

CONFECIÓN DE UN CATÁLOGO SÍSMICO ACTUALIZADO PARA EL CÁLCULO DE LA PELIGROSIDAD SÍSMICA EN ESPAÑA

Elena Pascual Sánchez, Julián García Mayordomo, José A. Álvarez Gómez

Resumen

En el presente manuscrito, se describe la metodología empleada para la confección del catálogo sísmico de cálculo a partir del 1 de enero de 2011 hasta el 4 de octubre de 2022, que pretende completar el catálogo previamente existente. La importancia de contar con un catálogo correctamente procesado queda manifiesta cuando debe llevarse a cabo un estudio de peligrosidad sísmica. Este catálogo queda a disposición de la comunidad científica para que pueda ser empleado para tal fin o cualquier otro que pueda resultar del uso de la información sísmica que contiene.

Cualquier duda sobre este procedimiento puede hacerse llegar al email: elepas03@ucm.es.

1. Introducción

Para llevar a cabo estudios de peligrosidad sísmica es necesario contar con catálogos de terremotos de la zona de estudio. Estos catálogos deben recoger de manera adecuada la información sísmica, poseer una magnitud uniforme que permita la correcta comparación entre eventos, estar depurados de premonitorios y réplicas y dar cuenta de la completitud de la información en función de el rango temporal considerado.

El procedimiento seguido es análogo al desarrollado por el IGN y la UPM en su *Actualización de Mapas de Peligrosidad Sísmica de España, 2012* con el fin de que ambos catálogos puedan unirse para conformar un catálogo completo. A continuación, se describen de manera detallada los pasos previamente enunciados.

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

1. Obtención del catálogo sísmico de España, desde el 1 de enero de 2011 hasta el 4 de octubre de 2022, procedente de la página de descargas del IGN-Información sísmica.
2. Acotar el estudio a la zona de influencia considerada, que en este caso se restringe a la Península Ibérica.
3. Eliminar de sismos profundos acontecidos a profundidades iguales o superiores a 65km.
4. Homogeneizar las diferentes escalas de magnitudes a magnitud momento.

5. Depurar el catálogo para eliminar las réplicas y premonitorios asociados a cada evento principal.
6. Eliminar los sismos no considerados relevantes para el estudio de la peligrosidad.
7. Evaluar la completitud del catálogo.

2. Preparación del catálogo sísmico

2.1. Descarga de datos

El conjunto de datos para el período (01/01/2022-04/10/2022) que conforma el catálogo adjunto ha sido obtenido de la página de descarga del IGN. <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. La información proporcionada por dicho catálogo (ver *Figura 1.*) recoge el código del evento, la fecha en la que tuvo lugar el terremoto, su hora, la latitud, longitud y profundidad a la que ha sido registrado, la magnitud del evento y una especificación del tipo de esta, la intensidad máxima sentida y, por último, la localidad más próxima al terremoto. El número de eventos presentes en el catálogo de descarga es de 113 980, con magnitudes comprendidas entre -2 y 6,3 medidas en distintas escalas: $m_b(VC)$, $m_b(Lg)$ y M_w . Los terremotos del catálogo de descarga se sitúan a profundidades comprendidas entre 0 y 270,4 km.

Figura 1: Información proporcionada en el catálogo de descarga del IGN.



Figura 2: Mapa de la Península Ibérica con la zona de estudio, en color, acotada. Los márgenes en rojo delimitan la zona 34°N - 45°N y 13°O - 6°E .

2.2. Restricción a la zona de influencia

La zona de influencia considerada se restringe a 34°N - 45°N y 13°O - 6°E , lo cual supone limitar el estudio a la Península Ibérica sin tratar el registro sísmico de las Islas Canarias. En la *Figura 2*, puede observarse la zona de trabajo seleccionada. Llevado a cabo este proceso, el catálogo se reduce a 68 674 eventos.

2.3. Eliminación de sismos profundos

Se eliminan aquellos terremotos acontecidos a profundidad superior o igual a 65km. Siguiendo el mismo criterio que en *IGN-UPM, 2017*, se considera que estos eventos no tendrán influencia en la peligrosidad sísmica y por ello son eliminados del catálogo de estudio.

El catálogo se reduce tras este proceso a 67 913 eventos, con lo que han sido eliminados 761 sismos profundos.

2.4. Homogeneización de las escalas de magnitud a magnitud momento

La medida de los terremotos puede realizarse de acuerdo a diversas escalas de magnitud. Para poder trabajar simultáneamente con eventos medidos inicialmente en diferentes escalas, es necesario expresarlos todos en función de una sola. Se ha decidido, siguiendo el procedimiento implementado por *IGN-UPM, 2017* homogeneizar las magnitudes a magnitud momento (M_W). Esto 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 magnitud $m_{bLg}(L)$, $m_b(VC)$, 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 un regresión ortogonal o RMA (Reduced Major Axis Regression), ya que tanto la magnitud dependiente, M_W en este caso, como la independiente

($m_b(VC)$ o $m_{bLg}(L)$) tienen un error asociado.

