

# Estudio sismotectónico del entorno del macizo de la Maladeta, sector de Vielha (Lérida)

## Sismotectonic study of Maladeta Massif, Vielha Sector (Lerida)

F. J. Torrijo (\* y \*\*), C. Melguizo (\*), J.M. Bescós (\*), M.L. Garijo (\*) y J. Bueso (\*)

(\*) Departamento de Geología y Geotecnia. Laboratorios PROYEX, S.A. Autovía de Logroño, Km. 11'4, 50180 UTEBO (Zaragoza)

(\*\*) Área de Petrología y Geoquímica. Departamento de Geología. Universidad de Zaragoza. C/ Pedro Cerbuna 12, 50009 ZARAGOZA

### ABSTRACT

This paper is a brief description of the sismotectonic study carried out in the Vielha sector of Maladeta Massif. This work is based in data sets: historic regional seismicity; instrumental seismicity in the Pyrenees; focal mechanism solutions and others stress field indicators; and seismic variation versus depth.

**Key words:** Sismotectonic, Pyrenees, Maladeta Massif, stress tensor.

Geogaceta, 29 (2001), 135-138

ISSN: 0213683X

### Introducción

El objetivo de este trabajo es dar a conocer, de manera resumida, los resultados obtenidos del análisis sismotectónico enmarcado dentro del estudio geotécnico para el proyecto constructivo del desdoblamiento del túnel de Vielha-Alfonso XIII; así como también la metodología aplicada en dicho estudio. Para su elaboración se tuvieron en cuenta básicamente cuatro aspectos: recopilación de datos sobre la sismicidad histórica en la zona, interpretación de los datos obtenidos mediante registro instrumental, análisis de los valores actuales del campo tensional regional, y la variación de la intensidad sísmica con la profundidad.

### Marco Geológico

La zona de estudio se localiza en el sector central de la cadena Pirenaica. Concretamente está circunscrita a la unidad morfológica-geológica denominada como Zona Axial, situándose dentro del macizo de La Maladeta. Dicho macizo, con una superficie aflorante de más de 400 km<sup>2</sup>, presenta una disposición general E-W, conformando bordes irregulares (figura 1).

La estructura geológica principal del macizo atravesado por el túnel es la del batolito granodiorítico de La Maladeta, sobre el cual reposan materiales paleozoicos. Los materiales graníticos se sitúan en el flanco sur y zona central

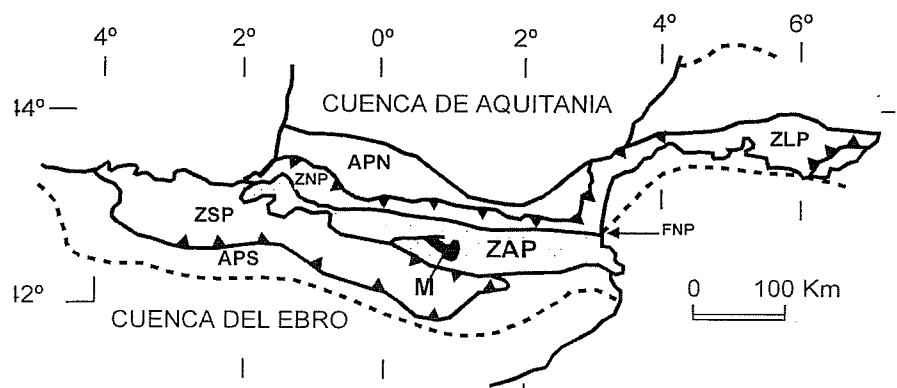


Fig. 1.- División estructural de la cadena pirenaica, según Mattauer y Seguret (1997). ZAP: Zona Axial Pirenaica; M: Maladeta; ZSP: Zona Sur Pirenaica; ZNP: Zona Nor-Pirenaica; ZLP: Zona de Languedoc-Provenza; APN: Antepais Plegado Norte; APS: Antepais Plegado Sur.

Fig. 1.- Structural sectorization of the Pyrenees (Mattauer and Seguret, 1997). ZAP: Axial Pirenaic Zone; M: Maladeta; ZSP: South Pirenaic Zone; ZNP: North Pirenaic Zone; ZLP: Languedoc-Provenza Zone; APN: North Foreland; APS: South Foreland

del macizo, con escasas variaciones litológicas. En el flanco norte se hallan los materiales paleozoicos representados en la zona del túnel por metagrauvascas, cuarcitas y pizarras con algunas intercalaciones calcáreas. El conjunto de materiales paleozoicos presentan una foliación general orientada E-W y buzando fuertemente hacia el Norte, aunque con replegamientos. En el sector próximo a la traza del túnel aparecen algunas fallas de desarrollo importante y de dirección aproximada NE-

SW (fallas de Jueu), así como en la traza del túnel aparece el cabalgamiento de la Picada-Valarties, en el lado norte del mismo.

