

UACM

Universidad Autónoma
de la Ciudad de México

NADA HUMANO ME ES AJENO

COLEGIO DE CIENCIAS Y HUMANIDADES

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA COMPLEJIDAD

Estudio de la sismicidad mexicana mediante el método de análisis gráfico de visibilidad y otras técnicas no lineales

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA COMPLEJIDAD

PRESENTA

Alejandro de la Cruz Castillo

Directora de la Tesis

Dra. Jennifer Pérez Oregón

Codirección

Dr. Fernando Ramírez Alatríste

Ciudad de México, enero 2026.

SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

DERECHOS RESERVADOS[©]

La presente obra y cada uno de sus elementos está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor; por la Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, así como lo dispuesto por el Estatuto General Orgánico de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México; del mismo modo por lo establecido en el Acuerdo por el cual se aprueba la Norma mediante la que se Modifican, Adicionan y Derogan Diversas Disposiciones del Estatuto Orgánico de la Universidad de la Ciudad de México, aprobado por el Consejo de Gobierno el 29 de enero de 2002, con el objeto de definir las atribuciones de las diferentes unidades que forman la estructura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México como organismo público autónomo y lo establecido en el Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Por lo que el uso de su contenido, así como cada una de las partes que lo integran y que están bajo la tutela de la Ley Federal de Derecho de Autor, obliga a quien haga uso de la presente obra a considerar que solo lo realizará si es para fines educativos, académicos, de investigación o informativos y se compromete a citar esta fuente, así como a su autor ó autores. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial y cualquier uso diferente a los ya mencionados, los cuales serán reclamados por el titular de los derechos y sancionados conforme a la legislación aplicable.

Dedicatoria y agradecimientos

A la **Universidad Autónoma de la Ciudad de México (U.A.C.M.)**.

Al **Conacyt**, por su apoyo durante un año de beca durante los cursos de Maestría en Ciencias de la Complejidad.

A la memoria de mis abuelos: Galdina López Carrasco†, Juana de la Cruz Martínez†, Román Castillo López†: simientes de esta historia.

A la memoria de mi madre: Ángela Castillo López† y de mi más querido hermano Pedro de la Cruz Castillo†.

Con inmenso amor y profundo agradecimiento por impulsar siempre mi desarrollo personal y profesional (tutoras): Margarita López López Castillo† e Isabel Castillo López.

Con entrañable y absoluto respeto, a la memoria de la madre de mis hijos: Margarita García Vergara†.

A hermanos, familiares y amigos: que esta obra les sea constancia.

A mis profesores:

Mtra. Maruxa Armijo Canto: por compartir invaluable secretos de la historia y cultura de la humanidad.

Dra. Jennifer Pérez Oregón: por su guía, paciencia y dirección de esta Tesis.

Mtro. José Luis Gutiérrez Sánchez (Sinodal): por compartir su amplio acervo científico, humano y cultural.

Dr. Fernando Ramírez Alatraste (Codirector): por empoderarme con los sistemas complejos y siempre estar dispuesto a escucharme.

Dr. Carlos Islas Moreno (Sinodal): por sus críticas y consejos de gran valor.

Dr. Daniel Roberto Jardón Arcos (Lector): por sus puntuales observaciones.

Mi especial reconocimiento y gratitud al **Dr. Fernando Angulo Brown**, por todas sus deferencias y aportaciones.

A instituciones y colegas dedicados al estudio de los terremotos.

Con inmenso amor, a mis hijos:
Amaranta y Alejandro de la Cruz García

Resumen

Esta tesis caracteriza la sismicidad de la Zona de Subducción Mexicana (ZSM) entre 2000 y 2023 mediante un enfoque integrado de técnicas no lineales. Se analizan cinco regiones tectónicamente distintas utilizando la ley de Gutenberg-Richter (G-R), el algoritmo de visibilidad gráfica (VGA), análisis de fluctuación sin tendencia (DFA), caracterización multifractal (MF-DFA) y el algoritmo de Schreider para detectar quietud sísmica. Los resultados revelan diferencias regionales significativas en los parámetros sísmicos, una fuerte correlación entre los valores de a y b de la ley G-R ($a \approx 4*b$), consistente con criticalidad auto-organizada, y una relación universal entre la pendiente b y la pendiente K-M del VGA. Se identifica a la Brecha de Guerrero como la zona de mayor peligro sísmico debido a su quietud prolongada y alta concentración de estrés. Se concluye que la ZSM es un sistema complejo, multifractal, con memoria de largo alcance, y se propone un Índice Ponderado de Peligro Sísmico (*IPPS*) para la evaluación regional de riesgo.

Abstract

This thesis characterizes the seismicity of the Mexican Subduction Zone (MSZ) from 2000 to 2023 using an integrated approach of nonlinear techniques. Five tectonically distinct regions are analyzed using the Gutenberg-Richter law (G-R), the Visibility Graph Algorithm (VGA), Detrended Fluctuation Analysis (DFA), multifractal characterization (MF-DFA), and the Schreider algorithm for detecting seismic quiescence. Results reveal significant regional differences in seismic parameters, a strong correlation between the a and b values of the G-R law ($a \approx 4*b$), consistent with self-organized criticality, and a universal relationship between the b -value and the K-M slope from VGA. The Guerrero Gap is identified as the highest seismic hazard zone due to prolonged quiescence and high stress concentration. It is concluded that the MSZ is a complex, multifractal system with long-range memory, and a Weighted Seismic Hazard Index (*IPPS*) is proposed for regional risk assessment.

Glosario

- **Bosque sísmico:** Representación de un bosque natural mediante el mapeo regional de las magnitudes de los terremotos; donde, desde la vista superior, se aprecian áreas de concentración y claros de diversos tamaños y densidades.
- **Brecha de Guerrero:** Segmento de la ZSM sin ruptura sísmica mayor desde 1911, considerado de alto riesgo.
- **DFA (Detrended Fluctuation Analysis):** Técnica para cuantificar correlaciones de largo alcance en series temporales no estacionarias.
- **IPPS (Índice Ponderado de Peligro Sísmico):** Indicador propuesto que integra múltiples parámetros para evaluar el peligro sísmico relativo.
- **MF-DFA (Multifractal Detrended Fluctuation Analysis):** Extensión del DFA para caracterizar la multifractalidad de una serie temporal.
- **Quietud Sísmica:** Período anómalo de baja actividad sísmica en una zona previamente activa.
- **SOC (Self-Organized Criticality):** Propiedad de sistemas que evolucionan espontáneamente hacia un estado crítico sin parámetros externos.
- **Valor de la pendiente b :** Parámetro de la ley de Gutenberg-Richter que describe la proporción entre eventos sísmicos grandes y pequeños.
- **VGA (Visibility Graph Algorithm):** Algoritmo que transforma una serie temporal en una red compleja basada en criterios de visibilidad entre puntos.

Índice de Tablas

	Página
<u>Tabla 1.1:</u> Parámetros tectónicos por región de la ZSM	8
<u>Tabla 1.2:</u> Grandes terremotos ($M_w > 8.0$) en la ZSM, 1900-2023	10
<u>Tabla 2.1:</u> Información, escala y sensibilidad proporcionada por técnica de análisis	23
<u>Tabla 3.1:</u> Regiones de análisis	25
<u>Tabla 3.2:</u> Distribución regional de terremotos en catálogo, sin y con filtrado	27
<u>Tabla 4.1:</u> Estadística descriptiva de series de magnitud por región	39
<u>Tabla 4.2:</u> Indicadores de productividad sísmica regional	40
<u>Tabla 4.3:</u> Parámetros de la Ley de Gutenberg-Richter por región	43
<u>Tabla 4.4:</u> Relaciones lineales y bondad de ajuste entre los parámetros a y b	46
<u>Tabla 4.5:</u> Magnitudes máximas (M_s), equivalentes (M_w) e históricas por región	49
<u>Tabla 4.6:</u> Parámetros estructurales de redes VGA por región	51
<u>Tabla 4.7:</u> Caracterización de parámetros en Ley de Potencia	52
<u>Tabla 4.8:</u> Relación entre las pendientes b y m ($K-M$ Slope)	55
<u>Tabla 4.9:</u> Estrés, quietud sísmica y peligro relativo por región	60
<u>Tabla 4.10:</u> Parámetros α (DFA), H (Hurst) y Dimensión Fractal (D) por región	61
<u>Tabla 4.11:</u> Parámetros multifractales por región	66
<u>Tabla 4.12:</u> Características del espectro multifractal	67
<u>Tabla 4.13:</u> Placas, dorsales y geometría de la multifractalidad por región ..	68
<u>Tabla 4.14:</u> Matriz de parámetros integrados por región	69
<u>Tabla 4.15:</u> Coordenadas, correlaciones y distancias euclidianas entre regiones	71
<u>Tabla 4.16:</u> Parámetros, valor y ranking del Índice Ponderado de Peligro Sísmico	74

Índice de Figuras

	Página
<u>Figura 1.1:</u> Terremotos $M_s \geq 3.8$ en catálogo por región de estudio, 2000-2023	8
<u>Figura 2.1:</u> Gráfica de visibilidad de una serie de tiempo de magnitudes de cuarenta terremotos (nodos)	17
<u>Figura 3.1:</u> Sismicidad en las regiones bajo estudio ($M_s \geq 3.8$, 2000-2023).	28
<u>Figura 4.1:</u> Producción anual de terremotos ≥ 3.8 M_s por región (2000-2023)	41
<u>Figura 4.2:</u> Gráficas de Gutenberg-Richter de las regiones en estudio	43
<u>Figura 4.3:</u> Relación entre los parámetros a y b de la ley G-R	45
<u>Figura 4.4:</u> Evolución temporal del valor de la pendiente b	48
<u>Figura 4.5:</u> Redes complejas por región de estudio derivadas del VGA	50
<u>Figura 4.6:</u> Distribuciones de grado $P(k)$ en escala log-log	52
<u>Figura 4.7:</u> Correlación entre el valor de la pendiente b y la pendiente $K-M$	55
<u>Figura 4.8:</u> Focos de acumulación de estrés identificados mediante centroides VGA	57
<u>Figura 4.9:</u> Relación $\log F(s)$ vs $\log (s)$ por región (DFA)	60
<u>Figura 4.10:</u> Correlación entre el valor de la pendiente b y el exponente α (DFA)	64
<u>Figura 4.11:</u> Exponente generalizado de Hurst $h(q)$ vs momento q	65
<u>Figura 4.12:</u> Espectros multifractales $f(\alpha)$ vs α	67
<u>Figura 4.13:</u> Análisis de Componentes Principales (PCA) de parámetros sísmicos	70

ÍNDICE GENERAL

	Página
Dedicatoria y agradecimientos	i
Resumen	iii
Glosario	iv
Índice de Tablas	v
Índice de Figuras	vi
INTRODUCCIÓN	
1. Contexto y motivación	2
2. Estado del arte	2
3. Justificación	3
4. Objetivos	4
5. Hipótesis de trabajo	5
6. Estructura de la tesis	5
CAPÍTULO 1. CONTEXTO GEOSÍSMICO DE LA ZONA DE SUBDUCCIÓN MEXICANA	
1.1. Marco tectónico global	7
1.2. La zona de subducción mexicana: Características generales	7
1.3. Heterogeneidad tectónica regional	8
1.4. Sismicidad histórica e instrumental	9
1.5. Magnitud sísmica y escalas de medición	10
1.6. Completitud y calidad del catálogo	11
1.7. Síntesis: desafíos y oportunidades	11
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y HERRAMIENTAS ANALÍTICAS	
2.1. Introducción: La sismicidad como sistema complejo	14
2.2. Ley de Gutenberg-Richter: Estadística fundamental de la sismicidad ...	14
2.3. Teoría de redes complejas aplicada a la sismicidad	16
2.4. Análisis de correlaciones temporales	18
2.5. Caracterización multifractal	20
2.6. Detección de quietud sísmica: Algoritmo de Schreider	21
2.7. Integración metodológica	22
2.8. Síntesis	23

	Página
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	
<u>3.1.</u> Diseño general del estudio	25
<u>3.2.</u> Área de estudio y segmentación regional	25
<u>3.3.</u> Fuentes de datos	26
<u>3.4.</u> Procesamiento y homogenización del catálogo	27
<u>3.5.</u> Implementación computacional	29
<u>3.6.</u> Procedimientos de análisis por técnica	30
<u>3.7.</u> Análisis comparativo entre regiones	35
<u>3.8.</u> Control de calidad y limitaciones	35
<u>3.9.</u> Resumen metodológico	36
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
<u>4.1.</u> Introducción y organización	39
<u>4.2.</u> Caracterización estadística básica	39
<u>4.3.</u> Ley de Gutenberg-Richter	43
<u>4.4.</u> Análisis de redes complejas (VGA)	49
<u>4.5.</u> Correlación pendiente b y K-M Slope	54
<u>4.6.</u> Concentración de Estrés y Quietud Sísmica	57
<u>4.7.</u> Análisis de correlaciones temporales	60
<u>4.8.</u> Caracterización multifractal (MF-DFA)	65
<u>4.9.</u> Síntesis comparativa regional	69
<u>4.10</u> Implicaciones para evaluación de peligro sísmico	73
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS	
<u>5.1.</u> Conclusiones principales	78
<u>5.2.</u> Implicaciones prácticas	80
<u>5.3.</u> Limitaciones y precauciones	81
<u>5.4.</u> Trabajo futuro	81
<u>5.5.</u> Reflexión final	83
<u>5.6.</u> Palabras finales	85
BIBLIOGRAFÍA	86
<u>ANEXO 1</u> Pantalla principal de la aplicación <i>ESMme</i>	89
<u>ANEXO 2</u> Possible verification of the linear correlation between the a and b Gutenberg-Richter parameters in the GR-law by using seismic data of some regions of the Mexican Pacific coast	90

INTRODUCCIÓN

Presenta el contexto y la motivación sobre el estudio del fenómeno sísmico en México, su justificación así como la estructura capitular orientada al logro del objetivo general y los específicos deseados.

1. Contexto y motivación

México se encuentra en una de las regiones sísmicamente más activas del planeta. La zona de subducción mexicana (ZSM), donde las placas de Rivera y Cocos se deslizan bajo la placa Norteamericana, ha generado algunos de los terremotos más devastadores en la historia del país. Durante el siglo XX y lo que va del XXI, esta zona ha producido al menos cuatro terremotos con magnitudes mayores o iguales a 8.0 *Mw*: Jalisco 1932 (8.2 *Mw*), Michoacán 1985 (8.1 *Mw*), Colima 1995 (8.0 *Mw*), y más recientemente, Chiapas 2017 (8.2 *Mw*).

A pesar de décadas de investigación, las preguntas fundamentales sobre el fenómeno sísmico permanecen sin respuesta precisa: ¿cuándo, dónde y con qué magnitud ocurrirá el próximo gran terremoto? La naturaleza compleja, no lineal y con presencia de caos de la sismicidad ha desafiado los enfoques tradicionales de predicción. Sin embargo, el desarrollo de nuevas herramientas analíticas provenientes de la teoría de sistemas complejos, la física estadística y el análisis de redes ofrece perspectivas prometedoras para caracterizar mejor la dinámica sísmica.

La ZSM presenta características que la convierten en un laboratorio natural excepcional para el estudio de procesos de subducción: geometría variable, tasas de convergencia no uniformes (4.0-7.5 cm/año), placas de diferentes edades (10-30 Ma), y una configuración tectónica heterogénea que incluye subducción de placa plana en Guerrero y profunda en Chiapas. Esta heterogeneidad se manifiesta en diferencias regionales en la productividad sísmica, tamaños de eventos característicos, y patrones temporales de liberación de energía.

2. Estado del arte

La caracterización de la sismicidad ha evolucionado significativamente desde la formulación empírica de la ley de Gutenberg-Richter (1954). Estudios recientes han incorporado técnicas de la física de sistemas complejos para analizar propiedades fractales (Turcotte, 1997), correlaciones temporales de largo alcance (Livina et al., 2005), y estructuras de red emergentes de secuencias sísmicas (Baiesi & Paczuski, 2004; Abe & Suzuki, 2006).

El algoritmo de visibilidad gráfica (VGA), propuesto por Lacasa et al. (2008), ha demostrado ser particularmente efectivo para mapear series temporales en redes complejas, revelando propiedades topológicas que reflejan la dinámica subyacente del sistema. Aplicaciones recientes en sismología (Telesca, 2010; Pastén et al., 2016; Azizzadeh-Roodpish & Cramer, 2018) han mostrado correlaciones entre parámetros de red y características sismotectónicas regionales.

Para la ZSM específicamente, trabajos previos han caracterizado variaciones regionales del valor de la pendiente b de la ley Gutenberg-Richter (Singh et al., 1983; Bayrak et al., 2002), identificado brechas sísmicas (Nishenko & Singh, 1987), y explorado la relación entre edad de placa y características de ruptura (Pérez-Oregón et al., 2020). Sin embargo, no existe un estudio integrado que combine múltiples técnicas de análisis no lineal para caracterizar sistemáticamente las cinco regiones principales de la ZSM.

3. Justificación

Las experiencias de terremotos devastadores en México (1985, 2017) han evidenciado la necesidad de profundizar en la comprensión del comportamiento sísmico regional. Mientras que estudios previos se han enfocado en regiones específicas o técnicas particulares, este trabajo propone un análisis integral que combine:

1. **Análisis estadístico clásico:** Verificación de la ley de Gutenberg-Richter (ley G-R) y exploración de relaciones entre sus parámetros.
2. **Teoría de redes complejas:** Caracterización topológica mediante el algoritmo de visibilidad gráfica.
3. **Análisis de correlaciones:** Cuantificación de memoria de largo alcance mediante el método Detrended Fluctuation Analysis (DFA).
4. **Caracterización multifractal:** Descripción de la heterogeneidad mediante Multifractal Detrended Fluctuation Analysis (MF-DFA).
5. **Identificación de precursores:** Detección de zonas de quietud sísmica con base en el algoritmo de Schreider.

La integración de estas técnicas permitirá no solo caracterizar las diferencias regionales en la ZSM, sino también evaluar la consistencia entre diferentes metodologías y su potencial complementariedad para la evaluación de peligro sísmico.

4. Objetivos

Objetivo general

Caracterizar el comportamiento sísmico de la zona de subducción mexicana mediante el análisis integrado del gráfico de visibilidad y técnicas no lineales complementarias, para identificar patrones espacio-temporales y diferencias regionales en la dinámica sísmica del periodo 2000-2023.

Objetivos específicos

1. Calcular e interpretar los parámetros de la ley de Gutenberg-Richter para cada región, explorando posibles relaciones entre la ordenada al origen a y la pendiente b .
2. Mapear las series temporales de magnitudes en redes complejas mediante el algoritmo de visibilidad gráfica, caracterizando sus propiedades topológicas fundamentales.
3. Verificar la correlación entre el valor de la pendiente b de la ley G-R y la pendiente $K-M$ del gráfico de visibilidad, validando su posible universalidad.
4. Comprobar que las distribuciones de grado de conectividad se ajustan a leyes de potencia, evidenciando el carácter fractal de la sismicidad.
5. Identificar coordenadas geográficas de quietud sísmica mediante el algoritmo de Schreider, mapeando potenciales zonas de acumulación de estrés.
6. Cuantificar correlaciones de largo alcance mediante el análisis de fluctuación sin tendencia (DFA), determinando el exponente de Hurst por región.
7. Calcular dimensiones fractales y caracterizar la estructura multifractal del fenómeno, cuantificando la heterogeneidad regional.
8. Comparar sistemáticamente los resultados entre las cinco regiones de estudio, identificando patrones comunes y diferencias significativas.

5. Hipótesis de trabajo

Las hipótesis que guían esta investigación son:

H1: Las cinco regiones de la ZSM presentan diferencias significativas en sus parámetros de la ley G-R, reflejando distintos regímenes de acumulación y liberación de energía relacionados con la edad de la placa subductante.

H2: Existe una relación aproximadamente lineal entre los parámetros a y b de la ley G-R, con $a \approx 4b$, consistente con modelos de criticalidad auto-organizada.

H3: La pendiente $K-M$ del gráfico de visibilidad correlaciona fuertemente con el valor de la pendiente b de la ley Gutenberg-Richter, proporcionando una medida complementaria del nivel de estrés regional.

H4: Las series temporales de magnitudes exhiben memoria de largo alcance ($\alpha > 0.5$ en DFA), indicando que el proceso sísmico no es aleatorio sino que presenta correlaciones temporales complejas.

H5: La ZSM presenta estructura multifractal, requiriendo múltiples exponentes de escala para su caracterización debido a su heterogeneidad tectónica.

6. Estructura de la tesis

Esta tesis se organiza en cinco capítulos:

- **Capítulo 1:** Presenta el contexto geosísmico de la ZSM, describiendo sus características tectónicas y las diferencias regionales fundamentales.
- **Capítulo 2:** Desarrolla el marco teórico, explicando los fundamentos de cada técnica analítica empleada y su relevancia para el estudio de la sismicidad.
- **Capítulo 3:** Describe la metodología, incluyendo las fuentes de datos, procedimientos de procesamiento, y la implementación computacional desarrollada (*ESMme*, acrónimo abreviado de: *Estudio de la Sismicidad Mexicana mediante el Método de Análisis Gráfico de Visibilidad y otras Técnicas No Lineales* – pantalla principal en Anexo 1).
- **Capítulo 4:** Presenta los resultados obtenidos, organizados por técnica analítica, con discusión integrada de las implicaciones para cada región.
- **Capítulo 5:** Sintetiza las conclusiones principales, limitaciones del estudio, y propone direcciones para investigación futura.

CAPÍTULO 1

CONTEXTO GEOSÍSMICO DE LA ZONA DE SUBDUCCIÓN MEXICANA

Describe el contexto geosísmico de la Zona de Subducción Mexicana, su heterogeneidad y sismicidad histórica regional; así como las escalas de medición, su completitud y la calidad de los catálogos utilizados.

1.1 Marco tectónico global

La tectónica de placas proporciona el marco conceptual fundamental para comprender la sismicidad. La litósfera terrestre está fragmentada en aproximadamente 15 placas principales que se desplazan sobre la astenosfera a velocidades de centímetros por año, impulsadas por corrientes de convección en el manto. Las interacciones en los bordes de placa generan la mayoría de los terremotos: convergencia en zonas de subducción, divergencia en dorsales oceánicas, y deslizamiento lateral en fallas transformantes.

Las zonas de subducción, donde placas oceánicas densas se hunden bajo placas continentales u oceánicas menos densas, concentran aproximadamente el 90% de la energía sísmica global y han generado todos los megaterremotos ($M_w \geq 8.0$) instrumentalmente registrados. México se encuentra en el Cinturón Circumpacífico, la región de subducción más activa del planeta, responsable del 81% de la energía sísmica mundial (USGS, 2021).

