

CARACTERIZACIÓN DEL MOVIMIENTO FUERTE EN EL EMPLAZAMIENTO DE LA PRESA DE ITOIZ



A. Rivas-Medina¹, M.A. Santoyo², F. Luzón³, B. Benito¹, J. M. Gaspar-Escribano¹, and A. García-Jerez³,

¹ Universidad Politécnica de Madrid, ETSI Topografía, Geodesia y Cartografía, Campus Sur UPM, Ctra. de Valencia, km 7.5, 28031 Madrid, Spain.

alicia.rivas@upm.es

² Instituto de Astronomía y Geodesia. CSIC-UCM. Facultad de Ciencias Matemáticas; Plaza de Ciencias 3, 28040, Madrid, Spain. msantoyo@ual.es

³ Depto. Física Aplicada; U. Almería; Cañada de San Urbano s/n; 04120-Almería; Spain. fluzon@ual.es

RESUMEN

Se presenta en este trabajo una nueva caracterización del movimiento del suelo en la presa de Itoiz, consistente con la peligrosidad sísmica del emplazamiento. En primer lugar, proponemos una metodología con tres niveles de aproximación al movimiento esperado, que es después aplicada considerando las características particulares de la presa y su emplazamiento. Los cálculos de peligrosidad se realizan siguiendo la línea metodológica conocida como PSHA, con un método probabilista zonificado y formulando un árbol lógico que combina diferentes zonificaciones sísmicas y modelos de movimiento fuerte.

La peligrosidad se representa en términos de la aceleración pico PGA y de las aceleraciones espectrales para periodos coincidentes con los de vibración de la presa, considerando dos estados de la misma correspondientes a *presa vacía* ($T=0.1s$) y presa con *capacidad máxima de llenado* ($T=0.22 s$). Se caracterizan los correspondientes movimientos para dos periodos de retorno, 975 años y 4975 años, asociados al *sismo de proyecto* y al *sismo extremo*, respectivamente. El efecto de sitio en el emplazamiento de la presa también fue tenido en cuenta.

La metodología propuesta conduce a caracterizar el movimiento con tres niveles de detalle. En una primera etapa se obtienen los espectros de respuesta uniforme (UHS) para los dos niveles de movimiento referidos. Seguidamente se desarrolla un análisis de desagregación para obtener los sismos de control que previsiblemente pueden afectar mas a la presa. Estos se identifican como los que más contribuyen a los movimientos objeto dados por las aceleraciones espectrales de los dos periodos característicos, SA (0,1 s) y SA (0.22 s) y para los dos periodos de retorno de 975 y 4975 años asociados a lo sismos de *proyecto* y *extremo*. De ahí se obtienen los espectros de respuesta específicos para las cuatro combinaciones resultantes.

Finalmente, se realiza una simulación del movimiento en el dominio del tiempo, obteniendo acelerogramas sintéticos mediante el método de número de onda discreto. Las simulaciones se realizaron considerando fuentes finitas en diferentes posiciones y evaluando el efecto de la directividad en las posibles fuentes consideradas. Se concluye destacando la importancia del efecto de directividad, en la caracterización del emplazamiento de la presa.

Palabras clave: peligrosidad sísmica, emplazamientos críticos.

SUMMARY

This paper presents a new hazard-consistent ground motion characterization of the Itoiz dam site, located in Northern Spain. Firstly, we propose a methodology with different approximation levels to the expected ground motion at the dam site. Secondly, we apply this methodology taking into account the particular characteristics of the site and the dam. Hazard calculations were performed following the Probabilistic Seismic Hazard Assessment (PSHA) method using a logic tree, which accounts for different seismic source zonings and different ground-motion attenuation relationships. The study was done in terms of peak ground acceleration and two spectral accelerations of periods coinciding with the fundamental vibration periods of the dam. In order to estimate these ground motions we consider two different dam conditions: when the dam is empty ($T=0.1$ s) and when it is filled of water to its maximum capacity ($T=0.22$ s). Additionally, seismic hazard analysis is done for two return periods: 975 years, related to the project earthquake, and 4975 years, identified with the extreme event. Soil conditions were also taken into account in the site of the dam.

Through the proposed methodology we deal with different forms of characterizing ground motion at the study site. In a first step, we obtain the uniform hazard response spectra (UHS) for the two return periods. In a second step a disaggregation analysis is done in order to obtain the controlling earthquakes which can affect the dam. Subsequently, we characterize the ground motion at the dam site in terms of specific response spectra for target motions defined by the expected values of PGA and SA (T) for $T=0.1$ s and 0.22 s for the return periods of 975 and 4975 years respectively.

Finally, synthetic acceleration time histories for earthquake events matching the controlling parameters are generated and analyzed using the discrete wave-number method. Due to the relative short distances between the controlling earthquakes and the dam site we considered finite sources in these computations. We conclude that directivity effects should be taken into account as an important variable in this kind of studies for seismic assessments.

Introducción

La presa de Itoiz es una presa de hormigón de gravedad localizada en el río Irati, en la Comunidad Foral de Navarra. En la fase inicial de llenado se produjo una serie sísmica entre Pamplona y la presa, a 8 km de ésta, encabezada por un sismo principal el 18 de septiembre de 2004 de $M_w=4.5$ y seguido de varias réplicas. Tanto el sismo principal como la mayor réplica se sintieron ampliamente en la región, creando una gran expectativa social y generando un importante volumen de estudios locales (Rueda 2005; Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos 2005; Colegio Oficial de Geólogos 2005, Ruiz et al., 2006, Luzón et al., 2009, 2010, Jiménez et al., 2009, García-Mayordomo y Insua-Arévalo, 2010; Santoyo et al., 2010).

En los últimos años se han llevado a cabo dos estudios regionales de peligrosidad conteniendo el emplazamiento de la presa, en el marco de los proyectos ISARD y RISNA. El primero es un proyecto Europeo dirigido a uniformizar los niveles de peligrosidad dados por las normativas Francesa y Española (Secanel et al, 2008) y el segundo es un proyecto dirigido al cálculo del riesgo sísmico en Navarra para el correspondiente plan de Emergencias de Protección Civil (Benito et al, 2008). Ambos estudios proporcionaron parámetros del movimiento fuerte cuyos valores oscilan entre los propuestos en ambas normativas, siendo en general más altos que los dados por la Norma de la Construcción Sismorresistente Española NCSE-02. Este trabajo supone una nueva contribución al conocimiento de la peligrosidad de la zona, y proporciona caracterizaciones del movimiento que representan escenarios realistas con implicaciones en la seguridad de la presa.

En la primera parte se propone una metodología para caracterizar el movimiento con diferente grado de detalle. Se revisan seguidamente las características geológicas y sísmicas del emplazamiento, así como las especificaciones técnicas de la presa. Finalmente, se aplica la metodología propuesta y se presentan las especificaciones, resultados y conclusiones del estudio.

