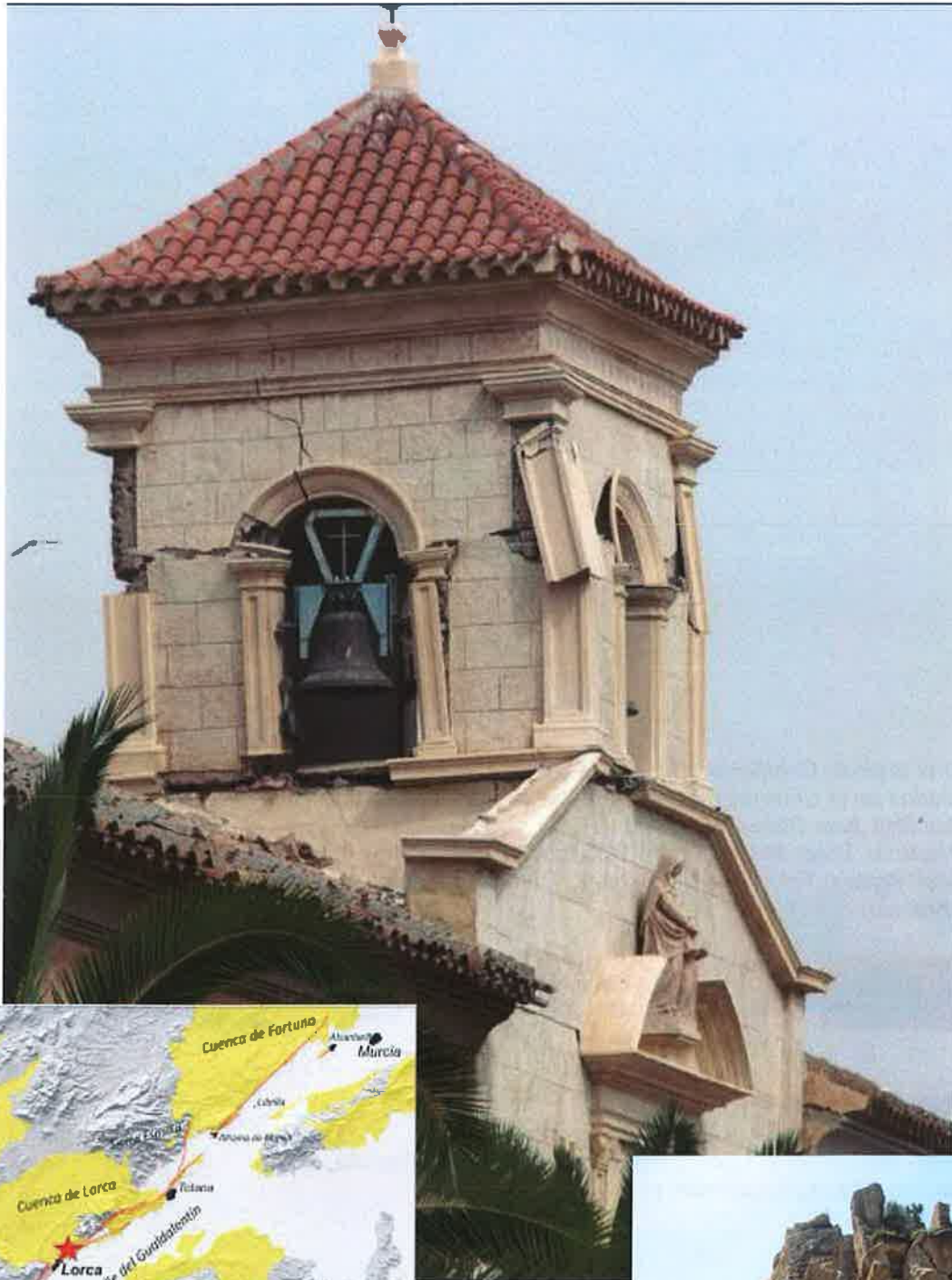




Fecha: 20 de mayo de 2011

# INFORME GEOLÓGICO PRELIMINAR DEL TERREMOTO DE LORCA DEL 11 DE MAYO DEL AÑO 2011, 5.1 M<sub>w</sub>



### CRÉDITOS:

Elaborado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Grupo de Tectónica Activa, Paleosismicidad y Riesgos Asociados de la Universidad Complutense de Madrid (UCM), Universidad Autónoma de Madrid (UAM) y la Universidad Rey Juan Carlos de Madrid (URJC).

José Jesús Martínez Díaz; Miguel Ángel Rodríguez-Pascua; Raúl Pérez López; Julián García Mayordomo; Jorge Luis Giner Robles; Fidel Martín-González; Martín Rodríguez Peces; Jose Antonio Álvarez Gómez; Juan Miguel Insua Arévalo.



### Registro de derechos de Autor:

Esta obra está bajo una licencia de *Creative Commons*

Reconocimiento - NoComercial - CompartirIgual (by-nc-sa) 3.0 España

(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/es/>)



Dépósito Legal: M-23569-2011

## Índice

<b>1. Motivación de este informe y agradecimientos</b>	
<i>José Jesús Martínez Díaz (UCM); Miguel Ángel Rodríguez Pascua (IGME); Raúl Pérez López (IGME); Julián García Mayordomo; Jorge Luis Giner Robles (UAM); Fidel Martín-González (URJC); Martín Rodríguez Peces (UCM); Jose Antonio Álvarez Gómez (IH Cantabria - UCM); Juan Miguel Insua Arévalo (UCM)</i> .....	4
<b>2. Caracterización sismotectónica de la serie sísmica de Lorca y análisis de la fuente geológica del terremoto</b>	
<i>José J. Martínez Díaz (UCM); José A. Álvarez Gómez</i> .....	5
2.1. <i>Caracterización sismotectónica de la serie sísmica de Lorca y sus eventos principales, MW 4.5 y MW 5.1 del 11/05/2011.</i>	
2.2. <i>Análisis de la fuente geológica del terremoto: ¿La falla de Alhama de Murcia?</i>	
<b>3. Reconocimiento geológico de la zona epicentral y de la Falla de Alhama de Murcia (FAM)</b>	
<i>J. J. Martínez-Díaz (UCM); F. Martín-González (URJC); R. Pérez López (IGME); M. A. Rodríguez-Pascua (IGME); J. García Mayordomo (IGME); M. Rodríguez Peces (UCM)</i> .....	15
<b>4. Inestabilidades del Terreno producidas por los terremotos de Lorca del 11 de Mayo de 2011</b>	
<i>Julián García Mayordomo (IGME); Martín Jesús Rodríguez Peces (UCM); Juan Miguel Insua Arévalo (UCM)</i> . .....	19
<b>5. Estudio de daños en edificaciones históricas mediante técnicas de análisis estructural geológico. Aplicaciones a la arqueosismología.</b>	
<i>Miguel Ángel Rodríguez Pascua (IGME); Jorge Luis Giner Robles (UAM); Raúl Pérez López (IGME); Fidel Martín-González (URJC)</i> .....	30
<b>6. Conclusiones preliminares</b>	
<i>José Jesús Martínez Díaz (UCM); Miguel Ángel Rodríguez Pascua (IGME); Raúl Pérez López (IGME); Julián García Mayordomo; Jorge Luis Giner Robles (UAM); Fidel Martín-González (URJC); Martín Rodríguez Peces (UCM); Jose Antonio Álvarez Gómez (IH Cantabria - UCM); Juan Miguel Insua Arévalo (UCM)</i> . .....	43
<b>7. Bibliografía principal</b> .....	44
<b>Anexo 1: Breve reseña sobre la Peligrosidad Sísmica en la Zona</b>	
<i>Julián García Mayordomo (IGME)</i> .....	45

## 1. Motivación de este informe y agradecimientos

Con motivo de la ocurrencia de un terremoto catastrófico el 11 de mayo de 2011 de magnitud Mw 5.1, a las 18:47 (hora local), presentamos a continuación un informe geológico preliminar de urgencia. Consta de una descripción de los primeros datos geológicos relacionados con la posible fuente geológica del terremoto, sus características sismotectónicas, y sus efectos superficiales, tanto los relacionados con los daños en edificaciones como con efectos geológicos superficiales. Pocas horas después del evento se desplazó a la zona un grupo de especialistas en geología de terremotos de varias instituciones: Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Grupo de Tectónica Activa, Paleosismicidad y Riesgos Asociados de la UCM (UCM), Universidad Autónoma de Madrid (UAM) y la Universidad Rey Juan Carlos de Madrid (URJC), con el fin de recabar todos aquellos datos, tanto de daños como de posibles efectos geológicos superficiales que por su carácter efímero pudieran desaparecer en pocos días tras el evento. Para la realización de este informe se han utilizado los datos obtenidos durante los cuatro días que duró esta campaña de emergencia, así como datos sísmicos del Instituto Geográfico Nacional y datos geológicos de trabajos previos. Los resultados e interpretaciones presentadas son preliminares y responden al análisis de las evidencias con que se cuenta a día de hoy durante la redacción de este informe.

Agradecemos a la Red Sísmica Nacional, del Instituto Geográfico Nacional, el habernos proporcionado los datos sísmicos que se presentan en este informe. En especial a su director Emilio Carreño, a Juan Rueda por poner a disposición del público los mecanismos focales de los eventos principales y a Resurrección Antón por proporcionarnos los parámetros detallados de los eventos.

En los próximos meses se presentará un informe completo de toda la información recopilada durante la campaña de campo de emergencia, con todo el tratamiento y análisis de los datos y las conclusiones extraídas de los mismos.

## 2. Caracterización sismotectónica de la serie sísmica de Lorca y análisis de la fuente geológica del terremoto

José J. Martínez Díaz (UCM)

José A. Álvarez Gómez (IH Cantabria - UCM)

### 2.1. Caracterización sismotectónica de la serie sísmica de Lorca y sus eventos principales, MW 4.5 y MW 5.1 del 11/05/2011.

Se presenta una caracterización inicial de la serie sísmica iniciada el 11 de Mayo de 2011 con los datos sísmicos del Instituto Geográfico Nacional hasta el 17 de Mayo de 2011. Además se realiza una interpretación preliminar de la relación con la tectónica de la zona.

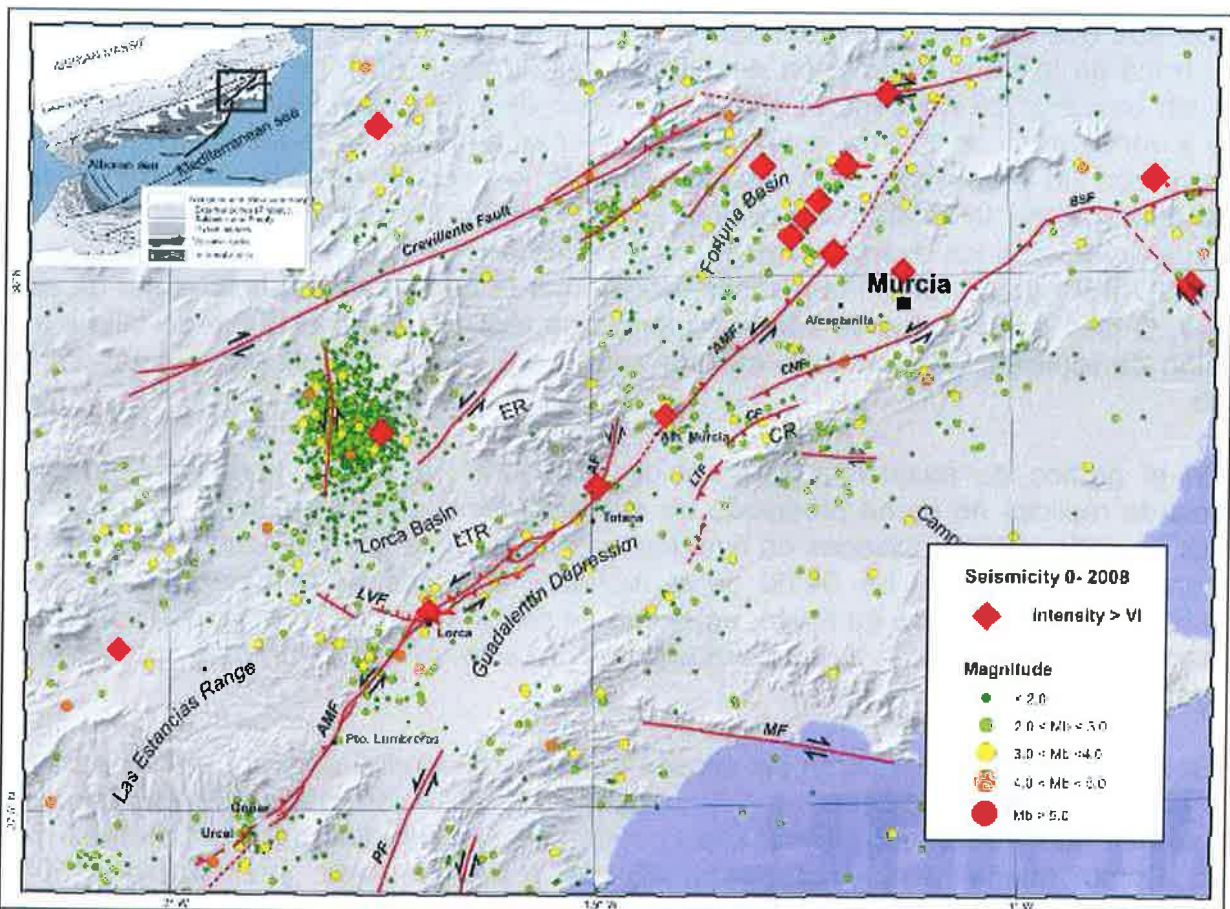


Figura 2.1: Mapa de la sismicidad ocurrida en la zona hasta el año 2008. Los rombos rojos indican la posición de terremotos históricos destructores. Los círculos muestran los epicentros de los sismos con el color en función de la magnitud del evento. Las líneas rojas muestran las trazas de las principales fallas activas.

La región de Murcia es conocida desde hace tiempo como una de las zonas con más actividad sísmica de España. Históricamente ha sufrido una buena cantidad de eventos dañinos (Figura 2.1), muchos de ellos asociados de alguna manera a la zona de Falla de Alhama de Murcia. Como puede observarse en la Figura 2.1 cerca de la ciudad de Lorca ya hay registrado un evento destructivo, así como en las cercanías de las localidades de Totana

o Alhama de Murcia. En época más reciente cabe destacar la serie sísmica de La Paca – Aviles – Zarcilla de Ramos; en el año 2005, con un evento de magnitud inferior al reciente de Lorca, pero también causando daños de importancia y con una serie de réplicas intensa (agrupación de eventos verdes al sur de la Falla de Crevillente y al norte de la Cuenca de Lorca (Lorca Basin).

El 11 de Mayo de 2011 a las 15:05 se produjo un evento sísmico con magnitud  $M_W$  4.5. Este evento es seguido por una pequeña serie de réplicas de magnitudes inferiores a  $m_{bLg}$  2.5 (6 temblores) y un evento sísmico mayor, de magnitud  $M_W$  5.1 a las 16:47. Tras este evento mayor se han producido hasta el día 17 de Mayo, 103 réplicas con magnitudes entre  $m_{bLg}$  0.4 y  $M_W$  3.9. Esta diferencia de uso de magnitud se debe a que a partir de la magnitud 3.5 se calculan los mecanismos focales de los eventos obteniéndose su magnitud momento ( $M_W$ ). En la Figura 2.2 se muestra el mapa de la distribución epicentral de los eventos así como su evolución temporal.

Los dos eventos principales se sitúan muy cerca el uno del otro, aproximadamente sobre la traza de la rama norte Falla de Alhama de Murcia (FAM). La mayor parte de las réplicas sin embargo se concentran hacia el sureste de esta zona. Esta diferencia podría deberse a varios motivos. Podría deberse a un error sistemático en la localización, que se subsanaría con un procesado de relocalización y la instalación de una red local auxiliar temporal para mejorar la localización de futuras réplicas. Podría deberse también a que las roturas que produjeron los eventos principales no ocurrieran en la FAM sino en una falla de dirección NO-SE y por lo tanto las réplicas representar la continuación hacia el sur de esta estructura. O bien podría deberse a la inexistencia de réplicas sobre el plano de falla y a la generación de réplicas fuera de falla en una zona de aumento de esfuerzos estáticos de Coulomb.

En el gráfico de evolución temporal de la Figura 2.2 puede apreciarse como la ocurrencia de réplicas no se ha producido de manera más o menos continua, o gradual, si no que se ha dado en agrupaciones de eventos, gran parte de estas teniendo lugar entre las 21:00 horas de la noche y las 06:00 de la mañana. De especial relevancia es la serie ocurrida la noche del 14 al 15 de mayo, en la que se dieron más de 30 réplicas. También es de destacar que las réplicas han disminuido enormemente su frecuencia en los días posteriores a la serie mencionada.

En la Figura 2.3 se muestran las elipses de error proporcionadas por el IGN para los eventos con magnitudes superiores a 1.5; por ser su localización más representativa. Las elipses se han sombreado de manera que la superposición de ellas da lugar a áreas más oscuras. Como puede verse todas las elipses presentan una orientación  $N150^\circ E$ , aproximadamente perpendicular a la FAM. Tienden a solaparse con mayor frecuencia cerca de la FAM, al sureste de esta, zona donde se produjo la principal réplica de  $M_W$  3.9 (Figura 1 - 11/05/2011 20:37). Esto muestra cómo la calidad de localización es mejor en dirección NE-SO que en la dirección NO-SE, donde hay un margen de error de localización de hasta más de 10 km en algunos casos.

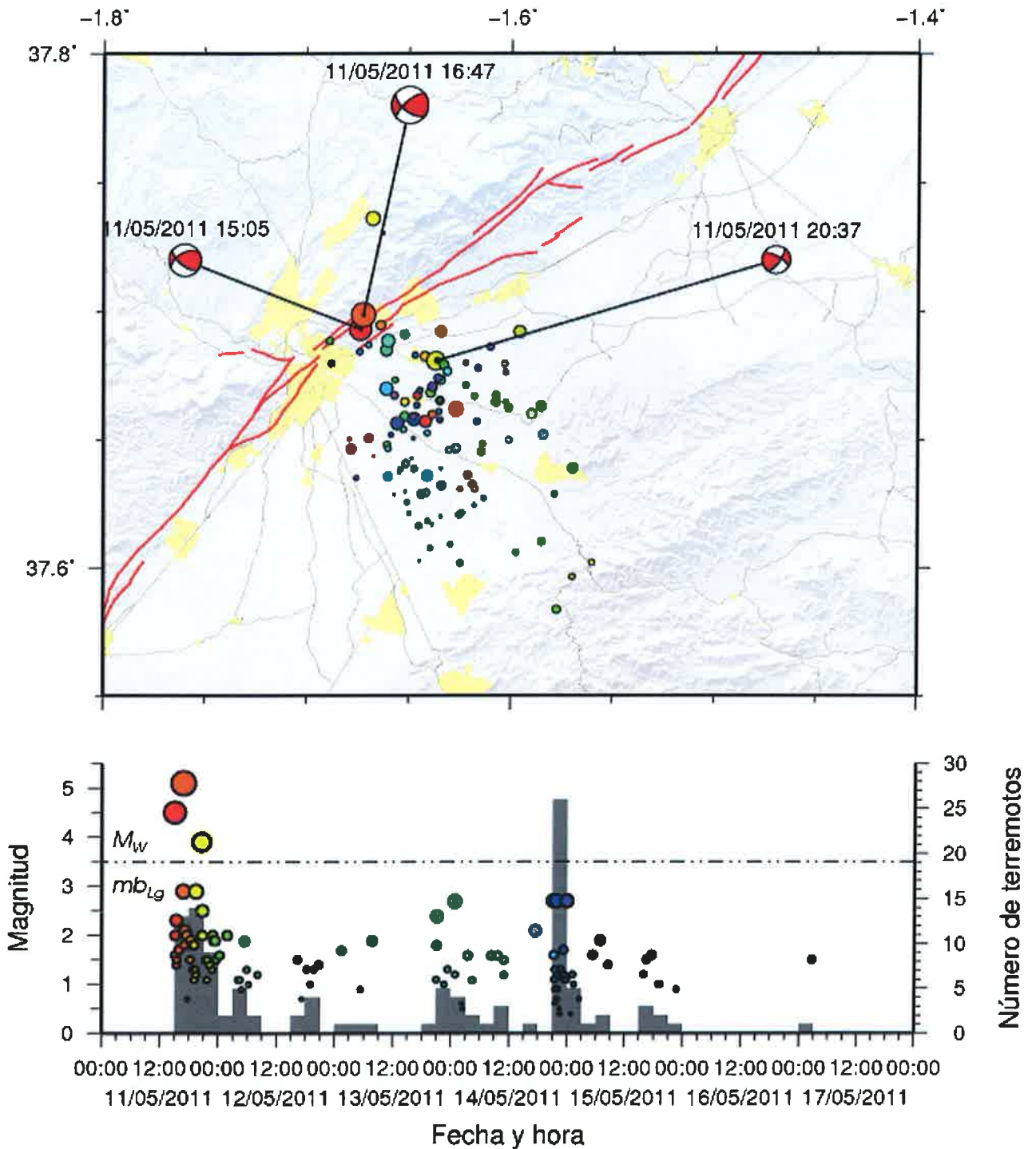


Figura 2.2. Mapa mostrando la serie sísmica. El tamaño de los círculos es proporcional a la magnitud del evento. El color es función de su posición en la serie como se muestra en la gráfica inferior de evolución temporal. Los mecanismos focales de los eventos principales muestran las características del movimiento de la rotura, en este caso fallas de desgarre con componente inversa. En línea roja se muestran las trazas de las principales estructuras activas. El gráfico inferior muestra la evolución temporal de la serie. Los círculos representan cada evento con el tamaño proporcional a la magnitud (eje Y de la izquierda), su color es función de su posición en la serie. Las barras grises muestran la cantidad de eventos en intervalos de 3 horas. Es destacable el pico de actividad de la noche del 14 al 15 de Mayo. La línea discontinua muestra el umbral a partir del cual las magnitudes están expresadas como  $M_w$  en lugar de como  $m_{bLg}$ . El número de eventos se refiere al diagrama de barras.

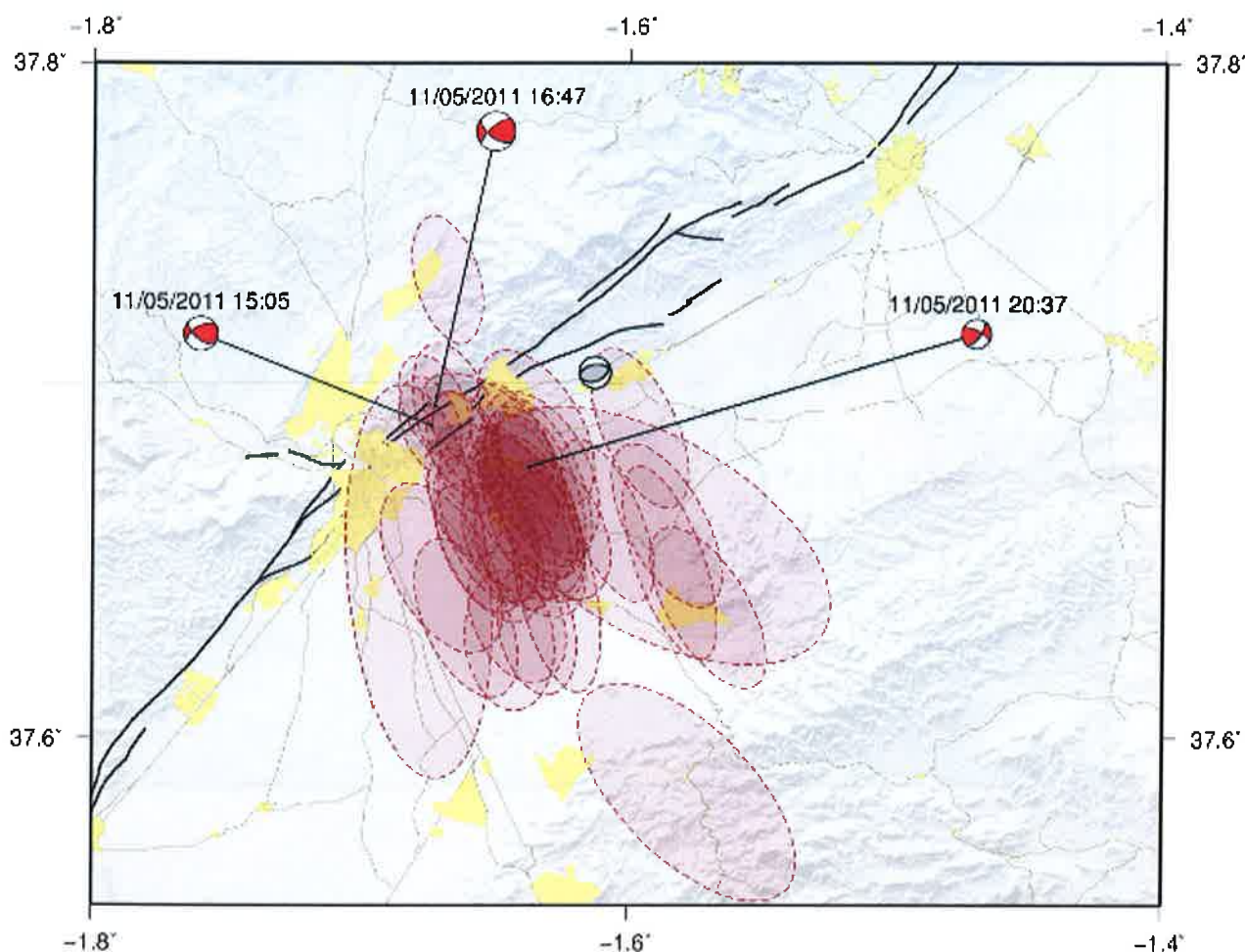


Figura 2.3. Mapa de elipses de error de la localización de los eventos de la serie sísmica con magnitud superior a  $m_{bLg}$  1.5. Los mecanismos focales sombreados en rojo corresponden a los tres eventos principales de la serie ocurridos el 11/05/2011, el mecanismo focal gris corresponde a un evento producido el 08/03/2006.