La fracturación existente en el macizo produce abundantes dislocaciones en los materiales y determina una red de discontinuidades penetrantes, que posibilita la circulación de agua. La importancia de estas circulaciones depende del grado de fracturación local, de la heterogeneidad de los materiales atravesados y de las condiciones de recarga del macizo.

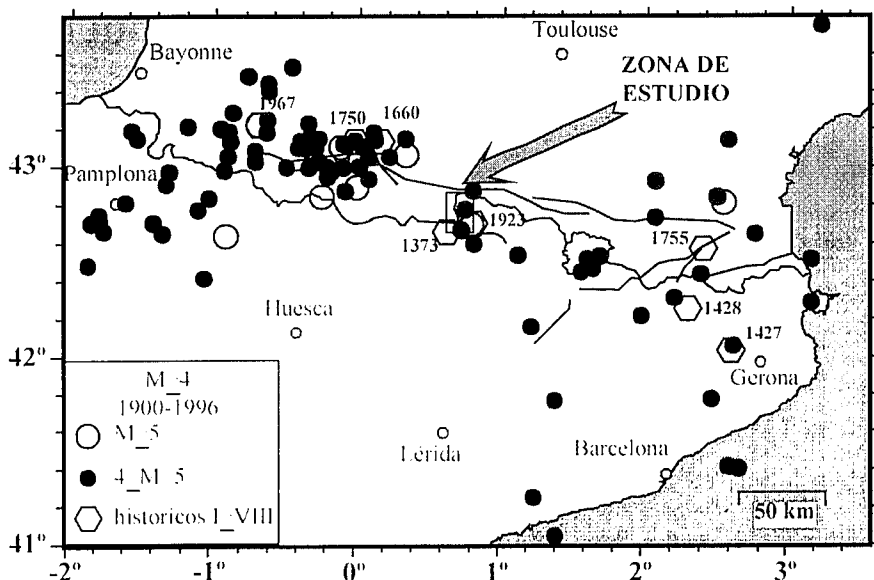


Fig. 2.- Mapa de terremotos de magnitud mayor o igual a 4, en el Pirineo y zonas adyacentes, durante el último siglo; también se muestran los eventos de intensidad mayor o igual a VIII obtenidos de los datos de sismosidad histórica (modificado de Souriau y Pauchet, 1998).

Fig. 2.- Map of main Pyrenean earthquakes (magnitudes  $\geq 4.0$ ) from the beginning of the century; also shown are the main events (Intensity  $\geq VIII$ ) reported from historical seismicity (modified from Souriau y Pauchet, 1998).

**Datos históricos de sismicidad**

Aunque en la actualidad la sismicidad de la zona es moderada, en el pasado tuvieron lugar terremotos de magnitud importante (vease Souriau y Pauchet, 1998). A modo de ejemplo (figura 2) se puede comentar que en el año 1923 existen registros de magnitudes importantes (6.6) en la zona del valle de Arán (Artiga de Lin) y de intensidades de valor VIII en la escala de Mercalli (modificada Sieberg) en la Canal de Berdún (más hacia el Oeste). También se conoce que hubo sismos destructivos en la misma región en los años 1373, 1700, 1870, 1902, 1908 y 1918. Así mismo, en Bagnères de Bigorre el 21/06/1660, se registró un sismo de intensidad VIII (M.S.K.), y en la zona próxima a Gerona se registraron dos sismos de intensidad VIII (M.S.K.) en los años 1427 y 1428.

Si tomamos como referencia la magnitud registrada de 5,6 o su equivalente de intensidad VIII (M.S.K.) y aplicamos la ley de atenuación experimental de Sponheuer, la zona de traza del túnel puede experimentar una intensidad que oscile entre IV y VI. Para el cálculo de la peligrosidad sísmica en términos de intensidad (I), se aplica la relación  $\log_{10} A = 0,30103 I - 0,2321$ , que permite obtener la aceleración horizontal característica. Para el caso de I= VIII, la aceleración horizontal superficial es de 150

cm/s<sup>2</sup> y para las intensidades de IV-VI, la aceleración horizontal oscila entre 9,4 y 37,5 cm/s<sup>2</sup>. Además, si se aceptan los valores que propone la nueva norma sísmica (NCSE-94), hay que aceptar para los términos municipales de Vielha, Vilaller, etc, el inferior a 0,04g, es decir una aceleración máxima inferior de 40 cm/s<sup>2</sup>, que en líneas generales concuerda con la anterior aproximación.

