

Tectónica activa de la falla de Calamocha en la fosa del Jiloca

Leticia Martín

RESUMEN. Algunas de las estructuras más representativas del entorno de la Comarca del Jiloca están generadas por fallas extensionales. En concreto, al NE de la localidad de Calamocha se encuentra la falla de Calamocha. Una falla normal de dirección NW-SE que constituye un escalón separando la Fosa del Jiloca en el bloque hundido, al SW, de la cuenca de Calatayud-Montalbán situada en su bloque levantado. La construcción de la Autovía Mudéjar nos desvela uno de los principales afloramientos de esta falla a su paso por la localidad de Calamocha. Gracias a esto se han podido realizar estimaciones de su antigüedad y deducir, de este modo, que se trata de una falla activa con evidencias de actividad tectónica durante el Pleistoceno superior.

ABSTRACT. Some of the most representative structures of Comarca del Jiloca area are generated by extensional faults. In particular, at the NE of Calamocha is located the fault of Calamocha. A normal fault, with NW-SE direction, which constitutes a step between Fosa del Jiloca at the hanging wall, and Calatayud-Montalbán basin located in the foot wall. The built of Mudéjar highway, as it passes by the NE of Calamocha, reveals one of the main outcrops of this fault. Because of this fact it was possible to estimate its age and realize it is an active fault which shows evidence of tectonic activity during the upper Pleistocene.

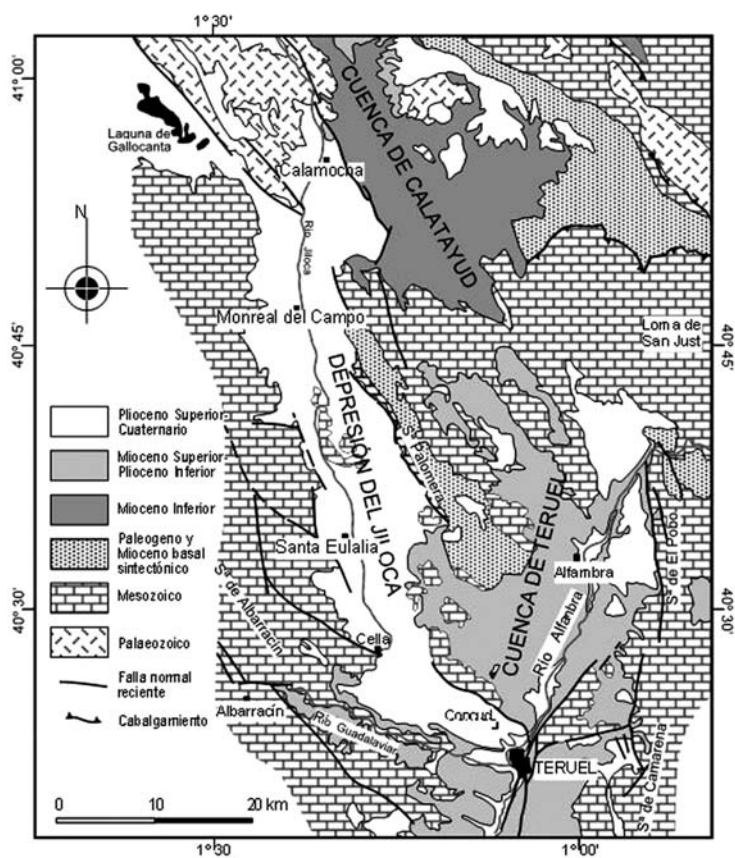


Figura 1. Localización geológica de la Falla de Calamocha (Simón *et al.* 2012).

1. Introducción

1.1. Situación geográfica y geológica

La falla de Calamocha se sitúa próxima a la localidad de Calamocha, al NW de la provincia de Teruel. Se encuentra en la parte central de la Cordillera Ibérica, donde predomina un relieve accidentado con cotas que varían entre 800 m en las zonas más bajas y 1.500 en las zonas más altas (sierras de Berrueco y de Herrera). Esta falla es una de las que limita la fosa del Jiloca, una depresión que se extiende a lo largo de 60 km, con cotas comprendidas entre 900 y 1.100 m.