De manera preliminar se ha realizado también un análisis de transferencia de esfuerzos de Coulomb. Esta metodología analiza el grado de influencia del movimiento de una falla sobre las fallas del entorno. En función de la dirección de las fallas y de su posición con respecto a la falla generadora del terremoto, estas fallas del entorno pueden ver incrementada su probabilidad de rotura (de generación de un sismo) o bien disminuida. En las Figuras 2.4 y 2.5 se muestran estos análisis. Los colores rojos implican una variación positiva del esfuerzo de Coulomb, es decir, se ha aumentado la probabilidad de ocurrencia de un evento en estas áreas. Los colores azules por el contrario muestran zonas donde el esfuerzo ha disminuido de manera que es menor la probabilidad de ocurrencia de sismos. Sin embargo hay que tener en cuenta que estos cálculos se hacen sobre planos de falla determinados y que el aumento de esfuerzos en un tipo de planos, por ejemplo de dirección N-S, no excluye que en otros planos, por ejemplo de dirección E-O, pueda ocurrir un descenso de esfuerzos.

En la Figura 2.4 hemos calculado la variación de esfuerzos producida por el terremoto principal de magnitud  $M_w$  5.1 asumiendo que el plano responsable de la rotura es el NE-SO,



sobre planos de falla de la misma dirección y buzamiento, es decir, el tipo de plano de la FAM. En la figura 2.5 hemos hecho el mismo cálculo pero asumiendo el plano NO-SE como generador del terremoto. Independientemente de cual de los dos planos sea el responsable del evento la variación de esfuerzos de Coulomb sobre el plano de falla de la FAM es prácticamente el mismo. Existen dos lóbulos de aumento de esfuerzos sobre los extremos de los segmentos Puerto Lumbreras – Lorca (al sur) y Lorca – Totana (al norte) y otros dos lóbulos ortogonales. Sobre el lóbulo sur de estos últimos se está desarrollando principalmente la serie de réplicas. El que dos lóbulos de aumento de esfuerzos se produzcan sobre extremos de la FAM implica que la probabilidad de generación de un nuevo evento en esta falla ha aumentado. Estos resultados deberían ser refinados una vez que se conozca mejor el plano de rotura causante del evento.

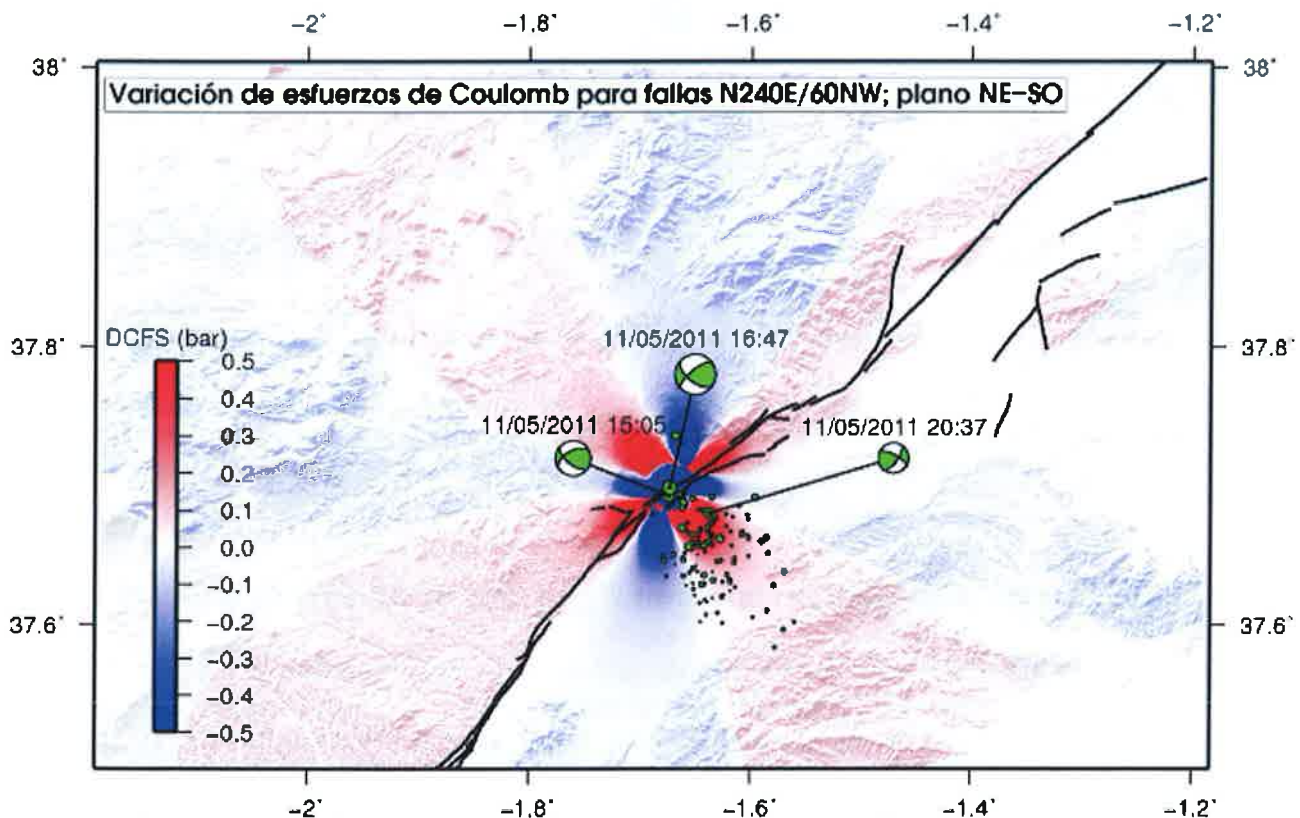


Figura 2.4: Mapa de variación de esfuerzos de Coulomb sobre planos NE-SO (tipo FAM) generados por el plano NE-SO del mecanismo focal del evento principal de la serie. Los colores indican la variación de esfuerzos (representada en la escala de colores). Los colores rojos indican un aumento de la probabilidad de generación de nuevos eventos.

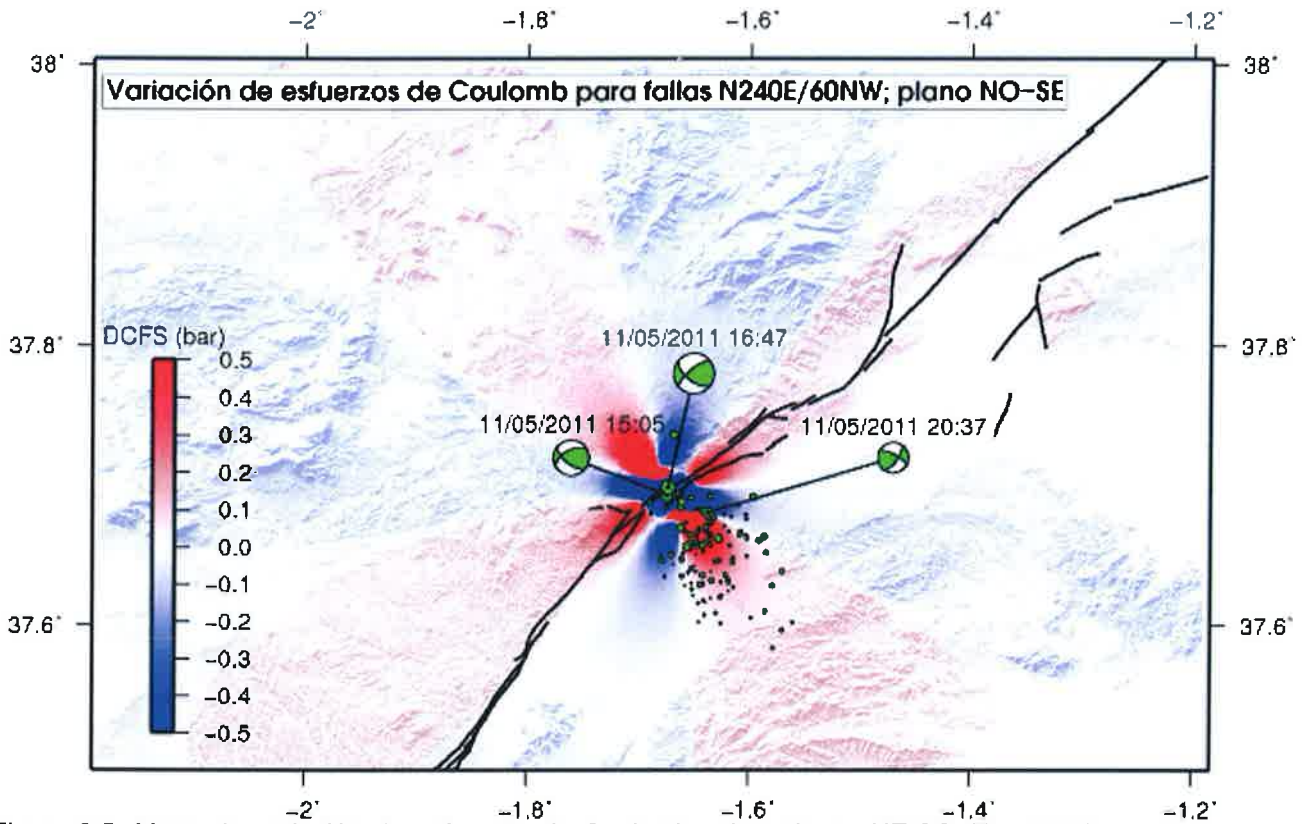


Figura 2.5: Mapa de variación de esfuerzos de Coulomb sobre planos NE-SO (tipo FAM) generados por el plano NO-SE del mecanismo focal del evento principal de la serie. Los colores indican la variación de esfuerzos (representada en la escala de colores). Los colores rojos indican un aumento de la probabilidad de generación de nuevos eventos.

## 2.2. Análisis de la fuente geológica del terremoto: ¿La falla de Alhama de Murcia?

La posición de los epicentros del terremoto principal de magnitud Mw 5.1 así como del terremoto de magnitud Mw 4.5 ocurrido aproximadamente 2 horas antes, coinciden espacialmente con la localización de la traza de la Falla de Alhama de Murcia (FAM) a unos 2 km al noreste de la ciudad de Lorca (Figura 2.6). La FAM fue descrita por primera vez por Bousquet et al. (1979) y ha sido objeto de numerosos trabajos de carácter estructural, neotectónico, sismotectónico y paleosísmico en los que se evidencia su carácter activo y su alto potencial sismogénico. Se trata de una falla de desgarre sinistral con una componente inversa que varía de unos segmentos a otros de la falla; la FAM se extiende a lo largo del borde NO de la depresión del Guadalentín, desde las proximidades de Alcantarilla hasta los alrededores de Góñar en Almería alcanzando una longitud total de al menos 85 kms. La falla se encuentra segmentada en varios tramos con direcciones algo distintas y estructura interna de la zona de cizalla que de complejidad variable (Figura 2.7).

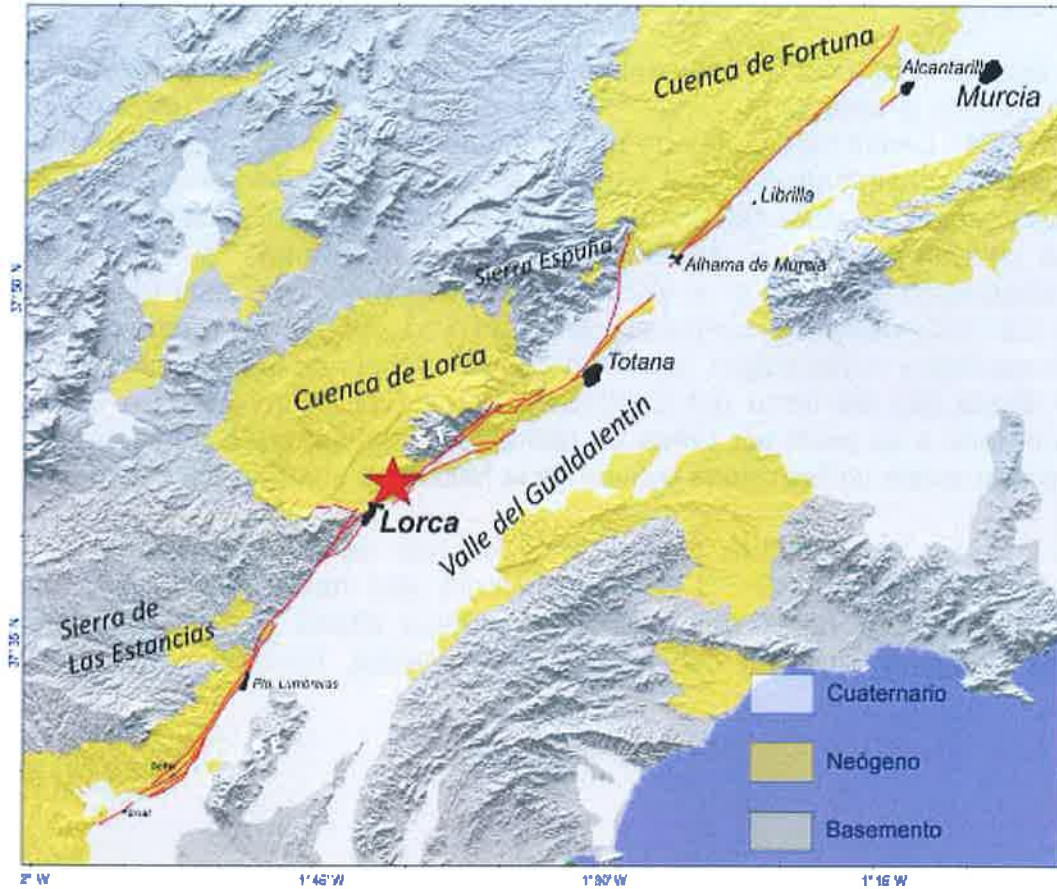


Figura 2.6: Cartografía de la traza de la Falla de Alhama de Murcia. La estrella indica la posición del epicentro del terremoto de magnitud Mw 5.1.

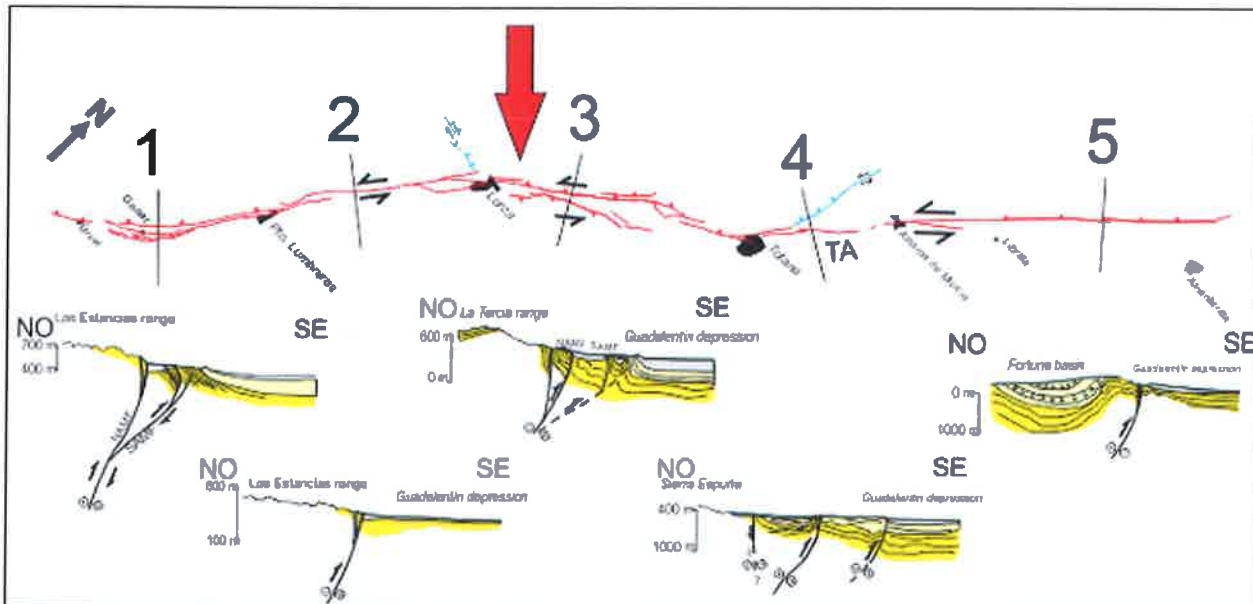


Figura 2.7: Estructura segmentada de la Falla de Alhama de Murcia tomada de Martínez-Díaz et al. (2010). La flecha roja marca la posición del epicentro del terremoto de 5.1 que se localiza en la terminación CO del segmento Lorca-Totana. En la parte inferior se muestra la estructura de la falla en profundidad interpretada a partir de datos geológicos de superficie en varias secciones a lo largo de la falla.

A una escala más local los epicentros de los dos terremotos de mayor magnitud parecen relacionados a una zona donde la FAM presenta una estructura algo compleja (Figura 2.8), con dos ramas principales de buzamientos opuestos en superficie: El Corredor Norte de Lorca con buzamiento hacia el norte, y el Corredor Sur de Lorca con buzamiento hacia el sur. Las elipses de error calculadas por el Instituto Geográfico Nacional indican que los epicentros podrían localizarse en cualquiera de las dos ramas, si bien parece más probable su localización asociada a al Corredor Norte. Este corredor está formado por una estructura de dúplex de desgarre compresivo formado a su vez por dos ramas paralelas muy próximas en superficie y cuyas trazas pasarían una por debajo de la casco urbano de Lorca y otra por el flanco NO del cerro del Castillo de Lorca (ver figura 2.9). En todo caso la estructura de la falla a su paso por Lorca es bastante compleja, sufre un ligero cambio de dirección y podrían existir varias ramas activas de la falla en el sustrato del casco urbano.

Por otra parte, la geometría y cinemática de uno de los dos planos de los dos mecanismos focales (plano NE-SO con buzamiento alto hacia el NO) presenta clara coincidencia con las dos fallas que forman el dúplex citado que además tienen un movimiento de desgarre sinistral con componente inversa, también coherente con los mecanismos.

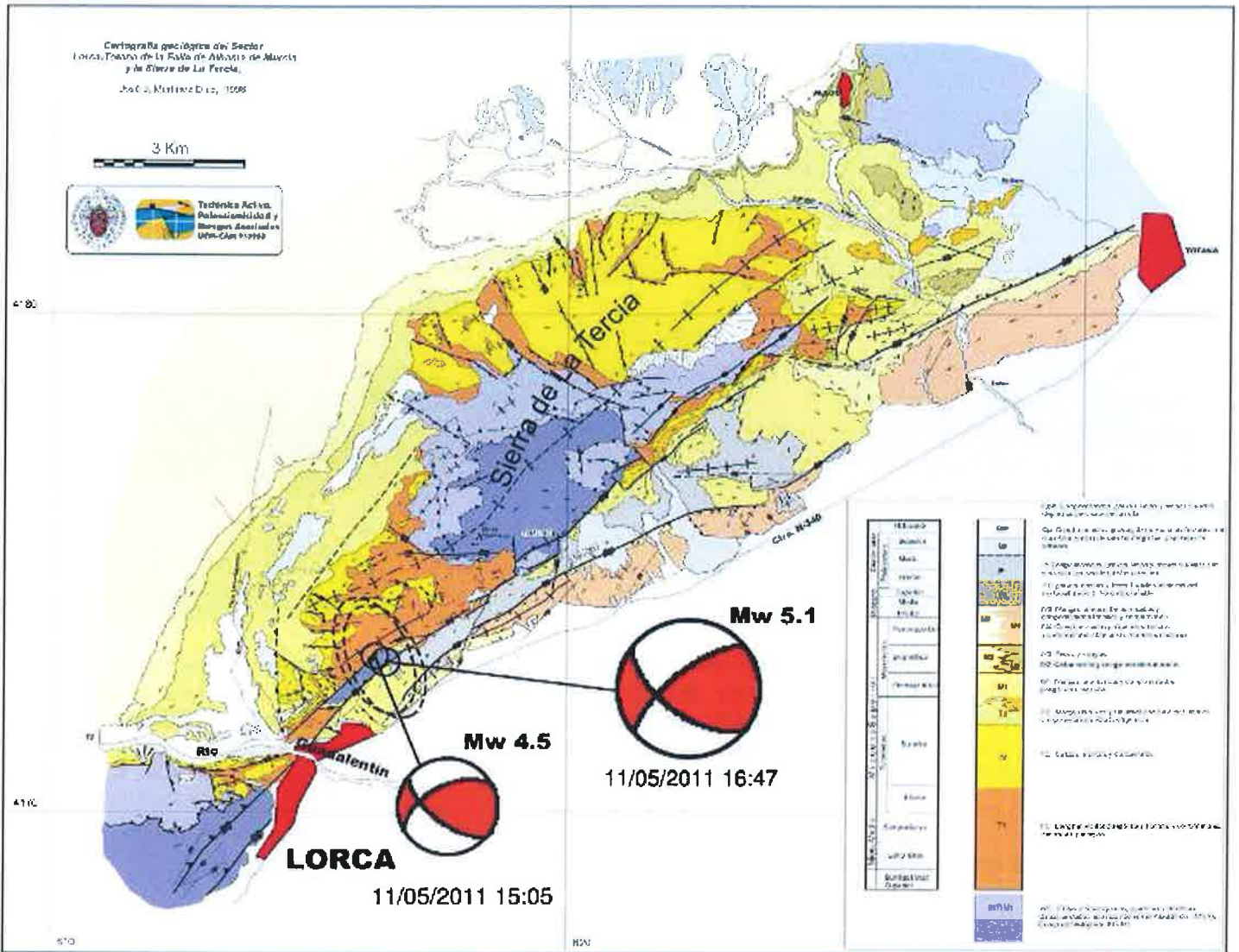


Figura 2.8: Mapa geológico del sector Lorca-Totana de la Falda de Alhama de Murcia sobre el que se han proyectado los epicentros de los dos terremotos mayores de la serie sísmica, sus elipses de error y los mecanismo focales calculados por el Instituto Geográfico Nacional. La cartografía geológica está tomada de Martínez-Díaz (1998).



Figura 2.9: Vista panorámica de la ciudad de Lorca tomada desde la zona del epicentro. Las trazas rojas muestran la posición de las trazas principales de la FAM a su paso por Lorca. Las dos fallas que se dirigen hacia el pueblo forman el dúplex de desgarre que forman un bloque de rocas de basamento metamórficas levantadas por un régimen transpresivo y rodeadas por rocas sedimentarias miocenas. Se han marcado como referencia varios puntos singulares de la ciudad.

### *Incertidumbres en la interpretación de la fuente*

Si bien el análisis de la geología de superficie y la posición de los epicentros apuntan claramente a la FAM como la responsable del terremoto destructivo, la posición de la mayoría de las réplicas situadas al sur de los epicentros en el interior del valle del Guadalentín no encajaría con esta interpretación. Una posible explicación sería que las réplicas responden a la reactivación de fallas menores situadas en el interior del valle alejadas de la FAM, de manera que aun no se han producido réplicas rodeando la zona de ruptura en la FAM. Otra posibilidad es la existencia de cierto error de localización debido a la baja magnitud de las réplicas. Una tercera posibilidad sería que la falla responsable no fuera la FAM sino una falla de dirección NO-SE que se internase en el valle. El número de observaciones y la calidad de las mismas a la hora de localizar los dos terremotos principales (reflejada en sus elipses de error) hace menos probable esta tercera posibilidad.

En todo caso se hace necesario realizar una relocalización de las réplicas y un afinado en la localización de los epicentros e hipocentros de los eventos principales para poder realizar una interpretación definitiva.

### **3. Reconocimiento geológico de la zona epicentral y de la Falla de Alhama de Murcia (FAM)**

*J. J. Martínez-Díaz (UCM)*

*F. Martín-González (URJC)*

*R. Pérez López (IGME)*

*M. A. Rodríguez-Pascua (IGME)*

*J. García Mayordomo (IGME)*

*M. Rodríguez Peces (UCM)*

La poca profundidad hipocentral (2 km) calculada por el Instituto Geográfico Nacional para el terremoto destructivo de magnitud Mw 5.1 que es coherente con la gran intensidad de los daños, eleva las posibilidades de que la ruptura a lo largo de la Falla de Alhama de Murcia hubiera alcanzado la superficie. Teniendo en cuenta la magnitud del terremoto y suponiendo una rotura muy superficial como la calculada por el IGN, el desplazamiento no habría podido superar unos pocos centímetros por ello se realizaron durante los tres días siguientes al sismo recorridos de campo por la zona epicentral y a lo largo de la traza de la FAM, prestando especial atención en estructuras y elementos artificiales como firmes carreteras, pistas prensadas o vallados de hormigón en los que pudieran quedar preservados pequeños desplazamientos centimétricos asociados a la ruptura en la falla. Se presenta en este trabajo una síntesis del reconocimiento de campo llevado a cabo.

En la ciudad de Lorca se ha recorrido la rambla del río Guadalentín a su paso por la ciudad que se encuentra encauzada por dos muros de mampostería de más de 6 m y un canal de cemento. Esta rambla se encuentra sobre el corredor sur de la Falla de Alhama, comportándose como un posible marcador (Fig. 3.1). La orientación de los muros es N113° E en el tramo más occidental y N140° E en el más oriental. El recorrido ha sido de 600m por ambos márgenes y no se ha encontrado desplazamiento asociado a ruptura con desplazamiento. Las numerosas grietas no presentan desplazamientos ni son penetrativas a todo lo largo del muro, ni se pueden continuar en el lecho de la rambla. Es de destacar que el muro norte (Fig. 3.2) presenta más grietas y desconchones que el muro sur que apenas presenta grietas.



*Fig. 3.1 muro de la rambla del río Guadalentín a su paso por Lorca, usado como marcador.*



*Fig. 3.2. Muro norte de la rambla del río Guadalentín.*



En la zona epicentral calculada por el IGN y situada a unos 2 km al NNE de Lorca se ha realizado un reconocimiento a lo largo de la Falla de Alhama tanto en el Corredor Sur como en el Corredor Norte. Se ha recorrido en el antiguo campo de tiro (37°41'54"N, 1°40'7"W) muy próximo al epicentro, se recorrió el muro de hormigón de una valla de dirección N 120° y longitud 160 m, que atraviesa completamente la falla sur del dúplex citado arriba como marcador del posible desplazamiento (Fig 3.3). El muro se encuentra intacto sin rotura asociada a un desplazamiento de la falla con cinemática sinistral. De igual manera se ha recorrido la zona epidentral en las coordenadas (37°41'42"N 1°40'49"W) al oeste del epicentro calculado por el IGN, recorriendo varias pistas de tierra, así como la rambla de Las Canales que cruzan las dos fallas de la estructura duplex. No se ha observado ningún rasgo evidente de rotura en superficie asociado a la rotura de la falla.