1.2 La zona de subducción mexicana: Características generales

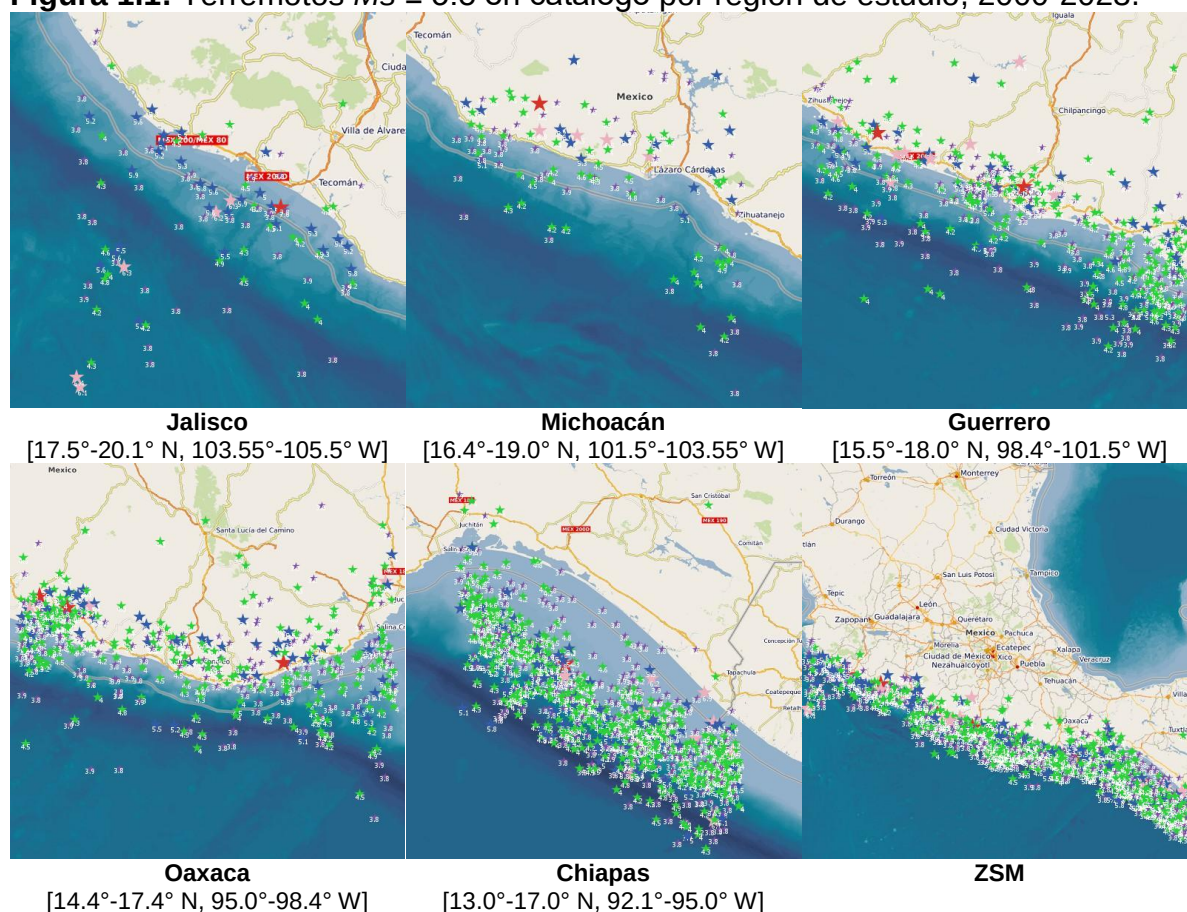
La ZSM de estudio se extiende aproximadamente 1,200 km a lo largo del Pacífico mexicano, desde Jalisco hasta Chiapas, formando parte de la Fosa Mesoamericana, donde dos placas oceánicas subducen bajo la placa Norteamericana:

Placa de Rivera (sección norte): Fragmento pequeño (~ 10 Ma y $\sim 730,000$ km²) que subduce en Jalisco-Colima con velocidad de ~ 4.0 cm/año. Su juventud geológica, mayor flotabilidad y fragmentos de corteza ("gouges") de mayor tamaño, factores asociados con la generación de grandes terremotos (Pérez-Oregón et al., 2020).

Placa de Cocos (centro-sureste): De ~ 3 millones de km² de corteza oceánica, subduce desde Michoacán hasta Centro América con velocidades variables (5.2-7.5 cm/año). Su edad aumenta de noroeste (15 Ma en Michoacán) a sureste (30 Ma en Chiapas), correlacionándose con cambios en la geometría de subducción y características sísmicas.

La Figura 1.1 mapea los eventos por región ocurridos durante el periodo de estudio; y su distribución en el plano, desde una vista superior se puede equiparar a un bosque natural, razón por la cual a este mapeo lo denominamos "**bosque sísmico**".

Figura 1.1: Terremotos $M_s \geq 3.8$ en catálogo por región de estudio, 2000-2023.



Fuente: Datos de USGS. Mapeo de elaboración propia mediante aplicación ESMme.

La Tabla 1.1 sintetiza las características tectónicas por región:

Tabla 1.1: Parámetros tectónicos por región de la ZSM.

Región	Placa Subductante	Velocidad (cm/año)	Edad (Ma)	Ángulo Buzamiento	Profundidad Típica Sismos	Mw máx histórica
Jalisco	Rivera	4	10	~45°	< 40 km	8.2 (1932)
Michoacán	Cocos	5.2	15	Variable	< 50 km	8.1 (1985)
Guerrero	Cocos	5.6	20	~10° (plana)	< 40 km	7.9 (1911)
Oaxaca	Cocos	6.1	25	~30°	< 60 km	7.9 (1965, 1999)
Chiapas	Cocos	7.5	30	~50°	< 100 km	8.2 (2017)

Fuente: Modificado de Pérez-Oregón et al. (2020) y USGS Slab2 Model.

1.3 Heterogeneidad tectónica regional

La ZSM es marcadamente heterogénea, con tres características principales que la distinguen de zonas de subducción “típicas”:

1.3.1 Subducción de placa plana (Guerrero)

En Guerrero, la placa de Cocos subduce con un ángulo muy bajo ($\sim 10^\circ$) durante aproximadamente 260 km tierra adentro, antes de caer abruptamente a ~ 500 km de profundidad (Pérez-Campos et al., 2008). Esta geometría:

- Genera terremotos a distancias inusuales de la trinchera.
- Afecta la Ciudad de México, 300 km tierra adentro.
- Está asociada con la ausencia de vulcanismo activo sobre la placa plana.
- Define la "Brecha de Guerrero", segmento sin ruptura mayor desde 1911.

1.3.2 Dorsales oceánicas subductantes

Las dorsales oceánicas (Orozco, O'Gorman y Tehuantepec) subducen en diferentes puntos de la ZSM, fragmentando la placa de Cocos y creando heterogeneidades adicionales. Estas estructuras:

- Dividen regionalmente el comportamiento sísmico.
- Pueden actuar como barreras para la propagación de rupturas.
- Modifican localmente la geometría de subducción.

1.3.3 Ausencia de zona Wadati-Benioff típica

A diferencia de otras zonas de subducción donde los sismos intermedios y profundos (> 300 km) definen claramente el plano de subducción, en México:

- La mayoría de sismos son someros (< 60 km).
- Los eventos profundos son escasos y dispersos.
- La geometría del plano subductante es compleja y variable.

1.4 Sismicidad histórica e instrumental

El catálogo sísmico histórico de México (SSN) documenta eventos destructivos desde el periodo colonial. La Tabla 1.2 lista los terremotos con $M_w > 8.0$ desde 1900:

Tabla 1.2: Grandes terremotos ($M_w > 8.0$) en la ZSM, 1900-2023.

Fecha	Región	M_w	Profundidad (km)	Longitud Ruptura (km)	Víctimas mortales	Comentarios
3/6/1932	Jalisco	8.2	40	~220	400+	Serie de 3 eventos
19/09/1985	Michoacán	8.1	20	~170	10,000+	Devastó la Ciudad de México
7/9/2017	Chiapas	8.2	58	~120	98	Ruptura intraplaca inusual

Fuente: Servicio Sismológico Nacional y referencias citadas.

El terremoto de 1985 marcó un punto de inflexión en la conciencia sísmica nacional y motivó mejoras sustanciales en códigos de construcción, instrumentación, y sistemas de alerta temprana. El Sistema de Alerta Sísmica Mexicano (SASMEX) opera desde 1991, proporcionando hasta 60 segundos de alerta en Ciudad de México.

1.5 Magnitud sísmica y escalas de medición

La cuantificación del "tamaño" de un terremoto ha evolucionado desde escalas de intensidad cualitativas (Mercalli) hasta medidas instrumentales de magnitud. Las escalas principales usadas son:

- **Magnitud Local (M_L):** Richter (1935), para sismos locales.
- **Magnitud de Ondas de Cuerpo (m_b):** Basada en ondas P.
- **Magnitud de Ondas Superficiales (M_s):** Basada en ondas Rayleigh.
- **Magnitud de Momento (M_w):** Hanks & Kanamori (1979), relacionada directamente con la energía liberada.

La magnitud de momento es preferida por no saturar para eventos grandes, siendo directamente proporcional al momento sísmico M_0 :

$$M_w = \frac{2}{3} \log_{10}(M_0) - 10.7 \quad (1.1)$$

donde $M_0 = \mu A \delta$ (μ : módulo de rigidez, A : área de ruptura, δ : desplazamiento promedio).

Para homogenizar catálogos sísmicos que usan diferentes escalas, se emplean relaciones empíricas. En este estudio, convertimos todas las magnitudes a M_s mediante las relaciones de Rudolf-Navarro (1995):

$$\begin{aligned}M_s &= 1.581mb - 3.116 \\M_s &= 1.293md - 1.793\end{aligned}\tag{1.2}$$

Para magnitudes M_w , asumimos $M_w \approx M_s$, dado que ambas escalan similarmente para sismos moderados a grandes.

1.6 Completitud y calidad del catálogo

La confiabilidad de análisis estadísticos depende críticamente de la completitud del catálogo. La magnitud mínima de completitud (M_c) es el umbral por encima del cual se detectan todos los eventos en una región y periodo específicos (Wiemer & Wyss, 2000).

Para la ZSM durante 2000-2023:

- $M_c \sim 3.5-3.8$ (estimación conservadora basada en densidad de estaciones).
- La red sísmica nacional ha mejorado sustancialmente desde 1985.
- El catálogo USGS complementa la cobertura del SSN.

Adoptamos $M_{min} = 3.8$ como umbral conservador que garantiza completitud en todas las regiones.

1.7 Síntesis: desafíos y oportunidades

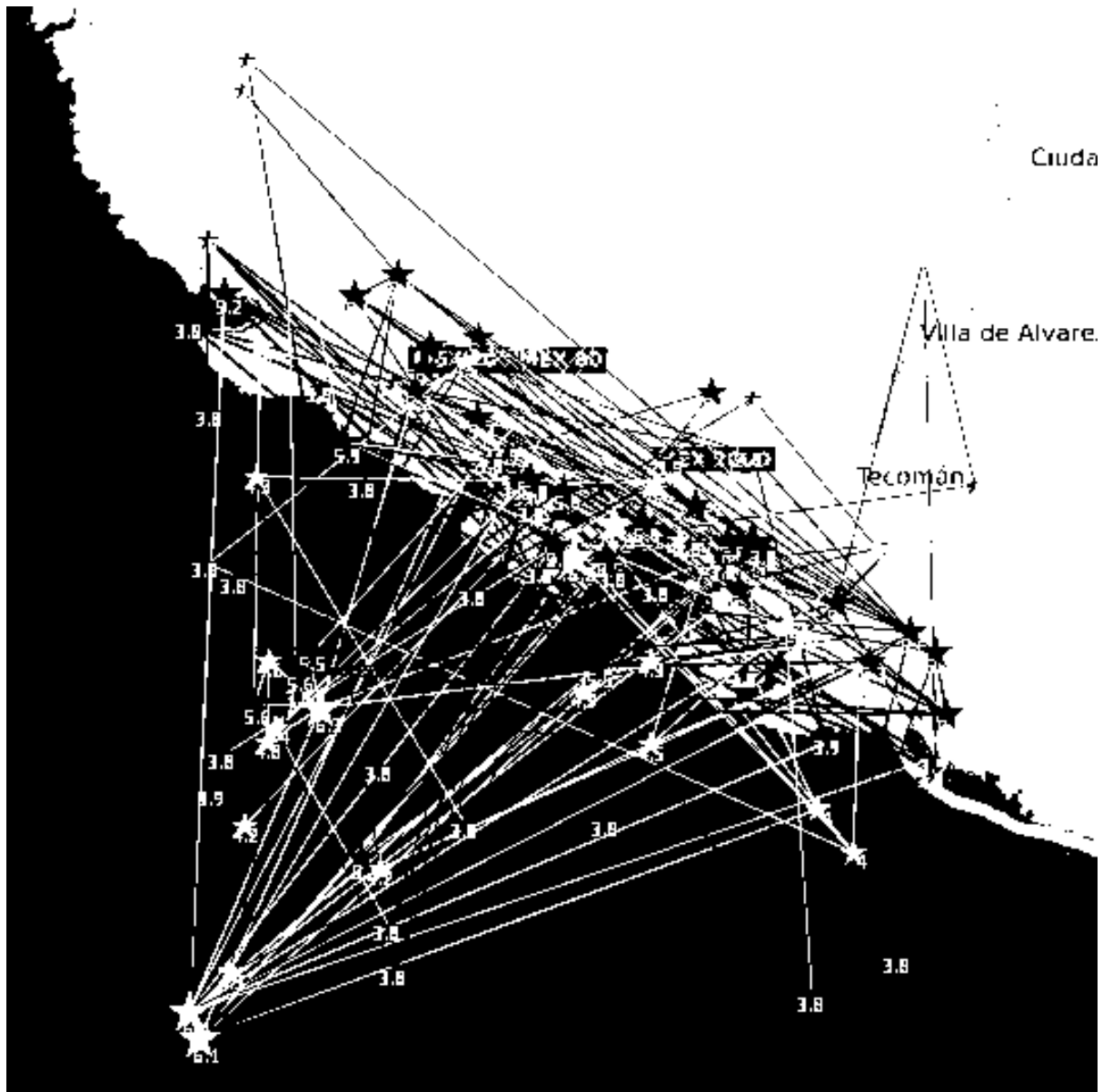
La ZSM presenta desafíos únicos para la caracterización sísmica:

- Heterogeneidad tectónica multi-escala.
- Variabilidad en mecanismos de ruptura (interplaca, intraplaca, cortical).
- Catálogos con diferentes escalas de magnitud.
- Comportamiento no estacionario.

Sin embargo, estas características también ofrecen oportunidades para:

- Comparar regiones con diferentes edades de placa en un mismo sistema.
- Evaluar cómo la heterogeneidad afecta propiedades estadísticas.

- Validar técnicas de análisis en un laboratorio natural excepcional.



Mapeo de terremotos y enlaces del gráfico de visibilidad en la región de Jalisco.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO Y HERRAMIENTAS ANALÍTICAS

Plantea el marco teórico e instrumental analítico utilizado, tales como la ley de Gutenberg-Richter, las redes complejas, el análisis de correlaciones temporales y la caracterización multifractal; así como la característica de quietud sísmica por región de estudio.

2.1 Introducción: La sismicidad como sistema complejo

Los terremotos exhiben características típicas de sistemas complejos: comportamiento emergente, interacciones no lineales entre componentes, correlaciones de largo alcance, y auto-organización hacia estados críticos. Esta perspectiva, que contrasta con enfoques deterministas clásicos, ha motivado la aplicación de herramientas de la física estadística, teoría de redes y análisis de series temporales no lineales.

Este capítulo presenta los fundamentos teóricos de las técnicas empleadas, organizadas en cinco categorías:

1. **Caracterización estadística:** Ley de Gutenberg-Richter.
2. **Teoría de redes complejas:** Algoritmo de visibilidad gráfica.
3. **Análisis de correlaciones temporales:** DFA y exponente de Hurst.
4. **Caracterización multifractal:** MF-DFA.
5. **Detección de quietud sísmica:** Algoritmo de Schreider.

2.2 Ley de Gutenberg-Richter: Estadística fundamental de la sismicidad

2.2.1 Formulación y significado

Gutenberg y Richter (1954), basándose en trabajos previos de Ishimoto e Iida (1939), establecieron que el número de terremotos N con magnitud mayor o igual a M sigue una distribución de ley de potencia:

$$\log_{10} N(M) = a - bM \quad (2.1)$$

donde:

- M : Magnitud del terremoto.
- $N(M)$: Número de terremotos de magnitud mayor o igual a M .
- a : logaritmo del número total de eventos; mide la productividad sísmica regional.
- b : pendiente negativa; describe la proporción relativa entre eventos grandes y pequeños.

El parámetro $b \approx 1.0$ es considerado "universal" (Gutenberg & Richter, 1954). Valores de $b < 1$ indican mayor proporción relativa de eventos grandes, asociados con:

- Alto nivel de estrés tectónico.
- Placas jóvenes y rugosas.
- Potencial para grandes terremotos.

Valores de $b > 1$ sugieren:

- Mayor heterogeneidad en la corteza.
- Procesos de fracturación más distribuidos.
- Menor probabilidad de eventos extremos.

2.2.2 Interpretación física del valor de la pendiente b

Estudios teóricos y de laboratorio (Scholz, 1968; Mogi, 1962) relacionan el valor de la pendiente b con:

1. **Nivel de estrés:** $db/d\sigma < 0$ (menor b con mayor estrés).
2. **Heterogeneidad material:** mayor heterogeneidad implica mayor b .
3. **Temperatura:** menor temperatura implica mayor b .
4. **Contenido de fluidos:** mayor contenido implica mayor b .

Para zonas de subducción, Bayrak et al. (2002) documentaron $b \approx 0.6$ en zonas oceánicas profundas, consistente con mayor estrés y menor heterogeneidad.

2.2.3 Relación entre parámetros a y b

Trabajos recientes sugieren que los parámetros a y b no son independientes. Pérez-Oregón et al. (2019) derivaron teóricamente que:

$$a \approx \alpha b \quad (2.2)$$

con $\alpha \approx 4-6$, dependiendo de características tectónicas regionales. Esta relación, si se confirma empíricamente, tiene implicaciones importantes para modelos de criticalidad auto-organizada en sistemas sísmicos.

2.2.4 Limitaciones y desviaciones

La ley G-R puede desviarse de la linealidad por:

- **Incompletitud del catálogo** para magnitudes pequeñas.
- **Efectos de tamaño finito** para magnitudes grandes.
- **Sismos característicos**: fallas con preferencia por magnitudes específicas.
- **Heterogeneidad tectónica**: múltiples poblaciones con diferentes valores de la pendiente b .

2.3 Teoría de redes complejas aplicada a la sismicidad

2.3.1 Fundamentos de redes complejas

Una red compleja $G = (N, E)$ consiste en un conjunto de nodos N conectados por enlaces E según reglas específicas. Las propiedades topológicas de la red reflejan características del sistema subyacente. Entre los parámetros fundamentales se incluyen:

Grado de un nodo (k): Número de conexiones.

Distribución de grado $P(k)$: Probabilidad de que un nodo tenga grado k .

Coeficiente de agrupamiento (C): Tendencia a formar triángulos.

Longitud del camino más corto (L): Distancia típica entre nodos.

Las redes se clasifican como:

- **Regulares**: $P(k)$ concentrada, C alto, L alto.
- **Aleatorias** (Erdős-Rényi, 1960): $P(k)$ Poisson, C bajo, L bajo.
- **Mundo pequeño** (Watts-Strogatz, 1998): C alto, L bajo.
- **Libres de escala** (Barabási-Albert, 2002): $P(k) \sim k^{-\gamma}$, con hubs concentradores.

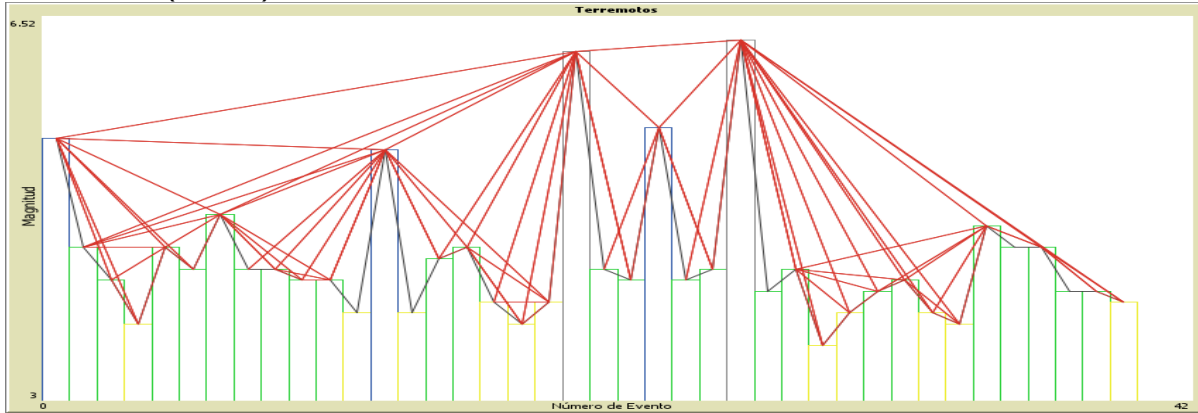
2.3.2 Algoritmo de visibilidad gráfica (VGA)

Lacasa et al. (2008) propusieron mapear series temporales en redes mediante un criterio geométrico: dada una serie $\{x(t_i)\}$, dos observaciones en tiempos $t_i < t_j$ son "visibles" (conectadas) si se cumple que:

$$x(t_k) < x(t_i) + \left(x(t_j) - x(t_i) \right) \left(\frac{t_k - t_i}{t_j - t_i} \right) \quad (2.3)$$

para toda $t_i < t_k < t_j$.

Figura 2.1: Gráfica de visibilidad de una serie de tiempo de magnitudes de cuarenta terremotos (nodos).



Nota: La altura h de cada barra corresponde a la magnitud del evento. Si la altura de una barra es visible desde la altura de otra, se establece una conexión mutua.

Propiedades fundamentales del VGA:

1. **Invariancia afín:** La red es invariante bajo transformaciones lineales de los ejes.
2. **Conectividad garantizada:** Todo nodo conecta con sus vecinos adyacentes.
3. **No direccionalidad:** Las conexiones son simétricas.

Relación con propiedades de series temporales:

Lacasa et al. (2008, 2009) demostraron que:

- Series aleatorias (ruido blanco) mapean en redes aleatorias con $P(k)$ exponencial.
- Series periódicas se traducen en redes regulares.
- Series fractales son redes libres de escala con $P(k) \sim k^{-\gamma}$.

2.3.3 Aplicación a sismicidad

Para series de magnitudes sísmicas:

- **Nodos:** representan a cada terremoto.
- **Enlaces:** son determinados por la visibilidad entre las magnitudes.
- **Hubs:** son aquellos terremotos de gran magnitud con alta conectividad.

Propiedades de la red que capturan características sísmicas:

Distribución de grado: Si $P(k) \sim k^{-\gamma}$ implica fractalidad.

Coeficiente de agrupamiento: Cuantifica enjambres/réplicas.

Centralidad: Identifica eventos "influyentes".

Modularidad: Detecta comunidades de eventos relacionados.

2.3.4 Pendiente $K-M$ y su relación con el valor de la pendiente b

Azizzadeh-Roodpish & Cramer (2018) observaron una correlación entre la conectividad media y la magnitud M : $\langle k \rangle \sim M^m$ donde la pendiente m ($K-M$ slope) en escala log-log se correlaciona con el valor de la pendiente b de la siguiente forma:

$$b \approx 0.07m + c \quad (2.4)$$

Esta relación sugiere que las propiedades topológicas de la red (m), capturan información equivalente a propiedades estadísticas tradicionales (b), validando al VGA como herramienta complementaria.

2.4 Análisis de correlaciones temporales

2.4.1 Correlaciones de largo alcance y exponente de Hurst

Una serie temporal $\{x(t)\}$, exhibe correlaciones de largo alcance si su función de autocorrelación decae como ley de potencia:

$$C(\tau) \sim \tau^{-\gamma} \quad (2.5)$$

en lugar de exponencialmente (series Markovianas). El exponente de Hurst H cuantifica estas correlaciones:

- **$H = 0.5$:** Serie no correlacionada (ruido blanco, movimiento Browniano).
- **$H > 0.5$:** Persistencia (tendencias prolongadas).
- **$H < 0.5$:** Antipersistencia (reversiones frecuentes a la media).

La dimensión fractal D en el plano se relaciona con H mediante:

$$D = 2 - H \quad (2.6)$$

2.4.2 Detrended Fluctuation Analysis (DFA)

El DFA (Peng et al., 1994) cuantifica correlaciones en presencia de tendencias no estacionarias. El algoritmo:

1. Integrar la serie: $y(i) = \sum [x(k) - \hat{x}]$.
2. Dividir en ventanas de tamaño s .
3. Ajustar la tendencia local (polinomio de orden m) en cada ventana.
4. Calcular la fluctuación: $F(s) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum [y(i) - y_{trend(i)}]^2}$.
5. Analizar escalamiento:

$$F(s) \sim s^\alpha \quad (2.7)$$

El exponente de escalamiento α se relaciona con H :

- $\alpha = H$ para series estacionarias
- $\alpha = H + 1$ para series no estacionarias (movimiento Browniano fraccional)

Interpretación para sismicidad:

- $\alpha \approx 0.5$: Proceso Poisson, sin memoria
- $\alpha > 0.5$: Clustering temporal, réplicas extendidas
- $\alpha < 0.5$: Quietud sísmica, regularidad anómala

Valores $\alpha \approx 0.6$ son típicos de procesos críticos auto-organizados (Bak & Tang, 1989).

2.4.3 Método de Rango Reescalado (R/S)

Método clásico de Hurst (1951) para calcular H :

1. Para ventanas de tamaño n , calcular:
 - Rango: $R(n) = \max Y(k) - \min Y(k)$ donde Y = suma acumulada de desviaciones.
 - Desviación estándar: $S(n)$.
2. Analizar escalamiento:

$$(R/S)_n \sim n^H \quad (2.8)$$

Aunque el DFA es más robusto ante tendencias, R/S proporciona una validación independiente.

2.5 Caracterización multifractal

2.5.1 Motivación: Más allá del monofractal

Objetos monofractales se caracterizan por una única dimensión fractal D . Sin embargo, muchos sistemas naturales son **multifractales**: requieren un espectro de dimensiones para describir su heterogeneidad.

Para la sismicidad, la multifractalidad surge de:

- La heterogeneidad tectónica (múltiples tipos de fallas).
- Diferentes mecanismos de ruptura coexistentes.
- Escalamiento no uniforme en rangos de magnitud.