1. Metodología propuesta para caracterización del movimiento en el emplazamiento de la presa.

La metodología propuesta se estructura en diferentes fases, dirigidas a alcanzar diferentes aproximaciones el movimiento, basadas en:

- a) Análisis de peligrosidad sísmica para establecer escenarios que puedan ser críticos para la seguridad de la presa.
- b) Análisis de desagregación para movimientos objeto asociados a los escenarios previos y cálculo de los espectros específicos consistentes con la peligrosidad.
- c) Modelización detallada de la superficie de ruptura y propagación, para el cálculo de acelerogramas sintéticos.

La primera fase concierne al análisis de peligrosidad en la línea PSHA, incluyendo un árbol lógico con dos nodos para capturar la incertidumbre epistémica relativa a la zonificación y modelos de atenuación. Se recomienda tener en cuenta dos terremotos con sus respectivas probabilidades: el terremoto de proyecto TP, que representa el terremoto de diseño de la presa y el terremoto extremo TE, que podría ocurrir durante la vida de la presa con menor probabilidad.

El estudio PSHA se realizará para los periodos de retorno (PR) correspondientes a los sismos TP y TE, dando como resultado espectros de probabilidad uniforme (UHS) para ambos PR. Los UHS representan la contribución de diferentes fuentes en la peligrosidad, pero no caracterizan movimientos asociados a un sismo específico. Para una caracterización más concreta, proponemos considerar, para los dos terremotos TP y TE, los periodos naturales de vibración correspondientes a dos estados de la presa: presa vacía (P_V) y presa llena (P_{LL}). Es de esperar que los movimientos que suponen alguna situación crítica para la presa tengan los periodos espectrales correspondientes a esos dos estados de la misma. La combinación de los dos sismos con los dos estados de la presa proporciona cuatro casos posibles: 1) TP- P_V , 2) TP- P_{LL} , 3) TE- P_V , 4) TE- P_{LL} . Cada caso representa un escenario sísmico caracterizado por una aceleración espectral SA a periodos estructurales de los estados P_V y P_{LL} , y para periodos de retorno correspondientes a los dos sismos considerados, TP y TE. El movimiento de cada escenario será obtenido en un paso posterior.

La segunda fase es dirigida a obtener los sismos de control que representan la mayor contribución a los escenarios previamente definidos. Se propone para ello un análisis de desagregación con la consiguiente identificación de las celdas (m, r, ϵ) que más contribuyen a los movimientos objeto dados por los valores obtenidos de SA (TP_V) y SA (TP_{LL}). Los correspondientes espectros específicos de respuesta son deducidos después aplicando los modelos de movimiento fuerte empleados en el análisis PSHA a las condiciones de M_w, r, ϵ deducidas.

En una fase final se propone la simulación del movimiento asociado a los sismos de control en el dominio del tiempo, asumiendo una ruptura finita en un modelo de Tierra estratificada con una distribución dada de deslizamiento, mecanismo focal y velocidad de ruptura. El área de ruptura S para cada terremoto se estima por alguna correlación entre $S - M_w$ y los acelerogramas se calculan usando el método de número de onda discreto propuesto por Bouchon y Aki (1977) y Bouchon (1979) para dislocaciones puntuales. Dado que la directividad puede cambiar drásticamente las aceleraciones para un emplazamiento dado respecto al plano de falla, y jugar un papel importante en la seguridad de la presa, se calcularán diferentes acelerogramas sintéticos para emplazamientos con distinto acimut respecto al plano de falla, lo que equivale a considerar variaciones en la ubicación de la fuente respecto al sitio.

2. Caracterización del sitio

El embalse de Itoiz se encuentra en el centro de los Pirineos occidentales, una zona sísmicamente activa con cerca de 35 eventos de magnitud $m_b \geq 3.0$ registrados en época instrumental (Souriau et al., 2001). El emplazamiento de la presa se encuentra sobre terreno Mesozoico y Terciario cubriendo un área compuesta por anticlinales y sinclinales tendiendo hacia el Este, pero truncados en algunos lugares por sistemas de fallas E-W y ESE-WNW (García Sansegundo, 1993 ; Ruiz et al 2006 a). Estudios geotécnicos realizados concluyen que la secuencia de materiales en los 30 primeros metros, va de margas calcáreas a piedra caliza. Las velocidades V_{s30} oscilan entre 902 m/s y 1736 m/s, por lo que el suelo puede considerarse Tipo I en la clasificación dada por la NCSE-02.

En cuanto a las características de la presa, se trata de un embalse de gravedad construido en hormigón, cuyos períodos fundamentales de vibración son de 0.10s, para la presa vacía (P_V), y de 0,22 s para la presa llena de agua (P_{LL}), según el estudio de respuesta dinámica realizado del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (2005). Estos son entonces los periodos que asumimos para los dos estados de la presa y para las aceleraciones espectrales SA (TP_V) y SA (TP_{LL}) que definen los escenarios sísmicos de interés y cuyo movimiento objeto se considera en el análisis de desagregación para estimar los sismos de control.

3. Caracterización del movimiento en la presa

La metodología propuesta se estructura en tres fases, cuyas particularidades y resultados se presentan a continuación.

3.1 Análisis de peligrosidad y definición de escenarios sísmicos

Primeramente se realiza un estudio de peligrosidad siguiendo la metodología PSHA (Budnitz et al., 1997), utilizando modelos de sismicidad zonificados y varios modelos de movimiento fuerte, combinados todos ellos en un árbol lógico. Como resultado se obtienen valores de PGA y SA (T) para periodos de retorno de 975 años y 4975 años, asociados a los sismos de proyecto TP y extremo TE, respectivamente (García-Mayordomo, 2007)

Como “entrada” del cálculo PSHA preparamos un catálogo de proyecto y seleccionamos diferentes zonificaciones y modelos de movimiento, a los que se asignan pesos razonadamente configurando las ramas del arbol lógico formulado para el cálculo. Como resultado, se obtienen los UHS para los dos periodos de retorno, que representan valores de la media y la mediana según el esquema de pesos elegidos así como los correspondientes percentiles de 16 y 84 %.

3.1.1 Catálogo sísmico de proyecto.

El hecho de que Navarra se encuentre en una zona fronteriza hace que la sismicidad del área de influencia esté recogida por agencias de dos países. En este estudio, se han tomado como catálogos sísmicos de partida los desarrollados en el Proyecto ISARD (Secanell et al., 2008) y en el proyecto RISNA (Benito et al., 2008) y se ha confeccionado un catálogo de proyecto, homogeneizado a magnitud momento M_w . Como los catálogos iniciales incluían datos de magnitud en distintas escalas, se han desarrollado correlaciones entre ellas, para la conversión a M_w , teniendo en cuenta la dependencia espacial y temporal de datos. La completitud ha sido también analizada por el método de Stepp (1973), identificando los años de referencia a partir de los cuales se puede considerar completo el catálogo para cada intervalo de magnitud, con los que se estima la tasa que se extrapola al resto del intervalo. El catálogo ha sido después depurado, eliminando réplicas y premonitores, para poder asumir la hipótesis de que la sismicidad de cada zona se ajusta a un modelo de Poisson. Para identificar las series sísmicas, se emplean las ventanas espacio-temporales definidas por Secanell et al, (2008), coincidentes con las utilizadas en el Proyecto ISARD. Se detectan 177 series formadas por 582 terremotos, lo que supone la

eliminación de 405 terremotos del catálogo original. El catálogo depurado y, por lo tanto final del proyecto (Figura 1) está compuesto por 3086 terremotos.