*Fig. 3.3. Muro de hormigón utilizado como marcador de posible ruptura a su paso por la traza de la falla.*

Finalmente, se ha realizado un recorrido bordeando la Autovía A-7 que al oeste del epicentro es atravesada por la FAM. Se han observados algunas grietas muy pequeñas y discontinuas de aspecto reciente pero sin continuación lateral, por lo que interpretamos que tampoco deben estar asociadas a ruptura superficial de la falla. También se realizaron observaciones en el túnel de la A-7 que atraviesa la FAM al NW de Lorca, sin que se hayan observado deformaciones en dicha infraestructura.

Por último y al cierre de la redacción de este informe, no parece que la baja magnitud del terremoto y tras los reconocimientos de campo de la traza de la Falla de Alhama de Murcia, se haya generado una rotura superficial asociada. Sin embargo, si tras una nueva relocalización de los epicentros e hipocentros de las réplicas, quedara definido como plano de falla el NO-SE y no la FAM, se debería reconocer nuevamente la zona de la Vega para descartar este otro plano como ruptura en superficie.

## **4. Inestabilidades del Terreno producidas por los terremotos de Lorca del 11 de Mayo de 2011**

*Julián García Mayordomo (IGME)  
Martín Jesús Rodríguez Peces (UCM)  
Juan Miguel Insua Arévalo (UCM)*

*Se presenta una síntesis del reconocimiento de campo efectuado desde la tarde del jueves 12 al mediodía del sábado 14 de Mayo de 2011.*

La serie sísmica del 11 de Mayo de 2011 ha generado una serie de inestabilidades de ladera en general de poca entidad y en un entorno muy localizado. Sin embargo, esta afirmación debe todavía contrastarse adecuadamente cuando se disponga de imágenes aéreas posteriores al terremoto principal.

Las inestabilidades del terreno producidas por el terremoto han sido básicamente: desprendimientos rocosos de diferente entidad (desde meros desconchones hasta desprendimientos con flujo de rocas), caída de bloques independientes y desmoronamientos de tramos de la muralla exterior del castillo de Lorca.

Algunas de las inestabilidades producidas por el terremoto pueden calificarse como significativas en el sentido de que han producido algún daño en edificación y cortes temporales de carreteras.

En particular, en la zona del espolón del castillo (extremo este del cerro del castillo), la caída de un bloque rocoso ha destrozado parte de un muro de cerramiento del patio de una vivienda. Así mismo, en la carretera de subida al castillo se han producido caídas de bloques que han dañado seriamente el pavimento de la carretera. Igual situación se ha dado en la carretera de Las Viñas, implicando el corte de la misma. Es de destacar que el mismo viernes 13 (es decir, algo más de 24 horas después del terremoto) ambas situaciones habían sido resueltas y se podía circular por ambas carreteras con relativa normalidad.

Merece destacarse que las medidas de estabilización del frente rocoso de la falda sur del cerro del Castillo de Lorca han funcionado adecuadamente, evitando lo que hubiera supuesto un agravamiento de los daños producidos por el terremoto, y quizá un mayor número de víctimas, en particular en las viviendas situadas justo debajo del acantilado. Una revisión ocular rápida sugiere el perfecto estado de las medidas, aunque por supuesto esta observación deberá confirmarse tras una revisión sistemática y pormenorizada.

Finalmente, es conveniente señalar dos trabajos previos muy importantes realizados por el IGME en Lorca:

- Estudio de Peligrosidad y Vulnerabilidad Sísmica en Lorca y su Término Municipal (1992).
- Estudio de Riesgos por Desprendimientos en el Cerro del Castillo de Lorca (Murcia) (1988)

A continuación se presenta un breve reportaje fotográfico de las inestabilidades citadas ordenadas por su localización general (la distribución de afloramientos se puede observar en la figura 4.1):

- Falda norte del cerro del castillo de Lorca (Figuras 4.2.0 y siguientes).
- Falda sur del cerro del castillo de Lorca (Figuras 2.3.0 y siguientes).
- Ladera norte de la carretera del pantano de Puentes (Figuras 4.4.0 y siguientes).
- Otras fotos (Figuras 4.5 en adelante).

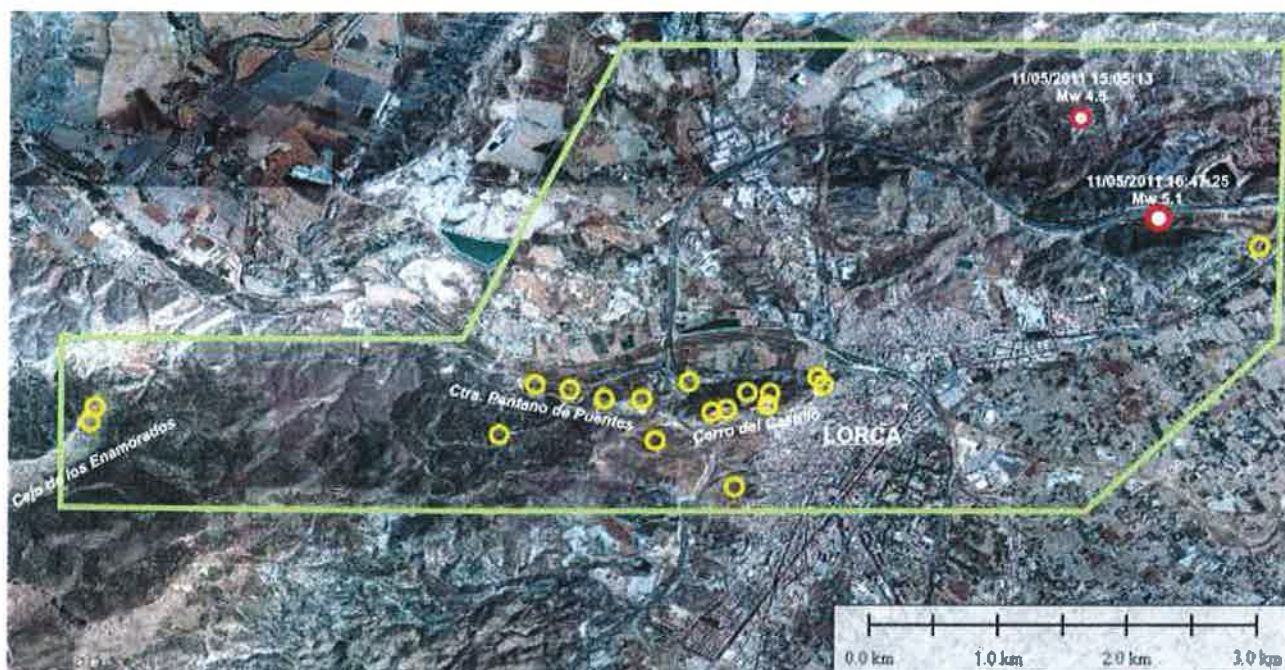
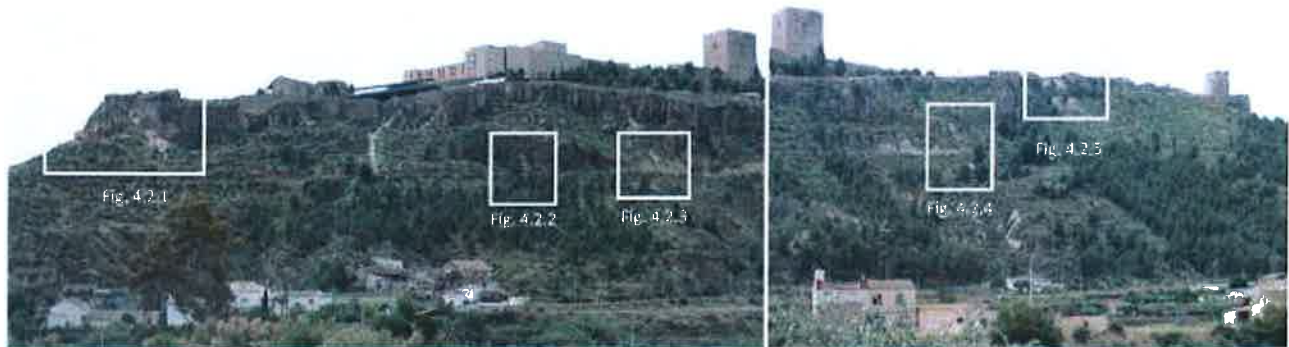


Figura 4.1: Localización de las principales inestabilidades de ladera identificadas en el reconocimiento de campo.



**Figura 4.2.0:** Vista general de la falda norte del cerro del castillo de Lorca. Se identifican las inestabilidades más importantes inducidas por los terremotos del 11 de mayo.



**Figura 4.2.1a:** Desmoronamiento parcial del espolón del cerro del Castillo (extremo más oriental del mismo). La caída de un bloque independizado provocó daños en una vivienda (ver Fig. 4.2.1c). La imagen de la derecha se corresponde con el mismo lugar y está tomada del estudio de riesgo sísmico de la ciudad de Lorca (IGME, 1992).



*Figura 4.2.1b: Vista del lateral S del espolón del cerro del castillo y del bloque que causó la rotura de un pequeño muro. En este tramo la carretera de descenso del castillo sufrió daños moderados en el pavimento. Se observa a la izquierda la terminación lateral de la malla de contención que estabiliza el frente norte del cerro.*



*Figura 4.2.1c: Impacto en el muro de bloques de hormigón del patio de una vivienda producido por la caída de una roca del espolón.*



*Figura 4.2.1d: Daños en la carretera de bajada del castillo causados por el rebote del bloque desprendido del espolón (foto 1.b).*



*Figura 4.2.1e: Vista de proximidad del desprendimiento del espolón (hacia el sur) y de las condiciones generales del macizo rocoso en este punto. En el extremo derecha se observa parte de la caída de un muro (ver foto 1.1f).*



*Figura 4.2.1f: Vista de detalle de la caída de parte del muro de contención antiguo. Se observa el relleno de intradós que permanece metaestable. Este tipo de inestabilidad también se ha producido en la falda sur del cerro del castillo (ver foto 2.1).*



*Figura 4.2.2: Pequeño desprendimiento con arrastre de un pino. Talud S de la carretera de subida al castillo.*



*Figura 4.2.4a: Desprendimiento de un bloque rocoso de dimensiones métricas que provocó daños importantes en la carretera (ver foto 1.4b).*



*Figura 4.2.3: Desprendimiento de rocas en la carretera de subida al castillo.*



*Figura 4.2.4b: Daños en el pavimento de la carretera de subida del castillo por la caída y rebote del bloque rocoso de la foto 1.4a.*

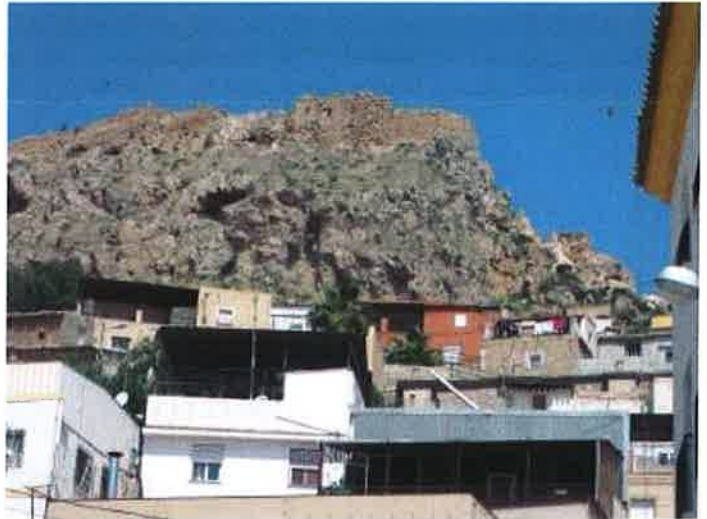


*Figura 4.2.5: Colapso de la muralla exterior del castillo de Lorca (falda N del cerro del Castillo).*





Fig. 4.3.1



**Figura 4.3.0: Vistas parciales de la falda norte del cerro del castillo de Lorca. El orden de las fotos es de oeste a este de izquierda a derecha. Solamente se han identificado dos pequeñas inestabilidades, una pequeña caída de rocas (foto núm. 2) y un desmoronamiento del muro exterior (foto núm. 3 y fig. 4.3.1). En la última foto se aprecia una visual del desprendimiento del espolón (fotos 4.2.1). Las medidas de estabilidad del macizo rocoso respondieron adecuadamente evitando mayores pérdidas y desgracias personales. Estas consisten en una malla de acero de doble diámetro cosida con bulones y una barrera dinámica. Las medidas fueron implantadas hace unos 3 años (com. pers. ayto.).**



*Figura 4.3.1: Desmoronamiento de un antiguo murete de contención adosado a la muralla exterior del castillo de Lorca en su falda N. Esta inestabilidad alertó a los habitantes de las viviendas situadas más abajo, preguntándonos in situ si era seguro volver a sus viviendas.*



Figura 4.4.1a: Desprendimientos en la parte alta de la ladera norte de la carretera al pantano de Puentes. La atribución de su origen al terremoto del 11 de mayo se presupone. El de más hacia el oeste (a la derecha en la primera foto) se corresponde en parte con una inestabilidad previa.



Figura 4.4.1b: Continuación de la carretera del pantano de Puentes hacia el oeste. A lo largo de la misma se han identificado numerosas inestabilidades, aunque de pequeña entidad. Destaca la caída de bloques con origen en la resta rocosa controlada por la falla de Las Viñas (señalado con una flecha). En la foto de la derecha se observa en detalle de los daños producidos por la caída de uno de estos bloques.



*Figura 4.4.2: Desprendimientos en el Cejo de los enamorados.*



*Figura 4.5: Cerro con antenas de comunicaciones situado en frente de la terminación oriental del cerro del castillo de Lorca. Se observan dos desprendimientos recientes que se atribuyen a los terremotos del 11 de mayo.*



*Figura 4.6: Vista de la ladera en un depósito de bombonas de gas en la carretera del pantano de Puentes. No se han identificado inestabilidades del terreno atribuibles a los terremotos del 11 de Mayo, aunque el desplome del murete de bloques de hormigón sí se atribuye a estos.*



*Figura 4.7: Balsa de riego localizada en las inmediaciones de los epicentros de los terremotos del 11 de mayo. No se observó ningún daño ni inestabilidades aparentes en el talud del fondo.*



*Figura 4.8: Caídas de roca en la pista que cruza la zona epicentral (foto cortesía de J.J. Martínez-Díaz).*



*Figura 4.9: Desprendimientos superficiales atribuidos a los terremotos de mayo en un talud de la carretera de servicio del canal Tajo-Segura.*

## **5. Estudio de daños en edificaciones históricas mediante técnicas de análisis estructural geológico. Aplicaciones a la arqueosismología.**

*Jorge Luis Giner Robles (UAM)*  
*Miguel Ángel Rodríguez Pascua (IGME)*  
*Raúl Pérez López (IGME)*  
*Fidel Martín-González (URJC)*

El terremoto de Lorca (SE España) del 11 de mayo del 2011, fue el causante de una elevada cantidad de daños e intensidad sísmica sobre todo el abanico de edificaciones presente en la ciudad de Lorca, incluyendo los edificios históricos de la ciudad. A lo largo del casco histórico se observan daños tanto en las edificaciones más antiguas como el pórtico de San Antonio, cuyo origen es una antigua muralla defensiva del siglo XIII, como en las diferentes iglesias y conventos repartidos en el centro cultural lorquino. A vista de pájaro se observa una concentración de daños en las torres elevadas, afectando principalmente a los arcos, tejadillos arbotantes, bolardos y algún cimborrio. También aparecen rotaciones en elementos decorativos sueltos como bolardos y obeliscos, como el obelisco de la pequeña plazuela anexa a la iglesia de San Francisco.

En principio y atendiendo a la experiencia en terremotos pasados en otras partes del mundo, un terremoto de magnitud 5.1 no debiera de haber generado una intensidad sísmica (VII EMS, [www.ign.es](http://www.ign.es)) tan elevada. Sin embargo, al ser una fuente somera cuyo hipocentro se localiza en los primeros kilómetros de la corteza y cuya propagación de la rotura se propagó desde la zona epicentral hacia el SW, podemos suponer que gran parte de la ruptura de la falla responsable del sismo (asumimos que es la FAM como estructura más probable), se produjo exactamente debajo del casco urbano. Por otro lado, los depósitos detríticos sobre los que se asienta la ciudad responden a materiales coluviales y aluviales junto al glacis de la sierra de la Tercia, así como depósitos de las ramblas del río Guadalentín y que constituyen depósitos con propiedades amplificadoras ante el paso de un tren de ondas sísmico.

Si bien es cierto que el terremoto de Lorca no ha producido colapsos generalizados en los edificios el casco urbano (solamente dos edificios colapsaron), durante las primeras horas de inspección sobre el terreno se han reconocido, clasificado y descrito más de cien efectos del terremoto sobre edificaciones y que corresponden a estructuras de deformación descritas en el trabajo de Giner-Robles et al., 2009 y 2011; Rodríguez-Pascua et al., 2011. Dichos autores los definen como Earthquake Archaeological Effects, siendo más comúnmente conocidos como EAE. El análisis de estas estructuras de deformación en edificios históricos surge como un estudio para poder reconocer y cuantificar daños de terremotos históricos en enclaves arqueológicos. En este sentido, los EAE describen y cuantifican deformaciones cosísmicas en yacimientos arqueológicos y edificios históricos. Según los trabajos anteriormente citados, se clasifican los EAEs en función (1) de la deformación permanente del sustrato o (2) de la deformación transitoria por el paso del rayo sísmico durante el terremoto.

El objetivo de este estudio es poder correlacionar los diferentes daños sufridos por los terremotos históricos de la ciudad de Lorca descritos mediante estructuras tipo EAEs, con los parámetros físicos del terremoto y la geología y sismotectónica a partir de los capítulos precedentes de este informe geológico. Además, en este trabajo preliminar, mostramos principalmente deformaciones asociadas a la anisotropía inherente del rayo sísmico. Con ello, es posible determinar la orientación de máximo acortamiento horizontal (ey) que sufrió la ciudad por deformación del sustrato al paso de un tren de ondas sísmicas durante los aproximadamente 5 segundos que duró la sacudida principal (Mw 5.1).

Durante el trabajo de campo, que se llevó a cabo en las 72 horas posteriores al sismo principal, se han reconocido principalmente deformaciones sobre los principales edificios singulares del casco viejo de Lorca, como iglesias, conventos y catedrales. La sistemática de estudio consistió en dividir el equipo en dos grupos de trabajo que accedieron a todos los edificios dañados con el objetivo de reconocer, clasificar y orientar los daños producidos dentro de una cuantificación y sistemática EAE (ver Rodríguez-Pascua et al. 2011). La figura 5.1 muestra la tabla de clasificación de los EAE según la propuesta de estos autores, con las claves usadas en la cartografía de localización de dichas deformaciones (Fig. 5.2).

Lo más relevante del estudio arqueosísmico aplicado a este terremoto instrumental, es que permite correlacionar los EAEs definidos a partir de terremotos históricos afectando a enclaves arqueológicos, con edificaciones patrimoniales y edificios modernos. Toda esta información además, se puede correlacionar con los parámetros sísmicos y geológicos que se muestran en este informe, tanto con la magnitud y mecanismo focal del terremotos, así como de la falla sismogénica y del efecto sitio debido a la geología del subsuelo lorquino.

a. EFECTOS COSÍSMICOS (DIRECTOS)		b. EFECTOS POSTSÍSMICOS (INDIRECTOS)	
EFECTOS GEOLÓGICOS	Efectos geológicos primarios	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Escarpes de falla</li> <li>- Levantamientos / hundimientos</li> </ul>	<b>EFECTOS de REGISTRO</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Incendios</li> <li>- Abandonos injustificados</li> <li>- Horizontes de destrucción o falta de registro estratigráfico en la secuencia arqueológica</li> <li>- Avenida súbita por roturas de presas artificiales o embalsamientos naturales</li> </ul>
	Efectos geológicos secundarios	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Licuaciones</li> <li>- Deslizamientos</li> <li>- Caída de bloques</li> <li>- Tsunamis/Seiches</li> <li>- Colapsos en cavidades</li> </ul>	
EFECTOS EN LA FÁBRICA DE LAS CONSTRUCCIONES	Por deformación permanente del sustrato	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pavimentos de argamasa plegados</li> <li>- Fracturas y plegues en enlosados regulares</li> <li>- Fracturas y plegues en enlosados irregulares</li> <li>- Impactos entre el enlosado</li> <li>- Contrafuertes desplazados y girados</li> <li>- Muros basculados</li> <li>- Muros plegados</li> <li>- Muros desplazados</li> </ul>	<b>EFECTOS CONSTRUCTIVOS</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Construcciones anti sísmicas</li> <li>- Reparación de construcciones</li> <li>- Elementos de reciclado constructivo anómalos</li> </ul>
	Deformaciones instantáneas a la vibración	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fracturas penetrativas en bloques de sillería</li> <li>- Fracturas conjugadas en muros de estuco o ladrillo</li> <li>- Columnas caídas y orientadas</li> <li>- Giros en bloques de sillería y columnas</li> <li>- Bloques de sillares desplazados</li> <li>- Arcoes desplazados</li> <li>- Escalones y líneas de bordillo plegadas</li> <li>- Muros colapsados (incluyendo restos humanos y objetos de valor bajo los escombros)</li> <li>- Bovedas colapsadas</li> <li>- Marcas de impacto</li> <li>- Roturas en esquinas de bloques</li> </ul>	

Figura 5.1 Tabla de clasificación de los Efectos Arqueológicos de Terremotos (Earthquake Archaeological Effects: EAE) (modificado de Rodríguez-Pascua et al. 2011): a) efectos cosísmicos, efectos producidos directamente por el evento sísmico (geológicos y en la fábrica de las construcciones) b) efectos postsísmicos, efectos indirectos producidos por las consecuencias del terremoto, ya sean visibles en el registro geoarqueológico (efectos de registro), o en las construcciones posteriores al evento sísmico (efectos constructivos).

La figura 5.2 muestra el mapa de la zona centro de Lorca identificando los principales EAEs reconocidos en este estudio. La leyenda de los EAEs corresponde a la misma que aparece en la figura 5.1. Las fichas describen los principales EAEs reconocidos y que han sido orientados según la metodología de Giner-Robles et al., 2009.



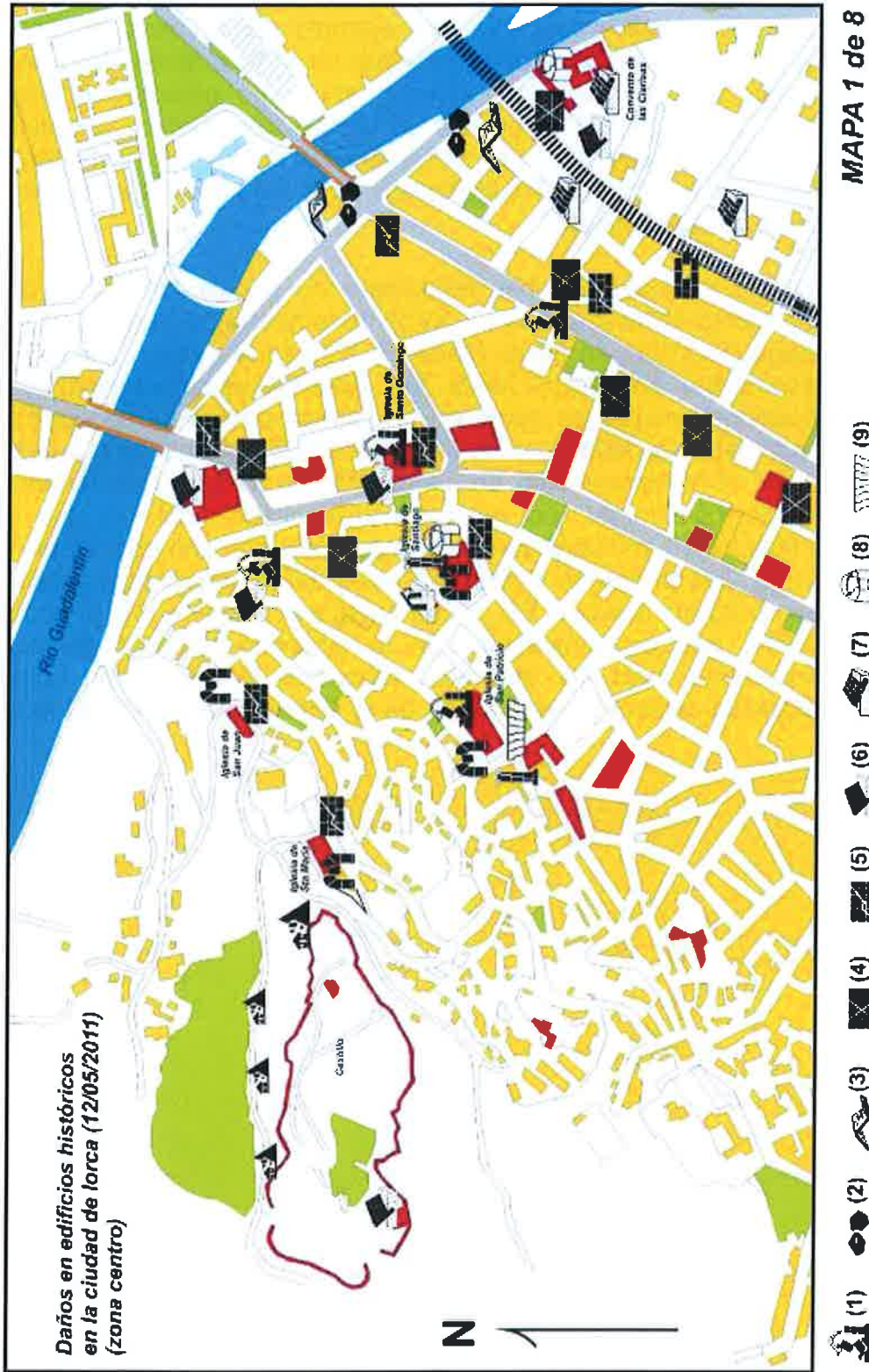


Figura 5.2 Mapa del centro urbano e histórico de Lorca con la distribución espacial de los principales EAAs clasificados durante el trabajo de campo posterior al terremoto. Ver figura 5.1 para la leyenda.