El curso fluvial principal es el río Jiloca, con una dirección S-N. También destaca el río Pancrudo, afluente por la derecha del Jiloca. La zona de estudio queda limitada por el río Jiloca en su margen oeste y por el río Pancrudo en su margen este. En el centro de ambos se encuentra la falla de Calamocha.

Esta falla presenta una dirección NW-SE y constituye un escalón que separa la Fosa del Jiloca (bloque hundido, al SW) de la cuenca de Calatayud-Montalbán (situada en su bloque levantado, al NE; Fig. 1). La falla, probablemente, se formó como resultando de la compresión alpina durante el Paleógeno para sufrir luego una inversión negativa durante la extensión neógeno-cuaternaria y ser reactivada como falla normal, tal como es ahora.

1.2. Antecedentes

La línea de fallas de Calamocha-Daroca forma un tramo del borde SW de la cuenca de Calatayud, separando cartográficamente los materiales neógenos inferiores que rellenan ésta de las unidades cámbricas pertenecientes al macizo paleozoico de Ateca-Daroca.

La cuenca de Calatayud (Fig. 1) se originó a comienzos del Mioceno, quizá todavía bajo un régimen de deformación compresiva o transpresiva, estando su borde suroeste determinado por cabalgamientos de bajo ángulo como el de Daroca. Posteriormente, a partir del Mioceno superior, esta zona de falla sufrió una inversión negativa o reactivación extensional (García *et al.*, 1988), en el contexto del proceso de *rift* bajo el que nace el Surco de Valencia (Simón, 1983, Roca y Guimerá, 1992). Finalmente, en el Plioceno se desarrolla, ya de forma completa, la cuenca NNW-SSE del Jiloca en el marco de un episodio extensional tardío que dura hasta la actualidad y que se caracteriza por un régimen de extensión radial o multidireccional con una dirección de extensión dominante ENE-WSW (Simón, 1983, 1989). Esta fosa es rellenada por una serie, de espesor en torno a 200 m, que incluye una unidad mar-

gosa inferior de edad desconocida y un conjunto detrítico superior atribuido al Plioceno superior-Cuaternario (Rubio y Simón, 2006).

La falla de Calamocha constituye el segmento más suroriental de la línea de fallas de Calamocha-Daroca y en su estructura se pone de manifiesto ya completamente su carácter extensional. Es también la más septentrional de las tres fallas normales que conforman el borde oriental de la fosa del Jiloca (junto con las de Sierra Palomera y Concud). Pone en contacto el Paleozoico y el Mioceno inferior-medio de la cuenca de Calatayud, en el bloque levantado, con materiales del Plioceno y Cuaternario en el bloque hundido.

Su actividad cuaternaria viene atestiguada por el hecho de que depósitos de esta edad, datados concretamente en 70.000 años (Simón *et al.* 2012), se encuentran cortados por ella. Esto la convierte en una falla activa. Su actividad cuaternaria esta siendo evidenciada por un estudio paleosismológico que se lleva a cabo en el área de Geodinámica Interna del Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Zaragoza bajo la dirección de José Luis Simón. Este tipo de estudios están desarrollándose en fallas activas de la Cordillera Ibérica desde hace muy pocos años, habiéndose limitado hasta el presente a las fallas de Concud (Lafuente *et al.* 2010), Munébrega (Gutiérrez *et al.* 2009) y Teruel (Simón *et al.*, estudio en preparación).

1.3. Objetivos y metodología

Los objetivos principales que se abordan en este trabajo son:

1. Completar un modelo estructural y evolutivo de la falla de Calamocha.
2. Evaluar su actividad extensional plio-cuaternaria y estimar su tasa de movimiento.

La metodología seguida para la consecución de estos objetivos incluye varias etapas de trabajo:

1. Elaboración de una cartografía geológica a escala 1:25000 de la falla y su entorno. Esta cartografía se basa en la cartografía del MAGNA existente, revisada y completada con nuevas observaciones de campo, estudio de fotografía aérea e imágenes de satélite de alta resolución (SITAR).
2. Toma de datos estructurales en campo (orientación de fallas y fracturas, etc.) y elaboración de tres cortes estructurales a través de la falla, basados en la cartografía 1:25.000 y en los datos tomados en campo.
3. Estudio en detalle del sector de la Autovía Mudejar, a través de tres trazas de falla que permiten interpretar la actividad reciente global de la falla de Calamocha.

