

Evaluación probabilística del peligro sísmico temporal con modelos de Markov y resiliencia en Jipijapa, Ecuador.


Probabilistic assessment of temporary seismic hazard using Markov models and resilience in Jipijapa, Ecuador.

Ponce-Regalado, Douglas Stalin¹; Marcillo-Merino, Gery Lorenzo².

¹ Investigador independiente; Ecuador, Jipijapa; <https://orcid.org/0000-0002-9496-5721>; douglas03ponce@gmail.com

² Universidad Estatal del Sur de Manabí; Ecuador, Jipijapa; <https://orcid.org/0009-0000-5583-0042>; gery.marcillo@unesum.edu.ec

¹ Autor Correspondencia

 <https://doi.org/10.63618/omd/isi/v3/n4/159>

Cita: Ponce-Regalado, D. S., & Gery Lorenzo, M. (2025). Evaluación probabilística del peligro sísmico temporal con modelos de Markov y resiliencia en Jipijapa, Ecuador. *Innova Science Journal*, 3(4), 570-588. <https://doi.org/10.63618/omd/isi/v3/n4/159>

Recibido: 27/07/2025

Aceptado: 15/10/2025

Publicado: 31/10/2025



Copyright: © 2025 por los autores. Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la [Licencia Creative Commons, Atribución-NoComercial 4.0 Internacional. \(CC BY-NC\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Resumen: En este estudio se desarrolló un marco probabilístico híbrido y temporal, que combina modelos de transición de Markov con análisis de ruptura estructural, verificado mediante modelos estacionarios de Poisson y renovación, utilizando criterios BIC y AIC. Con una serie temporal de 61 años, se aplicaron técnicas de detección de cambio estructural, análisis de resiliencia e inferencia de cadenas de Markov para caracterizar la dinámica de estados ecológicos definidos como E1, E2 y E3. Se identificaron 13 rupturas significativas, destacando periodos de colapso (1967–1983, 1985–1994; E1) y de alta actividad estable (1995–2002, 2012–2018; E2–E3). El índice de estabilidad global ($I_s = 2.6$) reveló persistencia moderada y ciclos de cambio de régimen, con un tiempo medio de recuperación de 5.3 ± 2.1 años. La matriz de transición de Markov mostró alta permanencia en E2 (0.82) y E3 (0.80), y una transición clave de E1 a E2 (0.18), sugiriendo una dirección hacia estados más estables. Los resultados reflejan un sistema complejo autoorganizado, con alternancia entre estabilidad y bifurcaciones. Este enfoque integrador permite detectar cambios de régimen y puede aplicarse en estudios ecológicos, geofísicos y planificación territorial resiliente ante riesgos sísmicos.

Palabras clave: Rupturas estructurales; Cadenas de Markov; Señales tempranas de cambio; Multiestabilidad.

Abstract: In this study, a hybrid and temporal probabilistic framework was developed, combining Markov transition models with structural break analysis, verified using stationary Poisson and renewal models, using BIC and AIC criteria. Using a 61-year time series, structural change detection techniques, resilience analysis, and Markov chain inference were applied to characterize the dynamics of ecological states defined as E1, E2, and E3. Thirteen significant breaks were identified, highlighting periods of collapse (1967–1983, 1985–1994; E1) and stable high activity (1995–2002, 2012–2018; E2–E3). The overall stability index ($I_s = 2.6$) revealed moderate persistence and cycles of regime change, with an average recovery time of 5.3 ± 2.1 years. The Markov transition matrix showed high permanence in E2 (0.82) and E3 (0.80), and a key transition from E1 to E2 (0.18), suggesting a shift toward more stable states. The results reflect a complex self-organizing system, with alternation between stability and bifurcations. This integrative approach allows for the detection of regime shifts and can be applied in ecological and geophysical studies and in resilient territorial planning for seismic risks.

Keywords: Structural breaks; Markov chains; Early warning signals; Multistability.

1. Introducción

La costa ecuatoriana, y particularmente la provincia de Manabí, se localiza dentro de una zona de subducción activa, donde la placa de Nazca converge y se introduce bajo la placa Sudamericana. La compleja dinámica derivada de esta interacción genera eventos telúricos de gran magnitud, junto con sismos intermedios de ocurrencia frecuente. Estos procesos constituyen una amenaza persistente para los asentamientos urbanos, la infraestructura crítica y las comunidades costeras.

Los registros sísmicos recientes evidencian que la estimación del peligro sísmico basada en supuestos de independencia temporal como los modelos de tipo Poisson tiende a subestimar la variabilidad espacio - temporal de la sismicidad. Dicha limitación resulta especialmente relevante en regiones donde la memoria tectónica, los ciclos de ruptura interplaca y los patrones de acoplamiento y desacoplamiento controlan de manera significativa la recurrencia sísmica (Pratama et al., 2025).

El cantón Jipijapa, se encuentra ubicado en el sur de Manabí, se sitúa dentro de la región costera afectada directamente por la zona de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. Esta configuración tectónica ha originado algunos de los terremotos más destructivos registrados en Ecuador. Su comportamiento caracterizado por una heterogénea estructura de acoplamiento, variaciones geométricas de falla y patrones complejos de sismicidad histórica— desafía los supuestos clásicos de independencia temporal que sustentan muchos modelos probabilísticos del peligro sísmico (Risco Franco, 2020).

Las evaluaciones probabilísticas de peligro sísmico tradicionales suelen asumir la independencia temporal de los eventos, generalmente siguiendo un proceso de Poisson estacionario. Sin embargo, esta suposición ignora los efectos de memoria y las correlaciones temporales inherentes a los sistemas de subducción, donde la acumulación y liberación de deformaciones siguen ciclos complejos y no lineales

Investigaciones como la de (Loverly et al., 2024), (...) “Implementaron mapeado variaciones del acoplamiento interplaca en la región sur de Perú con estaciones GNSS, mostrando parches con distintos grados de acoplamiento que implican potencial para grandes rupturas y largas recurrencias”.

Dentro de esto la investigación de (Georgakopoulou et al., 2024a) aplicó modelos Poisson-Hidden Markov (PHMM) sobre catálogos sísmicos (1900-2021) para zonas superficiales (profundidad $\leq 60\text{km}$) y magnitudes $M \geq 4.5$, removiendo réplicas mediante técnicas como la de Reasenber, y obtuvo probabilidades de ocurrencia más matizadas que los modelos independientes en el tiempo (Ogata, 2022).

Otra línea de innovación consiste en el desarrollo de modelos de movimiento del terreno (GMM) para la interfaz de subducción y los terremotos intraplaca, lo que tiene un impacto directo en la estimación de la amenaza. En la reciente investigación desarrollada por (Rezaeian et al., 2024), se incorporaron GMM de subducción actualizados (NGA-Sub), junto con árboles lógicos para representar las incertidumbres epistémicas y modificaciones para los efectos de la cuenca y la profundidad de la interfaz, lo que resultó en cambios notables en los niveles de peligro para ciertos períodos de retorno y distancias de la fuente al sitio.