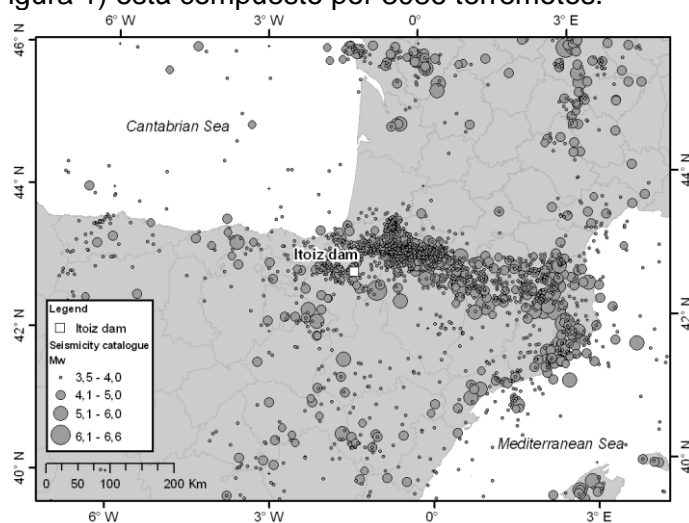


Figura 1. Distribución geográfica de los terremotos que componen el del catálogo de proyecto

3.1.2 Zonificaciones sísmicas

La sismicidad se consideró distribuida en zonas sismogénicas donde la actividad sísmica se supone uniforme, asumiendo además que la tasa de ocurrencia de terremotos es constante en el tiempo. Al ser la zona de influencia una zona de baja sismicidad, se han realizado pocos estudios de caracterización de fuentes sismogénicas en la misma. En el correspondiente nodo del árbol lógico incluimos las únicas zonificaciones publicadas que incluyen el emplazamiento de la presa, que son las definidas para los estudios de: Central Nuclear de Santa María de Garoña (Nuclenor S. A., 1985), riesgo sísmico de Navarra desarrollado por Prospección e Ingeniería (1992), Proyecto RISNA (Benito et al, 2008), Proyecto ISARD (Secanell et al, 2008 y NCSE-02). (Figura 2)

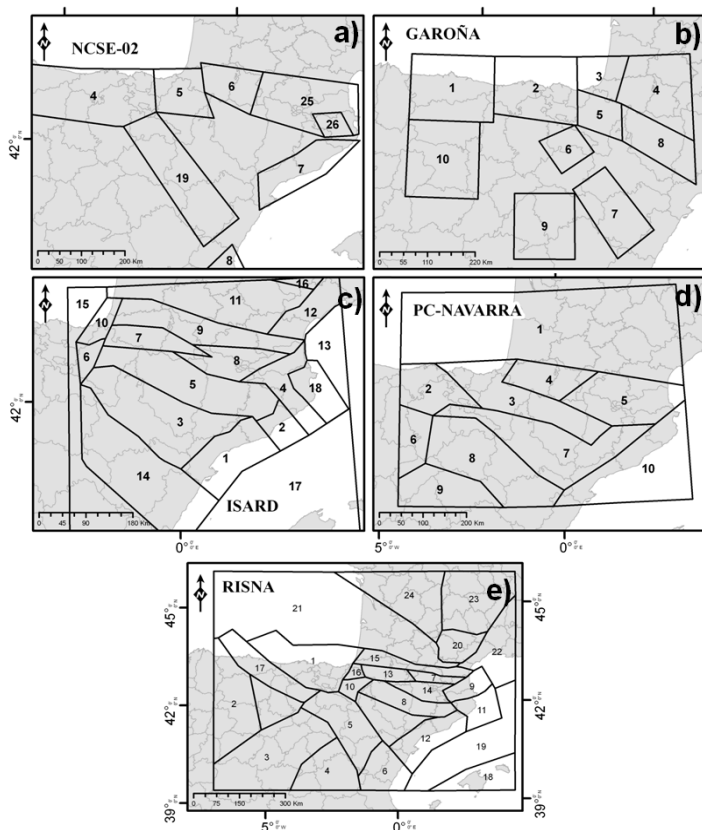


Figura 2. Zonificaciones empleadas en es estudio de peligrosidad de la presa de Itoiz.

La sismicidad de cada zona se ha modelizado por una ley de Gutenberg-Richter doblemente truncada, con una magnitud umbral mínima $M_{min} = 4$ (Mw) y una máxima definida para cada zona a partir de la sismicidad y la geología. La tabla 1 incluye los valores de los parámetros sísmicos de cada una de estas zonas, obtenidos al realizar un ajuste lineal de los datos contenidos en el catálogo de proyecto, según las expresiones:

$$\text{Log } N = \alpha - \beta \cdot Mw ; \quad v_0 = N (Mw \geq 4.0) = e^{\alpha - \beta \cdot (Mw = 4)}$$

Tabla 1. Parámetros sísmicos de las zonas, para las diferentes zonificaciones incluidas en el árbol lógico

ISARD				RISNA				GAROÑA			
Zone	M_{Wmax}	v_0	β	Zone	M_{Wmax}	v_0	β	Zone	M_{Wmax}	v_0	β
1	6.3	0.105	1.960	1	5.4	0.154	3.616	1	5.8	0.017	1.470
2	5.9	0.317	3.027	2	5.9	0.074	2.223	2	5.4	0.096	3.166
3	5.4	0.038	2.520	3	5.4	0.028	2.235	3	5.5	0.118	3.004
4	6.5	0.363	2.308	4	5.2	0.063	3.346	4	6.7	1.342	2.605
5	6.6	0.141	1.830	5	6.2	0.136	2.151	5	5.2	0.195	4.149
6	5.2	0.042	3.035	6	5.3	0.047	2.795	6	6.0	0.057	1.923
7	6.5	1.212	2.747	7	6.0	0.149	2.441	7	6.0	0.094	2.204
8	6.3	0.302	2.462	8	6.4	0.063	1.660	8	6.5	0.050	1.523
9	6.0	0.235	2.714	9	6.7	0.217	1.950	9	4.7	0.057	5.248
10	5.0	0.055	3.784	10	5.1	0.155	4.305	10	5.9	0.064	2.070
11	4.4	0.018	6.351	11	6.0	0.075	2.067	PC NAVARRA			
12	4.9	0.042	4.157	12	6.3	0.354	2.495	Zone	M_{Wmax}	v_0	β
13	4.5	0.020	5.630	13	6.5	1.235	2.769	1	6.0	0.131	2.311
14	6.2	0.095	2.021	14	6.6	0.234	2.078	2	5.4	0.065	2.846
15	5.9	0.145	2.826	15	5.4	0.123	3.224	3	6.2	0.219	2.431
17	6.1	0.052	1.833	16	5.3	0.071	3.255	4	6.5	1.235	2.812
18	6.5	0.047	1.489	17	4.9	0.066	4.398	5	6.8	0.727	2.325
NCSE-02				18	6.0	0.056	1.909	6	5.3	0.057	2.927
Zone	M_{Wmax}	v_0	β	20	4.7	0.032	4.520	7	6.2	0.140	2.176
19	5.5	0.085	2.888	21	6.0	0.032	1.620	8	4.6	0.026	4.942
20	5.9	0.248	2.778	22	4.4	0.022	6.851	9	6.2	0.449	2.717
21	6.5	1.216	2.792	23	6.2	0.321	2.539				
22	6.8	0.536	2.194	24	6.2	0.197	2.338				
23	6.4	0.322	2.316								
24	6.1	0.149	2.264								
25	6.7	0.087	1.571								

