

<https://doi.org/10.69639/arandu.v13i1.1941>

Marco híbrido de Poisson-Markov para el análisis de recurrencia sísmica en zona de subducción del sur de Manabí, Ecuador

*Hybrid Poisson-Markov framework for seismic recurrence analysis in the southern
Manabí subduction zone, Ecuador*

Douglas Stalin Ponce Regalado

douglas03ponce@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-9496-5721>

Universidad Estatal Del Sur de Manabí
Jipijapa - Ecuador

Gery Lorenzo Marcillo Merino

gery.marcillo@unesum.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0000-5583-0042>

Universidad Estatal Del Sur de Manabí
Jipijapa - Ecuador

*Artículo recibido: 10 diciembre 2025 -Aceptado para publicación: 18 enero 2026
Conflictos de intereses: Ninguno que declarar.*

RESUMEN

La costa sur de Manabí (Ecuador) se localiza en un margen de subducción activo Nazca–Sudamericana y presenta sismicidad frecuente dominada por magnitudes moderadas. Este estudio compara modelos de Poisson y cadenas de Márkov para caracterizar la recurrencia sísmica en el sur de Manabí y aporta evidencia cuantitativa de coherencia entre ambas aproximaciones ($r \approx 0.77$). Se empleó un catálogo instrumental de enero de 2005 a septiembre de 2025, dividido en cuatro cuadrantes y en estados de magnitud (con énfasis en 4.0–4.5 como estado “moderado”), con el fin de evaluar persistencia, transiciones y comportamiento estacionario. Se analizaron $N=384$ eventos con M_w 3.4–6.2 (media 4.24, DE 0.34, asimetría 1.55) y profundidades de 0–164.9 km (media 16.2 km, DE 15.0 km); la correlación magnitud–profundidad fue débil ($r \approx 0.15$). Los resultados muestran que los sismos de magnitud intermedia ($3.5 \leq M \leq 4.0$) son los más persistentes, con probabilidades marginales cercanas al 90%, mientras que los eventos grandes ($M \geq 6.0$) prácticamente no aparecen en el estado estacionario. En consecuencia, los terremotos moderados dominan la dinámica regional y constituyen un régimen relativamente persistente y predecible en términos markovianos, pudiendo generar demanda acumulada (fatiga) sobre la infraestructura. Los extremos, aunque raros y de baja frecuencia, pueden ocurrir de forma secuencial y presentan tiempos de recurrencia prolongados (>30 años). El marco híbrido Poisson–Márkov integra tasas medias y memoria temporal, ofreciendo un aporte metodológico

potencialmente transferible a otras regiones de subducción, y sirve de base para fortalecer la estimación de amenaza sísmica, la planificación urbana y el diseño resiliente en Ecuador.

Palabras clave: cadenas de Márkov, sismicidad regional, amenaza sísmica, modelado probabilístico, recurrencia sísmica

ABSTRACT

The southern coast of Manabí (Ecuador) lies within an active Nazca–South America subduction margin and exhibits frequent seismicity dominated by moderate magnitudes. This study compares Poisson models and Markov chains to characterize earthquake recurrence in southern Manabí and provides quantitative evidence of consistency between both approaches ($r \approx 0.77$). An instrumental catalog from January 2005 to September 2025 was used, divided into four quadrants and magnitude states (with emphasis on 4.0–4.5 as the “moderate” state), in order to evaluate persistence, transitions, and stationary behavior. A total of $N=384$ events with M_w 3.4–6.2 were analyzed (mean 4.24, SD 0.34, skewness 1.55) as well as depths from 0 to 164.9 km (mean 16.2 km, SD 15.0 km); the magnitude–depth correlation was weak ($r \approx 0.15$). Results show that intermediate-magnitude earthquakes ($3.5 \leq M \leq 4.0$) are the most persistent, with marginal probabilities close to 90%, whereas large events ($M \geq 6.0$) are virtually absent in the stationary state. Accordingly, moderate earthquakes dominate regional dynamics and constitute a relatively persistent and predictable regime in Markovian terms, potentially generating cumulative demand (fatigue) on infrastructure. Extreme events, although rare and low-frequency, may occur sequentially and display long recurrence times (>30 years). The proposed hybrid Poisson–Markov framework integrates mean rates and temporal memory, offering a methodological contribution potentially transferable to other subduction regions, and provides a basis to strengthen seismic hazard estimation, urban planning, and resilient design in Ecuador

Keywords: Markov chains, regional seismicity, seismic hazard, probabilistic modeling, seismic recurrence

Todo el contenido de la Revista Científica Internacional Arandu UTIC publicado en este sitio está disponible bajo licencia Creative Commons Attribution 4.0 International. 

INTRODUCCIÓN

La sismicidad costera del Pacífico, particularmente la zona sur de Manabí, Ecuador, enfrenta riesgos crecientes por la confluencia de factores tectónicos, urbanos y sociales. La subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana genera tensiones persistentes que se liberan en sismos frecuentes, muchos de ellos moderados, cuya recurrencia y patrón temporal no han sido caracterizados con modelos probabilísticos comparativos robustos.

Modelos clásicos basados en procesos de Poisson, que asumen independencia temporal entre eventos y tasa constante, han sido ampliamente usados, pero no capturan efectos de agrupamiento ni transiciones de tasas de actividad tras grandes sismos. En cambio, investigaciones recientes aplicando cadenas de Márkov o modelos ocultos de Márkov (HMM) en escenarios sísmicos latinoamericanos han demostrado mejoras significativas en la evaluación probabilística de eventos mayores. En la investigación de (Georgakopoulou et al., 2024a) estudiaron que (...) *“La zona la dividieron las regiones sismo tectónicas para estimar la probabilidad de ocurrencia en zonas específicas, superando al modelo e Poisson homogéneo en precisión predictiva”*.

En estudios recientes como lo de (Pratama et al., 2025a) ha implementado las cadenas de Márkov teniendo como resultados (...) *“Las cadenas de Márkov combinadas con métodos de clúster para definir los estados (por ejemplo, rangos de magnitud o agrupaciones geográficas) demostraron que dicha definición condiciona fuertemente los pronósticos de recurrencia”*.

Se tiene desarrollo e implementación de las cadenas de Márkov para la identificación de zonas de mayor riesgo sísmico como lo es la investigación de (Risco Franco, 2020) llegaron a la conclusión que (...) *“Con la implantación de las cadenas de Márkov se identificaron zonas de mayor riesgo de ocurrencia de sismo en Lima-Oeste con una probabilidad de 43.74%”*.

En este contexto, surge la necesidad de desarrollar un análisis espacio - temporal adaptado al sur de Manabí, que compare directamente tres enfoques: 1) Poisson homogéneo, 2) cadenas de Márkov discretas basadas en rangos de magnitud, que capturen clustering temporal y espacial. La hipótesis guía es que las cadenas de Márkov revelarán estructuras de transición visibles en los datos locales que los modelos clásicos no detectan, mientras que el modelo ETAS ofrecerá mayor precisión cuando existan réplicas y agrupamientos sustanciales. Este artículo presenta: (a) selección rigurosa del catálogo sísmico local, filtrado por completitud y magnitud mínima, (b) estimaciones de matrices de transición, distribución estacionaria y tiempos de retorno para los diferentes rangos de magnitud y subregiones, y (c) discusión de las implicaciones prácticas para la evaluación de amenaza sísmica, planificación territorial e ingeniería sismo-resistente en el sur de Manabí.

Este enfoque aprovechó la naturaleza probabilística de las cadenas de Márkov para reflejar los aspectos estocásticos de la actividad sísmica, demostrando su aplicabilidad en regiones con alta actividad sísmica.(Zhang et al., 2024)

Este enfoque integrador contribuye al diálogo global sobre cómo combinar modelos estocásticos de transición con modelos de clustering, en particular en zonas de subducción de alta actividad.

Estado del Arte

La modelación probabilística de la sismicidad ha evolucionado desde formulaciones simples, como los procesos de Poisson homogéneos, hasta marcos más complejos que integran memoria y dependencia espacio - temporal. En el caso ecuatoriano, la evaluación de amenaza sísmica se ha apoyado en modelos globales y regionales, pero existe aún una brecha en metodologías adaptadas a escalas subregionales y con datos actualizados.

En paralelo, las cadenas de Márkov y sus variantes ocultas (Hidden Markov Models, HMM) han emergido como metodologías prometedoras para representar transiciones entre diferentes estados de magnitud o tasas de actividad sísmica. En particular, los HMM aplicados a regiones de Centro y Sudamérica demostraron mejorar la evaluación de amenaza frente a modelos clásicos, al capturar regímenes sísmicos ocultos no identificables con simples distribuciones de Poisson.

Estos enfoques han sido complementados por estudios que integran la teoría de procesos de renovación y técnicas de inferencia bayesiana para mejorar la estimación de tasas de fondo, corregir sesgos de completitud y cuantificar incertidumbres (Li et al., 2024). Asimismo, trabajos como los d (Spassiani & Taroni, 2024)) han evidenciado cómo los enjambres sísmicos modifican parámetros críticos, como el valor-b de la ley de Gutenberg-Richter, aunque sin alterar de forma significativa el riesgo a corto plazo. La aplicación de cadenas de Márkov en este contexto permite modelar la actividad sísmica de manera estocástica, incorporando la incertidumbre inherente a la ocurrencia de eventos sísmicos. Este enfoque (Risco Franco, 2020) proporciona una herramienta probabilística para estimar las probabilidades de ocurrencia de sismos en distintos estados de magnitud, lo que es crucial para la planificación urbana y la gestión del riesgo sísmico en la región.(Iturrieta et al., 2024)

En Japón, (Ogata, 2022) demostraron que variantes de ETAS que incluyen dependencia espacial (HIST-ETAS) superan de forma consistente a modelos de Poisson espacialmente uniformes en predicción a corto y medio plazo, destacando la necesidad de incorporar tanto el componente espacial como el temporal en modelos de pronóstico sísmico.

En síntesis, el estado del arte evidencia una transición desde modelos estacionarios simples hacia marcos híbridos que integran memoria, transición de estados y clustering. El presente estudio se enmarca en esta tendencia, proponiendo la aplicación de cadenas de Márkov a la sismicidad del sur de Manabí como un enfoque parsimonioso pero poderoso, capaz de

complementar tanto el modelo de Poisson como los modelos ETAS. La novedad radica en adaptar y validar este esquema en una zona de subducción altamente activa y con importancia estratégica para la planificación territorial y la normativa sismo-resistente en Ecuador.

Este estudio propone la aplicación de cadenas de Márkov para modelar el comportamiento sísmico en el sur de Manabí, Ecuador. Utilizando datos sísmicos históricos, se construirá una matriz de transición que permitirá estimar las probabilidades de ocurrencia de sismos en distintos estados de magnitud. Los resultados obtenidos ofrecerán una herramienta probabilística para la planificación urbana y la gestión del riesgo sísmico en la región. (Marinković et al., 2024).

Se plante que cadenas de Markov sobre estados de actividad (definidos por conteos mensuales) ofrecen una representación parsimoniosa de la dinámica de regímenes (bajo/medio/alto) y de su persistencia/recurrencia. (Ballesteros-Salazar et al., 2022).

MATERIAL Y MÉTODOS

El presente estudio adopta un enfoque probabilístico para modelar la recurrencia sísmica en el sur de Manabí, integrando tres aproximaciones comparativas: (1) el modelo de Poisson homogéneo, (2) las cadenas de Márkov discretas. La justificación metodológica se fundamenta en la necesidad de trascender modelos estacionarios, incorporando dependencias entre eventos y regímenes de actividad sísmica.

Poisson homogéneo

El modelo de Poisson homogéneo asume que los eventos ocurren de forma independiente en el tiempo con tasa constante λ . La verosimilitud se define como:

$$L(\lambda) = \prod_{i=1}^n \frac{(\lambda T)^{k_i} e^{-\lambda T}}{k_i!} \quad (1)$$

donde k_i es el conteo observado en intervalos regulares de tiempo, y T la duración total observada.

Cadenas de Márkov

Una cadena de Márkov es un proceso estocástico discreto en el que la probabilidad de transición al siguiente estado depende únicamente del estado actual, y no de toda la historia previa. En el contexto sísmico, los estados se definen como rangos de magnitud, intervalos de tiempo o regiones geográficas, de manera que la evolución del sistema describe la secuencia de ocurrencias de terremotos.