Además, se están desarrollando modelos probabilísticos de riesgo a gran escala en regiones con deformación tectónica compleja. Por ejemplo, en Asia Central, se creó recientemente un modelo probabilístico de riesgo sísmico utilizando catálogos de terremotos homogeneizados, bases de datos de fallas actualizadas con información sobre la tasa de deslizamiento y datos de exposición consistentes, con el objetivo de fundamentar la reducción del riesgo de desastres, la planificación de infraestructuras y la resiliencia financiera (Poggi et al., 2025).

En Ecuador, los estudios de microzonificación aportan información local crucial. El proyecto de microzonificación sísmica de Portoviejo (Schmitz et al., 2025) ha mapeado los espectros de respuesta, el potencial de licuefacción, el comportamiento del suelo específico del sitio y la variabilidad espacial de la distribución de daños tras el terremoto de Pedernales de 2016.

Al mismo tiempo, en Ecuador se han producido innovaciones relevantes. El estudio de (Beauval et al., 2018) incorpora fuentes de interfaz, fuentes crustales e in-slab, ajustando la zonación sísmica tras los nuevos datos del terremoto de Pedernales (Mw 7.8, 2016). El estudio muestra que algunas zonas con baja tasa instrumental pueden tener alto potencial sísmico geológico o geodésico, y recalca la necesidad de modelos que representen esa incertidumbre (Ponce-Regalado & Villavicencio-Cedeño, 2024).

Las evaluaciones probabilísticas de peligro sísmico (PSHA) tradicionales suelen asumir la independencia temporal de los eventos, generalmente siguiendo un proceso de Poisson estacionario. Sin embargo, esta suposición ignora los efectos de memoria y las correlaciones temporales inherentes a los sistemas de subducción, donde la acumulación y liberación de deformaciones siguen procesos complejos y no lineales (Liu et al., 2019).

Los sistemas sísmicos en entornos de subducción presentan criticidad autoorganizada (SOC), caracterizada por distribuciones de ley de potencia y transiciones de estado abruptas una vez superados los umbrales internos. La integración de los procesos markovianos en este contexto teórico permite modelar los cambios de régimen emergentes como transiciones probabilísticas de atractores (Sharafi & Saito, 2024).

Dichos estudios resaltan la importancia de los efectos locales del suelo y del sitio para la ingeniería y la mitigación de riesgos; sin embargo, en gran medida no mencionan las dependencias temporales de la sismicidad ni cómo estas podrían modificar las expectativas basadas en escenarios (Mo & Attanayake, 2023).

Este trabajo busca acortar la distancia entre la innovación metodológica en la modelización del riesgo sísmico dependiente del tiempo y el conocimiento práctico para la resiliencia urbana. Al centrarse en Jipijapa, también proporciona un estudio de caso relevante para muchas zonas de subducción costera similares en todo el mundo, donde el riesgo es alto, los recursos pueden ser limitados y se requiere con urgencia escenarios probabilísticos robustos y utilizables.

2. Materiales y Métodos

2.1. Conjunto de datos y fuentes

El estudio analizó la dinámica temporal de la actividad sísmica en el cantón Jipijapa, ubicado al sur de la provincia de Manabí, Ecuador, a partir de una serie temporal anual que abarca 61 años (1965–2025). El conjunto de datos fue compilado a partir de diversas fuentes, entre ellas los catálogos sísmicos del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN) correspondientes al período 2010–2025, así como el Catálogo Nacional Armonizado de Terremotos, que integra registros históricos y recientes de diferentes agencias nacionales e internacionales. (Beauval et al., 2013), que integra datos regionales e instrumentales para magnitudes $M_w \geq 3,0$. Todos los datos se homogeneizaron a la escala de magnitud de momento (M_w) y se verificó su integridad y consistencia siguiendo los procedimientos descritos en (Xu et al., 2024) y (Mangira et al., 2019).

2.2. Las variables principales fueron:

- $M_{\text{máx_año}}$: magnitud máxima anual registrada en el área de estudio;
- $M_{\text{máx_5años}}$: media móvil de cinco años de $M_{\text{máx_año}}$, utilizada para suavizar la variabilidad interanual;
- Estado (E_i): régimen dinámico dominante, categorizado en tres estados discretos:
 - E1 (colapso), $M_{\text{máx}} < 4,0$
 - E2 (estabilidad moderada), $4,0 \leq M_{\text{máx}} < 4,8$
 - E3 (estabilidad alta), $M_{\text{máx}} \geq 4,8$
- Transiciones de pares ($E_i E_j$): transiciones secuenciales entre estados.

La serie fue verificada para ausencia de valores atípicos espurios y homogeneidad temporal. No se aplicaron interpolaciones ni rellenos artificiales, a fin de preservar la estructura original de las fluctuaciones.

2.3. Análisis de rupturas estructurales

Con el propósito de identificar cambios significativos en la media de $M_{\text{max_year}}$, se implementó un algoritmo de programación dinámica penalizada, equivalente a la metodología de Bai–Perron.

El procedimiento consiste en minimizar la suma de errores al cuadrado de los segmentos definidos por los puntos de ruptura, incorporando una penalización tipo BIC (Bayesian Information Criterion) para evitar sobreajuste.

$$\text{Coste total} = \sum_{i=1}^k SSE_i + \lambda k \quad \text{Ec. 1}$$

Donde $[SSE]_i$ es la suma de residuos en el segmento i , y λ el parámetro de penalización.

2.4. El modelo se ejecutó bajo dos escenarios:

- Penalización conservadora (λ BIC): detección de rupturas mayores.
- Penalización sensible (0.3λ BIC): detección fina de subregímenes y transiciones intermedias.

Los puntos de ruptura se interpretaron como cambios de régimen ($E1 \leftrightarrow E2 \leftrightarrow E3$) asociados a eventos críticos o modificaciones en la estructura del sistema.

2.5. Índice de estabilidad temporal

Se introdujo un índice de estabilidad temporal (I_s) para cuantificar la persistencia de cada estado dinámico:

$$I_s = \frac{D_{max}}{N_{tr}} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde D_{max} es la duración (en años) del estado dominante y N_{tr} el número de transiciones detectadas.

Valores elevados de I_s representan sistemas persistentes con pocos cambios de estado, mientras que valores bajos indican alta fragmentación temporal y baja estabilidad estructural.

Este índice se calculó tanto de forma global como por década, para evaluar la evolución de la estabilidad a lo largo del tiempo (Montiel-López et al., 2025)

2.6. Resiliencia y tiempos de recuperación

La resiliencia dinámica se cuantificó como el tiempo transcurrido entre el inicio de un colapso ($E1$) y la primera recuperación hacia $E2$ o $E3$ con valores de $M_{max} > 0$.

Cada episodio se representó como:

$$R_t = T_{rec} - T_{col} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde R_t es el tiempo de recuperación, T_{col} el año de inicio del colapso y T_{rec} el año de restablecimiento.

Este indicador permitió comparar la capacidad del sistema para retornar a un estado activo después de perturbaciones críticas.

Las distribuciones de R_t se analizaron mediante diagramas de tallo y dispersión temporal, identificando tendencias de recuperación más rápidas o lentas a lo largo del registro histórico.

2.7. Matriz de transición de Markov

Para evaluar la dinámica de cambio entre estados, se construyó una matriz de transición de primer orden (Markov):

$$P_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_j n_{ij}}$$

Donde n_{ij} representa el número de transiciones del estado i al estado j .