3.1.3. Modelos de movimiento del suelo

La limitada cantidad de datos de movimiento fuerte registrados en la presa y zonas circundantes impide el desarrollo de modelos de movimiento fuerte constreñidos con datos locales, por lo que se hace necesario recurrir a modelos desarrollados para otras zonas. Los modelos desarrollados con datos españoles carecen de información para los rangos de magnitud y de distancias en los que se esperan movimientos fuertes significativos. Los últimos modelos de movimiento fuerte desarrollados en Europa por Ambraseys et al. 2005 y Akkar y Bommer (2010) requieren del conocimiento o asignación de mecanismos de ruptura en la fuente sísmica, al igual que ocurre con los conocidos como Next Generation of Ground Motion Attenuation (NGA) (Power et al 2006). Teniendo en cuenta los criterios propuestos por Drouet et al (2007) para la selección de modelos aplicables a los Pirineos, se han incluido en nuestro estudio los modelos presentados por Berger-Thierry et al. (2003) y Lussou et al. (2001), así como el desarrollado por Ambraseys et al. (1996) - elegido en el Proyecto ISARD- y el propuesto por Sabetta y Pugliese (1996), por ser un modelo desarrollado con datos europeos y con una cierta afinidad con nuestra zona de estudio.

3.1.3 El árbol lógico

El arbol lógico formulado para el estudio de peligrosidad está compuesto por dos nodos, que tienen en cuenta respectivamente la variabilidad en la zonificación y en los modelos de atenuación. Las opciones contempladas en las diferentes ramas y el esquema de pesos se muestra en la figura 3.

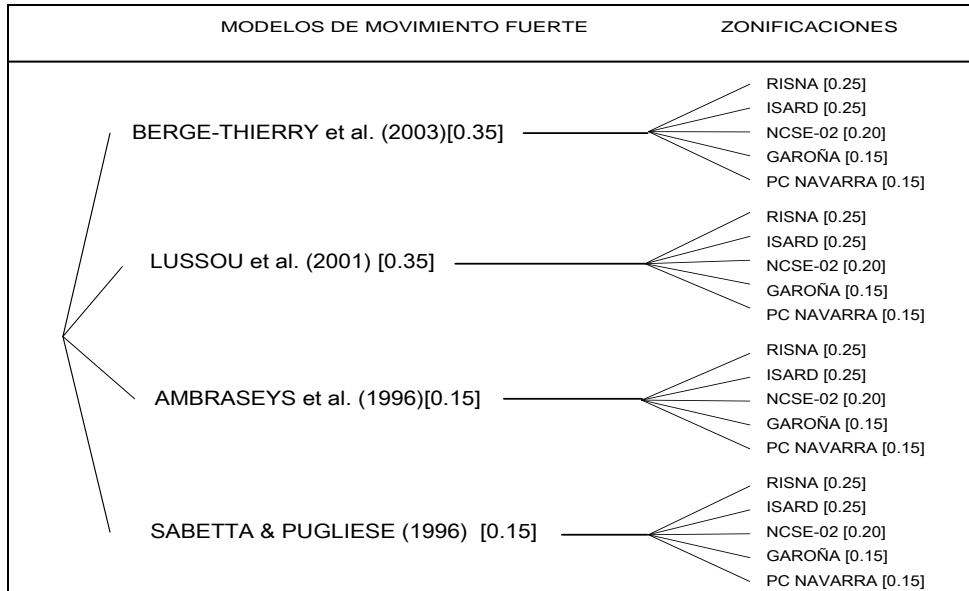


Figura 3. Árbol lógico formulado para el estudio de peligrosidad PSHA

3.1.4 Resultados. Espectros de Peligrosidad Uniforme.

El cálculo de peligrosidad sísmica para las diferentes ramas del árbol lógico se llevó a cabo utilizando el programa CRISIS2007 (ORDAZ et al., 2007).

Los espectros de peligrosidad uniforme UHS deducidos en el emplazamiento de la presa en condiciones de roca, para los PR de 975 y 4975 años, se muestran la Figura 4, que también incluye los de NCSE-02 y Eurocode 8 para PR de 475 años.

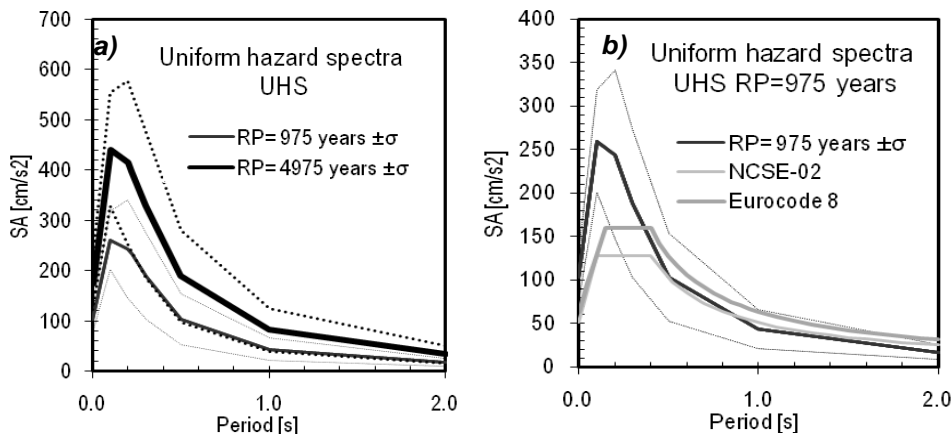


Figura 4. Espectros de peligrosidad uniforme. Comparativa con el espectro de la Norma española (NCSE-02) y Eurocode 8.

La Figura 5 muestra la distribución de valores de PGA para cada rama del arbol lógico, combinando la zonificación y la atenuación, para el período de retorno de 975 años. Las líneas horizontales corresponden a valores deducidos en otros estudios, en concreto a NCSE-02 (2002), RISNA (Benito et al, 2008), ISARD (Secanell et al, 2008) y García-Mayordomo y Insua-Arévalo (2010).

