



**Facultad de Ciencias Geológicas**  
**Universidad Complutense de Madrid**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN GEOLOGÍA**  
**AMBIENTAL**

**Curso 2022-2023**

Dependencia de la peligrosidad sísmica con el período de observación:  
análisis basado en sismicidad sintética para la zona de cizalla de las  
Béticas Orientales (SE España)

Dependence of seismic hazard on the observation time window: insights  
from physics-based simulated seismicity at the Eastern Betics shear  
zone (SE Spain)

**ELENA PASCUAL SÁNCHEZ**

**TUTOR/ES DEL TRABAJO: JOSÉ ANTONIO ÁLVAREZ GÓMEZ**  
**JULIÁN GARCÍA MAYORDOMO**



# **Facultad de Ciencias Geológicas Universidad Complutense de Madrid**

## **MÁSTER UNIVERSITARIO EN GEOLOGÍA AMBIENTAL**

**Curso 2022-2023**

Dependencia de la peligrosidad sísmica con el período de observación:  
análisis basado en sismicidad sintética para la zona de cizalla de las  
Béticas Orientales (SE España)

Dependence of seismic hazard on the observation time window: insights  
from physics-based simulated seismicity at the Eastern Betics shear  
zone (SE Spain)

**ELENA PASCUAL SÁNCHEZ**

**TUTOR/ES DEL TRABAJO:**

**JOSÉ ANTONIO ÁLVAREZ GÓMEZ      JULIÁN GARCÍA MAYORDOMO**

Fdo.: José Antonio Álvarez Gómez

Fdo.: Julián García Mayordomo



## Facultad de Ciencias Geológicas Universidad Complutense de Madrid

### DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

Dña. ELENA PASCUAL SÁNCHEZ con NIF 70275402-Y, estudiante de Máster en Geología Ambiental en la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid en el curso 2022-2023, como autor/a del trabajo de fin de máster titulado *Dependencia de la peligrosidad sísmica con el período de observación: análisis basado en sismicidad sintética para la zona de cizalla de las Béticas Orientales (SE España)* y presentado para la obtención del título correspondiente, cuyo/s tutor/es es/son: Dn. JOSÉ ANTONIO ÁLVAREZ GÓMEZ y Dn. JULIÁN GARCÍA MAYORDOMO.

**DECLARO QUE:** El trabajo de fin de máster que presento está elaborado por mí y es original. No copio, ni utilizo ideas, formulaciones, citas integrales e ilustraciones de cualquier obra, artículo, memoria, o documento (en versión impresa o electrónica), sin mencionar de forma clara y estricta su origen, tanto en el cuerpo del texto como en la bibliografía. Así mismo declaro que los datos son veraces y que no he hecho uso de información no autorizada de cualquier fuente escrita de otra persona o de cualquier otra fuente. De igual manera, soy plenamente consciente de que el hecho de no respetar estos extremos es objeto de sanciones universitarias y/o de otro orden.

En Madrid, a 24 de mayo de 2023

Fdo.: Elena Pascual Sánchez

*A todas las personas que se han visto afectadas por un terremoto.*

El presente Trabajo de Fin de Máster surge como resultado de una colaboración con el Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC), en el contexto de prácticas extracurriculares vinculadas al Máster de Geología Ambiental de la Universidad Complutense de Madrid.

## **AGRADECIMIENTOS**

Me gustaría comenzar agradeciendo este trabajo a mis tutores, al Dr. José Antonio Álvarez Gómez y al Dr. Julián García Mayordomo. Gracias por vuestra guía en este trabajo, por corregirme para mejorar y, sobre todo, por confiar en mí. A José Antonio, por sus largas explicaciones a mis muchas preguntas y su gran amabilidad. Gracias por fomentar mi curiosidad y enseñarme geología. A Julián, por tener paciencia conmigo para explicarme cada pequeño detalle acerca de la peligrosidad sísmica y por revisar meticulosamente mis progresos.

Gracias también a la Dra. Paula Herrero Barbero, por ser un ejemplo a seguir. Poder continuar tu trabajo con este proyecto es todo un regalo. Gracias por tu buen humor, tus consejos y tu buena compañía.

Al Dpto. de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, por aceptarme como a una más y compartir conmigo experiencias y momentos. Gracias a Ignacio, Jorge, Martín, Carlos, Julio, Josechu, Hodei, Meaza, Javi, Fran, Loreto, Paco, María y Fernanda por todas las conversaciones. Gracias en especial a Juanmi, por sus buenas explicaciones y consejos. También a José Luis y a Yolanda, por todo su apoyo y los buenos momentos compartidos.

Gracias en especial a Héctor Perea, mi profesor de riesgo sísmico, quien desde la primera visita a Lorca fomentó mi curiosidad por la peligrosidad sísmica y me permitió acudir a mi primera campaña de campo. Nunca olvidaré esos días de aprendizaje, convivencia y buenos momentos que pude compartir con vosotros.

A mis amigas Irene e Isa, por su cariño, sus palabras de ánimo y por compartir la ilusión de todos nuestros proyectos. Cada alegría vuestra es también mía. A Esther y a Sara, mis geólogas favoritas, por toda su bondad y cariño. A Jorge y José, por su gran amistad, por celebrar conmigo cada triunfo y por aceptarme cuando fallo.

A mi familia, que hace que todo merezca la pena. Poder compartir cada etapa con vosotros es mi mejor suerte. Gracias, por tanto.

## RESUMEN

La cuantificación de la peligrosidad sísmica guarda una dependencia estrecha con el registro disponible de terremotos pasados. Esto supone un condicionante sustancial en la evaluación del riesgo sísmico, ya que los eventos más devastadores son también los menos frecuentes. En España, los estudios de peligrosidad sísmica más recientes (IGN-UPM, 2013) se basan en el registro histórico e instrumental de terremotos, que recoge un período de aproximadamente 1,000 años. Dado que el régimen tectónico actual está marcado por una deformación lenta, este período de tiempo no es lo suficientemente extenso como para comprender el ciclo sísmico completo de los sistemas de fallas activos (Perea et al., 2006). En el caso concreto del sistema de fallas de la zona de cizalla de las Béticas Orientales, la falta de registro a lo largo del ciclo sísmico completo de las fallas puede inducir a una estimación desacertada de la peligrosidad sísmica.

Para compensar este déficit de información, los catálogos sintéticos de terremotos se presentan como una herramienta complementaria a los estudios de peligrosidad, ya que permiten caracterizar los sistemas de fallas en el largo plazo. Partiendo del catálogo sintético de un millón de años generado por Herrero-Barbero et al. (2021) para el sistema de fallas de la zona de cizalla de las Béticas Orientales, se han creado en este estudio diversos subcatálogos, aleatoriamente distribuidos en el tiempo, con una duración equivalente al catálogo histórico e instrumental (ca, 1,000 años). Con ello, se muestra la variabilidad de escenarios que el sistema de fallas es capaz de generar. Cada catálogo es sometido a un estudio probabilista de peligrosidad sísmica o PSHA (Probabilistic Seismic Hazard Assessment), de manera que se comprueba la dependencia que guarda la peligrosidad sísmica con el intervalo temporal de análisis. La dispersión que se observa en parámetros como la magnitud máxima, la tasa anual de terremotos o la relación entre frecuencia de magnitudes de cada catálogo se traduce en variaciones en los resultados del cálculo de la peligrosidad. Para las ciudades de Murcia, Lorca, Alicante, Vera, Torre Vieja y Almería se han calculado curvas de peligrosidad que evalúan el período de retorno para distintas aceleraciones pico del terreno (PGA), haciendo uso del software R-CRISIS. Las curvas muestran una variabilidad significativa para los diversos subcatálogos, la cual ha sido cuantificada mediante el coeficiente de variación que se acentúa para valores elevados de PGA. Con estos resultados, se comprueba que el cálculo de la peligrosidad sísmica depende del período de observación del que se deriva la caracterización de un sistema de fallas activo, como es el sistema de fallas de la zona de cizalla de las Béticas Orientales.

## INDICE

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO.....	I
AGRADECIMIENTOS .....	III
<b>RESUMEN</b> .....	IV
Capítulo 1: <b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
Capítulo 2: <b>CONTEXTO SISMOTECTÓNICO</b> .....	4
Capítulo 3: <b>FUNDAMENTO TEÓRICO</b> .....	6
3.1 El ciclo sísmico .....	6
3.2 Distribución de frecuencias y magnitudes (FMD) .....	7
3.3 Estudio PSHA de peligrosidad sísmica .....	8
Capítulo 4. <b>METODOLOGÍA</b> .....	10
4.1 Procesado y depuración de catálogos sísmicos.....	11
4.2 Confección de subcatálogos sintéticos .....	16
4.3 Caracterización de catálogos sísmicos .....	17
4.4 Cálculo de peligrosidad sísmica.....	20
Capítulo 5: <b>RESULTADOS</b> .....	22
5.1 Catálogo de cálculo .....	22
5.2 Subcatálogos sintéticos y caracterización automática.....	23
5.3 Curvas de peligrosidad .....	26
5.4 Estudio estadístico de 10,000 subcatálogos .....	28
Capítulo 6: <b>DISCUSIÓN</b> .....	31
Capítulo 7: <b>CONCLUSIONES</b> .....	34
Capítulo 8: <b>FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN</b> .....	35
Capítulo 9: <b>REFERENCIAS</b> .....	37

## Capítulo 1: INTRODUCCIÓN

### 1.1 Presentación

La sismicidad de la península Ibérica se concentra en la región sureste, donde parte de la convergencia entre las placas de Nubia y Eurasia se acomoda en las estructuras de la región, provocando la ocurrencia de terremotos de baja y moderada magnitud. Se tiene registro de sismos desde el año 880 a.c (Martínez-Solares & Mezcuca, 2002), pero no es hasta 1048 (González, 2017) cuando se considera que el catálogo de terremotos recoge todos los eventos significativos. En consecuencia, el registro histórico e instrumental abarca una ventana temporal de menos de 1,000 años (1048-2023), correspondiéndose tan solo el último siglo y medio con el registro instrumental. El registro instrumental en la península Ibérica se inicia con la operación del Real Observatorio de la Armada en San Fernando (Cádiz) a comienzos de 1898 (Batlló, 2004). Con posterioridad a este hecho, la red comienza su ampliación con constantes mejoras en las prestaciones de los equipos, hasta que, en 1962 la información macrosísmica se ve reemplazada por los datos sismológicos (González, 2017). En la actualidad, los datos procedentes de los sismógrafos conforman la fuente principal de datos para el registro sísmico de la península, si bien, la información macrosísmica se toma en consideración cuando el terremoto ha sido sentido por la población. Aunando las distintas fases del registro, tanto histórico como instrumental, recopiladas por el Instituto Geográfico Nacional, se tiene constancia de la ocurrencia de grandes terremotos en la zona de cizalla de las Béticas Orientales (ZCBO), una de las grandes regiones tectónicamente activas del SE peninsular y que constituye la zona de trabajo para este estudio. En la Tabla 1 se observan las principales características de los terremotos de magnitud igual o superior a seis acontecidos en la ZCBO de los cuales se tiene registro histórico o instrumental.

Año	Localidad próxima al epicentro	M <sub>w</sub>	±σ	Referencia
1482	Orihuela (Alicante)	6,0	0,8	(García-Mayordomo, 2005)
1487	Almería	6,0	0,8	(IGN-UPM, 2013)
1518	Vera (Almería)	6,2	0,8	(García-Mayordomo et al., 2012)
1522	Alhama de Almería	6,5	0,3	(Reicherter & Hübscher, 2007)
1673	Orihuela (Alicante)	6,0	0,6	(García-Mayordomo, 2005)
1674	Lorca (Murcia)	6,0	0,8	(Martínez-Díaz et al., 2019)
1804	Dalías (Almería)	6,4	0,2	(Murphy, 2019)
1829	Torre Vieja (Alicante)	6,6	0,2	(García-Mayordomo et al., 2006)
1910	Adra (Almería)	6,1	0,4	(Rodríguez-Escudero et al., 2014)

Tabla 1. Terremotos de magnitud igual o superior a seis asociados a fallas de la ZCBO acontecidos durante el período de registro histórico e instrumental.

El último terremoto de consecuencias severas fue el terremoto de Lorca de del 11 de mayo de 2011, de magnitud M<sub>w</sub> = 5.1 (Martínez-Díaz et al., 2012; López-Comino et al., 2012) que causó 9 fallecidos, numerosos heridos y cuantiosas pérdidas materiales.

Cuando se pretende emplear el registro histórico e instrumental para caracterizar la peligrosidad sísmica asociada al sistema fallas de la ZCBO, ocurre que la ventana temporal de registro tan solo representa una fracción del ciclo sísmico de dichas fallas (Perea et al., 2006). De acuerdo con diversos estudios de paleosismología y sismicidad (García-Mayordomo et al., 2005; Moreno, 2011; Alfaro et al., 2012; Ortuño et al., 2012; Martín-Banda, 2020; Gómez-Novell, 2021) se estima que el período de recurrencia de grandes terremotos para las fallas que conforman la ZCBO (Tabla 2) va desde unos pocos miles de años para la falla de Carboneras (Moreno, 2011) hasta una decena de miles de años para la falla del Bajo Segura (Alfaro et al., 2012).

Falla	Magnitud máxima ( $M_w$ )	Variabilidad	Intervalo de recurrencia (años)	Variabilidad	Referencia
<b>Bajo Segura</b> (offshore)	6.4	6.1-6.7	9,256	indefinida	(Alfaro et al., 2012)
<b>Bajo Segura</b> (onshore)	7.0	6.9-7.1	10,000	13,973-7434	(Alfaro et al., 2012; García-Mayordomo, 2005)
<b>Carrascoy</b> (NE)	6.8	$\pm 0.39$	3,268	$\pm 376$	(Martín-Banda, 2020)
<b>Carrascoy</b> (SO)	6.7	$\pm 0.1$	3,300	2,300-4,600	(Martín-Banda, 2020)
<b>Alhama de Murcia</b> (Alhama-Alcantarilla)	-	-	-	-	-
<b>Alhama de Murcia</b> (Totana-Alhama)	-	-	-	-	-
<b>Alhama de Murcia</b> (Lorca-Totana)	6.7	$\pm 0.2$	4300	$\pm 400$	(Gómez-Novell, 2021)
<b>Alhama de Murcia</b> (Goñar-Lorca)	6.7	6.4-7.0	15,000	15,000-29,000	(Ortuño et al., 2012)
<b>Los Tollos</b>	6.5	6.3-6.6	3,200	6,860-2,200	(Martín-Banda, 2020)
<b>Palomares</b> (S. de Almenara – S. de Hinojar)	-	-	-	-	-
<b>Palomares</b> (Carboneras -- S. de Almenara)	-	-	-	-	-
<b>Carboneras</b>	7.4	$\pm 0.3$	1,150	<13,500	(Moreno, 2011)

Tabla 2. Magnitud máxima esperada para cada falla o segmento de falla de la ZCBO y período de recurrencia estimado para el evento de mayor magnitud. Datos procedentes de QAFI, (García-Mayordomo et al., 2017).

Si se comparan los intervalos de recurrencia de la Tabla 2, procedentes de la base de datos Quaternary-Active Faults Database of Iberia (QAFI, García-Mayordomo et al., 2017), con la duración del registro histórico e instrumental puede notificarse que este es más breve que el ciclo sísmico de cualquiera de las fallas que conforman el sistema (Perea et al., 2006). Esto se traduce en que la sismicidad y la expresión en superficie de las fallas proporcionan una caracterización incompleta del potencial sismogénico de las mismas (Masana et al., 2004). Ante esta problemática y con el fin de caracterizar mejor la sismicidad de la región, Herrero Barbero et al. (2021) confeccionan un modelo tridimensional del sistema de fallas, el cual, mediante una simulación cuasi-dinámica de generación de terremotos, permite reproducir la sismicidad para un período de tiempo de un millón de años. Esto posibilita el estudio de la sismicidad en el largo plazo, durante varios ciclos sísmicos de las fallas, y con ello caracterizar el patrón de ocurrencia de grandes terremotos que puedan generarse en la ZCBO.

Partiendo del catálogo sintético de un millón de años generado por Herrero Barbero et al. (2021), en este estudio se evalúa la influencia del intervalo temporal de análisis en el cálculo de la peligrosidad sísmica. Para ello, se confeccionan 100 subcatálogos con una duración de 1,000 años, equivalente al registro histórico instrumental, aleatoriamente distribuidos en el tiempo. Cada catálogo es empleado en un estudio probabilista de peligrosidad o PSHA (Probabilistic Seismic Hazard Assessment) para lo cual es necesario llevar a cabo una detallada caracterización de los mismos. Para tal fin, se calculan de las curvas de Gutenberg-Richter (Gutenberg & Richter, 1944) y sus parámetros asociados mediante el método de máxima verosimilitud. A su vez, para poder contrastar los resultados obtenidos con estudios de peligrosidad previos (IGN-UPM, 2013) se procesa el catálogo histórico e instrumental y se desarrolla un PSHA independiente con sus datos característicos. Finalmente, el estudio conduce a la obtención de curvas de peligrosidad sísmica para las localidades de Murcia, Lorca, Alicante, Vera, Torre Vieja y Almería, lo cual permite evaluar si tal variabilidad existe para los diferentes escenarios aleatoriamente generados.

Como parte final del trabajo, se elabora un análisis automático de 10,000 subcatálogos con una duración de 1,000 años. Al trabajar con una cantidad tan elevada de catálogos, la variabilidad epistemológica del modelo se reduce y pueden evaluarse las distribuciones estadísticas de los parámetros descriptivos de los catálogos, eliminando el sesgo asociado a un análisis de cantidades menores de datos.