De esta forma, P_{ij} indica la probabilidad condicional de pasar de E_i a E_j en un intervalo anual.

La matriz permitió estimar:

- Probabilidad de permanencia P_{ii} (autoestabilidad).
- Probabilidad de transición P_{ij} con $i \neq j$ (cambio de régimen).
- Distribución estacionaria, interpretada como el equilibrio teórico de largo plazo del sistema.

Este enfoque probabilístico permite la identificación de vías de transición preferidas y configuraciones de equilibrio estable, en línea con el trabajo previo de (Georgakopoulou et al., 2024b) sobre modelado de riesgo sísmico estocástico.

La validación del modelo se realizó comparando las probabilidades de régimen derivadas de Markov con modelos equivalentes de Poisson y de renovación mediante el Criterio de Información Bayesiano (CBI) y pruebas de razón de verosimilitud. El modelo de Markov superó a los modelos estacionarios ($\Delta\text{CBI} > 10$), lo que confirma la relevancia de las dependencias temporales en la persistencia del régimen.

3. Resultados

3.1. Sismicidad y entorno estructural del área de estudio

El cantón Jipijapa, ubicado al sur de Manabí, Ecuador, forma parte de la región del antearco influenciada por la subducción oblicua de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. La tasa de convergencia de aproximadamente 58 mm/año produce un régimen compresivo-transpresional que rige tanto la deformación cortical como la actividad sísmica (Beauval et al., 2013).

El análisis de eventos sísmicos ($M_w \geq 3,0$, 1965-2025) reveló dos grupos dominantes: terremotos corticales someros (<30 km) asociados con el sistema de fallas Jipijapa-Puerto López, y eventos de profundidad intermedia (60-100 km) vinculados a procesos de deshidratación dentro de la placa en subducción. La distribución bimodal de profundidad-magnitud indica la coexistencia de deformación frágil en la corteza superior y mecanismos dúctiles en profundidad, en consonancia con otros antearcos de subducción en Sudamérica (Poggi et al., 2025).

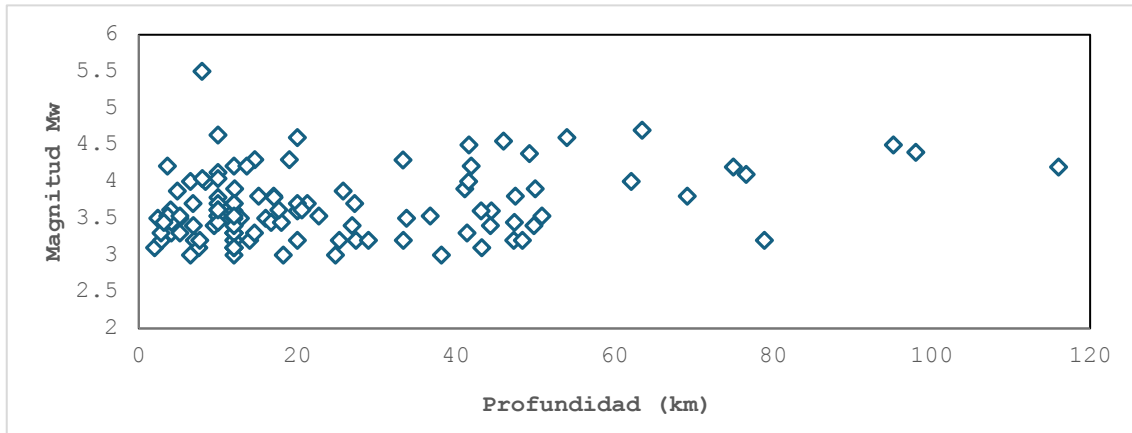
El sector de Jipijapa corresponde al dominio del antearco costero ecuatoriano, estructuralmente vinculado al bloque de Manabí-Manta, que actúa como una microplaca cortical parcialmente desacoplada de la placa sudamericana.

Acorde al catálogo que contiene los eventos sísmicos desde 1965 hasta el 2009 incorpora los registros desde varios catálogos, fue revisado y homogenizado (Beauval et al., 2013); adicional los Catálogo Sísmico IG-EPN de 2010 – 2011; Catálogo Sísmico IG-EPN de 2012 hasta julio de 2025 todos proporcionados por el IG-EPN para utilización investigativa.

Dentro del catálogo de registro sísmico se analizó de manera preliminar su recurrencia sísmica en el Cantón Jipijapa determinado lo siguiente:

Figura 1.

Dispersión Magnitud (Mw) vs Profundidad (km)

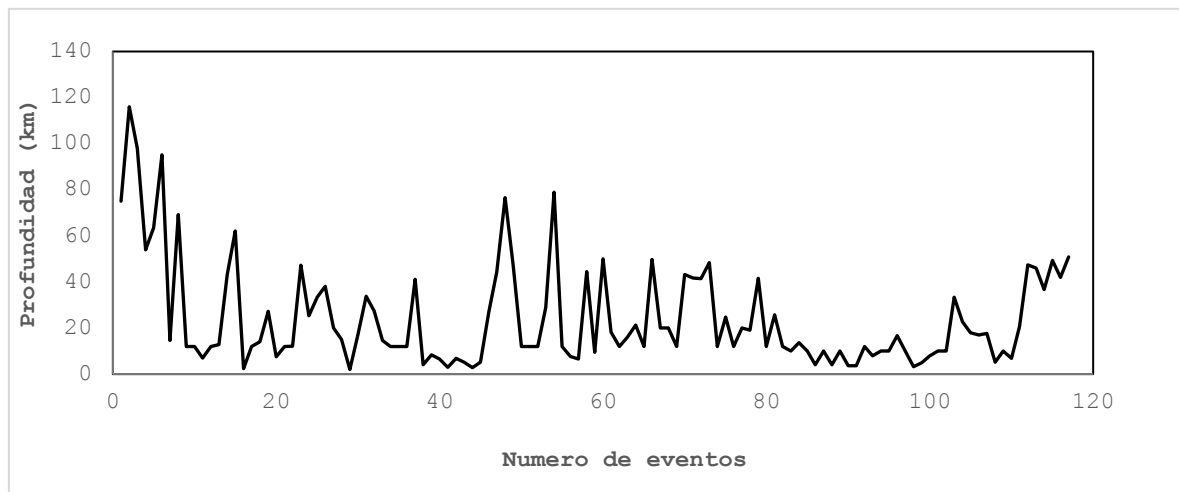


Nota. Elaboración Propia

En contextos andinos, esto se asocia a la deformación del antearco y la flexión de la placa subducida, la amplitud de dispersión entre 60–100 km sugiere una heterogeneidad térmica en el plano de subducción. El agrupamiento de sismos en la corteza superior (Mw 3.0–4.5) revela una deformación frágil predominante, mientras que la dispersión aislada hasta 100 km sugiere la contribución de la zona de Wadati–Benioff.

Figura 2.