- $m_b(VC)$

La magnitud $m_b(VC)$ hace referencia a la magnitud de ondas internas definida por *Veith y Clawson, 1972*. Se define según la ecuación 1.

$$m_b(VC) = \log \frac{A}{T} + P(\Delta, h) \quad (1)$$

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 2,

$$M_w = -1,528 + 1,213 \cdot m_b(VC) \quad (2)$$

cuyo rango de aplicación 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 en *López, 2008* según la ecuación 3.

$$m_{bLg}(L) = \log \frac{A}{T} + 1,17 \cdot \log(R) + 0,0012 \cdot R + 0,67 \quad (3)$$

donde A es la amplitud del desplazamiento expresada en micrómetros, T el período en segundos y R la distancia hipocentral en kilómetros. La ecuación 4 da cuenta de la transformación para esta magnitud,

$$M_w = 0,676 + 0,836 \cdot m_{bLg}(L) \quad (4)$$

cuyo rango de validez se encuentra 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 (5):

$$M_w = \frac{2}{3} \cdot \log(M_0) - 10,7 \quad (5)$$

donde M_0 se refiere al momento sísmico expresado en dyn·cm.

- $M(mb)$

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)*.

2.5. 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 2 y que ha sido determinado a criterio de experto, así como los errores asociados a los coeficientes del ajuste, determinados por *Cabañas et al. (2015)* para cada una de las ecuaciones de conversión (ver Tabla 3).

Magnitud	Error
$m_b(VC)$	0,2
$m_{bLg}(L)$	0,2
$M_w(IGN)$	0,1

Tabla 2: Errores asociados a las magnitudes de medida.

La ecuación 7 muestra la relación empleada para el cálculo del error de la magnitud momento proporcionada en el catálogo.

$$y_i = a + b \cdot x_i \quad (6)$$

donde y_i representa la magnitud momento M_w y x_i la magnitud m empleada para la conversión. a y b son los coeficientes obtenidos en el ajuste.

$$\sigma y_i^2 = \frac{\partial y}{\partial x} \sigma_x^2 + \frac{\partial y}{\partial a} \sigma_a^2 + \frac{\partial y}{\partial b} \sigma_b^2 + 2 \frac{\partial y}{\partial a} \frac{\partial y}{\partial b} \sigma_{ab} \quad (7)$$

Los errores asociados a cada coeficiente proceden del ajuste RMA realizado y pueden observarse en la Tabla 3. Dada su pequeña contribución, se decide despreciar el último término de la ecuación 7.

Magnitud	σ_a	σ_b	σ_{ab}
$m_b(VC)$	0,385	0,077	-0,0001
$m_{bLg}(L)$	0,202	0,052	-0,0001

Tabla 3: Errores asociados a los coeficientes de la regresión calculados en *Cabañas et al. (2015)*

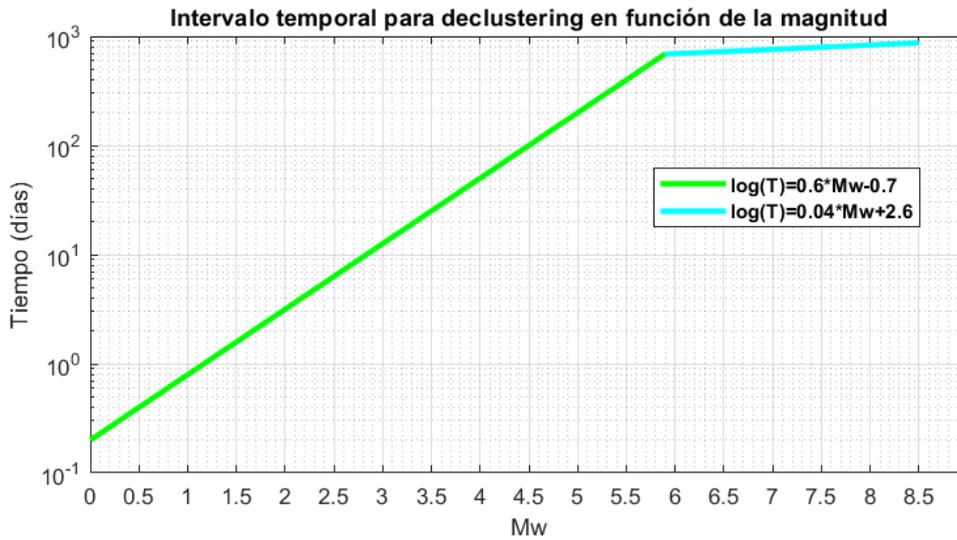


Figura 3: Ecuaciones de declustering para determinar el intervalo temporal en función de la magnitud momento.