## **1.2 Objetivos**

Este estudio, denominado *Dependencia de la peligrosidad sísmica con el período de observación: análisis basado en sismicidad sintética para la Zona de Cizalla de las Béticas Orientales (SE España)*, pretende evaluar si existe una dependencia en los cálculos de la peligrosidad sísmica con el intervalo temporal en el que se analiza un determinado sistema de fallas. El estudio se centra en el sistema de fallas de la ZCBO por tratarse de un sistema de deformación lenta, cuyo cálculo de la peligrosidad puede estar ampliamente influenciado por el intervalo de ciclo sísmico que queda recogido en el registro histórico e instrumental y que puede derivar en una subestimación o sobrecuantificación de la peligrosidad. Las localidades que han sido seleccionadas para el cálculo de la peligrosidad sísmica son Murcia, Lorca, Alicante, Vera, Torre Vieja y Almería, debido a su elevada población, con crecimiento estival, en las cuales la ocurrencia de un terremoto de elevada magnitud podría tener consecuencias devastadoras.

## Capítulo 2: CONTEXTO SISMOTECTÓNICO

Las placas tectónicas de Nubia y Eurasia presentan un límite difuso en la región más occidental del orógeno alpino mediterráneo. Esta región está marcada por la convergencia de dichas placas con una tasa de deslizamiento de 4 a 6 mm/año (Serpelloni et al., 2007; Koulali et al., 2011) y dirección NO. Geológicamente, el extremo mediterráneo más occidental se corresponde con el Arco de Gibraltar, formado por la Cordillera Bética en el sureste de la Península Ibérica, las montañas del Rif en el norte de África y la cuenca de Alborán entre ambas estructuras (Echeverría et al., 2013). La mayor parte de la deformación se acomoda en el Norte de África (Borque et al., 2019), mientras que tan solo un tercio de la deformación en la cuenca argelino-balear y la cordillera Bética (Serpelloni et al., 2007). De entre las estructuras que acomodan la deformación en la cordillera Bética cabe destacar la zona de cizalla de las Béticas Orientales (ZCBO), que constituye la región sísmicamente más activa del territorio español (Echeverría et al., 2013). La ZCBO es un sistema de fallas con comportamiento general lateral izquierdo con cierta componente inversa (Bousquet et al., 1979; De Larouziere et al., 1988), que se extiende desde la localidad de Alicante hasta Almería con continuación bajo el mar en la región de Alborán, abarcando una longitud total que supera los 450km. La dirección general del sistema es NE-SO. Su tasa de deslizamiento se estima en  $1.5 \pm 0.3$  mm/año (Echeverría et al., 2013), repartido de manera desigual en las diversas fallas (Figura 1) que conforman el sistema (Herrero-Barbero et al., 2021): la Falla de Carboneras (FC), la Falla de Alhama de Murcia (FAM), la Falla de Palomares (FP), la Falla de Los Tollos (FLT), la Falla de Carrascoy (FCA) y la Falla del Bajo Segura (FBS). Estas fallas principales están acompañadas de fallas secundarias cuyo comportamiento ha sido menos caracterizado: como la Falla de Torremendo (Alfaro et al., 2002) o la Falla de Hinojar (Baena-Escudero, 1993). Las fallas del sistema sufrieron una primera fase de deformación entre el Tortonense y el Mesiniense, en la que actuaron como fallas normales. Posteriormente, a partir del Plioceno y a causa de una inversión tectónica (Herrero-Barbero et al., 2020) actúan en régimen compresivo como fallas de desgarre e inversas.

Geológicamente, el sistema de fallas de la ZCBO se ubica en las zonas internas de la cordillera Bética, que se extienden desde Estepona hasta Cartagena. Las zonas internas están formadas por tres unidades tectosedimentarias afectadas en distinto grado por metamorfismo alpino: el complejo Nevado-Filábride, el complejo Alpujárride y el complejo Maláguide. Presentando todas ellas un elevado grado de aloctonía y deformación que se reduce para el caso del complejo Maláguide. Los materiales que conforman estas unidades son principalmente paleozoicos y mesozoicos, estando los materiales paleozoicos afectados por un bajo grado de metamorfismo que no afecta a los materiales mesozoicos.

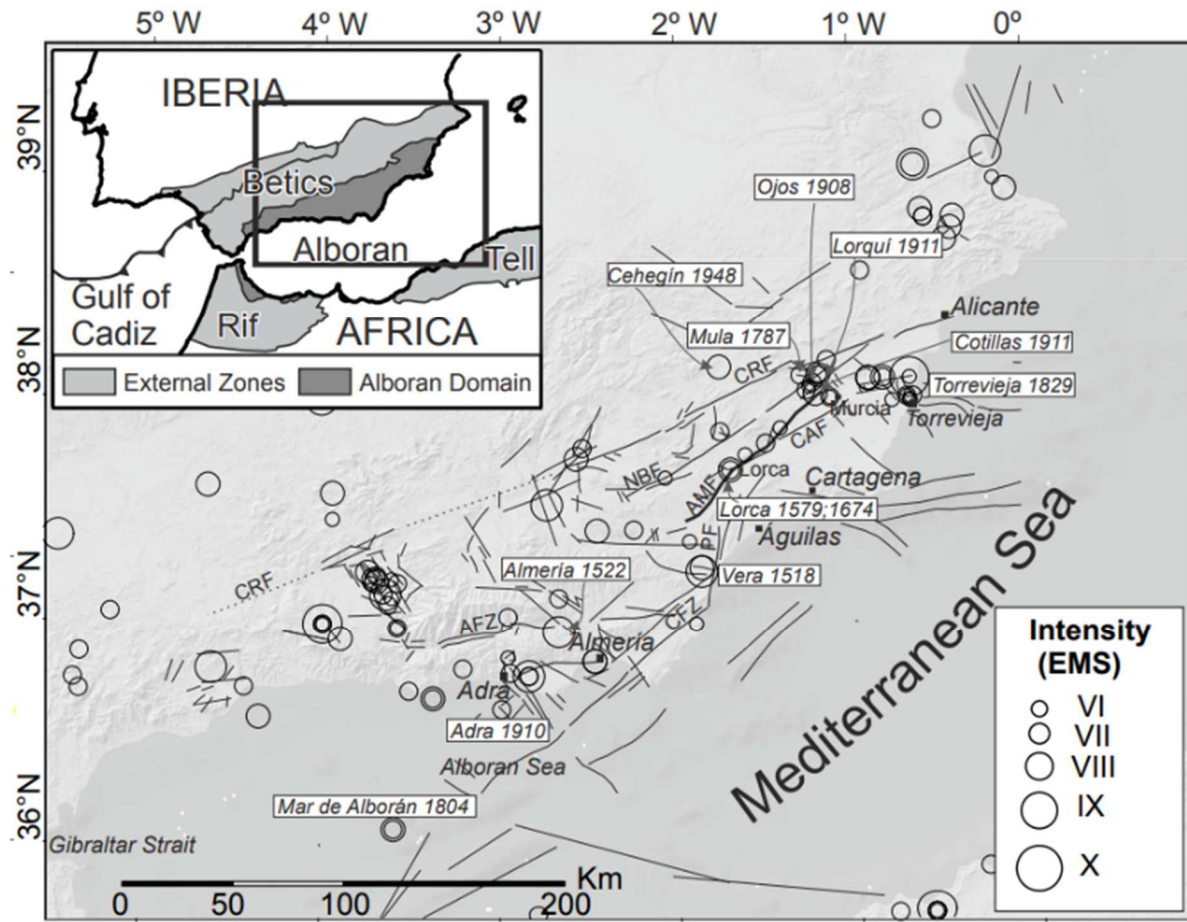


Figura 1. Traza de las principales fallas de la Zona de Cizalla de las Béticas Orientales, con la ubicación epicentral de los grandes terremotos registrados. Fuente: Martínez-Díaz et al., (2012).

## Capítulo 3: FUNDAMENTO TEÓRICO

### 3.1 El ciclo sísmico

Los sistemas de fallas activos actúan bajo los esfuerzos que se derivan del movimiento de las placas tectónicas. Esto se traduce en la acumulación de esfuerzo en el sistema durante la etapa intersísmica debido al acoplamiento entre la esquizosfera y la plastosfera (Thatcher, 1983; Bourne et al., 1998). El esfuerzo es liberado durante la etapa cosísmica una vez que se supera el límite de fricción de las fallas (Reid, 1910). La rotura o deslizamiento de una falla o un segmento de la misma, lleva asociada la propagación de ondas sísmicas que viajan desde el hipocentro del terremoto en todas las direcciones del espacio, hasta alcanzar la superficie terrestre. La propagación de ondas sísmicas en la superficie y su interacción con las edificaciones provoca los efectos destructivos de los terremotos. Idealmente, la liberación de esfuerzos (Figura 2) en una falla podría tener un carácter periódico (Shimazaki & Nakata, 1980). Sin embargo, lo habitual es que se sucedan patrones complejos de recurrencia (e.g. Chen et al., 2021) que no muestran una periodicidad marcada. A su vez, el mecanismo de ruptura puede variar entre modalidades lentas con enjambres o swarms; o rupturas rápidas que desencadenan terremotos grandes, que pueden o no ir acompañados de premonitorios (etapa presísmica) y réplicas (etapa postsísmica o de relajación de esfuerzos). Ante tal variabilidad de escenarios, es necesario recurrir a herramientas, como la distribución de frecuencias y magnitudes (FMD), que permitan caracterizar la sismicidad característica de una fuente sismogénica y con ello llevar a cabo estudios probabilistas de peligrosidad (PSHA).

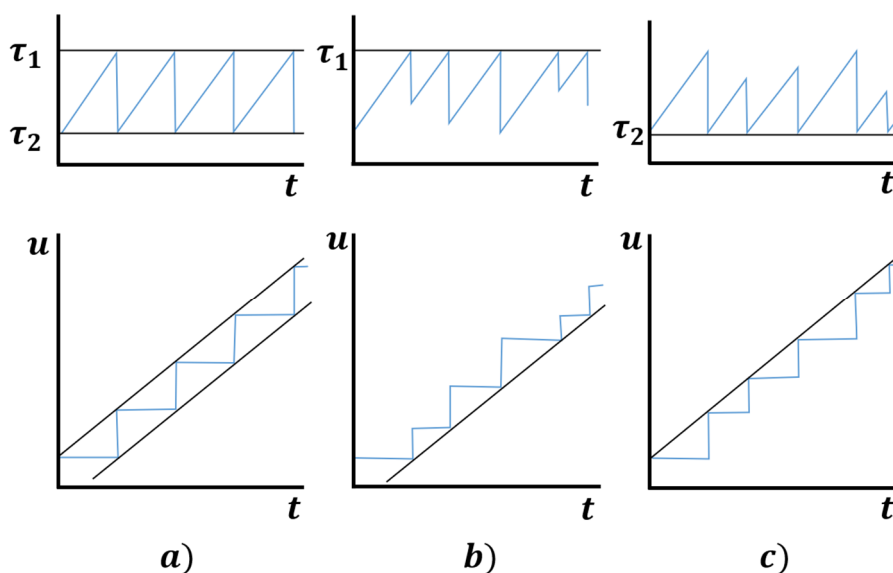


Figura 2. Liberación de esfuerzo,  $\tau$ , y desplazamiento cosísmico acumulado,  $u$ , según diversos modelos de ruptura: a) modelo de periodicidad perfecta de Reid, b) modelo predecible en el tiempo, c) modelo predecible en el tamaño Fuente: modificado de Shimazaki & Nakata, (1980).

### **3.2 Distribución de frecuencias y magnitudes (FMD)**

Un catálogo sísmico es la recopilación de los terremotos acontecidos en una determinada región durante un intervalo de tiempo. El catálogo recoge todos los eventos de magnitud registrable, la cual depende de la densidad de la red sísmica y de la calidad de los sismógrafos. En el catálogo sísmico se registran tanto premonitorios, como réplicas, eventos principales y terremotos aislados, los cuales deberán ser clasificados al efectuar un análisis de peligrosidad sísmica. El comportamiento de un catálogo viene descrito por su distribución de frecuencias y magnitudes o FMD (Frequency Magnitude Distribution) donde se representan intervalos de magnitud frente al número de eventos ocurridos en cada intervalo. A su vez, se grafica la curva de eventos acumulados que recoge todos los eventos ocurridos con magnitud superior a una dada. La curva de eventos acumulados resulta fundamental para un estudio de peligrosidad, ya que su descripción mediante la ley de Gutenberg-Richter (Gutenberg & Richter, 1944) constituye los datos de entrada que caracterizan una fuente sismogénica en un estudio probabilista de peligrosidad.

#### **Ley de Gutenberg-Richter**

La ley de Gutenberg-Richter (Gutenberg & Richter, 1944) expresa la relación constante que existe entre los terremotos de pequeña y elevada magnitud, la cual queda descrita de acuerdo a una ley potencial (Ecuación 1)

$$\log N = a - b \cdot M \quad (1)$$

donde  $M$  es la magnitud del terremoto y  $N$ , la cantidad de sismos acontecidos con una magnitud igual o superior a  $M$ . El parámetro  $b$  es la pendiente de la curva y representa la proporción entre terremotos grandes y pequeños, mientras que  $a$  representa el logaritmo decimal de la tasa de ocurrencia de terremotos. Es común emplear esta fórmula en términos del logaritmo natural (Ecuación 2) gracias a las transformaciones expresadas en la Ecuación 3 y Ecuación 4.

$$\ln N = \alpha - \beta \cdot M \quad (2)$$

$$\alpha = a \cdot \ln(10) \quad (3) \quad ; \quad \beta = b \cdot \ln(10) \quad (4)$$

La tasa anual de ocurrencia de terremotos que supera una cierta magnitud  $M$ , se obtiene de dividir el número de terremotos ocurridos entre el número de años que conforma el registro (Ecuación 5).

$$\tau(M) = \frac{N(M)}{T} = \frac{e^{(\alpha - \beta \cdot M)}}{T} \quad (5)$$

La ley de Gutenberg-Richter ha demostrado su validez en distintas configuraciones tectónicas, rangos de profundidades y duraciones de registro sísmico (Han et al., 2015), lo cual apoya su amplio uso en la caracterización de la peligrosidad sísmica (Allen et al., 1965).

### Modelo de terremoto característico

La ocurrencia de terremotos de elevada magnitud, cuya frecuencia de ocurrencia es superior a la descrita por la ley de Gutenberg-Richter, ha llevado a proponer el modelo de terremoto característico (Wesnousky, 1994; Youngs & Coppersmith, 1985). En este modelo, la ley de Gutenberg-Richter podría describir el comportamiento de la sismicidad para magnitudes moderadas y medias, pero, sin embargo, subestimaría la ocurrencia de grandes terremotos, cuya frecuencia de aparición se desvía en ocasiones de la ley potencial (Figura 3).

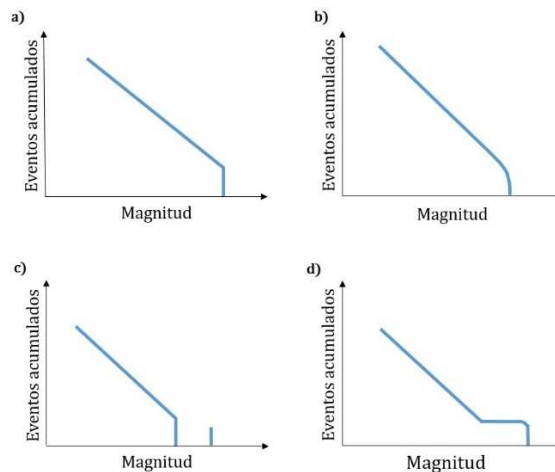


Figura 3. Modelo de Gutenberg-Richter: a) discreto y b) acumulado y modelo de terremoto característico: c) discreto y d) acumulado. Fuente: modificado de Wesnousky, (1994).

En la Figura 3, pueden apreciarse estas diferencias de comportamiento. Mientras que en la Figura 3a y la Figura 3b se observa un comportamiento de tipo Gutenberg-Richter, en la Figura 3c y en la Figura 3d, los terremotos de grandes magnitudes aparecen con una frecuencia superior a la esperada y el comportamiento se corresponde con el modelo de terremoto característico.

### 3.3 Estudio PSHA de peligrosidad sísmica

Para evaluar la amenaza sísmica en un determinado emplazamiento, puede llevarse a cabo un estudio probabilista de la peligrosidad o PSHA (Probabilistic Seismic Hazard Assessment). Para ello, a partir de datos sísmicos y geológicos, se estima la frecuencia con la que se supera una determinada amplitud de movimiento del terreno (Ecuación 6) en cierto enclave durante un período de tiempo determinado (Undro, 1979). La amplitud de movimiento del terreno puede cuantificarse como desplazamiento, velocidad o aceleración.

$$H = P [y \geq Y; \text{ en } t \text{ años, en emplazamiento } E] \quad (6)$$

Las normativas sismorresistentes emplean la aceleración como parámetro para cuantificar el movimiento que experimenta el terreno, concretamente, la aceleración máxima o pico (PGA, Peak Ground Acceleration) que se registra durante el terremoto. Con lo cual, la peligrosidad sísmica queda definida como la probabilidad de excedencia de una determinada aceleración pico, en un intervalo de tiempo y en un lugar determinado (Ecuación 7).

$$P(A > a, t) = 1 - e^{-(\lambda_a t)} \quad (7)$$

donde  $\lambda_a$  representa la tasa anual media de excedencia de un determinado nivel de movimiento del terreno, que se calcula de acuerdo con la Ecuación 8 conocida como integral de peligrosidad.

$$\lambda_a = \lambda_m \int \int P(A > a|m, r) f_M(m) f_R(r) dm dr \quad (8)$$

donde  $\lambda_m$  representa la tasa anual media de ocurrencia de terremotos;  $f_R(r)$ , la ecuación de atenuación del movimiento del terreno y  $f_M(m)$ , el modelo de recurrencia de terremotos que caracteriza el sistema. La caracterización de dichas funciones constituye el objetivo fundamental de los estudios probabilistas de peligrosidad. El modelo de recurrencia de terremotos,  $f_M(m)$ , se corresponde con la ley de Gutenberg-Richter previamente descrita; mientras que la ley de atenuación,  $f_R(r)$ , es la función de densidad de las distancias a la fuente, mientras que  $P(A > a|m, r)$  representa la función de atenuación del movimiento del terreno para una distancia ( $r$ ) y magnitud ( $m$ ) dadas. Existen numerosas leyes de atenuación en la bibliografía (Akkar & Boomer, 2010; Akkar et al., 2014, Boore & Atkinson, 2008; Cauzzi & Faccioli, 2008; Campbell & Bozorgnia, 2014) y es práctica común desarrollar un árbol lógico que incorpore varias de ellas (IGN-UPM, 2013). Debido a la gran cantidad de factores involucrados, la integral de peligrosidad es resuelta mediante el uso de softwares específicos como R-CRISIS (Ordaz & Salgado, 1994) u OpenQuake (Silva et al., 2014).