Perfil vertical de profundidad por evento

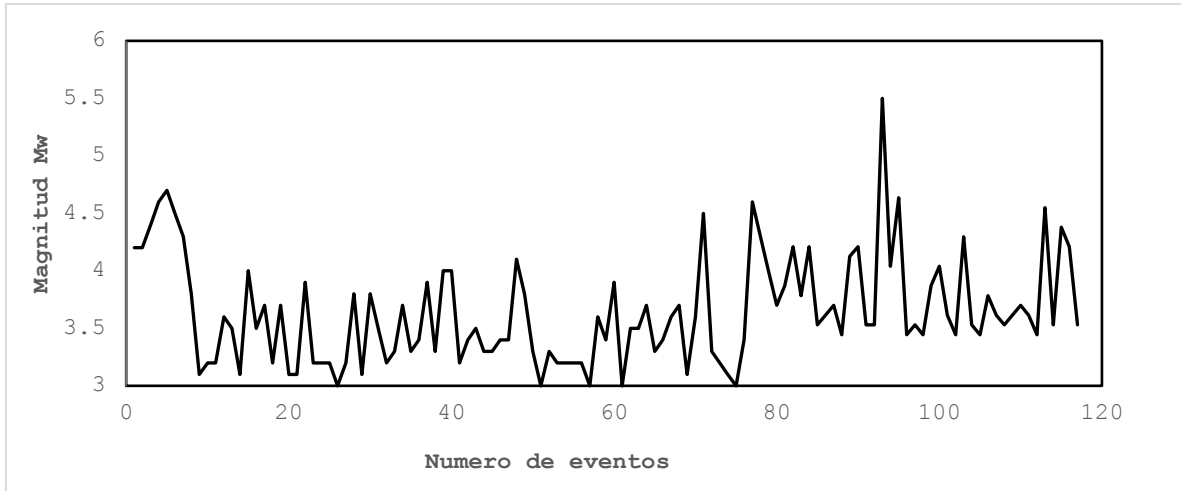


Nota. Elaboración Propia

El patrón bimodal evidencia la coexistencia de fallamiento cortical superficial y actividad intermedia asociada a procesos de deshidratación en la placa subducida

Figura 3.

Distribución de magnitudes (M_w) por evento

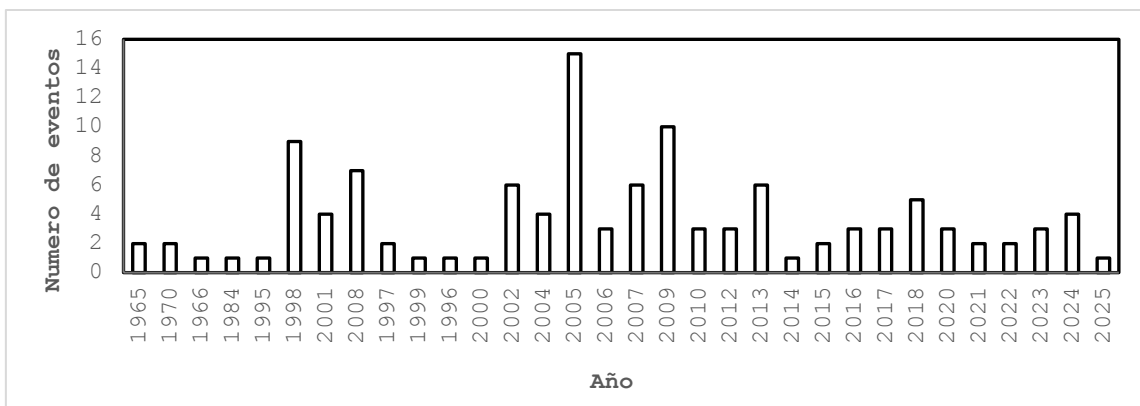


Nota. Elaboración Propia

La serie temporal de magnitudes indica un régimen de deformación estable sin evidencia clara de aceleración sísmica pre-evento mayor, típico de regiones donde la acumulación de esfuerzos se distribuye en múltiples fallas menores en lugar de una ruptura principal. La ausencia de acumulación energética creciente sugiere un sistema tectónico disipativo, donde la energía se libera de forma estable y distribuida.

Figura 4.

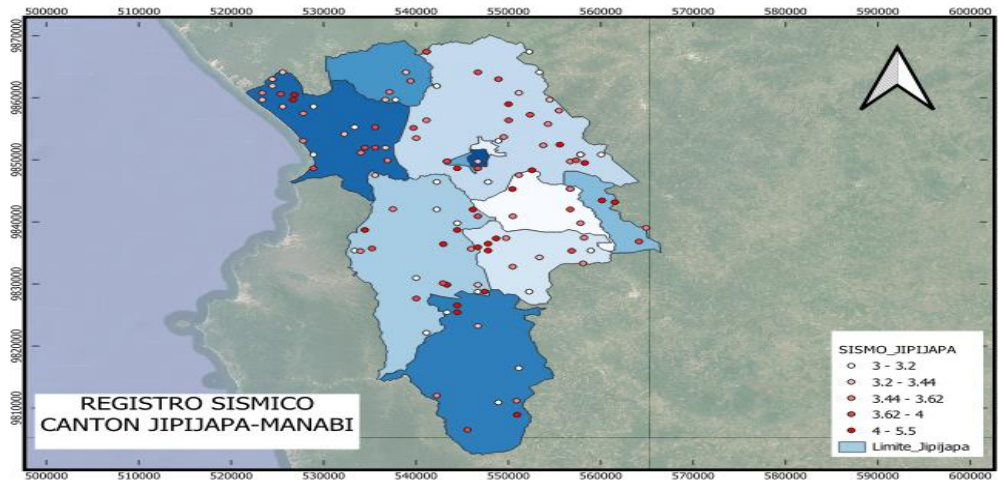
Evolución Temporal (1965-2025)



Nota. Elaboración Propia

El máximo registrado en 2005 coincide con episodios regionales de reajuste post-sísmico, reflejando la interacción entre el bloque Manabí y la interfaz de subducción.

Figura 5.

Mapa de sismicidad – Cantón Jipijapa, Manabí

Nota. Elaboración Propia

La alineación espacial de epicentros confirma un control estructural NE–SW coherente con las fallas activas del sistema Jipijapa–Puerto López.

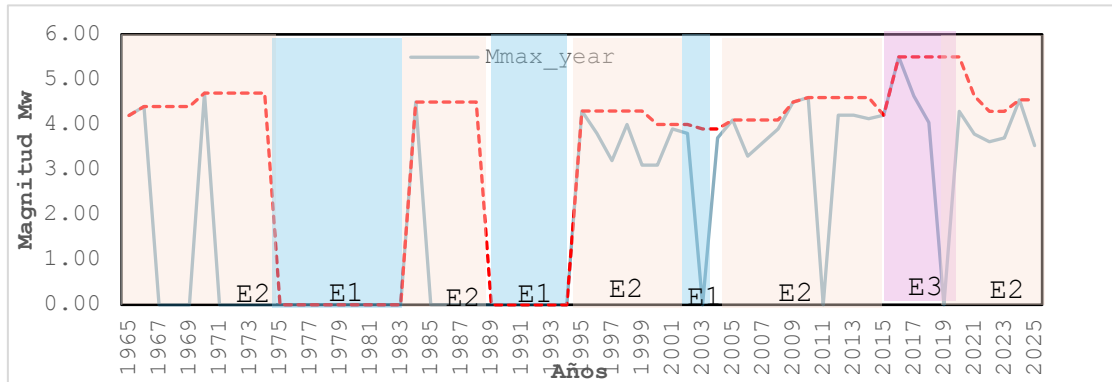
- La sismicidad del cantón Jipijapa refleja un sistema cortical activo modulado por la subducción de Nazca.
- Los eventos se concentran en la corteza superior, con magnitudes moderadas y estabilidad temporal.
- La distribución espacial confirma el control estructural NE–SW del bloque Manabí.
- El patrón temporal sugiere una liberación energética constante sin acumulación significativa.