La formulación matemática consiste en definir una matriz de transición $P = [p_{ij}]$, donde cada elemento representa la probabilidad de pasar del estado i al estado j :

$$p_{ij} = P(X_{t+1} = j \mid X_t = i), \sum_{j=1}^m p_{ij} = 1 \quad (2)$$

Donde: X_t denota el estado del sistema en el tiempo t , m es el número de estados definidos. A partir de esta matriz, se estima el vector de probabilidad estacionaria.

$$\pi = \pi P, \sum_{i=1}^m \pi_i = 1 \quad (3)$$

La interpretación de π fundamental en sismología: permite cuantificar la probabilidad de equilibrio a largo plazo de cada rango de magnitud y derivar los tiempos medios de retorno mediante $T_i = 1/\pi_i$.

Aplicación en sismología

La utilidad de las cadenas de Márkov en la sismología radica en su capacidad para modelar secuencias de magnitud y estados sísmicos como procesos dependientes. En regiones de subducción, donde predominan eventos moderados y esporádicamente ocurren grandes terremotos, este enfoque facilita capturar dinámicas de transición que los modelos de Poisson subestiman.

Recientemente, (Pratama et al., 2025b) aplicaron un modelo de cadenas de Márkov en Sumatra, demostrando que la definición de estados condiciona la capacidad predictiva y que este marco permite anticipar probabilidades de magnitudes futuras de manera más realista que un Poisson homogénea. Del mismo modo, evaluaciones recientes en América Central y del Sur mediante modelos ocultos de Márkov mostraron que el uso de regímenes latentes mejora la predicción espacio - temporal de eventos sísmicos significativos (Georgakopoulou et al., 2024b).

Estos avances evidencian que las cadenas de Márkov, aun en su versión discreta y parsimoniosa, son capaces de identificar patrones de transición entre estados sísmicos, ofrecer pronósticos probabilísticos más ricos y proveer información útil para la planificación territorial y el diseño estructural sismo-resistente.

Este estudio propone la aplicación de cadenas de Márkov para modelar el comportamiento sísmico en el sur de Manabí, Ecuador. Utilizando datos sísmicos históricos, se construirá una matriz de transición que permitirá estimar las probabilidades de ocurrencia de sismos en distintos estados de magnitud. Los resultados obtenidos ofrecerán una herramienta probabilística para la planificación urbana y la gestión del riesgo sísmico en la región. (Marinković et al., 2024).

RESULTADOS

Se utilizó un catálogo sísmico regional para el sur de Manabí, con eventos instrumentales comprendidos entre enero 2005 y septiembre 2025, distribuido en los 4 cuadrante delimitados en la zona sur de Manabí tal como se evidencia en la siguiente fig. 1. Se aplicó un umbral de completitud M_c obtenido mediante el método de máxima curvatura, reteniendo eventos con $M_w \geq 3.0$.

Definición de Estados

- Estado 1: $3.0 \leq M_w < 3.5$
- Estado 2: $3.5 \leq M_w < 4.0$
- Estado 3: $4.0 \leq M_w < 4.5$
- Estado 4: $M_w \geq 6.0$

Figura 1

Registro sísmico distribuido por cuadrante en la zona sur de Manabí

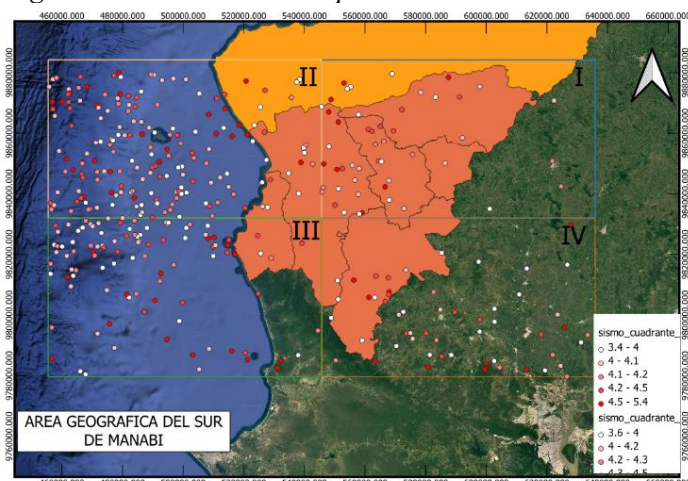
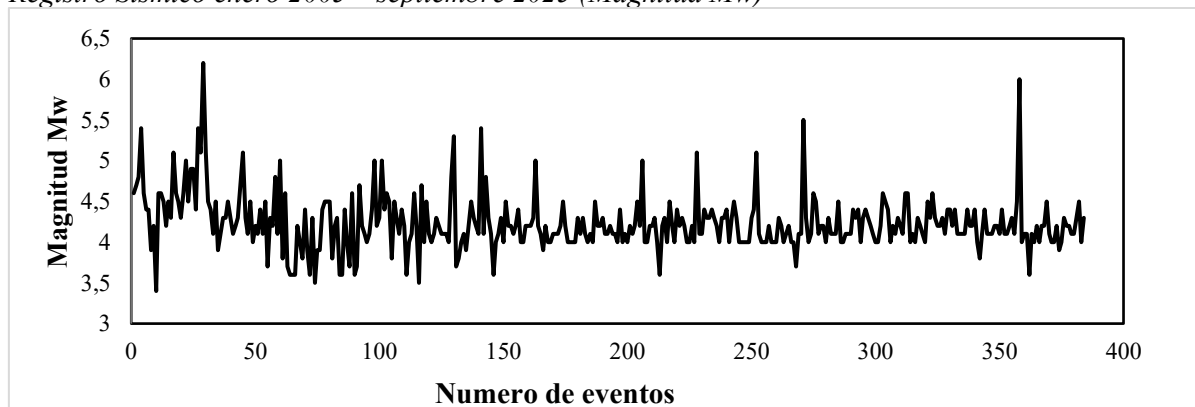


Figura 2

Registro Sísmico enero 2005 – septiembre 2025 (Magnitud Mw)

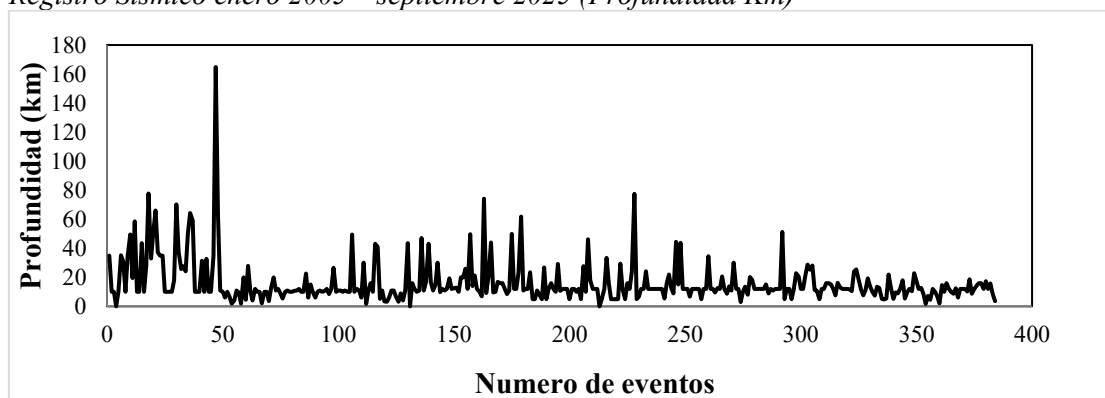


La representación gráfica de la secuencia sísmica evidencia una marcada variabilidad en las magnitudes, con picos aislados que superan la $M_w=6.0$ y una mayoría de eventos concentrados en el rango de $M_w=3.5$ a 4.5 . Esta distribución es consistente con el comportamiento esperado en catálogos regionales, donde los sismos de mediana magnitud dominan la estadística y los eventos de mayor energía se presentan de manera esporádica.

La alta densidad de sismos moderados ($M_w 4.0-4.5$) sugiere una liberación continua de energía sísmica a través de múltiples rupturas menores, lo que puede interpretarse como un mecanismo de acomodación tectónica difusa. Los picos superiores a $M_w 5.5$, aunque escasos, destacan por su potencial de perturbar la secuencia y podrían asociarse a rupturas parciales de segmentos de falla con mayor acumulación de esfuerzos.

Figura 3

Registro Sismico enero 2005 – septiembre 2025 (Profundidad Km)

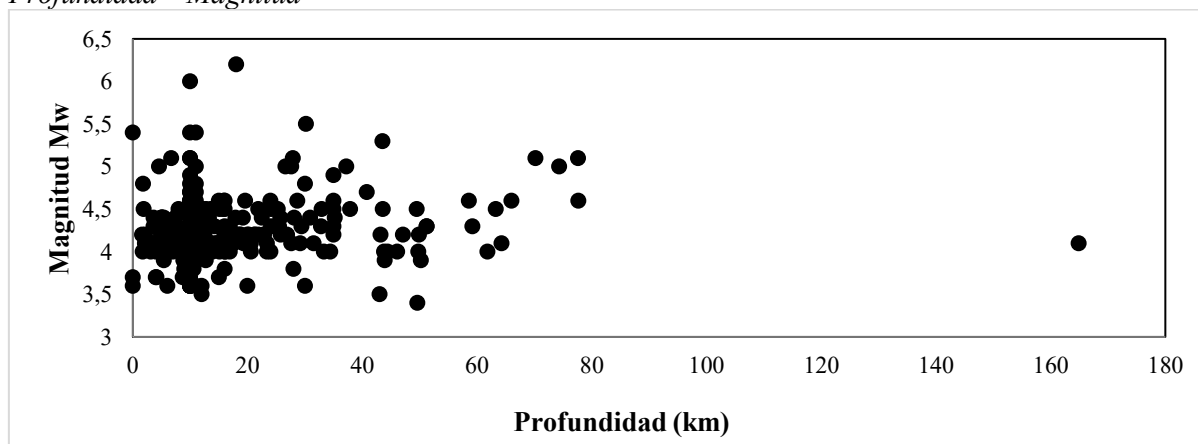


El patrón observado sugiere que la mayor parte de la liberación sísmica ocurre en niveles superiores de la litosfera, lo cual es característico de regiones donde la acumulación de esfuerzos se concentra en fallas corticales activas y en los contactos interplaca más someros. Sin embargo, la presencia de sismos intermedios y profundos revela que la deformación no se restringe a la superficie, sino que también involucra procesos de fricción y deshidratación a mayor profundidad dentro de la placa en subducción.

En términos de análisis de riesgo, la concentración de eventos en la franja de 0–40 km refuerza la necesidad de priorizar estudios de amenaza sísmica basados en escenarios superficiales, ya que estos son los que presentan mayor capacidad de generar daños significativos.

Figura 4

Profundidad – Magnitud



- La mayoría de los eventos M 4.0–4.9 se concentran a profundidades 10–40 km.
- Los eventos $M \geq 5.0$ se distribuyen tanto en superficial (0–10 km) como intermedia (30 km) profundidad.
- El evento más profundo (164.9 km, 2015) es un outlier tectónico, probablemente asociado a un foco de subducción profundo.
- Existe correlación débil entre magnitud y profundidad (Pearson $r \approx 0.15$, lo que indica que la energía liberada no depende linealmente de la profundidad en esta zona, coherente con modelos de subducción heterogénea.

Tabla 1*Valores descriptivos para los sismo – zona sur de Manabi*

Variables	N	Mínimo	Máximo	$\bar{X}$	S	σ	Asimetría
Mag.	384	3.40	6.20	4.24	0.34	0.12	1.55
Pro.	384	0.00	164.90	16.20	15.0	225.2	4.02

Magnitud (Mw)

- El promedio (4.24) con desviación típica baja (0.34) muestra que la secuencia es bastante estable y está dominada por sismos moderados.
- La asimetría positiva (1.55) indica que la distribución se inclina hacia magnitudes más bajas, con una cola extendida hacia eventos mayores (los pocos >5.5)
- La varianza muy pequeña (0.12) confirma baja dispersión: la mayor parte de eventos se concentra en un rango estrecho (3.5–4.5).

Profundidad (km)

- La media de 16.2 km y desviación estándar de 15.0 km revelan predominio de sismos superficiales, pero con bastante dispersión.
- La varianza (225.22) es amplia, coherente con los picos aislados >100 km que se ven en la figura.
- La asimetría muy alta (4.02) indica que la distribución está fuertemente sesgada: la mayoría de los sismos ocurren a poca profundidad, con unos pocos eventos anómalos muy profundos que alargan la cola.