El terremoto de Lorca constituye un ejemplo ideal para el estudio de deformaciones asociadas al campo cercano durante un evento sísmico y que permite correlacionar el daño con la intensidad sísmica, así como parámetros propios del terremoto, magnitud, profundidad y geometría de la falla sismogénica. De este modo, podemos extrapolar dichos resultados del terremoto de Lorca del 11 de Mayo a los estudios de yacimientos y enclaves arqueológicos en los que la interpretación de un terremoto histórico de campo cercano.

En este informe preliminar se han recopilado los principales EAEs medidos y orientados en el Convento de las Clarisas (S. XVII), en la Iglesia de San Juan (S. XV), en la Iglesia de Santiago (S. XVIII), en Santa María (S. XV), en la Iglesia de San Francisco (S. XVII) y el Pórtico de San Antonio (S. XIII-S. XV). Además, se han descrito estructuras similares en edificaciones modernas como en el colapso orientado del edificio de las Viñas y en otras edificaciones modernas de ladrillo. También se incorporan dos nuevos EAEs observados en el reconocimiento de campo de las edificaciones lorquinas. Con toda esta información preliminar, se muestra el resultado final en una rosa de orientaciones. La figura 5.10. muestra el resultado principal con una orientación NW-SE, de media N150-160E. Interpretamos a partir de estos datos una direccionalidad en los daños NW-SE con un azimut desde el SE. Dicha orientación sugiere una dirección de  $e_y$  según los N150-160, que es compatible con la dirección regional del campo de esfuerzos, el mecanismo focal del terremoto (desgarre izquierdo con componente inversa) y la localización epicentral en la sierra de la Tercia con el error de localización asociado.



# Iglesia de Santiago

siglo XVIII

**Cordenadas**  
37° 40' 38,02''N  
01° 41' 53,26''O



**Esquema de daños en laterales 1 y 3**



Figura 5.3 Daños en la torre de la iglesia de Santiago.

# Almena del Porche de San Antonio

(torre de la antigua muralla)  
siglo XV

Cordenadas  $37^{\circ} 40' 44,88'' N$

$01^{\circ} 41' 51,69'' O$



Figura 5.4 Daños de las almenas del porche de San Antonio (Torre de la antigua muralla Almonacid).

# Convento de las Clarisas

siglo XVII

Coordenadas 37° 40' 33,83" N  
01° 41' 30,92" O

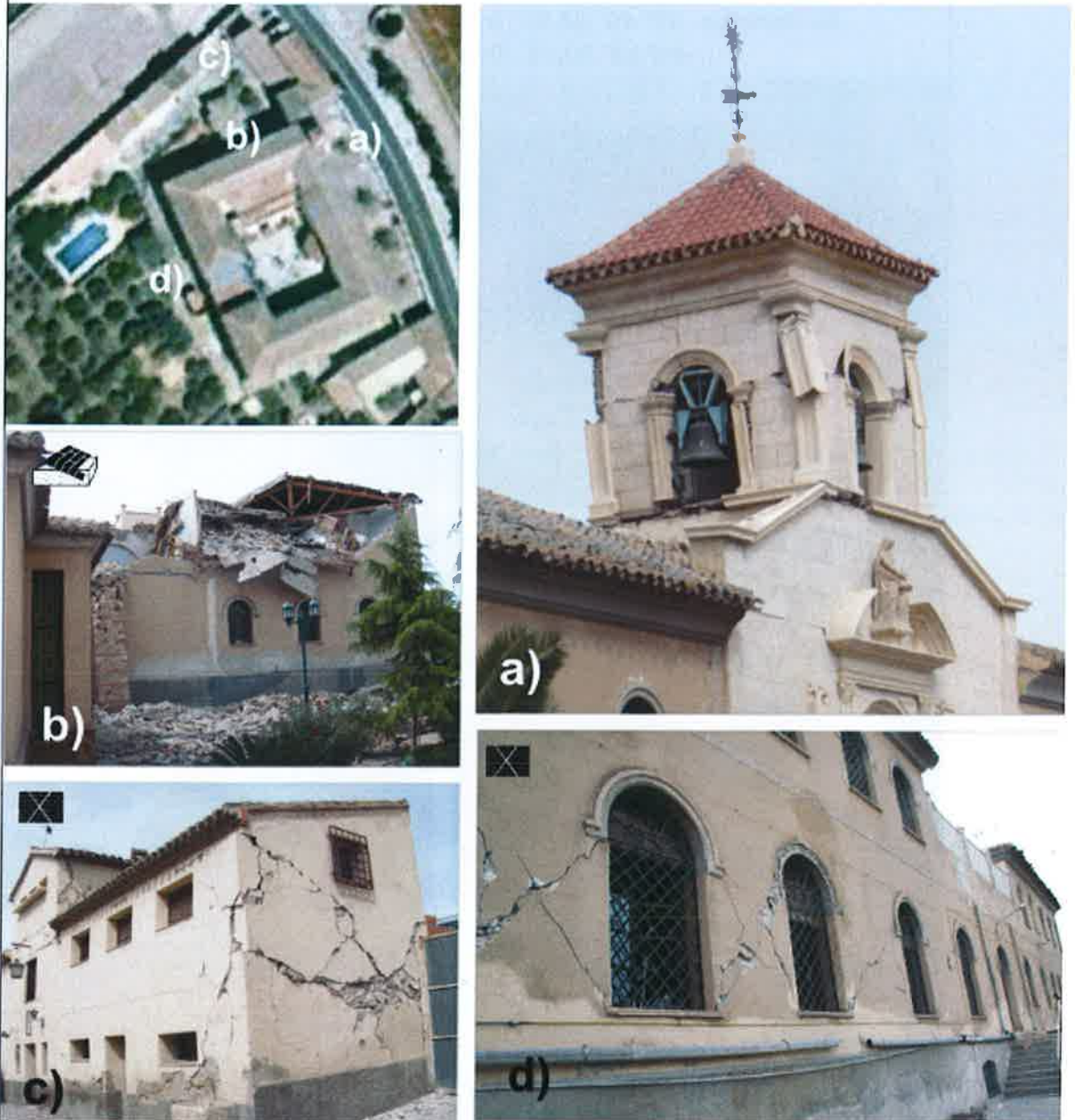


Figura 5.5 Daños en la torre y edificaciones principales del Convento de las Clarisas.

# Iglesia de San Francisco

siglo XVII

Cordenadas  $37^{\circ} 40' 22,15'' N$   
 $01^{\circ} 42' 00,16'' O$



Figura 5.6 Daños en la Iglesia de San Francisco.

# Iglesia de San Juan

siglo XV

Cordenadas

37° 40' 45,28''N

01° 41' 57,82''O



Figura 5.7 Daños en la torre de la Iglesia de San Juan.

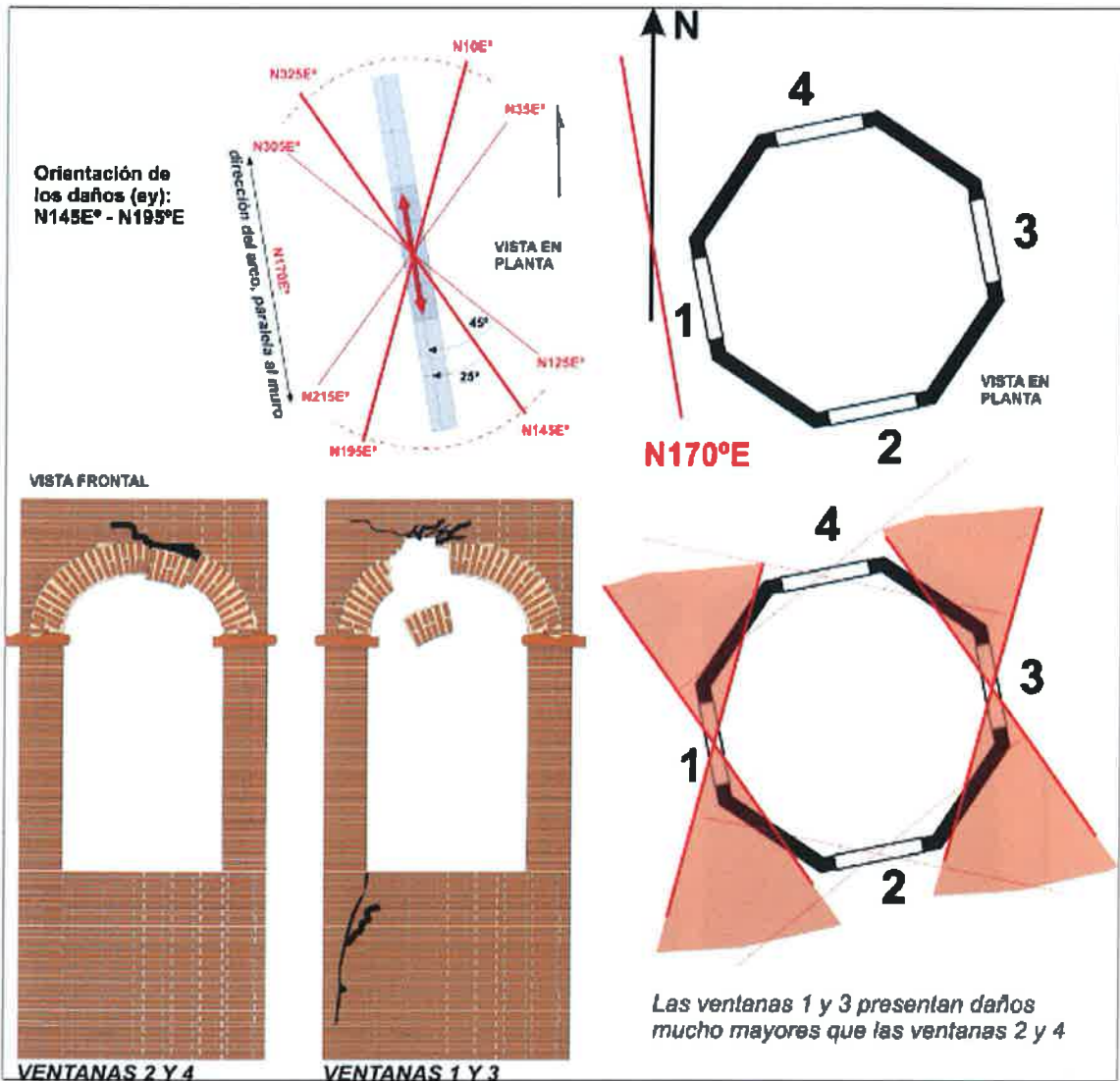


Figura 5.8 Ejemplo del análisis de las estructuras de deformación y determinación de la orientación de los daños (Iglesia de San Juan).





Figura 5.9 Compactación de sustratos y rellenos antrópicos asociados al Convento de las Clarisas. Nuevo EAE descrito.



Figura 5.10 Iglesia de Santa María. Clave de arco extruida al no soportar carga vertical.

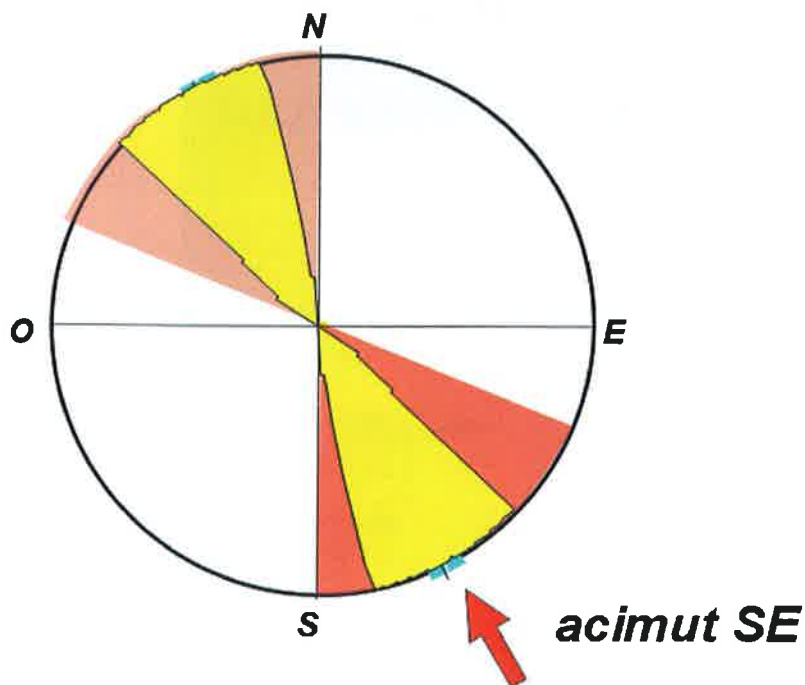


Figura 5.11 Rosa de orientaciones de la dirección media de los daños observados a partir del análisis de los EAEs inventariados. Resultados preliminares.

## 6. Conclusiones preliminares

*José Jesús Martínez Díaz (UCM); Miguel Ángel Rodríguez Pascua (IGME); Raúl Pérez López (IGME); Julián García Mayordomo; Jorge Luis Giner Robles (UAM); Fidel Martín-González (URJC); Martín Rodríguez Peces (UCM); Jose Antonio Álvarez Gómez (IH Cantabria - UCM); Juan Miguel Insua Arévalo (UCM).*

- La Falla de Alama-Murcia (FAM) es la falla con mayores evidencias de actividad cuaternaria en la zona, con evidencias paleosísmicas de ruptura superficial de terremotos de magnitud superior a 6.0 durante los últimos 1000 años, con surgencias termales asociadas a su traza superficial y sismicidad histórica destructiva localizada a lo largo de su traza durante los siglos XVII, XVIII y XIX. Es la falla con una mayor expresión geomorfológica en la zona y cuya traza es paralela a uno de los planos nodales del mecanismo focal obtenido para los terremotos del 11 de mayo de 2011. Su componente de movimiento inverso direccional (siniestro) es coherente con este mecanismo focal.
- La alta intensidad sufrida por la localidad de Lorca (intensidad VII en la escala EMS-98, datos IGN) asociada a una magnitud 5.1 Mw, puede deberse a una propagación del terremoto desde la Sierra de la Tercia (zona epicentral) hacia el SW. La falta de evidencias de vibración hacia el este del epicentro apoyan esta posible direccionalidad de la propagación.
- Esta direccionalidad apoyaría que la ruptura de la FAM se propagó desde la zona epicentral, atravesando la ciudad de Lorca. Esto, unido a la superficialidad del terremoto, explicaría la elevada intensidad sísmica y aceleraciones pico de 0,41 g (datos IGN) registradas en el acelerógrafo de la antigua cárcel de Lorca.
- El aumento de esfuerzos estáticos sobre los segmentos de la falla de Alhama generado por el terremoto principal pueden haber incrementado la probabilidad de ocurrencia de terremotos en estas áreas. Sin que se pueda precisar temporalmente su ocurrencia.
- La orientación de los ejes principales de las deformaciones extraídas del estudio arqueosísmico es NW-SE, coherente con el campo regional de esfuerzos tectónicos y el mecanismo focal del terremoto principal, así como con la posición epicentral.
- Las observaciones y datos arqueosismológicos (más de un centenar) apoyan un origen de la deformación asociado a un campo cercano, lo que implicaría que gran parte de la ruptura del terremoto principal se produjo debajo del casco histórico de la ciudad de Lorca.
- Con estos datos y su inclusión en la escala de intensidades geológicas de terremotos ESI-07, se podrá mejorar la información de terremotos históricos y su localización epicentral, mejorando el conocimiento del proceso sísmico en España.

## 7. Bibliografía principal

Giner-Robles, J.L. M.A. Rodríguez-Pascua, R. Pérez-López, P.G. Silva, T. Bardají, C. Grützner and K. Reicherter. (2009). Structural Analysis of Earthquake Archaeological Effects (EAE): Baelo Claudia Examples (Cádiz, South Spain), vol. 2, 130p. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid. DEP. LEG.: M-27206-2009.

Giner-Robles, J.L. P.G. Silva, R. Pérez-López, M.A. Rodríguez-Pascua, J. Lario, T. Bardají. (2011). Evaluación del daño sísmico en edificios históricos y yacimientos arqueológicos: aplicación al estudio del riesgo sísmico. Proyecto EDASI, Fundación MAPFRE. En prensa.

Martínez Díaz, J.J. (1998). Neotectónica y Tectónica Activa del Oeste de Murcia y sur de Almería (Cordillera Bética). Tesis Doctoral. Universidad Complutense Madrid. 470 pp.

Martínez Díaz, J.J., E. Masana, J.L. Hernández-Enrile Y P. Santanach (2001). Evidence for coseismic events of recurrent prehistoric deformation along the Alhama De Murcia Fault, Southeastern Spain. *Geológica Acta*, (antes *Acta Geológica Hispánica*). 36 (3-4): 315-327.

Martínez Díaz, J.J. y J.L. Hernández-Enrile (2001). Using travertine deformations to characterize paleoseismic activity on an active oblique-slip fault: the Alhama de Murcia Fault (Betic Cordillera-Spain). *Geologica Acta*, (antes *Acta Geológica Hispánica*) 36 (3-4): 297-313.

Martínez-Díaz, J. J. (2002). Stress field variety related to fault interaction in a reverse oblique-slip fault: the Alhama de Murcia Fault, Betic Cordillera, Spain. *Tectonophysics*, 356: 291-305.

Rodríguez-Pascua M.A.; R. Pérez-López; J.L. Giner-Robles; P.G. Silva; V.H. Garduño-Monroy and K. Reicherter. (2011). A Comprehensive Classification of Earthquake Archaeological Effects (EAE) in Archaeoseismology: application to ancient remains of Roman and Mesoamerican cultures. *Quaternary International*, doi:10.1016/j.quaint.2011.04.044.

Rodríguez-Pascua, M.A.; Pérez-López, R.; Giner-Robles, J.L.; Silva, P.G.; Garduño-Monroy, V.H.; Reicherter, K. (2010). Nueva tabla de clasificación de Efectos Arqueológicos de Terremotos. *Tierra y Tecnología*. 38: 59-65.

## ANEXO 1. Breve reseña sobre la Peligrosidad Sísmica en la Zona

*Julián García Mayordomo (IGME)*

La peligrosidad sísmica a la que está sujeta la ciudad de Lorca (y en general la Región de Murcia y Sureste de España) ha sido analizada en numerosas ocasiones y por procedimientos muy diferentes. No en vano los habitantes del municipio de Lorca y territorios aledaños son conscientes de que viven bajo este riesgo de la naturaleza.

Baste recordar que los últimos terremotos dañinos en España se han localizado en la Región de Murcia (terremotos de Mula en 1999, Bullas en 2002, La Paca en 2005, y ahora en Lorca en 2011). Asimismo, la historia de este territorio está marcada ocasionalmente por la ocurrencia de terremotos más o menos fuertes (ver: [www.ign.es/ign/layout/sismologiaEstadisticasCartografiaSismica.do](http://www.ign.es/ign/layout/sismologiaEstadisticasCartografiaSismica.do)). El propio municipio de Lorca ha encargado estudios de este tipo en diferentes ocasiones, como por ejemplo el estudio pionero realizado por el Instituto Geológico y Minero de España en 1992. Asimismo Protección Civil de la Región de Murcia cuenta con un Plan Especial de Protección Ante el Riesgo Sísmico moderno (puede consultarse en: [www.112rm.com/dgsce/planes/sismimur-home.php](http://www.112rm.com/dgsce/planes/sismimur-home.php)). A nivel legislativo estatal la construcción o reforma de edificaciones en el municipio de Lorca están sujetas al obligatorio cumplimiento de la normativa sismorresistente (Figura 1) ([www.fomento.es/MFOM/LANG\\_CASTELLANO/DIRECCIONES\\_GENERALES/INSTITUTO\\_GEOGRAFICO/Geofisica/sismologia/ingss/normageneral-pdf.htm](http://www.fomento.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/INSTITUTO_GEOGRAFICO/Geofisica/sismologia/ingss/normageneral-pdf.htm)).

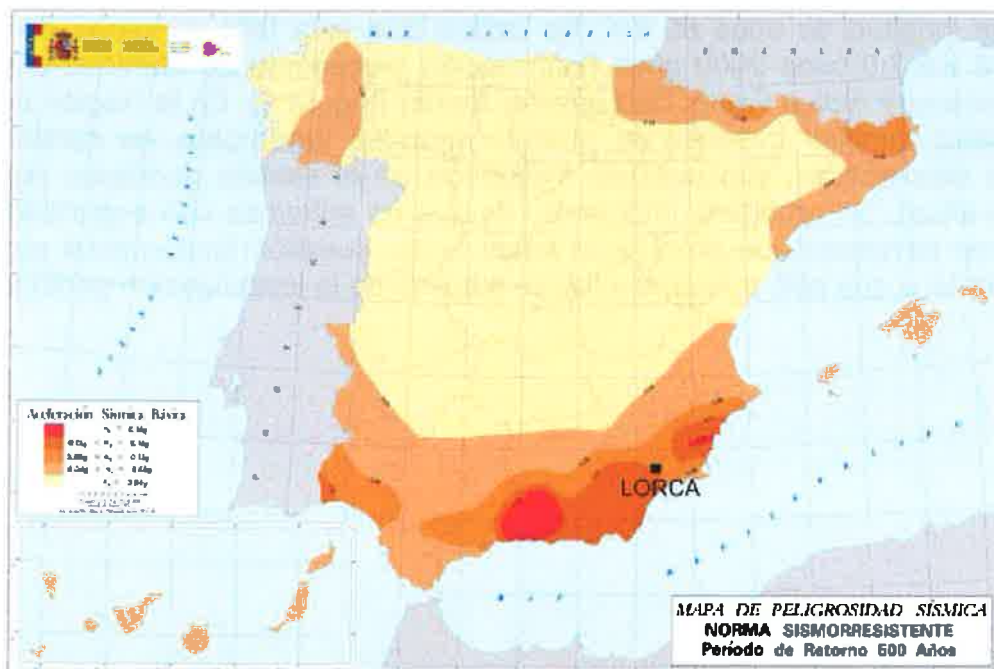
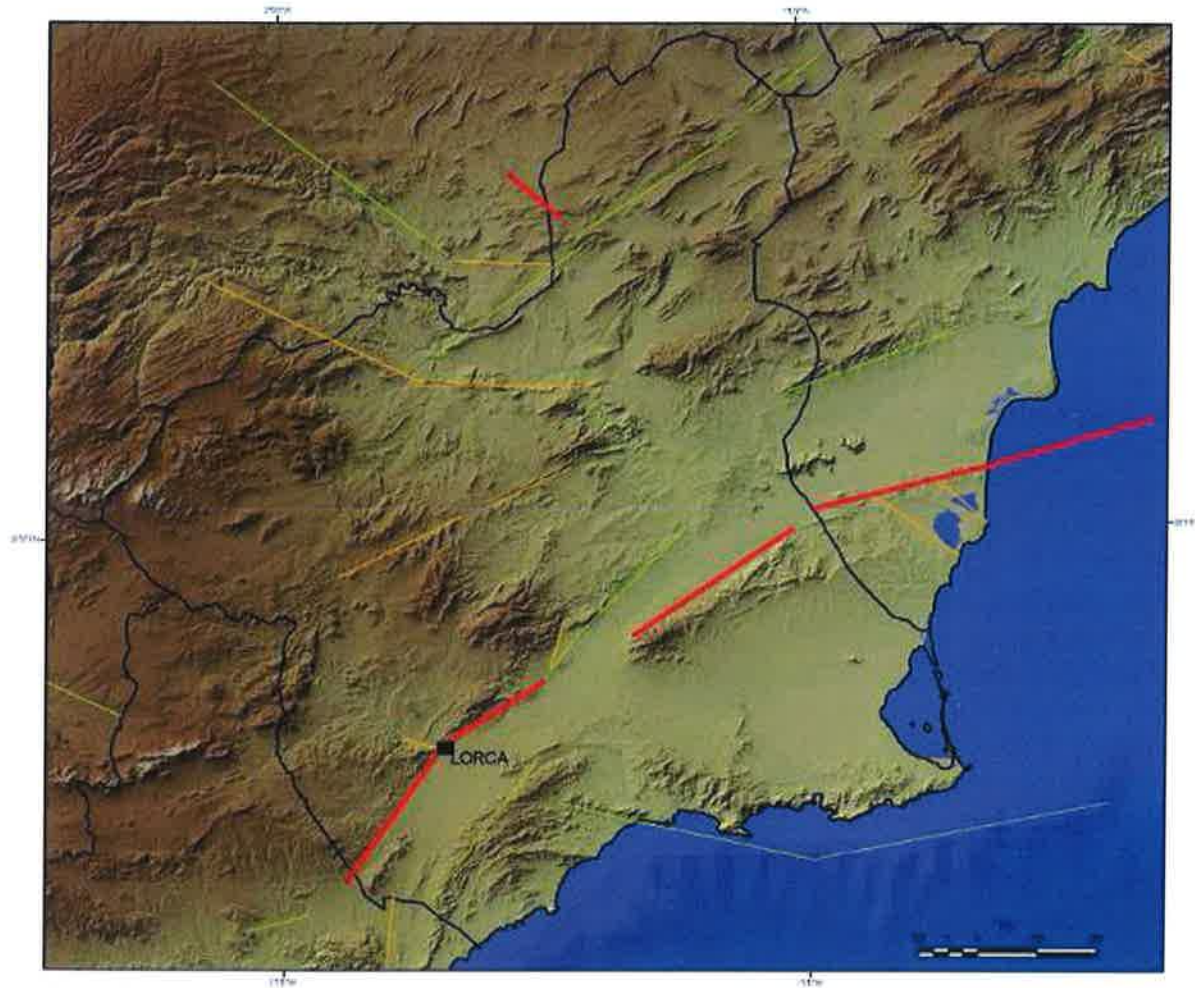


Figura 1: Localización de la ciudad de Lorca en el mapa de referencia de peligrosidad sísmica incluido en la norma de construcción sismorresistente española (NCSE-02).

En el contexto español Lorca se sitúa en una zona de peligrosidad moderada en relación con otros territorios como Granada y el sur de Alicante. Esto es debido a que el cálculo realizado para obtener este mapa está fuertemente controlado por el conocimiento que tenemos sobre terremotos que hayan ocurrido en el pasado histórico (de hecho los dos terremotos más destructivos en España en los últimos 100 años han tenido lugar en estas zonas: Arenas del Rey (1884) y Torrevieja (1829), respectivamente). Sin embargo, desde un punto de vista geológico, Lorca es un lugar sujeto a una alta peligrosidad sísmica.