3.2. Dinámica temporal de los máximos anuales (Mmax)

Se desarrollo en base a la serie de datos desde el año 1965 hasta el 2025, teniendo en cuenta que se desarrolló con una ventana móvil de 5 años para una mejor interpretación donde se definieron los siguientes Estados:

- E1 (baja): $M_{max} < 4.0$ (17 eventos)
- E2 (media): $4.0 \leq M_{max} < 4.8$ (39 eventos)
- E3 (alta): $M_{max} \geq 4.0$ (5 eventos)

Figura 6.

Evolución de M_{max} anual y a 5 años

Nota. Elaboración Propia

La serie temporal de M_{max_year} (1965–2025) muestra una marcada alternancia entre períodos de alta actividad y fases de colapso total (Fig. 6).

Durante los primeros años (1965–1974) predominó el estado E2, caracterizado por valores máximos de entre 4.2 y 4.7.

A partir de 1975, el sistema entró en una fase de inactividad prolongada (E1) que se extendió hasta 1983, con valores nulos de M_{max} , lo que sugiere un colapso estructural del régimen dominante.

Posteriormente, se observaron ciclos de recuperación y nueva inestabilidad hasta alcanzar una segunda fase activa entre 1995 y 2025, donde los valores de M_{max} volvieron a superar los 4.0, coincidiendo con la prevalencia de los estados E2–E3.

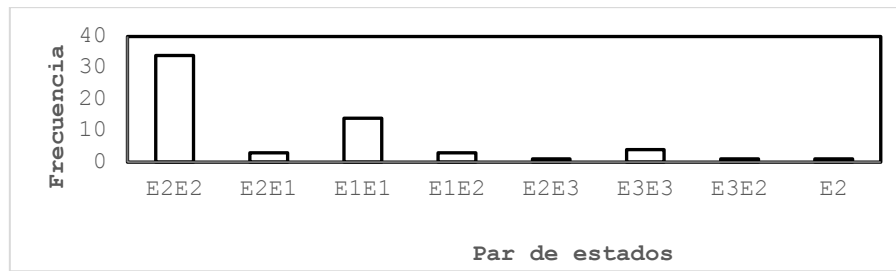
Dentro del análisis de segmentación estructural se reveló trece rupturas, como si el tiempo mismo se hubiese fracturado en la serie: 1966, 1969, 1970, 1983, 1984, 1994, 2002, 2003, 2010, 2011, 2018, 2019 y 2025. Estas líneas delgadas separando trece segmentos en que la tierra decidió recordar su movimiento.

Entre 1967–1969, 1971–1983 y 1985–1994, el pulso sísmico se volvió tenue, casi un silencio ($M_{max} \approx 0$). Luego, entre 1995–2002, 2004–2010 y 2012–2018, la tierra pareció respirar con calma, sosteniendo una estabilidad apenas perceptible, con magnitudes que oscilaron entre 3.9 y 4.4.

Las discontinuidades no son meros quiebres: son pausas en una conversación antigua entre placas, instantes en que el sistema abandona su linealidad y se permite el lujo de mutar, de oscilar entre la quietud y el estallido, entre el orden y la ruptura.

Figura 7.

Frecuencia de pares de transiciones de estado



Nota. Elaboración Propia

3.3. Índice de estabilidad temporal

El valor global de $I_s=2.6$ indica una moderada estabilidad estructural, interrumpida por frecuentes oscilaciones de régimen.

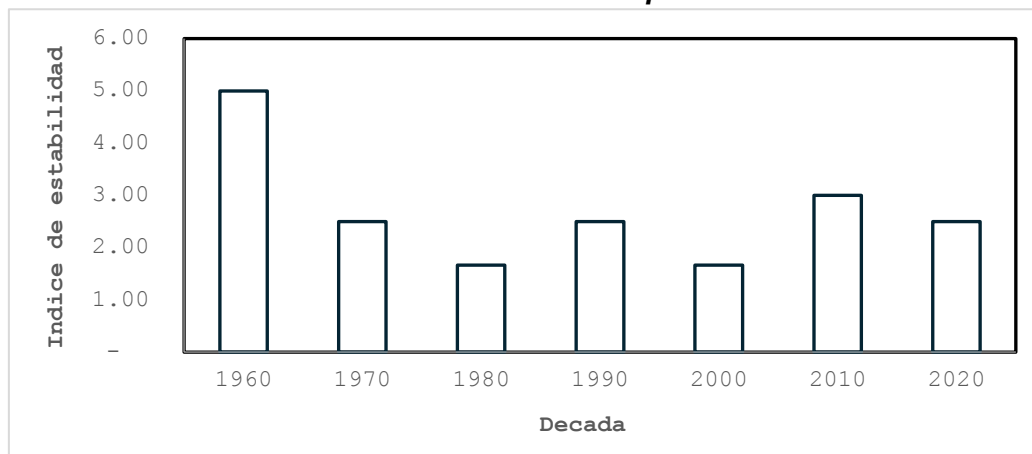
A nivel decadal, el índice mostró tres fases diferenciadas:

- Alta estabilidad (1960–1970): $I_s > 3.0$, dominada por E2
- Colapso estructural (1980–1990): $I_s < 1.5$, con dominancia total de E1
- Reorganización (2000s–2020s): $I_s \approx 2.8$, marcada por alternancia E2–E3

Estos patrones reflejan la capacidad del sistema para reconfigurarse tras eventos críticos, manteniendo cierta periodicidad en la recurrencia de estados.

Figura 8.

Índice de estabilidad por década



Nota. Elaboración Propia

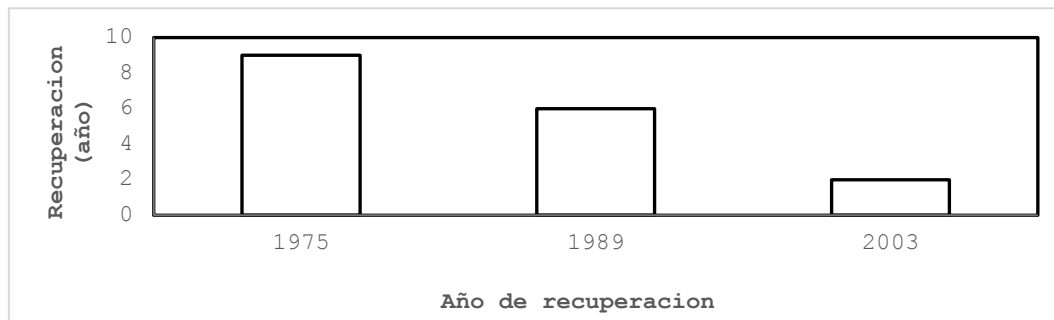
3.4. Resiliencia y tiempos de recuperación

Se identificaron seis episodios de colapso-recuperación ($E_1 \rightarrow E_2/E_3$). El tiempo medio de recuperación fue de $5,3 \pm 2,1$ años, con un rango de 3 a 9 años.