Para evaluar la peligrosidad sísmica, se emplea la tasa anual media de excedencia, lo cual permite definir un período de retorno esperado para un determinado nivel de movimiento fuerte del terreno. El período de retorno se trata pues de un parámetro estadístico que se calcula como el inverso de la tasa anual media de excedencia para un valor de movimiento fuerte del terreno (Ecuación 9) y no de un parámetro medido en la fuente sismogénica. Es importante aclarar este aspecto, ya que la terminología podría generar confusión en la interpretación de los resultados.

$$T = \frac{1}{\lambda_a} \quad (9)$$

La probabilidad de superación de un determinado nivel de movimiento fuerte del terreno, en función del período de retorno vendrá determinado por la Ecuación 10.

$$P(A > a, t) = 1 - \left[1 - \frac{1}{T}\right]^t \quad (10)$$

En consecuencia, la evaluación de la peligrosidad sísmica estará asociada a un período de retorno determinado. En la normativa, es frecuente hacer uso de períodos de retorno de 475 o de 950 años, redondeados frecuentemente a 500 o 1,000 años. Cuando se lleva a cabo un estudio de peligrosidad para edificaciones críticas, muy críticas o súper críticas, como centrales nucleares, los períodos de retorno que pasan a considerarse son de 1950, 4950 y 9950 años respectivamente, redondeados a 2,000, 5,000 y 10,000 años.

## Capítulo 4. METODOLOGÍA

Para poder elaborar un PSHA basado en catálogos sintéticos de terremotos en las ciudades de Murcia, Lorca, Alicante, Vera, Torrevieja y Almería, se comienza caracterizando la sismicidad histórica e instrumental, que servirá como elemento de control para los resultados obtenidos. Para tal fin, se comienza depurando el catálogo histórico e instrumental de réplicas y premonitorios, se homogenizan sus escalas de magnitudes (IGN-UPM, 2013; Cabañas, 2015) y se evalúa su completitud. Este trabajo ha sido realizado sobre la última década de registro, ya que los terremotos acontecidos durante este período no habían sido incorporados al catálogo de cálculo empleado en estudios previos de peligrosidad sísmica (IGN-UPM, 2013). Una vez actualizado el catálogo sísmico completo de la Península Ibérica, se restringe la zona de cizalla de las Béticas Orientales (ZCBO), que será la fuente sismogénica seleccionada para el presente estudio. Posteriormente se caracteriza su FMD y se comparan los resultados obtenidos con estudios precedentes del mismo sistema (IGN-UPM, 2013; García-Mayordomo, 2015).

Una vez caracterizado el comportamiento del sistema durante el período histórico e instrumental, se procede a la confección de subcatálogos sintéticos de terremotos con una duración equivalente. Dado que el registro histórico e instrumental abarca un período de 975 años, se ha decidido redondear esta cifra y evaluar la variación de la peligrosidad sísmica en base a catálogos de 1,000 años de duración. A partir del catálogo sintético generado por Herrero-Barbero et al. (2021) de una duración de 1M.a., se crean 100 subcatálogos en base a una semilla aleatoria. Una vez que los catálogos han sido creados, se someten al mismo proceso de depuración que el catálogo histórico e instrumental, se caracterizan y se emplean los parámetros que describen su comportamiento en la elaboración de un PSHA. En el estudio de peligrosidad intervienen las fuentes sismogénicas adyacentes a la ZCBO, cuyos parámetros de sismicidad característicos han sido obtenidos de la base de datos ZESIS (García-Mayordomo et al., 2012). El modelo de atenuación del terreno seleccionado es el definido por Campbell & Bozorgnia, (2014) ya que resulta adecuado para el estudio de zonas sismogénicas que engloban sistemas de fallas, por incorporar parámetros sensibles a la modalidad de comportamiento de las mismas.

Por último, y como apoyo estadístico a los apartados previos, se compila un conjunto de 10,000 catálogos que permite evaluar la distribución estadística de parámetros sísmicos. Los resultados obtenidos de los estudios de peligrosidad son correlacionados con las distribuciones estadísticas para evaluar como influyen los patrones de comportamiento del sistema en los cálculos de peligrosidad. En este punto, se ha realizado una evaluación discreta de cada una de las fallas que conforman la ZCBO.

#### 4.1 Procesado y depuración de catálogos sísmicos

Para poder adecuar el catálogo instrumental de la última década a las características de cálculo, es necesario llevar a cabo un procesado del catálogo que implique homogeneizar sus diferentes escalas de magnitudes, eliminar las réplicas y premonitorios asociadas a un terremoto principal y evaluar la completitud del catálogo para los distintos rangos de magnitudes.

El procedimiento seguido es análogo al desarrollado en *Actualización de Mapas de Peligrosidad Sísmica de España, 2012* (IGN-UPM, 2013), con el fin de que el catálogo que resulte del presente estudio pueda unirse con el existente hasta 2011 y así conformar un recurso útil para la comunidad científica. Bajo este interés, se ha procesado el catálogo completo de la Península Ibérica, para después seleccionar aquellos terremotos ocurridos en el sistema de fallas de la ZCBO, que serán objeto del presente trabajo.

Para la preparación del catálogo sísmico de cálculo se llevan a cabo los siguientes pasos:

1. **Obtención del catálogo sísmico**, desde el 1 de enero de 2011 hasta el 4 de octubre de 2022, procedente de la página de descargas del Instituto Geográfico Nacional (IGN)- Información sísmica. <https://www.ign.es/web/ign/portal/sis-catalogo-terremotos> *Catálogo de Terremotos. Instituto Geográfico Nacional / Actividades / Información Sísmica*, consultada el 4 de octubre de 2022.
2. **Acotar el estudio a la zona de influencia** considerada, que en este caso se restringe a la Península Ibérica (34°N-45°N y 13°O-6°E), tal y como se muestra en la Figura 4.



Figura 4. Extensión geográfica del catálogo de cálculo (en color) con límites: 34°N-45°N y 13°O-6°E.

3. **Eliminar los sismos profundos** acontecidos a profundidades iguales o superiores a 35km, ya que se considera que no tendrán influencia en la peligrosidad sísmica.

**4. Homogeneizar las diferentes escalas de magnitud a magnitud momento.** Los catálogos sísmicos son heterogéneos, ya que la medida de los terremotos puede realizarse de acuerdo a diversas escalas de magnitud. Para poder trabajar simultáneamente con eventos medidos en diferentes escalas, es necesario expresarlos en una sola. Se ha decidido, siguiendo el procedimiento implementado por IGN-UPM, (2013), homogeneizar las magnitudes a magnitud momento ( $M_w$ ). Lo cual se debe a que la magnitud momento guarda relación directa con la falla o fenómeno físico que produce el terremoto y no satura para el caso de grandes eventos. El catálogo sísmico del IGN cuenta con eventos expresados en magnitudes  $m_{bLg}(L)$ ,  $m_b(VC)$ ,  $M_w$  y  $M(m_b)$ . A continuación, se presenta una breve descripción de las mismas y cómo se relacionan con la magnitud momento. Las relaciones empleadas para la conversión entre magnitudes son aquellas obtenidas por Cabañas et al. (2015). Estas relaciones han sido calculadas mediante una regresión ortogonal o RMA (Reduced Mayor Axis Regression), ya que tanto la magnitud dependiente,  $M_w$  en este caso, como la independiente ( $m_b(VC)$  ó  $m_{bLg}(L)$ ) cuentan con error asociado.

**$m_b(VC)$**  La magnitud  $m_b(VC)$  hace referencia a la magnitud de ondas internas (Ecuación 11) definida por Veith y Clawson, (1972).

$$m_b(VC) = \log\left(\frac{A}{T}\right) + P(\Delta, h) \quad (11)$$

donde  $A$  y  $T$  son la amplitud y el período de la fase  $P$ , y  $P(\Delta, h)$  es un factor de corrección que depende de la profundidad y de la distancia epicentral. Ha sido empleada para eventos ocurridos a partir de 1998. La transformación de esta magnitud a  $M_w$  se realiza de acuerdo a la Ecuación 12.

$$M_w = -1.528 + 1.213 \cdot m_b(VC) \quad (12)$$

cuyo rango de aplicabilidad se encuentra entre las magnitudes 3.7 y 6.3.

**$m_{bLg}(L)$**  La magnitud  $m_{bLg}(L)$  se define a partir de la amplitud de la fase Lg de las ondas sísmicas por López, (2008) según la Ecuación 13.

$$m_{bLg}(L) = \log\left(\frac{A}{T}\right) + 1.17 \cdot \log(R) + 0.0012 \cdot R + 0.67 \quad (13)$$

donde  $A$  es la amplitud del desplazamiento expresada en micrómetros,  $T$  el período en segundos y  $R$  la distancia hipocentral en kilómetros. La transformación de magnitud  $m_{bLg}(L)$  a magnitud momento viene descrita por la Ecuación 14.

$$M_w = 0.676 + 0.836 \cdot m_{bLg}(L) \quad (14)$$

cuyo rango de validez engloba las magnitudes comprendidas entre 3.0 y 5.4.

**$M_w$**  La magnitud  $M_w$  hace referencia a la magnitud momento propiamente dicha, por lo que no requiere ningún tipo de transformación. Fue descrita por Hanks y Kanamori, (1979) y se relaciona con el momento sísmico mediante la ecuación de Kanamori (Ecuación 15)

$$M_w = \frac{2}{3} \cdot \log(M_0) - 10.7 \quad (15)$$

donde  $M_0$  describe el momento sísmico expresado en  $dyn \cdot cm$ , que representa (Ecuación 16) el producto de  $\mu$ , el módulo de cizalla;  $A$ , el área de ruptura y  $D$ , el salto de falla. Desde el punto de vista sismológico, el momento sísmico es calculado a partir de la energía radiada por la fuente suponiendo una caída de esfuerzo constante, empleando la forma de onda detectada por los simógrafos.

$$M_0 = \mu \cdot A \cdot D \quad (16)$$

**$M(mb)$**  Por último, el catálogo del IGN hace uso de la magnitud  $M(mb)$  para dar cuenta de eventos que han sido medidos en magnitud  $m_b(VC)$ , pero que ya han sido transformados a magnitud momento mediante las relaciones de Cabañas et al. (2015).

5. **Cálculo del error asociado** a la magnitud sísmica y conversión del error. Dado que la magnitud momento ha sido calculada en base a otras magnitudes mediante un método de regresión RMA, el ajuste del error de esta magnitud incluye los errores en las magnitudes previas, que pueden observarse en la Tabla 3 y que ha sido determinado por criterio de experto, así como los errores asociados a los coeficientes del ajuste (Tabla 4), determinados por Cabañas et al. (2015) para cada una de las ecuaciones de conversión.

Magnitud	Error
$m_b(VC)$	0.2
$m_{bLg}(L)$	0.2
$M_w(IGN)$	0.1

Tabla 3. Errores asociados a las magnitudes de medida. Datos procedentes de Cabañas et al. (2015).

El error asociado a la magnitud momento calculada se obtiene mediante la Ecuación 17, que recoge los errores asociados a todos los parámetros del ajuste RMA, donde  $y_i$  representa la magnitud momento  $M_w$  y  $x$  la magnitud  $m$  empleada en la conversión,  $a$  y  $b$  son los parámetros obtenidos en el ajuste de cada una de las transformaciones (Ecuación 18).

$$\sigma y_i^2 = \left(\frac{\partial y}{\partial x} \sigma_x\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial a} \sigma_a\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial b} \sigma_b\right)^2 + 2 \frac{\partial y}{\partial a} \frac{\partial y}{\partial b} \sigma_{ab} \quad (17)$$

$$y_i = a + b \cdot x_i \quad (18)$$

Los errores asociados a cada coeficiente proceden del ajuste RMA realizado y pueden observarse en Tabla 3. Dada su pequeña contribución, se desprecia el último término de la Ecuación 17.

Magnitud	$\sigma_a$	$\sigma_b$	$\sigma_{ab}$
$m_b(VC)$	0.385	0.077	-0.0001
$m_{bLg}(L)$	0.202	0.052	-0.0001

Tabla 4. Errores asociados a los coeficientes de la regresión calculados por Cabañas et al. (2015).

**6. Depurar el catálogo** para eliminar las réplicas y premonitorios asociados a cada evento principal. Se considera que los terremotos que conforman el catálogo de peligrosidad se comportan de acuerdo a una distribución poissoniana, lo cual implica que cada evento debe ser independiente espacial y temporalmente del resto. Dado que una serie sísmica suele estar formada por un evento principal de mayor magnitud y sismicidad secundaria de menor magnitud, consistente en premonitorios y réplicas; o, en otro caso, constituir un enjambre sísmico, es necesario llevar a cabo un proceso de depuración que elimine la sismicidad secundaria y seleccione un único evento representativo de cada conjunto o cluster. El proceso de depuración agrupará aquellos eventos que se pueden relacionar tanto espacial como temporalmente. Siguiendo el método propuesto por Gardner & Knopoff, (1974), en el cual, el intervalo temporal y espacial escogido dependerán de la mayor magnitud encontrada al conformar el cluster, se requiere efectuar un proceso iterativo. Una vez que ha sido identificado el cluster, se seleccionará como terremoto representativo aquel que posea mayor magnitud. Las ecuaciones empleadas para definir los intervalos espaciales y temporales que conforman cada cluster difieren ligeramente de las empleadas por Gardner-Knopoff, (1974), ya que se pretende adaptarlas a la sismicidad característica de la Península Ibérica (IGN-UPM, 2013). Para poder adecuar el estudio a las características propuestas por IGN-UPM, (2013) ha sido necesario modificar el código fuente del software de libre acceso ZMAP (Wiemer, 2001) para incluir en él las ecuaciones de declustering características de la Península Ibérica (Ecuaciones 19, 20 y 21). La representación de dichas ecuaciones puede observarse en la Figura 5, donde destaca el cambio de pendiente que presenta la ecuación espacial.

$$\log(T) = 0,6 \cdot M_w - 0,7 \quad \text{para } M_w < 5,9 \quad (19)$$

$$\log(T) = 0,04 \cdot M_w + 2,6 \quad \text{para } M_w \geq 5,9 \quad (20)$$

$$\log(L) = 0,2 \cdot M_w + 0,4 \quad (21)$$

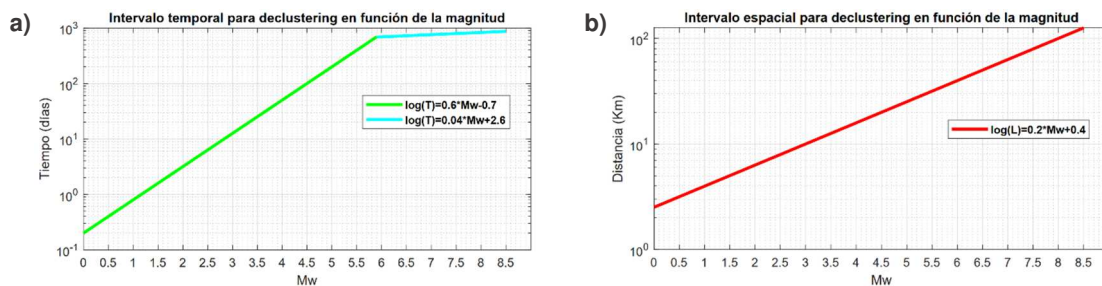


Figura 5. Ecuaciones de declustering para los intervalos a) temporal y b) espacial en función de la magnitud máxima de cada conjunto de terremotos. Ecuaciones propuestas por IGN-UPM, (2013).

Tras el proceso de depurado, es de esperar que el catálogo se reduzca a 2/3 del original, ya que la sismicidad de fondo y los terremotos principales constituyen más del 60% del total de la sismicidad.

**7. Eliminar los sismos no considerados relevantes para el estudio de la peligrosidad.**

Dados los rangos de aplicabilidad de las ecuaciones de homogeneización de magnitudes y atendiendo a su baja influencia en la peligrosidad sísmica, se han eliminado los sismos con magnitud inferior a 3.0. A su vez, la heterogeneidad de la red sísmica nacional no puede garantizar que los eventos de magnitud inferior a  $M_w = 3.0$  sean registrados en toda la península Ibérica (González, 2017), con lo que se opta por adoptar un criterio uniforme que deriva en este límite.

**8. Evaluar la completitud del catálogo.** En base a IGN-UPM, (2013) se evalúa como para

$M_w \geq 3.0$  el catálogo sísmico de España lleva siendo completo desde 1985 (Figura 6). Dado que el catálogo que ha sido confeccionado parte de 2011, se pueden obviar los problemas de completitud, ya que está garantizada para el intervalo de magnitudes de trabajo. Sin embargo, los datos de completitud serán necesarios para confeccionar la curva de Gutenberg-Richter del catálogo histórico e instrumental, tal y como se explicará más adelante.