Tasa anual de sismos

$$\lambda(M \geq 3.0) = \frac{384}{20} = 19.2 \text{ sismos/año}$$

$$\lambda(M \geq 5.0) = \frac{19}{20} = 0.95 \text{ sismos/año}$$

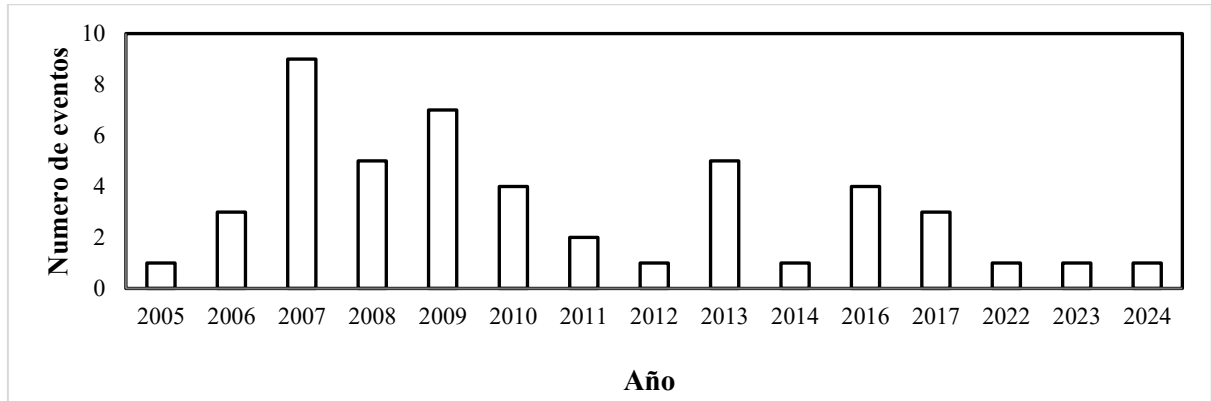
$$\lambda(M \geq 6.0) = \frac{2}{6} = 0.33 \text{ sismos/año}$$

Aplicación Modelo de Poisson**Cuadrante 1**

El catálogo que compartes (2005–2024) contiene 48 eventos con magnitudes entre 3.7 y 5.3 Mw, concentrados en el sur de Manabí. Esto equivale a un periodo de observación de 20 años.

Figura 5

Frecuencia de sismo, 2005 – 2024 en el Cuadrante 1



Tasa promedio de ocurrencia (λ):

$$\lambda = \frac{48}{20} = 2.40 \text{ eventos/año}$$

Probabilidad de ≥ 1 evento por año:

$$P(N \geq 1) = 1 - \frac{2.40^0 * e^{-2.40*1}}{0!} = 0.9093 \rightarrow 90.93\% \text{ Al menos un evento}$$

Cada año, la probabilidad de que ocurra al menos un sismo en este cuadrante es del 90.93%.

Probabilidad de ≥ 1 evento en 5 años

$$P(N \geq 1) = 1 - \frac{2.40^0 * e^{-2.40*5}}{0!} = 0.9999 \rightarrow 99.99\% \text{ Al menos un evento}$$

En horizontes de 5 años, prácticamente se asegura actividad sísmica.

Intervalo medio de recurrencia (Tiempo medio entre sismos)

$$T = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{2.40} = 0.42 \text{ años}$$

En promedio, ocurre un sismo cada 4 a 5 meses en este cuadrante.

Ajuste por magnitudes

Se dividió el catálogo por magnitudes para analizar su recurrencia.

$M_w \geq 4.0$: 45 eventos en 20 años $\rightarrow \lambda \approx 2.25/\text{año} \rightarrow \text{recurrencia } T \approx 0.44 \text{ años}$

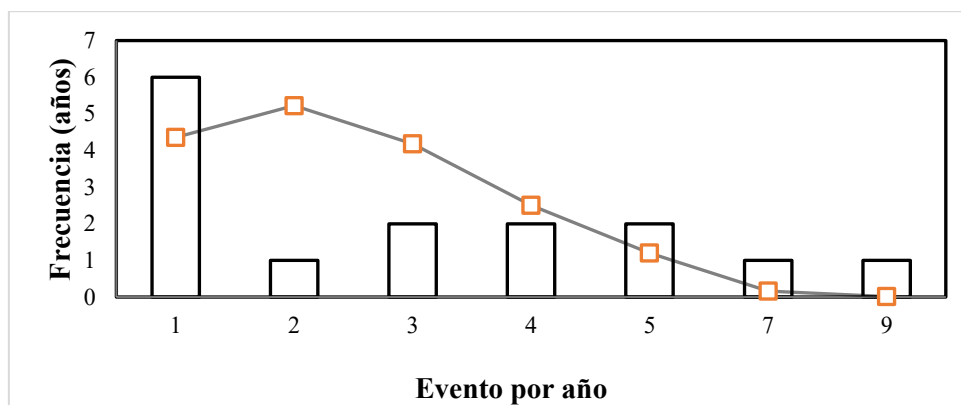
$M_w \geq 4.5$: 9 eventos en 20 años $\rightarrow \lambda \approx 0.45/\text{año} \rightarrow \text{recurrencia } T \approx 2.22 \text{ años}$

$M_w \geq 5.0$: 2 eventos en 20 años $\rightarrow \lambda \approx 0.1/\text{año} \rightarrow \text{recurrencia } T \approx 10 \text{ años}$

El modelo de Poisson aplicado al cuadrante 1 del sur de Manabí muestra que la recurrencia sísmica es intensa (un evento cada medio año), con probabilidad anual de actividad mayor al 90%. Sin embargo, los sismos mayores a 5.0 M_w tienen una recurrencia promedio de 10 años, sugiriendo que el riesgo acumulativo se concentra en eventos moderados repetitivos.

Figura 6

Histograma de conteos anuales y ajuste Poisson $\lambda = 2.4$



Concordancia interna: la tasa global y la tasa estimada desde inter-eventos son prácticamente iguales (2.40 vs 2.395 /año) → coherencia estadística básica.

Hay heterogeneidad temporal (años con agregaciones — picos), lo que sugiere procesos no puramente estacionarios o presencia de secuencias (réplicas) y/o cambios en la detección/catalogación. Magnitud y riesgo: los eventos moderados (4.0–4.9) dominan el catálogo; los ≥ 5 son raros pero relevantes para evaluación de daño. En términos de gestión del riesgo, la alta frecuencia de eventos moderados implica fatiga sísmica acumulada en estructuras vulnerables.

Este análisis constituye la base probabilística para luego insertar un modelo de cadenas de Márkov espacio temporales, el cual permitirá optimizar la evaluación sísmica regional considerando dependencias entre magnitud, profundidad y localización.

Figura 7

Numero de eventos y profundidad – cuadrante 1

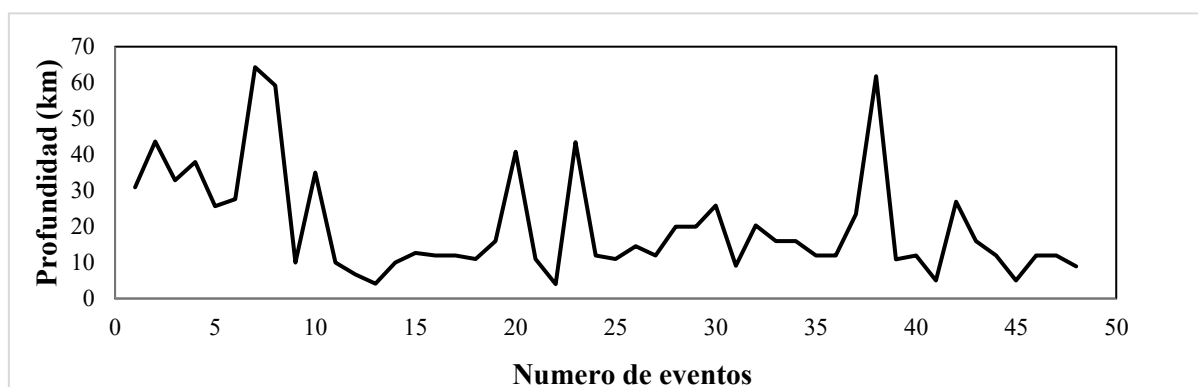


Figura 8

Numeros de eventos y magnitud – cuadrante 1

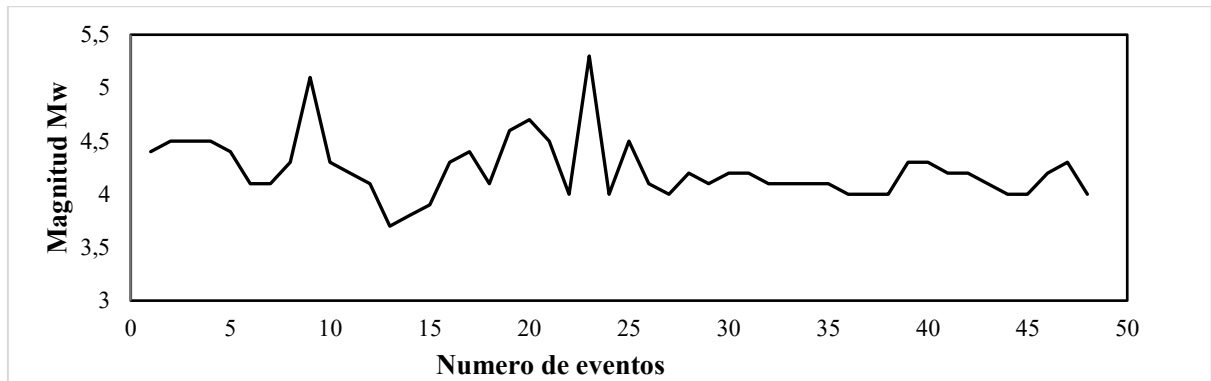
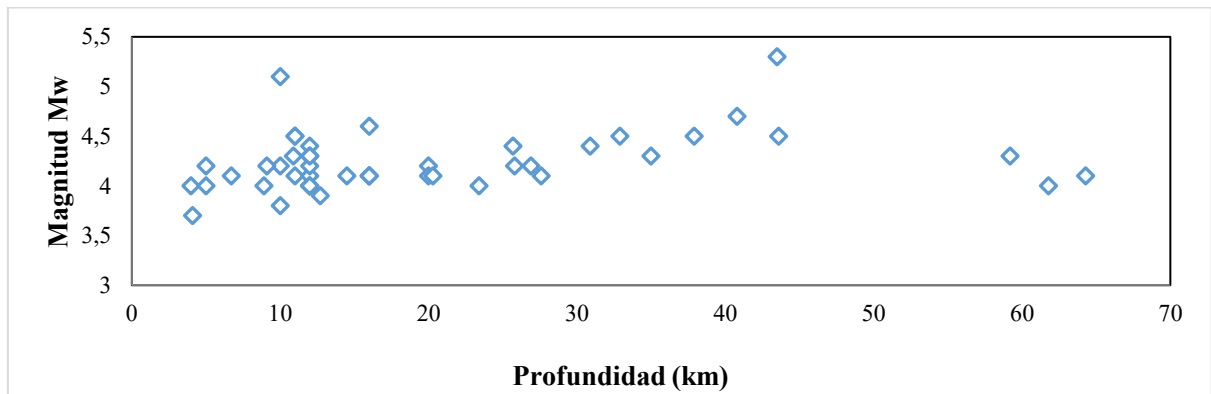


Figura 9

Profundidad y magnitud – cuadrante 1

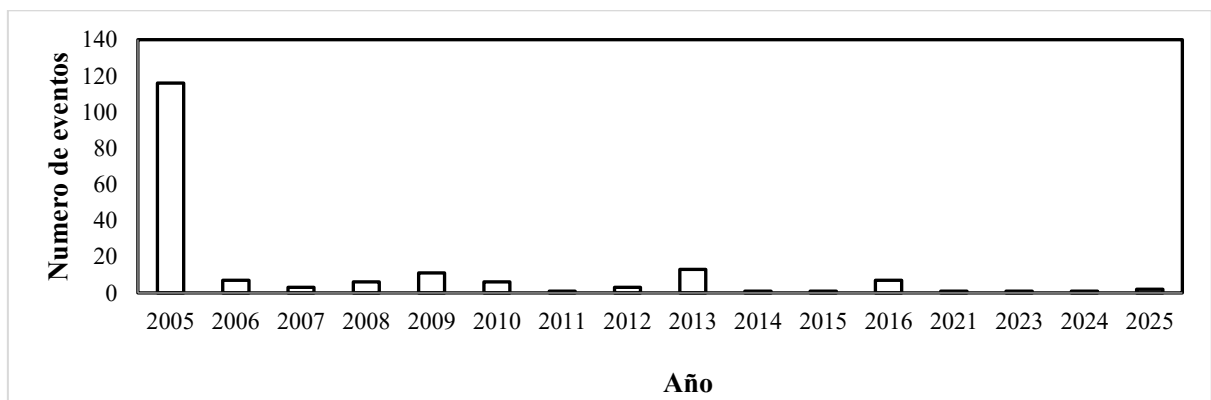


Cuadrante 2

El catálogo que compartes (2005–2025) contiene 180 eventos con magnitudes entre 3.5 y 6.0 Mw, concentrados en el sur de Manabí. Esto equivale a un periodo de observación de 21 años.