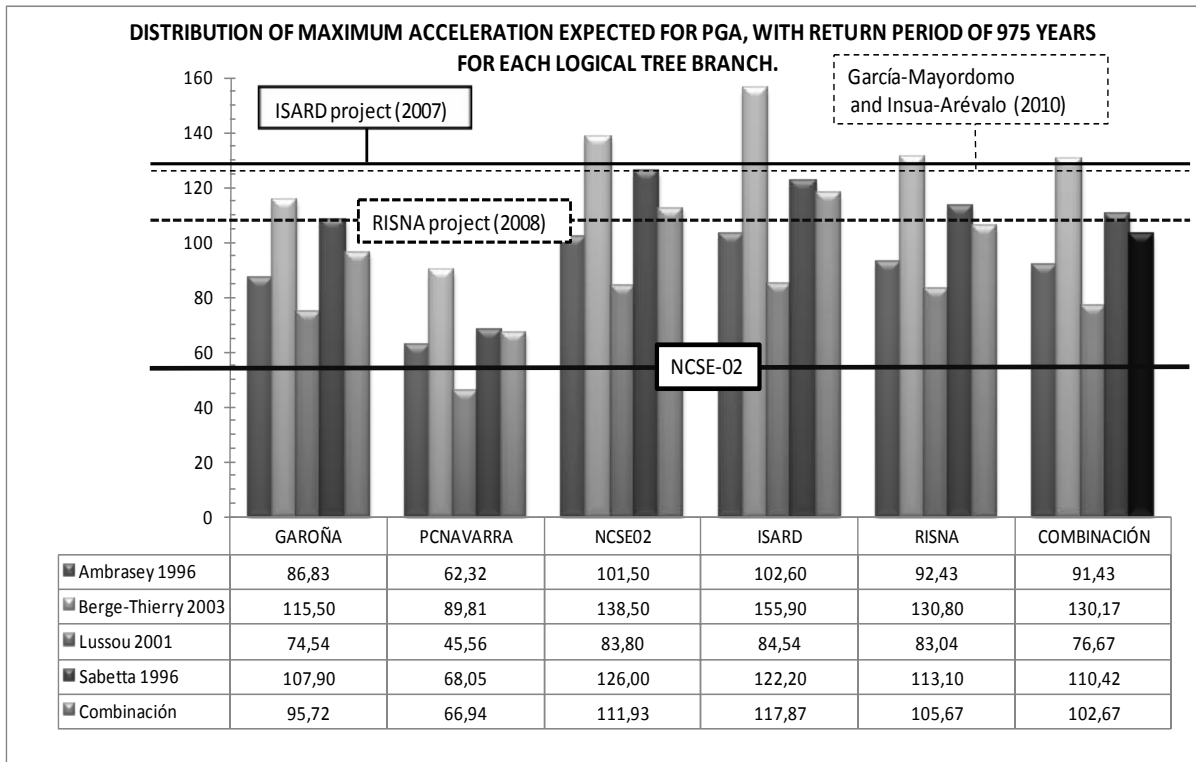


Figura 5. Resultados del estudio en cada rama del árbol lógico y comparación con resultados de otros estudios.

3.2 Desagregación, definición de escenarios sísmicos y espectros específicos de respuesta

En una segunda fase, se determina el terremoto de control que representa una mayor contribución a la peligrosidad sísmica a través de un análisis de desagregación 3D, en términos de magnitud-distancia-épsilon (m, r, ϵ). Este análisis se lleva a cabo tomando como movimiento objeto las aceleraciones espectrales SA (T) correspondientes a los periodos de vibración en los estados de *presa vacía* ($T_{PV} = 0.1 \text{ s}$) y *presa llena* ($T_{PLL} = 0.22 \text{ s}$), ambas deducidas para RP de 475 y 975 años, asociados a los sismos TP y TE. Estimamos entonces las funciones de densidad que representan la contribución de diferentes celdas ($\Delta m, \Delta r, \Delta \epsilon$) a los valores de SA (T).

Para cada escenario se obtienen dos sismos de control, que representan la primera y segunda contribución, en cada caso. La tabla 2 muestra los valores obtenidos de m, r, ϵ

Tabla 2. Terremotos de control para los diferentes casos estudiados en el proyecto.

	Sismo de control 1			Sismo control 2		
	Magnitud (Mw)	Distancia (Km)	Epsilon	Magnitud (Mw)	Distancia (Km)	Epsilon
TP-P _V	4.5	10	1.6	5.0	25	2.2
TP-P _{LL}	4.5	5	1.1	5.5	20	1.5
TE-P _V	4.5	5	1.5	6.0	25	1.5
TE-P _{LL}	5.0	15	2.2	6.0	30	2.0

La figura 6 muestra los espectros de respuesta específicos para los terremotos de control obtenidos aplicando los modelos de movimiento fuerte seleccionados a los valores de las celdas (m , r , ϵ) resultantes del análisis. Para el estado de presa llena, el espectro del sismo más fuerte excede al del sismo de menor magnitud para todos los periodos, tanto para el sismo de proyecto como para el extremo. Sin embargo, para presa vacía, las ordenadas de corto periodo son controladas por el sismo próximo de menor magnitud, mientras que las de largo periodo lo son por el más distante de mayor magnitud.

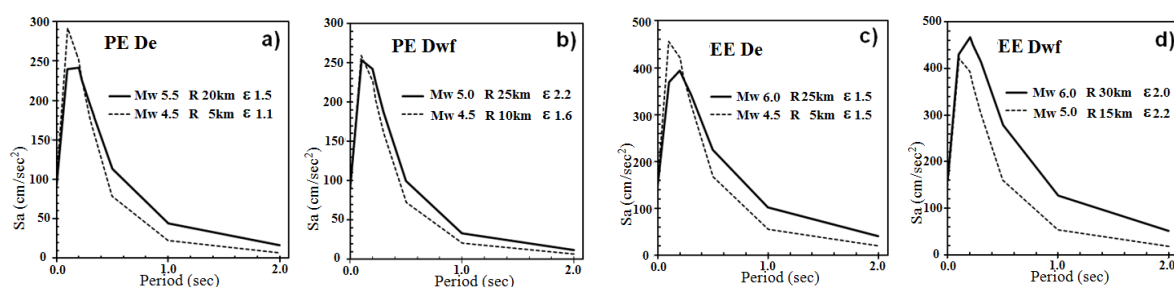


Figura 6. Espectros específicos de respuesta de cada terremoto de control obtenido. a) SRS para el terremoto de proyecto en condición de presa vacía. b) SRS para el terremoto de proyecto en condición de presa llena. c) SRS para el terremoto extremo en condición de presa vacía. d) SRS para el terremoto extremo en condición de presa llena.

3.3 Simulación del movimiento en el dominio del tiempo. Acelerogramas sintéticos

En una última fase se simulan los movimientos debidos a los sismos de control en el dominio del tiempo, asumiendo una ruptura finita en un modelo de tierra estratificada. El área de ruptura se estima para cada sismo por la relación de Wells and Coppersmith (1994). Se asume ruptura rectangular con $L = W$ para $M_s \leq 5.0$ y $L = 2W$ para $M_s > 5.0$ (Dowrick and Rhoades, 2004). El momento liberado se deduce por la relación $\log(M_0) = 1.5M_w + 16.1$ (Wells y Calderero, 1994). La distribución de deslizamiento sobre la falla se supuso semielíptica (Mikumo et al, 1998), de forma cónica con una función coseno a lo largo de la dirección y buzamiento. En este modelo, la propagación de la ruptura se hace con velocidad constante; aquí $V_r = 0.8\beta$ y β es la velocidad de las ondas S en el lugar de origen (por ejemplo, Mikumo, et al 2000). Los acelerogramas sintéticos se calculan utilizando el método discreto número de onda descrita por Bouchon y Aki (1977) y Bouchon (1979) para dislocaciones puntuales, y la estructura cortical de velocidad propuesta para esta parte de España en Ruiz et al. (2006b).