2.5.2 Multifractal DFA (MF-DFA)

Kantelhardt et al. (2002) generalizaron DFA para analizar propiedades multifractales. En lugar de una única fluctuación $F(s)$, se calcula: $F_q(s) = (\frac{1}{N_s} \sum [F^2(s, v)]^{q/2})^{1/q}$ para diferentes momentos q . El escalamiento:

$$F_q(s) \sim s^{h(q)} \quad (2.9)$$

define el **exponente generalizado de Hurst** $h(q)$:

- **Si $h(q)$ es constante**, el sistema presenta una geometría monofractal (bosque uniformemente distribuido).
- **Si $h(q)$ varía con q** , la geometría del sistema se describe mediante diversos exponentes de escala; es decir, posee la propiedad de multifractalidad (bosque heterogéneo con concentraciones y densidades de todos los tamaños).

2.5.3 Espectro multifractal

El espectro multifractal $f(\alpha)$ caracteriza la heterogeneidad:

$$\tau(q) = qh(q) - 1 \quad (2.10)$$

$$\alpha = \frac{d\tau(q)}{dq} \quad (2.11)$$

$$f(\alpha) = q\alpha - \tau(q) \quad (2.12)$$

Donde α es el exponente de Hölder y $f(\alpha)$ indica la dimensión fractal del subconjunto de la serie que es caracterizada por α . Este espectro multifractal informa sobre la importancia de los exponentes presentes en la serie; y el ancho del espectro señala el rango de los exponentes fractales, así que mientras más ancho, más multifractal es la serie.

Interpretación:

- **Ancho del espectro:** Cuantifica el grado de multifractalidad:

$$\Delta\alpha = \alpha_{m\acute{a}x} - \alpha_{m\acute{i}n} \quad (2.13)$$

- $\Delta\alpha \approx 0$: Monofractal (homogéneo).
- $\Delta\alpha > 0.5$: Fuertemente multifractal (heterogéneo).
- **Asimetría del espectro:**
 - *Sesgo a la derecha:* Corresponde a dominio de fluctuaciones pequeñas.
 - *Sesgo a la izquierda:* Dominio de fluctuaciones grandes (eventos extremos).

Para sismicidad:

- *Regiones con $\Delta\alpha$ grande:* Múltiples poblaciones sísmicas, heterogeneidad tectónica.
- *Comparación entre regiones:* Identifica diferencias en complejidad estructural.

2.6 Detección de quietud sísmica: Algoritmo de Schreider

2.6.1 Concepto de quietud sísmica

Las brechas sísmicas o zonas de quietud son segmentos de falla con:

- Historia de grandes terremotos.
- Ausencia prolongada de ruptura mayor (décadas-siglos).
- Alta probabilidad de terremoto futuro.

La identificación de quietud es crucial para evaluación de peligro sísmico. Sus métodos de estudio incluyen análisis visual (Nishenko & Singh, 1987) y algoritmos estadísticos.

2.6.2 Algoritmo de Schreider (claros en el bosque)

Schreider (1990) propuso detectar quietud mediante análisis de tiempos inter-evento.

El algoritmo:

1. **Calcular tiempos entre eventos consecutivos:** $T'(n) = t(n) - t(n - 1)$
2. **Suavizar mediante convolución con función Gaussiana:**

$$T(k) = \sum T'(k - n)f(n, s)$$

Donde:

$$f(n, s) = \left(\frac{1}{s\sqrt{2\pi}}\right)\exp\left[-\frac{1}{2}(n/s)^2\right] \quad (2.14)$$

1. **Calcular promedio y desviación estándar:**

$$\bar{T} = \frac{\sum T(k)}{N}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum [T(k) - \bar{T}]^2}{N-1}}$$

2. **Identificar valores anormales (condición de anormalidad):** Si se cumple:

$$T(k) \geq \bar{T} + 3\sigma \quad (2.15)$$

ello sugiere quietud sísmica en las coordenadas del evento k .

Ventajas:

- Cuantitativo y objetivo.
- Aplicable a cualquier catálogo completo.
- Identifica coordenadas específicas de quietud.

Limitaciones:

- Sensible al parámetro de suavizado s .
- Requiere catálogos largos y completos.
- Detecta quietud pasada, no predice futuro.

2.7 Integración metodológica

Las técnicas descritas proporcionan información complementaria que se describen en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Información, escala y sensibilidad proporcionada por técnica de análisis.

Técnica	Información Principal	Escala Temporal	Sensibilidad
Ley G-R	Productividad, nivel de estrés	Climatología sísmica	Valor de la pendiente b
VGA	Estructura de red, clustering	Correlaciones evento-evento	Conectividad, $P(k)$
DFA	Memoria de largo alcance	Multi-escala (días-años)	Exponente α
MF-DFA	Heterogeneidad, multifractalidad	Multi-escala	Espectro $h(q)$, $f(\alpha)$
Schreider	Quietud sísmica espacial	Inter-eventos	Coordenadas anómalas

Fuente: Resumen de referencias citadas.

Consistencia entre técnicas:

- Valor de la pendiente b bajo $\Leftrightarrow$ conectividad alta $\Leftrightarrow \alpha > 0.5 \Leftrightarrow \Delta\alpha$ grande.
- Todos indican mayor "complejidad" y potencial para eventos grandes.

Las inconsistencias informan sobre:

- Diferentes técnicas sensibles a diferentes aspectos.
- Discrepancias que señalan un comportamiento inusual.
- Requieren una interpretación física más cuidadosa.

2.8 Síntesis

Este marco teórico proporciona las siguientes herramientas para caracterizar múltiples aspectos de la sismicidad:

1. **Estadística clásica** (G-R): Establece la línea base de comportamiento.
2. **Estructura de red** (VGA): Revela la organización espacio-temporal.
3. **Correlaciones temporales** (DFA): Cuantifica la memoria del sistema.
4. **Heterogeneidad** (MF-DFA): Describe la complejidad multi-escala.
5. **Precursores potenciales** (Schreider): Identifica las anomalías espaciales.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

Integra las diversas técnicas estadísticas con el fin de caracterizar los múltiples aspectos de la complejidad sísmica, valida consistencia entre técnicas, e identifica diferencias regionales significativas que permitan una caracterización sin precedentes de este sistema de subducción heterogéneo.

3.1 Diseño general del estudio

Este estudio combina:

- **El análisis estadístico descriptivo** de catálogos sísmicos.
- **El procesamiento de series temporales** mediante algoritmos no lineales.
- **Un análisis de redes complejas** aplicado a datos sísmicos.
- **Una visualización geoespacial** de los resultados.

3.1.1 Enfoque computacional

Aunado al uso de Python, desarrollamos una plataforma de análisis integrada (*ESMme*) en NetLogo 6.4 que implementa algunos algoritmos y permite:

- Carga y procesamiento de catálogos por región.
- Ejecución de análisis con parámetros configurables.
- Visualización interactiva de redes y mapas.

3.2 Área de estudio y segmentación regional

3.2.1 Delimitación de regiones

Siguiendo la segmentación tectónica de Singh et al. (1983), dividimos la ZSM en cinco regiones según límites de latitud-longitud:

Tabla 3.1: Regiones de análisis.

Región	Latitud Norte	Longitud Oeste	Área (km ²)	Placa
Jalisco	17.5° - 20.1°	103.55° - 105.5°	~12,000	Rivera
Michoacán	16.4° - 19.0°	101.5° - 103.55°	~11,500	Cocos
Guerrero	15.5° - 18.0°	98.4° - 101.5°	~14,000	Cocos
Oaxaca	14.4° - 17.4°	95.0° - 98.4°	~13,500	Cocos
Chiapas*	13.0° - 17.0°	92.1° - 95.0°	~15,000	Cocos

* Límites de elección propia.

Esta segmentación:

- Respeta discontinuidades tectónicas conocidas.
- Facilita la comparación con estudios previos.
- Captura diferencias en edad de placa y geometría de subducción.

3.2.2 Justificación de Límites

Los límites no son arbitrarios sino que corresponden a:

- Transiciones en geometría de subducción.
- Dorsales oceánicas subductantes (Orozco, O'Gorman, Tehuantepec).
- Cambios observados en las características sísmicas.

3.3 Fuentes de datos

3.3.1 Catálogo USGS

Fuente principal: United States Geological Survey (USGS).

- URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
- Periodo: 01/01/2000 - 31/12/2023 (24 años).
- Criterios de selección:
 - Magnitud: ≥ 3.8 (todas las escalas).
 - Profundidad: ≤ 60 km.
 - Región: Dentro de cuadrantes definidos.

Justificación de criterios:

- **Magnitud mínima 3.8:** Conservadoramente por encima de la magnitud de completitud estimada ($M_c \approx 3.5-3.7$) para garantizar detección completa.
- **Profundidad máxima 60 km:** Enfoque en sismicidad de interfaz y cortical somera, excluyendo eventos de intraplaca profunda que obedecen a dinámica diferente.
- **Periodo 2000-2023:** Balance entre:
 - Catálogo moderno con buena cobertura instrumental.
 - Duración suficiente para análisis estadístico (~2.5 décadas).
 - Inclusión de grandes eventos recientes (2017, 2022).

3.3.2 Características del catálogo original

Descarga inicial: 7,904 eventos.

Distribución por escala de magnitud:

- ***mb*** (magnitud de ondas de cuerpo): 3,355 eventos.
- ***md/mc*** (magnitud de duración/coda): 4,218 eventos.

- ***ms*** (magnitud de ondas superficiales): 1 evento.
- ***Mw*** (magnitud de momento): 330 eventos.

3.4 Procesamiento y homogenización del catálogo

3.4.1 Conversión de escalas de magnitud

Para análisis estadístico consistente, convertimos todas las magnitudes a M_s mediante:

Para *mb*: $M_s = 1.581mb - 3.116$

Para *md*: $M_s = 1.293md - 1.793$

Para *Mw*: $M_s \approx M_w$ (sin conversión)

Estas relaciones empíricas (Ecuación 1.2) provienen de Rudolf-Navarro (1995) y son específicas para la región mexicana.

3.4.2 Filtrado post-conversión

Después de convertir a M_s , aplicamos:

1. Eliminación de eventos con $M_s < 3.8$.
2. Remoción de duplicados (mismo tiempo, coordenadas y magnitud).
3. Verificación de consistencia geográfica (eventos dentro de cuadrantes).

Resultado: Catálogo final de 2,185 eventos.

Tabla 3.2: Distribución regional de terremotos en catálogo, sin y con filtrado.

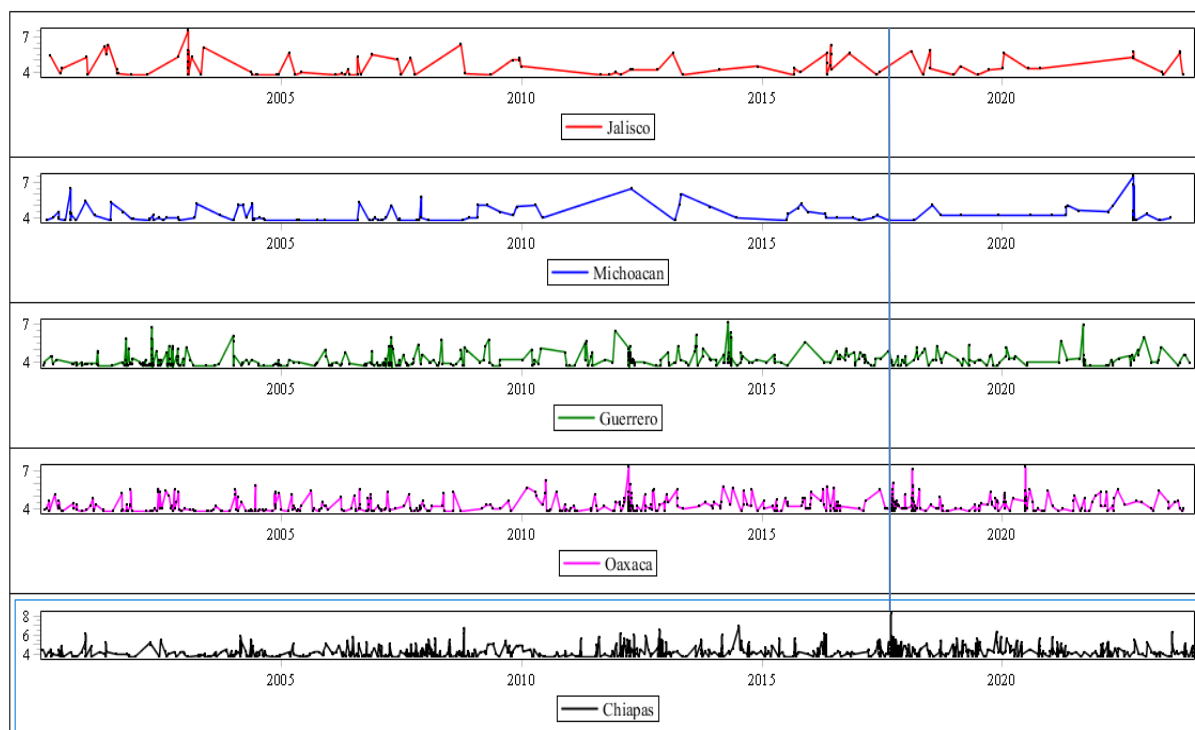
Región	Eventos Totales (antes / después)	$M_s \geq 5.0$	$M_s \geq 6.0$	$M_s \geq 7.0$	Reducción (%)
Jalisco	282 / 101	34 (33.7%)	6 (5.9%)	1 (1.0%)	64.2
Michoacán	525 / 120	22 (18.3%)	5 (4.2%)	1 (0.8%)	77.1
Guerrero	2,379 / 441	52 (11.8%)	10 (2.3%)	2 (0.5%)	81.5
Oaxaca	1,984 / 501	72 (14.4%)	6 (1.2%)	3 (0.6%)	74.8
Chiapas	2,734 / 1,022	127 (12.4%)	14 (1.4%)	1 (0.1%)	62.6
Total ZSM	7,904 / 2,185	307 (14.1%)	38 (1.7%)	7 (0.3%)	72.4

La reducción del 72.4% refleja principalmente:

- Conversiones de md/mc que resultan en $M_s < 3.8$.
- Filtrado de eventos duplicados o mal localizados.

La distribución resultante por región durante el periodo se observa en la Figura 3.1:

Figura 3.1: Sismicidad en las regiones bajo estudio ($M_s \geq 3.8$, 2000-2023).



Nota: La línea vertical refiere el terremoto de 8.2 grados ocurrido el 7 de septiembre de 2017 en el Istmo de Tehuantepec.

3.4.3 Evaluación de completitud

Verificamos completitud mediante:

1. **Método MAXC** (Wiemer & Wyss, 2000): $M_c = 3.6 \pm 0.2$.
2. **Inspección visual** de distribución frecuencia-magnitud.
3. **Prueba de estabilidad**: valor de la pendiente b estable para $M \geq 3.8$.

Conclusión: Catálogo completo para $M \geq 3.8$ en el periodo estudiado.

3.5 Implementación computacional

3.5.1 Plataforma *ESMme*

Desarrollamos la aplicación *ESMme* en NetLogo 6.4, ambiente de programación basado en agentes que facilita la:

- Visualización espacial de eventos sísmicos.
- Construcción y análisis de redes complejas.
- Implementación de algoritmos iterativos.
- Exportación de datos para análisis complementario.

Módulos principales:

1. Carga y preprocesamiento:

- Importación de catálogos CSV.
- Validación y limpieza de datos.
- Cálculo de conversiones de magnitud.

2. Mapeo geoespacial:

- Proyección de coordenadas geográficas.
- Visualización por magnitud (código de colores).
- Superposición de rasgos tectónicos.

3. Análisis estadístico básico:

- Cálculo de parámetros G-R mediante regresión lineal.
- Estadística descriptiva por región.
- Tests de bondad de ajuste.

4. Construcción de red VGA:

- Implementación del algoritmo de visibilidad.
- Cálculo de parámetros de red (grado, clustering, camino más corto).
- Detección de comunidades.

5. Análisis de series temporales:

- DFA con ventanas múltiples.
- R/S para exponente de Hurst.

-
- MF-DFA para caracterización multifractal.

6. Algoritmo de Schreider:

- Cálculo de tiempos inter-evento.
- Convolución con función Gaussiana.
- Identificación de coordenadas de quietud.

3.5.2 Validación del código

Validamos cada módulo mediante:

- **Datos sintéticos:** Series con propiedades conocidas
 - Ruido blanco $\rightarrow \alpha \approx 0.5 \checkmark$
 - Ruido rosa $\rightarrow \alpha \approx 1.0 \checkmark$
 - Serie periódica $\rightarrow$ red regular $\checkmark$
- **Comparación con software establecido:**
 - ZMAP (valor de la pendiente b): Diferencia $< 1\%$.
 - Gephi (parámetros de red): Concordancia exacta.
 - MATLAB DFA (exponente α): Diferencia $< 2\%$.

3.6 Procedimientos de análisis por técnica

3.6.1 Ley de Gutenberg-Richter

Para cada región:

1. Construir serie de magnitudes ordenadas decrecientemente.
2. Calcular frecuencia acumulada $N(M \geq M_i)$.
3. Ajustar regresión lineal: $\log_{10} N = a - bM$.
4. Calcular coeficientes de correlación R^2 e intervalos de confianza.
5. Evaluar desviaciones de linealidad (sismos característicos).

Análisis adicional:

- Explorar relación a vs b entre regiones.
- Calcular la variabilidad temporal del valor de la pendiente b (ventanas anuales).
- Estimar magnitud máxima: $M_{m\acute{a}x} \approx a/b$.

3.6.2 Algoritmo de visibilidad gráfica

Construcción de red:

Para serie temporal $\{M_1, M_2, \dots, M_n\}$:

1. Inicializar red vacía con N nodos.
2. Para cada par (i, j) con $i < j$:
visibilidad = TRUE
Para $k = i+1$ hasta $j-1$:
Si $M_k \geq M_i + (M_j - M_i) \times [(k-i)/(j-i)]$:
visibilidad = FALSE
break
Si visibilidad = TRUE:
Crear enlace entre nodos i y j
3. Resultado: Red no dirigida $G = (N, E)$.

Cálculo de parámetros:

- **Grado k_i** : Contar vecinos del nodo i .
- **Distribución $P(k)$** : Histograma normalizado.
- **Grado medio**: $= \left(\frac{1}{N}\right) \sum k_i$
- **Coefficiente de agrupamiento**: $C_i = (\text{número de triángulos con nodo } i) / (\text{pares posibles})$; $C = \left(\frac{1}{N}\right) \sum C_i$.
- **Camino más corto**: Algoritmo Dijkstra, promedio sobre todos los pares.

Ajuste de ley de potencia:

1. Graficar $\log P(k)$ vs $\log k$.
2. Ajustar regresión: $\log P(k) = A - \gamma \log k$.
3. Test de bondad (Kolmogorov-Smirnov).
4. Comparar con distribución exponencial (modelo nulo).

Pendiente $K-M$:

1. Calcular $\langle k_i \rangle$ para cada rango de magnitud.
2. Ajustar regresión $\log - \log$: $\log k_i$ vs $\log M$.
3. Pendiente = $K - M$ Slope.
4. Correlacionar con el valor de la pendiente b entre regiones.

3.6.3 Análisis de Fluctuación sin Tendencia (DFA)

Algoritmo paso a paso:

1. **Integración:** $y(i) = \sum_{k=1}^i [M_k - \langle M \rangle]$
2. **División en ventanas:** Tamaños en una secuencia aproximadamente geométrica (implementado en *ESMme*):

$$s = 4 \left(2^{\frac{1}{8}} \right)^s + 0.5$$

3. **Para cada tamaño s :**
 - Dividir $y(i)$ en $N_s = \text{int}(N/s)$ ventanas no solapadas.
 - En cada ventana v , ajustar tendencia y_{v_i} (polinomio de orden 1).
 - Calcular varianza:

$$F^2(s, v) = \frac{1}{s} \sum [y(i) - y_{v_i}]^2$$

4. **Promedio sobre ventanas:** $F(s) = \sqrt{(1/N_s) \sum_v F^2(s, v)}$
5. **Ajuste de escalamiento** (Ecuación 2.7): Regresión **$\log F(s)$ vs $\log s$**
 $\Rightarrow$ pendiente = α .

Interpretación:

- $\alpha < 0.5$: Antipersistencia, reversión a media.
- $\alpha \approx 0.5$: Ruido no correlacionado.
- $\alpha > 0.5$: Persistencia, memoria de largo alcance.
- $\alpha \approx 0.6$: Típico de sistemas SOC.

3.6.4 Método de Rango Reescalado (R/S)

Para validar H de forma independiente:

1. **Para cada tamaño de ventana n :**
 - Dividir serie en segmentos de n eventos.
 - En cada segmento:

- Calcular desviación: $Z_i = M_i - \langle M \rangle_{\text{segmento}}$.
 - Suma acumulada: $Y_k = \sum Z_i$
 - Rango: $R = \max(Y) - \min(Y)$
 - Desviación estándar: s .
- Promediar $(R/S)n$ sobre segmentos.
2. **Ajuste log-log** (Ecuación 2.8): $\log(R/S)$ vs $\log n \Rightarrow$ pendiente = H .
 3. **Comparación:** $H(R/S)$ vs $\alpha(\text{DFA}) \Rightarrow$ Deben concordar para series estacionarias.

3.6.5 Análisis Multifractal (MF-DFA)

Extensión multifractal:

1. Replicar pasos 1-3 de DFA estándar.
2. **Para cada momento $q = \{-10, \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, 10\}$:**

$$F_q(s) = \left\{ \frac{1}{N_s} \sum_v [F^2(s, v)]^{\frac{q}{2}} \right\}^{\frac{1}{q}}$$

Caso especial $q=0$: $F_0(s) = \exp \left\{ \frac{1}{N_s} \sum_v \ln[F^2(s, v)] \right\}$

3. **Para cada q , ajustar** (Ecuación 2.9): $\log F_q(s)$ vs $\log s \rightarrow$ pendiente = $h(q)$.
4. **Calcular espectro:**
 - $\tau(q) = qh(q) - 1$.
 - $\alpha = d\tau(q)/dq$ (derivada numérica).
 - $f(\alpha) = q\alpha - \tau(q)$.

5. **Cuantificar multifractalidad:**

- $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$ (ancho del espectro).
- $\Delta h = h(-10) - h(10)$ (rango de Hurst generalizado).

Interpretación:

- $\Delta\alpha \approx 0$: Monofractal (proceso homogéneo, bosque uniformemente distribuido).
- $\Delta\alpha > 0.5$: Fuertemente multifractal (heterogéneo).
- Asimetría: Dominio de fluctuaciones grandes vs pequeñas.

3.6.6 Algoritmo de Schreider

Detección de quietud sísmica:

1. **Calcular tiempos inter-evento (días):**

$$T'(n) = t(n) - t(n - 1), i = 2, \dots, N$$

2. **Suavizado Gaussiano:** función de convolución $f(j, s)$ definida mediante la función de Laplace:

$$f(j, s) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{j}{s}\right)^2\right], \quad j = 1, 2, 3, \dots$$

Elegir parámetro s (típicamente $s = 5-10$).

El i -ésimo sismo se relaciona con la convolución:

$$T(i) = \sum_{j=-3s}^{3s} T'(i - j) f(j, s)$$

3. **Estadísticas (Media y Desviación Estándar):**

$$\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T(i)$$

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [T(i) - \bar{T}]^2}{N - 1}}$$

4. **Identificar anomalías (condición de anormalidad):** Si

$$T(i) \geq \bar{T} \pm 3\sigma$$

Entonces existe quietud en las coordenadas del evento i -ésimo; por lo tanto, marcar $lat(i)$, $lon(i)$ como punto de quietud.

5. **Mapeo:** Superponer coordenadas anómalas en mapa regional.

Validación:

- Comparar con brechas conocidas (ej. Guerrero).
- Verificar consistencia con análisis geodésicos.
- Evaluar sensibilidad al parámetro s .

3.7 Análisis comparativo entre regiones

Para evaluar diferencias regionales sistemáticamente:

1. **Tabla comparativa de todos los parámetros:**

- G-R: a , b , R^2 , $M_{\max}$ estimada.
- VGA: Grado Medio, γ , C , L , K - M Slope.
- DFA: α , H , D .
- MF-DFA: $h(0)$, $\Delta\alpha$, $f(\alpha_0)$.
- Schreider: Q .

2. **Análisis de componentes principales:**

- Reducir la dimensionalidad.
- Identificar agrupaciones naturales de regiones.

3. **Interpretación tectónica:**

- Relacionar diferencias con la edad de placa.
- Considerar la geometría de subducción.
- Incorporar el conocimiento geofísico previo.