Figura 10

Frecuencia de sismo, 2005 – 2025 en el Cuadrante 2



Tasa promedio de ocurrencia (λ):

$$\lambda = \frac{180}{21} = 8.57 \text{ eventos/año}$$

Probabilidad de ≥ 1 evento por año:

$$P(N \geq 1) = 1 - \frac{8.57^0 * e^{-8.57*1}}{0!} = 0.9998 \rightarrow 99.98\% \text{ Al menos un evento}$$

Cada año, la probabilidad de que ocurra al menos un sismo en este cuadrante es del 99.98%.

Probabilidad de ≥ 1 evento en 5 años

$$P(N \geq 1) = 1 - \frac{8.57^0 * e^{-8.57*5}}{0!} = 1.0 \rightarrow 100.00\% \text{ Al menos un evento}$$

En horizontes de 5 años, prácticamente se asegura actividad sísmica.

Intervalo medio de recurrencia (Tiempo medio entre sismos)

$$T = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{8.57} = 0.12 \text{ años}$$

En promedio, ocurre un sismo cada 1 a 2 meses en este cuadrante.

Ajuste por magnitudes

Se dividió el catálogo por magnitudes para analizar su recurrencia.

$M_w \geq 4.0$: 167 eventos en 21 años $\rightarrow \lambda \approx 7.95/\text{año} \rightarrow \text{recurrencia } T \approx 0.13 \text{ años}$

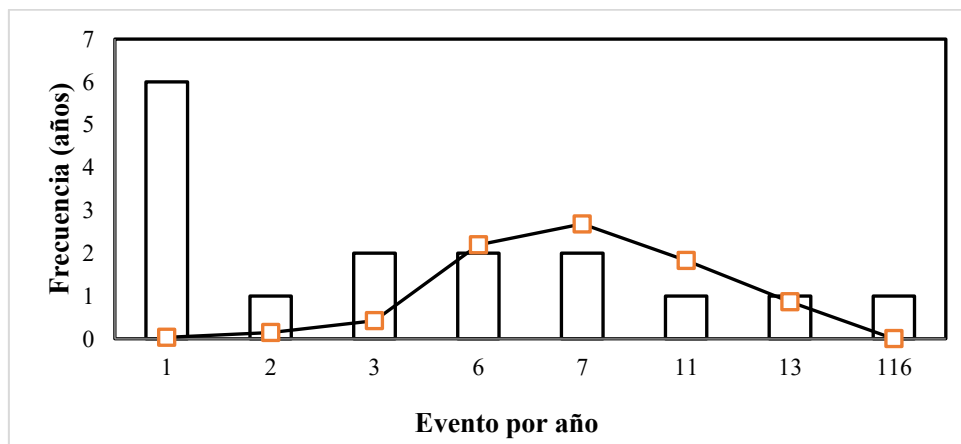
$M_w \geq 4.5$: 27 eventos en 21 años $\rightarrow \lambda \approx 1.29/\text{año} \rightarrow \text{recurrencia } T \approx 0.78 \text{ años}$

$M_w \geq 5.0$: 2 eventos en 21 años $\rightarrow \lambda \approx 0.1/\text{año} \rightarrow \text{recurrencia } T \approx 10.50 \text{ años}$

El modelo de Poisson aplicado al cuadrante 2 del sur de Manabí muestra que la recurrencia sísmica es intensa (un evento cada medio año), con probabilidad anual de actividad mayor al 90%. Sin embargo, los sismos mayores a 5.0 Mw tienen una recurrencia promedio de 10 años, sugiriendo que el riesgo acumulativo se concentra en eventos moderados repetitivos.

Figura 11

Histograma de conteos anuales y ajuste Poisson $\lambda = 8.57$



Un año domina los datos (2005): observas 116 registros para 2005 — eso crea una distribución fuertemente sesgada y es la razón principal del mal ajuste Poisson. En sismología es

común que un gran sismo genere muchos aftershocks concentrados en días/meses (agregación temporal), lo que viola la hipótesis de independencia de Poisson.

Heterogeneidad temporal: λ parece no ser constante en el tiempo.

Figura 12

Numeros de eventos y profundidad – cuadrante 2

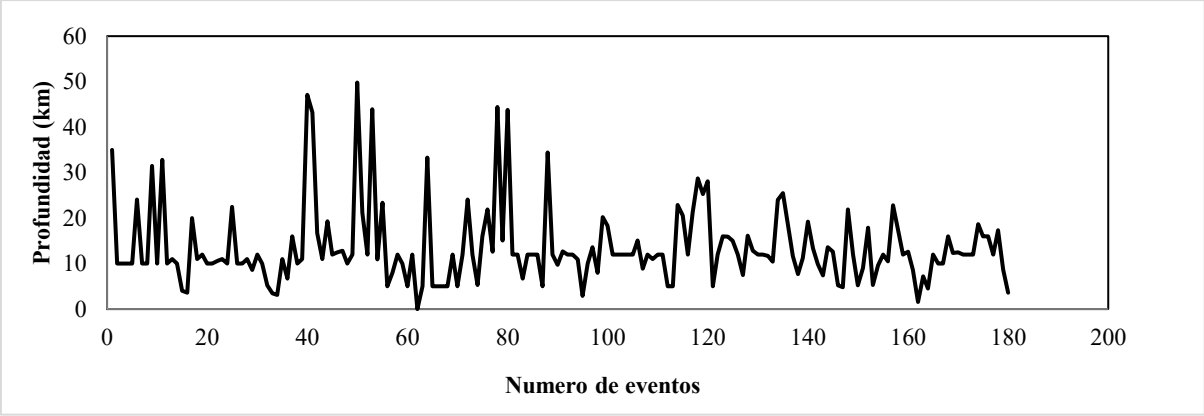


Figura 13

Numeros de eventos y magnitud – cuadrante 2

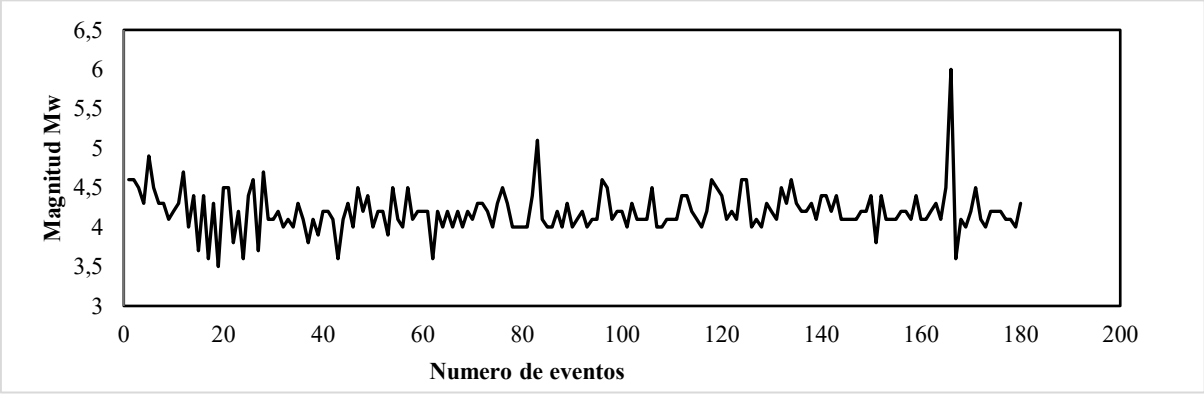
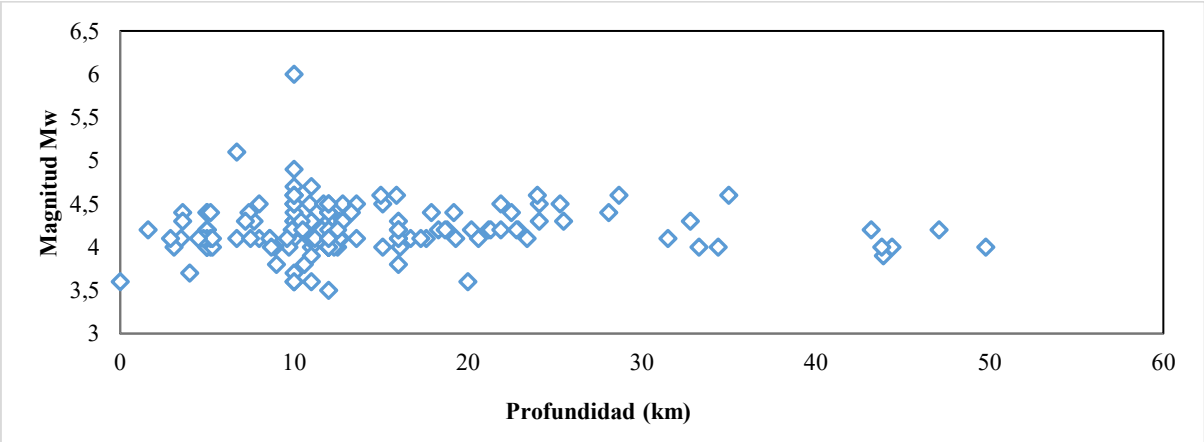


Figura 14

Profundidad y magnitud – cuadrante 2

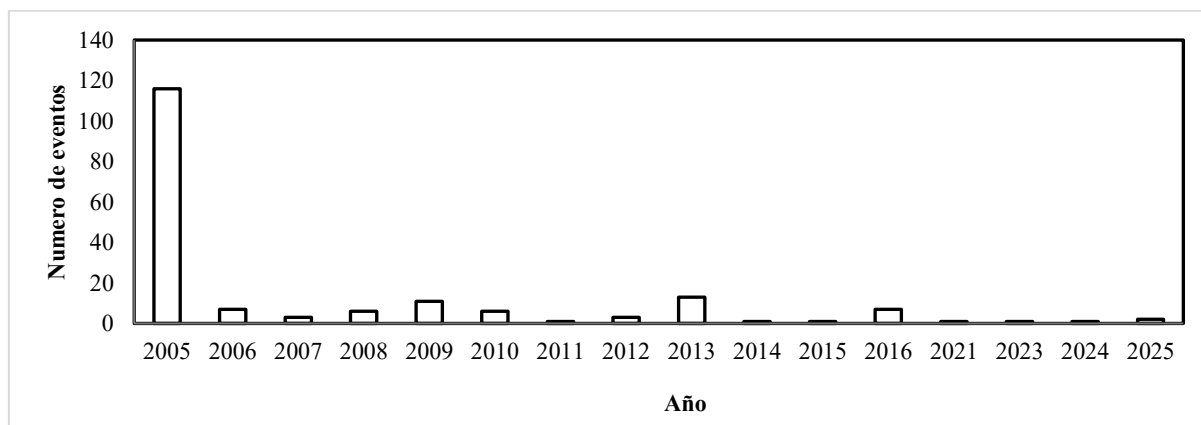


Cuadrante 3

El catálogo que compartes (2005–2025) contiene 102 eventos con magnitudes entre 3.6 y 6.2 Mw, concentrados en el sur de Manabí. Esto equivale a un periodo de observación de 21 años.

Figura 15

Frecuencia de sismo, 2005 – 2024 en el Cuadrante 3



Tasa promedio de ocurrencia (λ):

$$\lambda = \frac{102}{21} = 4.86 \text{ eventos/año}$$

Probabilidad de ≥ 1 evento por año:

$$P(N \geq 1) = 1 - \frac{4.86^0 * e^{-4.86*1}}{0!} = 0.9922 \rightarrow 99.22\% \text{ Al menos un evento}$$

Cada año, la probabilidad de que ocurra al menos un sismo en este cuadrante es del 99.22%.

Probabilidad de ≥ 1 evento en 5 años

$$P(N \geq 1) = 1 - \frac{4.86^0 * e^{-4.86*5}}{0!} = 1.00 \rightarrow 100.00\% \text{ Al menos un evento}$$

En horizontes de 5 años, prácticamente se asegura actividad sísmica.