**Interpretación de los datos de sismicidad obtenidos mediante análisis instrumental**

Una muestra de la permanente actividad sísmica existente en la zona son los datos instrumentales suministrados por las diferentes estaciones sismográficas establecidas en el Pirineo, de manera fija o temporal, desde 1984. De ellos, se han tomado los existentes desde 1984 hasta el momento actual (SGC, 1984-1999), entre los 42° 50' y 43° 20' de latitud y los 0° 15' a 2° 30' de longitud, con una profundidad igual o inferior a 3 km (figura 3). De éstos datos se puede extraer que la gran mayoría de los sismos registrados presentan una magnitud inferior a 3, y que únicamente 15 de ellos han presentado una magnitud igual o superior a 3, llegando alcanzarse una magnitud superior a 5 en el último sismo acaecido el año 1999 cerca de la localidad de Sort.

Si se representan el número de sismos de magnitud mayor o igual a 3 en el interior de las áreas delimitadas por las hojas 1/50.000 del mapa topográfico (figura 3), se constata que el mayor número de ellos se sitúan en dos máximos. Estos máximos se pueden unir por una línea de orientación Noroeste-Sureste, centrándose los valores máximos de la frecuencia de los sismos, en las hojas de Lourdes, Argelès-Gazost, Campan, Bagnères de Bigorre, la Seu d'Urgell y la Poble de Lillet.

De forma semejante, en la figura 4 se muestra el valor de la magnitud máxima alcanzada. Se observa en la figura que los sismos de mayor magnitud se localizan en las hojas de Bagnères de Bigorre y la Poble de Lillet.

**Orientación actual del campo tensional regional**

Una indicación de la orientación de las tensiones naturales existentes en la roca a nivel cortical, tan solo se puede deducir de la obtención del mecanismo focal de los sismos registrados. No obstante, a escala más superficial, se puede obtener información a partir de un análisis microtectónico y a partir de los ensayos de fracturación hidráulica, de rotura de perforaciones profundas y de medida de tensiones «in situ», propios de los reconocimientos petroleros, mineros, geotécnicos o incluso hidroeléctricos (FECSA, 1980; Whitte y Soria, 1983).

De los datos anteriores, más datos bibliográficos (vease, por ejemplo, Mueller et al., 1997), el C.S.N. (1998) y Herraiz et al. (in press) han elaborado un mapa de la Península Ibérica en el que se localizan los mecanismos focales obtenidos y las trayectorias de Shmax para la moda principal calculadas con el método de Lee y Angelier (1994).

Del mismo modo, Goula et al. (1999) estudiaron 30 terremotos durante el periodo de 1969 a 1996 y obtuvieron los parámetros epicentrales y otras características de estos terremotos, tal como se refleja en la tabla 1. En esta tabla "N" (columna 1) es el número de referencia de los sismos seleccionados para el proceso de inversión y "N" (columna 8) es el número de polaridades (dirección de movimiento de los planos nodales para cada estación) posibles.

Cabe comentar que en todos los casos consideraron más de diez polaridades por terremoto (N $\geq$ 10), tal como propone el C.S.N. (1998). Este límite inferior se estima teniendo en cuenta que un número pequeño de polaridades puede conducir a establecer regiones de confianza muy

grandes, no sólo para los ejes del tensor de esfuerzos sino también para el valor del factor de forma R (definido como  $R = (s_2 - s_3) / (s_1 - s_3)$ , o régimen de esfuerzos) y los parámetros del mecanismo focal (vease el ejemplo del análisis de las réplicas del sismo de Perugia del 29 de Abril de 1984; Rivera, 1989). De esta forma, se intenta asegurar una población de polaridades con calidad uniforme y aceptable, aún con el riesgo de descartar información válida (Delouis *et al.*, 1993).

De de la tabla anterior y de los mapas establecidos por los autores anteriores se constata que la dirección preferente de Shmax es la NNO-SSE (aproximadamente 165-345°).