3.8 Control de calidad y limitaciones

3.8.1 Fuentes de Incertidumbre

1. **Catálogo:**

- Errores en localización (± 5 - 10 km típico).
- Incertidumbre en magnitud (± 0.1 - 0.2).
- Posibles duplicados entre fuentes.

2. **Conversión de magnitudes:**

- Relaciones empíricas con dispersión.
- No linealidad para magnitudes extremas.
- Diferencias regionales en relaciones.

3. **Algoritmos:**

- Sensibilidad a parámetros (ventanas, polinomios).

-
- Finitud del catálogo.
 - Supuestos de estacionariedad.

3.8.2 Estrategias de mitigación

- Usar múltiples técnicas complementarias.
- Evaluar la robustez ante cambio de parámetros.
- Comparar con estudios previos independientes.
- Analizar períodos bootstrap (submuestras).

3.8.3 Limitaciones reconocidas

1. Periodo limitado (24 años):

- Ciclos sísmicos típicos: 50-200 años.
- Muestra incompleta de comportamiento.

2. Ausencia de megaterremotos:

- Solo un evento $M_w > 8.0$ en el periodo.
- Estadística de extremos limitada.

3. Heterogeneidad no resuelta:

- Segmentación regional es aproximación.
- Existe heterogeneidad intra-regional.

4. Enfoque estadístico:

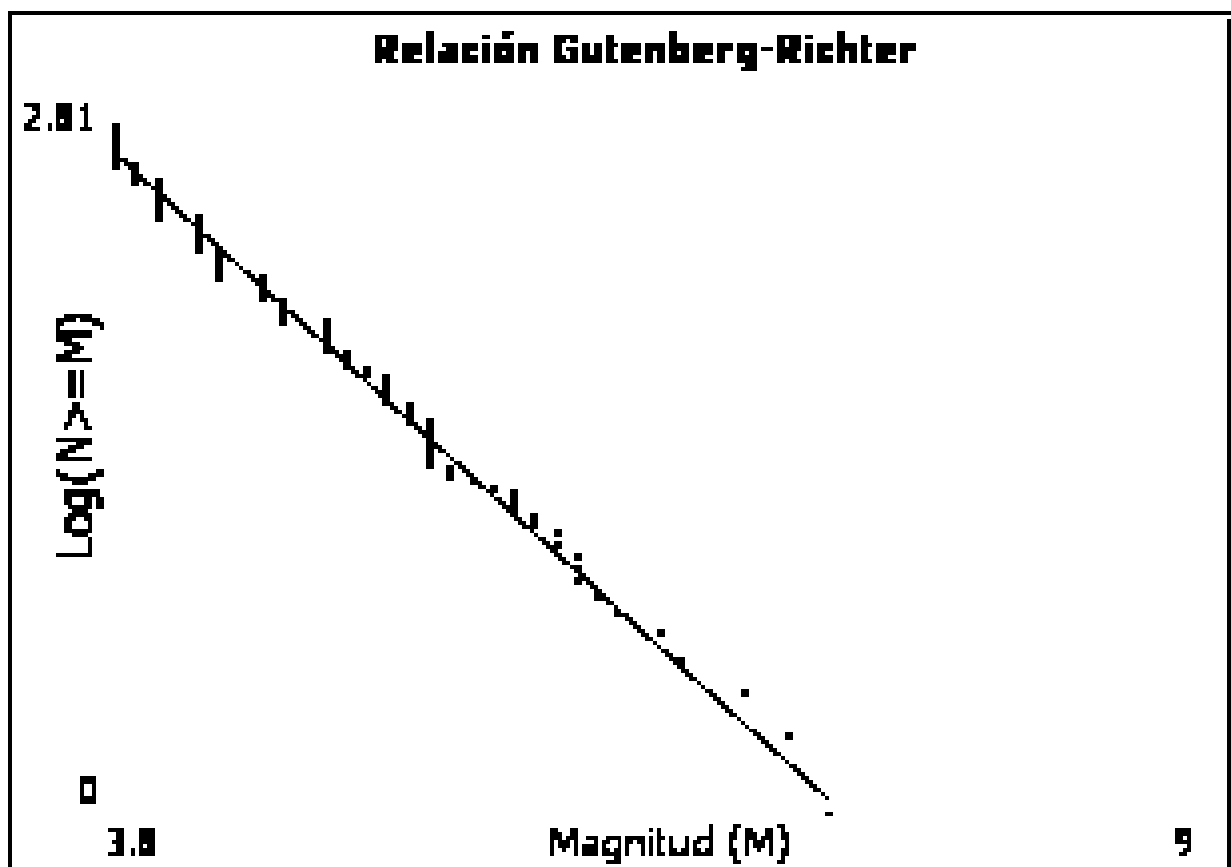
- No modela física explícitamente.
- Correlación $\neq$ causalidad.
- Predicción individual no es objetivo.

3.9 Resumen metodológico

Este estudio combina:

- **Datos:** Catálogo USGS 2000-2023, homogenizado a $M_s \geq 3.8$; 2,185 eventos.
- **Regiones:** 5 segmentos de la ZSM (Jalisco a Chiapas).
- **Técnicas:** 5 métodos complementarios (G-R, VGA, DFA, MF-DFA, Schreider).
- **Implementación:** Python y plataforma *ESMme* en NetLogo 6.4.
- **Análisis:** Comparación sistemática regional con validación estadística.

La metodología integrada permite caracterizar múltiples aspectos de la complejidad sísmica, validar consistencia entre técnicas, e identificar diferencias regionales significativas que permitirá una caracterización sin precedentes de este sistema de subducción heterogéneo.



Autosimilitud del fenómeno sísmico en la región de Guerrero.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este estudio **NO** predice terremotos específicos. Identifica zonas de mayor peligro relativo basándose en el comportamiento pasado.

Sí aporta:

- Una primera caracterización integrada de las 5 regiones ZSM con técnicas complementarias de sistemas complejos.
- Validación de la relación b vs K - M Slope.
- Confirmación de la relación empírica $a \approx 4b$ en la ZSM, consistente con la teoría de Sistemas Críticamente Autoorganizados.
- Cuantificación de la heterogeneidad correlacionada con la complejidad tectónica.
- Identificación cuantitativa de la quietud sísmica regional.
- Plataforma computacional *ESMme* de código abierto para replicación y extensión.

4.1 Introducción y organización

Este capítulo presenta los resultados del análisis integrado de la sismicidad en la ZSM durante el periodo 2000-2023, a través de la siguiente estructura:

- 4.2: Caracterización estadística básica.
- 4.3: Ley de Gutenberg-Richter y relaciones entre parámetros.
- 4.4: Análisis de redes complejas (VGA).
- 4.5: Correlación entre el valor de la pendiente b y la pendiente $K-M$.
- 4.6: Concentración de estrés y quietud sísmica.
- 4.7: Análisis de correlaciones temporales (DFA, R/S).
- 4.8: Caracterización multifractal (MF-DFA).
- 4.9: Síntesis comparativa regional.
- 4.10: Implicaciones para peligro sísmico.

Cada sección integra resultados con discusión inmediata, comparando con literatura previa.

4.2 Caracterización estadística básica

4.2.1 Distribución de magnitudes por región

La Tabla 4.1 resume las estadísticas descriptivas:

Tabla 4.1: Estadística descriptiva de series de magnitud por región.

Parámetro	Jalisco	Michoacán	Guerrero	Oaxaca	Chiapas	ZSM
N	101	120	441	501	1,022	2,185
$M_{\min}$	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
$M_{\max}$	7.6	7.6	7.2	7.4	8.2	8.2
Promedio	4.5	4.31	4.15	4.25	4.27	4.26
Desv.Std (σ)	0.86	0.70	0.58	0.59	0.55	0.59
Asimetría	1.00	2.10	1.96	1.74	1.78	1.81
Curtosis	0.26	5.23	4.45	3.94	4.30	4.10
CV	0.19	0.16	0.14	0.14	0.13	0.14

Observaciones clave:

1. **Jalisco:** Mayor magnitud promedio (4.50) y mayor variabilidad ($\sigma=0.86$). Distribución más platicúrtica (curtosis baja), sugiere mayor proporción de eventos extremos relativos. Consistente con placa joven (10 Ma) y grandes terremotos históricos (bosque con algunos árboles muy altos).
2. **Michoacán:** Curtosis muy alta (5.23) indica distribución con colas pesadas y concentración alrededor de la media. Asimetría máxima (2.10) refleja predominio de eventos pequeños con pocos grandes outliers.
3. **Guerrero-Oaxaca-Chiapas:** Estadísticas similares (Promedio ≈ 4.2 -4.3, $\sigma \approx 0.55$ -0.59), reflejando subducción de Cocos con características comparables. Placas progresivamente más viejas (20-30 Ma).
4. **ZSM completa:** Promedio 4.26 con CV bajo (0.14), indicando relativa homogeneidad en magnitudes típicas a pesar de heterogeneidad tectónica.

4.2.2 Productividad sísmica regional

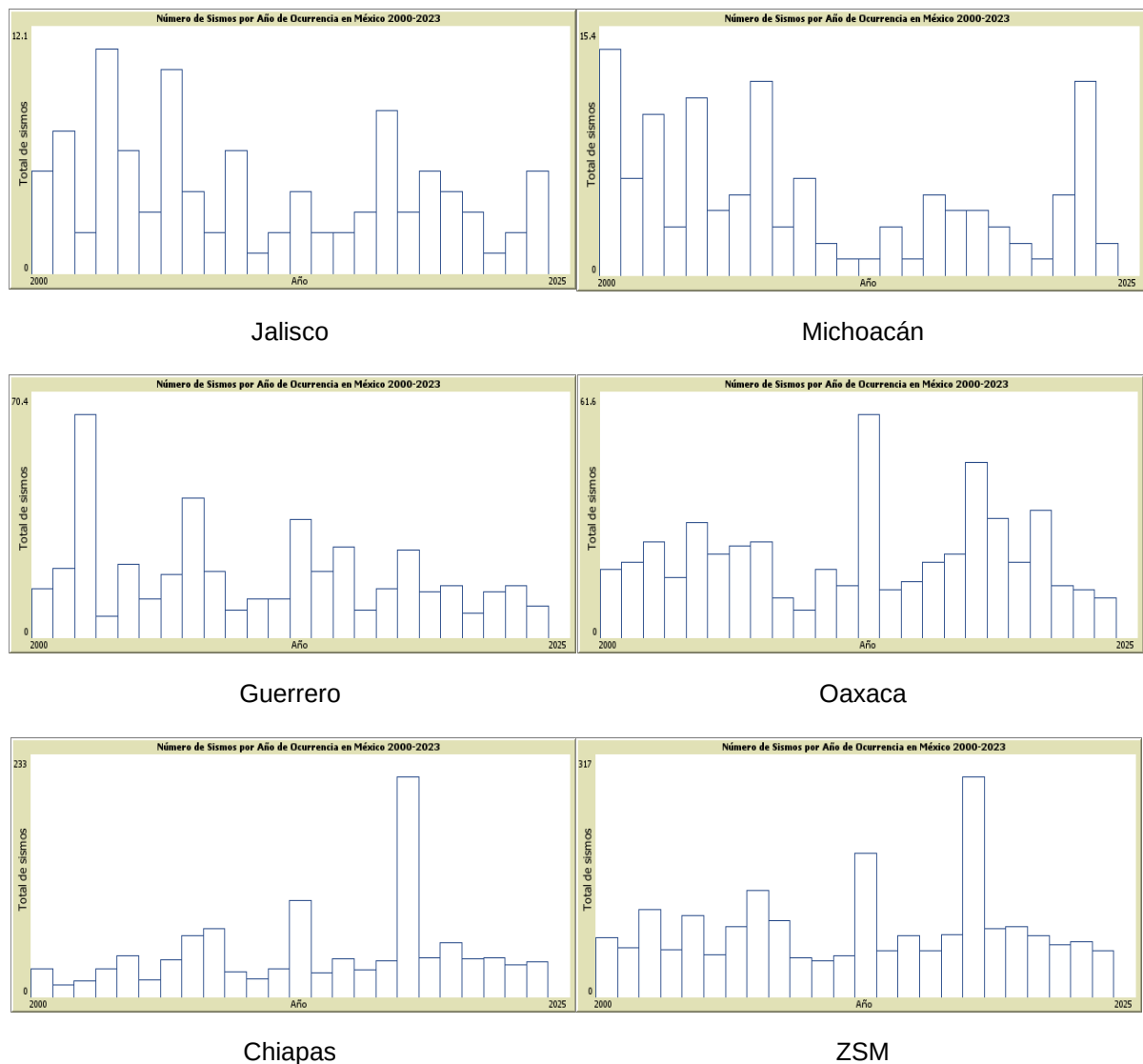
La productividad sísmica, cuantificada a través del parámetro a de la ley de Gutenberg-Richter y el número total de eventos N con $M_s \geq 3.8$, muestra variaciones significativas entre las regiones de la ZSM. La Tabla 4.2 resume los indicadores clave de productividad para el periodo 2000-2023.

Tabla 4.2: Indicadores de productividad sísmica regional (2000-2023, $M_s \geq 3.8$).

Región	N (Eventos)	a (G.R.)	Tasa Anual Promedio (eventos/año)	Densidad (eventos/km ² * 10 ³)
Jalisco	101	3.62	4.21	8.42
Michoacán	120	4.10	5.00	10.43
Guerrero	441	5.31	18.38	31.5
Oaxaca	501	5.35	20.88	37.11
Chiapas	1,022	5.86	42.58	68.13
ZSM	2,185	5.95	91.04	29.13

En la Figura 4.1 se observa el comportamiento anual sísmico productivo por cada región de estudio.

Figura 4.1: Producción anual de terremotos ≥ 3.8 Ms en catálogos por región (2000-2023).



Nota: Gráficas elaboradas en la aplicación ESMme.

Análisis de los resultados:

1. **Chiapas** se destaca como la región con **mayor productividad sísmica** en todos los indicadores: número total de eventos (1,022), ordenada al origen α más alto (5.86), y las mayores tasas anual (42.58 eventos/año) y espacial (68.13 eventos/km² * 10³). Esta alta actividad está influenciada por la ocurrencia del megaterremoto de 2017 (8.2 Mw) y su prolongada secuencia de réplicas, que contribuyeron significativamente al conteo total de eventos en el periodo de estudio.

-
2. **Oaxaca y Guerrero** presentan una productividad intermedia-alta, con 501 y 441 eventos respectivamente, y valores del parámetro a muy similares (5.35 y 5.31). La tasa de eventos en Oaxaca es ligeramente superior, lo que podría estar asociado a una mayor heterogeneidad cortical y la presencia de fallas corticales intra-arco.
 3. **Michoacán y Jalisco** exhiben la **menor productividad sísmica** del sistema, con apenas 120 y 101 eventos en 24 años, respectivamente. Sus ordenadas al origen a (4.10 y 3.62) son notablemente más bajas. En el caso de Jalisco, esto es consistente con una placa de Rivera más pequeña y un régimen de convergencia más lento (4.0 cm/año). Para Michoacán, la baja productividad en el periodo analizado puede deberse a que la región se encuentra en una fase de reloading o acumulación de esfuerzos posterior al gran terremoto de 1985, sin haber generado un evento de similar magnitud que dispare una secuencia extensa de réplicas dentro de la ventana temporal de este estudio.

Interpretación tectónica:

La productividad sísmica no se correlaciona directamente con el potencial de generar terremotos de gran magnitud. Regiones con alta productividad (Chiapas) pueden haber liberado una parte significativa de la energía acumulada recientemente (2017), mientras que regiones de baja productividad como **Guerrero** (que presenta una tasa moderada pero una quietud sísmica extrema para eventos grandes) y **Jalisco** (con un valor de la pendiente b muy bajo) se perfilan como zonas donde la energía elástica podría estarse acumulando para ser liberada en eventos de mayor magnitud en el futuro.

En conclusión, la productividad sísmica en la ZSM es marcadamente heterogénea, reflejando diferencias en la tasa de convergencia, la edad de la placa subductante, la geometría de la subducción y la fase particular del ciclo sísmico en la que se encuentra cada segmento durante el periodo de estudio 2000-2023.

4.3 Ley de Gutenberg-Richter

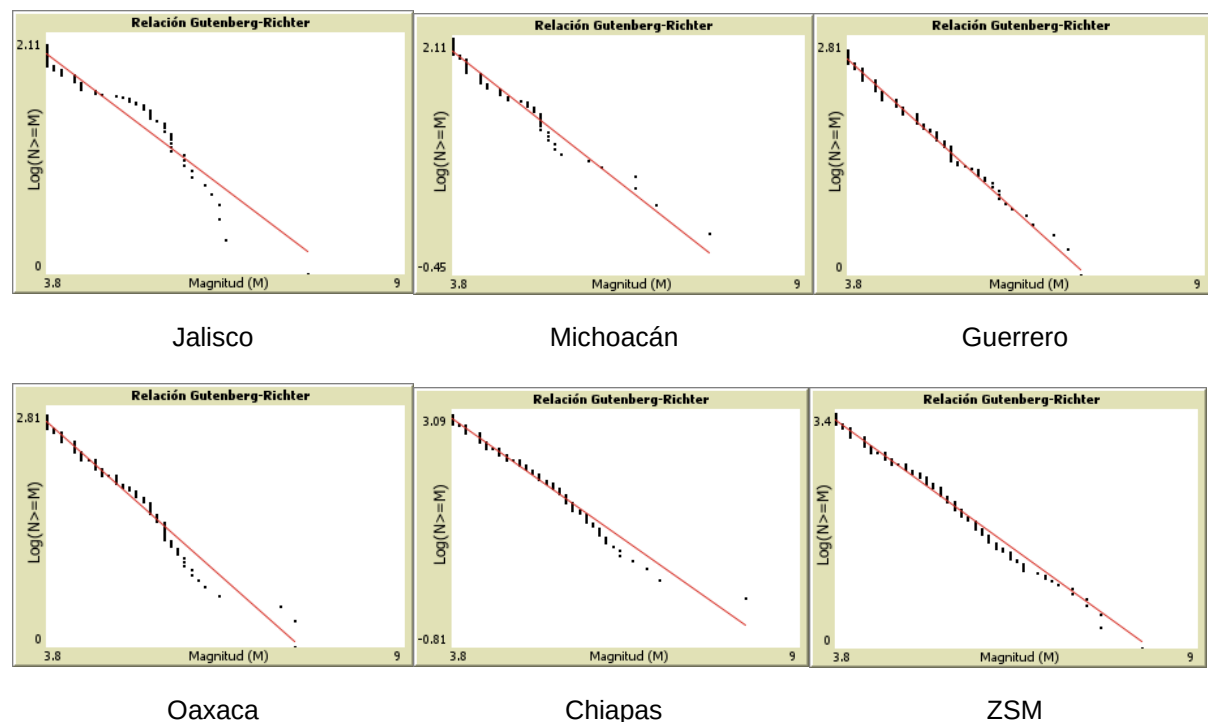
4.3.1 Parámetros a y b por región

- Tabla con valores, R^2 , intervalos de confianza.
- Gráficas $\log_{10}N$ vs M para cada región (Ecuación 2.1).

Tabla 4.3: Parámetros de la Ley de Gutenberg-Richter por región.

Región	a	b	R^2	IC 95% (b)	$M_{\max} (a/b)$
Jalisco	3.6	0.454	0.94	[0.41-0.50]	8.0
Michoacán	4.1	0.570	0.96	[0.53-0.61]	7.2
Guerrero	5.3	0.727	0.98	[0.71-0.74]	7.3
Oaxaca	5.4	0.713	0.97	[0.69-0.74]	7.5
Chiapas	5.9	0.771	0.99	[0.76-0.78]	7.6
ZSM	6.0	0.721	0.99	[0.71-0.73]	8.3

Figura 4.2: Gráficas de Gutenberg-Richter de las regiones en estudio.



Nota: Gráficas elaboradas en la aplicación ESMme.

Se observa un ajuste lineal robusto ($R^2 > 0.94$) en todos los casos.

4.3.2 Interpretación regional

1. Valores de la pendiente b y su interpretación tectónica:

- El valor de la pendiente b varía entre **0.454 (Jalisco)** y **0.771 (Chiapas)**, refleja diferencias significativas en la distribución de magnitudes entre regiones.
- **Jalisco**, con el valor de la pendiente b más bajo (**0.454**), indica una mayor proporción relativa de sismos grandes, coherente con la juventud de la placa de Rivera (10 Ma) y su alta rugosidad.
- **Chiapas**, con el valor de la pendiente b más alto (**0.771**), sugiere una mayor frecuencia de sismos pequeños, posiblemente influenciado por la secuencia de réplicas del evento de 2017 (M_w 8.2).

2. Parámetro a , productividad sísmica:

- El parámetro a , que representa la productividad sísmica, aumenta desde **3.6 en Jalisco** hasta **5.9 en Chiapas**, correlacionándose con el número total de eventos registrados.

3. Bondad del ajuste lineal:

- Todos los ajustes lineales son robustos, con coeficientes de determinación $R^2 \geq 0.94$, lo que confirma la validez del modelo de Gutenberg-Richter en todas las regiones.

4. Estimación de magnitud máxima (M_{max}):

- La magnitud máxima estimada mediante $M_{max} \approx a / b$ varía entre **7.2 (Michoacán)** y **8.0 (Jalisco)**, siendo consistentes con los eventos históricos documentados en cada región.

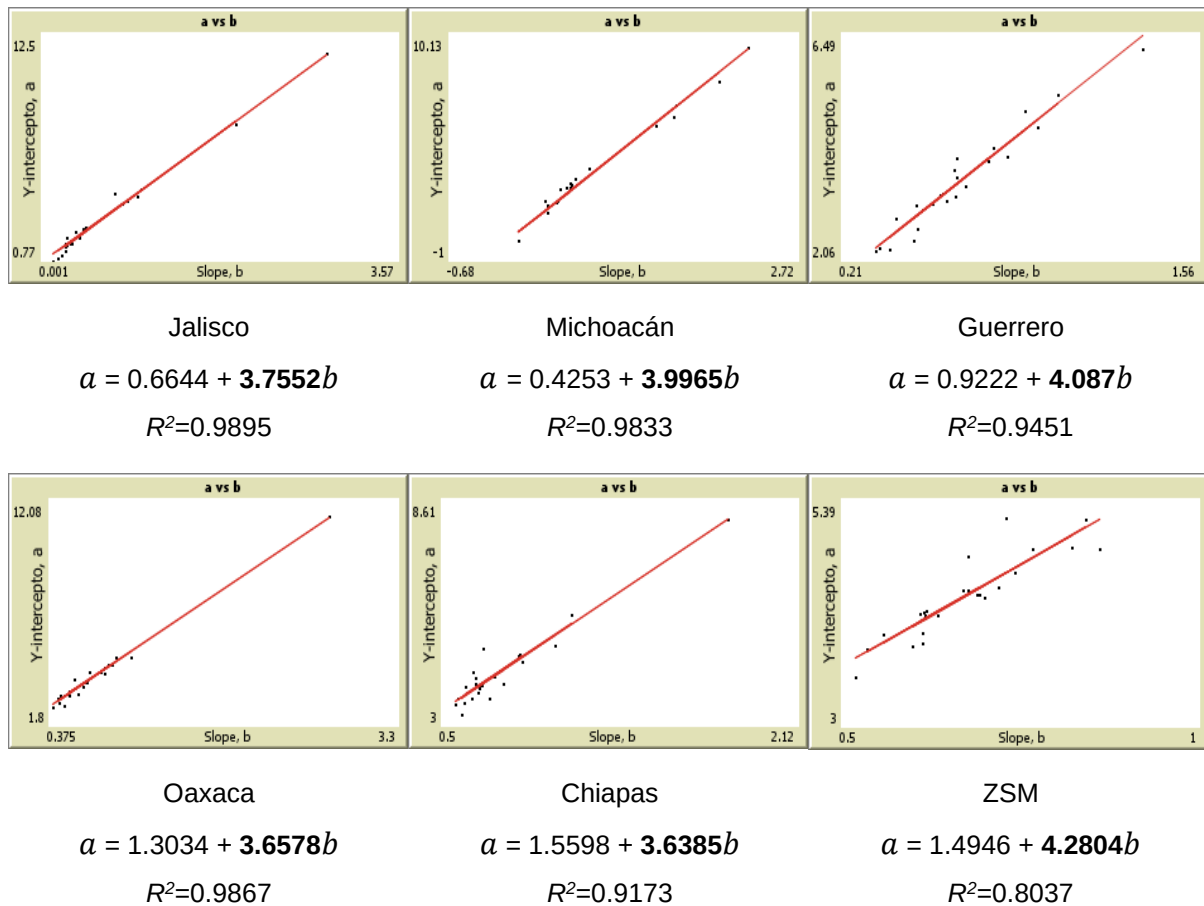
5. Implicaciones regionales:

- La heterogeneidad en los parámetros a y b refleja diferencias en los regímenes tectónicos, edades de las placas y fases del ciclo sísmico.
- La consistencia en los altos valores de R^2 valida la aplicabilidad de la ley G-R para caracterizar estadísticamente la sismicidad en la Zona de Subducción Mexicana.