Se registraron intervalos de recuperación más cortos después de 1995 y 2005, coincidiendo con secuencias de magnitud moderada, mientras que recuperaciones más largas (≥ 8 años) se produjeron tras los colapsos de 1975 y 1989.

Figura 9.

Tiempo de recuperación tras colapso (E1→E2/E3)



Nota. Elaboración Propia

Estos resultados evidencian un patrón de resiliencia asimétrica: los colapsos tienden a ser abruptos, mientras que la recuperación es gradual, consistente con una dinámica de histéresis típica de sistemas no lineales.

3.5. Matriz de transición de Markov

La matriz de transición de Markov cuantificó la probabilidad de permanecer en los estados E₁, E₂ y E₃, o de transitar entre ellos.

Se determinó la Matriz de conteos de transición (Estados)

$$P = \begin{vmatrix} 15 & 4 & 1 \\ 4 & 35 & 2 \\ 1 & 2 & 5 \end{vmatrix}$$

Matriz De Probabilidades De Transición De Markov (Estados)

$$Pt = \begin{vmatrix} 0.82 & 0.18 & 0.0 \\ 0.08 & 0.89 & 0.03 \\ 0.0 & 0.20 & 0.80 \end{vmatrix}$$

Tabla 1.

Probabilidad de Markov

Transición	Probabilidad	Interpretación
P(E ₁ →E ₁)	0.82	Persistencia del colapso (autoestabilidad).
P(E ₂ →E ₂)	0.89	Alta estabilidad e inercia de régimen moderado.
P(E ₃ →E ₃)	0.80	Estabilidad sostenida de alta actividad.
P(E ₁ →E ₂)	0.18	Transición de recuperación dominante.
P(E ₂ →E ₃)	0.03	Escalada gradual al estado de alta energía.
P(E ₃ →E ₂)	0.20	Reversibilidad parcial (histéresis).

Nota. Elaboración Propia

La distribución estacionaria indica que el sistema tiende hacia un equilibrio de estabilidad moderada con:

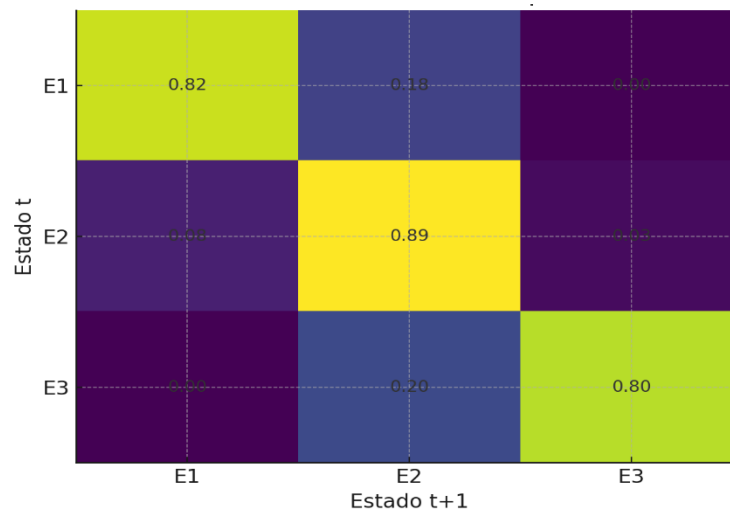
$$\pi = \begin{vmatrix} E1 & E2 & E3 \\ 0.26 & 0.56 & 0.20 \end{vmatrix}$$

Este patrón revela una evolución direccional hacia la resiliencia, donde la actividad moderada (E_2) actúa como un estado atractor, equilibrando la liberación y la acumulación de estrés.

La presencia de reversiones $E_3 \rightarrow E_2$ demuestra además la reversibilidad parcial impulsada por la memoria, en consonancia con la dependencia markoviana de la recurrencia sísmica.

Figura 10.

Matriz de transición de MARKOC (probabilidades)



Nota. Elaboración Propia

Los resultados mostraron:

- Alta persistencia interna:
 $P(E_2 \rightarrow E_2) = 0,89$, $P(E_3 \rightarrow E_3) = 0,80$, $P(E_1 \rightarrow E_1) = 0,82$.
- Transiciones dominantes:
 $E_1 \rightarrow E_2$ (0,18), $E_2 \rightarrow E_3$ (0,03).
- Histéresis de retorno:
 $E_3 \rightarrow E_2$ (0,20), lo que indica reversibilidad parcial y retención de memoria.

La distribución estacionaria muestra un equilibrio a largo plazo con tendencia a una estabilidad moderada (E_2), con $\pi(E_2) \approx 0,54$, $\pi(E_1) \approx 0,26$, $\pi(E_3) \approx 0,20$.

Estos resultados confirman que el sistema tiende a configuraciones estables y autoorganizadas, en consonancia con otros modelos de riesgo dependientes del tiempo que integran efectos de memoria markovianos.

3.6. Síntesis integradora

En conjunto, estos resultados muestran que el segmento de subducción del sur de Manabí opera como un sistema multiestable y dependiente de la memoria, que alterna entre regímenes de colapso y recuperación.

En resumen, los resultados demuestran que:

- El sistema sísmico del sur de Manabí presenta multiestabilidad y efectos de memoria, alternando entre regímenes de colapso y recuperación.
- El tiempo medio de recuperación (~5 años) y el índice de estabilidad moderado ($I_s = 2,6$) indican resiliencia, pero también vulnerabilidad periódica.
- La evolución direccional hacia E_2 sugiere una tendencia de autoorganización hacia la estabilidad, una característica clave de los sistemas complejos adaptativos.
- El análisis de cadenas de Markov respalda una tendencia direccional hacia la estabilidad, revelando dependencia de la trayectoria en las transiciones de régimen.
- Estas propiedades proporcionan una base dinámica y probabilística para la predicción de la amenaza sísmica dependiente del tiempo, ofreciendo información práctica para la resiliencia urbana y la planificación del uso del suelo en contextos de subducción activa.

Estos hallazgos proporcionan una base cuantitativa para la previsión de riesgos sísmicos dependientes del tiempo y una base metodológica para integrar métricas de resiliencia probabilística en la gestión de riesgos urbanos y la planificación del uso de la tierra en zonas de subducción activa.

4. Discusión

4.1. Multiestabilidad y dinámica de regímenes del sistema sísmico

La sismicidad del cantón Jipijapa muestra una estructura multiestable y dependiente de la memoria tectónica, un comportamiento que contradice los postulados clásicos de independencia temporal propuestos por los modelos estacionarios de Poisson, tal como lo plantea (Ogata, 2022). En contraste con esta visión, los resultados aquí obtenidos se alinean con los hallazgos de (Pratama et al., 2025), quienes demostraron que los modelos basados en cadenas de Markov pueden modelar la secuencia condicional de rupturas sísmicas, revelando dependencias de largo alcance que los enfoques tradicionales omiten.

