

## **Estimación del estado de esfuerzos actual en la zona de Cataluña y del Pirineo Oriental Francés**

R. Lindo<sup>1,2,3</sup>, C. Olivera<sup>1</sup>, L.A. Rivera<sup>2</sup>, B. Grellet<sup>4</sup>, J. Fleta<sup>1</sup>, X. Goula<sup>1</sup>, y A. Cisternas<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Servei Geològic de Catalunya. Institut Cartogràfic de Catalunya. Barcelona.

<sup>2</sup> Institut de Physique du Globe. Strasbourg. Francia.

<sup>3</sup> Dep. Geofísica y Meteorología-Universidad Complutense. Madrid.

<sup>4</sup> Geo-Ter. Montpellier. Francia.

### **Resumen**

*Se analiza el tensor de esfuerzos de la zona del Nordeste de la Península ibérica que comprende Cataluña y el Pirineo oriental francés a partir del estudio de los mecanismos focales y de medidas microtectónicas realizadas en materiales Plio-Cuaternarios.*

*Los resultados obtenidos a partir de las dos aproximaciones muestran una buena coherencia en la orientación aproximadamente N-S de la dirección del esfuerzo máximo horizontal, válido para el conjunto de la región.*

### **1. INTRODUCCIÓN**

En áreas caracterizadas por sismicidad moderada es necesaria la definición de zonas sismotectónicas para evaluar la peligrosidad sísmica. Con este objetivo, el Servei Geològic de Catalunya, en colaboración con otros organismos, lleva a cabo desde hace varios años diversos estudios encaminados a su determinación. En el presente trabajo se analiza el estado de esfuerzos reciente y actual de la región, uno de los parámetros más significativos en la caracterización sismotectónica regional.

Se han escogido los dos tipos de datos que reflejan directamente y con la máxima fiabilidad la deformación tectónica. Los mecanismos focales proporcionan información del estado de esfuerzos actual y los datos de microtectónica seleccionados representan el estado de esfuerzos reciente (Plio-Cuaternario). Las dos colecciones de datos de la región de Cataluña y del Pirineo oriental francés han sido procesadas de forma independiente utilizando métodos numéricos de inversión con la finalidad de realizar un análisis comparativo del tensor de esfuerzos regional obtenido.

### **SISMICIDAD REGIONAL**

La sismicidad de la parte Este de los Pirineos es actualmente moderada, aunque en épocas pasadas han ocurrido terremotos importantes. En 1373 un terremoto destructivo tuvo lugar en los Pirineos centrales llegando a alcanzar la intensidad de VIII-IX (MSK) (Olivera et al., 1994). Una serie de terremotos acaecidos en 1427 y 1428 causaron daños considerables en

una extensa área de los Pirineos orientales (Banda and Correig, 1984; Olivera et al., 1994).

En la figura 1 se representa la sismicidad correspondiente al período 1977-1996 junto con los mecanismos focales y el contexto tectónico del área de estudio. La actividad sísmica está principalmente localizada en los Pirineos y en el área Mediterránea, siendo en la Depresión del Ebro muy baja en concordancia con la débil deformación tectónica observada. A pesar del aumento de la densidad de estaciones sísmicas desde 1985, existe una escasa cobertura azimutal para los terremotos localizados en el sistema Mediterráneo (cordilleras costero catalanas y plataforma continental). Estas localizaciones no son tan precisas como las de los sismos de los Pirineos. Aunque la actividad sísmica del sistema Mediterráneo es más escasa que en los Pirineos, 7 de los 11 terremotos con magnitud mayor que 4 ocurridos durante el período 1986-96 tienen su epicentro en el mar. La mayoría de los terremotos de los Pirineos están concentrados en la zona axial. Aunque la actividad sísmica en los Pirineos orientales es más baja que en los Pirineos centrales, el terremoto más importante del período de estudio, de magnitud 5.2, ocurrió en 1996 en los Pirineos orientales y fue seguido de una gran número de réplicas.