2. Materiales

En este apartado se describen las distintas unidades estratigráficas presentes en la zona y que están afectadas por la falla de Calamocha.

2.1. Paleozoico

El Paleozoico se encuentra representado por cuarcitas del Cámbrico superior y medio. Aflora en la parte oeste del cauce del Jiloca, formando una franja de dirección NW-SE paralela al río en la parte norte de la zona de estudio. Su potencia máxima es de unos 200 m.

2.2. Cenozoico

2.2.1. Terciario

Los materiales terciarios encontrados en la zona de estudio aparecen en casi su totalidad en el bloque oriental de la falla y todos ellos corresponden al Neógeno. Los materiales miocenos aflorantes están constitutos por sedimentos detríticos, carbonatados y evaporíticos, depositados en régimen continental. El Plioceno se encuentra representado al W de la falla formando parte del relleno de la fosa del Jiloca. Para la descripción de las unidades terciarias utilizaremos en parte la nomenclatura informal propuesta en la cartografía MAGNA (Hernández *et al.* 1983; Rubio y Simón, 2006).

Rojo 0

Se trata de conglomerados silíceos, limolitas y arcillas rojas, y su edad es Ageniense Superior-Aragoniense Medio (Hernández *et al.* 1983). Se localiza sobre el margen derecho de la falla de Calamocha, a orillas del río Pancrudo (Fig. 1). Esta unidad presenta hasta los 200 m de espesor.

Morfológicamente se presenta como un relieve no muy abrupto con incisión lineal y formación de cárcavas (Fig. 2). Se deposita sobre materiales paleozoicos y mesozoicos.

Esta unidad puede dividirse en tres subunidades a partir de sus relaciones laterales y verticales con los tramos carbonatados que se describen a continuación. Aunque la litología de todas ellas es similar, puede distinguirse un Rojo 0-A con predominio de lutitas grises con yesos, un Rojo 0-B formado por limolitas y arcillas de tonos anaranjados amarillentos, y un Rojo 0-C caracterizado por capas de conglomerados de base erosiva y con cantos subredondeados (Fig. 2). El medio sedimentario corres-

pondería en su tramo basal a zonas medias o distales que van evolucionando de abanicos aluviales a medios palustres hacia techo de la unidad (Hernández *et al.* 1983).



Figura 2. Unidades miocenas correspondientes al Rojo 0-C, en tonos rojos intensos, depositado sobre el Rojo 0-B, de tonos naranjas y amarillentos, sobre una unidad más blanquecina correspondiente a margas con yesos atribuible a las Calizas de Nombrevilla 1.

Calizas de Nombrevilla

Esta unidad engloba todos los niveles carbonatados correspondientes al Aragoniense y se sitúa en la parte sureste de la zona de estudio (Fig. 1). Estos materiales tienen un espesor máximo acumulado de unos 180 m en la parte oriental, que va disminuyendo hasta casi desaparecer hacia el NW, donde comienzan a interdigitarse con los niveles detríticos.

Dentro de esta unidad se han diferenciado distintas subunidades según sus características: Calizas de Nombrevilla 1, 2 y 3. Las primeras corresponderían a estas unidades más lutíticas con cristales de yeso. Las Calizas de Nombrevilla 2 se distinguen por la presencia de capas tabulares de calizas blancas (Fig. 2). Por último, las Calizas de Nombrevilla 3 están compuestas de estratos de calizas mejor definidos con presencia de intensa bioturbación.

Rojo 2

Esta unidad puede atribuirse ya al Mioceno superior y la forman limolitas y margas amarillentas y rojas en un pequeño afloramiento próximo a la Venta de los Céntimos. Se encuentra discordante sobre materiales miocenos más antiguos y presenta una potencia de 50-80 m.