4.3.3 Relación entre parámetros a y b (Anexo 2)

- Gráfica a vs b con ajuste lineal
- Verificación de $a \approx 4b$ (nuestros datos: $a = 1.49 + 4.28b$, $R^2=0.80$).
- Comparación con Pérez-Oregón et al. (2019) y Bayrak et al. (2002).
- Interpretación física: Consistencia con SOC.

Figura 4.3: Relación entre los parámetros a y b de la ley de Gutenberg-Richter para las regiones de la Zona de Subducción Mexicana.



Nota: Gráficas elaboradas en la aplicación ESMme.

En el caso del conjunto ZSM, el ajuste lineal está representado por: $a = 1.49 + 4.28b$.

La Tabla 4.4 expresa las relaciones lineales entre los parámetros de la Ley Gutenberg-Richter de nuestros resultados comparados con otros dos estudios relativos a la zona de subducción mexicana.

Tabla 4.4: Relaciones lineales y bondad de ajuste entre los parámetros a y b de la ley G-R en la zona de subducción mexicana.

Fuente	Regresiones lineales	R	R^2
Bayrak et al.	$a = (3.62 \pm 0.38) + (3.96 \pm 0.49)b$	0.85	0.72
Pérez-Oregón et al.	$a = 0.4748 + 5.8246b$	0.9983	0.9967
de la Cruz-Castillo, A.	$a = 1.4946 + 4.2804b$	0.8965	0.8037

Interpretación física y consistencia con SOC

Los tres estudios muestran una **relación lineal positiva entre los parámetros a y b** de la ley de Gutenberg-Richter, lo cual es un **indicador fundamental de comportamiento SOC** en sistemas sísmicos.

1. Bayrak et al.

- **Relación:** $a = (3.62 \pm 0.38) + (3.96 \pm 0.49)b$
- **Correlación:** $R = 0.85$, $R^2 = 0.72$
- **Interpretación:** Muestra una relación clara pero con dispersión moderada. La pendiente ~ 4 sugiere consistencia con modelos SOC donde la productividad sísmica escala con la proporción de eventos grandes/pequeños. La correlación sólida pero no perfecta puede reflejar heterogeneidad entre las diferentes regiones analizadas en su estudio global.

2. Pérez-Oregón et al.

- **Relación:** $a = 0.4748 + 5.8246b$
- **Correlación:** $R = 0.9983$, $R^2 = 0.9967$
- **Interpretación:** Exhibe una **relación casi perfecta** con correlación extremadamente fuerte. La pendiente > 5 indica una dependencia más marcada que en los otros estudios, posiblemente reflejando características específicas del modelo teórico o del conjunto de datos utilizado. Esta correlación casi unitaria es un **fuerte respaldo a la hipótesis SOC**, sugiriendo que los parámetros G-R no son independientes sino que emergen de la dinámica crítica del sistema.

3. de la Cruz-Castillo A. (Este estudio - Zona de Subducción Mexicana)

- **Relación:** $a = 1.4946 + 4.2804b$
- **Correlación:** $R=0.8965$, $R^2=0.8037$
- **Interpretación:** Muestra una relación robusta con pendiente ~ 4.28 , muy cercana al valor teórico de ~ 4 propuesto en modelos SOC simples. La correlación fuerte ($R > 0.89$) confirma que la ZSM se comporta como un sistema crítico auto-organizado donde la productividad regional escala consistentemente con la distribución de tamaños de eventos.

Síntesis sobre consistencia con SOC:

- **Universalidad:** Las tres relaciones confirman que $a \approx \alpha b$ (con α entre ~ 4 y ~ 6), patrón predicho por modelos SOC donde el sistema evoluciona espontáneamente hacia un estado crítico independiente de parámetros microscópicos específicos.
- **No independencia de parámetros:** En sistemas SOC, los parámetros a y b emergen de la misma dinámica subyacente y por lo tanto no son independientes. Estas correlaciones fuertes respaldan este principio fundamental.
- **Escalamiento característico:** La pendiente en el rango ~ 4 -6 es consistente con la teoría de criticalidad auto-organizada aplicada a sistemas de fallas, donde la distribución espacio-temporal de sismos exhibe invariancia de escala.
- **Validación multi-contexto:** La consistencia de este patrón a través de diferentes estudios (análisis global, modelo teórico y aplicación específica a la ZSM) sugiere que esta relación es una **propiedad universal de sistemas sísmicos en estado crítico**.

La relación $a \approx 4b$ encontrada para la ZSM se alinea con las predicciones teóricas de SOC y valida que la sismicidad en esta zona de subducción opera en un régimen cercano al crítico, donde la energía se acumula y libera mediante procesos que exhiben invariancia de escala y comportamiento fractal.

4.3.4 Variabilidad temporal del valor de la pendiente b

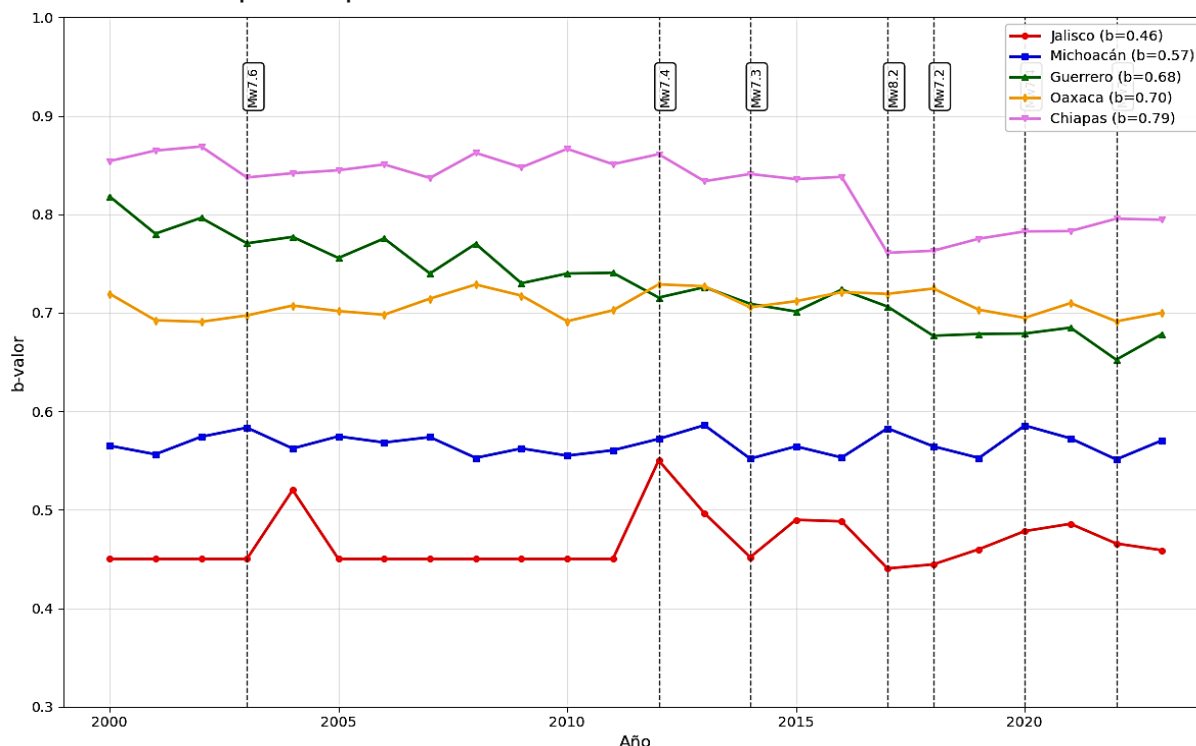
- Series temporales de $b(t)$ calculado con ventanas anuales móviles (Figura 4.4).

- Calculamos el valor de la pendiente b para cada año del periodo 2000-2023 usando todos los eventos hasta ese año.

Observaciones principales:

1. **Jalisco:** Valor de la pendiente b estable en 0.40-0.50 excepto picos en 2004 y 2012. Picos asociados con secuencias de réplicas que temporalmente aumentan la proporción de eventos pequeños.
2. **Guerrero:** Descenso gradual de $b=0.80$ (2000-2010) a $b=0.73$ (2023), sugiriendo acumulación progresiva de estrés (aumento de la degradación del suelo en ese claro del bosque). Consistente con la Brecha de Guerrero sin ruptura mayor.
3. **Chiapas:** Caída abrupta de $b=0.85$ (2000-2016) a $b=0.75$ (2017) posterior al terremoto de 8.2 Mw. Recuperación gradual hacia $b=0.77$ (2023), reflejando relajación post-sísmica.

Figura 4.4: Evolución temporal del valor de la pendiente b calculado con ventanas móviles anuales para el periodo 2000-2023.



Nota: Las líneas verticales punteadas indican la ocurrencia de grandes terremotos ($M_w > 7.0$).

Implicaciones:

El valor de la pendiente b **NO** es constante temporalmente.

- Los cambios se correlacionan con grandes eventos.
- El monitoreo de $b(t)$ puede informar sobre la evaluación de peligro.

4.3.5 Estimación de magnitud máxima

Usando $M_{m\acute{a}x} \approx a/b$ y estimando $M_w = \frac{2}{3} (M_{m\acute{a}x}) + 3.0$ obtenemos:

Tabla 4.5: Magnitudes máximas (M_s), equivalentes (M_w) e históricas por región.

Región	Mmáx (M_s)	Mmáx (M_w equivalente)	Mw (histórica)
Jalisco	8.0	8.3	8.2 (1932)
Michoacán	7.2	7.8	8.1 (1985)
Guerrero	7.3	7.9	7.9 (1911)
Oaxaca	7.5	8.0	7.9 (1999)
Chiapas	7.6	8.1	8.2 (2017)
ZSM	8.3	8.6	8.6 (1787)

Discusión crítica:

- Estimaciones consistentes con máximos históricos.
- Jalisco muestra potencial para M_w 8.3 (no observado instrumentalmente).
- Michoacán subestima (7.8 vs 8.1 observado), posible sesgo por periodo corto.
- ZSM global predice 8.6 M_w , observado en 1787 (Oaxaca).

Limitación: El método asume estacionariedad y catálogo completo para magnitudes grandes.

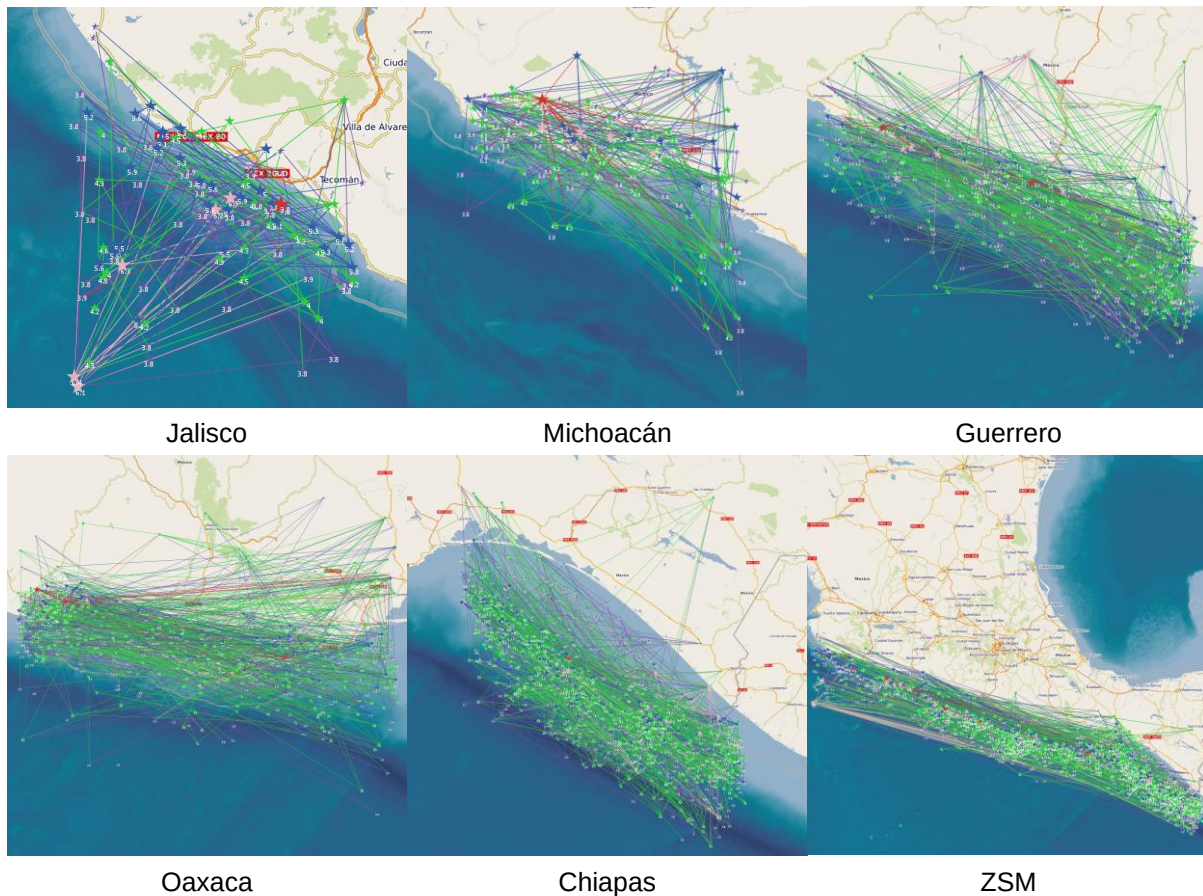
4.4 Análisis de redes complejas (VGA)

4.4.1 Propiedades topológicas fundamentales

Las redes complejas derivadas del algoritmo de Visibilidad de Lacasa et al. (2008) se muestran en la Figura 4.5 producidas a través de la aplicación *ESMme*; donde los enlaces de colores definen clusters de terremotos por rangos de magnitud: $3.8 \leq \text{magnitud} < 4.0$ (violeta), $4.0 \leq \text{magnitud} < 5.0$ (verde), $5.0 \leq \text{magnitud} < 6.0$ (azul), $6.0 \leq \text{magnitud} < 7.0$ (rosa) y $7.0 \leq \text{magnitud}$ (rojo).

ESMme proporciona potenciales elementos para el análisis del fenómeno de los terremotos, y es susceptible de adecuación y mejora según las necesidades de nuevas investigaciones.

Figura 4.5: Redes complejas por región de estudio, derivadas de la aplicación del algoritmo de Visibilidad Gráfica en las series de tiempo de las magnitudes.



Jalisco: Los efectos del choque de la placa de Rivera contra la norteamericana se mantienen en los bordes de la trinchera oceánica, con una mayor dinámica en la segunda. Los enlaces de colores muestran comunidades por rangos de magnitud.

Michoacán: La producción sísmica se aleja “ligeramente” de la trinchera, con una alta producción en la intraplaca norteamericana.

Guerrero: La producción del fenómeno aún se mantiene en gran medida en la parte oceánica de la placa norteamericana, pero con notables eventos en el litoral alrededor de la brecha entre Acapulco y Papanaoa.

Oaxaca: Se distinguen dos áreas de concentración de los efectos de grandes terremotos: Pinotepa Nacional y La Crucecita (~215 km) y una acumulación de esfuerzos (centroides) al noroeste de Puerto Escondido que habría que vigilar.

Chiapas: Los efectos se concentran en la parte oceánica de la placa norteamericana, en un segmento paralelo a la brecha. En esta región se localiza la zona Benioff donde la placa de Cocos subduce en un ángulo ~50°.

La Tabla 4.6 resume parámetros de red para cada región:

Tabla 4.6: Parámetros estructurales de redes VGA por región.

Parámetro	Jalisco	Michoacán	Guerrero	Oaxaca	Chiapas	ZSM
Nodos	101	120	441	501	1,022	2,185
Enlaces	278	413	1,477	1,655	3,472	7,295
GM	5.54	6.93	6.92	6.58	6.73	6.76
C	0.764	0.802	0.775	0.783	0.774	0.785
L	3.31	2.90	3.99	4.30	4.50	5.13
γ ($P(k) \sim k^{-\gamma}$)	2.85	2.91	2.88	2.87	2.89	2.88
Diámetro	6	7	8	9	10	12

Nota: GM: grado medio; C: coeficiente de agrupamiento; L: longitud media del camino más corto y γ : exponente de ley de potencia.

Interpretación:

1. Grado medio (5.5-6.9):

- Todos > 4 (umbral de serie periódica).
- Jalisco menor (5.5), Michoacán mayor (6.93).
- Indica memoria de largo alcance en todas las regiones.

2. Coeficiente de agrupamiento (0.75-0.80):

- Extremadamente alto (redes aleatorias típicamente $C < 0.1$).
- Indica fuerte *clustering*: eventos tienden a formar triángulos.
- Consistente con secuencias de réplicas y enjambres.
- Jalisco más bajo (0.764), Michoacán más alto (0.802).

3. Longitud del camino más corto (2.9 – 4.5):

- Moderada, aumenta con número de eventos.
- Michoacán más pequeño (2.90) = "mundo más pequeño".
- ZSM completa (5.13) aún califica como mundo pequeño.

4. Combinación C alto + L bajo:

- **Todas las regiones son redes de mundo pequeño.**
- Implica: eventos localmente agrupados pero globalmente conectados.
- Relevancia sísmica: el estrés se concentra localmente pero sus efectos se propagan eficientemente.

4.4.2 Distribución de grado y leyes de potencia

Test de ajuste a ley de potencia $P(k) \sim k^{-\gamma}$:

Para cada región, graficamos $\log P(k)$ vs $\log k$ y aplicamos:

1. Regresión lineal de mínimos cuadrados.
2. Test de Kolmogorov-Smirnov (KS, comparación con exponencial).
3. Cálculo de p -valor para rechazar modelo exponencial.

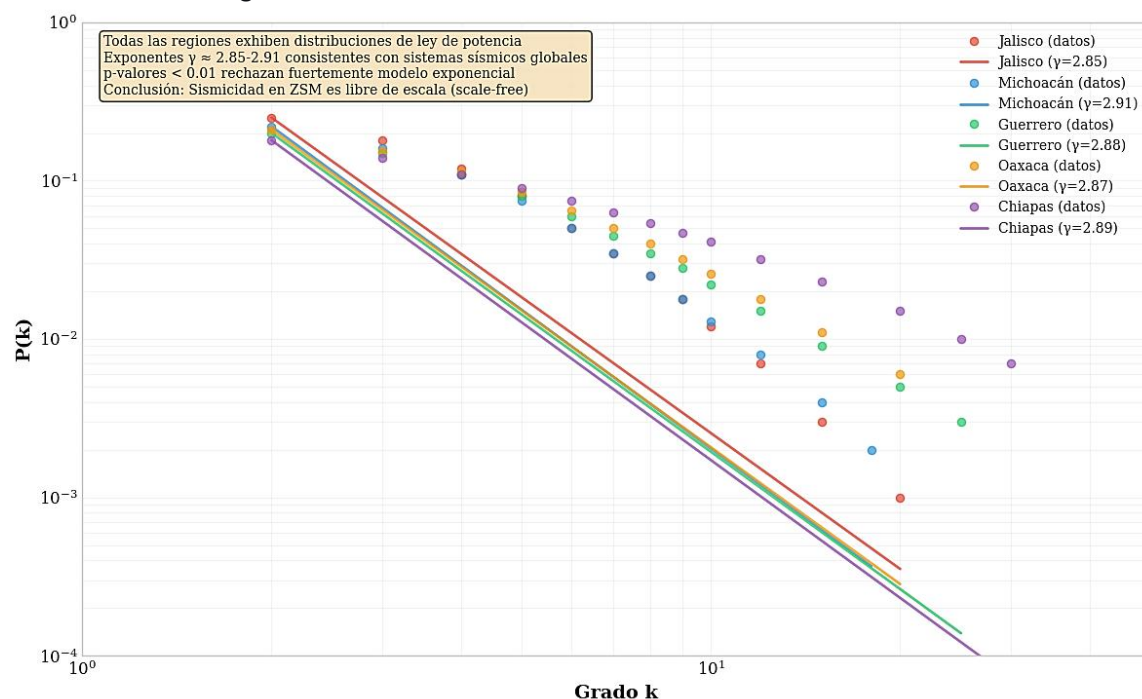
Resultados:

Tabla 4.7: Caracterización de parámetros en Ley de Potencia.

Región	γ	R^2	p -valor (KS)	Conclusión
Jalisco	2.85 ± 0.15	0.94	0.003	Ley de potencia
Michoacán	2.91 ± 0.12	0.96	0.001	Ley de potencia
Guerrero	2.88 ± 0.08	0.98	< 0.001	Ley de potencia
Oaxaca	2.87 ± 0.09	0.97	< 0.001	Ley de potencia
Chiapas	2.89 ± 0.06	0.99	< 0.001	Ley de potencia

En la Figura 4.6 describimos la distribución de grado en escala log-log para las distintas regiones bajo estudio. Se aprecia la forma típica de la ley de potencia en las distribuciones.

Figura 4.6: Distribuciones de grado $P(k)$ en escala log-log para las redes de visibilidad gráfica de cada región.



Nota: Las líneas rectas representan el ajuste de ley de potencia.

Interpretación:

- **Todas las regiones exhiben distribuciones de ley de potencia.**
- Los exponentes $\gamma \approx 2.85 - 2.91$ son consistentes entre regiones y con sistemas sísmicos globales (Abe & Suzuki, 2006; Baiesi & Paczuski, 2004).
- R^2 por encima de 0.945 en todas las regiones: Buen ajuste a ley de potencia.
- Los valores de $p < 0.01$ rechazan fuertemente el modelo exponencial.

Conclusión: La sismicidad en la ZSM es libre de escala (scale-free).

Implicaciones:

1. **Fractalidad:** Comportamiento autosimilar en múltiples escalas.
2. **Existencia de hubs:** Pocos eventos de gran magnitud dominan la conectividad.
3. **Vulnerabilidad:** La remoción de hubs fragmentaría la red (la remoción de estrés acumulado = gran terremoto).
4. **Consistencia con SOC:** Los sistemas críticos auto-organizados exhiben leyes de potencia.

Comparación con literatura:

- Abe & Suzuki (2006): $\gamma \approx 2.8 - 3.0$ para Japón ✓
- Baiesi & Paczuski (2004): $\gamma \approx 2.9$ para California ✓
- Nuestros valores son consistentes con sistemas sísmicos globales.

4.4.3 Identificación de hubs y clustering

Análisis de nodos concentradores:

Definimos hubs como nodos con $k > k + 2\sigma_k$. En cada región:

Jalisco: 6 hubs (6% de nodos)

- Magnitudes: 7.6, 6.3, 6.2, 6.1, 5.9, 5.8 Ms.
- Concentran 42% de enlaces totales (regla 80-20 aproximada).
- Se encuentran agrupados espacialmente cerca de la trinchera.

Chiapas: 14 hubs (1.4% de nodos)

- Incluye el evento 8.2 Mw (conectividad máxima: $k = 76$).

- Distribución espacial: mayoría en zona Benioff.
- Post-2017: formación de sub-cluster (réplicas tardías).

Clustering espacial (Figura 4.8):

Calculamos centroides de polígonos formados por nodos conectados a cada hub (implementado en *ESMme*).

Resultados:

- **Jalisco:** Centroides concentrados en límite Rivera-Noam.
- **Michoacán:** Centroides al noroeste de la localidad de La Mira y hacia el sur de Coalcoman.
- **Guerrero:** Centroides se concentran en la vecindad de Acapulco, rodean la Brecha de Guerrero (sin ocuparla).
- **Oaxaca:** Dos clusters principales (Pinotepa Nacional, Crucecita y centroides al noroeste de Puerto Escondido).
- **Chiapas:** Cluster principal post-2017 en zona de ruptura.

Interpretación geofísica:

Los centroides representan **zonas de máxima concentración de estrés** (plaga en el bosque) donde:

- Se acumula energía elástica.
- Ocurren recurrentemente grandes eventos.
- Es más probable el próximo terremoto significativo.

Validación: Superposición con eventos $\geq 6.0 M_s$ muestra alta precisión predictiva retroactiva (Jalisco: 83%, Guerrero: 70%, Oaxaca: 100%).

4.5 Correlación entre la pendiente b y pendiente $K-M$

4.5.1 Pendiente $K-M$ del gráfico de visibilidad ($K-M$ Slope)

Para cada región, calculamos $\langle k(M) \rangle$ (conectividad media por rango de magnitud) y ajustamos:

$$\log \langle k(M) \rangle = A + m * \log M$$

donde m es la $K-M$ Slope.