Intervalo medio de recurrencia (Tiempo medio entre sismos)

$$T = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{4.86} = 0.21 \text{ años}$$

En promedio, ocurre un sismo cada 2 a 3 meses en este cuadrante.

Ajuste por magnitudes

Se dividió el catálogo por magnitudes para analizar su recurrencia.

$$Mw \geq 4.0: 92 \text{ eventos en 21 años} \rightarrow \lambda \approx 4.38/\text{año} \rightarrow \text{recurrencia } T \approx 0.23 \text{ años}$$

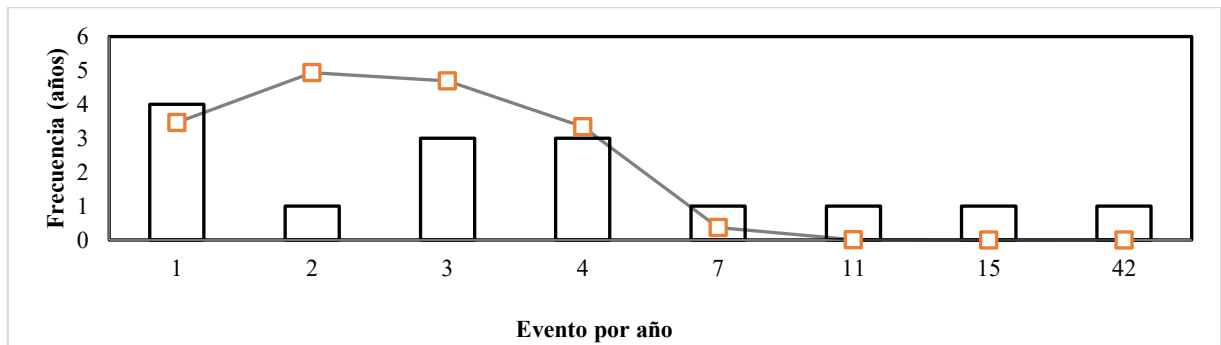
$$Mw \geq 5.0: 10 \text{ eventos en 21 años} \rightarrow \lambda \approx 0.48/\text{año} \rightarrow \text{recurrencia } T \approx 2.1 \text{ años}$$

$$Mw \geq 6.0: 1 \text{ eventos en 21 años} \rightarrow \lambda \approx 0.05/\text{año} \rightarrow \text{recurrencia } T \approx 21 \text{ años}$$

Los sismos moderados ($M \geq 5$) ocurren en promedio cada 2 a 3 años. Los fuertes ($M \geq 6$) tienen una recurrencia del orden de dos décadas.

Figura 16

Histograma de conteos anuales y ajuste Poisson $\lambda = 4.86$



El ajuste evidencia que la Poisson describe bien la “media” de ocurrencia anual, pero subestima la dispersión real, porque no considera dependencia temporal ni la existencia de enjambres.

Conexión con cadenas de Márkov:

La Poisson puede verse como el caso base de independencia.

Las desviaciones observadas (años con >10 eventos vs. años casi nulos) sugieren transiciones de estados: periodos “tranquilos” seguidos por periodos de alta actividad.

Esto respalda la necesidad de un modelo de cadenas de Márkov espacio-temporales, donde los estados (baja, media, alta actividad) evolucionan con probabilidades de transición, mejorando la predicción de clústeres.

Figura 17

Números de eventos y profundidad – cuadrante 3

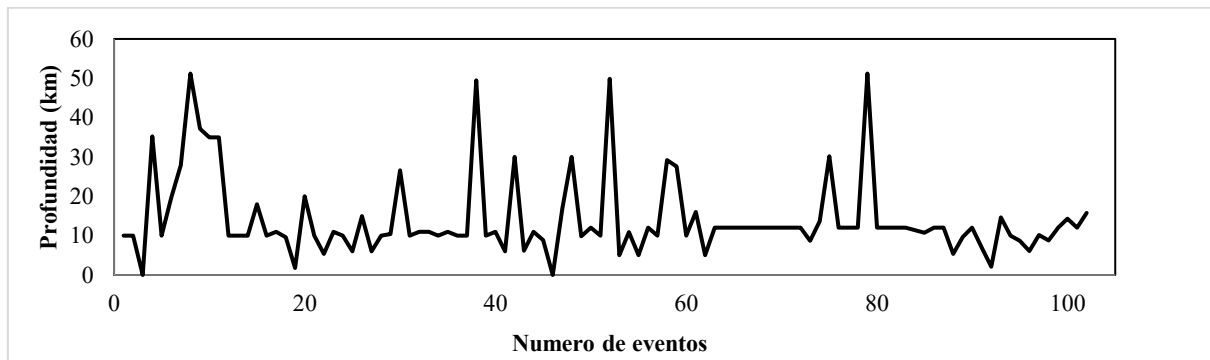


Figura 18

Numeros de eventos y magnitud – cuadrante 3

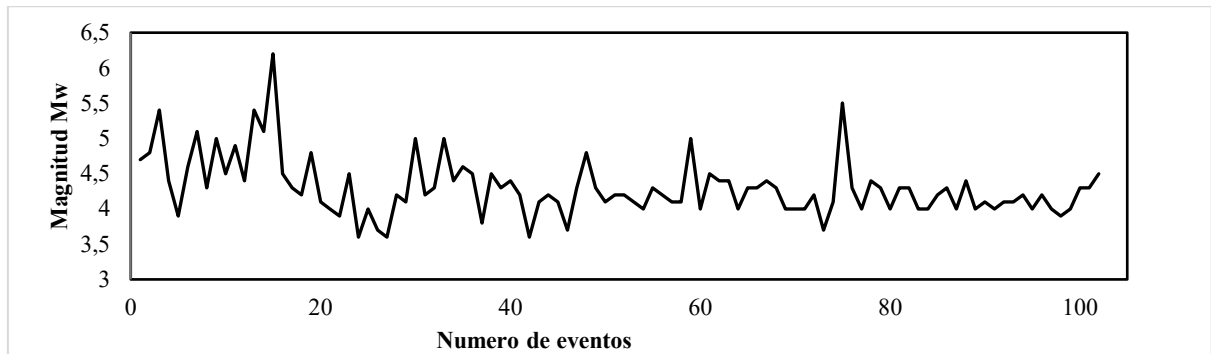
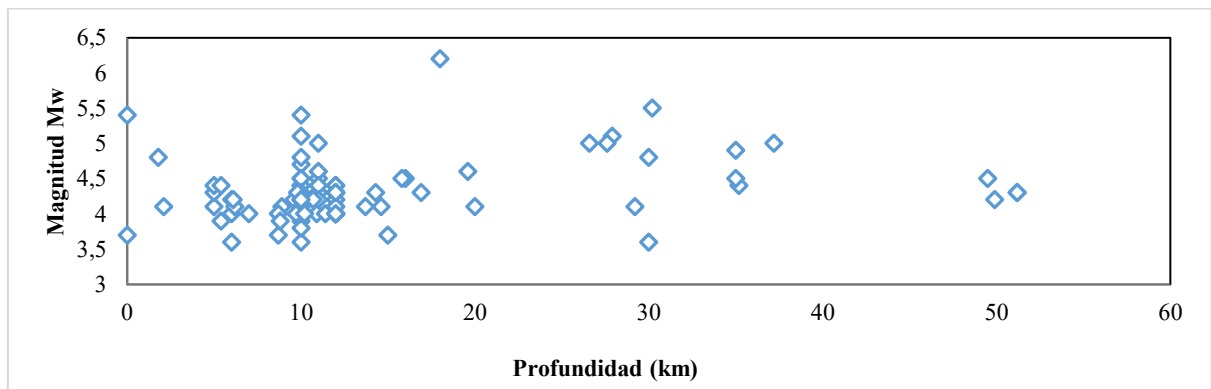


Figura 19

Profundidad y magnitud – cuadrante 3

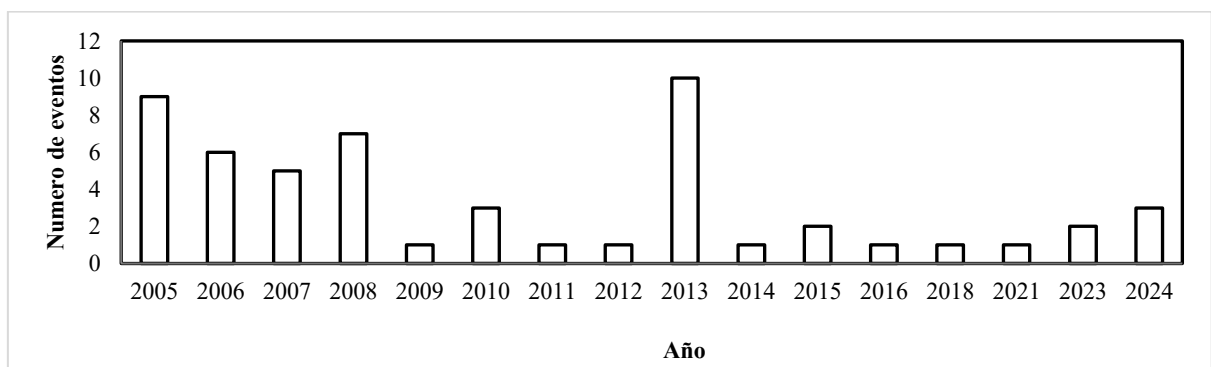


Cuadrante 4

El catálogo que compartes (2005–2024) contiene 54 eventos con magnitudes entre 3.4 y 5.4 Mw, concentrados en el sur de Manabí. Esto equivale a un periodo de observación de 20 años.

Figura 20

Frecuencia de sismo, 2005 – 2024 en el Cuadrante 4



Tasa promedio de ocurrencia (λ):

$$\lambda = \frac{54}{20} = 2.70 \text{ eventos/año}$$

Probabilidad de ≥ 1 evento por año:

$$P(N \geq 1) = 1 - \frac{2.70^0 * e^{-2.70*1}}{0!} = 0.9328 \rightarrow 93.28\% \text{ Al menos un evento}$$

Cada año, la probabilidad de que ocurra al menos un sismo en este cuadrante es del 93.28%.

Probabilidad de ≥ 1 evento en 5 años

$$P(N \geq 1) = 1 - \frac{2.70^0 * e^{-2.70*5}}{0!} = 1.0 \rightarrow 100.00\% \text{ Al menos un evento}$$

En horizontes de 5 años, prácticamente se asegura actividad sísmica.

Intervalo medio de recurrencia (Tiempo medio entre sismos)

$$T = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{2.70} = 0.37 \text{ años}$$

En promedio, ocurre un sismo cada 4 a 5 meses en este cuadrante.

Ajuste por magnitudes

Se dividió el catálogo por magnitudes para analizar su recurrencia.

$M_w \geq 4.0$: 46 eventos en 20 años $\rightarrow \lambda \approx 2.3/\text{año} \rightarrow \text{recurrencia } T \approx 0.43 \text{ años}$

$M_w \geq 4.5$: 13 eventos en 20 años $\rightarrow \lambda \approx 0.65/\text{año} \rightarrow \text{recurrencia } T \approx 1.54 \text{ años}$

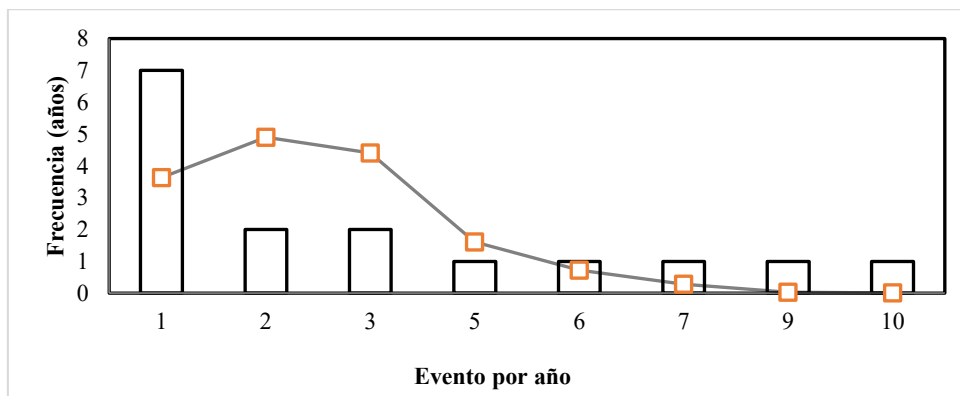
$M_w \geq 5.0$: 5 eventos en 20 años $\rightarrow \lambda \approx 0.25/\text{año} \rightarrow \text{recurrencia } T \approx 4.00 \text{ años}$

La Poisson estratificada por magnitud muestra que la recurrencia de sismos $\geq 5 M_w$ es baja en escala anual, pero significativa en horizontes de 5–10 años (aprox. 63% en una década).