**Discusión y conclusiones**

Se ha realizado un estudio sismotectónico en el sector de Vielha del Macizo de la Maladeta, integrando cuatro aspectos que ayudan a definir, según el punto de vista sísmico, la viabilidad de una estructura lineal. Estos aspectos son: recopilación de datos sobre la sismicidad histórica en la zona, interpretación de los datos obtenidos mediante registro instrumental, análisis de los valores actuales del campo tensional regional, y la variación de la intensidad sísmica con la profundidad.

De los dos primeros puntos de vista, se concluye que la zona presenta una permanente actividad sísmica y unos valores relativamente altos de intensidad.

Del análisis de la orientación actual del campo tensional regional se deduce una dirección preferente de los esfuerzos compresivos (Shmax) NNO-SSE, que teóricamente sería la más favorable como eje de traza para el futuro túnel. Del mismo modo, desde el punto de vista hidráulico, la dirección perpendicular a la anterior (aproximadamente 075-255°), es la más favorable para efectuar el drenaje del macizo, o lo que es equivalente, es la más peligrosa en el momento de atravesar fracturas cuya dirección sea paralela a aquella y que tengan carga de agua.

Integrando los datos anteriores, y teniendo en cuenta que una estructura subterránea se comporta de una forma más favorable al efecto sísmico que una superficial, por su elevado grado de confinamiento, tal y como se puso de manifiesto en el terremoto de 1976 con epicentro en la mina de Tangsham (Lee, 1987), puede concluirse que la orientación del túnel es muy favorable (prácticamente N-S) con respecto a las orientaciones de los ejes de compresión actuales y, por tanto, viable desde el punto de vista sismotectónico.

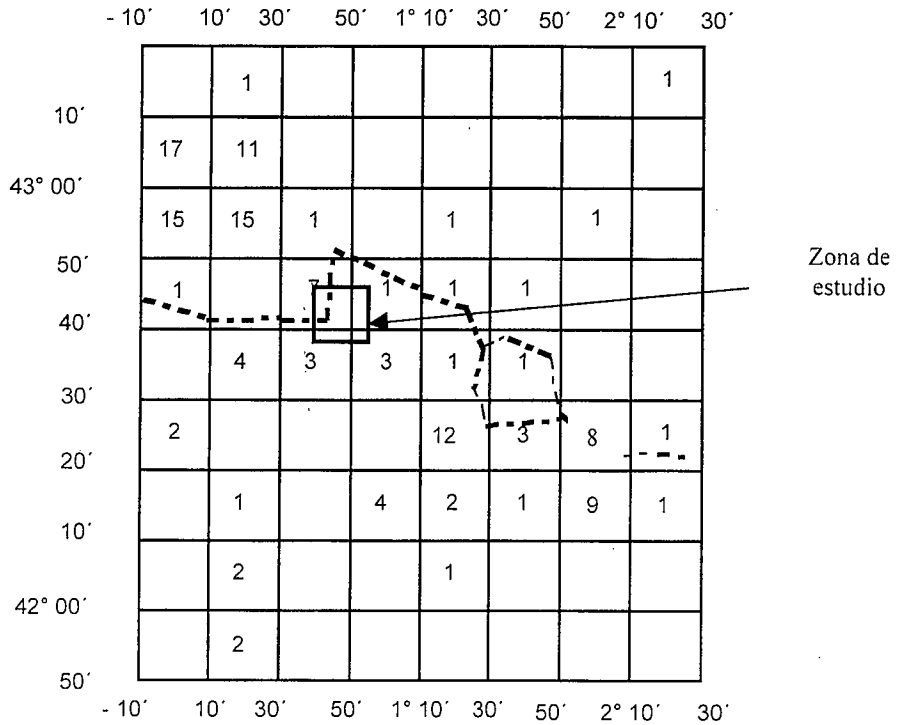


Fig. 3.- Número de sismos de magnitud mayor o igual a 3, registrados por el Servicio Geológico de la Generalitat de Catalunya durante el periodo de 1984 a 1999.

Fig. 3.- Number of earthquakes with  $M \geq 3$ , obtained from the Servicio Geológico de la Generalitat de Catalunya between 1984 and 1999.