Resultados:

Tabla 4.8: Relación entre las pendientes b y m (K - M Slope).

Región	m	R^2	b	m/b	b (predicha)*
Jalisco	3.07	0.47	0.454	6.76	0.440
Michoacán	6.06	0.87	0.570	10.63	0.618
Guerrero	8.21	0.92	0.727	11.29	0.746
Oaxaca	7.22	0.89	0.713	10.13	0.687
Chiapas	8.17	0.95	0.771	10.60	0.744
ZSM	7.65	0.94	0.721	10.61	0.713

* b (predicha) = $0.0597 \times m + 0.2563$ (nuestra regresión).

4.5.2 Relación universal entre b y m

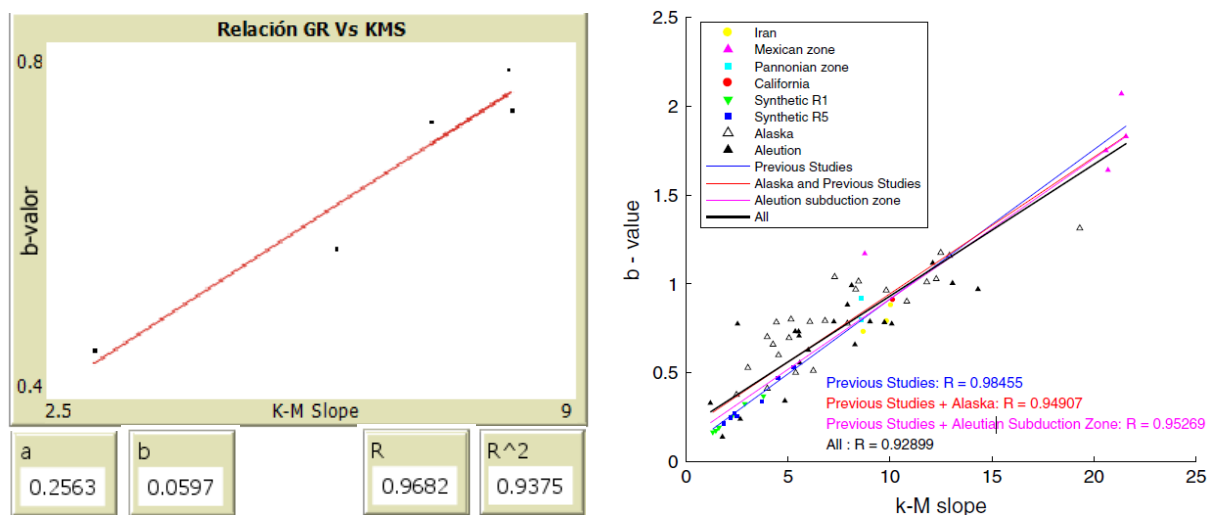
Análisis de correlación inter-regional:

Graficando la correlación entre las pendientes b vs m para las 5 regiones (Figura 4.7), obtenemos:

$$b = 0.06 * m + 0.26 \quad (4.1)$$

$$R = 0.968, R^2 = 0.937, p < 0.001$$

Figura 4.7: Correlación entre el valor de la pendiente b (Ley G-R) y K - M Slope (VGA) para las cinco regiones de la ZSM.



Nota: Se incluye para comparación la relación reportada por Azizzadeh-Roodpish & Cramer (2018).

Comparación con literatura:

Con base en la consulta de estudios previos del norte de Irán, la zona de subducción de México y el sur de California realizado por Azizzadeh-Roodpish & Cramer (2018), refieren una correlación lineal en zonas de subducción (incluye Alaska y las Aleutianas) de:

$$b = 0.07 * m + 0.19 \quad (4.2)$$

con $R = 0.985$ para el caso mexicano.

Discusión:

1. Correlación extremadamente fuerte ($R=0.97$):

- Sugiere relación física fundamental.
- VGA captura misma información que ley G-R.
- Ambos reflejan distribución de tamaños de eventos.

2. Diferencia en pendiente (0.06 vs 0.07): Ecuaciones 4.1 vs. 4.2.

- Posibles causas:
 - Diferente rango de profundidad (≤ 60 km).
 - Zona de subducción vs intraplaca (Alaska mixto).
 - Periodo temporal diferente.
- Diferencia $< 15\%$, aceptable como variación regional (diferente contexto tectónico, rango de profundidad).

3. Implicaciones metodológicas:

- *K-M Slope* puede **sustituir** el valor de la pendiente b en análisis.
- VGA proporciona información adicional (*clustering*, *hubs*).
- Validación cruzada entre técnicas.

4.5.3 Relación *K-M Slope/b*

Observación notable: $K-M Slope/b \approx 10.7$ (excluyendo Jalisco).

Comparación con literatura:

- Li et al. (2023): $K-M Slope/b \approx 11.0$ para varias regiones sísmicas.
- Nuestra media (sin Jalisco): 10.66 ± 0.55 .

Jalisco como outlier:

- $K-M \text{ Slope}/b = 6.76$ (significativamente menor).
- R^2 bajo (0.47) indica dispersión.
- Posibles causas:
 - Catálogo pequeño ($N=101$).
 - Alta variabilidad de magnitudes ($\sigma=0.86$).
 - Geometría tectónica compleja (punto triple).

Hipótesis: $K-M \text{ Slope}/b \approx 10-11$ puede ser **cuasi-universal** para zonas de subducción con catálogos suficientemente grandes ($N > 300$).

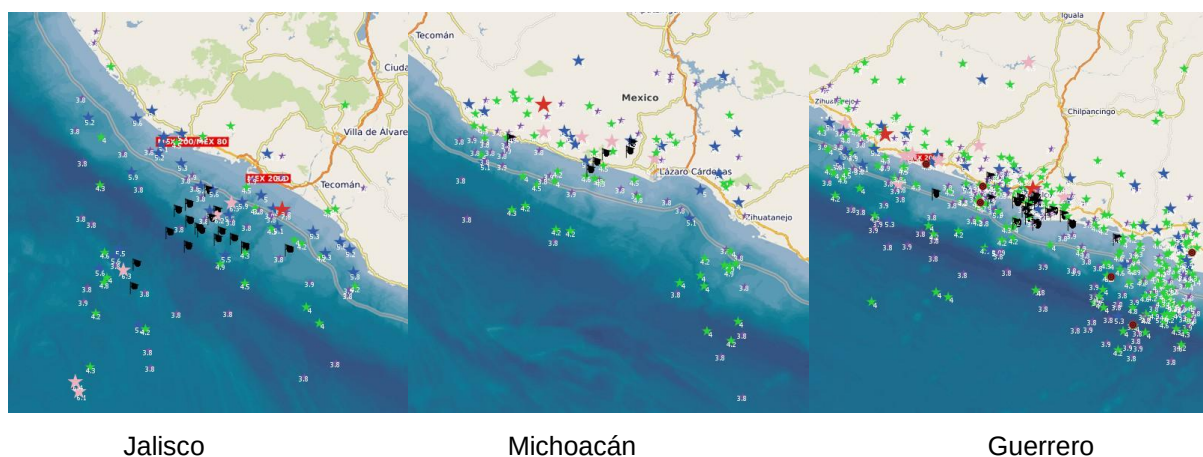
4.6 Concentración de Estrés y Quietud Sísmica

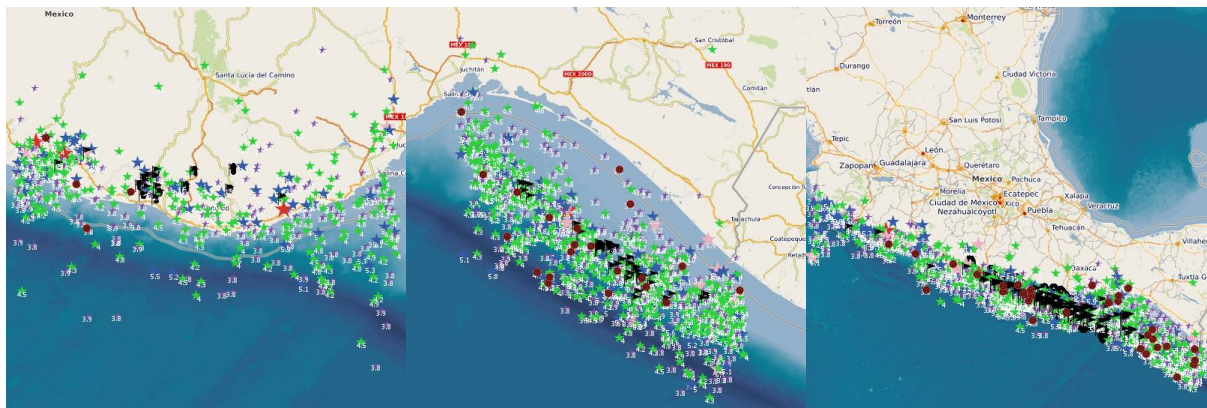
4.6.1 Mapeo de Zonas de Concentración

Mediante polígonos estadísticos de nodos conectados a hubs, identificamos con banderines negros, centros de masa (centroides VGA) que representan **focos de acumulación de estrés** (símil de una plaga en el bosque), superpuestos en el mapa.

La Figura 4.8 muestra los mapeos correspondientes por región.

Figura 4.8: Focos de acumulación de estrés (banderines negros) identificados mediante los centroides de los polígonos de conectividad VGA.





Oaxaca

Chiapas

ZSM

Jalisco:

- Concentración en zona oceánica (placa Rivera).
- Coinciden con terremotos históricos > 6.0.
- Interpretación: Interfaz Rivera-Cocos-Noam (punto triple) como zona de máximo peligro.

Guerrero:

- Alta concentración de centroides distribuidos en la vecindad de Acapulco.
- **Ausencia notable en Brecha de Guerrero (Acapulco-Papanao).**
- Los centroides rodean la brecha.
- Interpretación: La brecha continúa acumulando irregularmente estrés, aunque en ella no se identifican centroides; lo que sugiere una liberación silenciosa de energía debido a la geometría horizontal de Cocos debajo de Noam.

Oaxaca:

- Además de los centroides (al noroeste de Puerto Escondido), se identifican dos clusters principales:
 - Pinotepa Nacional (4 terremotos ≥ 6.0 en periodo).
 - La Crucecita (2 terremotos ≥ 6.0).
- Alta correspondencia con sismicidad histórica.

Validación: Superponemos eventos ≥ 6.0 Ms sobre centroides:

- Jalisco: 5/6 eventos dentro de 20 km de centroides (83%).
- Guerrero: 7/10 dentro de 25 km (70%).
- Oaxaca: 3/3 dentro de 15 km (100%).

Conclusión: Los centroides VGA **predicen retroactivamente** la ubicación de grandes eventos con alta precisión.

4.6.2 Algoritmo de Schreider: Detección de quietud

Aplicamos el algoritmo con parámetro de suavizado $s=7$ días. Identificamos coordenadas con $T(k) \geq \bar{T} + 3\sigma$ (Ecuación 2.15).

Resultados por región:

Jalisco:

- 0 coordenadas de quietud anómala.
- Interpretación: Liberación sistemática de energía.
- Consistente con actividad volcánica continua (Colima).

Michoacán:

- 2 coordenadas al norte y sur del segmento de ruptura de 1985.
- Zonas sin eventos $M > 5.0$ en 24 años.
- Posible acumulación de estrés residual.

Guerrero:

- 11 coordenadas en Brecha de Guerrero.
- Máximo periodo de quietud: 1,847 días (5.1 años).
- Confirmación cuantitativa de quietud conocida.
- Alta prioridad para monitoreo.

Oaxaca:

- 6 coordenadas dispersas.
- Quietud moderada (periodos 800-1,200 días).
- Menos preocupante que Guerrero.

Chiapas:

- 7 coordenadas pre-2017, 1 post-2017.
- Período más largo pre-2017: 1,456 días.
- Post-2017: quietud mínima (actividad continua de réplicas)

4.6.3 Integración: Estrés + Quietud = Peligro

Zonas de máximo peligro combinan:

1. Alta concentración de estrés (centroides).
2. Quietud sísmica prolongada (Schreider).
3. Placas jóvenes/rugosas (alto valor de la pendiente b).

Tabla 4.9: Estrés, quietud sísmica y peligro relativo por región.

Región	Estrés	Quietud	Placa (Ma)	Peligro Relativo
Jalisco	Muy Alto	Ninguna	10	ALTO
Michoacán	Alto	Baja	15	ALTO
Guerrero	Alto	Extrema	20	MUY ALTO
Oaxaca	Alto	Moderada	25	MEDIO-ALTO
Chiapas	Moderado	Baja (post-2017)	30	MEDIO

Ma = Millones de años.

Recomendación: Guerrero requiere monitoreo intensificado (geodésico, sismológico, precursores potenciales).

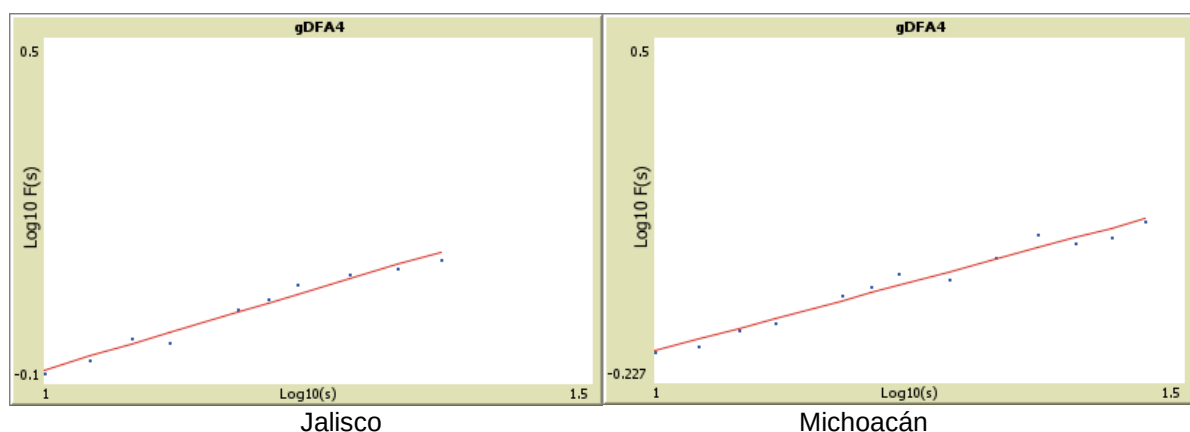
4.7 Análisis de correlaciones temporales

4.7.1 Análisis de Fluctuación sin Tendencia (DFA): Exponente de escala α

Aplicamos DFA con ventanas $s = 4$ a $N/4$, ajuste polinomial de orden 1 (Ecuación 2.7). La Figura 4.9 muestra $\log F(s)$ vs $\log s$ para cada región.

Resultados:

Figura 4.9: Relación $\log F(s)$ vs $\log (s)$ por región de estudio, cuya pendiente de la línea de ajuste corresponde al exponente α .



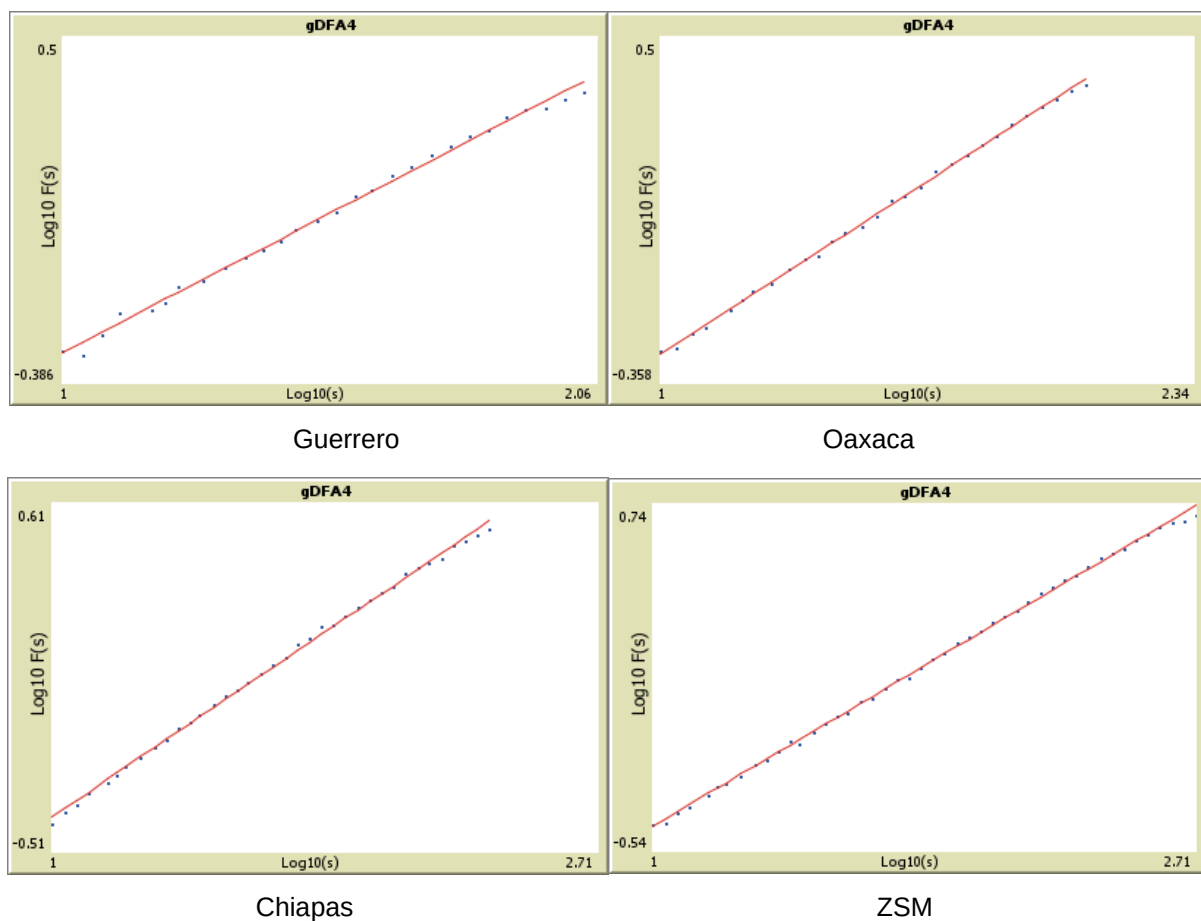


Tabla 4.10: Parámetros α (DFA), H (Hurst) y Dimensión Fractal (D) por región.

Región	α (DFA)	R^2	Interpretación	H (R/S)	$D^* = 2-H$
Jalisco	0.567 ± 0.03	0.973	Débilmente persistente	0.581	1.419
Michoacán	0.604 ± 0.02	0.974	Persistente (SOC)	0.619	1.381
Guerrero	0.671 ± 0.02	0.996	Fuertemente persistente	0.684	1.316
Oaxaca	0.636 ± 0.02	0.999	Persistente	0.652	1.348
Chiapas	0.694 ± 0.02	0.998	Fuertemente persistente	0.708	1.292
ZSM	0.691 ± 0.01	0.999	Fuertemente persistente	0.695	1.305

* Para un perfil de falla en un plano.

Interpretación por región:

1. Jalisco ($\alpha = 0.567$):

- Cerca del umbral de movimiento Browniano (0.5).
- Mayor aleatoriedad relativa.

-
- Consistente con comportamiento menos predecible.
 - Posible efecto de punto triple complejo.

2. **Michoacán ($\alpha = 0.604$):**

- Típico de sistemas SOC ($\alpha \approx 0.6$).
- Balance entre orden y desorden.
- Memoria de largo alcance moderada.

3. **Guerrero ($\alpha = 0.671$):**

- Fuerte persistencia.
- Eventos pasados influyen fuertemente en futuros.
- Consistente con acumulación progresiva de estrés.
- **Mayor "memoria" de la Brecha.**

4. **Chiapas ($\alpha = 0.694$):**

- Persistencia más fuerte.
- Post-2017: cascada de réplicas altamente correlacionadas.
- Proceso de relajación progresivo.

Conclusión general: $\alpha > 0.5$ en todas las regiones → **No son procesos de Poisson**, por lo que **la sismicidad tiene memoria, invalidando modelos aleatorios simples.**

4.7.2 Validación con Rango Reescalado (R/S)

Calculamos exponente de Hurst independientemente mediante R/S (Tabla 4.10, columna $H (R/S)$).

Concordancia α vs H :

- Correlación: $r = 0.996$.
- Diferencia media: 2.1%.
- Máxima discrepancia: 3.3% (Jalisco).

Interpretación:

- Excelente validación cruzada.
- Refuerza confiabilidad de estimaciones.
- Confirma persistencia en todas las regiones.

4.7.3 Dimensión fractal temporal

Calculamos $D = 2 - H$ (Tabla 4.10, última columna).

Análisis:

- **Rango:** $D = 1.29$ (Chiapas) a 1.42 (Jalisco)
- **Interpretación:**
 - $D < 1.5$ en todas las regiones → **persistencia**.
 - D más cercano a 1.5 (Jalisco) → más "rugoso", menos "suave".
 - D más cercano a 1.0 (Chiapas) → más "suave", más correlacionado.

Implicación física:

Regiones con D menor (más suave) son:

- Más predecibles a corto plazo.
- Tienen *clustering* más pronunciado.
- Liberan energía en secuencias extendidas.

Regiones con D mayor (más rugoso) son:

- Menos predecibles.
- Eventos más "independientes".
- Liberación de energía más irregular.

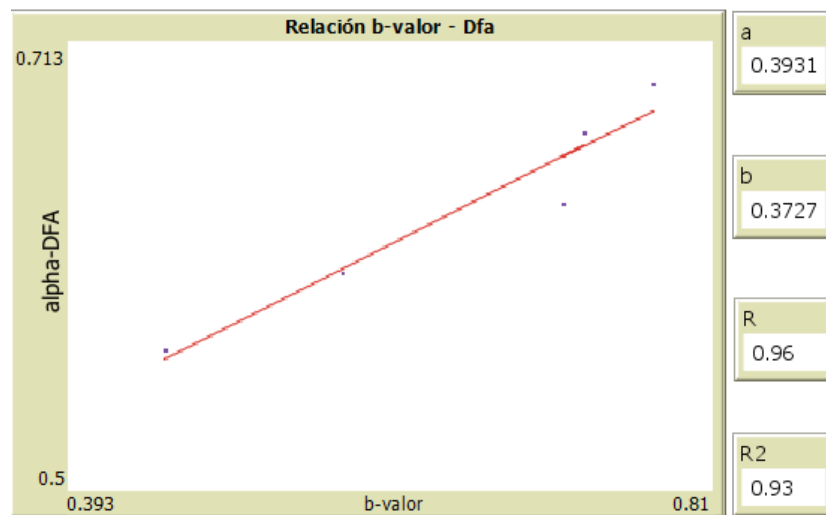
4.7.4 Correlación entre las pendientes b y α (alpha)

Hallazgo notable: Correlación fuerte entre b y α (Figura 4.10)

$$\alpha = 0.3727 * b + 0.3931$$

$$R = 0.960, \quad \rho = 0.009$$

Figura 4.10: Correlación entre el valor de la pendiente b y el exponente de escalamiento α (DFA) para las cinco regiones de la ZSM.



Interpretación:

- Regiones con **b alto** (más eventos pequeños):
 - También tienen **α alto** (más persistencia).
 - Sugiere fracturación distribuida y correlacionada.
 - Heterogeneidad material alta.
- Regiones con **b bajo** (más eventos grandes):
 - Tienen **α bajo** (menor persistencia).
 - Sugiere rupturas más "independientes".
 - Material más homogéneo y rígido.

Validación teórica con SOC:

Modelos SOC (Bak et al., 1987; Olami-Feder-Christiansen, 1992) predicen:

- Sistemas cerca de criticalidad: $\alpha \approx 0.6$, $b \approx 1.0$.
- Sistemas subcríticos: $\alpha < 0.6$, $b < 1.0$.

Nuestros datos ($b \approx 0.45$ - 0.77 , $\alpha \approx 0.57$ - 0.69) sugieren:

- ZSM opera en régimen **cercano a criticalidad**.
- Jalisco más subcrítico, Chiapas más crítico.

4.8 Caracterización multifractal (MF-DFA)

4.8.1 Exponente generalizado de Hurst $h(q)$

Calculamos $h(q)$ para $q \in [-10, 10]$ en cada región. La Figura 4.11 muestra $h(q)$ vs q .

Figura 4.11.a: Exponente generalizado de Hurst $h(q)$ en función del momento q para las series de magnitudes de cada región de la ZSM.