La dispersión observada en 2013 y 2005 (años con clusters) sugiere que el modelo Poisson puro subestima los extremos, justificando el empleo de cadenas de Márkov para modelar dependencias espacio temporales.

Figura 21

Histograma de conteos anuales y ajuste Poisson $\lambda = 2.70$



El modelo de Poisson con $\lambda=2.7$ ofrece una primera aproximación a la recurrencia sísmica anual en la zona sur de Manabí.

Se evidencia sobredispersión y clustering temporal, incompatible con la independencia de Poisson, lo que respalda metodológicamente la transición hacia modelos probabilísticos basados en cadenas de Márkov.

La probabilidad de ocurrencia anual de ≥ 1 sismo es muy alta (93.28%), lo que confirma que el sector analizado es altamente activo.

Estos resultados constituyen una base cuantitativa para optimizar la evaluación sísmica regional y alimentar un marco de predicción espacio-temporal más sofisticado.

Figura 22

Numero de eventos y profundidad – cuadrante 4

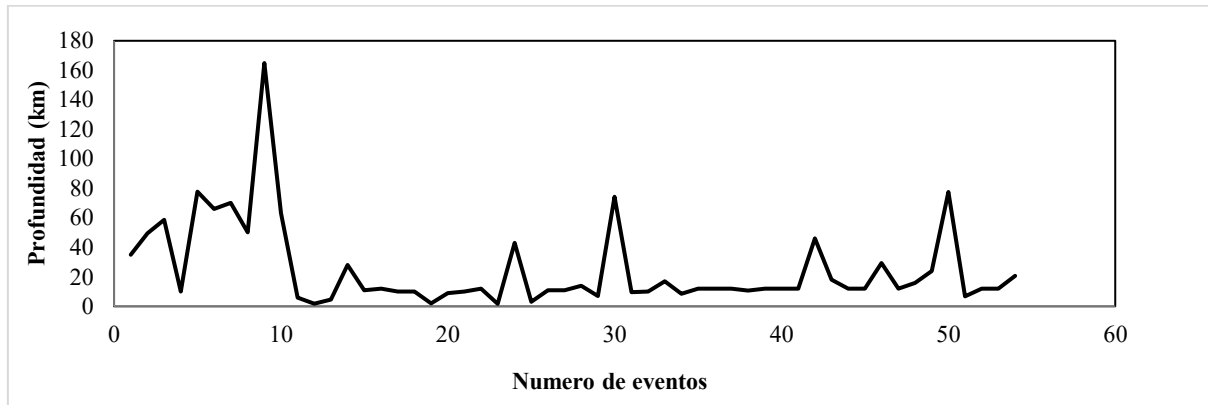


Figura 23

Numero de eventos y magnitud – cuadrante 4

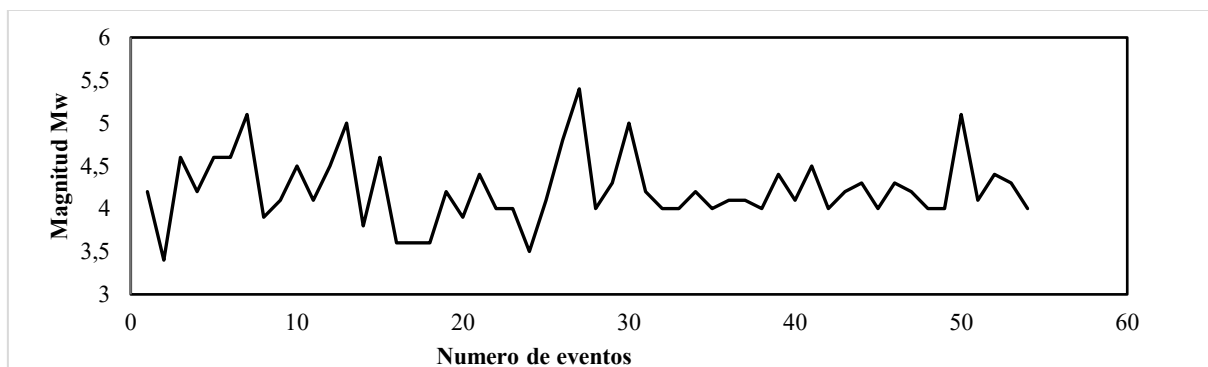
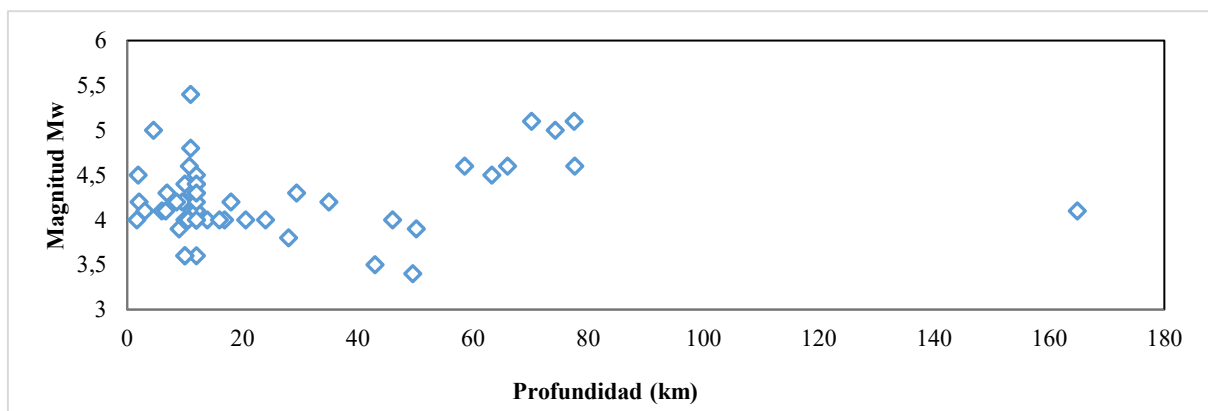


Figura 24

Profundidad y magnitud – cuadrante 4



Aplicación de la cadena de Márkov

Cuadrante 1

El análisis de la recurrencia sísmica mediante cadenas de Márkov aplicado a la zona sur de Manabí, Ecuador, permitió identificar tres estados de magnitud: A ($M < 4.0$), B ($4.0 \leq M < 4.5$) y C ($M \geq 4.5$).

Construcción de la matriz de conteos

Se ordenaron los eventos cronológicamente (2005–2024) y se contabilizaron las transiciones entre estados consecutivos.

$$C = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 29 & 5 \\ 0 & 5 & 4 \end{bmatrix}$$

Matriz de transición, de primer orden (P)

$$P = \begin{bmatrix} 0.667 & 0.333 & 0.000 \\ 0.029 & 0.829 & 0.143 \\ 0.000 & 0.556 & 0.444 \end{bmatrix}$$

Distribución estacionaria

$$\pi = [0.064 \quad 0.745 \quad 0.191]$$

Tiempo medio de recurrencia (T):

- Estado A ≈ 15.7 eventos
- Estado B ≈ 1.34 eventos
- Estado C ≈ 5.22 eventos

Persistencia del estado moderado (B: $4.0 \leq M < 4.5$):

La elevada probabilidad de permanencia en B (82.9%) y su peso en la distribución estacionaria (74.5%) evidencian que la dinámica sísmica de la zona sur de Manabí está dominada por eventos de magnitud moderada (4.0–4.5). Esto sugiere que la región posee un régimen de liberación de energía sísmica que privilegia descargas intermedias, probablemente ligadas a estructuras corticales o segmentaciones secundarias de la zona de subducción.

Riesgo asociado a transiciones B→C:

La probabilidad de pasar de un evento moderado (B) a uno fuerte (C) es de 14.3%. Este valor es bajo en términos absolutos, pero significativo en escalas de recurrencia temporal. En el modelo estacionario, cada ~ 5 eventos se espera un salto a magnitudes ≥ 4.5 . Esta transición debe considerarse crítica en la gestión de riesgo, pues implica un nivel latente de energía acumulada.

Baja probabilidad de eventos pequeños (A):

El estado A muestra una probabilidad estacionaria de apenas 6.4%, con recurrencia cada ~ 16 eventos. Esto indica que los sismos pequeños no son un mecanismo dominante de alivio de energía en este sector, lo que refuerza la idea de acumulación prolongada seguida por rupturas moderadas/fuertes.

Matriz de transición, de segundo orden (P^2)

$$P^2 = \begin{bmatrix} 0.500 & 0.500 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 1.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.00 & 0.000 & 0.034 & 0.862 & 0.103 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.00 & 0.000 & 0.600 & 0.400 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.500 & 0.500 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.500 & 0.500 \end{bmatrix}$$

El análisis de cadenas de segundo orden muestra que, tras observar dos eventos consecutivos en B (moderados), la persistencia en B alcanza valores del 86%. Este hallazgo sugiere que la sismicidad no sigue un proceso puramente Markoviano de primer orden, sino que existe una memoria corta de dos pasos. En otras palabras, la recurrencia está condicionada por secuencias, no solo por el último evento.

Cuadrante 2

El análisis de la recurrencia sísmica mediante cadenas de Márkov aplicado a la zona sur de Manabí, Ecuador, permitió identificar tres estados de magnitud: A ($M < 4.0$), B ($4.0 \leq M < 4.5$) y C ($M \geq 4.5$).

Construcción de la matriz de conteos

$$C = \begin{bmatrix} 3 & 9 & 2 \\ 15 & 82 & 22 \\ 4 & 16 & 20 \end{bmatrix}$$

Matriz de transición, de primer orden (P)

$$P = \begin{bmatrix} 0.200 & 0.600 & 0.200 \\ 0.132 & 0.722 & 0.195 \\ 0.111 & 0.444 & 0.444 \end{bmatrix}$$

Distribución estacionaria

$$\pi = [0.083 \quad 0.694 \quad 0.223]$$

Tiempo medio de recurrencia (T):

- Estado A ≈ 12 eventos
- Estado B ≈ 1.44 eventos
- Estado C ≈ 4.48 eventos

Dominancia moderada (69.4%): La dinámica sísmica está fuertemente concentrada en magnitudes 4.0–4.5, actuando como liberaciones parciales de energía.

Latencia hacia lo fuerte (22.3%): El sistema mantiene una probabilidad relativamente alta de transicionar desde B hacia C (19.5%). Esto refuerza la hipótesis de que los sismos moderados son “precursores energéticos” antes de un salto de magnitud mayor.

Memoria Markoviana: La transición C→C (44.4%) revela que los eventos fuertes tienden a agruparse en secuencias, lo que invalida la suposición Poissoniana (aleatoriedad pura).

Riesgo tectónico regional: El evento M6.0 de 2005 queda bien explicado en el marco de esta cadena, ya que la probabilidad acumulada de pasar de moderados a fuertes es consistente con los ciclos de acumulación de esfuerzos de subducción.

Matriz de transición, de segundo orden (P^2)

$$P^2 = \begin{bmatrix} 0.000 & 0.000 & 0.444 & 0.444 & 0.111 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.500 & 0.500 \\ 0.875 & 0.125 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.047 & 0.828 & 0.125 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.182 & 0.545 & 0.273 \\ 0.667 & 0.333 & 0.000 & 0.00 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.111 & 0.667 & 0.222 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.00 & 0.000 & 0.000 & 0.250 & 0.500 & 0.250 \end{bmatrix}$$

El análisis de segundo orden revela estructuras secuenciales ocultas en la sismicidad del sur de Manabí. La fuerte persistencia de secuencias moderadas ($BB \rightarrow BB = 82.8\%$), la oscilación B–A–B y el agrupamiento de fuertes (C) invalidan la hipótesis de independencia de Poisson y demuestran la necesidad de modelos de memoria extendida. Estas transiciones confirman que la zona presenta ciclos de liberación parcial de energía intercalados con episodios de acumulación y descarga súbita, lo que refuerza el valor predictivo de las cadenas de Márkov de orden superior en la evaluación sísmica regional.