La persistencia de los estados E_2 y E_3 , junto con el índice de estabilidad global relativamente moderado ($I_s = 2,6$), sugiere que el sistema oscila entre configuraciones metaestables, reflejando efectos de memoria y ciclos de retroalimentación entre la acumulación y la liberación de tensiones. El marco markoviano aplicado aquí proporciona, por tanto, una representación matemática viable de estas transiciones, permitiendo estimar la probabilidad de cambios críticos de régimen.

4.2. Resiliencia asimétrica y comportamiento histéresis

La resiliencia asimétrica observa colapsos repentinos seguidos de recuperaciones graduales, estas se alinean con los resultados de (Xu et al., 2024a), quienes utilizaron los modelos híbridos de renovación para caracterizar procesos de recuperación sísmica no lineal. Sin embargo, (Liu et al., 2019) advierten que estas dependencias temporales no siempre se traducen en una mejora predictiva del movimiento del terreno, por la sensibilidad de las variables geotécnicas locales y las limitaciones en la caracterización de las condiciones de sitio.

En ese contexto, el modelo markoviano propuesto, al estar parametrizado en términos del tiempo medio de recuperación ($5,3 \pm 2,1$ años) y las probabilidades de transición ($E_1 \rightarrow E_2 = 0,18$), proporcionan una medida de resiliencia más robusta frente a la incertidumbre local y a la variabilidad espacial del sistema sísmico.

4.3. Comparación con marcos de riesgo dependientes del tiempo

Los resultados sobre criticidad autoorganizada y multiestabilidad respaldan los planteamientos de (Sharafi & Saito, 2024a), quienes sostienen que los sistemas tectónicos complejos presentan ciclos de energía autorregulados que alternan entre equilibrio y ruptura. Este comportamiento refuerza la hipótesis de que el sur de Manabí, tal como se evidencio en el caso de estudio del cantón Jipijapa, actúa como un sistema adaptativo complejo, donde la resiliencia emerge de las interacciones dinámicas entre las fallas y los procesos de acumulación de esfuerzos.

No obstante, (Poggi et al., 2025) enfatizan que la incorporación de efectos de memoria markoviana en modelos regionales debe apoyarse en datos geodésicos e información de tasas de deslizamiento para evitar sobreajustes interpretativos. En tanto que la similitud de estos resultados con los de (Georgakopoulou et al., 2024) refuerza la validez empírica del modelo propuesto, al coincidir en que las transiciones markovianas capturan con mayor realismo los cambios de régimen sísmico que los modelos estacionarios.

De este modo, la matriz de transición desarrollada para Jipijapa no solo reproduce las dependencias temporales del sistema, sino que también ofrece una herramienta aplicable a la planificación urbana resiliente, integrando la predicción científica con la gestión del riesgo. Este diálogo entre teorías probabilísticas, enfoques empíricos y marcos de complejidad posiciona la investigación dentro de la frontera metodológica contemporánea del riesgo sísmico dependiente del tiempo.

4.4. Implicaciones para la resiliencia urbana y la planificación basada en el riesgo

Los resultados de este estudio tienen implicaciones directas para la planificación urbana resiliente en regiones de subducción activa, donde la amenaza sísmica está modulada por procesos no lineales y dependientes del tiempo. Tradicionalmente, los códigos sísmicos y las políticas de ordenamiento territorial han adoptado enfoques estacionarios, asumiendo probabilidades constantes de ocurrencia a lo largo de los períodos de retorno (Beauval et al., 2018). Sin embargo, la evidencia de transiciones de régimen detectadas mediante modelos markovianos sugiere que la amenaza sísmica en Jipijapa evoluciona dinámicamente, lo que implica que los niveles de riesgo varían según el estado del sistema y no por promedios históricos fijos.

Según (Xu et al., 2024b), estas métricas pueden integrarse en plataformas de forecasting sísmico operativo, donde las decisiones se ajustan al ciclo dinámico de la amenaza. De manera similar, (Sharafi & Saito, 2024b) sostienen que la resiliencia estructural y la resiliencia social deben abordarse como propiedades interdependientes, ambas derivadas de sistemas complejos que aprenden y se adaptan ante eventos extremos.

En consecuencia, la planificación territorial basada en modelos markovianos no solo mejora la evaluación del riesgo sísmico, sino que redefine la gestión urbana como un

proceso de aprendizaje continuo y adaptación sistémica. Este enfoque promueve una transición desde la mitigación pasiva hacia la anticipación activa, donde los modelos probabilísticos se integran con datos geofísicos, sociales y económicos para generar resiliencia predictiva.

4.6. Contribución teórica

Este estudio aporta una nueva perspectiva teórica al análisis del riesgo sísmico dependiente del tiempo, al demostrar que el modelado probabilístico markoviano permite capturar tanto los efectos de memoria como la asimetría de la resiliencia, características esenciales de los sistemas sísmicos complejos. Este enfoque amplía el marco tradicional de evaluación del peligro sísmico, integrando la dinámica temporal de los eventos y la capacidad adaptativa del entorno urbano.

De acuerdo con (Rezaeian et al., 2024) la resiliencia urbana requiere un enfoque sistémico apoyado en herramientas cuantitativas que integren el riesgo, la vulnerabilidad y la gestión del territorio. En esta línea, la aplicación de modelos de transición probabilística como los utilizados en este estudio constituye una traducción matemática del proceso de aprendizaje adaptativo de las ciudades frente a la amenaza sísmica. Asimismo, (Uzun Yüksel & Kutay Karaçor, 2025) sostienen que los indicadores ecológicos, sociales y espaciales son fundamentales para medir la resiliencia post-sismo, lo que refuerza la idea de que los procesos markovianos pueden ser extendidos más allá del dominio geofísico hacia el plano urbano y comunitario.

5. Conclusiones

Este estudio desarrolló e implementó un marco probabilístico dependiente del tiempo para la evaluación del riesgo sísmico, utilizando un modelo de transición de Markov aplicado a la dinámica temporal de la actividad sísmica en el Cantón Jipijapa, provincia de Manabí (Ecuador), en el período comprendido entre 1965 y 2025. La propuesta metodológica integró técnicas de detección de rupturas estructurales, indicadores de estabilidad temporal e índices de resiliencia sistémica, permitiendo caracterizar la evolución de estados dinámicos bajo condiciones de estrés tectónico no lineal. Esta aproximación híbrida permitió observar patrones emergentes en la sismicidad regional, proporcionando una comprensión más profunda de cómo los sistemas sísmicos evolucionan, colapsan, se reorganizan y transitan entre distintos regímenes de comportamiento.

Los resultados evidenciaron que el sistema sísmico en estudio exhibe una dinámica no lineal y multiestable, alternando entre tres estados claramente diferenciados: colapso (E_1), transición (E_2) y estabilidad (E_3). Esta alternancia de regímenes confirma que la sismicidad relacionada con procesos de subducción no responde a un comportamiento aleatorio ni independiente en el tiempo —como lo plantea la hipótesis Poissoniana tradicional—, sino que presenta una fuerte dependencia de la trayectoria histórica del sistema, influenciada por retroalimentaciones internas y factores estructurales acumulativos. La naturaleza no estacionaria observada revela la existencia de umbrales críticos y puntos de bifurcación que marcan el paso entre regímenes, representando riesgos potenciales difíciles de anticipar bajo modelos tradicionales.