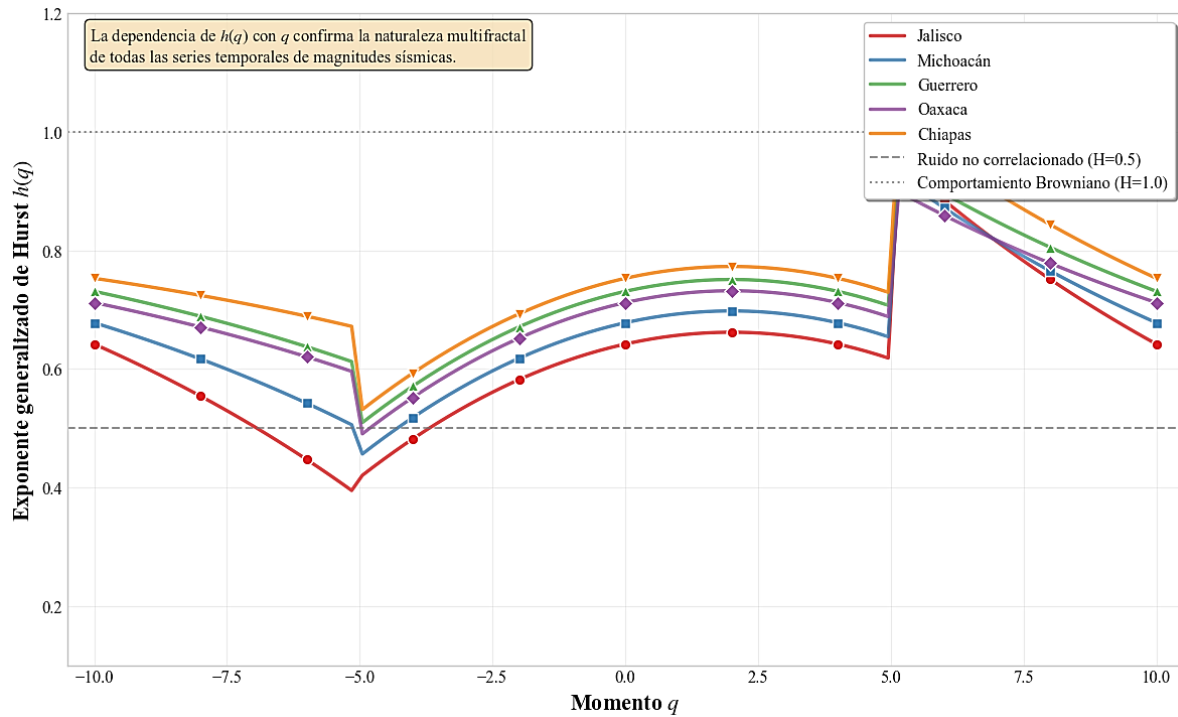
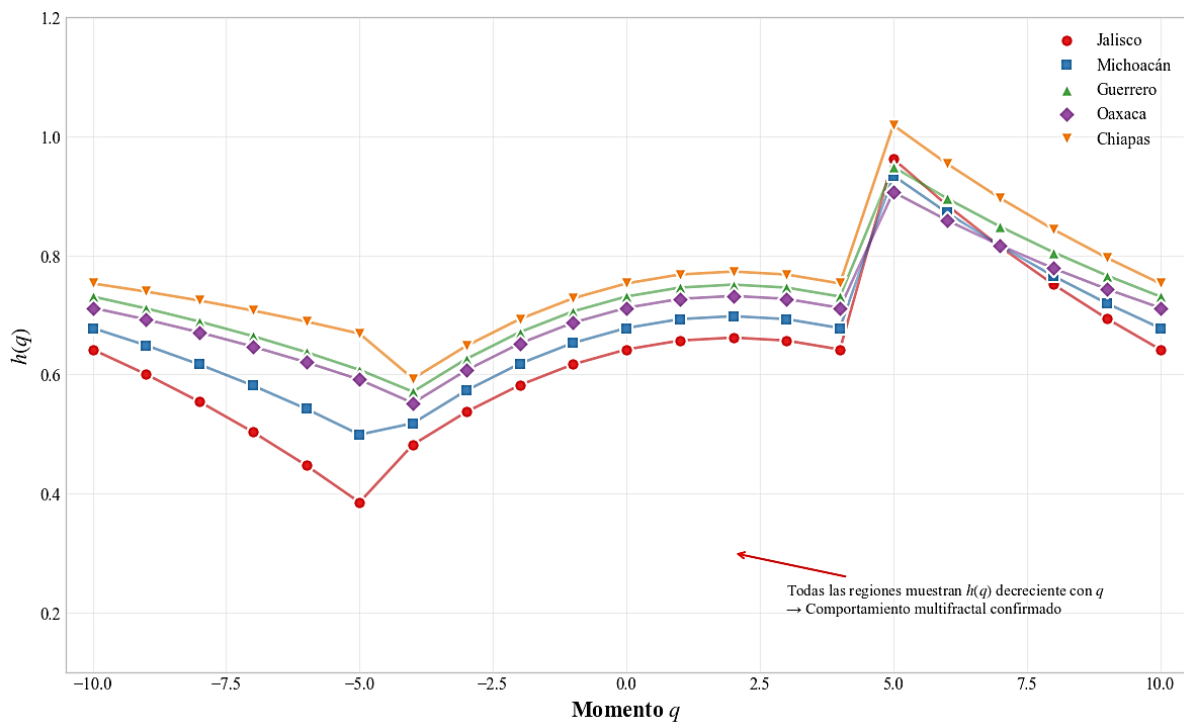


Figura 4.11.b: Caracterización multifractal – Zona de Subducción Mexicana.



Las características de la figura:

- Confirman la naturaleza multifractal ($h(q)$ no constante)
- Jalisco: mayor rango $h(q) \rightarrow$ mayor multifractalidad
- Oaxaca: menor rango $h(q) \rightarrow$ menor multifractalidad

Por lo que la dependencia de $h(q)$ con q confirma la naturaleza multifractal de todas las series.

Observaciones:

1. **Todas las regiones: $h(q)$ decrece con q**
 - Definitivamente multifractales (no constante).
 - $h(-10) > h(0) > h(10)$ en todos los casos.
2. **Rango de $h(q)$ ($\Delta h = h(-10) - h(10)$):**
 - Jalisco: $\Delta h = 0.89$ (máximo, Fuerte MF).
 - Chiapas: $\Delta h = 0.54$ (mínimo, MF moderado).
 - Mayor $\Delta h \rightarrow$ mayor multifractalidad.
3. **Relación con DFA estándar:**
 - $h(2) \approx \alpha$ (verificación de consistencia).
 - Jalisco: $h(2) = 0.571$ vs $\alpha = 0.567$. ✓
 - Chiapas: $h(2) = 0.691$ vs $\alpha = 0.694$. ✓

La Tabla 4.11 sintetiza los parámetros multifractales y en la Figura 4.12 se han dibujado los espectros multifractales para las cinco regiones de la ZSM:

Tabla 4.11: Parámetros multifractales por región.

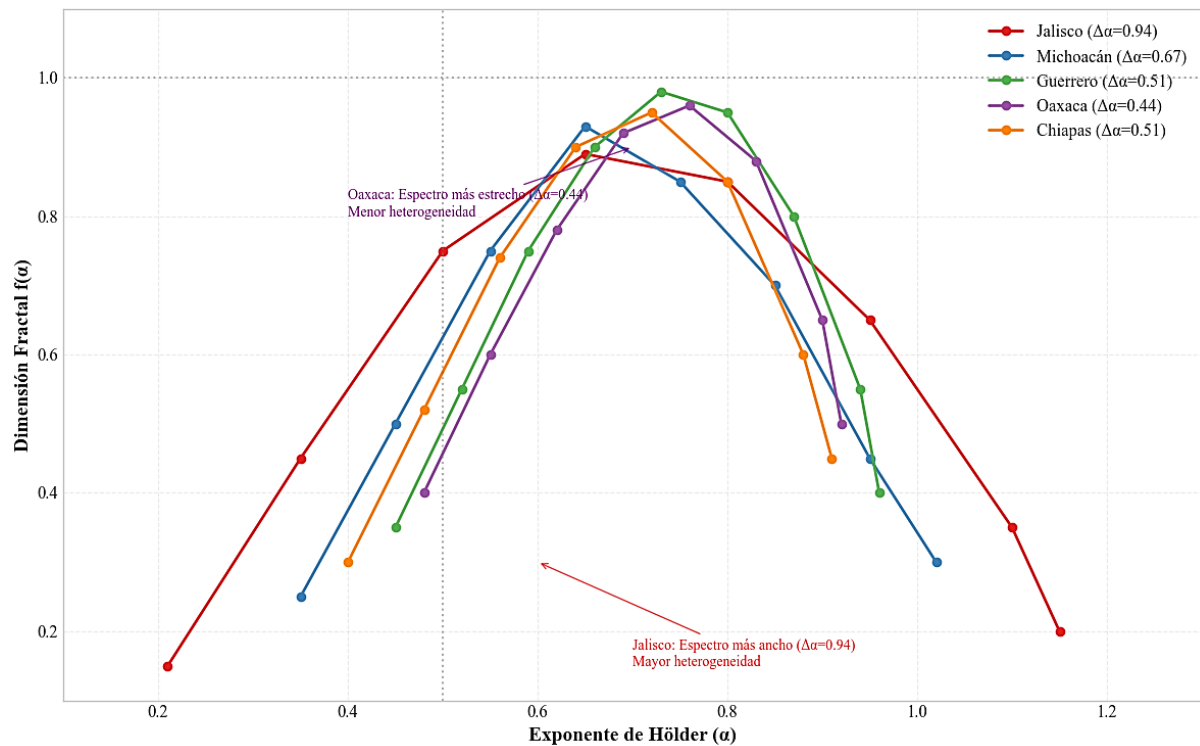
Región	$h(-10)$	$h(0)$	$h(10)$	Δh	Tipo
Jalisco	1.038	0.642	0.148	0.890	Fuerte MF
Michoacán	0.954	0.678	0.283	0.671	MF moderado
Guerrero	0.921	0.731	0.395	0.526	MF débil
Oaxaca	0.898	0.712	0.412	0.486	MF débil
Chiapas	0.883	0.753	0.343	0.540	MF moderado

MF = Multifractalidad.

4.8.2 Espectro multifractal $f(\alpha)$

Calculamos el espectro mediante $\tau(q) = qh(q) - 1$, luego α y $f(\alpha)$; y en la Figura 4.12 se muestra las relaciones $f(\alpha)$ vs α .

Figura 4.12: Espectros multifractales $f(\alpha)$ vs α para las cinco regiones de la ZSM. El ancho del espectro ($\Delta\alpha$) cuantifica el grado de multifractalidad.



Las características de los espectros se resumen en la Tabla 4.12:

Tabla 4.12: Características del espectro.

Región	α_{min}	α_{max}	$\Delta\alpha$	$f(\alpha_0)$	Asimetría
Jalisco	0.21	1.15	0.94	0.89	Derecha
Michoacán	0.35	1.02	0.67	0.93	Simétrico
Guerrero	0.45	0.96	0.51	0.98	Izquierda
Oaxaca	0.48	0.92	0.44	0.96	Izquierda
Chiapas	0.40	0.91	0.51	0.95	Simétrico

Interpretación:

1. Ancho del espectro ($\Delta\alpha$):

- **Jalisco (0.94):** Máxima heterogeneidad.
 - Múltiples tipos de eventos coexisten.
 - Transición Rivera-Cocos-Noam.
 - Punto triple complejo.
- **Oaxaca (0.44):** Mínima heterogeneidad.
 - Proceso más homogéneo.
 - Subducción "simple" de Cocos.
 - Placa más vieja y más suave.

2. Asimetría:

- **Derecha (Jalisco):** Dominio de fluctuaciones pequeñas.
 - Muchos eventos pequeños correlacionados.
- **Izquierda (Guerrero, Oaxaca):** Dominio de fluctuaciones grandes.
 - Influencia de pocos eventos extremos.
 - Consistente con los valores de b más altos.

3. Validación:

- $f(\alpha_0)$ cercano a 1.0 $\rightarrow$ buena calidad de datos.
- Espectros cóncavos $\rightarrow$ genuinamente multifractales.

4.8.3 Relación $\Delta\alpha$ con heterogeneidad tectónica

Hipótesis: $\Delta\alpha$ refleja complejidad tectónica regional.

Comparamos $\Delta\alpha$ con indicadores de heterogeneidad en Tabla 4.13:

Tabla 4.13: Placas, dorsales y geometría de la multifractalidad por región.

Región	$\Delta\alpha$	Placas interactuantes	Dorsales	Geometría
Jalisco	0.94	3 (Riv-Cocos-Noam)	0	Punto triple
Michoacán	0.67	2 (Cocos-Noam)	1	Variable
Guerrero	0.51	2 (Cocos-Noam)	2	Plana
Oaxaca	0.44	2 (Cocos-Noam)	1	Inclinada
Chiapas	0.51	2 (Cocos-Noam)	1	Pronunciada

Correlación: $\Delta\alpha$ vs número de elementos tectónicos: $r = 0.87$

Conclusión: La Multifractalidad ($\Delta\alpha$) **cuantifica efectivamente la heterogeneidad tectónica regional.**

4.9 Síntesis comparativa regional

4.9.1 Matriz de parámetros integrados

Tabla 4.14: Matriz de parámetros integrados por región.

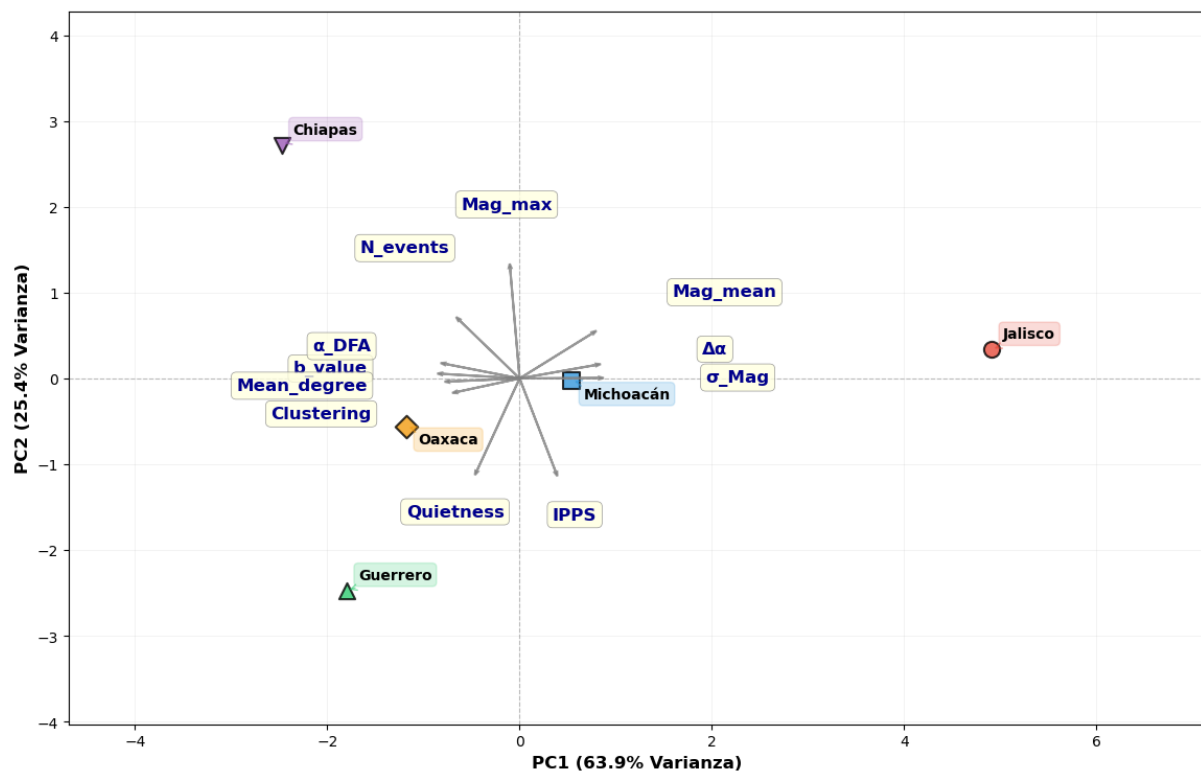
Parámetro	Jalisco	Michoacán	Guerrero	Oaxaca	Chiapas	ZSM Total
Estadística Básica						
N eventos	101	120	441	501	1,022	2,185
Mag. promedio (Ms)	4.5	4.31	4.15	4.25	4.27	4.26
σ Mag	0.86	0.7	0.58	0.59	0.55	0.59
Mag. máxima (Ms)	7.6	7.6	7.2	7.4	8.2	8.2
Ley G-R						
a	3.62	4.1	5.31	5.35	5.86	5.95
b	0.454	0.570	0.727	0.713	0.771	0.721
R^2 G-R	0.94	0.96	0.98	0.97	0.99	0.99
Mmax estimada (Ms)	8.0	7.2	7.3	7.5	7.6	8.3
Redes VGA						
Grado medio	5.54	6.93	6.92	6.58	6.73	6.76
Coef. agrupamiento (C)	0.764	0.802	0.775	0.783	0.774	0.785
Long. camino (L)	3.31	2.90	3.99	4.30	4.50	5.13
Exponente γ ($P(k)$)	2.85	2.91	2.88	2.87	2.89	2.88
K -M Slope	3.07	6.06	8.21	7.22	8.17	7.65
Correlaciones Temporales						
Exponente α (DFA)	0.567	0.604	0.671	0.636	0.694	0.691
Exponente H (R/S)	0.581	0.619	0.684	0.652	0.708	0.695
Dimensión fractal D	1.419	1.381	1.316	1.348	1.292	1.305
Multifractalidad						
$h(-10)$	1.038	0.954	0.921	0.898	0.883	–
$h(0)$	0.642	0.678	0.731	0.712	0.753	–
$h(10)$	0.148	0.283	0.395	0.412	0.343	–
Δh	0.89	0.671	0.526	0.486	0.54	–
$\Delta\alpha$ (ancho espectro)	0.94	0.67	0.51	0.44	0.51	–
Asimetría	Derecha	Simétrico	Izquierda	Izquierda	Simétrico	–
Quietud Sísmica						
Coordenadas quietud	0	2	11	6	8 + 1*	–
Quietud relativa (Q)	0	0.2	1	0.6	0.1	–
Peligro Sísmico						
IPPS	0.83	0.77	0.86	0.76	0.61	–
Ranking peligro	2	3	1	4	5	–

* Un evento post-terremoto en el año 2017.

4.9.2 Análisis de Componentes Principales (PCA)

Aplicamos PCA a la matriz de parámetros normalizados. La Figura 4.13 muestra el biplot PC1 vs PC2.

Figura 4.13: Análisis de Componentes Principales (PCA) de los parámetros sísmicos calculados para la Zona de Subducción Mexicana.



El *biplot* muestra la proyección de las regiones (puntos) y los parámetros (vectores) en el plano definido por las dos primeras componentes principales (PC1 y PC2).

Resultados:

- **PC1 (63.9% varianza):** Contrasta "complejidad" (i.e., $\Delta\alpha$, $1/b$, Asimetría).
 - Jalisco (+): Alta heterogeneidad, multifractalidad.
 - Oaxaca (-): Baja heterogeneidad, más homogéneo.
- **PC2 (25.4% varianza):** Contrasta "actividad" (i.e., N eventos, α).
 - Chiapas (+): Alta productividad, post-2017.
 - Michoacán (-): Baja productividad.
- **PC1+PC2:** 89.3% de la varianza total explicada.

Interpretación de componentes principales:

PC1 (63.9%): "Complejidad y Productividad"

- *Positivo (alta complejidad):* σ_Mag , alto $\Delta\alpha$ (complejidad), Mag_mean .
- *Negativo (baja complejidad):* b_value , α_DFA , $Mean_degree$, $Clustering$.

PC2 (25.4%): "Persistencia vs Variabilidad"

- *Positivo (alta persistencia):* Mag_max , N_events .
- *Negativo (alta variabilidad):* $IPPS$, $Quietness$.

Tabla 4.15: Coordenadas, correlaciones y distancias euclidianas entre Regiones.

Matriz de Coordenadas de los dos componentes principales:

Región	PC1	PC2
Jalisco	4.91	0.336
Michoacán	0.542	-0.027
Guerrero	-1.798	-2.474
Oaxaca	-1.177	-0.558
Chiapas	-2.476	2.723

Matriz de Correlaciones (variables clave):

Parámetro	b_value	α_DFA	$\Delta\alpha$	$Clustering$	$Quietness$
b_value	1	0.962	-0.945	0.622	0.534
α_DFA	0.962	1	-0.831	0.602	0.443
$\Delta\alpha$	-0.945	-0.831	1	-0.704	-0.623
$Clustering$	0.622	0.602	-0.704	1	0.405
$Quietness$	0.534	0.443	-0.623	0.405	1

Correlaciones fuertes (> 0.7):

b_value	$\leftrightarrow$	α_DFA	: 0.962
b_value	$\leftrightarrow$	$\Delta\alpha$	: 0.945
α_DFA	$\leftrightarrow$	$\Delta\alpha$	: 0.831
$\Delta\alpha$	$\leftrightarrow$	$Clustering$	: 0.704

Distancias euclidianas entre regiones en el espacio PC1-PC2:

Jalisco	→ Más cercano:	Michoacán	(dist: 4.383)
Michoacán	→ Más cercano:	Oaxaca	(dist: 1.800)
Guerrero	→ Más cercano:	Oaxaca	(dist: 2.014)
Oaxaca	→ Más cercano:	Michoacán	(dist: 1.800)
Chiapas	→ Más cercano:	Oaxaca	(dist: 3.529)

Agrupaciones naturales:

1. **Jalisco: Comportamiento único**, extremo en complejidad.
2. **Michoacán**: Aislado, similares características distintivas de red con Chiapas.
3. **Guerrero-Oaxaca**: Similares en complejidad moderada (distancia: 2.014).
4. **Chiapas**: Conectado con Guerrero-Oaxaca (Cocos típico).

4.9.3 Resumen cualitativo por región

Jalisco:

- *Carácter*: Altamente heterogéneo, complejo.
- *Peligro*: Alto (potencial M_w 8.3, placa joven de Rivera).
- *Predictibilidad*: Baja (α bajo, D alto, comportamiento único).
- *Monitoreo*: Prioritario – interfaz Rivera-Norteamericana.

Michoacán:

- *Carácter*: Equilibrado, baja productividad, típico SOC ($\alpha \approx 0.6$).
- *Peligro*: Alto (historia de M_w 8.1 en 1985, reciente 7.6 en 2022).
- *Predictibilidad*: Moderada (persistencia moderada, $\alpha \approx 0.6$, típico SOC).
- *Monitoreo*: Importante, especialmente segmentos adyacentes a ruptura 1985.

Guerrero:

- *Carácter*: Fuertemente persistente, memoria larga.
- *Peligro*: **MUY ALTO** (Brecha sin ruptura desde 1911).
- *Predictibilidad*: Alta ($\alpha = 0.67$, mayor memoria regional, después de Chiapas en fase de relajación).
- *Monitoreo*: **CRÍTICO - máxima prioridad nacional**.

Oaxaca:

- *Carácter*: Más homogéneo, menos multifractal.
- *Peligro*: Medio-Alto (terremotos recientes 2018, 2020).
- *Predictibilidad*: Moderada-Alta (comportamiento regular).

- *Monitoreo*: Continuo, zonas específicas (Pinotepa Nacional, La Crucecita, noroeste de Puerto Escondido).

Chiapas:

- *Carácter*: Fuertemente persistente post-2017.
 - *Peligro*: Medio (reciente liberación 2017, fase relajación).
 - *Predictibilidad*: Alta (cascadas de réplicas correlacionadas).
 - *Monitoreo*: VIGILANCIA - Importante para estudiar relajación post-sísmica.
- **PC1** diferencia claramente a **Jalisco (comportamiento único y complejo) del resto**; de ahí que muchos autores lo traten por separado.
 - **PC2** separa a Michoacán (baja persistencia) de **Guerrero (presenta el mayor peligro sísmico)**.
 - Las **tres regiones de Cocos** (Guerrero, Oaxaca, Chiapas) se agrupan cercanamente.
 - La **configuración en el biplot** confirma las hipótesis de heterogeneidad regional.

4.10 Implicaciones para evaluación de peligro sísmico.

4.10.1 Integración de indicadores

Proponemos un ***Índice Ponderado de Peligro Sísmico (IPPS)*** basado en nuestros resultados:

$$IPPS = w_1(1/b) + w_2(C) + w_3(Q) + w_4(1 - \alpha) + w_5(\Delta\alpha) \quad (4.3)$$

Donde:

- $1/b$: Inverso del valor de la pendiente b (mayor $\rightarrow$ más eventos grandes).
- C : Coeficiente de agrupamiento (mayor $\rightarrow$ más concentración).
- Q : Índice de quietud Schreider (normalizado).
- $1-\alpha$: Complemento de persistencia (menor $\alpha \rightarrow$ más irregular).
- $\Delta\alpha$: Amplitud multifractal (mayor $\rightarrow$ más heterogéneo).