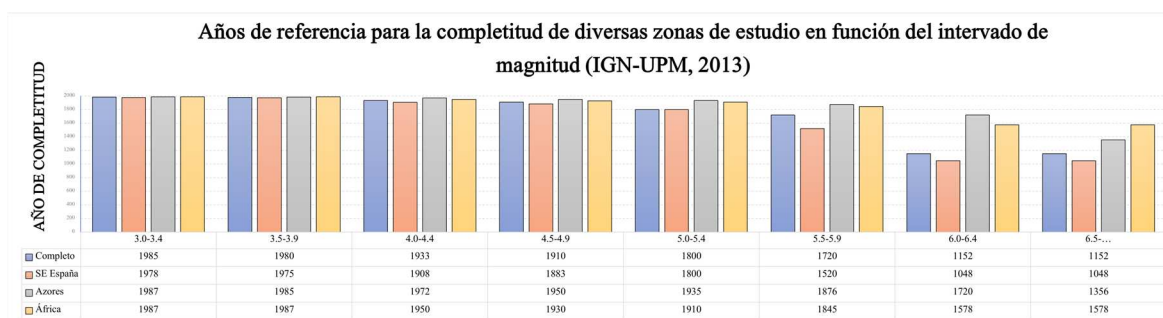


Figura 6. Evaluación de la completitud en función del rango de magnitudes para diversas zonas de estudio. Fuente: modificado de IGN-UPM, (2013).

## 4.2 Confección de subcatálogos sintéticos

Este estudio parte de los datos generados por P. Herrero-Barbero en su tesis doctoral *Modelización 3D de la Estructura, la Cinemática y el Comportamiento Sismogénico del Sistema de Fallas de las Béticas Orientales. Aplicación a la Amenaza Sísmica*, donde la autora lleva a cabo un modelo de sismicidad sintética que reproduce las características dinámicas del sistema de fallas de las Béticas Orientales. Para ello, hace uso del código de simulación de terremotos RSQSim ('Rate-State earthQuake Simulator', Richards-Dinger & Dieterich, 2012) que permite modelar el comportamiento friccional y de deslizamiento de los distintos segmentos de las fallas que conforman el sistema. La generación de terremotos sintéticos parte de un modelo tridimensional de la ZCBO (Herrero-Barbero et al., 2021), desarrollado mediante el software Trelis de modelización (Figura 7). El modelo tridimensional recoge las principales fallas del sistema: la Falla de Carboneras (CF), la Falla de Palomares (PF), la Falla de Los Tollos (LTF), la Falla de Carrascoy (CAF), la Falla de Alhama de Murcia (AMF) y la Falla del Bajo Segura (BSF), las cuales quedan representadas por una malla discreta formada por celdas triangulares de 1km<sup>2</sup>. Las fallas han sido modeladas atendiendo a sus segmentos principales, reproduciendo su geometría en dirección y buzamiento, su cabeceo y su tasa de deslizamiento.

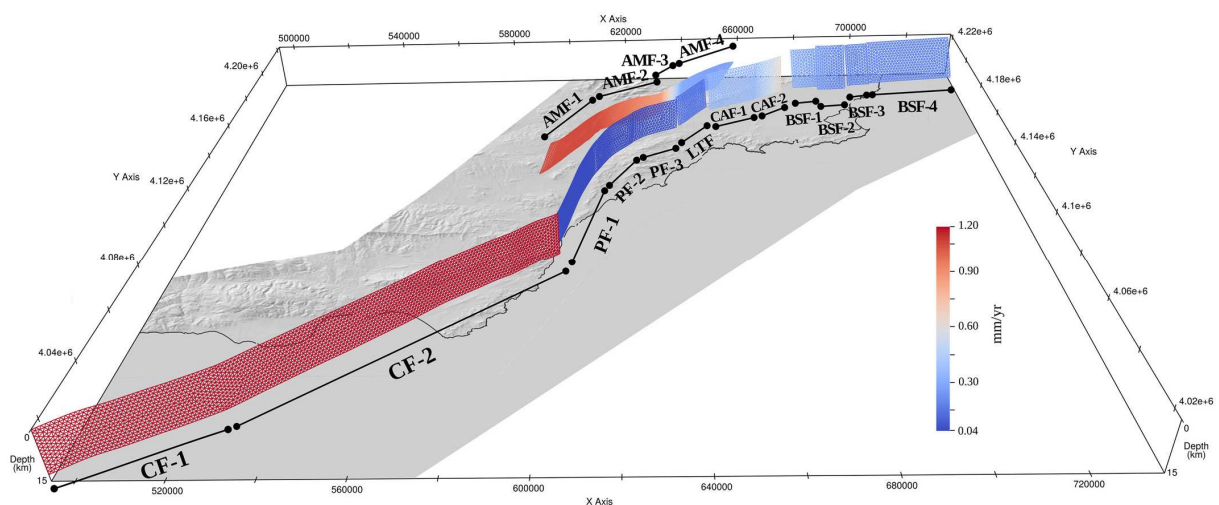


Figura 7. Modelo tridimensional del sistema de fallas de las Béticas Orientales. El modelo recoge las principales fallas de la región: la Falla de Carboneras (CF), la Falla de Palomares (PF), la falla de los Tollos (LTF), la falla de Alhama de Murcia (AMF), la Falla de Carrascoy (CAF) y la Falla del Bajo Segura (BSF). Fuente: Herrero-Barbero et al. (2021).

Para emular el funcionamiento de un sistema de fallas, RSQSim considera la ley de fricción de Dieterich (Dieterich, 1978) que relaciona la fricción con la velocidad de deslizamiento. Es por ello, que resulta necesario definir los parámetros friccionales del sistema de fallas, ya que controlarán la nucleación y propagación de los terremotos. Una vez que la geometría del sistema y sus propiedades friccionales han quedado definidas, RSQSim emplea una formulación cuasi-dinámica de la propagación de esfuerzos, en la que cada uno de los

elementos de la malla acumula esfuerzo hasta alcanzar un cierto límite. Cuando la ruptura o nucleación del terremoto comienza en uno de los elementos de la malla se transfieren esfuerzos al resto de elementos. Las simulaciones comienzan con un esfuerzo de cizalla inicial homogéneo que evoluciona a medida que los elementos del sistema interactúan. El régimen de esfuerzos requiere un tiempo inicial de acomodación, por lo que los primeros 2,000 años del catálogo deben ser descartados. Tras realizar diversas pruebas en los parámetros friccionales y las condiciones iniciales, los autores del estudio seleccionan el catálogo que mejor reproduce las características de la ZCBO y que será empleado en este estudio para la obtención de subcatálogos sintéticos.

Para la generación de subcatálogos sintéticos se crea un algoritmo de MATLAB que, mediante la creación de números pseudoaleatorios y pseudoindependientes gracias al generador Mersenne Twister (Matsumoto & Nishimura, 1998), confecciona catálogos de una duración de 1,000 años. Dicho algoritmo se emplea para elegir momentos concretos del catálogo global que actuarán como fecha de inicio para los diferentes subcatálogos. Una vez que el instante inicial ha sido aleatoriamente seleccionado, se agrupan todos los eventos que ocurren en el intervalo 1,000 años posteriores.

#### **4.3 Caracterización de catálogos sísmicos**

Para poder obtener curvas de peligrosidad sísmica, es necesario caracterizar los catálogos obtenidos. Los parámetros necesarios para ello son: la magnitud de completitud de cada catálogo, los parámetros de ajuste de la ley de Gutenberg-Richter y la máxima magnitud registrada. La caracterización de los catálogos ha sido implementada mediante el software MATLAB llegando a configurar un procedimiento automático que efectúa el ajuste de los datos empleando el método de máxima verosimilitud. Dado que los parámetros obtenidos de esta parte del análisis desempeñarán un papel fundamental en el cálculo de la peligrosidad sísmica, se ha prestado especial atención a su proceso de obtención. A continuación, se describe el procedimiento seguido para cada parámetro:

- 1. Creación de la curva de eventos acumulados.** En primer lugar, tal y como indica el ajuste de Gutenberg-Richter, es necesario crear una curva de eventos acumulados que de cuenta de la distribución de frecuencia de terremotos en función de la magnitud (FMD, Frequency Magnitude Distribution). Para ello, se agrupan los eventos por intervalos de 0.1, partiendo de la magnitud mínima y llegando hasta la magnitud máxima. Una vez que las magnitudes han sido agrupadas, se calcula cuántos terremotos existen en cada intervalo de magnitud y se dividen entre el número de años del registro para obtener su tasa anual. Posteriormente, se acumula el número de terremotos de cada intervalo de

magnitud y los superiores a él, de manera que se obtiene la curva de eventos acumulados. Esta curva proporciona la ley de recurrencia de terremotos propia del sistema, cuyo ajuste se discutirá más adelante.

- 2. Magnitud de completitud.** La magnitud de completitud es la magnitud a partir de la cual se consideran registrados todos los terremotos ocurridos. Para que esto suceda, la señal del terremoto debe ser claramente distinguible por encima del ruido sísmico (González, 2017), lo cual justifica que la magnitud de completitud disminuya a medida que aumentan la calidad y densidad de los dispositivos de registro. La correcta determinación de la magnitud de completitud es esencial para poder llevar a cabo un buen ajuste del catálogo. Para el caso del catálogo histórico e instrumental de la península Ibérica, la magnitud de completitud varía con el tiempo (Figura 6). Estudios previos (IGN-UPM, 2013) proporcionan una magnitud de completitud para el presente de  $M_c = 3.0$ . Sin embargo, en el caso de los subcatálogos sintéticos esta magnitud debe ser calculada, para lo cual será empleado el método de bondad de ajuste.

El método de bondad de ajuste o Goodness-of-fit test (GMF, Wiener & Wyss, 2000) se trata de un método de cálculo de la magnitud de completitud basado en la robustez del ajuste de la curva de eventos acumulados a una ley potencial de tipo Gutenberg-Richter (Ecuación 1, Gutenberg-Richter, 1944). Para evaluar la bondad del ajuste, se compara la FMD observada, con una curva sintética generada a partir de los datos propuestos para el ajuste. Para ello, se comienzan ajustando los datos del catálogo mediante el método de máxima verosimilitud (Aki, 1965), empleando la mínima magnitud del catálogo. El ajuste se repite para las sucesivas magnitudes, obteniéndose en cada caso la diferencia entre el número de eventos de la distribución observada y la generada con el respectivo ajuste (Ecuación 22).

$$R(a, b, M_i) = 100 - \left( \frac{\sum_{M_i}^{M_{max}} |B_i - S_i|}{\sum_i B_i} \cdot 100 \right) \quad (22)$$

donde  $B_i$  y  $S_i$  son el número de eventos observado y calculado respectivamente para los distintos intervalos,  $i$ , de magnitud. Llegados a este punto, se selecciona la mínima magnitud de completitud como aquella para la cual  $R$  no supera un valor del 10%, con lo que el 90% de la distribución de frecuencia puede ser reproducido con la ley potencial calculada. La implementación práctica de esta metodología se ha llevado a cabo en base a funciones de MATLAB implementada en el software ZMAP (Wiemer, 2001) por Schorlemmer, (2002).

- 3. Ajuste a una ley de Gutenberg-Richter** Una vez que la magnitud de completitud ha sido determinada, es necesario ajustar la curva de eventos a una ley potencial. Es práctica común llevar a cabo el ajuste tanto por el método de mínimos cuadrados como por el método de máxima verosimilitud (IGN-UPM, 2013). Sin embargo, la significancia estadística del segundo método (Sandry & Marzocchi, 2007) justifica su uso en el caso de ajustar una curva de eventos acumulados. Es por ello, que el método de máxima verosimilitud ha sido seleccionado para este estudio, tras diversas pruebas realizadas, en las cuales también se incorporaba el método de mínimos cuadrados.

La determinación de la pendiente  $b$  de la curva de Gutenberg-Richter mediante el método de máxima verosimilitud (Utsu, 1964; Aki, 1965) viene descrita por la Ecuación 23.

$$b = \frac{\log_{10} e}{(\bar{M} - M_{min})} \quad (23)$$

donde  $\bar{M}$  hace referencia a la media de todas las magnitudes superiores a la magnitud de completitud y  $M_{min}$  a la magnitud más baja que se incorpora al ajuste y que en este caso se corresponderá con la magnitud de completitud.

- 4. Tasa anual de terremotos** La tasa anual de terremotos para el catálogo histórico e instrumental debe calcularse atendiendo a la evolución de la completitud en función del tiempo y el intervalo de magnitud (Figura 6). Por ello, la tasa de terremotos para cada intervalo de magnitudes deberá dividirse entre el número de años que transcurren desde que se garantiza la completitud del registro hasta el presente. Para el caso de los subcatálogos sintéticos, en los cuales se supone garantizada la completitud de manera homogénea en el tiempo, tan solo es necesario dividir entre el número de años del período de registro.
- 5. Magnitud máxima del catálogo** Para determinar la magnitud máxima de cada hipotético escenario de estudio, se establece un compromiso entre la magnitud máxima geológica y la magnitud más alta registrada en cada subcatálogo más una cierta incertidumbre. La magnitud máxima geológica para la ZCBO ha sido determinada en  $M_w = 7.6$  (Gómez-Novell et al., 2020; Herrero-Barbero et al., 2021), a causa de una ruptura compleja que involucra varios segmentos de fallas. Para tener en consideración esta información y también la magnitud máxima de cada subcatálogo, se decide incorporar en el estudio de peligrosidad una magnitud máxima media, cuya incertidumbre viene determinada como la mitad de la diferencia entre la magnitud máxima del catálogo y la máxima geológica (Figura 8).

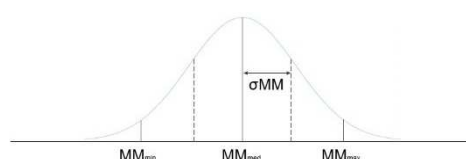


Figura 8. Ponderación ( $MM_{med}$ ) entre la magnitud máxima geológica ( $MM_{max}$ ) y la máxima magnitud registrada en el catálogo ( $MM_{min}$ ) e incertidumbre asociada ( $\sigma_{MM}$ ).

#### 4.4 Cálculo de peligrosidad sísmica

Con el fin de cuantificar la dependencia que guarda la peligrosidad sísmica con el intervalo de observación en un sistema de fallas activo, se emplean los datos procedentes de los diferentes subcatálogos para llevar a cabo un cálculo probabilista de peligrosidad sísmica (PSHA). El modelo de fuentes sismogénicas empleado es el propuesto por García-Mayordomo et al. (2012), de acuerdo con el modelo COMISIÓN (García-Mayordomo et al., 2015), heredero de los modelos IBERFAULT y SHARE. El modelo de zonación actual considera la ZCBO como una zona sismogénica independiente que recoge las características sísmicas de las fallas activas del sistema. Las zonas cercanas a la ZCBO influyen en el cálculo de la peligrosidad, por lo que los datos correspondientes a su sismicidad característica deben ser incorporados al modelo. Estos datos proceden de la base de datos ZESIS (García-Mayordomo et al., 2012; <https://info.igme.es/zesis/>) y pueden observarse en la Tabla 5.

Fuente	$\beta$	$\tau (4.0)$	MM	$\sigma_{MM}$
<b>Guadalquivir Central</b>	2.35	0.191	6.6	0.4
<b>Cazorla-Segura y Prebético de Albacete</b>	2.90	0.060	5.0	0.4
<b>Plataforma Valenciana y Prebético de Alicante</b>	2.05	0.259	6.6	0.4
<b>Béticas Internas Occidentales</b>	2.3	0.198	6.6	0.3
<b>Cuenca de Granada</b>	2.58	0.576	6.8	0.3
<b>Sierra Nevada-Filábride y Cuenca Guadix-Baza</b>	2.26	0.141	6.6	0.4
<b>Prebético Murciano</b>	2.67	0.39	6.68	0.2
<b>Béticas Internas Centrales</b>	2.21	0.317	6.7	0.2
<b>Béticas Internas Orientales</b>	3.09	0.081	6.7	0.1
<b>Mar de Alborán Occidental</b>	2.16	0.133	6.5	0.3
<b>Cuenca Argelina-Balear</b>	3.11	0.126	6.5	0.4
<b>Cresta de Alborán-Rif Central</b>	2.46	0.889	7.0	0.2
<b>Rif Oriental</b>	2.07	0.3	6.4	0.4
<b>Orán</b>	1.84	0.577	7.3	0.5

Tabla 5. Parámetros característicos de la sismicidad de las zonas adyacentes a la ZCBO donde  $\beta$  representa la pendiente de la ley de Gutenberg-Richter;  $\tau(4.0)$ , la tasa de actividad sísmica para magnitud  $M_w=4.0$ ; MM, la magnitud máxima media y  $\sigma_{MM}$ , la incertidumbre en la magnitud máxima. Fuente: base de datos ZESIS (García-Mayordomo et al., 2012).

Los emplazamientos en los cuales se ha decidido evaluar la variabilidad en la peligrosidad son seis ciudades del sureste peninsular: Murcia, Lorca, Alicante, Vera, Torrevecija y Almería, dada su proximidad a la fuente sismogénica de estudio y su elevada población (Tabla 6), la cual se ve incrementada en los meses de verano.

<b>Ciudad</b>	<b>Región</b>	<b>Coordenadas</b>	<b>Población (INE, 2022)</b>
<b>Murcia</b>	Murcia	-1.130278, 37.986111	462 979
<b>Lorca</b>	Murcia	-1.70, 37.683333	97 151
<b>Alicante</b>	Valencia	-0.483056, 38.345278	338 577
<b>Vera</b>	Almería	-1.867778, 37.2475	18 224
<b>Torre Vieja</b>	Valencia	-0.683333, 37.977778	83 547
<b>Almería</b>	Almería	-2.4675, 36.84	199 237

Tabla 6. Datos de los emplazamientos seleccionados para el cálculo de la peligrosidad sísmica.