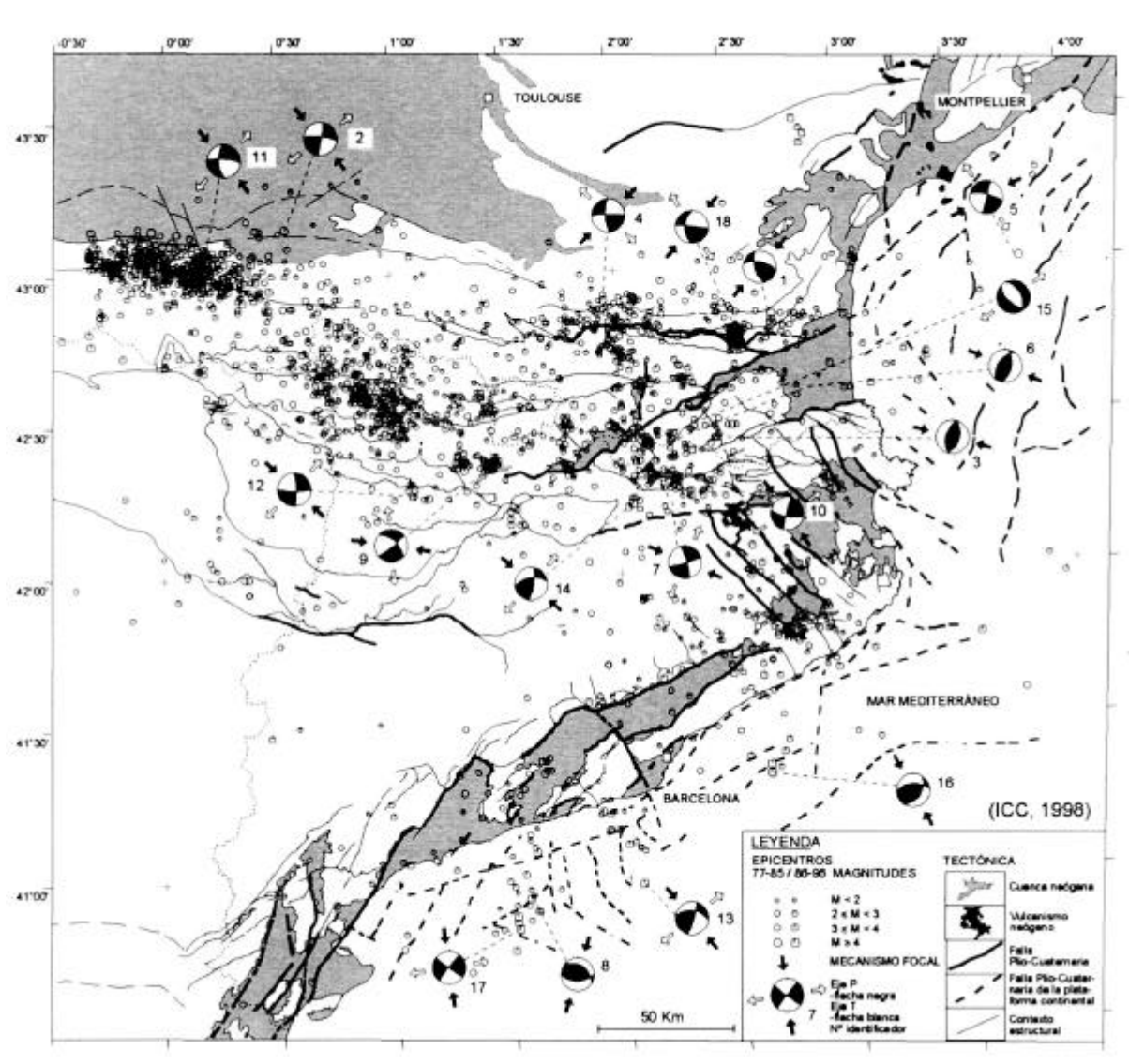
## **MECANISMOS FOCALES Y ESTADO DE ESFUERZOS**

El punto de partida de nuestro estudio es un conjunto de 30 terremotos correspondientes al período 1969-1996. Después de una selección basada en la magnitud ( $M > 3.3$ ) y en el número de polaridades para cada terremoto, se redujo el número de eventos a 18, los cuales están indicados con un número en la tabla I. En la figura 1 se muestran los mecanismos focales de estos 18 sismos que han sido obtenidos por diferentes autores. Los mecanismos indican movimientos en dirección o compresivos, en general con una dirección de compresión NW-SE, excepto los sismos de la parte nordeste de la región de estudio (nº 1, 4, 5 y 18) en que la dirección de compresión es NE-SW (Olivera et al., 1992).

Para determinar el estado de esfuerzos a partir de registros sísmicos se ha tomado una población inicial de polaridades de ondas P procedentes de los bancos de datos del *Servei Geològic de Catalunya* (SGC), del *Laboratoire de Détection et de Géophysique* (LDG), del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y del *Observatoire Midi Pyrénées de Toulouse* (OMPT).