Páramo 2

Al igual que la unidad anterior, ésta también aflora junto a la carretera de Calamocha a Luco en la zona de la Venta de los Céntimos. Su edad se atribuye al Rusciniense (Hernández *et al.* 1983). En el afloramiento aparecen 20 m de calizas y calizas margosas en bancos métricos con intercalaciones de margas blancas y arcillas negras.

Rojo 3

Litológicamente está constituida por limolitas y arcillas rojas con intercalaciones arenosas y niveles conglomeráticos de hasta 1 m de potencia. Pertenecen al Rusciniense-Villafranquense.

Glacis villafranquense

Esta unidad se encuentra ampliamente representada en el ámbito de la zona. Está localizada fundamentalmente en la margen derecha del Jiloca, constituyendo una extensa superficie de glacis (glacis de Fuentes Claras) limitada al Este por la falla que lo separa de los sedimentos miocenos y al oeste por el río Jiloca (Fig. 1). La potencia de la unidad es muy variable, normalmente comprendida entre 2 y 10 m. Su edad es Villafranquense.

2.2.2. Cuaternario

Los materiales pertenecientes al Cuaternario son conglomerados y brechas sueltas con matriz limo-arcillosa. Muchos de ellos forman abanicos al pie de las sierras paleozoicas y a lo largo de la falla de Calamocha. Su potencia observada es de unos 15 m.

3. Estructuras tectónicas

3.1. Introducción

La falla de Calamocha se reactivó durante el Mioceno con movimiento extensional afectando a todas las unidades estructurales presentes, desde el basamento Cámbrico hasta la cobertera postorogénica terciaria y cuaternaria. Pone en contacto el relleno de la fosa del Jiloca, pliocuaternario, al SW con los materiales de la Cuenca de Calatayud, miocenos, al NE. A partir del estudio estructural detallado de esta falla es posible calcular la magnitud de su salto. Además del momento en el que se originó, teniendo presentes desde el principio que podría tratarse de una falla activa.

3.2. Descripción estructural

La cartografía de detalle llevada a cabo en este trabajo (Anexo I. Mapa geológico) revela la geometría de las distintas estructuras que van a ser brevemente descritas en este apartado. Se hará uso de los tres cortes detallados, los cuales se realizaron perpendiculares a la traza de la falla. El corte A-A' se sitúa en la parte norte de la zona de estudio, el corte B-B' corresponde a la zona central (Autovía Mudéjar), y el corte C-C' se sitúa en el extremo sur (Anexo I).

La estructura perteneciente a la **parte norte** de la zona de estudio muestra el claro contacto entre materiales del Rojo 2, pertenecientes al Mioceno Superior, y los materiales paleozoicos, lo que indica la falla de Calamocha en ese límite. El plano de falla tiene un buzamiento elevado hacia el SW, con los materiales más jóvenes pertenecientes a las unidades Rojo 3, Páramo 2 y Rojo 2 en el bloque superior, en un contacto de falla normal.