El modelo de atenuación del terreno o GMPE (Ground Motion Prediction Equation) seleccionado para este estudio ha sido Campbell-Bozorgnia, 2014 (Campbell & Bozorgnia, 2014), ya que considera el comportamiento de un sistema tipo falla e incorpora la sensibilidad de la peligrosidad sísmica al tipo de comportamiento de la falla o del sistema de fallas modelado. Dicho GMPE ha sido empleado en estudios previos sobre peligrosidad sísmica en el SE peninsular (Rivas-Medina et al., 2018; Gómez-Novell et al., 2021).

Los aspectos mencionados son incorporados al software R-CRISIS (Ordaz & Salgado-Gálvez, 2019), proporcionando en cada caso los parámetros de sismicidad que caracterizan cada uno de los 100 escenarios definidos por los subcatálogos sintéticos. Cada conjunto de datos de entrada da lugar a una curva de peligrosidad independiente para cada emplazamiento seleccionado, de modo que los datos correspondientes a los diversos escenarios pueden ser comparados y así evaluar si existe o no variabilidad entre ellos.

## Capítulo 5: RESULTADOS

### 5.1 Catálogo de cálculo

La actualización del catálogo de cálculo se efectúa, en primera instancia, para toda la Península Ibérica, con límites geográficos 34°N-45°N y 13°O-6°E (Figura 4), con el fin de que los datos generados puedan ser útiles para la comunidad científica. Con ello, el catálogo completo cuenta con un total de 4,619 eventos, de los cuales 1,498 (33% del total) son eliminados tras el proceso de declustering. Gracias a ello, el catálogo debidamente homogeneizado y depurado cuenta con 3,121 terremotos de magnitud momento igual o superior a 3.0, comprendidos en un rango de profundidades de 0 a 65km. Este catálogo se une al existente hasta marzo de 2011, el cual cuenta con 10,350 eventos de las mismas características (Figura 9a). La caracterización del catálogo completo da lugar a una relación de Gutenberg-Richter (Figura 9b) con pendiente  $b = 1.1$  y  $a = 5.7$ , con lo que la ecuación que describe el catálogo completo de la Península Ibérica se corresponde con la Ecuación 24.

$$\log(N) = 5.7 - 1.1 \cdot M \quad (24)$$

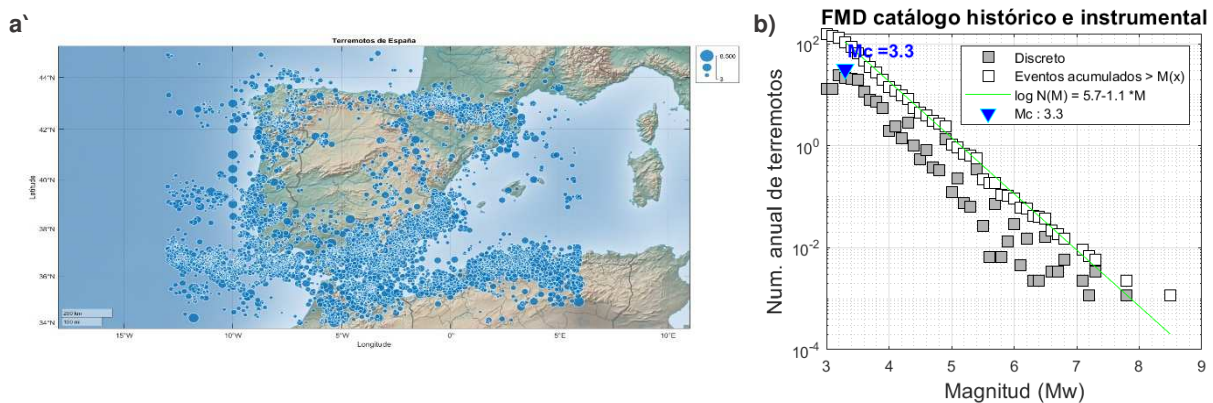


Figura 9. Sismicidad histórica e instrumental característica de la Península Ibérica con actualización del catálogo de cálculo durante el período 2011-2022: a) Distribución espacial de la sismicidad desde 1048 hasta la actualidad. b) FMD y ley de Gutenberg-Richter característica de la Península Ibérica.

Una vez confeccionado y caracterizado el catálogo completo de cálculo, se restringe el estudio a la zona de cizalla de las Béticas Orientales, ZCBO (Figura 10a). Esta región se corresponde con la zonación sísmica propuesta por García-Mayordomo et al. (2012) y ha sido empleada en diversos estudios de peligrosidad sísmica (IGN-UPM, 2013; Octavi-Novell et al., 2020). La sismicidad de la región ha sido caracterizada (Figura 10b), obteniéndose valores de  $b = 1.0$  y  $a = 3.8$ , con lo que la ley de Gutenberg-Richter que describe el comportamiento de la ZCBO viene descrita por la Ecuación 25.

$$\log(N) = 3.8 - 1.0 \cdot M \quad (25)$$

Los datos resultantes guardan acuerdo con los procedentes de estudios previos ( $a=3.9$ ,  $b=1.0$ ; IGN-UPM, 2013) ya que la diferencia de 0.1 en el valor de  $a$ , queda recogida dentro de la incertidumbre del modelo. Estos valores se emplean como referencia para efectuar la

comparación con los resultados que derivan del análisis de los subcatálogos sintéticos de terremotos.

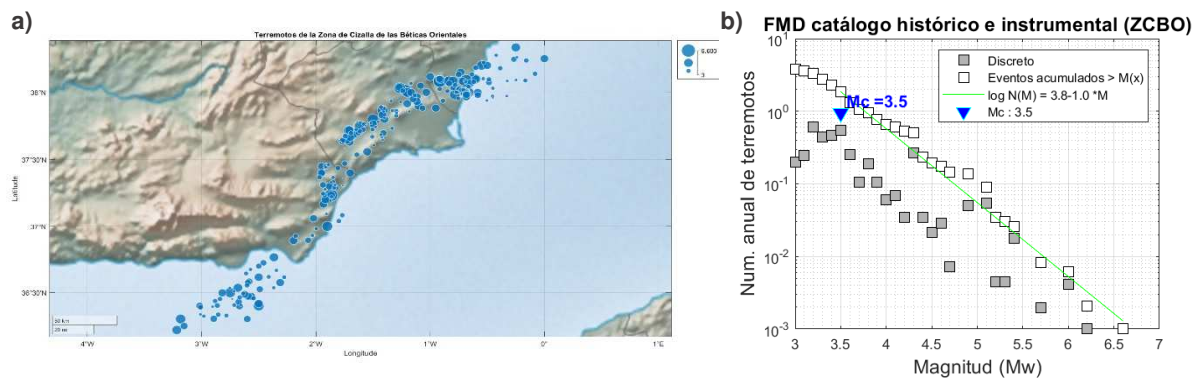


Figura 10. Sismicidad histórica e instrumental característica de la zona de cizalla de las Béticas Orientales (ZCBO): a) Distribución espacial de la sismicidad desde 1048 hasta la actualidad, en el perímetro delimitado por la zonación de García-Mayordomo et al. (2012) b) FMD y ley de Gutenberg-Richter características de la ZCBO.

## 5.2 Subcatálogos sintéticos y caracterización automática

El algoritmo diseñado para la generación y caracterización de subcatálogos en base al catálogo sintético de 1M.a. generado por Herrero-Barbero et al. (2021), da lugar a 100 catálogos que recogen los terremotos comprendidos entre una cierta fecha aleatoria y los 1,000 años posteriores. La depuración de los catálogos de réplicas y premonitorios se realiza de manera automática, de acuerdo con las ecuaciones propuestas por IGN-UPM, (2013). Finalmente, la consecución de las FMD características de los distintos subcatálogos y su ajuste mediante el método de máxima verosimilitud a una ley de Gutenberg-Richter resulta en siguiente conjunto de datos (Tabla 7), que constituyen los parámetros de entrada para el cálculo de la peligrosidad sísmica en cada uno de los escenarios. Un ejemplo de las FMD obtenidas puede observarse en la Figura 11 donde pueden apreciarse las variaciones en la magnitud de completitud, la pendiente, la tasa de terremotos y la magnitud máxima. Gracias a esta visualización puede apreciarse la variabilidad existente entre catálogos. Cabe destacar la presencia de terremotos aislados de elevada magnitud, por ejemplo, en los catálogos 2 (Figura 11a) y 47 (Figura 11g), cuyas implicaciones serán analizadas más adelante. Cabe observar que la ley de Gutenberg-Richter que describe el catálogo 5 (Figura 11b) es equivalente a la del catálogo histórico e instrumental y que, pese a ser muy distintos, los catálogos 26 (Figura 11e) y 37 (Figura 11f) resultan descritos por la misma ley.

Parámetros característicos de 100 subcatálogos sísmicos															
cat.	a	b	M <sub>max</sub>	cat.	a	b	M <sub>max</sub>	cat.	a	b	M <sub>max</sub>	cat.	a	b	M <sub>max</sub>
1	4.68	1.15	6.50	26	5.31	1.27	6.50	51	3.18	0.81	6.10	76	4.18	1.04	6.00
2	5.10	1.21	7.50	27	5.28	1.22	7.10	52	3.19	0.82	6.80	77	3.26	0.86	6.80
3	5.95	1.39	6.80	28	3.94	1.03	6.30	53	3.44	0.91	6.20	78	4.84	1.16	7.00
4	6.50	1.52	5.80	29	3.19	0.84	7.20	54	6.36	1.45	6.50	79	4.63	1.14	6.20
5	3.84	1.02	6.20	30	5.92	1.39	6.50	55	5.33	1.17	6.60	80	3.97	1.05	7.40
6	4.83	1.17	6.30	31	5.24	1.21	6.40	56	4.99	1.22	6.50	81	3.68	0.93	7.40
7	3.38	0.85	6.30	32	4.35	1.06	7.40	57	5.19	1.25	5.90	82	4.30	1.06	7.10
8	3.43	0.90	7.60	33	5.13	1.19	6.70	58	5.69	1.35	6.60	83	3.76	0.99	6.90
9	4.12	1.02	6.90	34	5.18	1.25	6.60	59	4.36	1.04	6.70	84	3.45	0.91	6.70
10	3.31	0.92	6.00	35	3.43	0.85	5.90	60	3.23	0.84	6.70	85	3.20	0.83	7.50
11	4.02	1.01	7.40	36	3.21	0.84	7.60	61	3.25	0.85	7.40	86	5.14	1.22	6.30
12	4.68	1.17	6.60	37	5.28	1.32	6.30	62	2.79	0.75	7.50	87	3.17	0.80	7.50
13	3.44	0.91	6.70	38	4.11	1.04	6.50	63	3.08	0.80	6.60	88	5.26	1.26	6.60
14	4.48	1.11	6.90	39	5.88	1.39	6.20	64	4.77	1.16	6.80	89	5.24	1.22	6.90
15	5.32	1.26	6.00	40	4.36	1.05	6.50	65	4.38	1.04	7.40	90	5.48	1.27	7.30
16	5.10	1.22	6.00	41	3.03	0.79	7.60	66	3.56	0.92	6.20	91	5.59	1.32	6.30
17	5.24	1.24	6.80	42	5.00	1.19	6.00	67	4.60	1.10	7.30	92	5.06	1.18	7.30
18	4.46	1.08	7.10	43	4.81	1.15	7.30	68	3.33	0.88	7.50	93	4.16	0.99	7.60
19	3.39	0.90	5.90	44	5.25	1.24	6.00	69	5.30	1.26	6.70	94	3.85	0.98	6.30
20	5.76	1.37	5.80	45	3.75	0.96	7.10	70	4.39	1.01	6.70	95	3.85	0.98	5.80
21	4.52	1.09	7.10	46	5.13	1.22	6.40	71	6.05	1.42	6.40	96	3.06	0.80	6.40
22	5.30	1.24	7.20	47	3.16	0.84	7.60	72	5.62	1.31	6.50	97	3.25	0.84	6.50
23	3.45	0.90	7.30	48	5.62	1.31	6.50	73	2.45	0.66	7.50	98	5.34	1.24	6.70
24	4.88	1.22	6.80	49	4.13	1.02	7.40	74	5.22	1.23	7.00	99	3.01	0.79	7.10
25	3.66	0.90	7.40	50	4.98	1.19	6.40	75	4.82	1.19	6.60	100	3.13	0.83	7.60

Tabla 7. Atributos característicos de los 100 subcatálogos de 1,000 años generados en este estudio a partir de un catálogo sintético de 1M.a..

Para evaluar los resultados obtenidos se representan, mediante histogramas, la frecuencia de aparición de los distintos valores de a (Figura 12a), b (Figura 12b) y M<sub>max</sub> (Figura 12c) donde puede observarse mayor presencia de los valores 3.0-3.5 y 5.0-5.5 para el caso de a (Figura 12a); 1.2-1.3 para el caso de b (Figura 12b) y 6.6-6.7 para el caso de M<sub>max</sub> (Figura 12c). La variabilidad de estos parámetros, según el modelo empleado en este estudio, podrá observarse con más detalle gracias a la ejecución de 10,000 catálogos (apartado 5.4 *Estudio estadístico de 10,000 subcatálogos*)

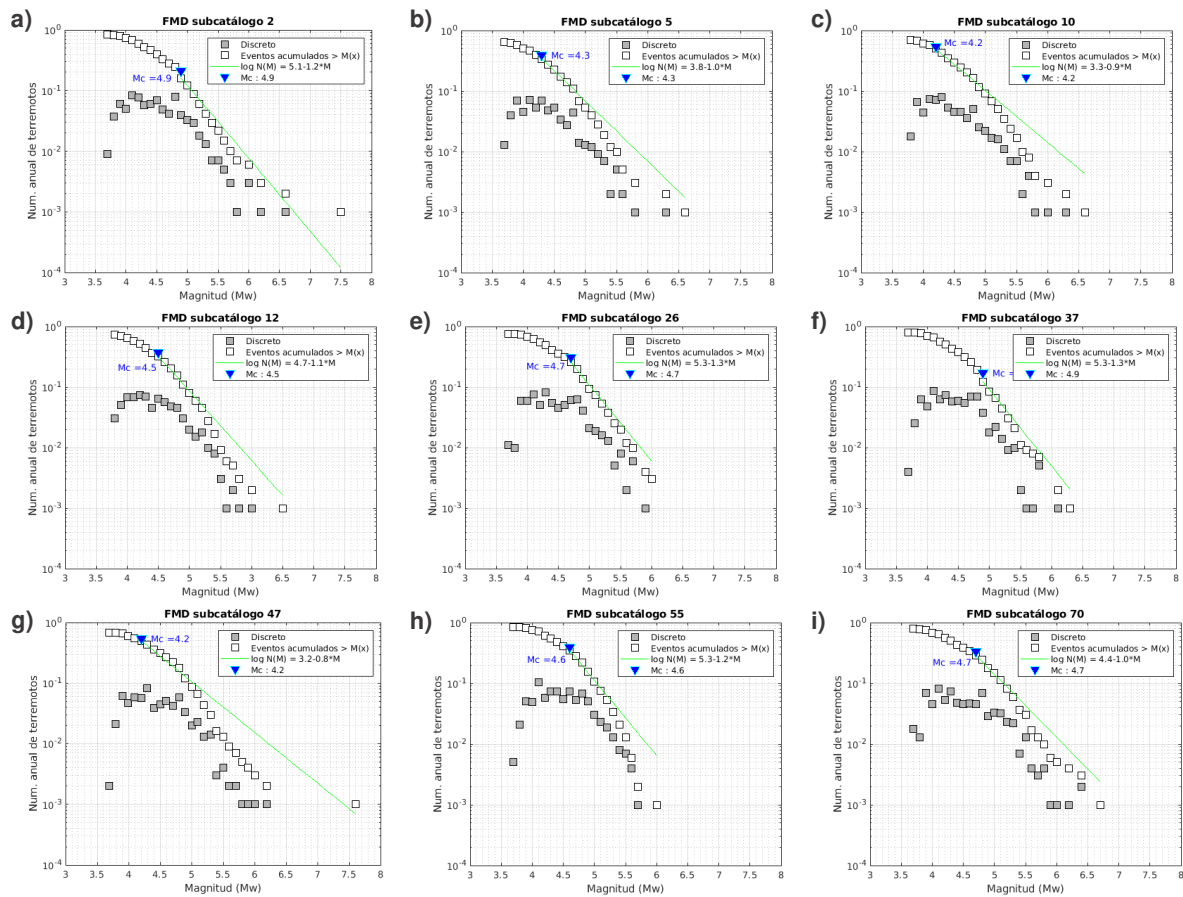


Figura 11. Ejemplos de FMD de diversos subcatálogos sintéticos: a) catálogo 2, b) catálogo 5, c) catálogo 10, d) catálogo 12, e) catálogo 26, f) catálogo 37, g) catálogo 47, h) catálogo 55 y i) catálogo 70.

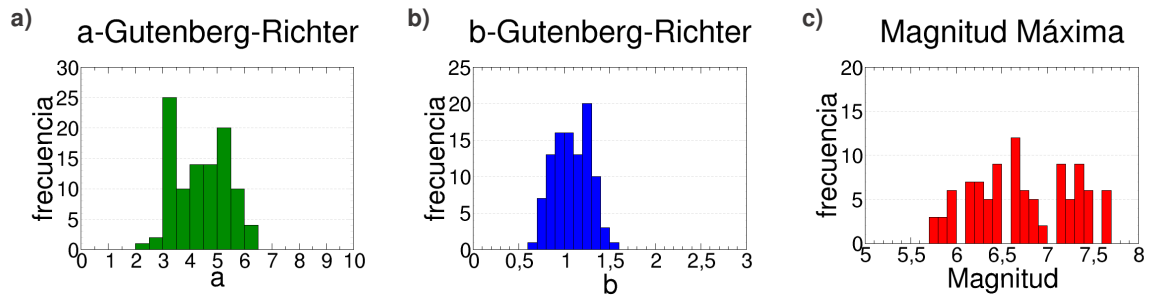


Figura 12. Frecuencia de aparición de los distintos valores de: a) a, b) b y c)  $M_{max}$  para los 100 subcatálogos de 1,000 años generados a partir de un catálogo sintético de 1M.a..