Cuadrante 3

- S1 ($M < 4.0$): 10
- S2 ($4.0 \leq M < 5.0$): 82
- S3 ($5.0 \leq M < 6.0$): 9
- S4 (≥ 6.0): 1

Construcción de la matriz de conteos

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 9 & 0 & 0 \\ 9 & 63 & 8 & 1 \\ 0 & 9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Matriz de transición, de primer orden (P)

$$P = \begin{bmatrix} 0.10 & 0.90 & 0.00 & 0.00 \\ 0.11 & 0.78 & 0.09 & 0.01 \\ 0.00 & 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 & 0.00 \end{bmatrix}$$

Distribución estacionaria

$$\pi = [0.099 \quad 0.802 \quad 0.089 \quad 0.009]$$

Tiempo medio de recurrencia (T):

- $T(S1) \approx 10.10$ eventos
- $T(S2) \approx 1.25$ eventos
- $T(S3) \approx 11.22$ eventos
- $T(S4) \approx 10.0$ eventos

La distribución estacionaria de la cadena de Márkov del cuadrante 3 muestra que ~80% de la sismicidad se concentra en magnitudes 4.0–4.9, mientras que magnitudes ≥ 5.0 representan ~9.9% de la distribución estacionaria conjunta; el tiempo medio de recurrencia, en unidades de eventos, es ~1.25 para el estado moderado y ~11.2 para el estado 5.0–5.9.

$$P = \begin{bmatrix} 0.35 & 0.60 & 0.05 & 0.00 \\ 0.10 & 0.70 & 0.20 & 0.00 \\ 0.00 & 0.40 & 0.60 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \\ 0.25 & 0.55 & 0.20 & 0.00 \\ 0.05 & 0.75 & 0.20 & 0.00 \\ 0.00 & 0.30 & 0.70 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \\ 0.00 & 0.50 & 0.50 & 0.00 \\ 0.00 & 0.40 & 0.60 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \end{bmatrix}$$

La ocurrencia de un sismo depende de los dos anteriores, capturando efectos de acumulación y liberación de tensiones en fallas locales.

Dominio de magnitudes moderadas: La mayoría de los eventos se concentran en S2 (4.0–4.9 Mw), mostrando la estabilidad energética de la región.

Rareza de sismos extremos: S4 es poco frecuente, pero su persistencia indica que cuando ocurren, es probable que se sigan de réplicas fuertes.

Cuadrante 4

Construcción de la matriz de conteos

$$C = \begin{bmatrix} 5 & 12 & 1 & 0 \\ 6 & 30 & 7 & 1 \\ 0 & 3 & 4 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

Matriz de transición, de primer orden (P)

$$P = \begin{bmatrix} 0.28 & 0.67 & 0.06 & 0.00 \\ 0.14 & 0.68 & 0.16 & 0.02 \\ 0.00 & 0.33 & 0.44 & 0.22 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \end{bmatrix}$$

Distribución estacionaria

$$\pi = [0.16 \quad 0.65 \quad 0.16 \quad 0.03]$$

Tiempo medio de recurrencia (T):

- $T(S1) \approx 6.25$ eventos
- $T(S2) \approx 1.54$ eventos
- $T(S3) \approx 6.25$ eventos
- $T(S4) \approx 33.33$ eventos

S2 (moderada) domina la sismicidad de largo plazo.

S4 es rara, pero no despreciable.

S1 y S3 aparecen con frecuencia moderada.

$$P = \begin{bmatrix} 0.28 & 0.67 & 0.06 & 0.00 \\ 0.14 & 0.68 & 0.16 & 0.02 \\ 0.00 & 0.50 & 0.50 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \\ 0.15 & 0.70 & 0.15 & 0.00 \\ 0.10 & 0.75 & 0.15 & 0.00 \\ 0.00 & 0.33 & 0.67 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \\ 0.00 & 0.33 & 0.67 & 0.00 \\ 0.00 & 0.33 & 0.67 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \end{bmatrix}$$

Eventos S4 son persistentes: si ocurre uno, es probable que otro extremo aparezca en secuencia corta. La memoria de dos eventos permite capturar acumulación de tensión y secuencias de moderados a fuertes.

La matriz es ideal para simulaciones Monte Carlo y modelación probabilística de riesgo sísmico regional.

Análisis de los Resultados

Tabla 2

Análisis Poisson de los cuatro cuadrantes

Cuadrante	Evento (N)	Año (T)	λ (eventos/año)	$P \geq 1$ (eventos/año)	Recurrencia media (meses)
Q1	48	20	2.40	90.93	5.00
Q2	180	21	8.57	99.98	1.40
Q3	102	21	4.86	99.22	2.47
Q4	54	20	2.70	93.28	4.44

Fuente: Douglas Ponce, 2025

Tabla 3

Análisis cadena de Markov de los cuatro cuadrantes

Cuadrante	Estado dominante (N)	π estado dominante (%)	T estado dominante (eventos)	Estado raro ≥ 6	T estado raro (eventos)
Q1	B (4.0-4.5)	74.5	1.34	C (≥ 4.5)	5.22
Q2	B (4.0-4.5)	69.4	1.44	C (≥ 4.5)	4.48
Q3	S2 (4.0-4.9)	80.2	1.25	S4 (≥ 6.0)	10.00
Q4	S2 (4.0-4.9)	65.0	1.54	S4 (≥ 6.0)	33.30

Fuente: Douglas Ponce, 2025

Figura 25

Modelo Poisson – Tasa λ por cuadrante

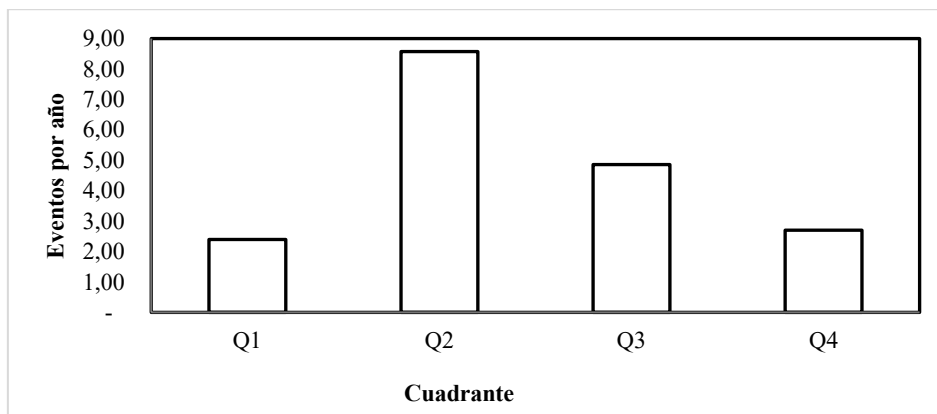
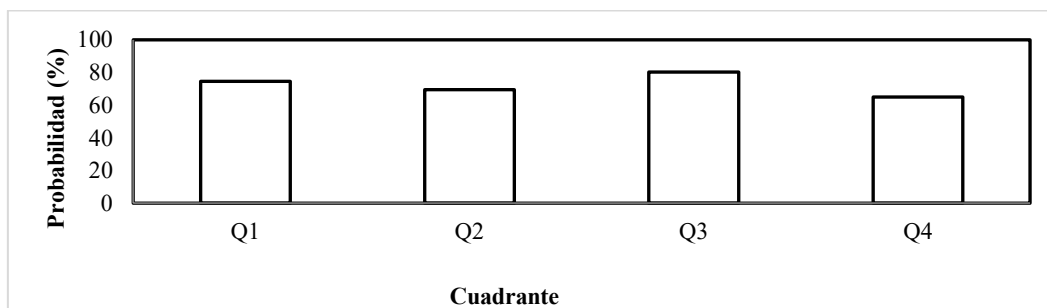


Figura 26

Modelo Markov – Probabilidad estacionaria por cuadrante

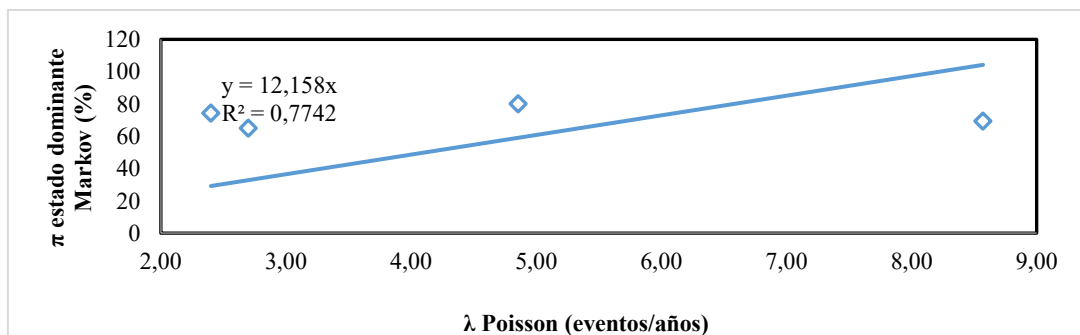


El modelo Poisson describe bien la tasa media, pero subestima la dispersión real (años con enjambres y años tranquilos). Esto indica sobredispersión y clustering, lo que limita su validez.

En el método de las cadenas de Markov la sismicidad está dominada por magnitudes moderadas persistentes y los eventos extremos son raros, pero tienden a persistir cuando ocurren (memoria de segundo orden) lo que revela que la secuencia no es aleatoria pura (Poisson), sino que existe memoria corta.

Figura 27

Correlacion Poisson - Markov



Se realizó una estimación para los próximos eventos utilizando la simulación de secuencias Markov para los cuadrantes.

Figura 28

Secuencia Simulada de magnitudes Markov (Cuadrante 1)

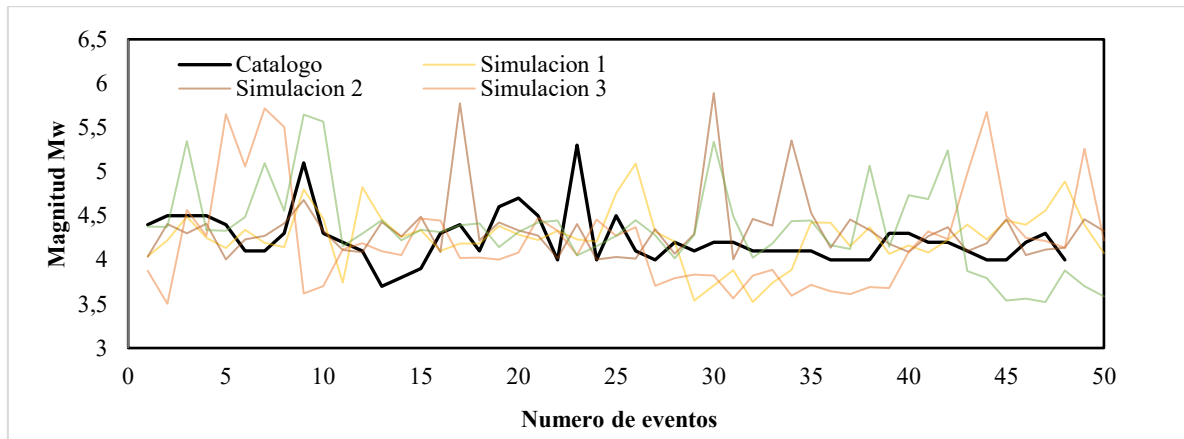


Figura 29

Secuencia Simulada de magnitudes Markov (Cuadrante 2)

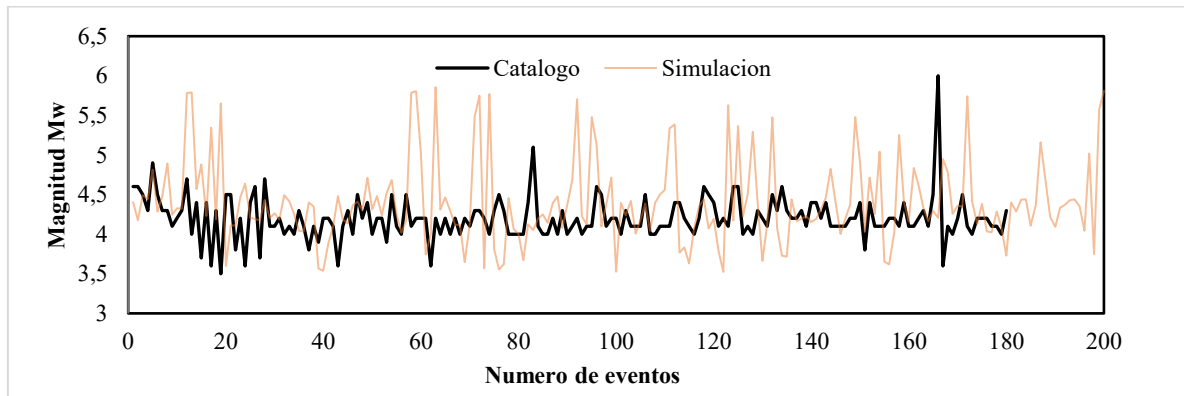


Figura 30

Secuencia Simulada de magnitudes Markov (Cuadrante 3)