Con el fin de comprobar si la directividad juega un papel clave en el movimiento de la presa, se calculan sismogramas en distintas posiciones acimutales respecto al plano de falla. Se consideraron ocho emplazamientos distintos ubicados en un círculo de radio R cada $\pi / 4$ rad, numerados en sentido agujas del reloj y empezando por el caso de la falla situada en el norte de la presa. Los terremotos estudiados fueron los terremotos extremos con la presa vacía y llena. La profundidad del hipocentro se estableció en $Z_H = 6,0$ km para todos los terremotos modelo, que es el promedio para la zona (Santoyo et al., 2010). El mecanismo de los terremotos, siguiendo el trabajo de RUEDA (2005) fueron definidos como: acimut $\theta = 34^\circ$ y buzamiento $\lambda = -90^\circ$ y dirección $\phi = 0,0^\circ$.

En la Figura 7 se muestran los acelerogramas sintéticos obtenidos por dos de los terremotos extremos considerados. En el lado izquierdo de esta figura, se muestran las aceleraciones producidas por un terremoto de magnitud $M_w = 4.5$ y distancia 5.0 km, y en el lado derecho el terremoto de magnitud $M_w = 6.0$ y distancia de 30.0 km. Como era de esperar, las aceleraciones pico en las estaciones ubicadas en la dirección de la ruptura son más grandes que en las estaciones situadas en el lado opuesto. Las amplitudes en las estaciones 4 y 5, son en ambos casos 3 veces mayor que las amplitudes en las estaciones 1 y 8. En el mismo sentido, el ancho de pulso y la duración en las estaciones ubicadas en la dirección de la ruptura son más cortas que en las estaciones ubicadas en la dirección opuesta. De estos resultados se observa claramente que la anchura del pulso y la amplitud de formas de onda en acelerogramas varían en función del ángulo entre la dirección de la ruptura y el despegue del ángulo a la estación.

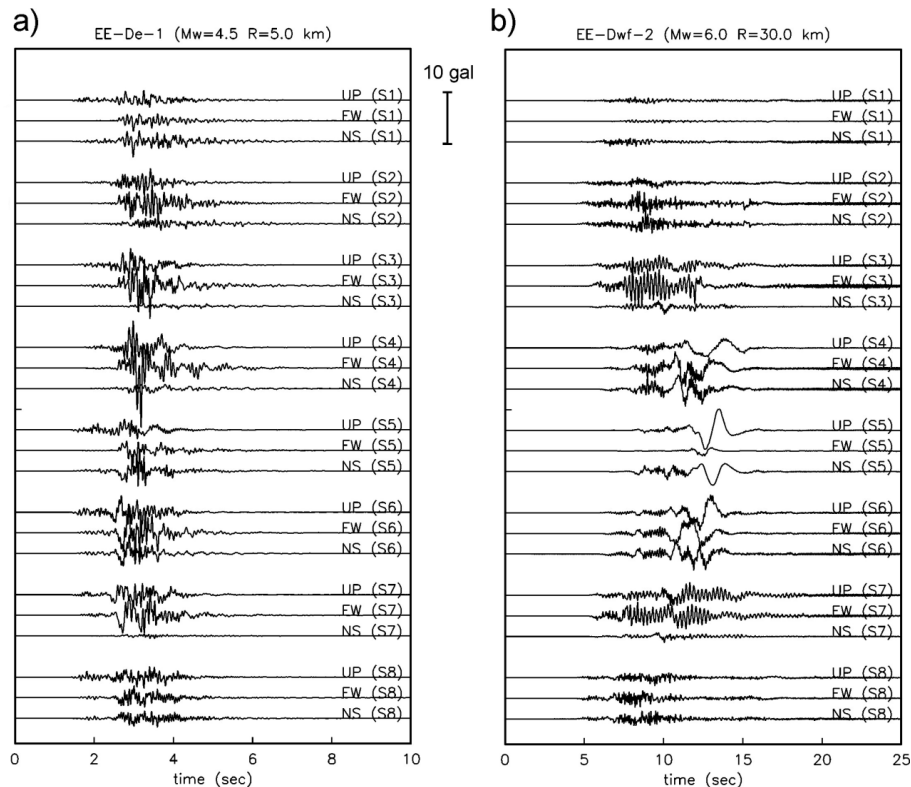


Figura 7. Acelerogramas sintéticos obtenidos por dos de los terremotos extremos considerados.

En la figura 8 se muestran los espectros de respuesta para las estaciones y terremotos seleccionados. Aquí se puede observar que las estaciones ubicadas en la dirección de ruptura tienen mayores amplitudes espectrales que las situadas en la dirección opuesta y que las amplitudes espectrales para los períodos de interés de la ingeniería sísmica para la presa (0.1 s y 0.22 s) tienen su mayor amplitud en el dirección perpendicular de la directividad de la ruptura, que es un resultado inesperado. Las amplitudes espectrales pueden presentar diferencias de hasta cuatro veces.