### 5.3 Curvas de peligrosidad

Las curvas de peligrosidad han sido obtenidas para los emplazamientos de Murcia (Figura 13a), Lorca (Figura 13b), Alicante (Figura 13c), Vera (Figura 13d), Torrevieja (Figura 13e) y Almería (Figura 13f). Los resultados muestran distintos valores de periodo de retorno para los diversos subcatálogos de origen sintético (en gris). Dichos valores superan, para la mayor parte de valores de PGA, los periodos de retorno obtenidos a partir los datos procedentes del catálogo histórico e instrumental (en rojo) y los datos de la base de datos ZESIS (en azul).

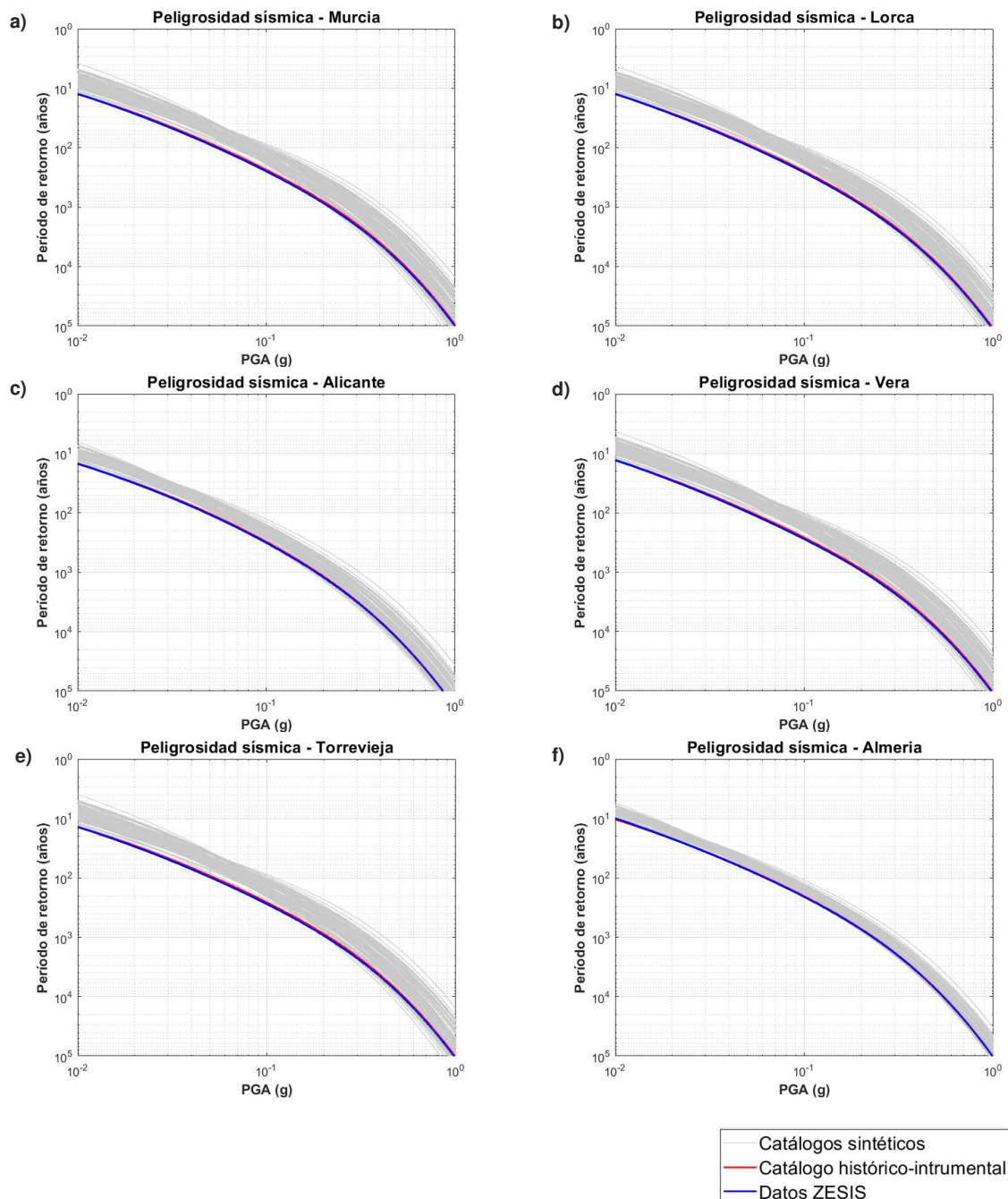


Figura 13. Curvas de peligrosidad sísmica obtenidas en base a 100 subcatálogos sintéticos de 1,000 años para las ciudades de a) Murcia, b) Lorca, c) Alicante, d) Vera, e) Torrevieja y f) Almería.

Dado que las curvas de peligrosidad sísmica son representadas en escala logarítmica, la percepción de la variabilidad queda camuflada por el tipo de escala. Para poder observar mejor dicha variabilidad, los valores de PGA han sido representados en función del período de retorno en un diagrama de cajas (Figura 14). Los períodos de retorno seleccionados para dicha evaluación son aquellos que poseen interés para los estudios de peligrosidad (apartado 3.3 *Estudio PSHA de peligrosidad sísmica*). De este modo, puede observarse como la variabilidad más grande en los datos se encuentra para grandes períodos de retorno y grandes valores de PGA.

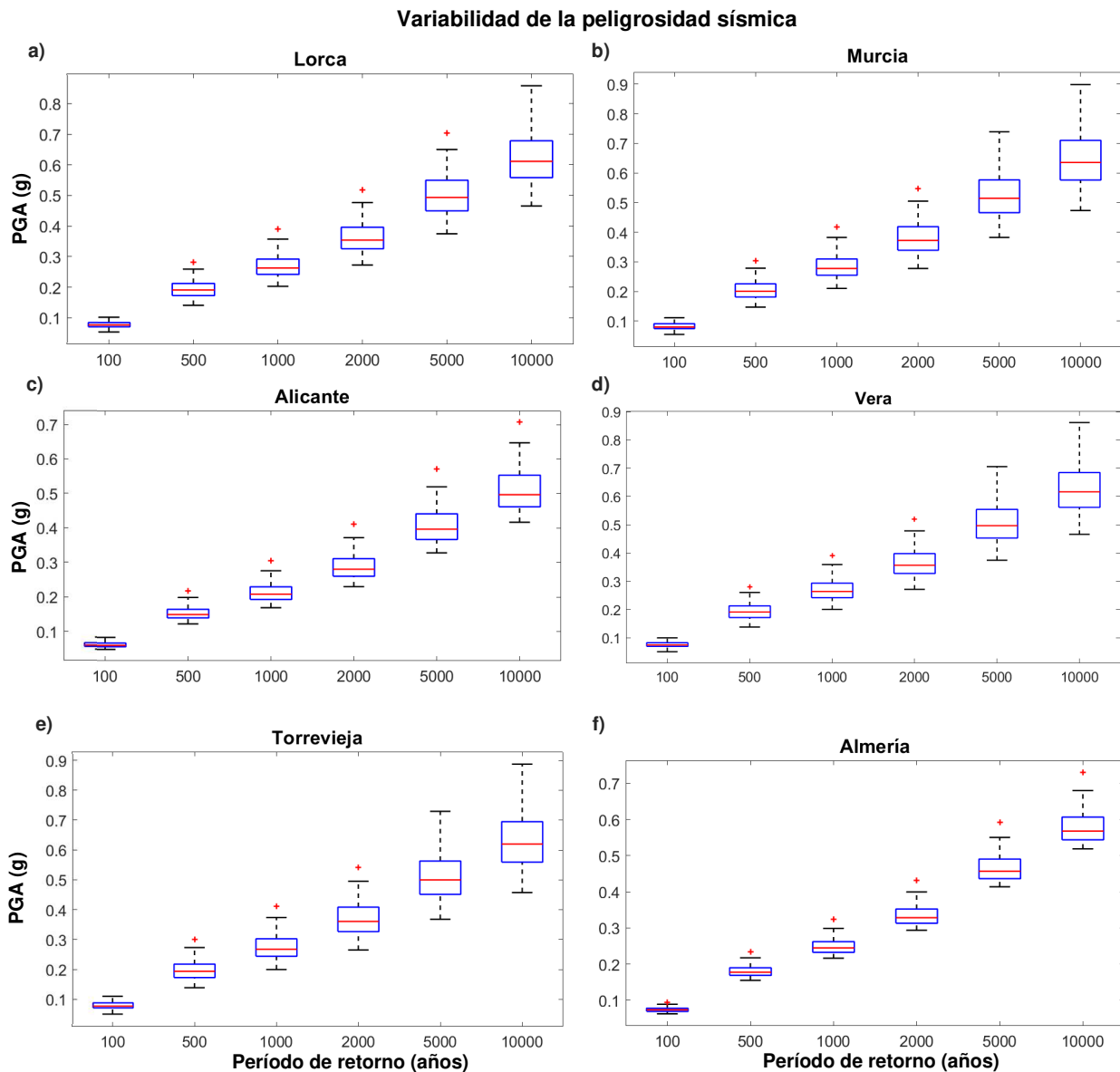


Figura 14. Variabilidad de la PGA para distintos períodos de retorno expresada como percentiles 25% y 75% en azul; mediana en rojo; máximos y mínimos en negro y valores anómalos como "+" en rojo. Datos para las ciudades de: a) Murcia, b) Lorca, c) Alicante, d) Vera, e) Torre Vieja y f) Almería.

Para poder evaluar las diferencias observadas entre ciudades, se representa la curva de peligrosidad media (Figura 15a) y el coeficiente de variación (Figura 15b) para cada una de ellas. Con ello, se observa que las curvas de peligrosidad medias son bastante semejantes

para los casos de Murcia, Lorca, Torrevieja, Vera y Almería, siendo la curva media de la ciudad de Alicante significativamente menor que el resto. Los resultados obtenidos al evaluar el coeficiente de variación en el período de retorno para distintos valores de PGA dan cuenta de que la variabilidad se acentúa para elevados valores de PGA. Este resultado ya había sido observado en los diagramas de cajas (Figura 14), pero al evaluar el coeficiente de variación puede cuantificarse dicha variabilidad. Para el caso de la ciudad de Murcia, los resultados alcanzan el mayor valor de variabilidad en un 57%; para Lorca, en un 53% para Almería, en un 25%; para Vera, en un 54%; en el caso de Torrevieja se alcanza el máximo de variabilidad, que supone un 58% y, por último, para el caso de Alicante, la variación máxima obtenida es de un 40%.

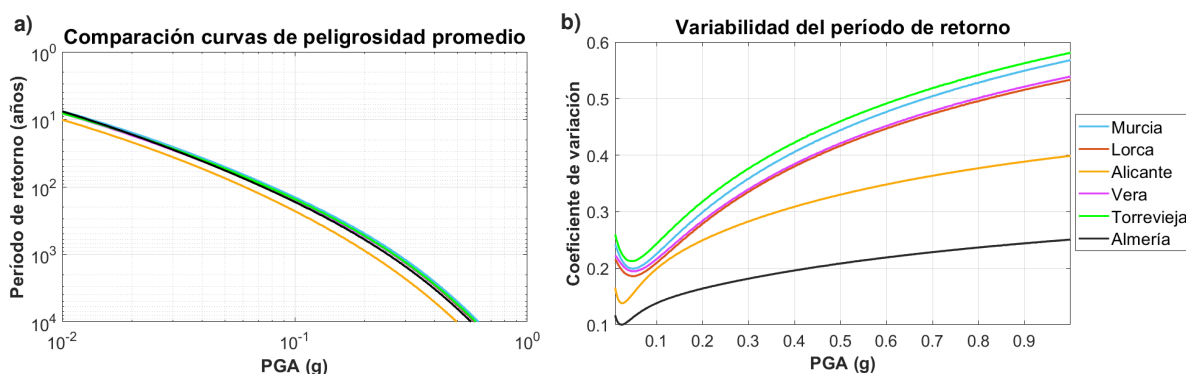


Figura 15. a) Curvas de peligrosidad medias y b) coeficiente de variación para las ciudades de Murcia, Lorca, Alicante, Vera, Torrevieja y Almería.

#### 5.4 Estudio estadístico de 10,000 subcatálogos

Desde un punto de vista estadístico, la evaluación de un conjunto de 100 subcatálogos no resulta una cantidad suficientemente representativa como para poder inferir el comportamiento de los distintos parámetros que caracterizan el sistema. La Figura 12 muestra la distribución de  $a$ ,  $b$  y  $M_{max}$  para el conjunto de 100 subcatálogos. Con el fin de evaluar si esta es la tendencia natural de los datos, las Figuras 16a, 16b y 16c muestran el comportamiento de  $a$ ,  $b$  y  $M_{max}$  respectivamente, para un conjunto de 10,000 subcatálogos englobando la totalidad de las fallas que conforman el sistema.

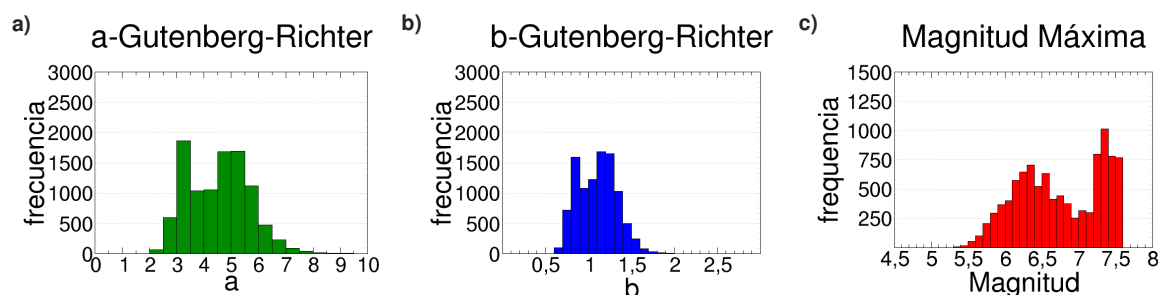


Figura 16. Frecuencia de aparición de los parámetros a)  $a$  y b)  $b$  de la ley de Gutenberg-Richter y de c) magnitudes máximas para un conjunto de 10,000 catálogos de terremotos.

En la Figura 16a se observan dos máximos marcados para el rango  $a = 3.0-3.5$  y  $a = 4.5-5.5$ . En la Figura 16b se manifiesta como la pendiente  $b$  de la ley de Gutenberg-Richter presenta un comportamiento aproximadamente normal, pero mostrando la presencia de dos máximos centrados entre  $b = 0.8-0.9$  y  $b = 1.2-1.3$ . La morfología en la distribución de  $a$  (Figura 16a) y  $b$  (Figura 16b) resulta muy similar. El comportamiento de las magnitudes máximas (Figura 16c) está marcado por una tendencia bimodal, con un máximo principal centrado entre  $M_w = 7.3-7.4$  y un máximo secundario centrado entre  $M_w = 6.3-6.4$ . Los terremotos que se engloban en torno al máximo principal poseen una magnitud momento superior a  $M_w=7.2$ , lo cual los convierte en grandes terremotos. Si se comparan los resultados obtenidos al evaluar 100 catálogos (Figura 16) con los resultantes de estudiar 10,000 (Figura 12) puede verse que el histograma de  $a$  para el caso de 100 catálogos (Figura 12a) tiene un máximo en  $a = 3.0-3.5$  significativamente más marcado. Para el caso de  $b$  (Figura 12b) destaca especialmente el máximo de  $b = 1.2-1.3$ . Para el caso de la magnitud máxima (Figura 12c) resulta difícil evaluar su comportamiento ya que presenta un patrón irregular en la frecuencia de aparición de las distintas magnitudes. En resumen, puede afirmarse que las tendencias de comportamiento al evaluar 100 catálogos y 10,000 se asemejan, pero presentan diferencias esperables debido al menor muestreo estadístico.

Con el fin de evaluar la variabilidad existente entre las distintas fallas que conforman el sistema, se han analizado los parámetros  $a$  (Figura 17),  $b$  (Figura 18) y  $M_{max}$  (Figura 19) para las fallas de Alhama de Murcia, Carboneras, Carrascoy y Bajo Segura. Las fallas de Palomares y Los Tollos quedan fuera de esta parte del estudio por tener asociados pocos terremotos, en muchos casos insuficientes como para poder ajustar el catálogo a una ley potencial.

Al analizar la distribución estadística de los parámetros de las distintas fallas de la ZCBO se observa que el parámetro  $a$  (Figura 17) muestra una predominancia de valores más bajos, con máximos situados en todos los casos cerca de  $a = 3.0$ . Para los casos de la falla de Alhama de Murcia (Figura 17a) el máximo se sitúa entre  $a = 2.0-2.5$ . Las fallas de Carboneras (Figura 17b) y del Bajo Segura (Figura 17d) presentan su máximo entre  $a = 2.5-3.0$ . En el caso de la falla de Carrascoy (Figura 17c) la variabilidad en el parámetro  $a$  es alta y ninguno de los valores destaca sobre el resto, presentando una distribución con un cierto carácter normal centrada en torno a 3.0.

En el caso del parámetro  $b$  (Figura 18) se observa que las pendientes que se obtienen en los catálogos generados para las fallas de Alhama de Murcia (Figura 18a) y del Bajo Segura (Figura 18d) son inferiores a la unidad, presentando máximos muy marcados para  $0.7-0.8$  en

el caso de la falla de Alhama de Murcia y  $b = 0.8-0.9$  para la falla del Bajo Segura. Las fallas de Carboneras (Figura 18b) y Carrascoy (Figura 18c) presentan una distribución más homogénea con comportamiento normal y máximos comprendidos entre  $b = 1.0-1.2$  para ambos casos.