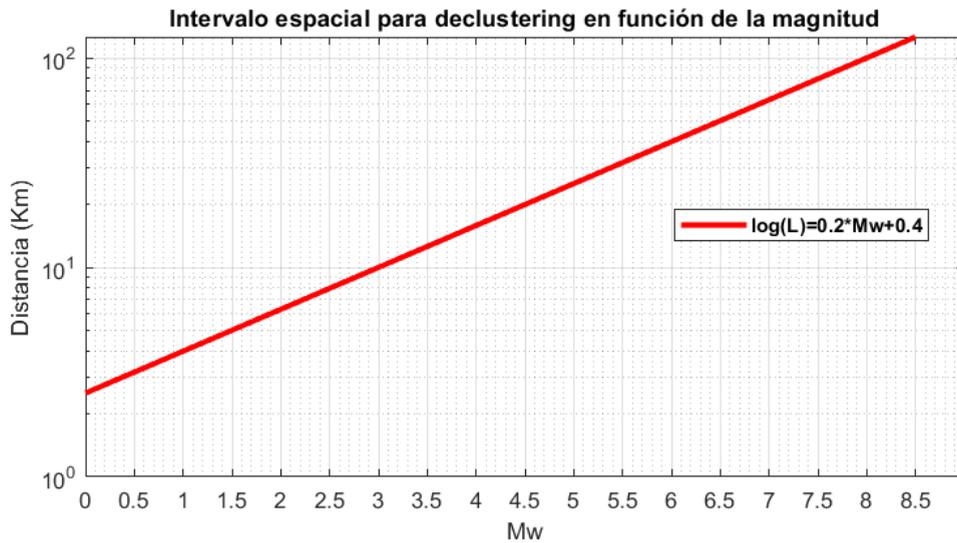


Figura 4: Ecuaciones de declustering para determinar el intervalo espacial en función de la magnitud momento.

2.6. Depuración del catálogo

Se considera que los terremotos que han de conformar el catálogo de peligrosidad se comportan de acuerdo a una distribución poissoniana. Esto implica que, cada evento debe ser un evento discreto cuya ocurrencia sea independiente 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 y, siguiendo

el método propuesto por *Gardner & Knopoff, 1974*, en el cual el intervalo temporal y espacial escogido dependerá de la mayor magnitud encontrada al conformar el cluster. Con lo que se requiere llevar a cabo un proceso iterativo. Una vez que ha sido identificado el cluster, se seleccionara como terremoto representativo aquel que cuente con mayor magnitud. Las ecuaciones empleadas para definir los intervalos espaciales y temporales que conforman cada cluster, difieren ligeramente de aquellas usadas por *Gardner & Knopoff, 1974*, ya que se pretende seguir un procedimiento análogo al realizado por *IGN-UPM, 2017*, en el cual las ecuaciones son adaptadas a la sismicidad de la Península Ibérica (ecuaciones 8, 9, 10).

$$\log(T) = 0,6 \cdot M_w - 0,7 \quad (8)$$

para $M_W < 5,9$

$$\log(T) = 0,04 \cdot M_w + 2,6 \quad (9)$$

para $M_W \geq 5,9$

$$\log(L) = 0,2 \cdot M_w + 0,4 \quad (10)$$

La representación de estas ecuaciones puede observarse en las Figuras 3 y 4.

Para poder emplear dichas ecuaciones han sido implementadas como una nueva opción de declustering (ver Figura 5) en el software libre ZMAP desarrollado por *Wiemer, 2001* y gracias al cual se ha llevado a cabo el proceso de declustering de manera iterativa. Después de este proceso, se ha obtenido un catálogo que contiene 39 767 eventos independientes, de los cuales 420 son eventos principales.



Figura 5: Procedimiento de declustering seguido por *IGN-UPM, 2017* implementado en el presente trabajo.

2.7. Eliminación de sismos de magnitud M_W inferior a 3,0.

Dado los rangos de aplicación de las ecuaciones de homogeneización de las magnitudes, y también atendiendo a su baja influencia en la peligrosidad sísmica, se han eliminado los sismos con magnitud inferior a 3,0. Con ello, el catálogo resultante posee tan solo aquellos eventos con magnitud M_W mayor o igual a 3,0. Esto supone que el catálogo quede reducido a 3121 eventos.

2.8. Análisis de completitud

En base a *IGN-UPM, 2017* se evalúa como para $M_W \geq 3$ el catálogo sísmico de España lleva siendo completo desde 1985 (ver 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.

2.9. Catálogo final del proyecto - Catálogo de cálculo

Tras finalizar el proceso, el catálogo resultante contienen 3121 eventos de magnitud M_W igual o superior a 3 depurados. En la *Tabla 4* se recogen las principales características del catálogo.