La mayor parte de las lecturas han sido realizadas directamente sobre las copias de los registros originales. Aunque el LDG da polaridades de ambas fases, Pn y Pg, en nuestro estudio sólo hemos considerado la primera llegada. Así pues, para realizar la inversión del tensor de esfuerzos disponemos finalmente de 431 datos de polaridades.

Dada la heterogeneidad de las determinaciones de los mecanismos focales existentes, se han recalculado para todos los terremotos los ángulos de incidencia usando un modelo de gradiente de la velocidad con la profundidad.



**Figura 1.** Sismicidad del período 1977-96 y mecanismos focales individuales junto al contexto estructural.

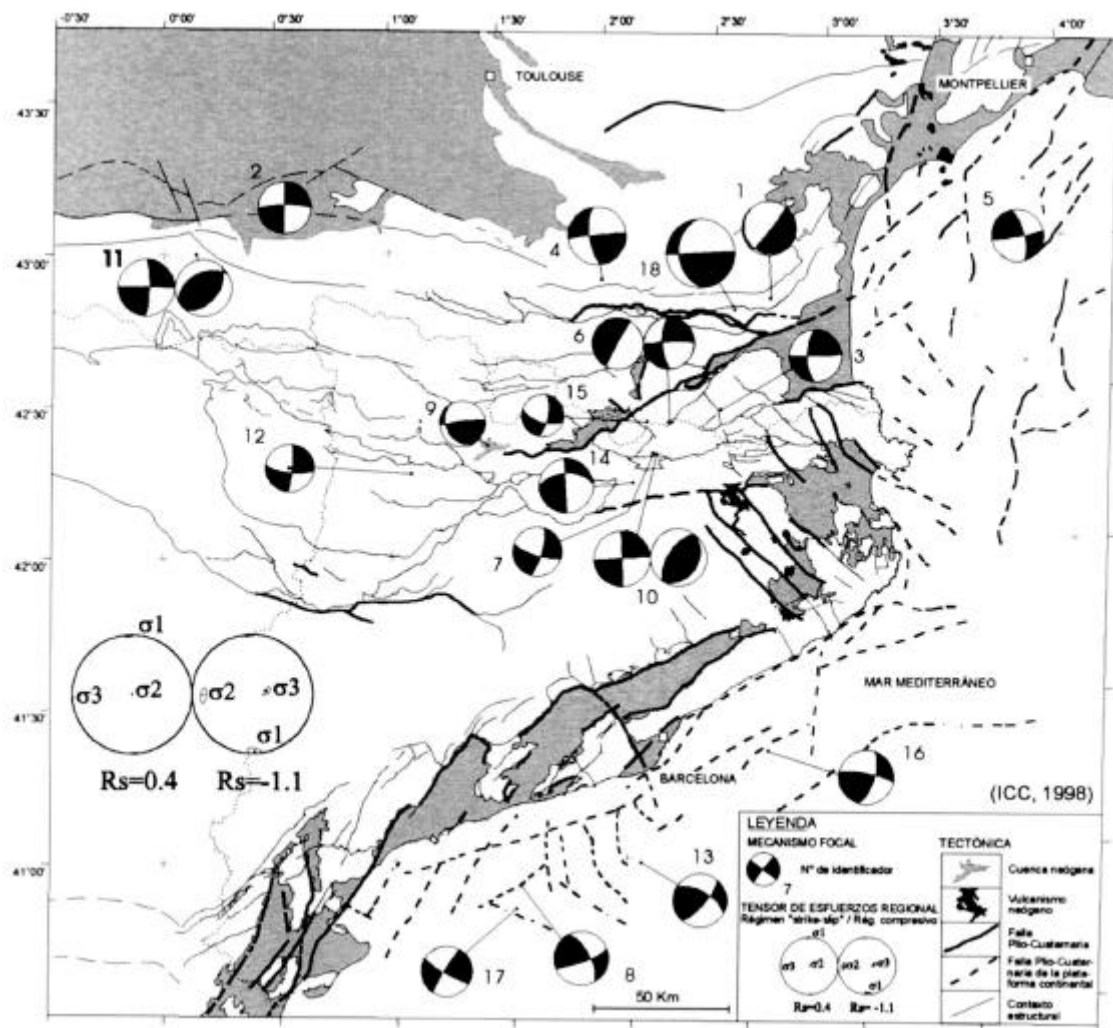
El método de inversión utilizado permite realizar una determinación conjunta del tensor de esfuerzos y de los mecanismos focales (Rivera and Cisternas, 1990) partiendo de los datos de polaridades y no de planos de falla previamente calculados. Siendo este un problema inverso no lineal, la estimación final depende de la solución de partida o ensayo. Por esta razón, se realizó una serie de ensayos de inversión y se seleccionó el de mayor calidad. Se ha optimizado una función de máxima verosimilitud que da peso a las polaridades observadas de acuerdo con su distancia a los planos nodales. Los parámetros de la inversión son: la orientación de los ejes principales de esfuerzos (3 parámetros), la forma del tensor desviador definida por  $R_s = (\sigma_z - \sigma_x) / (\sigma_y - \sigma_x)$  (1 parámetro) y la orientación del plano de falla para cada terremoto (dos parámetros por evento).