La peligrosidad sísmica en la ciudad de Lorca está controlada por dos tipos básicos de fuentes capaces de producir terremotos dañinos (García-Mayordomo, Tesis doctoral UCM, 2005). Fallas conocidas o desconocidas que presumiblemente no producirán terremotos mayores de 5.5-6.0 y la Falla de Alhama de Murcia. Respecto al primer caso, un estudio científico reciente (Gaspar-Escribano et al., 2008, BEE:6,179-196) estima que el terremoto más probable en Lorca para un periodo de retorno de 500 años (el que se considera legalmente en la edificación de viviendas) tendría una magnitud del orden de 5.0, muy similar a la del terremoto principal del 11 de mayo. En este sentido podría considerarse que Lorca se ha puesto a prueba con el terremoto más grande que debieran soportar las edificaciones convencionales sin llegar al colapso. Sin embargo, todavía quedan por despejar muchos interrogantes, como el alto nivel de aceleración registrado (0.37g) en relación con la aceleración básica que provee la norma sismorresistente para la construcción (0.12g).

Respecto a la posibilidad de que ocurran terremotos realmente catastróficos en Lorca la fuente más probable es la propia Falla de Alhama de Murcia, que va limitando la serranía con la vega desde aproximadamente Puerto Lumbreras hasta prácticamente la ciudad de Murcia, con una longitud de unos 85 km. Se estima que esta falla es capaz de producir terremotos entre 6.5-7.0 cada 2000 años (información procedente de Martínez-Díaz et al., 2010, en la *Quaternary Active Faults Database of Iberia*) (Figura 2). En la Región de Murcia existen otras fallas también capaces de producir grandes terremotos, de consecuencias previsiblemente catastróficas, con una alta frecuencia en el sentido geológico (ej, 1 cada varios miles de años). Un problema importante es que no sabemos con seguridad cuando fue el último gran terremoto que produjeron estas fallas, cuestión fundamental para poder preveer el siguiente, y que sólo puede resolverse a través de la investigación geológica.



*Figura 2: Localización de las principales fallas activas en la Región de Murcia. En rojo se señalan las fallas capaces de producir grandes terremotos con relativa frecuencia (cada varios miles de años). Obsérvese que la Falla de Alhama de Murcia cruza la ciudad de Lorca. Fuente: Quaternary Active Faults Database of Iberia (proyecto en desarrollo por el IGME en colaboración con investigadores en Ciencias de la Tierra de universidades y centros españoles y portugueses).*

Los terremotos del 11 de Mayo de 2011 en Lorca van a suponer un fuerte un impulso a la investigación y a la innovación en todas las áreas involucradas en la prevención y mitigación del riesgo sísmico en España (geología, sismología, ingeniería, arquitectura, protección civil, educación ciudadana, legislación). Las lecciones que aprendamos hoy servirán para reducir pérdidas y salvar vidas el día de mañana.



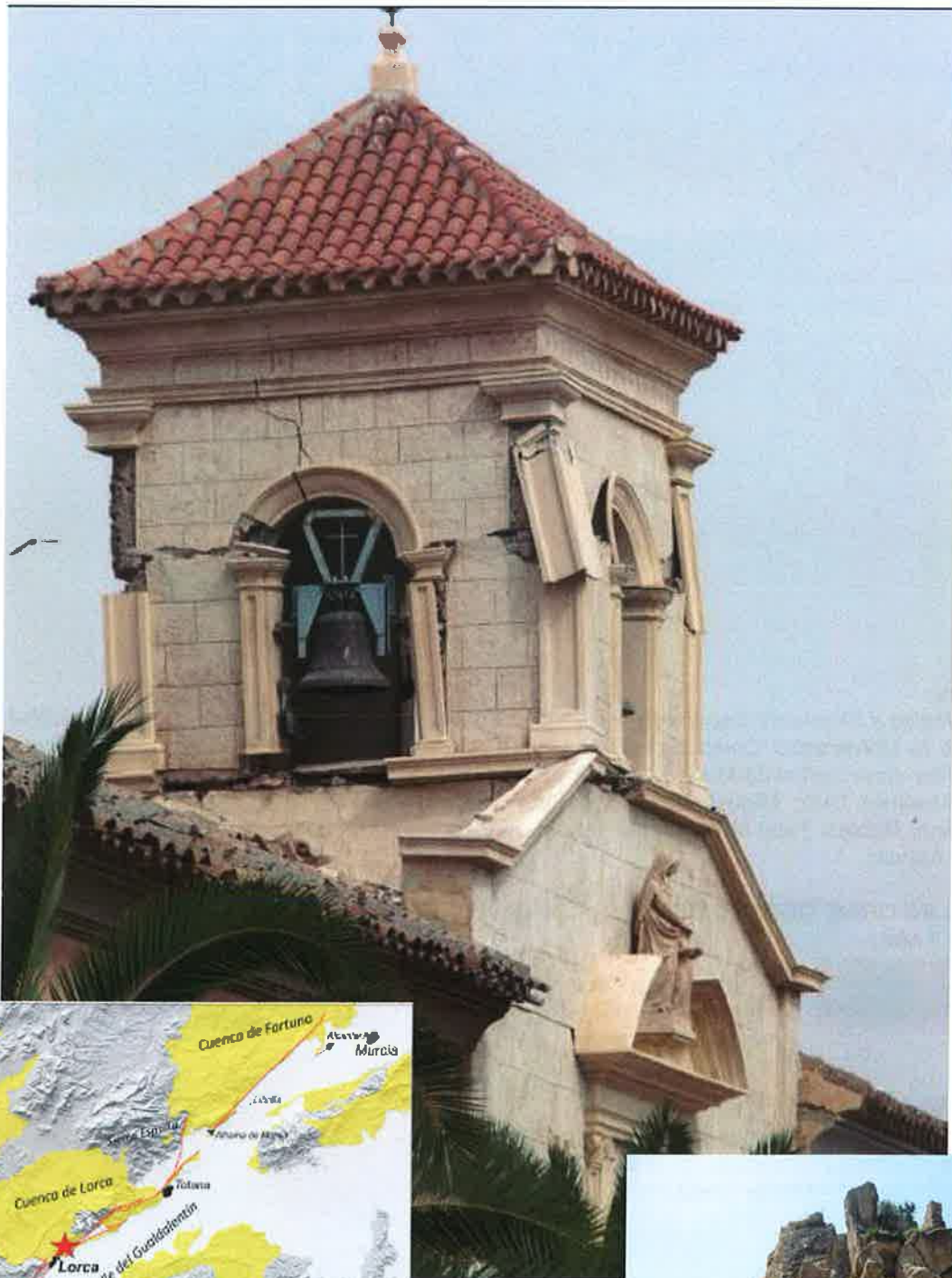




Date: 20th May, 2011

# GEOLOGICAL PRELIMINARY FIELD REPORT OF THE LORCA EARTHQUAKE (5.1 $M_w$ , 11<sup>TH</sup> MAY 2011)

*Translation from the original report in Spanish*



© The Authors:

*Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Spanish Group of Tectónica Activa, Paleosismicidad y Riesgos Asociados de la Universidad Complutense de Madrid (UCM), Universidad Autónoma de Madrid (UAM) and Universidad Rey Juan Carlos de Madrid (URJC).*

José Jesús Martínez Díaz; Miguel Ángel Rodríguez-Pascua; Raúl Pérez López; Julián García Mayordomo; Jorge Luis Giner Robles; Fidel Martín-González; Martín Rodríguez Peces; Jose Antonio Álvarez Gómez; Juan Miguel Insua Arévalo.

Original Title: *INFORME GEOLÓGICO PRELIMINAR DEL TERREMOTO DE LORCA DEL 11 DE MAYO DEL AÑO 2011, 5.1 Mw*



© The Authors:

This work is protected by a Creative Commons license  
Atribución-No\_Comercial-Compartir Igual CC BY-NC-SA  
(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/es/>)



## Index

<b>1. Motivation of this report and Acknowledgments</b>	
<i>José Jesús Martínez Díaz (UCM); Miguel Ángel Rodríguez Pascua (IGME); Raúl Pérez López (IGME); Julián García Mayordomo; Jorge Luis Giner Robles (UAM); Fidel Martín-González (URJC); Martín Rodríguez Peces (UCM); Jose Antonio Álvarez Gómez (IH Cantabria - UCM); Juan Miguel Insua Arévalo (UCM)</i> .....	4
<b>2. Seismotectonic characterization of the seismic series of Lorca and geological analysis of the earthquake source</b>	
<i>José J. Martínez Díaz (UCM); José A. Álvarez Góme</i> .....	5
2.1. <i>Seismotectonic characterization of the seismic series of Lorca and its major events, MW 4.5 and MW 5.1 of 11/05/2011.</i>	
2.2. <i>Analysis of the geological source of the earthquake: "The Alhama de Murcia Fault?".</i>	
<b>3. Geological searching of the epicentral area and the Alhama de Murcia Fault (FAM)</b>	
<i>J. J. Martínez-Díaz (UCM); F. Martín-González (URJC); R. Pérez López (IGME); M. A. Rodríguez-Pascua (IGME); J. García Mayordomo (IGME); M. Rodríguez Peces (UCM)</i> .....	15
<b>4. Ground Instabilities produced by the 11th May 2011 Lorca earthquakes</b>	
<i>Julián García Mayordomo (IGME); Martín Jesús Rodríguez Peces (UCM); Juan Miguel Insua Arévalo (UCM).</i> .....	19
<b>5. Study of the historical building damage within the village using structural geology techniques. Testing the Archaeoseismology methods</b>	
<i>Miguel Ángel Rodríguez Pascua (IGME); Jorge Luis Giner Robles (UAM); Raúl Pérez López (IGME); Fidel Martín-González (URJC)</i> .....	30
<b>6. Preliminary Conclusions</b>	
<i>José Jesús Martínez Díaz (UCM); Miguel Ángel Rodríguez Pascua (IGME); Raúl Pérez López (IGME); Julián García Mayordomo; Jorge Luis Giner Robles (UAM); Fidel Martín-González (URJC); Martín Rodríguez Peces (UCM); Jose Antonio Álvarez Gómez (IH Cantabria - UCM); Juan Miguel Insua Arévalo (UCM).</i> .....	43
<b>7. References</b> .....	44
<b>ANEXO 1. Brief outline on the seismic hazard in the area</b>	
<i>Julián García Mayordomo (IGME)</i> .....	45

## 1. Motivation of this report and Acknowledgments

On the occasion of the occurrence of a catastrophic low-sized earthquake in Lorca (Mw 5.1) (Southeast Spain) on May 11, 2011 at 18:47 (local time), we present a preliminary geological quick report. This report includes a description of the first geological data related to the possible geologic source of the earthquake, the seismotectonic characteristics of the seismic series, and the earthquake effects, related to the damage of buildings and the surface geological effects. A few hours after the event, a group of specialists in earthquake geology from different institutions: Geological Survey of Spain (IGME), Group of Active Tectonics, Paleoseismicity and related risk (UCM), Universidad Autónoma de Madrid (UAM) and the Universidad Rey Juan Carlos de Madrid (URJC), travelled to the epicentral area in order to compile all available field data related with ground effects associated with rupture and shaking, and damage of buildings as well. Besides, we have used instrumental data recorded from the IGN (Instituto Geográfico Nacional) and geological data from previous studies. The results and interpretations presented here are preliminary and they respond to the analysis of the preliminary evidence.

We thank the National Seismic Network (*Instituto Geográfico Nacional*), for providing us the instrumental seismic data presented in this report, especially to Emilio Carreño and Juan Rueda for the focal mechanism solutions of the major events, and to Resurrección Anton for providing the detailed parameters of the events.

## 2. Seismotectonic characterization of the seismic series of Lorca and geological analysis of the earthquake source.

José J. Martínez Díaz (UCM)

José A. Álvarez Gómez (IH Cantabria – UCM)

### 2.1. Seismotectonic characterization of the seismic series of Lorca and its major events, $M_w$ 4.5 and $M_w$ 5.1 of 11/05/2011.

We present an initial characterization of the seismic series began on May 11, 2011 to the May 17, 2011; with the seismic data of the National Geographical Institute. A preliminary interpretation of the relationship with the tectonics of the area is done.

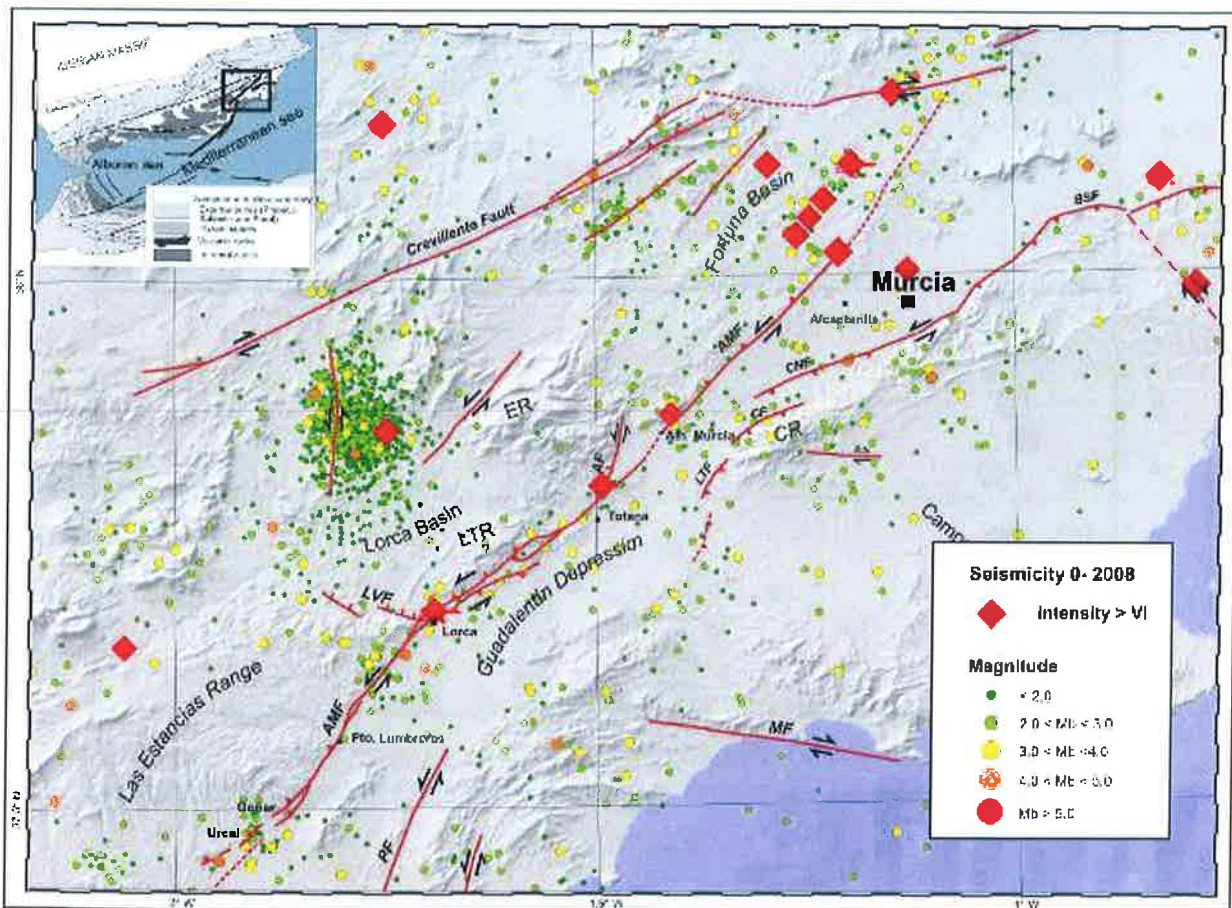


Figure 2.1: Map of seismicity in the area until the year 2008. The red diamonds indicate the position of destructive historical earthquakes. The circles show the epicenters of earthquakes with the color depending on the magnitude of the event. The red lines show the traces of major active faults.

Map of seismicity in the area until the year 2008. The red diamonds indicate the position of destructive historical earthquakes. The circles show the epicenters of earthquakes with the colour depending on the magnitude of the event. The red lines show the traces of major active faults.

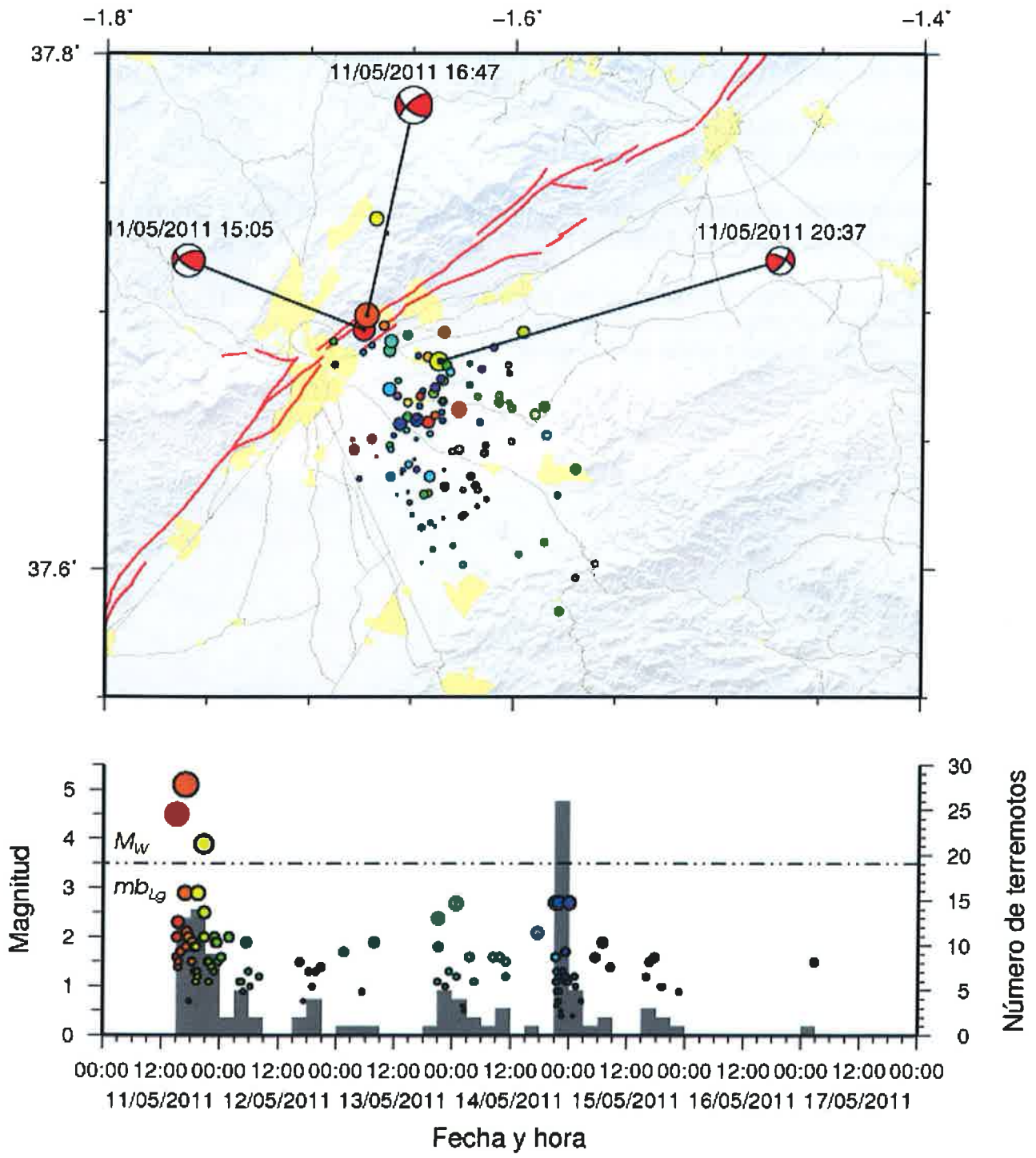


Figure 2.2. Map showing the seismic series. The size of the circles is proportional to the magnitude of the event. The colour is a function of its position in the series as shown in the bottom graph of temporal evolution. Focal mechanisms of major events show the characteristics of movement of the rupture, in this case are left-lateral strike-slip faults with reverse component. In red line the traces of the main active structures are shown. The chart below shows the time evolution of the series. Circles represent each event with size proportional to the magnitude (left Y axis), its colour is a function of position in the series. The gray bars show the number of events in intervals of 3 hours. Notably the peak of activity on the night of 14 to 15 May. The dashed line shows the threshold at which the magnitudes are expressed as  $M_W$  instead of as  $m_b_{Lg}$ .

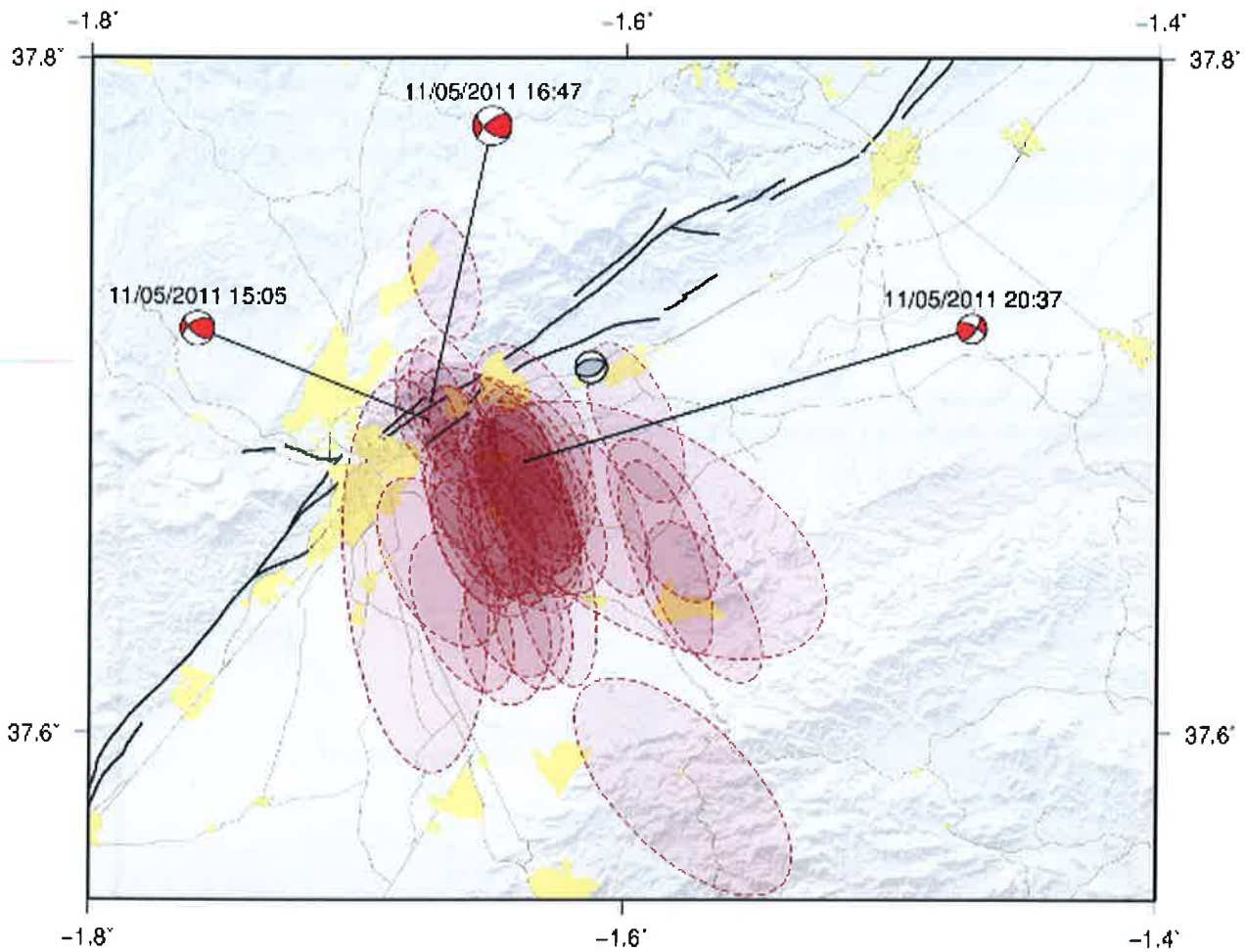


Figure 2.3. Map of error ellipses on the location of seismic events in the series with mbLg magnitude higher than 1.5. Focal mechanisms shaded in red correspond to the three main events of the series occurred on 11/05/2011, gray focal mechanism corresponds to an event occurred on 08/03/2006.

We have also conducted a preliminary analysis of Coulomb stress transfer. This methodology looks at the degree of influence of an earthquake rupture on the surrounding faults. Depending on the direction of the fault and its position with respect to the earthquake-generating fault, these surrounding faults can be increased in their likelihood of rupture (of generating an earthquake) or decreased. Figures 2.4 and 2.5 show these tests. The red colours imply a positive change in Coulomb stress, and it could be interpreted as an increasing of the probability of occurrence of another event in these areas. Blue colours in contrast show areas where the stress has fallen so that lowers the probability of occurrence of earthquakes. However, we must bear in mind that these calculations are done on determined fault planes and that increased stress in one fault plane, for example, N-S, does not preclude that other fault planes, eg E-W, may show a decrease of stress.

In Figure 2.4 we show the calculated stress changes produced by the main earthquake of magnitude 5.1 MW assuming a rupture with NE-SW direction, calculated on fault planes with the same strike and dip, ie the type of FAM plane. In Figure 2.5 we show the same calculation but assuming the plane NW-SE as the responsible of the earthquake. Regardless of which of the two planes has caused the event, the Coulomb stress change on

the fault plane of the FAM is practically the same. There are two lobes of increased stress on the ends of the segments Puerto Lumbreras - Lorca (south) and Lorca - Totana (north) and two orthogonal lobes. On the southern lobe of the latter is being developed the series of aftershocks. The two lobes of increased stress on the two segments of the FAM implies that the probability of generating a new event in this fault has increased. These results should be refined once the rupture is better defined.