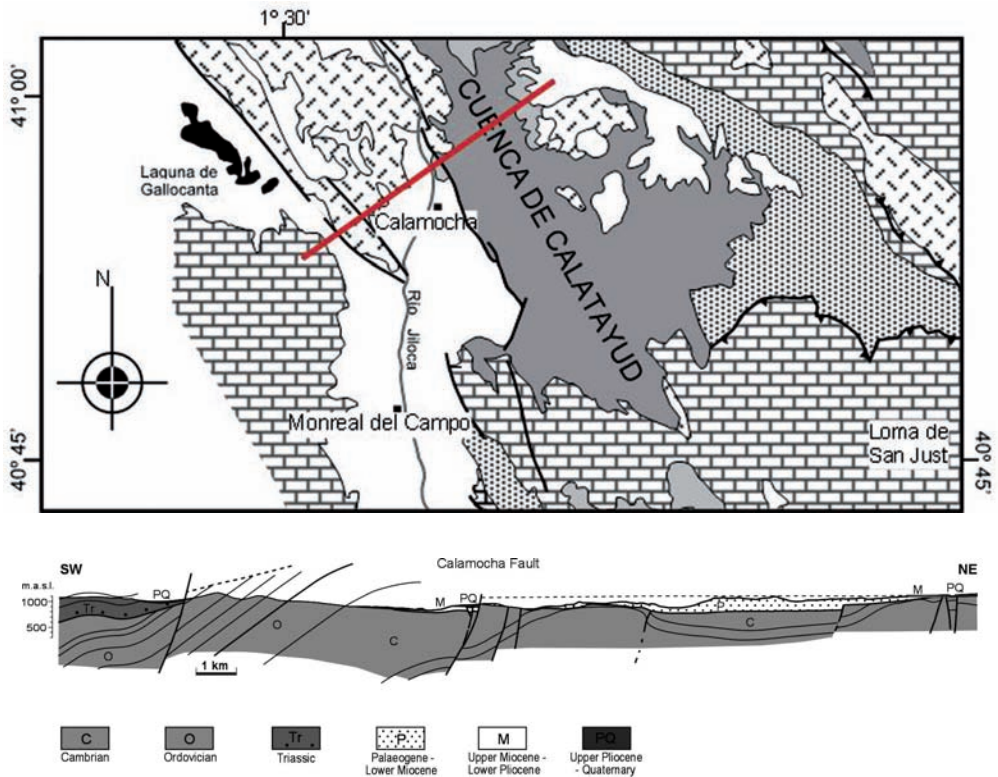


Figura 3. Arriba: Localización del corte (línea roja) realizado por Rubio y Simón (2006). Abajo: Corte de la falla de Calamocha realizado por Rubio y Simón (2006). La línea discontinua de la derecha indica el marcador correlacionado con el contacto Rojo 2-Páramo 2, a partir del cual se estima el salto de falla.

La estimación del salto de falla en este tramo se hace a partir del estudio previo realizado por Rubio y Simón (2006). Estos autores correlacionan los materiales limoso-detríticos anaranjados correspondientes al límite de la unidad Rojo 2 con la unidad Páramo 2 que afloran en el bloque hundido, interpretando que hacia el NW se corresponderían aproximadamente con una unidad detrítica adosada al borde de la cuenca (unidad 38 de la cartografía MAGNA, hoja n° 491, *Calamocha*) y que Hernández *et al.* (1983) atribuyen al Plioceno inferior. El salto indica un desplazamiento vertical de 140 m (Fig. 3).

Así pues, el corte A-A' (Fig. 4) corresponde a la zona central del corte realizado por Rubio y Simón (2006). Una falla normal en la que el bloque inferior se encuentra depositado el Rojo 0-C con un buzamiento suave hacia el NE, discordante sobre el Paleozoico (Anexo I). La unidad Rojo 0-C aumenta de espesor hacia el NE como consecuencia del relleno de la Cuenca de Calatayud. Sobre el Rojo 0-C se depositan el Rojo 2 y Páramo 2, acuñándose hacia el NE al acercarse al límite del relleno de la Cuenca del Jiloca. La línea discontinua entre estas dos unidades (Fig. 4 A-A') marca la correlación realizada en el corte de Rubio y Simón (2006) (Fig. 3) a partir de la cual se estima el salto de falla.