Número de terremotos	3121
Período	01/01/2011-04/10/2022
Longitud	-13° O hasta 6° E
Latitud	34° N hasta 45° N
Tipo de magnitud	magnitud momento (M_W)
Rango de magnitud	3,0-6,3
Profundidad	0-65km

Tabla 4: Principales atributos del catálogo de cálculo.

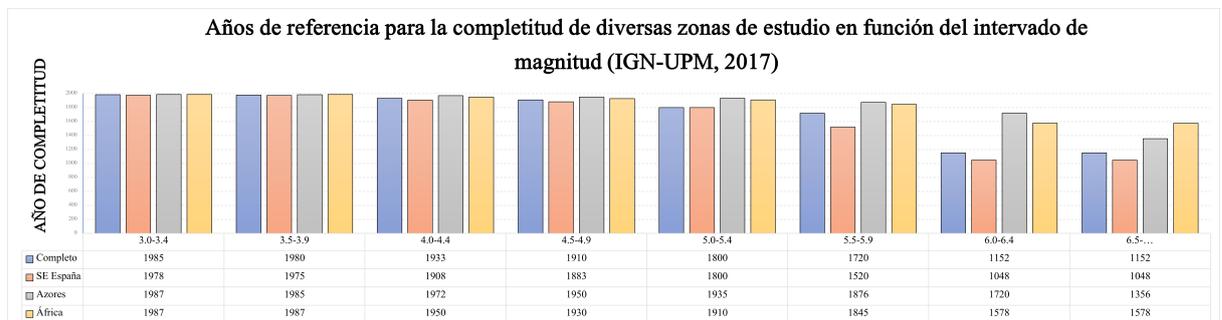


Figura 6: Análisis de completitud en función del rango de magnitud para diversas zonas de estudio. Fuente: *IGN-UPM, 2017*.

3. Elementos presentes en el catálogo

La información que se proporciona en el catálogo procesado incluye los siguientes aspectos:

- **EVID** Código de identificación del evento proporcionado desde la web de descarga del IGN.
- **Fecha** Fecha de ocurrencia del terremoto.
- **AÑO** Año en el que tuvo lugar el terremoto.
- **MES** Mes del evento.
- **DIA** Día de ocurrencia del terremoto.
- **HORA** Hora de registro del evento.
- **LONG** Longitud.
- **LAT** Latitud.
- **PROF** Profundidad del terremoto.
- **TIPO PROF** Permite diferenciar entre terremotos superficiales (a menos de 35km) y profundos (entre 35 y 65km)
- **LUGAR** Localidad más cercana al evento.
- **INT** Máxima intensidad registrada en el evento, expresada en escala EMS.
- **mb VC** $m_b(VC)$ para aquellos terremotos medidos inicialmente en esta magnitud.
- **mbLg L** $m_{mLg}(L)$ para aquellos eventos registrados inicialmente con esta magnitud.
- **Mw IGN** M_W para aquellos eventos registrados en magnitud momento o para aquellos que han sido transformados por el IGN a partir de $m_b(VC)$ antes de la publicación del catálogo.
- **tipo mag** Tipo de magnitud:
 - 3 se corresponde a $m_b(VC)$
 - 4 se corresponde a $m_{mLg}(L)$
 - 5 hace referencia a eventos procedentes de $m_b(VC)$ transformados por el IGN.
 - 6 corresponde a eventos medidos directamente en M_w .
- **Mw** Magnitud del terremoto en magnitud momento.
- σ Mw Error asociado a la magnitud momento.
- **correlacion** Magnitud de origen-Magnitud homogeneizada.
- **origen** Procedencia de los datos del evento: IGN en todos los casos.
- **depuracion** Indica si el terremoto se corresponde con sismicidad de fondo (background) o si es un evento principal (mainshock) que ha sido seleccionado de un cluster en el proceso de declustering.

Finalmente, y por comodidad en el trabajo, se proporcionan una catálogo que contiene los eventos superficiales, ocurridos a una profundidad inferior o igual a 35km. Por otro lado, se proporcionan los eventos más profundos, situados en un rango de entre 35 y 65km.

4. Referencias

1. 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.
2. 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
3. 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.
4. Instituto Geográfico Nacional (IGN) - Universidad Politécnica de Madrid (UPM), (2017) *Actualización de Mapas de Peligrosidad Sísmica de España 2012*. Edición digital: Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG).
5. Veith, K.F. y G.E. Clawson (1972). Magnitude from short period P-wave data. Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 62 N^o 2, pp. 435-452.
6. Wiemer, S., 2001. A software package to analyze seismicity: ZMAP. Seismological Research Letters, 72(3), pp.373-382 <https://doi.org/10.1785/gssrl.72.3.373>.