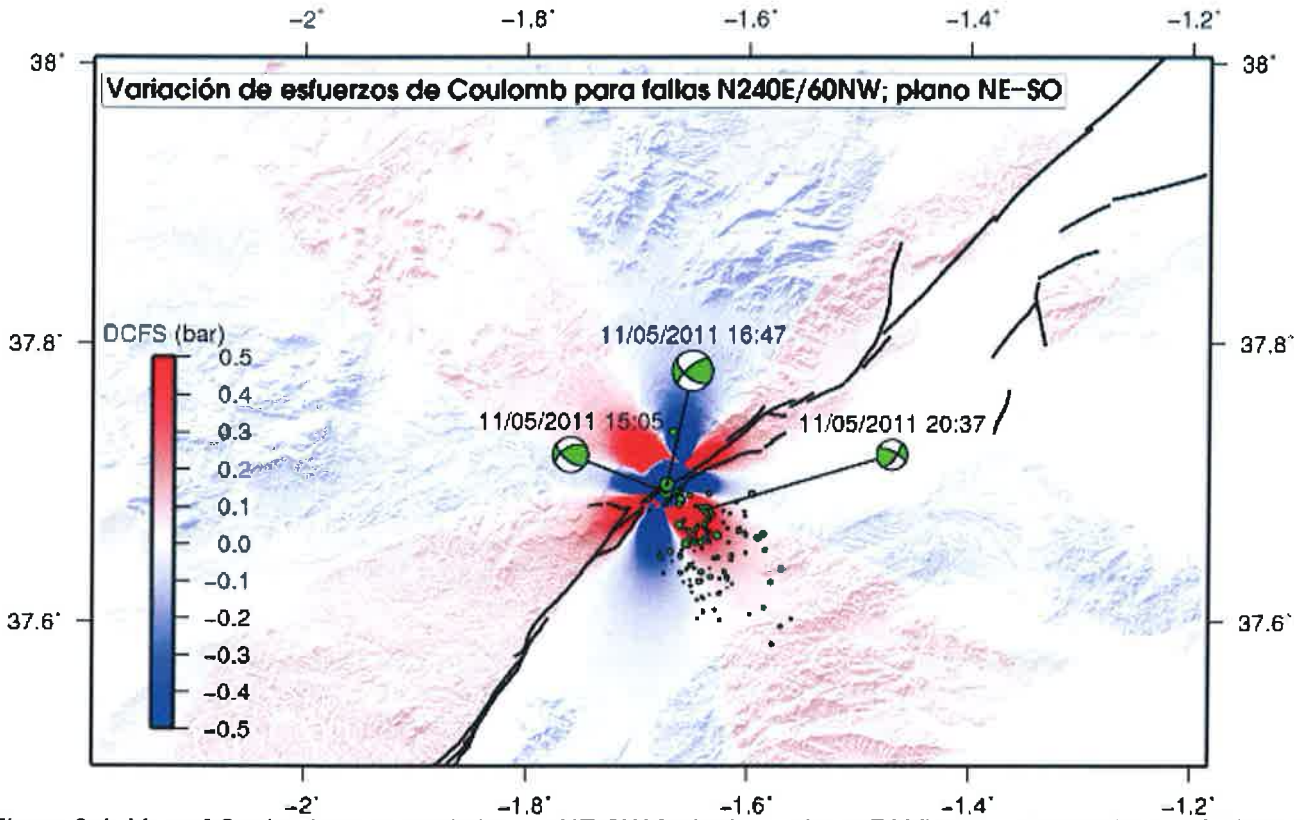


Figure 2.4. Map of Coulomb stress variation on NE-SW fault planes (type FAM) generated by the NE-SW plane of the focal mechanism of the main event of the series. The colours indicate the variation of stress (shown in colour scale). The red colours indicate an increased likelihood of generating new events.



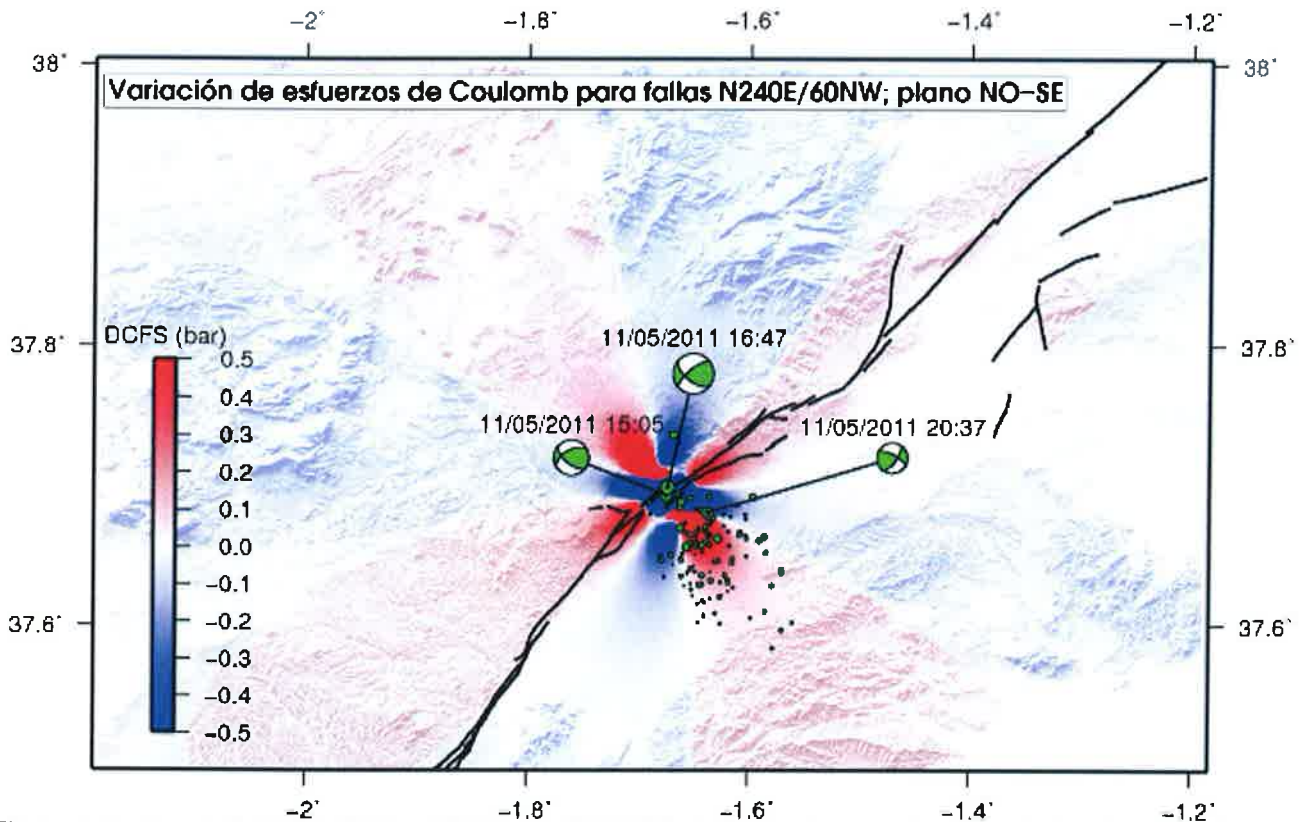


Figure 2.5. Map of Coulomb stress variation on NE-SW fault planes (type FAM) generated by the NW-SE plane of the focal mechanism of the main event of the series. The colours indicate the variation of stress (shown in colour scale). The red colours indicate an increased likelihood of generating new events.

## 2.2. Analysis of the geological source of the earthquake: "The Alhama de Murcia Fault?"

The position of the epicentres of the Mw 5.1 main shock and the Mw 4.5 foreshock is spatially consistent with the location of the Alhama de Murcia (FAM) fault trace 2 km northeast the city of Lorca (Figure 2.6). The FAM was first described by Bousquet et al. (1979) and it was the subject of a number of structural, seismotectonic and paleoseismic analysis and works showing its quaternary activity and high seismogenic potential (Silva et al., 1997; Martínez-Díaz, 1998; Martínez-Díaz et al., 2003; Masana et al., 2004). The FAM is oblique-slip sinistral strike slip fault with a reverse component (Martínez-Díaz 2002). It extends along the north-western flank of the Guadalentín depression, from Alcantarilla to Goñar, reaching a total length of at least 85 km. The fault is structured in several segments with variations in strike and degree of complexity along the fault (Figure 2.7).

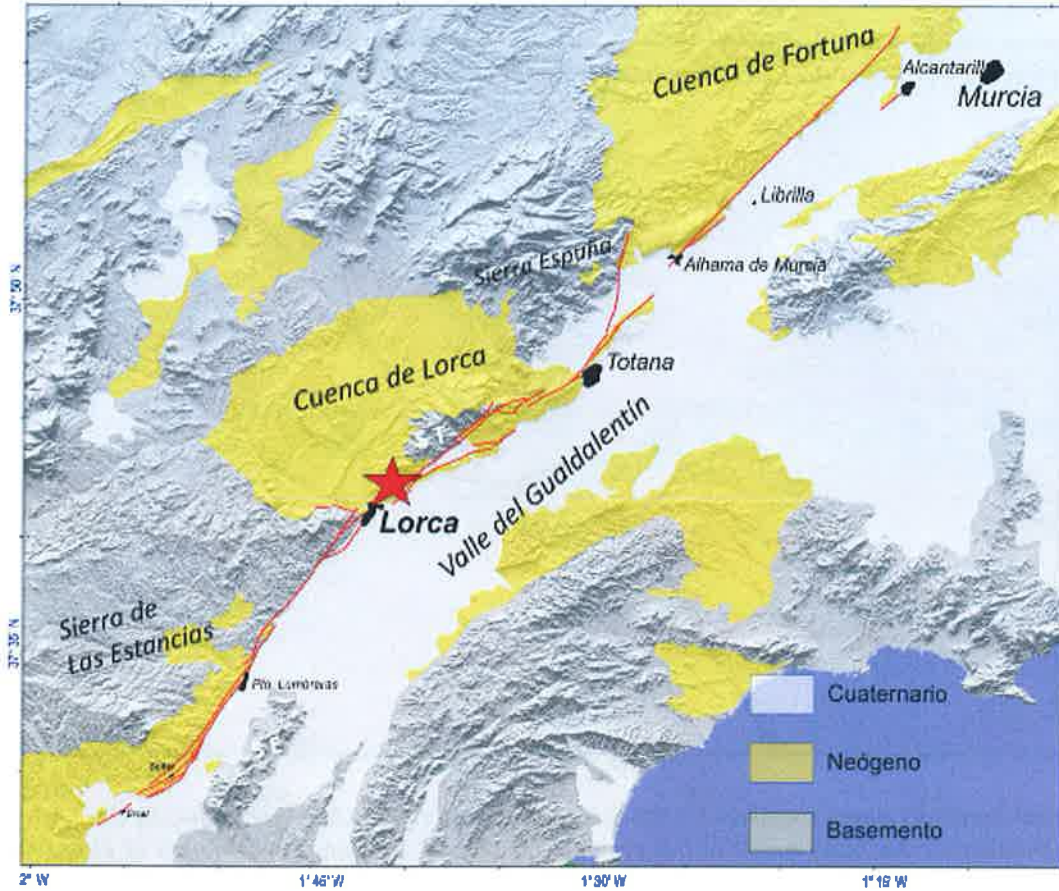


Figure 2.6: Map of the fault trace of the Alhama de Murcia Fault. The star indicates the position of the epicenter of the Mw 5.1 mainshock.

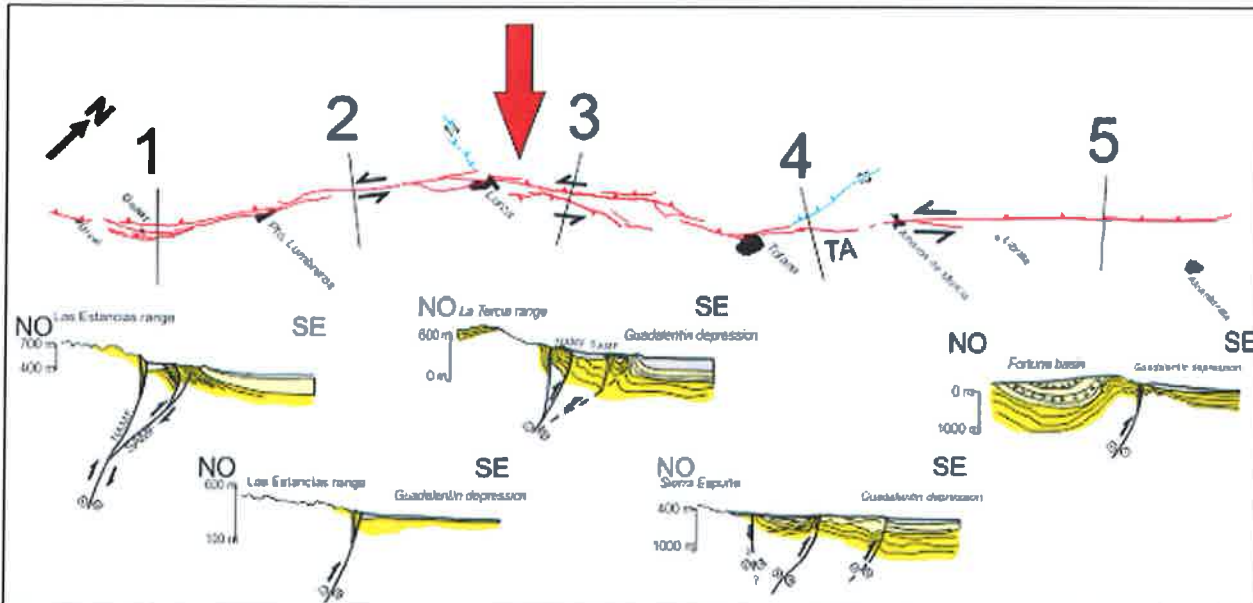


Figure 2.7: Structure of the Alhama de Murcia fault taken from Martínez-Díaz et al. (2010). The red arrow marks the position of the epicentre of the Lorca Mw 5.1 earthquake that is located at the western tip of the Lorca-Totana segment. In the lower part we show the cross section structure of the fault interpreted from surface geological data.

Focusing on the epicentral area the position of the larger events seem to be related to an area where the FAM has a rather complex structure (Figure 2.8), with two main branches with opposite dip: The Northern Lorca Corridor dipping to the NW and the South Lorca Corridor dipping to the SE. The uncertainty ellipse of the epicentre location calculated by the National Geographic Institute indicate that they could be related to either of the two branches, although it seems more likely the location associated with the Northern Corridor. This corridor consists of a compressional strike-slip duplex structure formed with two parallel branches one of which run to the SW below the town of Lorca and the other pass along the NW flank of the Castle of Lorca hill (see Figure 2.9). In any case the structure of the fault as it passes through Lorca is quite complex. It undergoes a slight change of direction and could have several active branches in the underground of the town. The geometry and kinematics of one of the two planes of the two focal mechanisms (plane NE-SW high dipping to the NW) is coherent with the two faults that form the duplex, since they present a sinistral strike-slip movement with reverse component during the Quaternary, also consistent with the plane solutions.

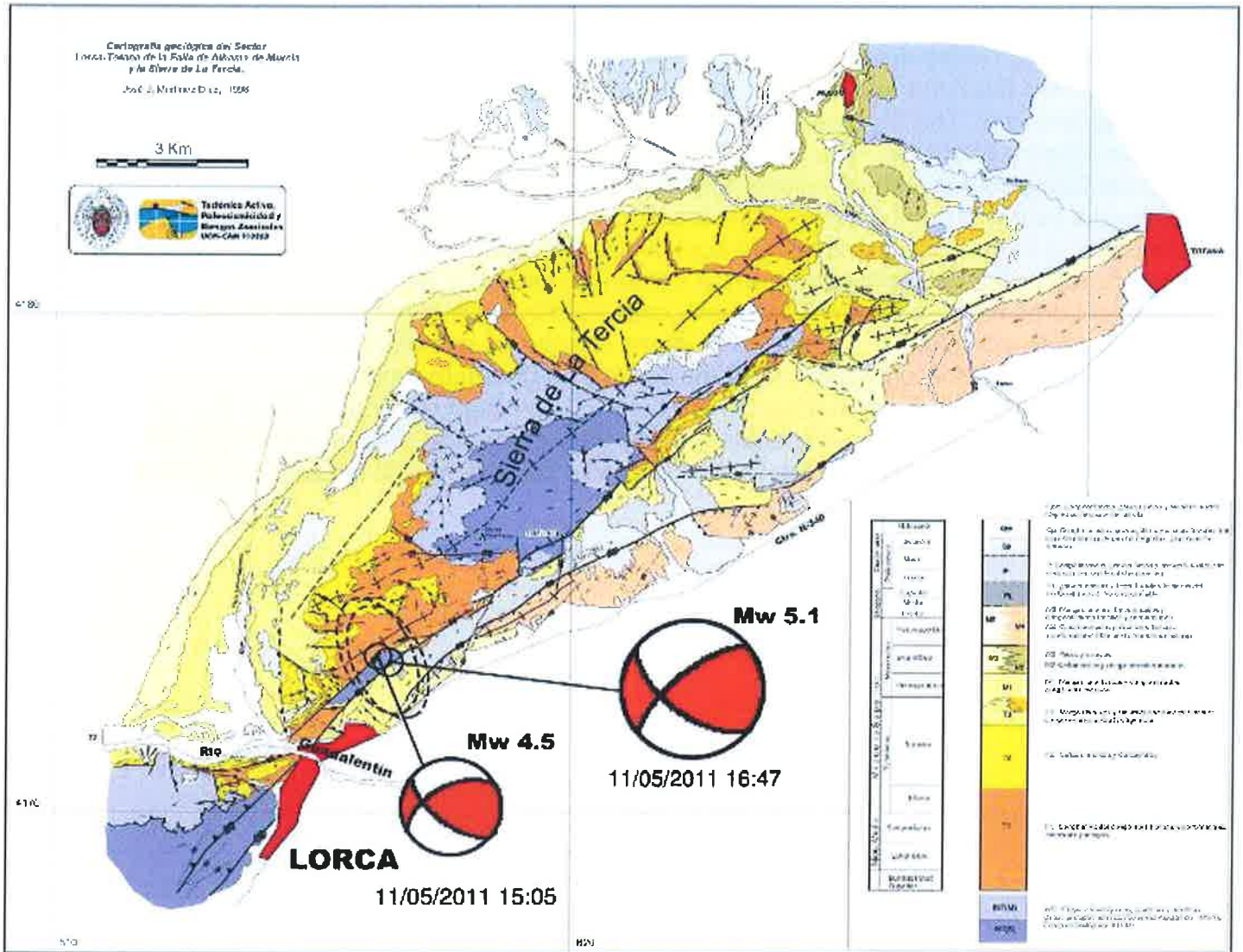


Figure 2.8: Geological map of the Lorca-Totana sector of the Alhama de Murcia fault with the epicentres of the two major earthquakes and the focal mechanisms calculated by the Instituto Geográfico Nacional. Geological mapping is taken from Martínez-Díaz (1998).



Figure 2.9: Panoramic view of Lorca taken from the epicentral area. The red traces show the position of the main branches of the FAM. The two faults that go towards the city bound the duplex structure formed by a block of basement rocks uplifted under a transpressional regime and flanked by Miocene sedimentary rocks.

### *Uncertainties in the interpretation of the earthquake source*

While the analysis of the surface geology and the position of the epicentres clearly point to the FAM as responsible for destructive earthquake, the position of most of the aftershocks located to the SE of the mainshock, into the Guadalentín valley, would not fit with this interpretation. One possible explanation is that the aftershocks respond to the reactivation of minor faults located within the valley away from the FAM and triggered by the mainshock. In this case no aftershocks are being produced around the rupture zone in the FAM. Another possibility is the existence of a localization misfit due to the high uncertainty of the location of low magnitude aftershocks using the regional seismic network. A third possibility is that the fault responsible is not the FAM but an unknown NW-SE, crossing from the epicentre to the valley. The higher number of seismic observations of the mainshock, coherent with the smaller size of error ellipses, makes less probable this third possibility. In any case it is necessary to carry out a relocation of the aftershocks and mainshocks hypocenters in order to make a definitive interpretation.

### **3. Geological searching of the epicentral area and the Alhama de Murcia Fault (FAM)**

*J. J. Martínez-Díaz (UCM)*  
*F. Martín-González (URJC)*  
*R. Pérez López (IGME)*  
*M. A. Rodríguez-Pascua (IGME)*  
*J. García Mayordomo (IGME)*  
*M. Rodríguez Peces (UCM)*

The shallow hypocentral depth (2 km) calculated by the Instituto Geográfico Nacional for this destructive earthquake of magnitude Mw 5.1, which is consistent with the high intensity of the damage, increases the chances of rupture along the Alhama de Murcia Fault had reached the surface. Given the magnitude of the earthquake a hypothetical surface rupture should not exceed a few centimetres. We carried out a field survey in the epicentral area and along trace of the FAM during the three days following the earthquake, paying special attention to structures and man-made elements as roads, tracks or concrete fences where it could be possible to observe fractures with centimetric displacements associated with the rupture on the fault. We present in this chapter a summary of this field reconnaissance.

In the village of Lorca we walked along the Guadalentín river banks where the FAM crosses the river. In this area the river course is flanked by two masonry walls more than 6 m high and a concrete channel passing through the city (Fig. 3.1). The orientation of the walls is N113° E in the western section and N140° E in the eastern part. The walk was 600 m long on both margins and no evidences of ground breaking associated with fault displacement were found. The numerous cracks present on the walls do not show movements throughout the wall, and they do not have continuity in the bed of the valley. It is noteworthy that the north wall (Fig. 3.2) has more cracks and pill offs than the southern wall that is only affected by several cracks.



*Figure 3.1. Masonry wall along Guadalentín river bank passing through Lorca, used as a marker.*



*Figure 3.2. Northern Wall of the Guadalentín river valley.*

In the epicentral area located by the IGN 2 km NNE of Lorca a field reconnaissance was done along the Alhama de Murcia fault traces following the two branches: the South and North Corridors. We walked the old military camp of Carraclaca ( $37^{\circ} 41'54'' \text{N}$ ,  $1^{\circ} 40'7'' \text{W}$ ) very close to the epicentre, following a 160 m long concrete fence oriented  $\text{N } 120^{\circ}$  that completely crosses the fault line of the southern branch of the strike slip duplex structure described above (Fig 3.3). The wall is intact without rupture associated with a displacement of the fault. Similarly, we walked the area at coordinates ( $37^{\circ} 41'42'' \text{N}$ ,  $1^{\circ} 40'49'' \text{W}$ ) to the west of the epicentre calculated by IGN, along several tracks, and the Las Canales Creek that crosses the faults forming the duplex structure. There has been observed clear evidences of surface deformations associated with the fault.

Also, we have measured temperatures in hot-springs associated to the FAM fault. Namely we have measured temperature of thermal water in the Carraclaca thermal baths. The average temperature of the water is  $21^{\circ}\text{C}$  and temperature obtained a thermocouple device was  $21.5^{\circ}\text{C}$ . Taking into account the accuracy of the thermocouple ( $0.2^{\circ}\text{C}$ ) and the resolution ( $0.1^{\circ}\text{C}$ ), we think that the variation is not relevant for a hot-water upwelling, even more if we consider that the thermal baths are located very close to the epicentre (1 km approximately) and the earthquake was very shallow.



Figure 3.3. Concrete fence basement used as a marker to look for deformation along the fault line of the FAM.



Finally, there has been a journey along the highway A-7 that located to the west of the epicenter and is crossed by the FAM. We observed some small NE-SW cracks on the road produced by the earthquake, but they do not present lateral continuity. Some observation was made in the tunnel and viaduct of the A-7 that passes through the FAM NW of Lorca, no tectonic deformations are observed in the infrastructure.

The preliminary observations and the field reconnaissance of the fault line of the Alhama de Murcia Fault, suggest that the low magnitude of the earthquake has no generated a surface rupture associated. However, if an aftershock relocation of epicenters points to a NW-SE fault plane as the possible seismic source, a new field reconnaissance along the Guadalentín valley would be necessary.

## 4. Ground instabilities produced by the 11<sup>th</sup> May 2011 Lorca earthquakes

Julián García Mayordomo (IGME)  
Martín Jesús Rodríguez Peces (UCM)  
Juan Miguel Insua Arévalo (UCM)

*A summary of the field survey carried out from the evening of Thursday 12<sup>th</sup> to the afternoon of Saturday 14<sup>th</sup> May, 2011.*

The 11 May 2011 seismic series has generated a number of slope instabilities. In general these are of a small size and distribute in a localized area. However, this assertion has yet to be contrasted with aerial imagery taken after the main shocks.

The ground instabilities produced by the earthquakes are basically rock-falls of very different size (from mere bare patch to debris flows), single rock-falls and collapses of sections of the external wall of Lorca's castle.

Few of the instabilities produced by the earthquake can be referred as significant in the sense that they have produced some damage in buildings and temporal road-cuts.

In particular, at the easternmost point of Lorca's Castle cliff, a fallen rock-block has destroyed part of the wall enclosing the patio of a house. Alike, on the road up-the-hill to the castle few rock-falls have badly damaged the pavement. A similar situation has taken place on the road to the Pantano de Puentes, which was temporarily closed to traffic. It is remarkable that on Friday 13<sup>th</sup> (aprox 24 h after the earthquake) both situations were already solved and driving was possible with relative normality.

It is highlighted that the stability measures deployed on the southern slope of the castle cliff have performed adequately, avoiding what it would have been an aggravation of the damage produced by the earthquake and may be a larger number of casualties, particularly on the habitations located right under the cliff. A quick visual inspection suggested the perfect state of the measures, although this observation should be confirmed after a systematic and detailed inspection.

Finally, it is convenient to notice two important previous works done by IGME in Lorca:

- Seismic Hazard and Vulnerability of Lorca and its Municipal District (1992). (*In Spanish*).
- Rock-fall risks in the Castle cliff of Lorca (Murcia) (1988). (*In Spanish*)

It follows a brief photographic report of the instabilities mentioned above, classified by its location (viewpoints are shown in figure 4.1):

- North face of Lorca's castle cliff (Figure 4.2.0 and following).
- South face of Lorca's castle cliff (Figure 2.3.0 and following).
- North slope of the Pantano de Puentes road (Figure 4.4.0 and following).
- Additional pictures (Figure 4.5 and onwards).