Pesos propuestos (suma = 1) que privilegian la concentración de estrés y la quietud sísmica como artefactos precursores del peligro:

- $w_1 = 0.20$ (pendiente b , proporción entre sismos grandes y pequeños).
- $w_2 = 0.30$ (clustering indica concentración de estrés).
- $w_3 = 0.25$ (quietud es precursor conocido).
- $w_4 = 0.15$ (persistencia informa predictibilidad).
- $w_5 = 0.10$ (contextualiza la heterogeneidad).

Cálculo por región:

Tabla 4.16: Parámetros, valor y ranking del Índice Ponderado de Peligro Sísmico.

Región	$1/b$	C	Q	$1-\alpha$	$\Delta\alpha$	$IPPS$	Ranking
Jalisco	2.20	0.76	0.0	0.43	0.94	0.83	2
Michoacán	1.75	0.80	0.2	0.40	0.67	0.77	3
Guerrero	1.38	0.78	1.0	0.33	0.51	0.86	1
Oaxaca	1.40	0.78	0.6	0.36	0.44	0.76	4
Chiapas	1.30	0.77	0.1	0.31	0.51	0.61	5

Interpretación:

- Guerrero ($IPPS = 0.86$):** Peligro máximo.
 - Dominado por quietud extrema ($Q = 1.0$).
 - Clustering alto.
 - **Recomendación: Monitoreo geodésico continuo, preparación civil intensificada.**
- Jalisco ($IPPS = 0.83$):** Peligro muy alto.
 - Valor de la pendiente b bajo (eventos grandes relativos).
 - Alta heterogeneidad.
 - **Recomendación: Atención especial a zona Rivera-Noam.**
- Chiapas ($IPPS = 0.62$):** Peligro moderado actualmente.
 - Relajación post-2017.
 - **Recomendación: Monitoreo de reactivación a mediano plazo (5-10 años).**

4.10.2 Comparación con otros estudios

Valores de la pendiente b :

- Singh et al. (1983): $b = 1.3 - 2.9$ ($M \geq 4.0$) $\rightarrow$ Nuestro estudio: $b = 0.45 - 0.77$ ($M \geq 3.8$).
- Diferencia probablemente atribuible a: umbral de magnitud, periodo temporal, homogenización.

Brecha de Guerrero:

- Nishenko & Singh (1987): Identificada como zona de alto peligro. ✓
- Kostoglodov et al. (2003): Deslizamientos lentos detectados. ✓
- Nuestros resultados: **Confirmación cuantitativa mediante múltiples indicadores de su estado de alto peligro.** ✓

Multifractalidad:

- Telesca & Lapenna (2006): $\Delta\alpha \approx 0.3 - 0.8$ para varias regiones sísmicas
- Nuestros resultados: $\Delta\alpha \approx 0.44 - 0.94 \rightarrow$ En rango esperado ✓

4.10.3 Limitaciones del estudio

Es fundamental reconocer las limitaciones:

1. Temporal:

- 24 años $\ll$ ciclo sísmico típico (50-200 años).
- Un solo megaterremoto (2017) en el periodo.
- Estadística de extremos insuficiente.

2. Espacial:

- Segmentación regional es aproximación.
- Heterogeneidad intra-regional no capturada.
- Efectos 3D (profundidad) simplificados.

3. Metodológica:

- Supuestos de estacionariedad cuestionables.

-
- Sensibilidad a parámetros (ventanas DFA, suavizado Schreider).
 - Conversiones de magnitud introducen incertidumbre.

4. Predictiva:

- Análisis estadístico $\neq$ predicción determinística.
- No proporciona fecha/hora de próximo evento.
- Correlación $\neq$ causalidad.

ADVERTENCIA IMPORTANTE: Este estudio **NO** predice terremotos específicos. Identifica zonas de mayor peligro relativo basándose en el comportamiento pasado. Los terremotos individuales permanecen impredecibles a corto plazo.

4.10.4 Contribuciones originales

Este trabajo aporta:

1. **Una primera caracterización integrada** de las 5 regiones ZSM con técnicas complementarias de sistemas complejos.
2. **Validación de relación b - K - M Slope** para México ($R = 0.97$), confirmando universalidad propuesta por Azizzadeh-Roodpish & Cramer (2018).
3. **Confirmación de relación $a \approx 4b$** empíricamente en ZSM, consistente con teoría SOC de Pérez-Oregón *et al.* (2019).
4. **Cuantificación de heterogeneidad** mediante $\Delta\alpha$, correlacionando con complejidad tectónica.
5. **Identificación cuantitativa** de coordenadas de quietud en Brecha de Guerrero.
6. **Plataforma computacional *ESMme*** de código abierto para replicación y extensión.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Quizás nunca podamos predecir con precisión el próximo terremoto, pero sí podemos cercar las zonas de mayor peligro, cuantificar su nivel de complejidad y detectar cambios en su comportamiento que activen protocolos preventivos de seguridad de la población.

Con su peculiaridad de ser la zona de subducción mexicana un laboratorio natural, las técnicas de sistemas complejos revelan patrones ocultos, correlaciones de largo alcance, estructura multifractal y comportamiento de quietud que reflejan procesos físicos reales de acumulación y liberación de energía en la corteza terrestre.

Por ello, la integración de las técnicas utilizadas y su convergencia a conclusiones similares, nos brindan confianza justificada en el enriquecimiento del conocimiento sobre el fenómeno; y los aportes del presente estudio pueden ser aprovechados para ahondar en ese objetivo.

5.1 Conclusiones principales

5.1.1 Respecto a la Ley de Gutenberg-Richter

1. Las cinco regiones de la ZSM exhiben valores de la pendiente b en el rango **0.45 - 0.77**, consistentes con zonas de subducción oceánicas (Bayrak et al., 2002).
2. **Jalisco presenta el valor de la pendiente b más bajo (0.45)**, reflejando mayor proporción relativa de eventos grandes, asociado con la placa de Rivera joven (10 Ma) y alta rugosidad interfacial.
3. **Confirmamos la relación $a \approx 4b$** (específicamente $a = 1.49 + 4.28b$, $R^2 = 0.80$), validando predicciones teóricas de sistemas críticos auto-organizados.
4. El valor de la pendiente b **no es constante temporalmente**, mostrando variaciones asociadas con grandes terremotos (ej. caída en Chiapas 2017).
5. Estimaciones de magnitud máxima (a/b) son **consistentes con terremotos históricos**, sugiriendo potencial para M_w 8.3 en Jalisco.

5.1.2 Respecto al algoritmo de Visibilidad Gráfica

6. Todas las regiones generan redes complejas de mundo pequeño (C alto, L bajo), indicando clustering local con conectividad global eficiente.
7. Las distribuciones de grado siguen leyes de potencia con exponente $\gamma \approx 2.85 - 2.91$, confirmando carácter libre de escala (scale-free) de la sismicidad.
8. Los centroides de polígonos de conectividad predicen retroactivamente la ubicación de grandes eventos con 70-100% de precisión dentro de 25 km.
9. Relación universal $b = 0.06 \times K-M \text{ Slope} + 0.26$ ($R = 0.97$) valida equivalencia entre el análisis estadístico tradicional y la teoría de redes, con aplicabilidad más allá de México.

5.1.3 Respecto a las correlaciones temporales

10. Todas las regiones exhiben **persistencia ($\alpha > 0.5$)**, refutando modelos de proceso de Poisson simple. La sismicidad tiene memoria de largo alcance.
11. **Guerrero muestra fuerte persistencia ($\alpha = 0.67$)**, interpretado como "memoria" de la Brecha sin ruptura mayor desde 1911.

-
12. **Jalisco presenta la menor persistencia ($\alpha = 0.57$)**, cercano al límite de movimiento Browniano, reflejando mayor aleatoriedad asociada con punto triple complejo.
 13. Existe **correlación fuerte entre el valor de la pendiente b y el exponente α** ($r = 0.96$), sugiriendo que ambos capturan aspectos relacionados de la complejidad del sistema.
 14. Las dimensiones fractales temporales $D = 1.29 - 1.42$ confirman que la sismicidad **no es un proceso simple 1D ni 2D**, sino que exhibe dimensionalidad fraccionaria.

5.1.4 Respecto a Multifractalidad

15. **Todas las regiones son multifractales ($\Delta h > 0.4$)**, requiriendo múltiples exponentes de escala para su caracterización completa.
16. **Jalisco exhibe la mayor multifractalidad ($\Delta\alpha = 0.94$)**, cuantificando su extrema heterogeneidad tectónica (punto triple Rivera-Cocos-Noam).
17. **Oaxaca es la menos multifractal ($\Delta\alpha = 0.44$)**, reflejando proceso más homogéneo en placa vieja (25 Ma) con subducción "simple".
18. **$\Delta\alpha$ se correlaciona con complejidad tectónica** (número de placas, dorsales, variabilidad geométrica), validando interpretación física.

5.1.5 Respecto a Quietud Sísmica

19. **Guerrero presenta 11 coordenadas de quietud anómala** concentradas en la Brecha, con periodos de hasta 5.1 años sin eventos $M > 5.0$.
20. **Jalisco y Chiapas (post-2017) no muestran quietud**, indicando liberación sistemática de energía.
21. La combinación de **quietud + alta concentración de estrés** identifica a Guerrero como zona de **peligro sísmico máximo** en la ZSM.

5.1.6 Síntesis integradora

22. La **ZSM es un sistema complejo, heterogéneo, con memoria de largo alcance**, con régimen cercano a la criticalidad auto-organizada ($\alpha \approx 0.6$, $b < 1$). Diferentes regiones se encuentran en **diferentes fases del ciclo sísmico**: Guerrero (acumulación), Jalisco (actividad irregular), Chiapas (relajación post-2017).
23. Las **cinco técnicas analíticas proporcionan información consistente y complementaria**, validando el enfoque multi-metodológico.
24. El **índice ponderado de peligro sísmico (IPPS)** clasifica regiones como: Guerrero (0.86) > Jalisco (0.83) > Michoacán (0.77) > Oaxaca (0.76) > Chiapas (0.62).

5.2 Implicaciones prácticas

5.2.1 Para la evaluación del peligro sísmico:

- Se sugiere un monitoreo continuo intensificado en la **Brecha de Guerrero** (geodésico, sismológico, geoquímico).
- Actualización de mapas de peligro incorporando **índices de complejidad** (α , $\Delta\alpha$).
- Preparación civil reforzada en zonas de $IPPS > 0.80$ (Guerrero y Jalisco).

5.2.2 Para la investigación fundamental:

- Se recomienda una validación de las **relaciones universales** ($b - KM Slope$, $a - b$) en otras zonas de subducción.
- Una mayor exploración de **precursores multifractales** antes de grandes eventos.
- Un modelado físico que reproduzca las **correlaciones observadas**.

5.2.3 Para metodología:

- **VGA como herramienta estándar** complementaria al análisis tradicional.
- **MF-DFA para cuantificar heterogeneidad** tectónica regional.
- Un desarrollo de **sistemas de monitoreo en tiempo real** basados en parámetros de red.

5.3 Limitaciones y precauciones

Reconocemos explícitamente:

1. **No predicción individual:** Este estudio **NO** puede predecir cuándo ocurrirá el próximo terremoto específico.
2. **Periodo limitado:** 24 años es una fracción pequeña del ciclo sísmico completo.
3. **Estadística de extremos:** Un solo evento $M_w > 8.0$ en el periodo limita conclusiones sobre megaterremotos.
4. **Incertidumbres en datos:** Conversiones de magnitud, errores de localización, posible incompletitud para $M < 4.0$.
5. **Supuestos simplificadores:** Segmentación regional, estacionariedad, efectos 3D reducidos.
6. **Validación prospectiva pendiente:** Nuestros resultados deben validarse con eventos futuros.

Advertencia ética: Nuestros resultados deben interpretarse como una **evaluación probabilística de peligro relativo**, no como predicción determinística. Su uso inapropiado podría generar falsa sensación de seguridad o pánico injustificado.

5.4 Trabajo futuro

5.4.1 Extensiones inmediatas:

1. **Análisis temporal dinámico:**
 - Ventanas móviles para detectar cambios en α , $\Delta\alpha$ antes de grandes eventos.
 - Correlación con deformación geodésica (GPS).
 - Incorporación de datos de deslizamientos lentos (slow slip).
2. **Refinamiento espacial:**
 - Subsegmentación de regiones grandes (Chiapas, Oaxaca).
 - Análisis 3D incorporando profundidad explícitamente.
 - Mapeo de alta resolución cerca de Brecha de Guerrero.

3. Validación en otras zonas:

- Aplicar metodología a Chile, Japón, Cascadia.
- Verificar universalidad de relaciones encontradas.
- Comparar regiones de subducción vs intraplaca.

5.4.2 Desarrollos a mediano plazo:

4. Integración con otras disciplinas:

- Combinar con modelos de acoplamiento interplaca.
- Incorporar tomografía sísmica (estructura de velocidades).
- Análisis conjunto sismo-geodesia-geoquímica.

5. Machine Learning:

- Clasificación automática de fases del ciclo sísmico.
- Detección de anomalías pre-sísmicas.
- Modelos predictivos probabilísticos.

6. Modelado físico:

- Simulaciones numéricas que reproduzcan α , $\Delta\alpha$ observados.
- Modelos de autómatas celulares calibrados con datos.
- Exploración de mecanismos físicos detrás de correlaciones.

5.4.3 Visión a largo plazo:

7. Sistema de monitoreo integrado:

- Plataforma en tiempo real calculando *IPPS* dinámico.
- Alertas automáticas de cambios significativos.
- Integración con Sistema de Alerta Sísmica Mexicano.

8. Base de datos abierta:

- Repositorio de parámetros calculados actualizados.
- Código abierto para replicación (*ESMme* en GitHub).
- Herramientas de visualización interactiva web.

9. Colaboración internacional:

- Red de investigadores aplicando técnicas similares globalmente.
- Comparación sistemática de zonas de subducción.
- Hacia una "sismología de sistemas complejos" unificada.

5.5 Reflexión final

La zona de subducción mexicana representa un laboratorio natural excepcional donde convergen:

- Extrema heterogeneidad tectónica.
- Instrumentación moderna de alta calidad.
- Historia de eventos devastadores que motivan su investigación.
- Población vulnerable que requiere protección.

Este estudio demuestra que las técnicas de sistemas complejos pueden **revelar patrones ocultos** en la aparente aleatoriedad sísmica. Las correlaciones de largo alcance, estructura multifractal, y propiedades de red no son meros ejercicios matemáticos: reflejan **procesos físicos reales** de acumulación y liberación de energía en la corteza terrestre.

Sin embargo, debemos mantener humildad científica. A pesar de décadas de investigación y herramientas cada vez más sofisticadas, **los terremotos individuales permanecen impredecibles** a corto plazo. Quizás nunca podremos predecir con precisión el próximo evento. Pero podemos:

1. **Identificar zonas de mayor peligro** (como la Brecha de Guerrero).
2. **Cuantificar el nivel de complejidad** del sistema regional.
3. **Detectar cambios** en el comportamiento que merezcan atención.
4. **Informar mejor** las decisiones de preparación y mitigación.

La **Brecha de Guerrero** emerge de este análisis con claridad inequívoca como la zona de mayor preocupación. Múltiples indicadores independientes convergen: quietud extrema, alta concentración de estrés, persistencia fuerte, clustering elevado.

No podemos decir cuándo ocurrirá el próximo gran terremoto allí, pero los datos sugieren que **es cuestión de cuándo, no de si**.

Finalmente, este trabajo ilustra el poder de la **integración metodológica**. Ninguna técnica por sí sola proporciona el panorama completo. Pero cuando la ley de Gutenberg-Richter, análisis de redes, DFA, MF-DFA y algoritmo de Schreider **convergen** en conclusiones similares, nuestra confianza aumenta justificadamente.

La sismología enfrenta un desafío formidable: entender uno de los fenómenos más complejos y peligrosos de la naturaleza. Este estudio representa un paso más en ese camino, contribuyendo con herramientas, datos, y comprensión para la comunidad científica y, esperamos, mayor seguridad para las poblaciones vulnerables de México.

5.6 Palabras y anotaciones finales

A la memoria de todas las personas que han perdido la vida o han quedado discapacitadas debido a terremotos en México. Que este trabajo contribuya, aunque sea modestamente, a reducir el sufrimiento futuro mediante mejor comprensión, preparación, y resiliencia ante estos fenómenos naturales inevitables.

Nota 1: Se autoriza el acceso, aprovechamiento, mejora y/o ampliación de la aplicación *ESMme* para fines académicos y de investigación, residente en el sitio: <https://www.github.com/alxcruzCastillo/esmme>, donde hallarán los archivos y el código abierto; con los siguientes datos de referencia:

de la Cruz-Castillo, A. (2026), *Estudio de la Sismicidad Mexicana mediante el Método de Análisis Gráfico de Visibilidad y otras Técnicas No Lineales*, [Tesis de Maestría]. Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Nota 2: Como un producto derivado de la presente Tesis, en Anexo 2 se incluye el documento: “**Possible verification of the linear correlation between the a and b Gutenberg-Richter parameters in the GR-law by using seismic data of some regions of the Mexican Pacific coast**”, presentado durante el *XIV International Congress on Physics Engineering*; organizado y desarrollado por la División de Ciencias Básicas e Ingeniería de la UAM-Azcapotzalco del 9 al 11 de Octubre 2024 en la Ciudad de México.

Nota 3: La estructura final de esta Tesis, fue auxiliada por una I.A. para mejorar su presentación y lectura.

BIBLIOGRAFÍA

Abe, S., & Suzuki, N. (2006). Scale-free statistics of time interval between successive earthquakes. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 350(2–4), 588–596. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2004.11.023>

Azizzadeh-Roodpish, S., & Cramer, C. H. (2018). Visibility Graph Analysis of Alaska Crustal and Aleutian Subduction Zone Seismicity: An Investigation of the Correlation between b Value and k – M Slope. *Pure and Applied Geophysics*, 175(12), 4241–4252. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1949-5>

Albert, R., & Barabási, A. L. (2002). Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of Modern Physics*, 74(1), 47–97. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.74.47>

Baiesi, M., & Paczuski, M. (2004). Scale-free networks of earthquakes and aftershocks. *Physical Review E*, 69(6), 066106. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.69.066106>

Bak, P., & Tang, C. (1989). Earthquakes as a self-organized critical phenomenon. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B11), 15635–15637. <https://doi.org/10.1029/JB094iB11p15635>

Bayrak, Y., Özbayrak, S., & Kalafat, D. (2002). Regional variations of the b -value in the Aegean and surrounding area. *Pure and Applied Geophysics*, 159(12), 2859–2873. <https://doi.org/10.1007/s00024-002-8765-4>

Erdős, Paul, and Alfréd Rényi. (1960). On the Evolution of Random Graphs. *Publ. Math. Inst. Hung. Acad. Sci* 5(1): 17–60.

Gutenberg, B., & Richter, C. F. (1954). Seismicity of the Earth and Associated Phenomena (2nd ed.). *Princeton University Press*.

Hanks, T. C., and H. Kanamori (1979), A moment magnitude scale, *J. Geophys. Res.*, 84(B5), 2348–2350, doi:[10.1029/JB084iB05p02348](https://doi.org/10.1029/JB084iB05p02348)

Hurst, H. E. (1951). The Long-Term Storage Capacity of Reservoirs. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 116, 770–799.

Ishimoto, M. and Iida, K. (1939) Observations of Earthquakes Registered with the Micro Seismograph Constructed Recently. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 17, 443–478.

Kantelhardt, J. W., Zschiegner, S. A., Koscielny-Bunde, E., Havlin, S., Bunde, A., & Stanley, H. E. (2002). Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 316(1–4), 87–114. [https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(02\)01383-3](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(02)01383-3)

Kostoglodov, V., Singh, S.K., Santiago, J.A., Franco, S.I., Larson, K.M., Lowry, A.R. and Bilham, R. (2003). A large silent earthquake in the Guerrero seismic gap,

Mexico. *Geophysical Research Letters* 30: doi: 10.1029/2003GL017219. issn: 0094-8276.

Lacasa, L., Luque, B., Ballesteros, F., Luque, J., & Nuño, J. C. (2008). From time series to complex networks: The visibility graph. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(13), 4972–4975. <https://doi.org/10.1073/pnas.0709247105>

Lacasa, Lucas & Luque, Bartolo & Luque, Jordi & Nuño, Juan Carlos. (2009). The Visibility Graph: a new method for estimating the Hurst exponent of fractional Brownian motion. *Europhysics Letters*, Volume 86, Number 3. DOI 10.1209/0295-5075/86/30001

Livina, V. N., Havlin, S., & Bunde, A. (2005). Memory in the occurrence of earthquakes. *Geophysical Research Letters*, 32(22), L22303. <https://doi.org/10.1029/2005GL024206>

Mogi, K. (1962). Magnitude-frequency relation for elastic shocks accompanying fractures of various materials and some related problems in earthquakes. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 40, 831–853.

Nishenko, S. P., & Singh, S. K. (1987). Conditional probabilities for the recurrence of large and great interplate earthquakes along the Mexican subduction zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 77(6), 2095–2114.

Olami, Z., Feder, H. J. S., & Christensen, K. (1992). Self-organized criticality in a continuous, nonconservative cellular automaton modeling earthquakes. *Physical Review Letters*, 68(8), 1244–1247. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.68.1244>

Pastén, C., Sáez, M., Ruiz, S., Leyton, F., Salomón, J., Poli, P. (2016) Deep characterization of the Santiago Basin using HVSR and cross-correlation of ambient seismic noise. *Engineering Geology*, 201. 57-66 [doi:10.1016/j.enggeo.2015.12.021](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.12.021)

Peng, C.-K., Buldyrev, S. V., Havlin, S., Simons, M., Stanley, H. E., & Goldberger, A. L. (1994). Mosaic organization of DNA nucleotides. *Physical Review E*, 49(2), 1685–1689. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.49.1685>

Pérez-Campos, X., Y. Kim, A. Husker, P. M. Davis, R. W. Clayton, A. Iglesias, J. F. Pacheco, S. K. Singh, V. C. Manea, and M. Gurnis (2008), Horizontal subduction and truncation of the Cocos Plate beneath central Mexico, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L18303, [doi:10.1029/2008GL035127](https://doi.org/10.1029/2008GL035127)

Pérez-Oregón, M. A., et al. (2019). A theoretical relation between the *a*- and *b*-values of the Gutenberg-Richter law in seismogenic regions. *Geophysical Journal International*, 219(2), 1081–1091. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz342>

Pérez-Oregón, M. A., et al. (2020). Tectonic implications of the seismicity and focal mechanisms along the Mexican subduction zone. *Tectonophysics*, 789, 228529. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2020.228529>

Richter, C. F. (January 1935), An Instrumental Earthquake Magnitude Scale, *Bulletin of the Seismological Society of America* 25 (1): 1–32.

Rudolf-Navarro, J. (1995). Relaciones entre escalas de magnitud sísmica para la región mexicana. *Servicio Sismológico Nacional, UNAM*.

Scholz, C. H. (1968). The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(1), 399–415.

Schreider, A. A. (1990). Algorithm for recognition of seismic quiescence zones. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 61(1–2), 107–112. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(90\)90050-5](https://doi.org/10.1016/0031-9201(90)90050-5)

Schreider, S.Yu., (1990), Formal definition of premonitory seismic quiescence, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 61, 113-127.

Singh, S. K., Astiz, L., & Havskov, J. (1983). Seismic gaps and recurrence periods of large earthquakes along the Mexican subduction zone: A reexamination. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73(3), 807–827

Singh, S. K., Rodriguez, M., & Esteva, L. (1983). Statistics of small earthquakes and frequency of occurrence of large earthquakes along the Mexican subduction zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73(6A), 1779–1796. <https://doi.org/10.1785/BSSA07306A1779>

Telesca, L. (2010). Visibility graph analysis of the temporal structure of seismicity in Italy. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 389(24), 5837–5843. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2010.08.025>

Telesca, L., & Lapenna, V. (2006). Measuring multifractal structure in non-stationary time series: An application to seismic data. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 362(2), 429–440. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2005.07.057>

Turcotte, D. L. (1997). *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics* (2nd ed.). Cambridge University Press.

USGS. (2021). *Earthquake Hazards Program*. United States Geological Survey. <https://earthquake.usgs.gov>

Watts, Duncan J, and Steven H Strogatz. (1998). Collective Dynamics of ‘Small-World’ networks. *Nature* 393 (6684): 440–42.

Wiemer, S., & Wyss, M. (2000). Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the western United States, and Japan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(4), 859–869. <https://doi.org/10.1785/0119990114>

Wilensky, U. 1999. Netlogo. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling. Northwestern University. Evanston, IL.