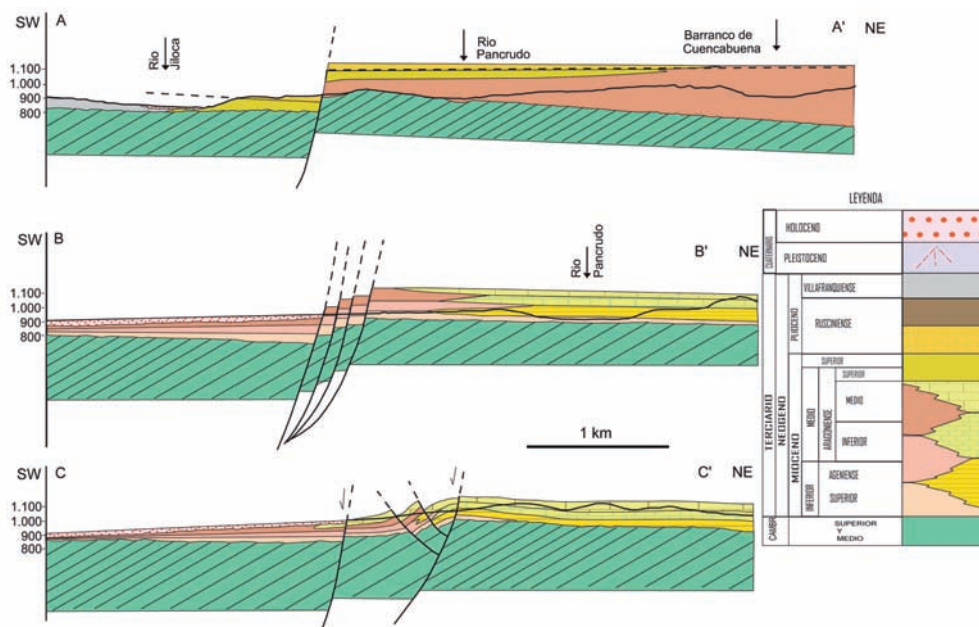


Figura 4. Tres cortes situados en el Mapa geológico que muestran tres secciones de la Falla de Calamocha. A-A' corresponde a la parte norte, B-B' a la parte central y C-C' a la parte sur.

En el bloque superior se depositan los materiales del Rojo 2 y Páramo 2 discordantes sobre el Paleozoico. Sobre estos se depositan, por un lado, en el cauce del río Jiloca, materiales del Cuaternario y, por otro, en el margen SW, los glaciares del Villafranquense procedentes del oeste depositándose directamente sobre el Paleozoico.

Hacia la **zona central**, la falla de Calamocha varía su dirección de ENE-WSW a NW-SE y N-S, para volver a recuperar luego la dirección principal NW-SE. A lo largo de esta zona la falla pone en contacto materiales miocenos del Rojo 0-C con materiales del Pleistoceno. Estos últimos se generan como consecuencia de la erosión de los materiales del Mioceno, y se observan pequeños glaciares con pendiente orientada de NE a SW, perpendiculares a la dirección de la falla.

El estudio de la zona central es el más exhaustivo puesto que la construcción de la Autovía Mudéjar generó excelentes afloramientos donde poder llevar a cabo un estudio detallado de la falla de Calamocha. En esta zona se distinguen hasta cuatro ramas sintéticas en las que se divide la falla de Calamocha (Fig. 4 B-B'). Dos de ellas son trazas principales, la sur y la norte, que afloran en los taludes de la Autovía Mudéjar y serán descritas más adelante con detalle (*Ver 3.3.1. Falla de Calamocha a escala mesoscópica*). Estas fallas ponen en contacto distintos niveles de materiales del mioceno pudiendo llegar a estar unidas en profundidad, con un salto mínimo de 210m (Fig. 4 B-B').

En el bloque inferior, hacia el norte, se observa un aumento de las calizas y margas grises con cristales de yeso. Se trata de una zona compleja en la que el espesor de detríticos es claramente mayor en la zona norte mientras que en el sur aumenta el espesor de calizas.

En el bloque inferior de la zona central (Anexo I), bajo Rojo 0-C, afloran las subunidades Rojo 0-B y Rojo 0-A, con intercalaciones de materiales de las Calizas de Nombrevilla. La relación entre estas unidades se puede explicar como un cambio lateral de facies en el que, las subunidades del Rojo-0 se intercalan con las subunidades de las Calizas de Nombrevilla (Anexo I).

La **zona sur** se encuentra en su margen oeste cubierta por glaciares del Villafranquense, desembocando en el margen derecho del río Jiloca, y glaciares cuaternarios en contacto con la falla (Anexo I).

El bloque inferior de la falla presenta tres fallas de menor envergadura, dos de ellas antitéticas (Fig. 4 C-C'). Estas fallas afectan a las unidades Rojo 0-C y Calizas de Nombrevilla 3. La situada más al SW es una sintética a la falla principal. Las dos fallas comprendidas entre ambas son fallas antitéticas. Éstas producen en bascula-

mientos de tipo *roll-over* con buzamientos hacia el suroeste (110,17 W) subperpendiculares a la dirección de las fallas (135,65 E).