La distribución estadística de la magnitud máxima por fallas da cuenta de la diversidad de comportamiento que se alcanza entre las distintas partes del sistema. Mientras que las fallas de Alhama de Murcia (Figura 19a) y la falla de Carboneras (Figura 19b) presentan una distribución bimodal semejante a la del sistema global, las fallas de Carrascoy (Figura 19c) y del Bajo Segura (Figura 19d) solo cuentan con una distribución aproximadamente normal centradas en  $M_{\max} = 5.6$  para ambos casos y no nuclean terremotos de elevada magnitud.

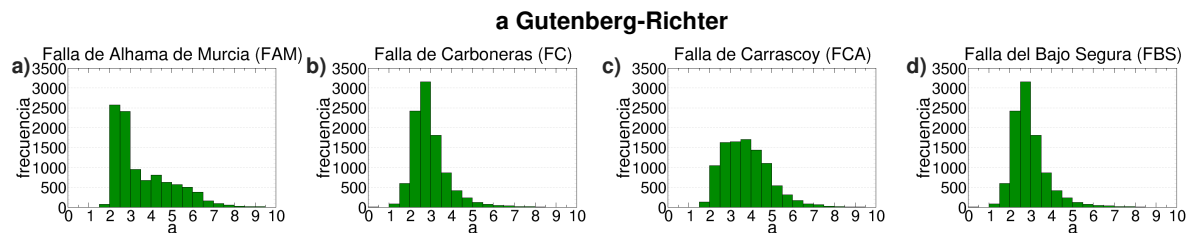


Figura 17. Valores de  $a$  de la ley de Gutenberg-Richter para catálogos de terremotos nucleados en las fallas de a) Alhama de Murcia, b) Carboneras, c) Carrascoy y d) Bajo Segura.

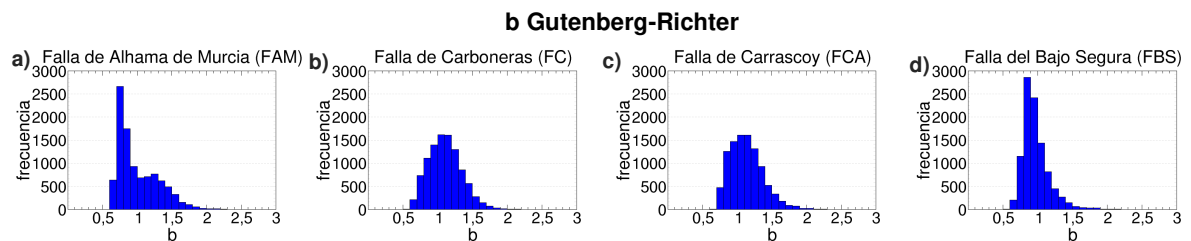


Figura 18. Valores de pendiente  $b$  de la ley de Gutenberg-Richter para catálogos de terremotos nucleados en las fallas de a) Alhama de Murcia, b) Carboneras, c) Carrascoy y d) Bajo Segura.

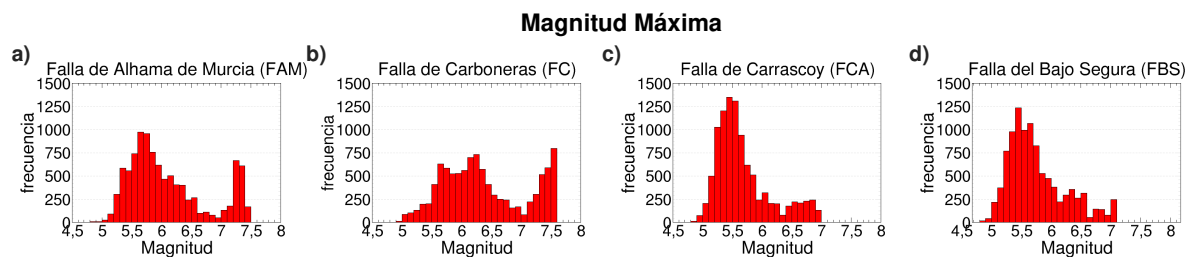


Figura 19. Valores de magnitud máxima para catálogos de terremotos nucleados en las fallas de a) Alhama de Murcia, b) Carboneras, c) Carrascoy y d) Bajo Segura.

## Capítulo 6: DISCUSIÓN

El objetivo principal de este estudio consiste en evaluar si la ventana temporal en la cual se registra el catálogo de terremotos influye en los resultados de los estudios de peligrosidad. Para ello, en base al catálogo de terremotos de 1M.a. generado por Herrero-Barbero et al. (2021) se han creado 100 subcatálogos aleatoriamente distribuidos en el tiempo. Los resultados (Figuras 13 y 14) muestran como dicha variabilidad existe. Tal variabilidad se acentúa para los grandes períodos de retorno y elevados valores de PGA. Este resultado sería vinculante en el caso de construir una infraestructura crítica, muy crítica o supercrítica. Sin embargo, la construcción de este tipo de estructuras suele efectuarse bajo escenarios deterministas de peligrosidad que consideran el peor escenario posible.

Es de destacar que las curvas de peligrosidad (Figura 13) descritas por los datos procedentes del catálogo histórico e instrumental y de la base de datos ZESIS, proporcionan períodos de retorno menores que los escenarios sintéticos para un mismo valor de PGA. O lo que es lo mismo, los escenarios sintéticos proporcionan valores de peligrosidad más altos. Este hecho podría deberse a que el modelo empleado sobreestima la tasa de terremotos. Sin embargo, no puede descartarse que, por situarse dentro de los límites del modelo, el escenario histórico e instrumental constituya uno de los escenarios de menor peligrosidad que puede generar el sistema.

La variabilidad en función de las ciudades (Figura 15) muestran como la influencia de la ZCBO es mayor para el caso de Torre Vieja (58%), Murcia (57%), Vera (54%) y Lorca (53%), ya que estas ciudades se sitúan en el interior de la zona sismogénica. Las localidades de Alicante (40%) y Almería (25%) se muestran menos afectadas por la sismicidad de la ZCBO, por lo que presentan menor sensibilidad al estudio y su variabilidad es menor.

Al evaluar la forma de las FMD de cada catálogo se observa un decrecimiento en la frecuencia acumulada de terremotos para el intervalo de magnitudes comprendido entre  $M_w = 4.5-5.5$ , lo cual puede deberse a la falta de sismicidad sintética derivada de la modelización exclusiva de fallas principales en el modelo tridimensional de la ZCBO.

El ajuste de los parámetros  $a$  y  $b$  de los diferentes escenarios puede resultar incorrecto por forzar a todos los catálogos a ajustarse a una ley de tipo Gutenberg-Richter, cuando puede observarse que ciertos catálogos, como son 2 (Figura 11a) y 47 (Figura 11g), presentan un comportamiento semejante al de tipo terremoto característico, con la presencia de terremotos

de magnitud elevada con una frecuencia superior a la que determina la ley potencial dominante en el resto del catálogo.

Otros parámetros del ajuste también merecen mención, ya que desempeñan un papel determinante en los resultados obtenidos. El cálculo de la magnitud de completitud del catálogo se realiza bajo el método de Test de Bondad de Ajuste, sin embargo, otros métodos han sido evaluados, como el método de máxima curvatura. El método de máxima curvatura daba lugar a valores inferiores en los que no se considera que el catálogo se comportara verdaderamente como un catálogo completo. Sin embargo, los valores obtenidos mediante el método de bondad de ajuste sí que dan lugar a magnitudes de completitud acertadas, con valores situados en torno a  $M_w = 4.7$ . Esta magnitud de completitud es elevada y muy superior a la que presenta el registro histórico e instrumental. Sin embargo, forma parte de las limitaciones del modelo sintético, ya que viene determinada por la resolución de las celdas que conforman la malla del modelo tridimensional.

A su vez, ha sido necesario establecer para el catálogo histórico e instrumental de ZCBO una magnitud de completitud de  $M_w = 3.5$  (Figura 10b), cuando según IGN-UPM, (2013) se considera que el catálogo es completo a partir de magnitud  $M_w = 3.0$ . Este factor puede ser indicativo de una falta de registro en este intervalo de magnitudes, el cual puede estar motivado por una densidad insuficiente de sismómetros en la región, por una depuración demasiado restrictiva o por déficit de resolución en los equipos.

Otro de los aspectos que merece discusión en lo referente al catálogo histórico e instrumental es como la sismicidad del catálogo (Figura 10a) presenta unas pequeñas discontinuidades en las magnitudes enteras y medias. La naturaleza de una FMD no justifica esta forma, la cual se debe al procesamiento previo del catálogo. En el análisis de completitud efectuado por IGN-UPM, (2013), las magnitudes se discretizan en intervalos de 0.5, eliminándose aquellos sismos que sucedieron antes del rango temporal considerado (Figura 6). Este filtro en la parte final del procesado provoca una alteración en los datos, que pierden su continuidad y presentan estas pequeñas desviaciones.

Al evaluar el conjunto de datos obtenidos del estudio estadístico de 10,000 catálogos se observa como la magnitud máxima y la pendiente  $b$  de la Gutenberg-Richter presentan un comportamiento bimodal con máximos en  $M_{max} = 6.1$  y  $M_{max} = 7.2$  y  $b = 0.8-0.9$  y  $b = 1.1-1.3$  respectivamente. Para el caso de la magnitud máxima, este patrón puede deberse a que el sistema presente un comportamiento tipo terremoto característico, de manera que la frecuencia de aparición de grandes terremotos supera a la esperada de cumplirse una ley

potencial tipo Gutenberg-Richter. Al evaluar este comportamiento en las distintas fallas que conforman el sistema puede verse la diversidad de comportamientos que puede presentar un período de 1,000 años. Mientras que las fallas de Alhama de Murcia y Carboneras mantienen el patrón bimodal encontrado en el catálogo global; las fallas de Carrascoy y del Bajo Segura solo cuentan con una distribución de tipo normal centrada en  $M_w = 5.6$ . Esta diferencia de comportamiento se debe a que las fallas de Alhama de Murcia y Carboneras presentan tasas de deslizamiento más rápidas de manera que estadísticamente albergan un mayor número de grandes eventos. A su vez, cuando tiene lugar la ruptura conjunta de varios segmentos, se produce en estas fallas. Por otro lado, para el caso de la pendiente  $b$  de la Gutenberg-Richter se obtiene dos máximos, pero en este caso, están mucho menos marcados que en el caso de la magnitud máxima. Se podría considerar la distribución aproximadamente normal centrada en torno a  $b = 1.0-1.1$  de acuerdo con los datos que caracterizan la región (Figura 10b) y al valor esperable para una ley de tipo Gutenberg-Richter.

## Capítulo 7: CONCLUSIONES

El presente estudio *Dependencia de la peligrosidad sísmica con el período de observación: análisis basado en sismicidad sintética para la zona de cizalla de las Béticas Orientales (SE España)* ha permitido evaluar como la peligrosidad sísmica depende de la ventana temporal de observación en la cual se evalúa el sistema. Mediante el desarrollo completo de un PSHA, se han empleado los datos de partida procedentes de un estudio sintético para construir escenarios físicamente plausibles, basados en la física de terremotos, para seis ciudades del sureste peninsular obteniendo distintos resultados en la peligrosidad para cada escenario planteado. La comparación del ciclo sísmico de las fallas, que puede durar desde miles hasta cientos de miles de años, con un período de observación de 975 años resulta en una caracterización inexacta del potencial sismogénico del sistema. Para tratar de paliar este problema, los estudios de arqueosismología, paleosismología o los modelos de sismicidad sintética se presentan como herramientas fundamentales para poder caracterizar más profundamente el sistema. Gracias a la automatización completa del proceso de análisis, se ha podido evaluar estadísticamente un conjunto de 10,000 subcatálogos extraídos del catálogo sintético de 1M.a.. Con ello, se notifica una elevada presencia de rupturas complejas que involucran varios segmentos de falla generando grandes terremotos, de los cuales no se tiene constancia en el registro histórico.

Por todo ello, este trabajo ha supuesto un ejercicio didáctico de gran valor. En él se ha aprendido a efectuar desde el inicio un estudio probabilista de peligrosidad sísmica (PSHA), con todas las etapas que ello involucra: procesado de un catálogo sísmico llevando a cabo el proceso de declustering, la homogenización de magnitudes y el análisis de completitud; a caracterizar la ley de potencias que define un catálogo de terremotos de acuerdo al método de máxima verosimilitud; a resolver la integral de peligrosidad mediante el software R-CRISIS aportando todos los parámetros implicados en el estudio y entendiendo su significado e implicaciones. A un tiempo, se ha aprendido a interpretar los resultados obtenidos en el contexto de la tectónica activa y a dilucidar las consecuencias que estos pueden tener en la determinación de la peligrosidad sísmica. Por último, y destacando de manera especial en importancia, se ha adquirido destreza en el uso de mapas geológicos, en el entendimiento de contextos geológicos y geodinámicos y en sus implicaciones en el comportamiento del sistema activo bajo estudio.

Como conclusión a este trabajo, cabe destacar que la ciencia destinada a la caracterización de la peligrosidad sísmica es una ciencia activa que produce nuevas observaciones de manera constante. La actual normativa sismorresistente de España no ha sido actualizada desde 2002, sin embargo, el conocimiento actual de las fallas del territorio nacional ha mejorado mucho desde entonces. Todos los esfuerzos económicos y científicos destinados a tal fin deberían verse reflejados en medidas que permitan proteger a la población.

## Capítulo 8: FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Al trabajar con catálogos de terremotos y realizar un PSHA se han identificado nuevas líneas de investigación. Estas líneas despiertan interés puesto que permitirían aprovechar de nuevas maneras la información sísmica contenida en los registros de terremotos.

1. En un primer lugar, gracias a unas breves pruebas realizadas con el catálogo sintético de 1M.a. generado por Herrero-Barbero et al. (2021) se ha observado que el intervalo temporal entre eventos previos a la ocurrencia de un gran terremoto da cuenta de una aceleración en el sistema. La evaluación del comportamiento de estos premonitorios podría constituir una extensión del presente trabajo.
2. Se ha observado que los modelos sintéticos de terremotos sufren de falta de sismicidad de fondo para magnitudes intermedias ( $M_w = 4.5-5.5$ ) a causa de no incorporar fallas secundarias en sus modelos geométricos. Añadir sismicidad de fondo con representatividad estadística (Robinson et al., 2011) de lo que ocurre en la realidad permitiría paliar esta carencia y ampliar el presente estudio.
3. También se ha observado que la pendiente  $b$ , de la ley de Gutenberg-Richter, guarda relación con la magnitud máxima de cada catálogo (Figura 20. La relación observada es una tendencia aproximadamente lineal con un punto de cambio abrupto ubicado en torno a  $M_w = 7.2$ . Entender porque la variación se produce en este determinado punto proporcionaría más información acerca del funcionamiento del modelo en el cual se basa este estudio.

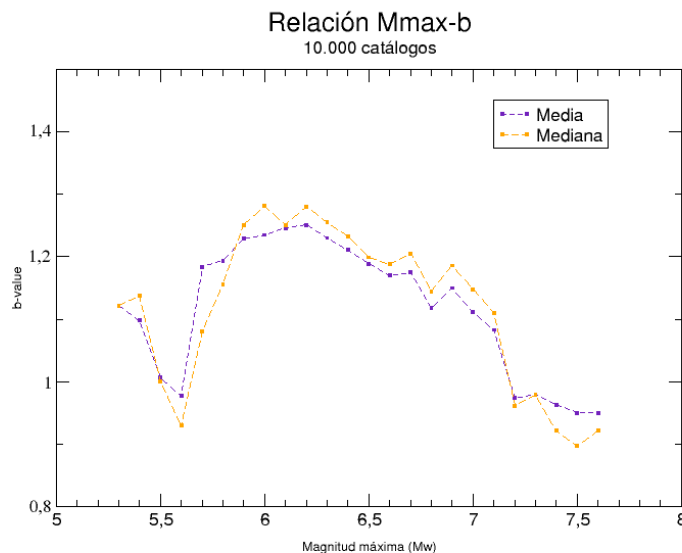


Figura 20. Relación observada entre la magnitud máxima de cada subcatálogo sintético y la pendiente  $b$  de la ley de Gutenberg-Richter.

4. Ciertos autores (Bak et al., 2002; Baiesi & Paczuski, 2004; Davidsen & Goltz, 2004) proponen una escala unificada para la caracterización de los catálogos de terremotos basada en el intervalo temporal entre eventos, conocido como *waiting time*. Este parámetro permitiría obtener una caracterización alternativa del sistema y con ello poder obtener otros puntos de vista, lo cual derivaría en la obtención de nuevas conclusiones.
5. A su vez, y en suma a la tendencia creciente en el uso de inteligencia artificial, sería interesante crear una red neuronal recurrente (Sadhukhan et al., 2022; Panakkat & Adeli, 2007) capaz de analizar un gran conjunto de terremotos para tratar de inferir patrones de comportamiento en las series sísmicas.
6. Gracias a que el modelo de sismicidad sintética proporciona un conjunto extenso de datos, podrían aplicarse técnicas de análisis estadístico sofisticadas como el periodograma de Lomb-Scargle (Baisch, & Bokelmann, 1999; Polanco-Martínez et al., 2014; Ansari & Bae, 2021), para inferir patrones cíclicos en los datos y con ello identificar el ciclo sísmico de las fallas gracias a la sismicidad.