El resultado de la inversión proporciona dos tipos de modelos con características muy similares, de buena calidad en ambos casos ya que el 86% de las polaridades están correctamente predecidas y la verosimilitud es del 92%. La diferencia entre los modelos surge del hecho que la mayor parte de las polaridades incoherentes están cerca de los planos nodales. La solución A da un régimen intermedio (*strike-slip*) con un factor de forma  $R_s = 0.4$ , y consecuentemente  $\sigma_1$  orientado casi N-S,  $\sigma_3$  orientado casi E-W y  $\sigma_2$  vertical. El modelo B corresponde a una compresión triaxial con un factor de forma  $R_s = -1.1$ , con la misma orientación N-S de  $\sigma_1$ , pero con  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  intercambiados.

No	FECHA	HORA	MAG	Z Km	LAT	LONG	N	REFERENCIAS
	11/03/69	18:18	4.0	5	42.7	0.7	10	Nicolas et al., 1990
	14/03/70	0:32	4.0	5?	42.52	1.70	15	Nicolas et al., 1990
	14/03/70	15:48	4.7	5?	42.52	1.68	25	Nicolas et al., 1990
	16/03/70	6:26	4.6	5?	42.54	1.71	21	Nicolas et al., 1990
	05/04/70	6:49	4.9	5?	42.47	1.66	17	Nicolas et al., 1990
	29/08/78	22:23	4.1	8	43.69	3.29	23	Nicolas et al., 1990
1	03/11/78	6:38	4.3	8	42.84	2.70	22	LDG
2	28/09/79	5:28	4.1	16	43.15	0.54	21	Nicolas et al., 1990
3	05/12/79	23:02	4.2	3	42.44	2.44	29	LDG
4	23/04/81	15:53	4.5	1	42.90	2.05	23	Gallart et al., 1982
5	23/12/82	14:48	4.1	6	43.00	3.81	31	Nicolas et al., 1990
	24/12/82	0:06	4.0	5	42.55	0.50	21	Nicolas et al., 1990
6	20/07/83	19:08	3.9	2	42.38	2.25	17	Gallart et al., 1985
7	26/09/84	4:54	4.4	5	42.32	2.17	22	SGC, 1985
8	24/08/87	18:43	4.2	7	40.95	1.57	18	SGC, 1988
9	20/02/88	16:38	3.6	1	42.36	1.46	26	LDG
10	16/03/88	4:33	3.8	8	42.34	2.20	41	LDG
11	06/01/89	19:33	4.9	11	42.99	0.17	44	LDG
12	05/08/90	21:32	3.7	0	42.27	1.09	18	SGC, 1991
13	15/12/91	11:50	4.2	12	40.98	2.06	30	SGC, 1992
14	19/03/92	18:53	4.2	2	42.23	2.06	39	SGC, 1992
	25/07/92	22:01	3.1	12	42.79	1.22	13	SGC, 1993
	24/08/92	22:23	2.8	0	42.27	2.32	13	SGC, 1993
	03/09/92	3:12	3.3	11	41.65	2.17	17	SGC, 1993
	02/10/92	23:06	3.2	4	42.43	1.86	13	SGC, 1993
	15/12/92	22:27	3.1	9	42.65	1.06	13	SGC, 1993
15	08/10/93	2:09	3.3	3	42.43	2.13	36	SGC, 1994 (composed mechanism)
16	26/09/94	5:38	4.2	10	41.41	2.55	35	SGC, 1995
17	15/05/95	15:37	4.6	14	40.84	1.52	30	SGC, 1996
18	18/02/96	1:45	5.2	8	42.79	2.54	82	SGC, 1997

**Tabla 1.** Características de los 30 terremotos considerados en el estudio. No: referencia de los sismos seleccionados para el proceso de inversión. Descripción de los parámetros epicentrales. N: número de polaridades existentes. Referencias.

