predicción de las Réplicas de un Terremoto

Taller de Investigación

Docente: Grados Paredes Daniel

Lin Chiu Chen Yang

April 26, 2025

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería

Económica, Estadística y Ciencias Sociales

FIEECS

Contents

1 **Introducción** **3**

 1.1 Contexto 3

 1.2 Problema de Investigación 4

 1.3 Motivación 4

 1.4 Objetivos de la Investigación 4

 1.4.1 Objetivos Generales 4

 1.4.2 Objetivos Especificos 5

 1.5 Hipótesis de Investigación 5

References **6**

1 Introducción

1.1 Contexto

Los terremotos representan uno de los fenómenos naturales más devastadores y difíciles de predecir en el mundo. A lo largo de la historia, estos eventos han causado pérdidas humanas y materiales significativas, generando la necesidad imperante de desarrollar métodos efectivos para su predicción y mitigación de riesgos. La predicción de terremotos es una rama de la ciencia de la sismología que estudia los terremotos, disciplina que llegó a ser científica a partir de la segunda mitad del siglo XIX. Es cuando el deseo de encontrar herramientas que permitan estudiar el fenómeno natural llevó en 1880 a John Milne, famoso ingeniero británico, a inventar el sismógrafo ((Kossobokov & Shebalin, 2003)). Se han planteado distintos métodos de predicción desde anomalías en el campo electromagnético de la tierra o perturbaciones de la ionosfera ((Freund et al., 2009)) hasta el comportamiento animal al sentir las ondas P momentos previos al fenómeno ((Woith, Petersen, Hainzl, & Dahm, 2018)) pero no es hasta la década de los setenta que empezaron los estudios estadísticos representándolos como procesos estocásticos asimismo esta disciplina se ha extendido no solo en la geofísica sino también a través de múltiples campos de la ciencia como la sismología fotónica donde últimas investigaciones sugieren el uso de tecnologías emergentes a base de fibra óptica para su estudio ((Lindsey & Martin, 2021)).

¿Qué es la predicción de un terremoto? Según el Diccionario Oxford, las palabras predicción y pronóstico son sinónimos, mientras que para la sismología son términos que marcan diferencia. El pronóstico de terremotos se refiere a estimaciones a largo plazo durante un período de tiempo prolongado, que puede ir desde meses hasta décadas, en cambio, la predicción de terremotos generalmente se define como la especificación del tiempo, lugar y magnitud de un futuro terremoto dentro de límites establecidos a corto plazo pueden ocurrir en días, semanas o meses ((Ismail-Zadeh, 2013)); por su naturaleza estocástica la capacidad de predecir con precisión queda corta por no decir imposible, por eso ahora en adelante la investigación se centra netamente en el pronóstico de eventos sísmicos más no predicción.

Se han planteado varios métodos de pronóstico ((Ogata, 1988)) propone estudiar los eventos de forma epidemiológica planteando así el modelo ETAS de carácter temporal mas tarde en conjunto con ((Zhuang, Werner, Zhou, Harte, & Hainzl, 2011)) se desarrolló el modelo de tipo espacio-temporal que se detallará en las siguientes secciones del documento.

El Perú se encuentra ubicado en una región sísmicamente activa exactamente el cinturón de fuego del pacifico debido a la convergencia de dos placas tectónicas entre la Placa de Nazca y la Sudamericana. Este proceso llamado subducción, donde la Placa de Nazca se hunde debajo de la

Sudamericana acumulando tensiones, es responsable de la generación de terremotos frecuentes y actividad volcánica en las costas del Pacífico incluyendo Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia y Chile. En el artículo de ((Villegas-Lanza et al., 2016)) se detallan los grandes terremotos ocurridos a lo largo de la zona de subducción peruana en los segmentos centro y sur, como Lima-Callao de 1746 ($8.8M_W$) y el terremoto de Pisco de 2007 ($8.0M_W$) respectivamente.