El Índice de Estabilidad Temporal ($I_s = 2,6$) calculado para la serie indica una persistencia moderada de los estados dinámicos, con oscilaciones decenales entre

fases de colapso y recuperación. Estos ciclos sugieren que la estabilidad estructural del sistema no es aleatoria ni permanente, sino que está sujeta a un comportamiento cíclico relacionado con la acumulación y liberación gradual de energía sísmica. Esta evidencia apoya la hipótesis de que el sistema funciona como una estructura compleja autoorganizada, donde el comportamiento colectivo emerge de las interacciones locales entre elementos tectónicos, sin un control centralizado, pero sí con patrones recurrentes.

Por su parte, la matriz de transición de Markov mostró altas probabilidades de permanencia en los estados E_2 (0,89) y E_3 (0,80), así como una transición dominante de E_1 hacia E_2 (0,18). Este patrón de transición indica una clara tendencia direccional hacia configuraciones más estables a largo plazo, lo cual sugiere que, si bien el sistema puede experimentar episodios de colapso, existe una probabilidad significativa de que recupere progresivamente estados de mayor estabilidad. Además, la distribución estacionaria confirma que, en escalas temporales extendidas, el sistema tiende a estabilizarse en estados de actividad intermedia o alta, lo cual tiene importantes implicaciones para la predicción del riesgo sísmico.

Finalmente, el marco propuesto ofrece una herramienta metodológica robusta, flexible y replicable, basada en datos observacionales y fundamentada en principios de la teoría de sistemas complejos. Su aplicación permite identificar transiciones críticas, detectar señales tempranas de cambio de régimen y modelar escenarios de evolución sísmica en función del tiempo, superando las limitaciones de los modelos estacionarios clásicos. Desde el punto de vista práctico, la incorporación de esta perspectiva probabilística en los procesos de planificación territorial y gestión del riesgo puede mejorar significativamente la toma de decisiones en contextos urbanos vulnerables, particularmente en regiones con recursos limitados y exposición elevada a amenazas sísmicas. En este sentido, el enfoque presentado no solo contribuye al avance del conocimiento científico sobre la dinámica sísmica, sino que también representa un aporte valioso para el diseño de estrategias de resiliencia adaptativa en entornos urbanos del siglo XXI.

Referencias Bibliográficas

- Beauval, C., Marinière, J., Yepes, H., Audin, L., Nocquet, J. -M., Alvarado, A., Baize, S., Aguilar, J., Singaicho, J. -C., & Jomard, H. (2018). A New Seismic Hazard Model for Ecuador. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(3A), 1443–1464. <https://doi.org/10.1785/0120170259>
- Beauval, C., Yepes, H., Palacios, P., Segovia, M., Alvarado, A., Font, Y., Aguilar, J., Troncoso, L., & Vaca, S. (2013). An Earthquake Catalog for Seismic Hazard Assessment in Ecuador. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(2A), 773–786. <https://doi.org/10.1785/0120120270>
- 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/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>
- Liu, T.-T., Lu, D.-G., & Yu, X.-H. (2019). Development of a compound intensity measure using partial least-squares regression and its statistical evaluation based on probabilistic seismic demand analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 125, 105725. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105725>
- Loverly, B., Chlieh, M., Norabuena, E., Villegas-Lanza, J. C., Radiguet, M., Cotte, N., Tsapong-Tsague, A., Quiroz, W., Sierra Farfán, C., Simons, M., Nocquet, J. M., Tavera, H., & Socquet, A. (2024). Heterogeneous Locking and Earthquake Potential on the South Peru Megathrust From Dense GNSS Network. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 129(2). <https://doi.org/10.1029/2023JB027114>
- Mangira, O., Kourouklas, C., Chorozoglou, D., Iliopoulos, A., & Papadimitriou, E. (2019). Modeling the earthquake occurrence with time-dependent processes: a brief review. *Acta Geophysica*, 67(3), 739–752. <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00284-4>
- Mo, T., & Attanayake, J. (2023). Modulation of Seismic Radiation by Fault-Scale Geology of the 2016 Mw 6.0 Shallow Petermann Ranges Earthquake (PRE) in Central Australia. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 113(2), 604–612. <https://doi.org/10.1785/0120220137>
- Montiel-López, D., Molina, S., Galiana-Merino, J. J., Gómez, I., Kharazian, A., Soler-Llorens, J. L., Huesca-Tortosa, J. A., Guardiola-Villora, A., & Ortuño-Sáez, G. (2025). Computing the time-dependent activity rate using non-declustered and declustered catalogues – a first step towards time-dependent seismic hazard calculations for operational earthquake forecasting. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 25(2), 515–539. <https://doi.org/10.5194/nhess-25-515-2025>
- 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>
- Poggi, V., Parolai, S., Silacheva, N., Ischuk, A., Abdrakhmatov, K., Kobuliev, Z., Ismailov, V., Ibragimov, R., Karaev, J., Ceresa, P., Santulin, M., & Bazzurro, P. (2025). Development of a regional probabilistic seismic hazard model for Central Asia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 25(2), 817–842. <https://doi.org/10.5194/nhess-25-817-2025>
- Ponce-Regalado, D. S., & Villavicencio-Cedeño, E. G. (2024). Evaluación probabilística de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones del campus los ángeles de la Universidad Estatal del sur de Manabí. *MQRInvestigar*, 8(3), 1707–1734. <https://doi.org/10.56048/mqr20225.8.3.2024.1707-1734>
- Pratama, R., Porcu, E., & Zhou, B. (2025). 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>
- Rezaeian, S., Powers, P. M., Altekruze, J., Ahdi, S. K., Petersen, M. D., Shumway, A. M., Frankel, A. D., Wirth, E. A., Smith, J. A., Moschetti, M. P., Withers, K. B., &

- Herrick, J. A. (2024). The 2023 US National Seismic Hazard Model: Subduction ground-motion models. *Earthquake Spectra*, 40(3), 1739–1786. <https://doi.org/10.1177/87552930241243069>
- 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*.
- Schmitz, M., Yepes, H., Hernández, J. J., Yegres, L., Singer, A., Rodríguez, L. M., Marcial, D., Sánchez-Rojas, J., García, K., Rocabado, V., Palacios, P. B., Marrero, J. M., Osorio, I., Parra, J., Jiménez, E., Cárdenas, D., & Realpe, G. (2025). Principal results of the Portoviejo (Ecuador) seismic microzonation project and importance for seismic hazard mitigation. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07669-3>
- Sharafi, S. Q., & Saito, T. (2024). Seismic Damage Probability Assessment of Existing Reinforced Concrete School Buildings in Afghanistan. *Buildings*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/buildings14041054>
- Uzun Yüksel, K., & Kutay Karaçor, E. L. (2025). A model proposal for disaster resilient neighborhoods: Düzce City case. *City, Territory and Architecture*, 12(1), 30. <https://doi.org/10.1186/s40410-025-00280-w>
- Xu, M.-Y., Lu, D.-G., & Zhou, W. (2024). Time-Dependent Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Seismic Sequences Based on Hybrid Renewal Process Models. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 114(1), 449–473. <https://doi.org/10.1785/0120230074>

CONFLICTO DE INTERESES

“Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses”.