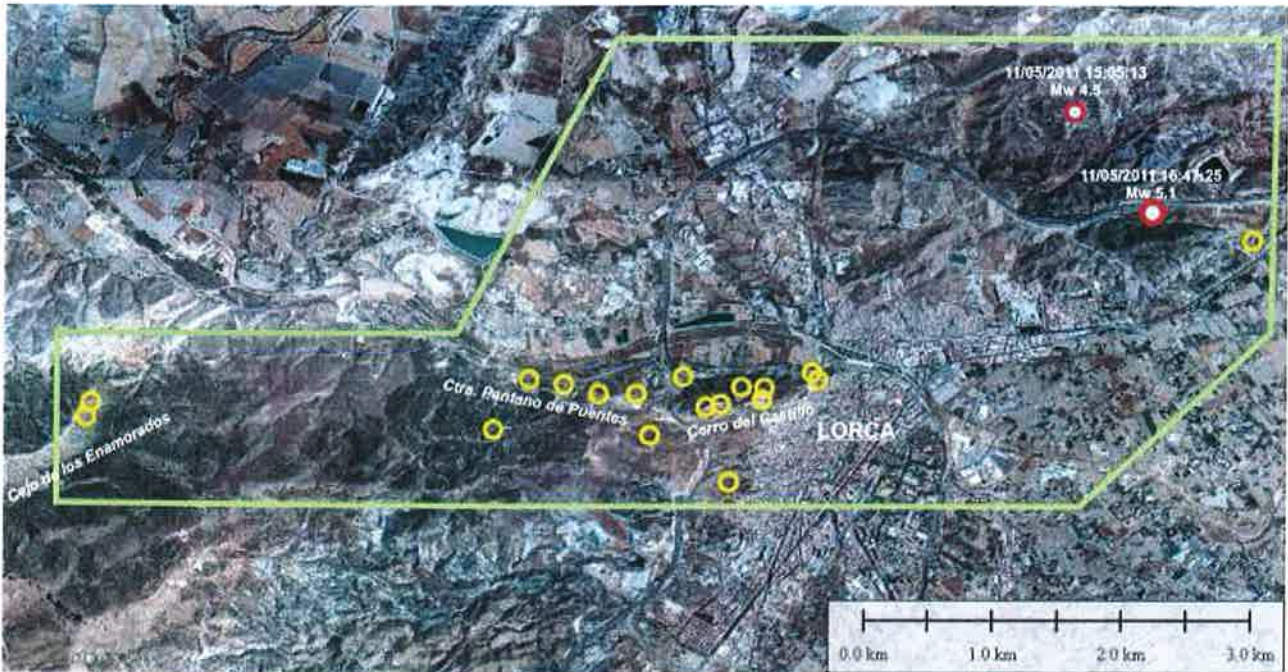


Figure 4.1: Situation of the main slope instabilities identified in the field survey.

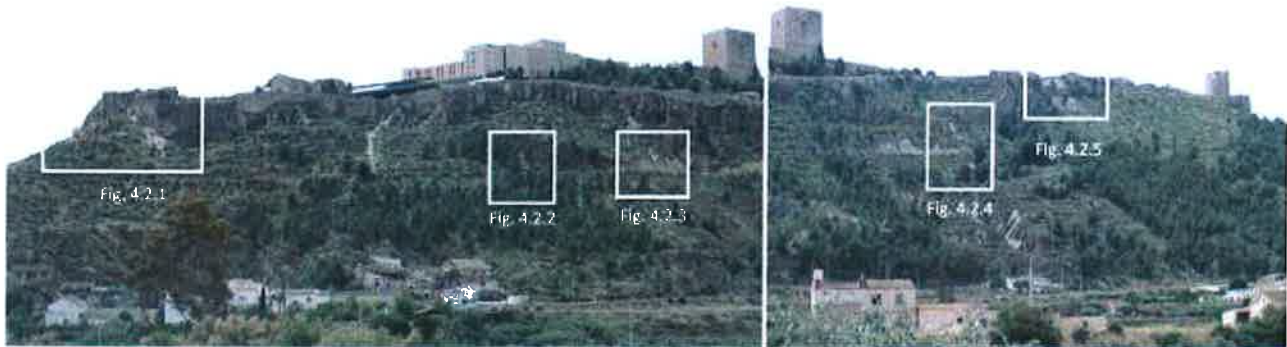


Figure 4.2.0: General view of the north slope of the Lorca's castle cliff. The most remarkable instabilities induced by the 11th May earthquake are identified.

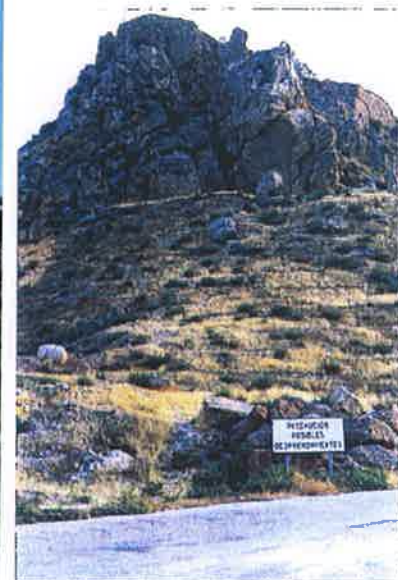


Figure 4.2.1a: Partial collapse of the easternmost point of Lorca's castle cliff. A detached rock-block produced damage in a near house (see Fig. 4.2.1c). Picture on right corresponds to the same place few years back (taken from the IGME seismic hazard study of Lorca, 1992).



Figure 4.2.1b: View of south lateral of the easternmost point of the castle cliff and of the block that damaged a small wall of a house. The down-the-hill road pavement showed moderate damage at this point. It can be observed on the left the ending of the retaining wire mesh that stabilises the south face of the castle cliff.



Figure 4.2.1c: Result of the impact on a wall made of concrete blocks enclosing the patio of a house from a rock detached from the easternmost point of the cliff.



Figura 4.2.1d: Moderate damage on the down-the-hill road caused by the rebound of the block detached from the easternmost point of the cliff (figure 1.b).



Figure 4.2.1e: Close-up of the collapse of the easternmost point of the castle cliff (looking South) and of the general conditions of the rock mass at this site. On the upper right corner it is observed part of a fallen wall (see figure 1.1f).



Figure 4.2.1f: Close up of the fall of part of an old retaining wall. It can be observed that the intrados filling remains meta-stable. This type of instability also appears on the south face of Lorca's castle cliff (see figure 2.1).



Figure 4.2.2: Small debris dragging a pine tree on the north talus of the up-the-hill road to the castle.



Figure 4.2.3: Rock-falls and debris on the up-the-hill road to the castle.



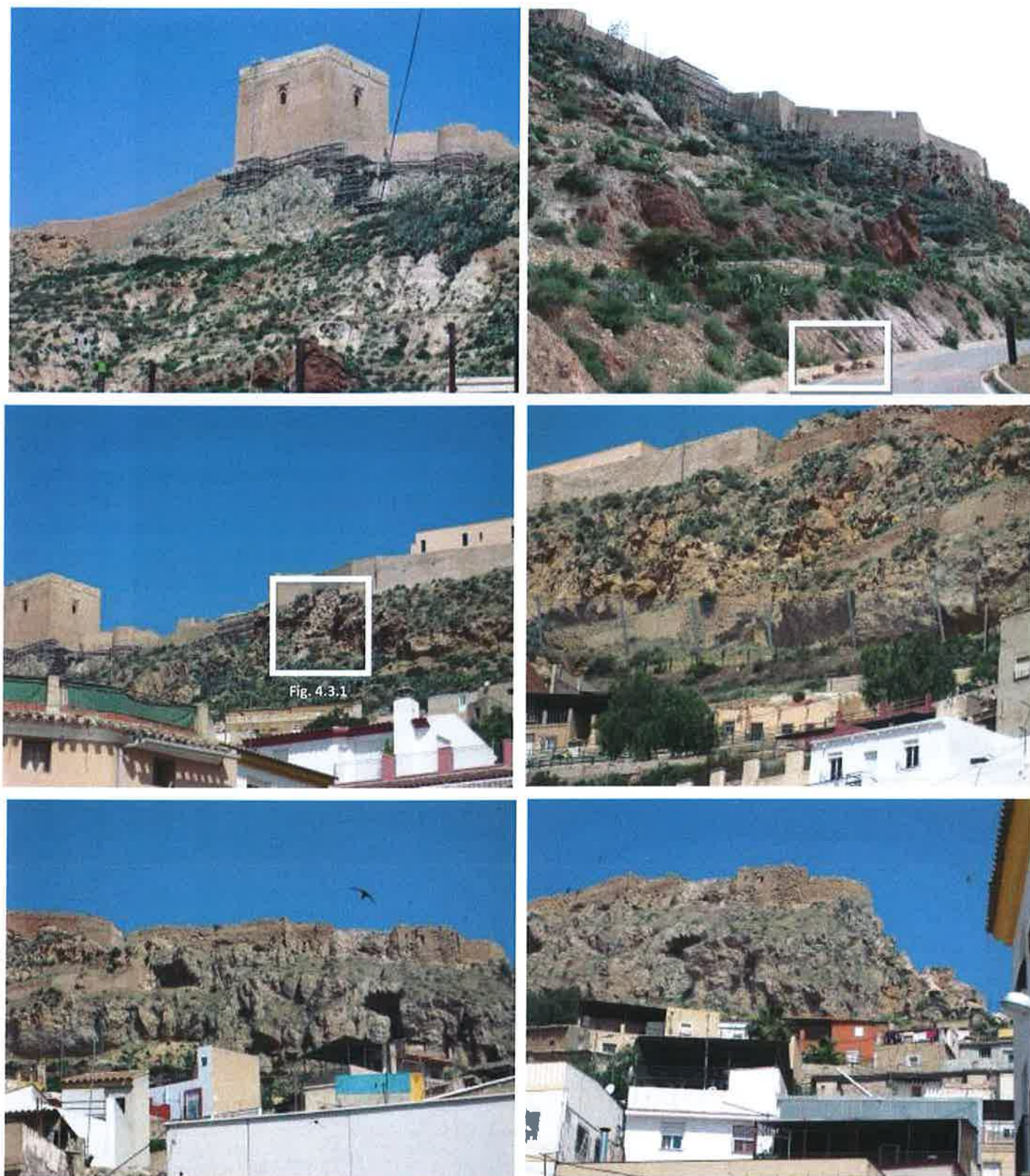
Figure 4.2.4a: Rock-fall of metric size that damaged badly the road (see figure 1.4b).



Figure 4.2.4b: Damage on the pavement of the up-the-hill road to the castle due to the fall and rebound of the block shown in figure 1.4a.



*Figure 4.2.5: Collapse of the external wall of Lorca's castle (north face).*



**Figure 4.3.0: Partial views of the southern slope of Lorca's castle cliff. Photos are arranged from west to east, from left to right. Only two small size instabilities were identified: a small debris fall (photo number 2) and the collapse of the external wall of the castle (photo number 3 and fig. 4.3.1). On the last photo a visual of the easternmost point of the cliff is shown (figure 4.2.1). The stabilization measures of the rock mass performed adequately preventing the occurrence of more damage and personal losses. These consist in a double diameter wire mesh nailed to the rock mass by bolts and a dynamic barrier. These measures were put in place 3 years ago aprox. (pers. com. council).**





*Figura 4.3.1: Collapse of an old retaining wall attached to the external wall of the Lorca's castle on its south face. This instability warned the dwellers of the houses situated right under the cliff, which asked us whether it was safe to return back to their places.*



Figure 4.4.1a: Rock-falls and debris on the summit of the north slopes of the Pantano de Puentes road. Their attribution to the earthquake is presumed. The westernmost one (on the right on the first photo) corresponds in part with a previous instability.



Figure 4.4.1b: Continuation of the Pantano de Puentes road towards the west. Along this road many instabilities were identified, although of a small size in general. Particularly remarkable are the rock blocks fallen from the ridge controlled by Las Viñas Fault (marked with an arrow). Picture on right shows a close-up of the damage produced by one of this rock blocks.



*Figura 4.4.2: Rock-falls and rock-debris at the Cejo de los Enamorados.*



*Figure 4.5: Communications towers founded on a hill situated in front of the westernmost end of Lorca's castle cliff. Two recent instabilities are shown, which are attributed to the 11 May earthquakes.*



*Figure 4.6: View of the slope enclosing a butane-gas storage site on the Pantano de Puentes road. No slope instabilities that could be attributed to the earthquakes were identified here, although the collapse of the concrete-brick wall is attributed to them.*



*Figure 4.7: Irrigation pool situated nearby the epicentres of the 11 May earthquakes. Neither damage was observed in this area, nor instabilities on the talus on the background.*



*Figure 4.8: Rock falls on a dirt road that runs across the epicentral area (photo courtesy of J.J. Martínez-Díaz).*



*Figure 4.9: Shallow debris falls attributed to the May earthquakes on a service road of the Tajo-Segura canal.*

## **5. 5. Study of the historical building damage within the village using structural geology techniques. Testing the Archaeoseismology methods**

*Jorge Luis Giner Robles (UAM)*

*Miguel Ángel Rodríguez Pascua (IGME)*

*Raúl Pérez López (IGME)*

*Fidel Martín-González (URJC)*

The earthquake of Lorca (SE Spain) May 11th 2011 was responsible for a large amount of damage and seismic intensity on a wide range of buildings in the city of Lorca, including the historical buildings. The historical damaged buildings is observed not only in older buildings such as the portico of San Antonio, (whose origin is an ancient defensive wall of the XIII<sup>th</sup> century), but in churches and monasteries around the cultural center Lorca. Aerial view shows a concentration of damage in the highest towers, mainly affecting the arches, buttresses canopies, bollards etc. Rotations also appear in decorative elements such as bollards and obelisks, like the obelisk in the San Francisco church.

According to the experience of ancient earthquakes happened worldwide, an earthquake of 5.1 magnitude should not have generated such a seismic intensity (VII EMS; [www.ign.es](http://www.ign.es)). However, being shallow and the rupture spreads from the epicentral area to the southwest, we can assume that much of the rupture of the fault responsible of the earthquake was just below the village (assuming the FAM as the structure responsible). Moreover, alluvial continental deposits generated in the glacis of the Sierra de la Tercia and deposits of Guadalentín River have amplifying properties to for the seismic waves.

Lorca's earthquake has not produced widespread buildings collapses (only two buildings collapsed), during the inspection we have recognized, classified and described more than one hundred effects of the earthquake on buildings and structures described in the work of Giner-Robles et al., 2009 and 2011, Rodríguez-Pascua et al., 2011. These authors defined them as Archaeological Earthquake Effects, (commonly known as EAE). The analysis of these deformation structures in historic buildings is very important to identify and quantify historical earthquake damage in archaeological sites.

The EAE describe and quantify coseismic deformation in archaeological sites and historic buildings. After Giner-Robles et al., 2009 and 2011, Rodríguez-Pascua et al., 2011, they classify according to EAE: (1) permanent deformation of the surface (2) temporary deformation by the seismic ray during the earthquake.

The aim of this study is to correlate the different earthquakes damages in the historic town of Lorca described by EAEs type structures with the physical parameters of the earthquake and the geology and the seismotectonic models from previous chapters of this geological preliminary report. Moreover, in this preliminary work, we show deformations associated mainly to the anisotropy of the seismic ray. Thus, it is possible

to determine the orientation of maximum horizontal compression ( $\sigma_1$ ) that the city suffered during the main shock, which lasted about 5 seconds (Mw 5.1).

During the field work, carried out within the 72 hours after the main event, the deformation has been recognized mainly on the main historical buildings of the town of Lorca, such as churches, convents and cathedrals. The team was divided into two working groups in order to recognize all the damaged buildings and classified damages in a systematic way after Rodríguez-Pascua et al. 2011. Figure 5.1 shows the table of classification of EAE as proposed by these authors, with the keys used in the location map (Fig. 5.2).

The most relevant key of this archaeoseismic study is applied instrumental information of this earthquake to correlate the EAEs defined in historical earthquakes affecting archaeological sites with historical buildings and modern buildings. This information also can be correlated with seismic and geological parameters shown in this report, such as the magnitude and focal mechanism of earthquakes, the seismogenic fault and site effects due to the geology of Lorca.

The earthquake of Lorca is an ideal example to study deformation associated during an earthquake and to correlate the damages with the seismic intensity and parameters of the earthquake, such as magnitude, depth and geometry of the seismogenic fault. Hence, we can extrapolate these results of the Lorca earthquake (May 11th) to other studies of archaeological sites with near field effects. In this preliminary report we have collected and measured the main EAEs oriented in the convent of Clarisas (S. XVII), in the Church of San Juan (S. XV), in the Church of Santiago (S. XVIII), Santa Maria (S. XV), in the Church of San Francisco (S. XVII) and the Portico de San Antonio (S. XIII-S. XV). Moreover, similar structures have been described in modern buildings such as the collapse of the building in Las Viñas and other modern buildings. We also incorporate two new EAEs observed in field of buildings of Lorca.

All this preliminary information has been represented in a rose diagram (Figure 5.10), showing the main orientation in a NW-SE trend, N150°-160°E. We interpret these direction NW-SE with azimuth from the SE. This suggests a direction of  $\sigma_1$  N150°-160°, which is coherent with the regional stress field, the focal mechanism of the earthquake (left lateral with reverse component) and the epicentral location in the *Sierra de la Tercia*.

<b>EARTHQUAKE ARCHAEOLOGICAL EFFECTS (EAE)</b>		<b>I. PRIMARY EFFECTS (DIRECT EFFECTS)</b>	
		<b>GEOLOGICAL EFFECTS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- On-fault geological effects                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fault scarps</li> <li>- Seismic Uplift / subsidence</li> </ul> </li> <li>- Off-fault geological effects                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Liquefactions and dike injections</li> <li>- Landslides</li> <li>- Rock fall</li> <li>- Tsunamis/Seiches</li> <li>- Collapses in caves</li> <li>- Folded mortar pavements</li> <li>- Fractures, folds &amp; pop-ups on regular pavements</li> <li>- Fractures, folds &amp; pop-ups on irregular pavements</li> </ul> </li> </ul>
<b>BUILDING FABRIC EFFECTS</b>		<i>Strain structures generated by permanent ground deformation</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- shock breakouts in flagstones</li> <li>- Rotated and displaced buttress walls</li> <li>- Tilted walls</li> <li>- Displaced walls</li> <li>- Folded walls</li> </ul>
		<i>Strain structures generated by transient shaking</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Penetrative fractures in masonry blocks</li> <li>- Conjugated fractures in walls made of either stucco or bricks</li> <li>- Fallen and oriented columns</li> <li>- Rotated and displaced masonry blocks in walls and drums in columns</li> <li>- Displaced masonry blocks</li> <li>- Dropped key stones in arches or lintels in windows and doors</li> <li>- Folded steps and kerbs</li> <li>- Collapsed walls (including human remains and items of value under the rubble)</li> <li>- Collapsed vaults</li> <li>- Impact block marks</li> <li>- Broken pottery found in fallen position</li> <li>- Dipping broken corners</li> </ul>
<b>II. SECONDARY EFFECTS (INDIRECT EFFECTS)</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fires</li> <li>- Repaired buildings</li> <li>- Recycling anomalous elements</li> <li>- Settlement abruptly abandoned</li> <li>- Stratigraphic gap in the archaeological record</li> <li>- Flash floods generated by collapses of natural and human dams</li> <li>- Anti-seismic buildings</li> </ul>	

Figure 5.1: Classification table of the Earthquake Archaeological Effects (EAE) (Rodríguez-Pascua et al. 2011).

Figure 5.2 shows the map of the downtown area of Lorca, identifying the main EAEs recognized in this study. The symbols of the EAE are shown in Figure 5.1. The figures describe the main EAEs recognized and they have been created using the methodology of Giner-Robles et al., 2009.

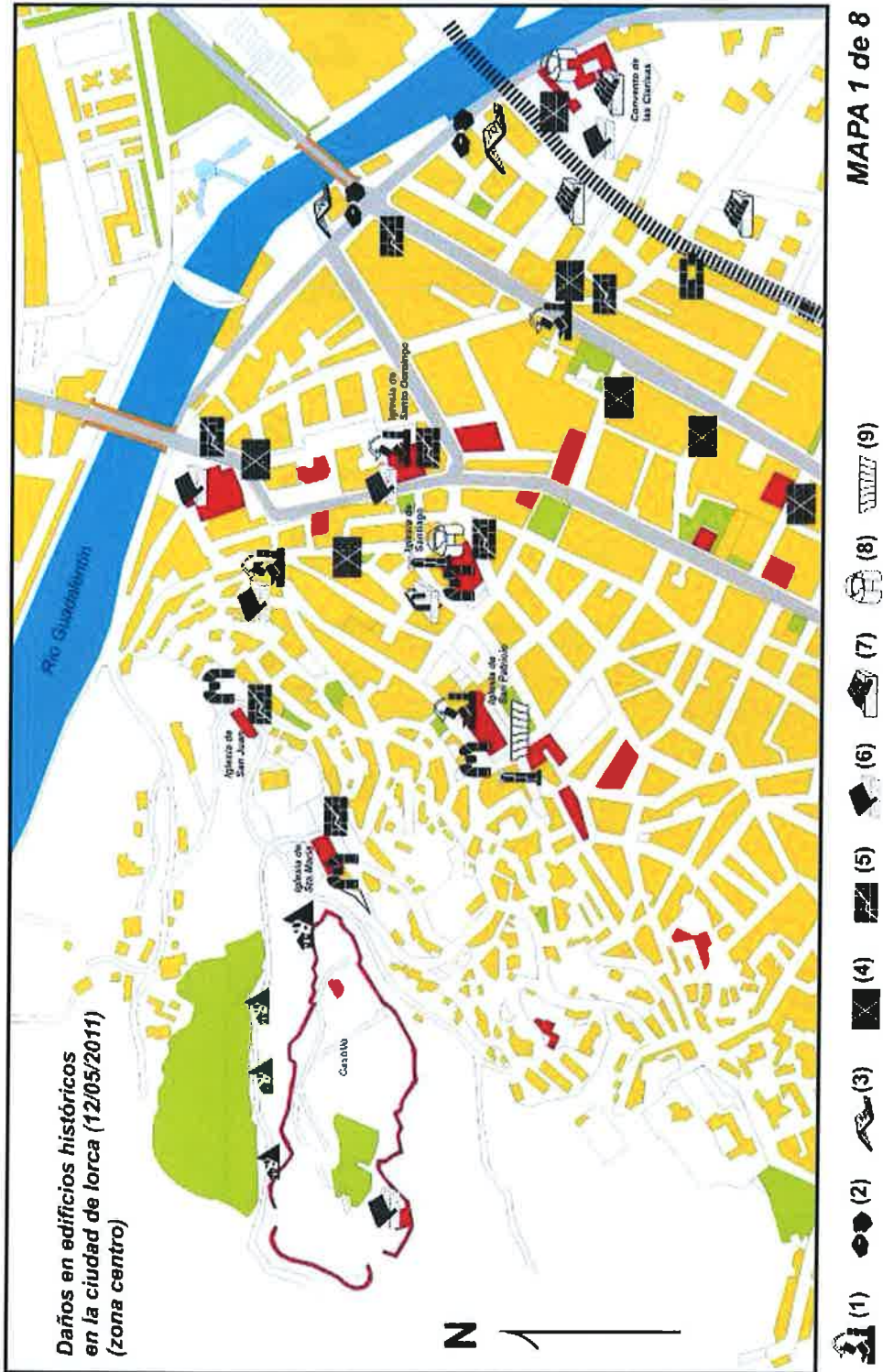


Figure 5.2: Map of downtown of Lorca, with the spatial distribution of the main EAEs classified during the field work after the earthquake. See figure 5.1 for further explanation of the symbols.





Figure 5.3: Damage in the church's tower of Santiago.

# Almena del Porche de San Antonio

(torre de la antigua muralla)  
siglo XV

Cordenadas 37° 40' 44,88" N

01° 41' 51,69" O



Figure 5.4: Damage in the battlements of the entrance of San Antonio (Tower of the old defensive wall of the Islamic Period).

# Convento de las Clarisas

siglo XVII

Coordenadas 37° 40' 33,83" N  
01° 41' 30,92" O

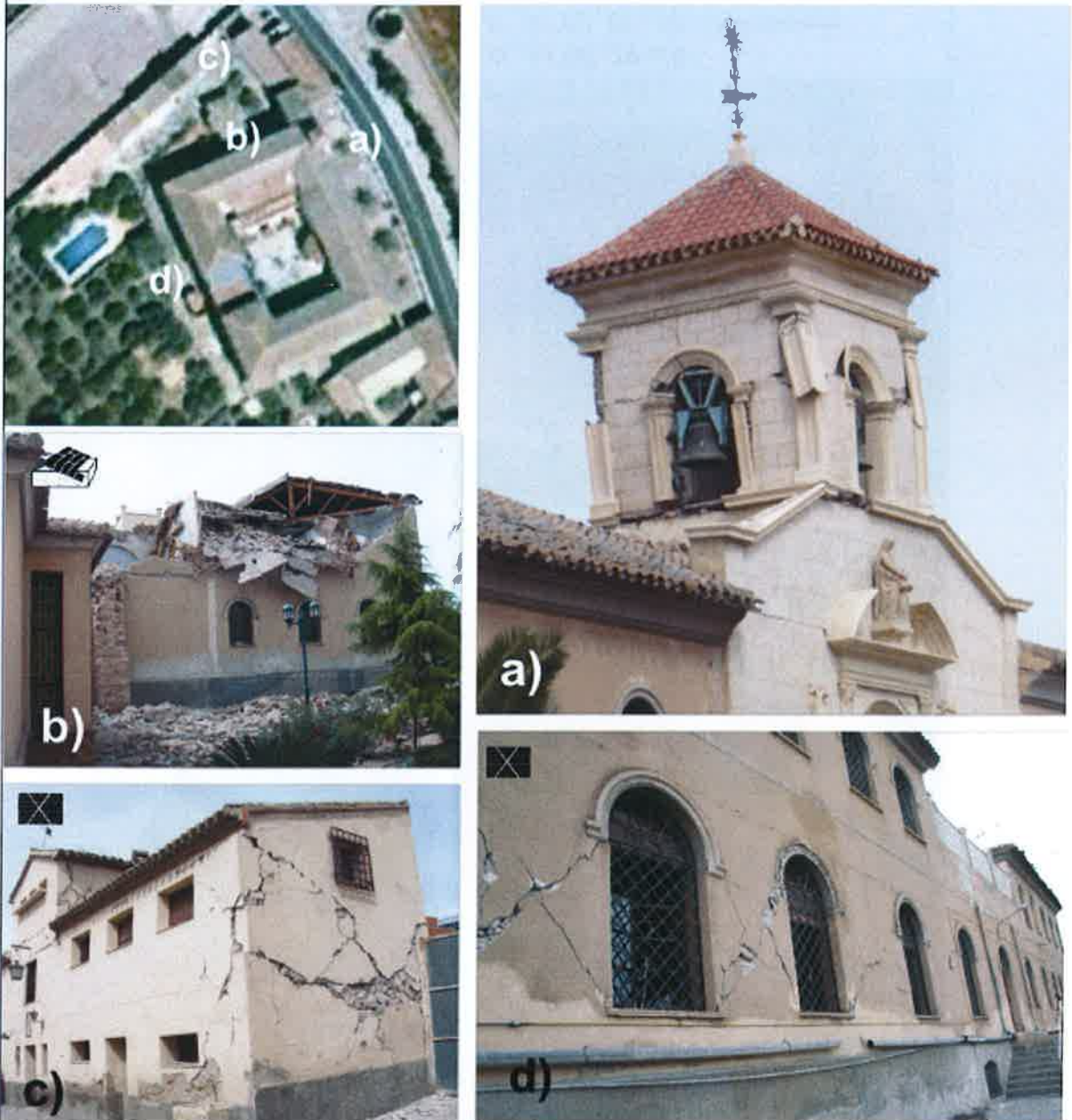


Figure 5.5: Damage in the tower and main buildings of the Clarisas' Convent.