1.2 Problema de Investigación

La comprensión de terremotos sigue siendo un desafío primario de la sismología; estas traen importantes implicaciones sociales y económicas. A pesar de décadas de investigación, aún no es posible determinar con exactitud cuándo, dónde y con qué intensidad ocurrirá un sismo. Esto se debe a la naturaleza compleja de los fenómenos sísmicos y a la interacción de múltiples factores geológicos, físicos u otros que lo preceden; lo cual se realiza el StatSei (The International Statistical Seismology conference) evento bienal que reúne a investigadores y expertos en el campo de la sismología estadística, esta investigación se apoya en varios de los artículos propuestos donde se abordará principalmente la posibilidad de su pronóstico mediante modelos estadísticos que simulan la sismicidad, acercándonos a la posición de ((Geller, 1997)) "¿Es posible la predicción?".

1.3 Motivación

Posterior al evento sísmico surgen las réplicas, también conocidas como aftershocks, ocurren después de un terremoto principal y pueden tener una magnitud menor, pero aún representan un riesgo significativo para la población y las infraestructuras afectadas ((Darzi, Halldorsson, Hrafnkelsson, & Vogfjör, 2022)) las cuales pueden permanecer en pie frente al terremoto principal pero la llegada de oleadas de réplicas consecutivas sobrepasan el límite de estrés de la infraestructura haciendo que colapse sin previo aviso es por eso que el estudio de los modelos predictivos es indispensable para la sociedad, y su precisión conlleva al dilema de ¿alarmar? ¿O no alarmar? Advertir de un terremoto que no ocurre también conlleva un costo: no solo el costo civil y económico. Entidades públicas como el IGP realizan investigaciones científicas con finalidad de la prevención, reducción de riesgos de desastres orientando al Estado promover políticas para proteger la vida de la población. Por otro lado en ((Mignan & Woessner, 2012)) y ((Gulia, Wiemer, & Wyss, 2012)) ambos autores proponen la importancia de la completitud y consistencia de los datos para el análisis de sismicidad pero factores no controlables como la calibración instrumental, el ruido externo disminuyen la calidad de estos por eso la realización de simulaciones pueden ayudar a mejorarlos; también, en la revisión de literatura no se encontró la implementación del modelo en la región de la placa de Nazca por consiguiente esta investigación intenta replicar un modelo descriptivo propuesto por ((Ogata, 2017)) para comparar la sismicidad de la región y los estudios anteriores.

1.4 Objetivos de la Investigación

1.4.1 Objetivos Generales

Desarrollar y replicar el modelo ETAS (Epidemic-Type Aftershock Sequence) para simular réplicas sísmicas seleccionando como región la costa del Pacífico, permitiendo una evaluación más precisa de focos del riesgo y una mejor planificación de respuestas ante emergencias.

1.4.2 Objetivos Especificos

- **Revisión Teórica y Metodológica:** Realizar una revisión exhaustiva de la literatura sobre modelos temporales y de procesos espacio-puntuales aplicados a sismología, con énfasis en el modelo ETAS. Describir los fundamentos teóricos del modelo ETAS y sus variantes, incluyendo la formulación matemática y los supuestos subyacentes.
- **Implementación del Modelo ETAS:** Desarrollar una implementación computacional del modelo ETAS utilizando técnicas paramétricas para la estimación de parámetros. Validar la implementación mediante simulaciones y comparación con datos históricos de secuencias de réplicas.
- **Aplicación a Datos Reales:** Aplicar el modelo ETAS a un conjunto de datos reales de secuencias de réplicas sísmicas de una región específica. Analizar la precisión del modelo en la predicción de la ocurrencia de réplicas en términos de tiempo y ubicación.
- **Evaluación y Comparación:** Evaluar la capacidad predictiva del modelo ETAS comparando sus resultados con otros modelos existentes. Identificar las fortalezas y limitaciones del modelo ETAS en diferentes escenarios de actividad sísmica.