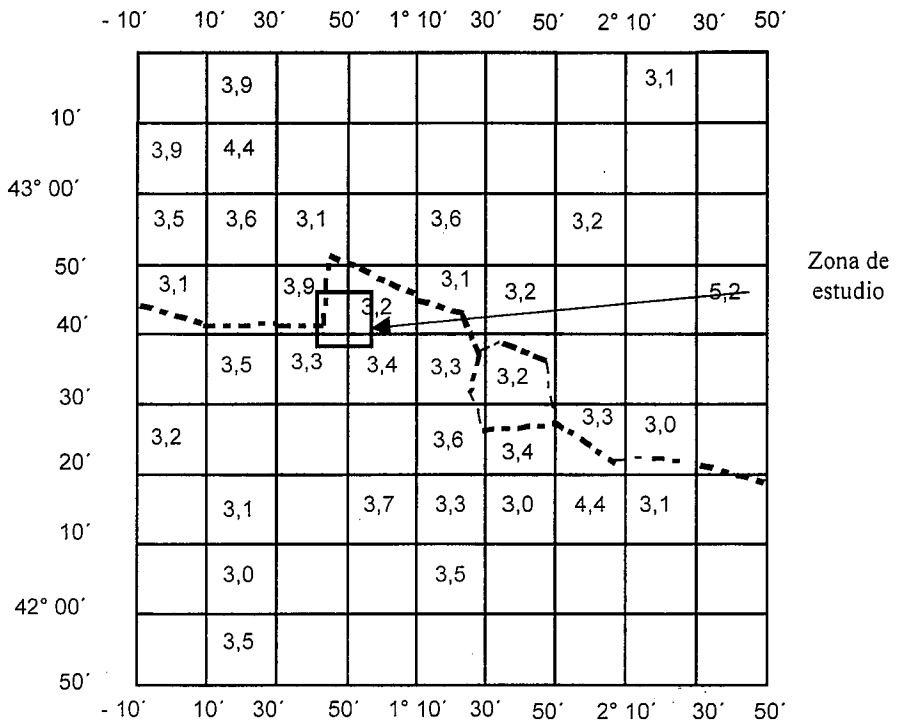


Fig. 4.- Valor de la magnitud máxima registrada por el Servicio Geológico de la Generalitat de Catalunya durante el periodo de 1984 a 1999. Se ha aumentado la zona hasta los 2°50'Este para incluir el terremoto n° 18 reflejado en la tabla 1 ( $M=5'2$ ).

Fig. 4.- Maximum magnitude of earthquakes, obtained from the Servicio Geológico de la Generalitat de Catalunya between 1984 and 1999. The covered area has been increased to 2°50'East, to include earthquake n° 18 of table 1 ( $M=5'2$ ).