En la figura 2 están representados los 18 mecanismos y los dos tensores de esfuerzos alternativos. De los 18 mecanismos, 10 están en los Pirineos, 4 en la parte nordeste de la zona de estudio y 4 en la parte sur del área costera. Dado que el número de sismo disponibles para cada zona es pequeño no es posible calcular un tensor de esfuerzos local para cada región. Los mecanismos resultantes de la inversión difieren ligeramente de los obtenidos previamente de forma individual (figura 1), siendo la tendencia general de incrementar el número de casos de *strike-slip*.



**Figura 2.** Tensores de esfuerzos regionales y mecanismos focales obtenidos en el proceso de inversión. Cuando se representan 2 mecanismos juntos, el de la derecha corresponde a la solución inversa del tensor de esfuerzos (nº 6, 10 y 11).

### ANÁLISIS MICROTTECTÓNICO

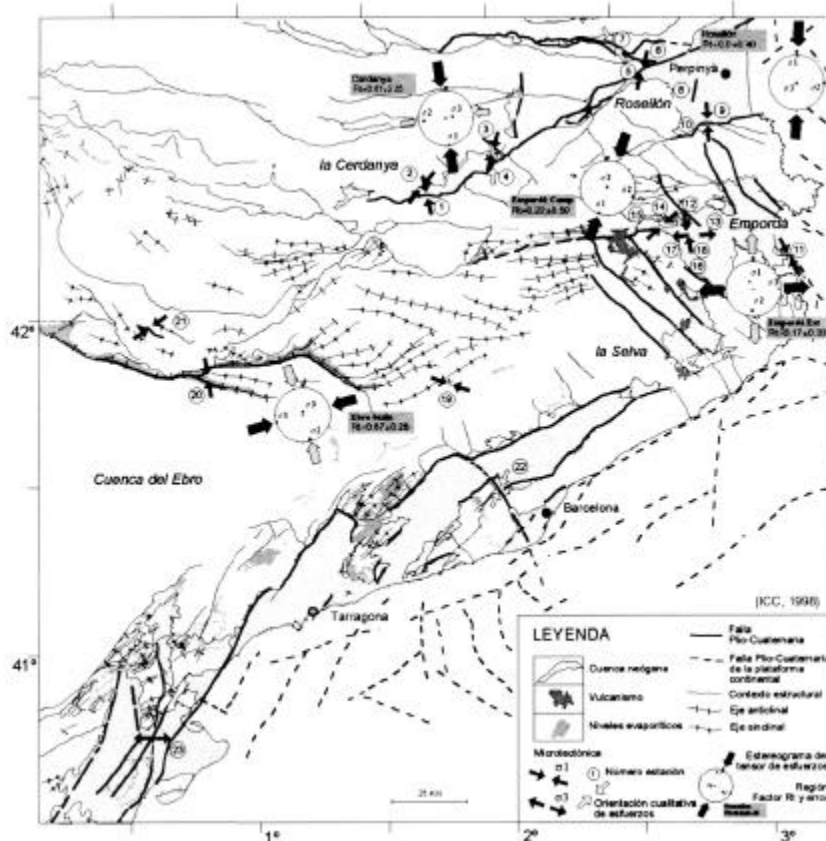
Se ha realizado el análisis de 23 estaciones microtectónicas en sedimentos post-miocénicos, cuyos datos corresponden a medias de estrías y del sentido de movimiento en los planos de

falla. La mayor parte de las estaciones están situadas en los márgenes de las fosas neógenas, en particular en la parte Este de los Pirineos (donde existe una interacción entre las estructuras pirenaicas, de orientación E-W, y las asociadas con el volcanismo neógeno y cuaternario, orientadas NW-SE), y algunas en la depresión del Ebro, a lo largo del frente de cabalgamiento sudpirenaico (figura 3).

A partir del análisis de una población de estrías se ha determinado el estado de esfuerzos usando el método básico de inversión (Etchecopar et al., 1981; Etchecopar 1984). En dicho proceso se ha tomado un gran número de tensores de partida escogiendo aleatoriamente los parámetros ( $\psi$ ,  $\theta$ ,  $\phi$ ,  $R_t$ ), siendo  $R_t$  el factor de forma tectónico

$$R_t = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3).$$

El estado de esfuerzos obtenido es relativamente homogéneo, caracterizado por un  $\sigma_1$  de orientación predominante N-S, que corresponde a un régimen compresivo o de *strike-slip*, excepto algunas variaciones locales  $R_t$  en la depresión del Ebro y un régimen extensivo obtenido en la fosa del Empordà (Goula et al., 1998).