## Capítulo 9: REFERENCIAS

- Aki, K. (1965). Maximum likelihood estimate of  $b$  in the formula  $\log N = a - bM$  and its confidence limits. *Bull. Earthquake Res. Inst., Tokyo Univ.*, 43, 237-239.
- Akkar, S. & Boomer, J. J. (2010): Empirical Equations for the Prediction of PGA, PGV, and Spectral Accelerations in Europe, the Mediterranean Region, and the Middle East. *Seism. Res. Lett.*, 81, 195-206.
- Akkar, S., Sandıkkaya, M. A., & Bommer, J. J. (2014). Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. *Bull. Earthq. Eng.* 12, 359–387.
- Alfaro, P., Andreu, J.M., J. Delgado, Estévez, A., Soria, J.M. & Teixido, T. (2002). Quaternary deformation of the Bajo Segura blind fault (eastern Betic Cordillera, Spain) revealed by high resolution reflection profiling. *Geological Magazine*, 139(3), 331-341.
- Alfaro, P., Bartolomé, R., Borque Arancón, M. J., Estévez, A., García Mayordomo, J., García-Tortosa, F. J., Francisco, J., Gil, A.J., Gracia, E. & Lacono, C. (2012). The Bajo Segura fault zone: active blind thrusting in the eastern betic cordillera (SE Spain). *Journal of Iberian Geology* 38(1): 271-284.
- Allen, C. R., St. Amand, P., Richter, C. F., & Nordquist, J. M. (1965). Relationship between seismicity and geologic structure in the southern California region. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 55(4), 753-797.
- Ansari, K., & Bae, T. S. (2021). Clustering analysis of seismicity in the space–time–depth–magnitude domain preceding the 2016 Kumamoto earthquake, Southwestern Japan. *International Journal of Earth Sciences*, 110(1), 253-261.
- Baena-Escudero, R. (1993): Evolución cuaternaria de la Depresión del Medio-Bajo Guadalquivir y sus márgenes (Córdoba y Sevilla). Tesis doctoral. Universidad de Sevilla (España).
- Baiesi, M., & Paczuski, M. (2004). Scale-free networks of earthquakes and aftershocks. *Physical review E*, 69(6), 066106.
- Baisch, S., & Bokelmann, G. H. (1999). Spectral analysis with incomplete time series: an example from seismology. *Computers & Geosciences*, 25(7), 739-750.
- Bak, P., Christensen, K., Danon, L., & Scanlon, T. (2002). Unified scaling law for earthquakes. *Physical Review Letters*, 88(17), 178501.
- Batló, J. (2004) Catálogo inventario de sismógrafos antiguos españoles [A Catalogue of Old Spanish Seismographs]. Instituto Geográfico Nacional, Madrid.
- Boore, D. M. & Atkinson, G. M. (2008). Ground- Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at Spectral Periods Between 0.01 s and 10.0 s. *Earthquake Spectra*, 24, 99-138.
- Borque, M., Sánchez-Alzola, A., Martín-Rojas, I., Alfaro, P., Molina, S., Rosa-Cintas, S., Avilés, M. y col. (2019). How Much Nubia-Eurasia Convergence Is Accommodated by the NE End of the Eastern Betic Shear Zone (SE Spain)? Constraints From GPS Velocities. *Tectonics*, 38 (5), 1824-1839.

- Bourne, S. J., England, P. C., & Parsons, B. (1998). The motion of crustal blocks driven by flow of the lower lithosphere and implications for slip rates of continental strike-slip faults. *Nature*, 391(6668), 655-659.
- Bousquet, J. (1979). Quaternary strike-slip faults in southeastern Spain. *Tectonophysics*, 52 (1-4), 277-286.
- Cabañas, L., Rivas-Medina, A., Martínez-Solares, J. M., Gaspar-Escribano, J. M., Benito, B., Antón, R., & Ruiz-Barajas, S. (2015). Relationships between  $M_w$  and other earthquake size parameters in the Spanish IGN seismic catalog. *Pure and Applied Geophysics*, 172, 2397-2410.
- Campbell, K. W. & Bozorgnia, Y. (2014). NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5% damped linear acceleration response spectra. *Earthquake Spectra*, 30 (3), 1087-1115.
- Cauzzi, C. & Faccioli, E. (2008). Broadband (0.05 s to 20 s) prediction of displacement response spectra based on worldwide digital records. *Journal of Seismology*, 12, 453-475.
- Chen, G., Magistrale, H., Rong, Y., Cheng, J., Ahmet Binselam, S. & Xu, X. (2021). Seismic Site Condition of Mainland China from Geology. *Seismological Society of America*, 92 (2A), 998-1010.
- Davidson, J., & Goltz, C. (2004). Are seismic waiting time distributions universal? *Geophysical research letters*, 31(21), L21612.
- De Larouzière, F., Bolze, J., Bordet, P., Hernandez, J., Montenat, C. & d'Estevou, P. O. (1988). The Betic segment of the lithospheric Trans-Alboran shear zone during the Late Miocene. *Tectonophysics*, 152 (1-2), 41-52.
- Dieterich, J. H. (1978). Time-dependent friction and the mechanics of stick-slip. In *Rock friction and earthquake prediction*. Birkhäuser. Basel. 790-806
- Echeverría, A., Khazaradze, G., Asensio, E., Gárate, J., Dávila, J. M., & Suriñach, E. (2013). Crustal deformation in eastern Betics from CuaTeNeo GPS network. *Tectonophysics*, 608, 600-612.
- García-Mayordomo, J. (2005). Caracterización y Análisis de la Peligrosidad Sísmica en el Sureste de España. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid (España).
- García-Mayordomo, J., & Martínez-Díaz, J. J. (2006). Caracterización sísmica del anticlinorio del Bajo Segura (Alicante): fallas del Bajo Segura, Torreveja y San Miguel de Salinas. *Geogaceta*, 40, 19-22.
- García-Mayordomo, J., Insua-Arévalo, J. M., Martínez-Díaz, J. J., Martín-Alfageme, S., Jiménez-Díaz, A., Martín-Banda, R., ... & Gaspar-Escribano, J. M. (2012). Seismogenic faultsource characterization in SE Spain: Implications for probabilistic seismic hazard assessment. *Proceedings of the XV World Conference on Earthquake Engineering*, 15, 24-28.
- García Mayordomo, J. (2015). Creación de un modelo de zonas sísmogénicas para el cálculo del mapa de peligrosidad sísmica de España. *Riesgos Geológicos y Geotecnia*, 5, CSIC - Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

García-Mayordomo, J., Martín-Banda, R., Insua-Arévalo, J. M., Álvarez-Gómez, J. A., Martínez-Díaz, J. J., & Cabral, J. (2017). Active fault databases: building a bridge between earthquake geologists and seismic hazard practitioners, the case of the QAFI v. 3 database. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(8), 1447-1459.

Gardner, J. K., & Knopoff, L. (1974). Is the sequence of earthquakes in Southern California with aftershocks removed. Poissonian?. *Bulletin of the seismological society of America*. 64(5). 1363-1367.

Gómez-Novell, O., Chartier, T., García-Mayordomo, J., Ortuño, M., Masana, E., Insua-Arévalo, J. M., & Scotti, O. (2020). Modelling earthquake rupture rates in fault systems for seismic hazard assessment: The Eastern Betics Shear Zone. *Engineering Geology*, 265, 105452.

Gómez Novell, O. (2021). Paleoseismic transect across the Alhama de Murcia Fault and implications of a fault-based seismic hazard assessment for the Eastern Betics. Tesis Doctoral. Universitat de Barcelona (España).

González, Á. (2017). The Spanish national earthquake catalogue: Evolution, precision and completeness. *Journal of Seismology*, 21(3), 435-471.

Gutenberg, B., & Richter, C. F. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological society of America*, 34(4), 185-188.

Han, Q., Wang, L., Xu, J., Carpinteri, A., & Lacidogna, G. (2015). A robust method to estimate the b-value of the magnitude–frequency distribution of earthquakes. *Chaos, Solitons & Fractals*, 81, 103-110.

Hanks, T. C., & Kanamori, H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84(B5), 2348-2350.

Herrero-Barbero, P., Álvarez-Gómez, J. A., Martínez-Díaz, J. J., & Klimowitz, J. (2020). Neogene basin inversion and recent slip rate distribution of the northern termination of the Alhama de Murcia Fault (Eastern Betic Shear Zone, SE Spain). *Tectonics*, 39(7), e2019TC005750.

Herrero-Barbero, P., Álvarez-Gómez, J. A., Williams, C., Villamor, P., Insua-Arévalo, J. M., Alonso-Henar, J., & Martínez-Díaz, J. J. (2021). Physics-based earthquake simulations in slow-moving faults: a case study from the Eastern Betic Shear Zone (SE Iberian Peninsula). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 126(5).

Instituto Geográfico Nacional (IGN) - Universidad Politécnica de Madrid (UPM). (2013) Actualización de Mapas de Peligrosidad Sísmica de España 2012. Edición digital: Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG).

IGN (04 de octubre de 2022) Catálogo de Terremotos. Instituto Geográfico Nacional. <https://doi.org/10.7419/162.03.2022>. Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG): Madrid.

Koulali, A., Ouazar, D., Tahayt, A., King, R., Vernant, P., Reilinger, R., . . . Amraoui, N. (2011). New GPS constraints on active deformation along the Africa–Iberia plate boundary. *Earth and Planetary Science Letters*, 308 (1-2), 211-217.

- López, C. (2008). Nuevas fórmulas de magnitud para la Península Ibérica y su entorno. Trabajo de investigación del Máster en Geofísica y Meteorología. Departamento de Física de la Tierra. Astronomía y Astrofísica I. Universidad Complutense de Madrid. Madrid.
- López-Comino, J. Á., Mancilla, F. D. L., Morales, J., & Stich, D. (2012). Rupture directivity of the 2011, Mw 5.2 Lorca earthquake (Spain). *Geophysical Research Letters*, 39(3).
- Martín-Banda, R., García-Mayordomo, J., Insua-Arévalo, J. M., Salazar, Á. E., Rodríguez-Escudero, E., Álvarez-Gómez, J. A., ... & Herrero, M. J. (2016). New insights on the seismogenic potential of the Eastern Betic Shear Zone (SE Iberia): Quaternary activity and paleoseismicity of the SW segment of the Carrascoy Fault Zone. *Tectonics*, 35(1), 55-75.
- Martín-Banda, R. M. (2020). Segmentación y evolución reciente del Sistema de Fallas de la Sierra de Carrascoy: implicaciones en su potencial sismogénico. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid (España).
- Martín-Banda, R., Insua-Arévalo, J. M., & García-Mayordomo, J. (2021). Slip rate variation during the last~ 210 ka on a slow fault in a transpressive regime: the Carrascoy Fault (Eastern Betic Shear Zone, SE Spain). *Frontiers in Earth Science*, 8.
- Martínez Díaz, J. J., Masana, E., & Ortuño, M. (2012). Active tectonics of the Alhama de Murcia fault, Betic Cordillera, Spain.
- Martínez-Díaz, J., Bejar-Pizarro, M., Álvarez-Gómez, J. A., de Lis Mancilla, F., Stich, D., Herrera, G. & Morales, J. (2012). Tectonic and seismic implications of an intersegment rupture: The damaging May 11th 2011 Mw 5.2 Lorca, Spain, earthquake. *Tectonophysics*, 546, 28-37.
- Martínez-Díaz, J. J., Alonso-Henar, J., Insua-Arévalo, J. M., Canora, C., Garcia-Mayordomo, J., Rodríguez-Escudero, E., ... & Masana, E. (2019). Geological evidences of surface rupture related to a seventeenth century destructive earthquake in Betic Cordillera (SE Spain): constraining the seismic hazard of the Alhama de Murcia fault. *Journal of Iberian Geology*, 45(1), 73-86.
- Martínez-Solares, J. M., & Mezcuca, J. (2002). Catálogo sísmico de la Península Ibérica (880 aC-1900). Instituto Geográfico Nacional–Monografía, (18), 444.
- Masana, E., Martínez-Díaz, J. J., Hernández-Enrile, J. L., & Santanach, P. (2004). The Alhama de Murcia fault (SE Spain), a seismogenic fault in a diffuse plate boundary: Seismotectonic implications for the Ibero-Magrebien region. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B1).
- Masana, E., Gràcia, E., Moreno, X., Bartolomé, R., & Dañobeitia, J. J. (2010). Characterizing the seismic potential of the Eastern Betics Shear Zone (EBSZ), a major source of earthquakes in Southeastern Iberia. *Contribución de la Geología al Análisis de la Peligrosidad Sísmica*, 101-104.
- Matsumoto, M., & Nishimura, T. (1998). Mersenne twister: a 623-dimensionally equidistributed uniform pseudo-random number generator. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS)*. 8(1). 3-30.
- Moreno, X. (2011). Neotectonic and Paleoseismic Onshore-Offshore integrated study of the Carboneras Fault (Eastern Betics, SE Iberia)/Estudio integrado tierra-mar de la Neotectónica y Paleosismología de la Falla de Carboneras (Béticas Orientales, SE Península Ibérica). Tesis doctoral. Universitat de Barcelona (España).

Murphy, P. (2019). Los terremotos de Almería de 1804. En el archivo histórico nacional. Instituto Geográfico Nacional.

Ordaz M. and Salgado-Gálvez M.A. (2019). R-CRISIS Validation and Verification Document. ERN Technical Report. Mexico City, Mexico.

Ortuño, M., Masana, E., García-Meléndez, E., Martínez-Díaz, J., Štěpančíková, P., Cunha, P. P., & Murray, A. S. (2012). An exceptionally long paleoseismic record of a slow-moving fault: The Alhama de Murcia fault (Eastern Betic shear zone, Spain). *Bulletin*, 124(9-10), 1474-1494.

Reicherter, K., & Hübscher, C. (2007). Evidence for a seafloor rupture of the Carboneras Fault Zone (southern Spain): Relation to the 1522 Almería earthquake?. *Journal of Seismology*, 11(1), 15-26.

Panakkat, A., & Adeli, H. (2007). Neural network models for earthquake magnitude prediction using multiple seismicity indicators. *International journal of neural systems*, 17(01), 13-33.

Perea, H., Masana, E., & Santanach, P. (2006). A pragmatic approach to seismic parameters in a region with low seismicity: The case of eastern Iberia. *Natural Hazards*, 39, 451-477.

Polanco-Martínez, J. M. (2014). Estimación espectral de datos ambientales no equiespaciados vía el periodograma suavizado de Lomb-Scargle. Una breve revisión. *Analítika*, 8(2), 7-23.

Reicherter, K. & Hübscher, C. (2007). Evidence for a seafloor rupture of the Carboneras Fault Zone (southern Spain): Relation to the 1522 Almería earthquake? *Journal of Seismology*, 11 (1), 15-26.

Reid, H. F. (1910). The mechanism of the earthquake, in the California earthquake of April 18, 1906. Report of the state earthquake investigation commission, 2, 16-28.

Richards-Dinger, K. & Dieterich, J. H. (2012). RSQSim Earthquake Simulator. *Seismological Research Letters*, 83 (6), 983-990.

Rivas-Medina, A., Benito, B., & Gaspar-Escribano, J. M. (2018). Approach for combining fault and area sources in seismic hazard assessment: application in south-eastern Spain. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(11), 2809-2823.

Robinson, R., Van Dissen, R. & Litchfield, N. (2011). Using synthetic seismicity to evaluate seismic hazard in the Wellington region, New Zealand: Synthetic seismicity. *Geophysical Journal International*, 187(1), 510-528.

Rodríguez-Escudero, E., Martínez-Díaz, J. J., Álvarez-Gómez, J. A., Insua-Arévalo, J. M., & Capote del Villar, R. (2014). Tectonic setting of the recent damaging seismic series in the Southeastern Betic Cordillera, Spain. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12, 1831-1854.

Rodríguez Escudero, E. (2017). Implicaciones de la estructura interna de una zona de falla activa en la génesis de terremotos. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Madrid (España).

Sadhukhan, B., Chakraborty, S., & Mukherjee, S. (2022). Predicting the magnitude of an impending earthquake using deep learning techniques. *Earth Science Informatics*, 1-21.

Sandri, L., & Marzocchi, W. (2007). A technical note on the bias in the estimation of the b-value and its uncertainty through the least squares technique. *Annals of Geophysics*, 50(3), 329-339.

Sanz de Galdeano, C. (1990). Geologic evolution of the Betic Cordilleras in the Western Mediterranean, Miocene to the present. *Tectonophysics*, 172(1-2), 107-119.

Sanz de Galdeano, C., & Garrido, A. L. (2016). Transcurrencia y mélangé tectónica en el área de Sierra Arana (Cordillera Bética, NE de Granada). *Estudios Geológicos*, 72(2), e055.

Serpelloni, E., Vannucci, G., Pondrelli, S., Argnani, A., Casula, G., Anzidei, M.,... & Gasperini, P. (2007). Kinematics of the Western Africa-Eurasia plate boundary from focal mechanisms and GPS data. *Geophysical Journal International*, 169 (3), 1180-1200.

Shimazaki, K., & Nakata, T. (1980). Time-predictable recurrence model for large earthquakes. *Geophysical Research Letters*, 7(4), 279-282.

Silva, V., Crowley, H., Pagani, M. et al. (2014). Development of the OpenQuake engine, the Global Earthquake Model's open-source software for seismic risk assessment. *Nat Hazards* 72, 1409–1427.

Solares, J. M. M., & Rodríguez, J. M. (2002). Catálogo sísmico de la Península Ibérica:(880 aC-1900). Ministerio de Fomento, Dirección General del Instituto Geográfico Nacional, DL 2002.

Thatcher, W. (1993). The earthquake cycle and its role in the long-term deformation on the continental lithosphere, 36(2), 13-24.

Undro, N. D. (1979). Vulnerability Analysis: Report of Expert Group Meeting. Office of the United Nations Disaster Relief Coordinator, Geneva, 9-12.

Utsu, T. (1964) read at the meeting of the Seismological Society of Japan, Oct, 1964.

Veith, K.F., & G.E. Clawson (1972). Magnitude from short period P-wave data. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 62 N° 2, pp. 435-452.

Wesnousky, S. G. (1994). The Gutenberg-Richter or characteristic earthquake distribution, which is it?. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(6), 1940-1959.

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.

Wiemer, S. (2001). A software package to analyse seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*. 72(3), 373-382.

Youngs, R. R., & Coppersmith, K. J. (1985). Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(4), 939-964.