1.5 Hipótesis de Investigación

Se analizará si el modelo ETAS proporcionará simulaciones de réplicas sísmicas coherentes con los datos históricos en la región de la costa del Pacífico, permitiendo una mejor identificación de focos de riesgo. También si la inclusión de datos de sismicidad simulada mejorará la calidad y la completitud de los datos utilizados en el análisis de sismicidad, superando las limitaciones impuestas por factores no controlables.

References

- Darzi, A., Halldorsson, B., Hrafnkelsson, B., & Vogfjör, K. S. (2022, September). Short-term bayesian etas spatiotemporal forecasting of the Ölfus 2008 earthquake sequence in iceland. *Tectonophysics*, 839, 229522. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2022.229522> doi: 10.1016/j.tecto.2022.229522
- Freund, F. T., Kulahci, I. G., Cyr, G., Ling, J., Winnick, M., Tregloan-Reed, J., & Freund, M. M. (2009, December). Air ionization at rock surfaces and pre-earthquake signals. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 71(17–18), 1824–1834. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/J.JASTP.2009.07.013> doi: 10.1016/j.jastp.2009.07.013
- Geller, R. J. (1997, December). Earthquake prediction: a critical review. *Geophysical Journal International*, 131(3), 425–450. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb06588.x> doi: 10.1111/j.1365-246X.1997.tb06588.x
- Gulia, L., Wiemer, S., & Wyss, M. (2012). Catalog artifacts and quality control. Retrieved from http://www.corssa.org/export/sites/corssa/.galleries/articles-pdf/gulia_et_al.pdf doi: 10.5078/CORSSA-93722864
- Ismail-Zadeh, A. T. (2013). Earthquake prediction and forecasting. In *Encyclopedia of earth sciences series* (p. 225–231). Springer Netherlands. Retrieved from http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4_106 doi: 10.1007/978-1-4020-4399-4_106
- Kossobokov, V., & Shebalin, P. (2003). Earthquake prediction. In *Nonlinear dynamics of the lithosphere and earthquake prediction* (p. 141–207). Springer Berlin Heidelberg. Retrieved from http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-05298-3_4 doi: 10.1007/978-3-662-05298-3_4
- Lindsey, N. J., & Martin, E. R. (2021). Fiber-optic seismology. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 49(Volume 49, 2021), 309–336. Retrieved from <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-earth-072420-065213> doi: <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-072420-065213>
- Mignan, A., & Woessner, J. (2012). Estimating the magnitude of completeness for earthquake catalogs. Retrieved from <http://www.corssa.org/export/sites/corssa/.galleries/articles-pdf/Mignan-Woessner-2012.pdf> doi: 10.5078/CORSSA-00180805
- Ogata, Y. (1988, March). Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes. *Journal of the American Statistical Association*, 83(401), 9–27. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1080/01621459.1988.10478560> doi: 10.1080/01621459.1988.10478560
- Ogata, Y. (2017, August). Statistics of earthquake activity: Models and methods for earthquake predictability studies. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 45(1), 497–527. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-earth-063016-015918> doi: 10.1146/annurev-earth-063016-015918
- Villegas-Lanza, J. C., Chlieh, M., Cavalié, O., Tavera, H., Baby, P., Chire-Chira, J., & Nocquet, J. (2016, October). Active tectonics of peru: Heterogeneous interseismic coupling along the nazca megathrust, rigid motion of the peruvian sliver, and subandean shortening accommodation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(10), 7371–7394. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1002/2016JB013080> doi: 10.1002/2016jb013080

- Woith, H., Petersen, G. M., Hainzl, S., & Dahm, T. (2018, April). Review: Can animals predict earthquakes? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(3A), 1031–1045. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1785/0120170313> doi: 10.1785/0120170313
- Zhuang, J., Werner, M. J., Zhou, S., Harte, D., & Hainzl, S. (2011). Basic models of seismicity: spatiotemporal models. Retrieved from <http://www.corssa.org/export/sites/corssa/.galleries/articles-pdf/Zhuang-et-al-2011-CORSSA-07487583> doi: 10.5078/CORSSA-07487583