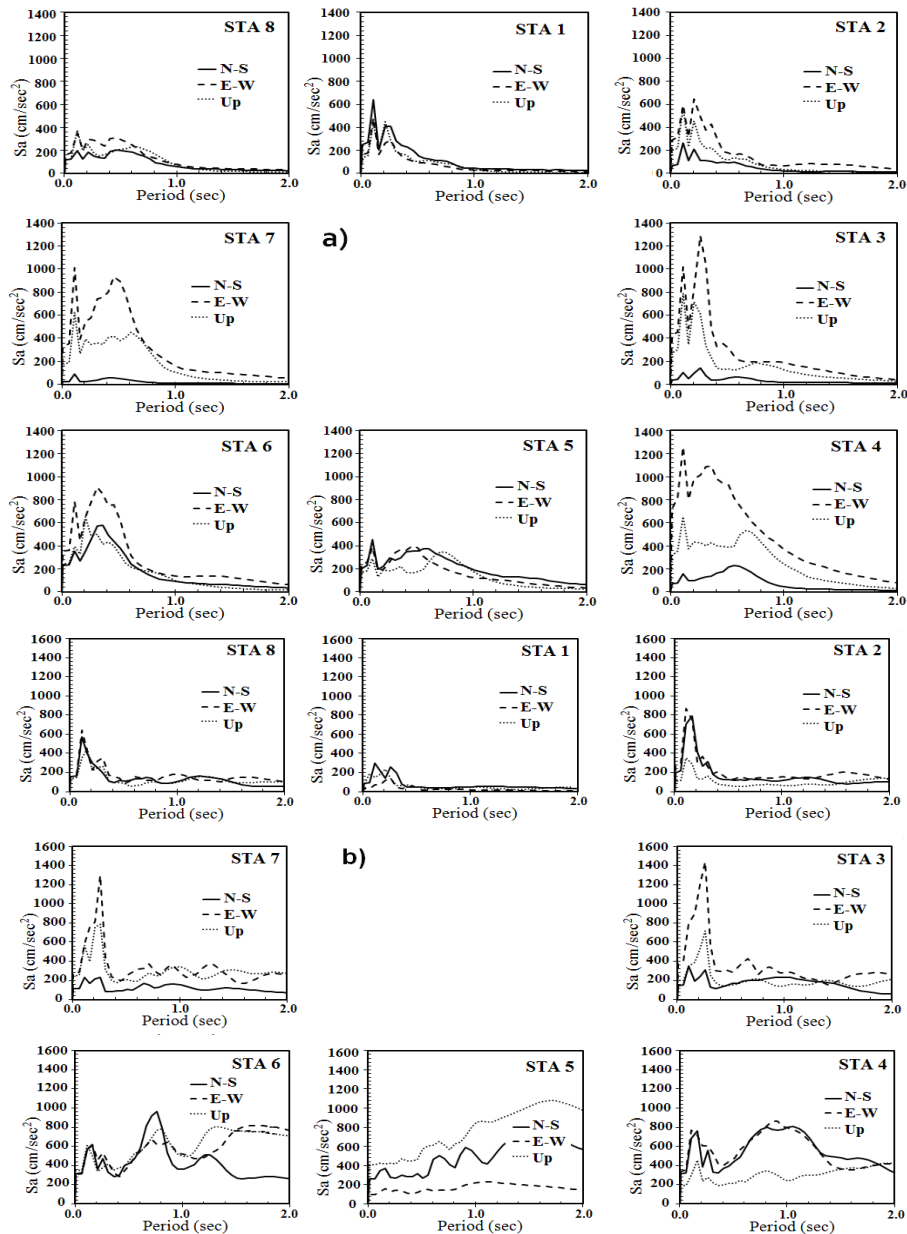


Figura 8. Espectros de respuesta para las estaciones seleccionadas y los terremotos de control extremos. a) Terremoto extremo para la presa vacía. b) Terremoto extremo para la presa llena de agua

Discusión y Conclusiones

Se ha presentado un enfoque metodológico para la caracterización del movimiento del suelo basado en definir escenarios sísmicos realistas en la presa de Itoiz. Se propone la caracterización del movimiento sísmico con tres niveles de detalle, con la consiguiente aplicación. Primero, se evalúa la peligrosidad sísmica considerando dos periodos de retorno: 975 y 4975 años. Tal y como indica el Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses (MOPTMA, 1996), estos períodos se asocian, respectivamente, a dos terremotos que pueden cuestionar, en diferentes medida, la seguridad de la presa: un terremoto de proyecto (TP) y un terremoto extremo (TE). Como resultado de la primera parte del análisis, se obtienen espectros de peligrosidad uniforme (UHS). Los valores de PGA para ambos periodos de retorno resultan ser de 0,10 g y 0,17g y las aceleraciones espectrales máximas son de 0,27 g 0,44 g, respectivamente. Estos valores son superiores a los dados por la Norma de Construcción Sismoresistente Española NCSE-02 y están en consonancia con los obtenidos en otros estudios realizados en la región .

En una segunda etapa se realizó una caracterización más detallada del movimiento, teniendo en cuenta escenarios sísmicos específicos que puedan representar acciones críticas para la seguridad de la presa. Estos escenarios fueron identificados teniendo en cuenta, tanto el *terremoto de proyecto*, como el *sismo extremo* en dos estados de la presa: *presa vacía* y *presa llena*, con períodos fundamentales de 0,10 s y 0,22, respectivamente. Se ha desarrollado un análisis de desagregación para la obtención de los terremotos de control vinculados con los cuatro escenarios, cada uno identificado por una posible combinación de período de retorno y período estructural. Los valores de aceleración espectral resultante para cada una de las cuatro combinaciones se tomaron como movimiento objeto para la desagregación. Los terremotos de control obtenidos se encuentran en un rango de magnitudes M_w [4.5-6] y distancias [5-30 km]. Se obtuvieron los espectros de respuesta específicos (SRS) de estos terremotos, que pueden considerarse una segunda aproximación al movimiento del suelo que previsiblemente resultará más crítico para la presa.

En una tercera aproximación, se identificaron los terremotos de control con escenarios específicos, asociando esos terremotos teóricos con un mecanismo compatible con los encontrados en la zona y situándolos en diferentes posiciones relativas a la presa para analizar posibles efectos de directividad. Este estudio se hizo en el dominio del tiempo, generando acelerogramas sintéticos. Los resultados obtenidos muestran un claro efecto de directividad en las ocho posiciones estudiadas, proporcionando aceleraciones mucho mayores cuando la dirección terremoto-emplazamiento coincide con la dirección de ruptura.

Agradecimientos

Son numerosas las personas e instituciones que han aportado información de interés para el desarrollo del presente trabajo. A todas ellas queremos mostrar nuestro agradecimiento. A C. López y S. Limonchi por su ayuda en las campañas de campo y a Yuncha que participó en las etapas iniciales de esta investigación. A la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE), por el acceso a sus instalaciones y por los datos sísmicos proporcionados. Al Instituto Geográfico Nacional (IGN) de España y al Réseau Accélérométrique Permanent (RAP) de Francia, por facilitar los datos sísmicos de la región. Este trabajo fue financiado parcialmente por: la Secretaría General para el Territorio y la Biodiversidad del Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino de España, bajo la subvención 115/SGTB/2007/8.1; la UE con fondos FEDER y el equipo de investigación RNM-194 de la Junta de Andalucía. El estudio PSHA se realizó durante la estancia de investigación de A.R.M. en la Universidad de Almería.

Referencias:

- AMBRASEYS, N.N., DOUGLAS, J., SARMA, S.K., and SMIT, P.M. (2005), Equations for the Estimation of Strong Ground Motions from Shallow Crustal Earthquakes Using Data from Europe and the Middle East: Horizontal Peak Ground Acceleration and Spectral Acceleration, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 3, 1–53.
- AMBRASEYS, N.N., SIMPSON, K.A., and BOMMER, J.J., (1996), Prediction of horizontal response spectra in Europe. *EarthqEng Dyn* 25(4): 371–400
- BENITO, B., GASPAR-ESCRIBANO, J. M., MARTÍNEZ-DÍAZ, J.J., GÓMEZ, R., CANORA, C. and ÁLVAREZ, J.A., (2008), Evaluación de la peligrosidad sísmica (emplazamientos en roca) Vol.1. Evaluación del Riesgo Sísmico en Navarra. Protección Civil de Emergencias de la Comunidad Foral de Navarra. Internal report.
- BERGE-THIERRY, C., COTTON, F., SCOTTI, O., GRIOT-POMMERA, D.A., and FUKUSHIMA, Y., (2003), New Empirical Response Spectral Attenuation Laws for Moderate European Earthquakes, *J. Earthquake Eng.* 7 (2), 193-222.
- BOUCHON, M., (1979), Discrete wave number representation of elastic wave field in three space dimensions, *Journal of Geophysical Research*, 84, 3609-3614.
- BOUCHON, M., and AKI, K., (1977), Discrete wave number representation of seismic source wave fields, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 67, 259-277.
- BUDNITZ, R.J., APOSTOLAKIS, G., and BOORE, D.M., (1997), Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance on Uncertainty and Use of Experts, NUREG/CR-6372, US Nuclear Regulatory Commission.