Nº	Fecha (día/mes/año)	Hora	Mag.	Z (km)	Latitud (°N)	Longitud (°E)	N	Dirección de compresión	Referencias
	11/03/69	18:18	4.0	5	42.70	0.70	10	NW-SE	Nicolas <i>et al.</i> , 1990
	14/03/70	00:32	4.0	5?	42.52	1.70	15	NW-SE	Nicolas <i>et al.</i> , 1990
	14/03/70	15:48	4.7	5?	42.52	1.68	25	NW-SE	Nicolas <i>et al.</i> , 1990
	16/03/70	06:26	4.6	5?	42.54	1.71	21	NW-SE	Nicolas <i>et al.</i> , 1990
	05/04/70	06:49	4.9	5?	42.47	1.66	17	NW-SE	Nicolas <i>et al.</i> , 1990
	29/08/78	22:23	4.1	8	43.69	3.29	23	NW-SE	Nicolas <i>et al.</i> , 1990
1	03/11/78	06:38	4.3	8	42.84	2.70	22	NE-SW	Goula <i>et al.</i> , 1999
2	28/09/79	05:28	4.1	16	43.15	0.54	21	NW-SE	Nicolas <i>et al.</i> , 1990
3	05/12/79	23:02	4.2	3	42.44	2.44	29	W-E	Goula <i>et al.</i> , 1999
4	23/04/81	15:53	4.5	1	42.90	2.05	23	NE-SW	Gallart <i>et al.</i> 1982
5	23/12/82	14:48	4.1	6	43.00	3.81	31	NE-SW	Nicolas <i>et al.</i> , 1990
	24/12/82	00:06	4.0	5	42.55	0.50	21	NW-SE	Nicolas <i>et al.</i> , 1990
6	20/07/83	19:08	3.9	2	42.38	2.25	17	W-E	Gallart <i>et al.</i> , 1985
7	26/09/84	04:54	4.4	5	42.32	2.17	22	NW-SE	SGC, 1985-1997 (1985)
8	24/08/87	18:43	4.2	7	40.95	1.57	18	NE-SW	SGC, 1985-1997 (1988)
9	20/02/88	16:38	3.6	1	42.36	1.46	26	W-E	Goula <i>et al.</i> , 1999
10	16/03/88	04:33	3.8	8	42.34	2.20	41	NW-SE	Goula <i>et al.</i> , 1999
11	06/01/89	19:33	4.9	11	42.99	0.17	44	NW-SE	Goula <i>et al.</i> , 1999
12	05/08/90	21:32	3.7	1	42.27	1.09	18	NW-SE	SGC, 1985-1997 (1991)
13	15/12/91	11:50	4.2	12	40.98	2.06	30	NW-SE	SGC, 1985-1997 (1992)
14	19/03/92	18:53	4.2	2	42.23	2.06	39	NW-SE	SGC, 1985-1997 (1992)
	25/07/92	22:01	3.1	12	42.79	1.22	13	NW-SE	SGC, 1985-1997 (1993)
	24/08/92	22:23	2.8	1	42.27	2.32	13	NW-SE	SGC, 1985-1997 (1993)
	03/09/92	03:12	3.3	11	41.65	2.17	17	NW-SE	SGC, 1985-1997 (1993)
	02/10/92	23:06	3.2	4	42.43	1.86	13	NW-SE	SGC, 1985-1997 (1993)
	15/12/92	22:27	3.1	9	42.65	1.06	13	NW-SE	SGC, 1985-1997 (1993)
15	08/10/93	02:09	3.3	3	42.43	2.13	36	NW-SE	SGC, 1985-1997 (1994) (mecanismo compuesto)
16	26/09/94	05:38	4.2	10	41.41	2.55	35	NW-SE	SGC, 1985-1997 (1995)
17	15/05/95	15:37	4.6	14	40.84	1.52	30	NW-SE	SGC, 1985-1997 (1996)
18	18/02/96	01:45	5.2	8	42.79	2.54	82	NE-SW	SGC, 1985-1997 (1997)

Tabla 1. Características de los 30 terremotos estudiados durante 1969 y 1996 por Goula *et al.* (1999), y usados para el proceso de inversión.

Table 1. Characteristics of 30 earthquakes within the period 1969-1996 studied by Goula *et al.* (1999), and used for the inversion procedure.

Además, el túnel se sitúa a una profundidad considerable (aproximadamente 800 metros en su parte central), lo cual le confiere cierto confinamiento y atenuación.

## Referencias

- C.S.N. (Consejo de Seguridad Nuclear) (1998): Colección Otros Documentos, C.S.N., 239 pp.
- Delouis, B., Haessler, H. Cisternas, A. and Rivera, L., (1993): *Tectonophysics*, 221, 413-417.
- FECSA (Fuerzas Eléctricas de Cataluña, S.A.) (1980): *Informe Interno* (Inédito).
- Goula, X., Olivera, C., Fleta, J., Grellet, B., Lindo, R., Rivera, L.A., Cisternas, A. and carbon, D. (1999): *Tectonophysics*. 308, 487-502.
- Herraiz, M., De vicente, G., Lindo-ñaupari, R., Giner, J., Simón, J.L., González-Casado, J.M., Vadillo, O., Rodríguez-Pascua, M.A., Cicuéndez, J.I., Casas, A., Cabañas, L., Rincón, P., Cortés, A.L., Ramírez, M. and Lucini, M. (*in press*), *Tectonics*.
- Mueller, B., Wehrle, V., and Fuchs, K. (1997): Available on-line at <http://www-wsm.physik.uni-Karlsruhe.de/pub/Rel97/wsm97.html>.
- Lee, C.F. (1987): *Tunneling and Underground Space Technology*, 2(2), 199-202.
- Lee, J.C. (1994): *Computers and Geosciences*, 20(2), 161-191.
- Rivera, L.A. (1989): Thèse de Doctorat. Universit' t Louis-Pasteur de Strasbourg, 226 pp.
- S.G.C. (Servei Geològic de Catalunya) (1984-1999): *Butlletí Sismològic*. Generalitat de Catalunya.
- Souriau, A. and Pauchet, H. (1998): *Tectonophysics*, 290, 221-244.
- Whitte, W. and Soria, J.L. (1983): *Fifth Congress of the International Society for Rocks Mechanics*. Australian Geomechanics Society. Melbourne (Australia), Section D, pp 167-178.