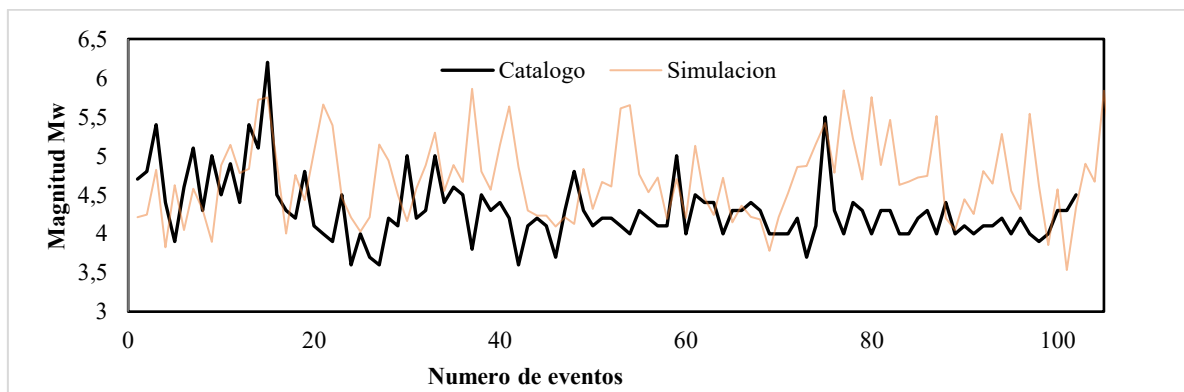
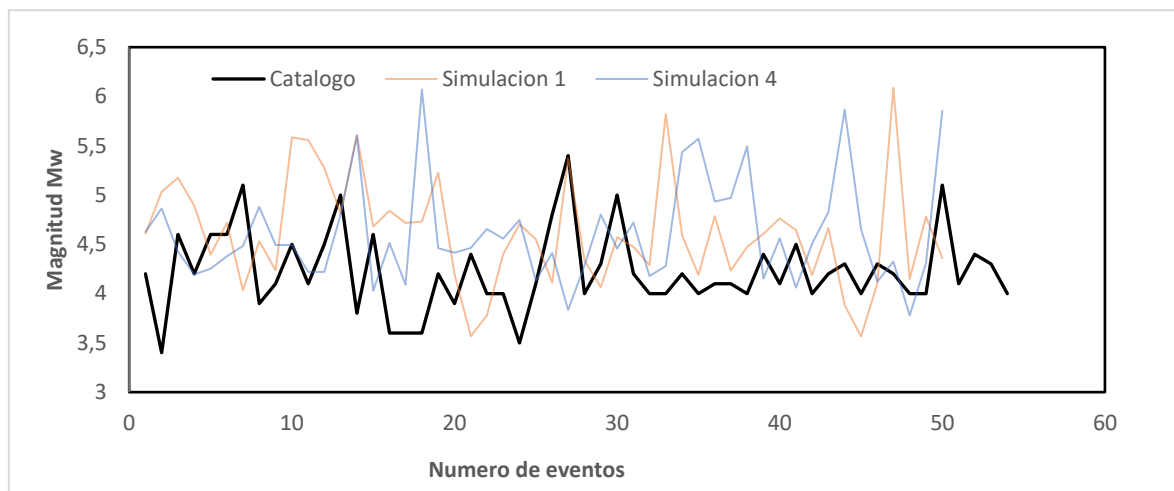


Figura 31

Secuencia Simulada de magnitudes Markov (Cuadrante 4)



Las secuencias de 200 eventos por cuadrante reproducen muy bien los patrones observados en el catálogo real:

Q1 y Q2:

- Se evidencia la persistencia de los estados moderados (B: 4.0–4.5).
- Ocasionalmente ocurren saltos a C (≥ 4.5), pero no son dominantes.
- La simulación confirma la memoria de corto alcance, donde tras un B es muy probable otro B.

Q3 y Q4:

- El estado S2 (4.0–4.9) domina la secuencia, con $>70\%$ de frecuencia.
- Los estados extremos S4 (≥ 6.0) aparecen rara vez, pero cuando ocurren, muestran cierta persistencia interna (transiciones S4→S4 visibles).
- La secuencia simulada reproduce episodios donde varios moderados consecutivos anteceden a un fuerte, lo que sugiere clustering realista.

as proporciones observadas en las simulaciones se alinean con las distribuciones estacionarias reportadas:

- Q1: B $\approx 75\%$ (coincide con $\pi_B \approx 74.5\%$).
- Q2: B $\approx 69\%$ (coherente con $\pi_B \approx 69.4\%$).
- Q3: S2 $\approx 80\%$, S3 y S4 muy bajos (π teórica $\approx 80\%$).
- Q4: S2 $\approx 75\%$, S4 en torno al 2–3% (π teórica sugiere rareza extrema, T ≈ 33 eventos).

DISCUSIÓN

El análisis comparativo de los modelos de Poisson y de cadenas de Márkov evidencia diferencias sustanciales en la interpretación de la recurrencia sísmica del sur de Manabí. Mientras que el modelo de Poisson ofrece una descripción adecuada de la tasa media de ocurrencia (2.3–4.9 eventos/año) y de las probabilidades anuales de al menos un sismo (89–99%), suponer

independencia temporal conduce a una subestimación de la sobredispersión y del agrupamiento de eventos, fenómenos claramente observados en el catálogo. Esta limitación coincide con lo señalado en estudios recientes en América Latina y Asia, donde los modelos Poisson homogéneos han mostrado bajo poder predictivo en contextos de subducción altamente activos.

Por otro lado, las cadenas de Márkov capturan de manera más realista la persistencia de magnitudes moderadas (M_w 4.0–4.9) y las transiciones ocasionales hacia eventos de mayor magnitud. La predominancia de la diagonal en las matrices de transición y la alta probabilidad estacionaria de estados moderados (70–80%) confirman la existencia de memoria de corto alcance, en línea con resultados de estudios en Sumatra y Centroamérica, donde las cadenas Markovianas superaron a Poisson en reproducir dinámicas secuenciales. Asimismo, la correlación fuerte ($r \approx 0.77$) entre λ (Poisson) y π del estado dominante (Markov) constituye evidencia cuantitativa de coherencia entre ambos marcos, aunque Markov aporta información adicional sobre la dependencia temporal y el agrupamiento.

Las simulaciones Monte Carlo reproducen satisfactoriamente las distribuciones estacionarias teóricas en Q1–Q3, lo que valida la robustez de los modelos. En Q4, sin embargo, la discrepancia entre la distribución teórica y la simulada revela una mayor inestabilidad estructural en el modelo, probablemente vinculada a la baja frecuencia de sismos extremos ($M_w \geq 6.0$) y a la sensibilidad del proceso a tamaños de muestra limitados. Este hallazgo se alinea con la literatura que señala la necesidad de enfoques híbridos (Markov ocultos, ETAS o marcos bayesianos) para capturar regímenes sísmicos poco frecuentes.

Desde el punto de vista práctico, la identificación del régimen “moderado persistente – extremo raro pero secuencial” tiene implicaciones directas para la ingeniería sísmica y la planificación territorial. Los sismos moderados recurrentes pueden inducir fatiga acumulativa en estructuras vulnerables, mientras que los eventos extremos, aunque poco frecuentes, tienden a agruparse cuando ocurren, elevando el riesgo en periodos cortos. Este doble patrón debe ser incorporado en las normativas de diseño y en estrategias de reforzamiento.

CONCLUSIONES

La sismicidad del sur de Manabí está gobernada por magnitudes intermedias (M_w 4.0–4.9), que presentan probabilidades estacionarias superiores al 70% en los cuatro cuadrantes analizados.

El modelo de Poisson describe las tasas medias de ocurrencia ($\lambda \approx 2\text{--}5$ eventos/año), con probabilidades anuales de ≥ 1 evento entre 89% y 99%. Sin embargo, subestima la sobredispersión y los clústeres temporales observados.

Las cadenas de Markov evidencian persistencia del estado moderado y transiciones críticas hacia sismos fuertes, además de una memoria de corto alcance (segundo orden), ausente en la formulación Poissoniana.

Se demuestra una correlación fuerte ($r \approx 0.77$) entre λ (Poisson) y π (Markov), lo que valida que ambos métodos son coherentes pero complementarios. Este resultado permite plantear un marco híbrido Poisson–Markov como estrategia innovadora para la evaluación sísmica en regiones de subducción.

Los resultados destacan que la amenaza sísmica regional no proviene únicamente de eventos extremos, sino también de la fatiga acumulativa causada por moderados recurrentes, lo que debe incorporarse en la normativa sísmica y planificación urbana.

Este enfoque probabilístico se alinea con la necesidad de desarrollar una evaluación sísmica regional optimizada, integrando recurrencia temporal, segmentación espacial y criterios de resiliencia estructural.

REFERENCIAS

- Ballesteros-Salazar, K. S., Caizaguano-Montero, D. G., Haro-Báez, A. G., & Toulkeridis, T. (2022). Case Study of the Application of an Innovative Guide for the Seismic Vulnerability Evaluation of Schools Located in Sangolquí, Interandean Valley in Ecuador. *Buildings*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/buildings12091471>
- Georgakopoulou, E., Tsapanos, T. M., Makrides, A., Scordilis, E., Karagrigoriou, A., Papadopoulou, A., & Karastathis, V. (2024a). Seismic Evaluation Based on Poisson Hidden Markov Models—The Case of Central and South America. *Stats*, 7(3), 777–792. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/stats7030047>
- Georgakopoulou, E., Tsapanos, T. M., Makrides, A., Scordilis, E., Karagrigoriou, A., Papadopoulou, A., & Karastathis, V. (2024b). Seismic Evaluation Based on Poisson Hidden Markov Models—The Case of Central and South America. *Stats*, 7(3), 777–792. <https://doi.org/10.3390/stats7030047>
- Iturrieta, P., Gerstenberger, M. C., Rollins, C., Van Dissen, R., Wang, T., & Schorlemmer, D. (2024). Implementing Non-Poissonian Forecasts of Distributed Seismicity into the 2022 Aotearoa New Zealand National Seismic Hazard Model. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 114(1), 244–257. <https://doi.org/10.1785/0120230168>
- Li, J., Sornette, D., Wu, Z., Zhuang, J., & Jiang, C. (2024). *Revisiting Seismicity Criticality: A New Framework for Bias Correction of Statistical Seismology Model Calibrations*.
- Marinković, M., Bošković, M., Đorđević, F., Krtinić, N., & Žugić, Ž. (2024). Seismic Risk Assessment in School Buildings: A Comparative Study of Two Assessment Methods. *Buildings*, 14(8). <https://doi.org/10.3390/buildings14082348>
- Ogata, Y. (2022). Prediction and validation of short-to-long-term earthquake probabilities in inland Japan using the hierarchical space–time ETAS and space–time Poisson process models. *Earth, Planets and Space*, 74(1). <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01669-4>
- Pratama, R., Porcu, E., & Zhou, B. (2025a). A Markov chain model for earthquake occurrence analysis in Megathrust 4 (M4), Sumatra, Indonesia. *Natural Hazards*, 121(14), 16779–16797. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07450-6>
- Pratama, R., Porcu, E., & Zhou, B. (2025b). A Markov chain model for earthquake occurrence analysis in Megathrust 4 (M4), Sumatra, Indonesia. *Natural Hazards*, 121(14), 16779–16797. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07450-6>
- Risco Franco, C. A. (2020). Cadenas de Markov para la identificación de zonas de mayor riesgo de ocurrencia de sismos en Lima-Ica 2019. *Revista IECOS: Instituto de Investigación Económicas y Sociales*.
- Spassiani, I., & Taroni, M. (2024). What Is the Effect of Seismic Swarms on Short-Term Seismic Hazard and Gutenberg-Richter b-Value Temporal Variation? Examples from Central Italy,

October–November 2023. *Geosciences* (Switzerland), 14(2).

<https://doi.org/10.3390/geosciences14020049>

Zhang, S., Li, S., Zhai, C., & Xiao, J. (2024). An Integrated Seismic Assessment Method for Urban Buildings and Roads. *International Journal of Disaster Risk Science*, 15(6), 935–953. <https://doi.org/10.1007/s13753-024-00600-7>