- COLEGIO DE GEOLOGOS, (2005). Informe de supervisión de los estudios Y análisis disponibles sobre la seguridad de la presa de Itoiz. Internal report. Confederación Hidrográfica del Ebro. <http://www.chebro.es>.
- COLEGIO DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS (2005). Estudio sobre la Presa de Itoiz. Internal report. Confederación Hidrográfica del Ebro. <http://www.chebro.es>.
- DOWRICK, D.J., and RHOADES, D. A., (2004), Relations Between Earthquake Magnitude and Fault Rupture Dimensions: How Regionally Variable Are They? *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 94, No. 3, pp. 776–788, June.
- DROUET, S., SCHERBAUM, F., COTTON, F., and SOURIAU, A. (2007), Selection and ranking of ground motion models for seismic hazard analysis in the Pyrenees. *J. Seismol.* 11, 87–100 ECORS PYRENEES TEAM, (1988). The ECORS deep reflection seismic survey. *Nature* 311,508- 511.
- GARCÍA-MAYORDOMO, J., (2007), Metodologías modernas en el análisis de peligrosidad sísmica para embalses, in *Jornadas Técnicas sobre Estabilidad de Laderas en Embalses* (Ed. Confederación Hidrográfica del Ebro), Memorias, 581-597, Zaragoza.
- GARCÍA-MAYORDOMO, J., and INSUA-ARÉVALO, J.M., (2010), Estudio Sismotectónico y de Actividad Tectónica Reciente en el entorno de la Presa de Itoiz (Navarra): Cálculo de la Peligrosidad Sísmica Mediante Técnicas Modernas. Internal report of the Instituto Geológico y Minero de España.
- GARCÍA-SANSEGUNDO, J., (1993), Memoria y mapas geológicos a escala 1: 25.000 de la hoja nº 142 (Aoiz), cuadrantes de Aoiz (I), Irurozqui (II), Monreal (III) y Domeño (IV). Diputación Foral de Navarra.
- JIMÉNEZ, A., TIAMPO, K.F., POSADAS, A., LUZÓN, F., and DONNER, R., (2009). Analysis of complex networks associated to seismic clusters near the Itoiz reservoir dam, *European Physical Journal Special topics*, 174, 181-195
- LUSSOU, P., FUKUSHIMA, Y., BARD, P.Y., and COTTON, F., (2001) Seismic design regulation codes: contribution of Knet data to site effect evaluation. *J Earthq Eng* 5, 13–33
- LUZÓN, F., GARCÍA-JEREZ, A., SANTOYO, M.A., and SÁNCHEZ-SESMA, F. J., (2009). A hybrid technique to compute the pore pressure changes due to time varying loads: application to the impounding of the Itoiz reservoir, northern Spain. In *POROMECHANICS-IV*, Eds. H. Ling, A. Smyth, and R. Betti, DEstech Publications, Inc., Lancaster, Pennsylvania. ISBN: 978-1-60595-006-8., pp. 1109-1114.
- LUZÓN, F., GARCÍA-JEREZ, A., SANTOYO, M.A., and SÁNCHEZ-SESMA, F.J., (2010). Numerical modelling of pore pressure variations due to time varying loads using a hybrid technique: the case of the Itoiz reservoir (Northern Spain). *Geophysical Journal International*, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04408.x
- MIKUMO, T., MIYATAKE, T., and SANTOYO, M.A., (1998). Dynamic rupture of asperities and stress change during a sequence of large interplate earthquakes in the Mexican subduction zone. *Bulletin of the Seismological Society of America* 88, 686-702.
- NCSE-02, (2002). NORMA DE LA CONSTRUCCIÓN SISMORRESISTENTE ESPAÑOLA (NCSE02) (2002). Real Decreto 997/2002, de 27 de septiembre, por el que se aprueba la norma de construcción sismorresistente: parte general y edificación (NCSR-02). *Boletín Oficial del Estado (BOE)* número 244 de 11/10/2002, páginas 35898 a 35967.
- NUCLENOR S.A. (1983). Estudio de Revisión de la Calificación Sísmica del Emplazamiento de la central nuclear de Santa María de Garoña. Temas SEP II- 4. 3 volúmenes.
- ORDAZ, M., AGUILAR, A., and ARBOLEDA, J. (2007), Program for computing seismic hazard, CRISIS2007, Universidad Nacional Autónoma de México.
- PROSPECCION E INGENIERÍA (1992). Estudio Sísmico de Navarra, Gobierno de Navarra Servicio de Protección Civil, Memoria 103 pp., 7 planos + 5 Apéndices.
- RUEDA, J., (2005). Informe sobre terremotos ocurridos en Itoiz (Navarra) en septiembre de 2004. Internal report, Instituto Geográfico Nacional, Madrid.
- RUIZ, M., GASPÀ, O., GALLART, J., DÍAZ, J., PULGAR, J.A., GARCÍA-SANSEGUNDO, J., ÓPEZFERNÁNDEZ, C., and GONZÁLEZ-CORTINA, J.M., (2006a). Aftershocks series monitoring of the September 18, 2004, M=4.6 earthquake at the western Pyrenees: A case of reservoirtriggered seismicity?. *Tectonophysics*, 424, 223–243.
- SABETTA, F., and PUGLIESE, A., (1996) Estimation of response spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motions. *Bull Seism Soc Am* 86(2): 337–352
- SANTOYO, M.A., GARCÍA-JEREZ, A., and LUZÓN, F., (2010), A Subsurface Stress Analysis and its Possible Relation with Seismicity Near the Itoiz Reservoir, Navarra, Northern Spain. *Tectonophysics*, doi:10.1016/j.tecto.2009.06.022
- SECANELL, R., BERTIL, D., MARTIN, CH., GOULA, X., SUSAGNA, TH., TAPIA, M., DOMINIQUE, P., CARBON, D., and FLETA, J., (2008). Probabilistic seismic hazard assessment of the Pyrenean region. *J Seismol.* DOI 10.1007/s10950-008-9094-2
- SOURIAU, A., SYLVANDER, M., RIGO, A., FELS, J.F., DOUCHAIN, J. M. and PONSOLLES, C., (2001), Sismotectonique des Pyrénées: principales contraintes sismologiques. *Bull.Soc.géol.France*, 172(1), 25-39.
- STEPP, J.C., (1973) Analysis of completeness of the earthquake sample in the Puget Sound area and its effect on statistical estimates of earthquake hazard. In: *Proceedings the 2nd International Conference on Microzonation*, pp 897–910
- WELLS D. L. AND K. J. COPPERSMITH (1994). New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 84, No. 4, pp. 974-1002.