**Figura 3.** Localización de las estaciones microtectónicas en el contexto neotectónico de la parte Este de los Pirineos representadas con el tensor de esfuerzos obtenido para cada estación y la regionalización deducida. La estimación cualitativa de la orientación de los ejes del tensor de esfuerzos corresponde a estaciones con un número de estrías insuficiente.

## Discusión

Se ha llevado a cabo una estimación del estado actual de esfuerzos del NE de la Península Ibérica, a partir de datos de mecanismos focales y de estrías observadas en planos de falla afectando depósitos plio-cuaternarios. El tensor de esfuerzos no ha podido ser determinada de manera completa. Por una parte, el tratamiento inverso del conjunto de polaridades correspondientes a 18 sismos da lugar a dos soluciones de calidad comparable para el conjunto de la región, indicativas de un régimen de cizalla y de un régimen compresivo. Por otro lado, la inversión de datos de microtectónica da como resultado un estado de esfuerzos regional de tipo compresivo, pero con incertidumbres importantes en algunas zonas, que hacen posible una solución de tipo cizalla.

Sin embargo, los resultados obtenidos a partir de las dos aproximaciones muestran una buena coherencia en la orientación aproximadamente N-S de la dirección del esfuerzo máximo horizontal, válido para el conjunto de la región. En consecuencia estos resultados indican que el estado de esfuerzos regional no ha variado substancialmente desde el Plio-Cuaternario hasta la actualidad.

## Referencias

- Banda, E. and Correig, A.M. (1984). "The catalan earthquake of February 2, 1428". *Engineering Geology*, 20: 89-97.
- Etchecopar, A.; Vasseur, G. et Daignières, M. (1981). "An inverse problem in microtectonic for the determination of stress tensors from fault striation analysis". *Journal of Structural Geology*, 3 (1): 51-65.
- Etchecopar, A. (1984). Etude des états de contraintes en tectonique cassante et simulations de déformations plastiques (approche mathématique). Thèse d'Etat, Montpellier.
- Gallart, J.; Olivera, C. y Correig, A. (1985). "Reconocimiento sísmico de la Cerdanya (Pirineos Orientales). Primeros resultados". *Rev. de Geofísica*, 41: 81-90.
- Gallart, J.; Olivera, C.; Daignières, M. et Hirn, A. (1982). Quelques données récentes sur la relation entre fractures crustales et séismes dans les Pyrénées orientales. *Bull. Soc. Géol. France*, (7), t. XXIV, n° 2: 293-298.
- Goula, X.; Olivera, C.; Fleta, J.; Grellet, B.; Lindo, R.; Rivera, L.A.; Cisternas, A. and Carbon, D. (1998). *Present and recent stress regime in the Eastern part of Pyrenees*. (en preparación).
- Nicolas, M.; Santoire, J.P. and Delpech, P.Y. (1990). "Intraplate seismicity: new seismotectonic data in Western Europe". *Tectonophysis*, 179: 27-53.

- Olivera, C.; Riera, A.; Lambert, J.; Banda, E. i Alexandre, P. (1994). Els terratrèmols de l'any 1373 al Pirineu: els efectes a Espanya i França. Generalitat de Catalunya, Servei Geològic de Catalunya, monografia n° 3, 220 pp.
- Olivera, C.; Riera-Melis, A.; Martínez, B. and Roca, A. (1994). "Revision of the 1427 earthquakes in the Eastern Pyrenees. Delimitation of the epicentral area and intensity assesment for the March 15 and May 15 events". In: Albini, P. and Moroni, A. (editors). *Historical Investigation of European Earthquakes*. CNR, Milan, 169-179.
- Olivera, C.; Susagna, T.; Roca, A. and Goula, X. (1992). "Seismicity of the Valencia Trough and Surrounding Areas". *Tectonophysis*, 203: 99-109.
- Rivera, L.A.; Cisternas, A. (1990). "Stress tensor and fault plane solutions for a population of earthquakes". *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 80 (3): 600-614.
- SGC (1985-1997). *Butlletí Sismològic*. Generalitat de Catalunya, Servei Geològic de Catalunya.