# Iglesia de San Francisco

siglo XVII

Cordenadas  $37^{\circ} 40' 22,15'' N$   
 $01^{\circ} 42' 00,16'' O$



Figure 5.6: Damage in the San Francisco's Church.

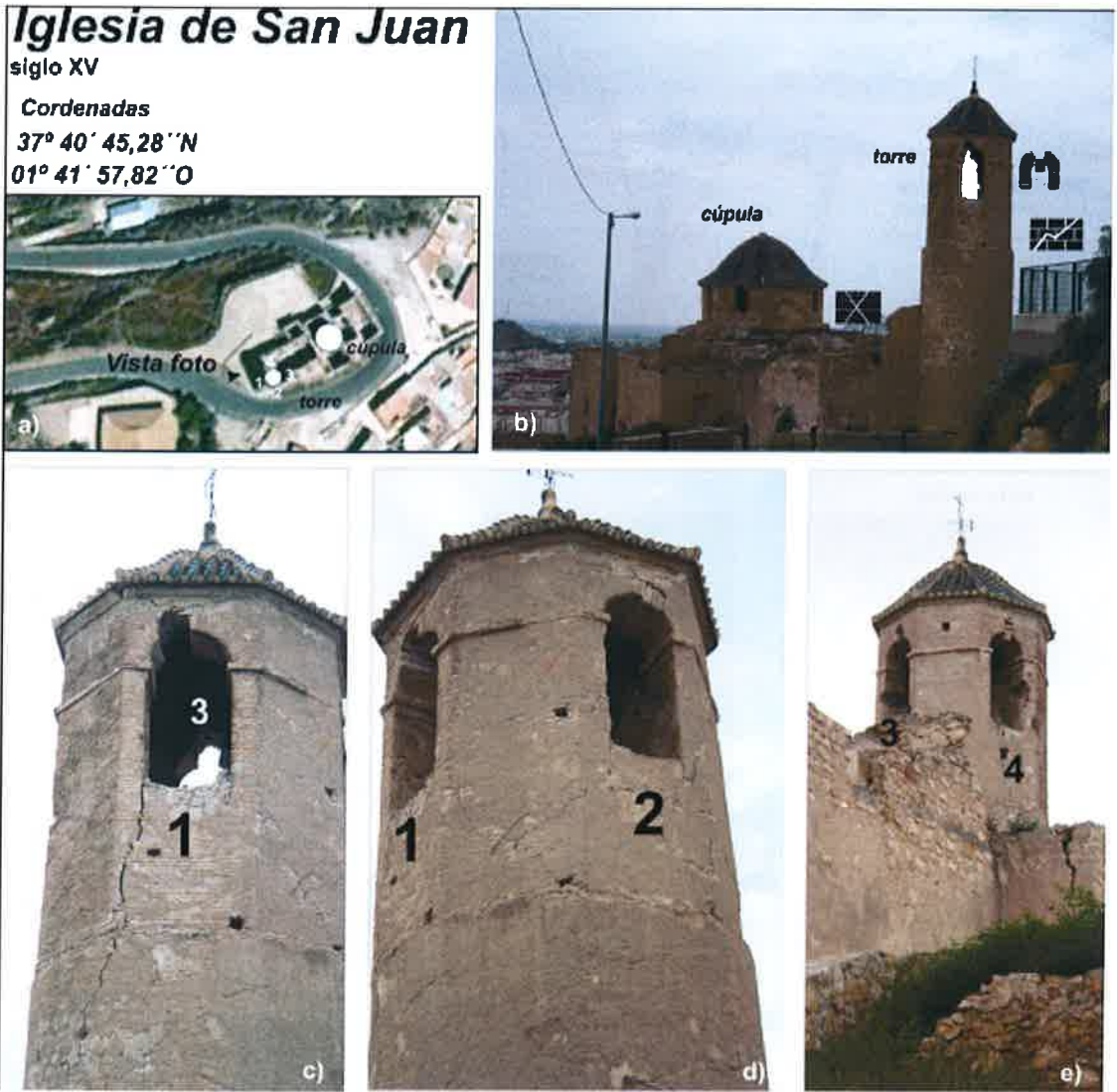


Figure 5.7: Damage in the San Juan's Church.

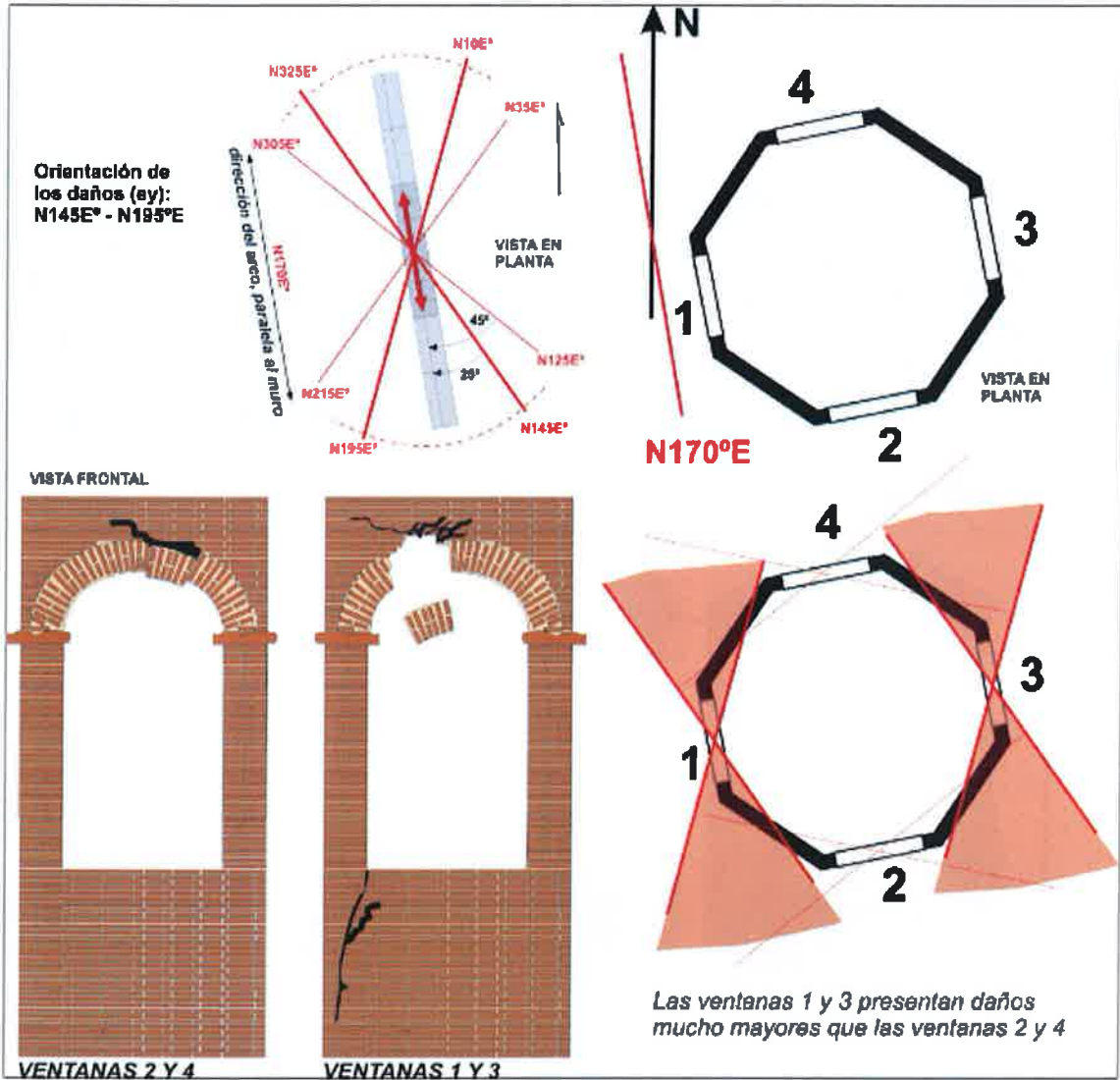


Figure 5.8: Example of analysis of deformation structures and the results of the orientation assessment of the strain (San Juan's Church).



Figure 5.9: Anthropically compacted substratum by seismic shock related to the Clarisas's Convent. New EAE structure.



Figure 5.10: Santa Maria's Church. Pop up of a clave stone.

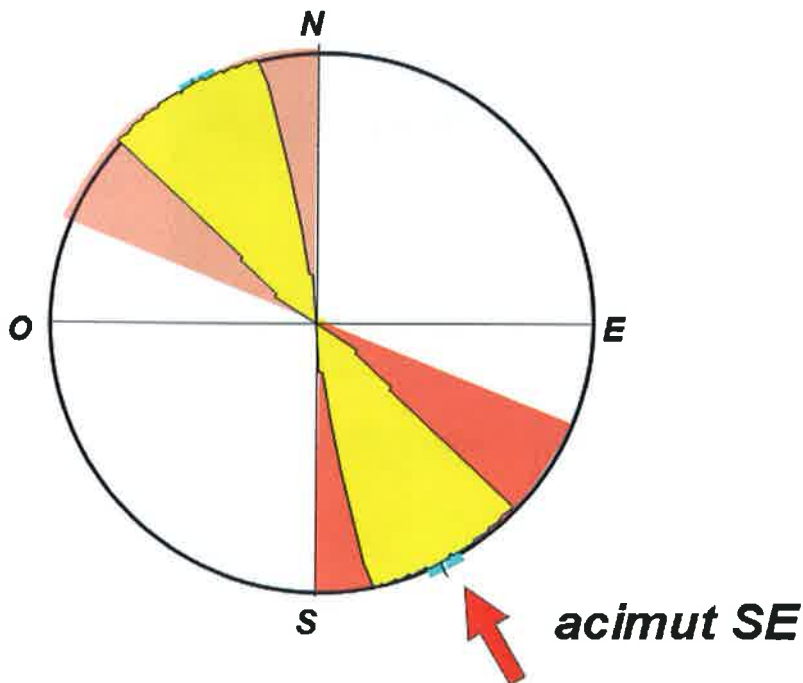


Figure 5.11: Rose diagram of the calculated main horizontal strain directions, using the EAEs. Preliminary results.



## 6. Preliminary Conclusions

*José Jesús Martínez Díaz (UCM); Miguel Ángel Rodríguez Pascua (IGME); Raúl Pérez López (IGME); Julián García Mayordomo; Jorge Luis Giner Robles (UAM); Fidel Martín-González (URJC); Martín Rodríguez Peces (UCM); Jose Antonio Álvarez Gómez (IH Cantabria - UCM); Juan Miguel Insua Arévalo (UCM).*

- Alhama-Murcia Fault (FAM) is the fault with greater evidence of Quaternary activity in the area, with evidence of paleoseismic activity ( $M > 6.0$ ) over the last 1000 years, associated with thermal springs and a well-recognized surface trace. There was destructive historical seismicity located along the trace during the XVII, XVIII and XIX centuries. FAM has a clear geomorphological expression in this area and whose trace is parallel to one of the nodal planes of focal mechanisms obtained for the earthquakes of May 11, 2011. The sinistral strike-slip movement of the fault is consistent with the focal mechanism solution.

- The high seismic intensity experienced by the town of Lorca (intensity VII EMS-98 scale, data IGN) associated with a magnitude 5.1 Mw, may be due to the earthquake spread from the Sierra de la Tercia (epicentral area) to the SW. The lack of geological effects towards the east of the epicentre supports this possible directionality of propagation.

- The wave propagation supports the directionality of the FAM rupture spread from the epicentral area, crossing the city of Lorca. This reason associated with the shallowness of the earthquake, would explain the high seismic intensity and peak accelerations of 0.36 g (IGN data) recorded in the accelerometer of the old prison of Lorca (located in the downtown).

- The increasing in static stress (Coulomb Stress-Transfer Model) on the segments of the Alhama-Murcia Fault (FAM) generated by the main earthquake may have increased the likelihood of earthquake occurrence in these areas. However, it is not possible specify temporary occurrence of these earthquakes.

- The orientation of the principal axe of the strain ellipsoid ( $e_y$ ), obtained from the archaeoseismological study is NW-SE, is consistent with the regional tectonic stress field and focal mechanism of the main earthquake and also with the epicentral location.

- the Archaeoseismological data (more than a hundred values) suggest an origin of the deformation associated with a nearby seismic field, implying that most of the main earthquake rupture occurred beneath the historic city of Lorca because the faulting subsurface rupturing runs below the Lorca village.

- With these data and their inclusion in the Environmental Seismic Intensity Scale ESI-07, this preliminary geological report will improve the information of historical earthquakes and epicentral location, improving the knowledge of the seismic process in Spain.



## 7. References

Giner-Robles, J.L. M.A. Rodríguez-Pascua, R. Pérez-López, P.G. Silva, T. Bardají, C. Grützner and K. Reicherter. (2009). Structural Analysis of Earthquake Archaeological Effects (EAE): Baelo Claudia Examples (Cádiz, South Spain), vol. 2, 130p. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid. DEP. LEG.: M-27206-2009.

Giner-Robles, J.L. P.G. Silva, R. Pérez-López, M.A. Rodríguez-Pascua, J. Lario, T. Bardají. (2011). Evaluación del daño sísmico en edificios históricos y yacimientos arqueológicos: aplicación al estudio del riesgo sísmico. Proyecto EDASI, Fundación MAPFRE. En prensa.

Martínez Díaz, J.J. (1998). Neotectónica y Tectónica Activa del Oeste de Murcia y sur de Almería (Cordillera Bética). Tesis Doctoral. Universidad Complutense Madrid. 470 pp.

Martínez Díaz, J.J., E. Masana, J.L. Hernández-Enrile Y P. Santanach (2001). Evidence for coseismic events of recurrent prehistoric deformation along the Alhama De Murcia Fault, Southeastern Spain. *Geológica Acta*, (antes *Acta Geológica Hispánica*). 36 (3-4): 315-327.

Martínez Díaz, J.J. y J.L. Hernández-Enrile (2001). Using travertine deformations to characterize paleoseismic activity on an active oblique-slip fault: the Alhama de Murcia Fault (Betic Cordillera-Spain). *Geologica Acta*, (antes *Acta Geológica Hispánica*) 36 (3-4): 297-313.

Martínez-Díaz, J. J. (2002). Stress field variety related to fault interaction in a reverse oblique-slip fault: the Alhama de Murcia Fault, Betic Cordillera, Spain. *Tectonophysics*, 356: 291-305.

Rodríguez-Pascua M.A.; R. Pérez-López; J.L. Giner-Robles; P.G. Silva; V.H. Garduño-Monroy and K. Reicherter. (2011). A Comprehensive Classification of Earthquake Archaeological Effects (EAE) in Archaeoseismology: application to ancient remains of Roman and Mesoamerican cultures. *Quaternary International*, doi:10.1016/j.quaint.2011.04.044.

Rodríguez-Pascua, M.A.; Pérez-López, R.; Giner-Robles, J.L.; Silva, P.G.; Garduño-Monroy, V.H.; Reicherter, K. (2010). Nueva tabla de clasificación de Efectos Arqueológicos de Terremotos. *Tierra y Tecnología*. 38: 59-65.

Silva, P.G., Goy, J.L., Zazo, C., Lario, J., Bardají, T. 1997. Paleoseismic indications along "aseismic" fault segments in the Guadalentín depression (SE Spain). *J. Geodynamics* 24(1-4), 105-115.

## ANEXO 1. Brief outline on the seismic hazard in the area

Translated literally by the author from the original report in Spanish

*Julián García Mayordomo (IGME)*

The seismic hazard at which the city of Lorca is subjected to (and, in general, the Murcia Region and Southeast Spain) has been analysed many times and by very different approaches. Not in vain the dwellers of Lorca municipality and nearby territories know that they lived under this natural risk.

Looking back to the past the last damaging earthquakes in Spain have located in Murcia Region (1999 Mula, 2002 Bullas, 2005 La Paca, and now 2011 Lorca). Likewise, the history of this territory is marked by the occasional occurrence of more or less strong earthquakes (see: [www.ign.es/ign/layout/sismologiaEstadisticasCartografiaSismica.do](http://www.ign.es/ign/layout/sismologiaEstadisticasCartografiaSismica.do)). The municipality of Lorca itself have appointed studies on this topic several times, as for example the pioneer study carried out by the Institute of Geology and Mines of Spain (IGME, Instituto Geológico y Minero de España) in 1992. Furthermore, Civil Protection of Murcia Region counts on with a modern special emergency plan against seismic risk (Plan Especial de Protección Ante el Riesgo Sísmico, see: [www.112rm.com/dgsce/planes/sismimur-home.php](http://www.112rm.com/dgsce/planes/sismimur-home.php)). On a national-scale legislative level, the construction or restoration of buildings in Lorca municipality is subjected to the obligatory accomplishment of the national seismic resistant code (Figure 1, see: [www.fomento.es/MFOM/LANG\\_CASTELLANO/DIRECCIONES\\_GENERALES/INSTITUTO\\_GEOGRAFICO/Geofisica/sismologia/ingss/normageneral-pdf.htm](http://www.fomento.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/INSTITUTO_GEOGRAFICO/Geofisica/sismologia/ingss/normageneral-pdf.htm)).

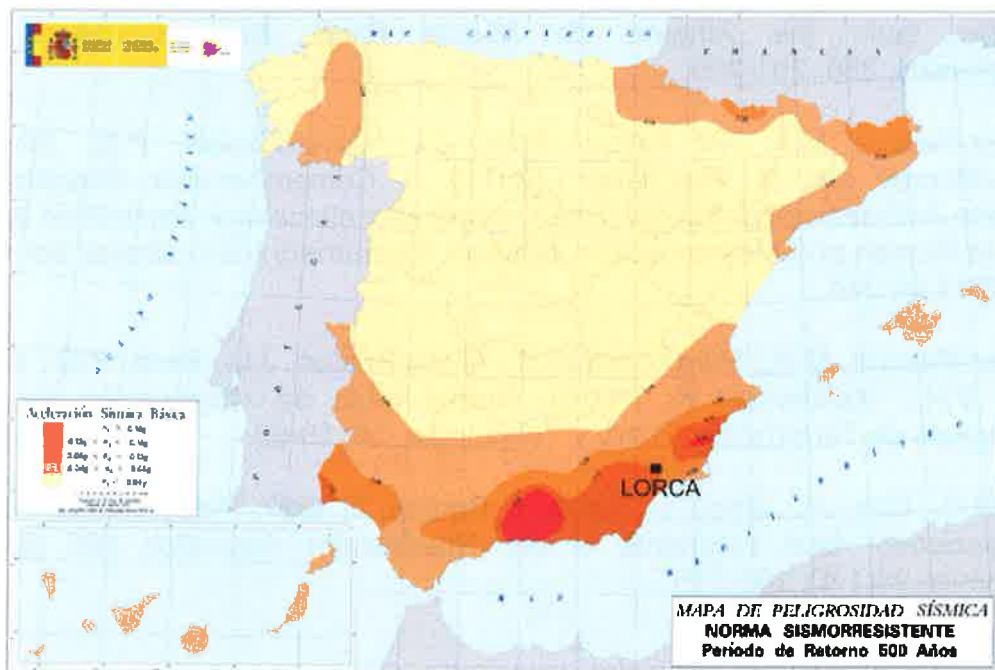
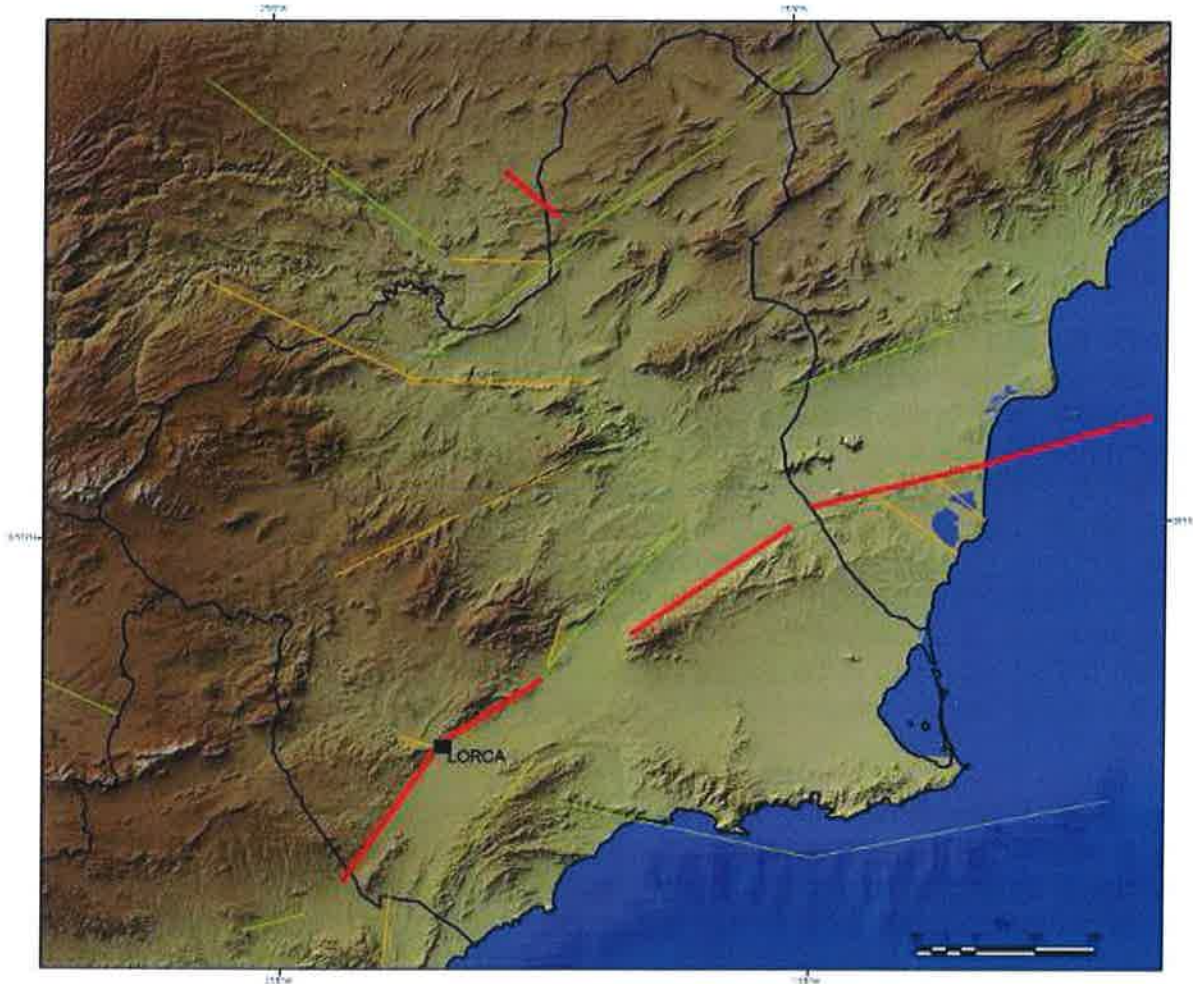


Figure 1: Location of Lorca city in the seismic hazard map included in the Spanish seismic code (NCSE-02).

In the Spanish context, Lorca is situated in a moderate seismic hazard zone in relation to other territories like Granada and the south of Alicante. This is because the calculation done to produce the map is strongly controlled by the knowledge we have of earthquakes happened in the historical past (in fact, two of the most destructive earthquakes in Spain in the last 100 years have taken place in these areas: 1884 Arenas del Rey and 1829 Torrevieja, respectively). However, from a geological point of view, Lorca is an area subject to a high seismic hazard.

Seismic hazard in Lorca city is controlled by two Basic types of sources capable of producing damaging earthquakes (García-Mayordomo, PhD Thesis UCM, 2005). (1) Known or unknown faults, which will presumably not produce earthquakes larger than 5.5-6.0, and (2) the Alhama de Murcia Fault. Concerning the first case, a recent scientific study (Gaspar-Escribano et al., 2008, BEE:6, 179-196) estimates that the most probable earthquake for a 500 years return period (which is the one considered legally for the construction of habitational buildings) would have a magnitude of the order of 5.0, very similar to the 11 May main shock). In this sense, it could be considered that Lorca has been put to the test with the strongest earthquake that conventional buildings should resist without collapse. However, there are still many questions to be explained, like the high acceleration recorded (0.37g) in relation to the basic design acceleration that the seismic code provides for building in Lorca (0.12g).

Regarding the possibility that really catastrophic earthquakes take place in Lorca, the most likely source is the Alhama de Murcia Fault itself, which delineates the contact between the ranges and the basin from approximately Puerto Lumbreras to nearby the city of Murcia, totalling a longitude of about 85 km. It is estimated that this fault is capable of producing earthquakes between 6.5-7.0 every 2000 years (information from Martínez-Díaz et al., 2010, in the *Quaternary Active Faults Database of Iberia*) (Figure 2). In the Region of Murcia exist other faults also capable of producing big earthquakes, likely with catastrophic consequences, with a high frequency in the geological sense (eg, once every few thousand years). An important shortcoming is that we do not know the date of the last big earthquake that these faults produced, which is a fundamental question for predicting the next one, and that it only can be solved through geological research.



*Figure 2: Situation of the main major active faults in the Region of Murcia. In red are marked faults capable of producing big earthquakes with relative frequency (every thousand years). Note that the Alhama de Murcia Fault crosses the town of Lorca. Source: Quaternary Active Faults Database of Iberia (a ongoing project by IGME in collaboration with earth science researchers from Spanish and Portuguese universities and research centres).*

The 11th May 2011 earthquakes in Lorca are going to boost research and innovation in all the areas involved in preventing and mitigating seismic risk in Spain (geology, seismology, engineering, architecture, civil protection, citizen education, legislation). the lessons we learn today will serve to reduce losses and save lives tomorrow.