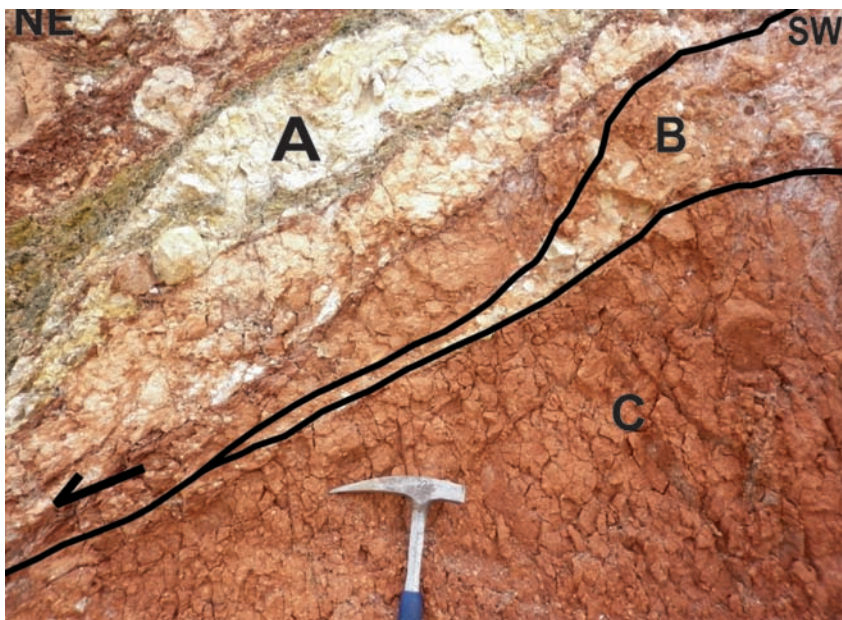
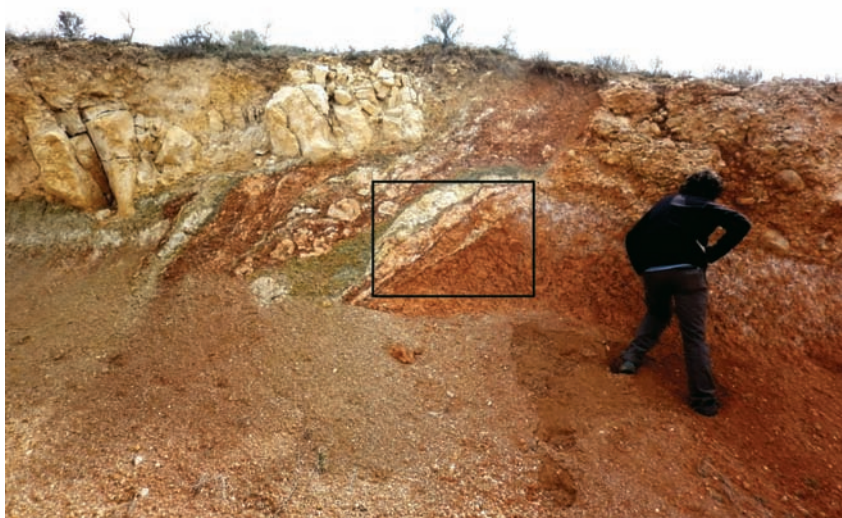


Figura 5. Arriba: Falla antitética del sector sur de la zona de estudio (180, 52 E, cabeceo 88 S). Abajo: Detalle de la falla antitética. (A) materiales del bloque superior, Calizas de Nombrevilla 3. (B) Nivel laminado de conglomerados pertenecientes al techo de los materiales Rojo 0-C. (C) Lutitas rojas de la unidad Rojo 0-C.

3.3. Estudio de detalle del sector central

En este apartado se describe la estructura de detalle de la falla de Calamocha a partir de las observaciones, a escala mesoscópica, llevadas a cabo en los taludes de la Autovía Mudéjar y en el Polígono Agroalimentario en las cercanías de Calamocha. Con ello estudiaremos la posible actividad que ha tenido durante el Cuaternario.

3.3.1. La falla de calamocha a escala mesoscópica. Aspectos geométricos y cinemáticos

El estudio a escala mesoscópica se ha llevado a cabo en el sector central de la zona de estudio (Fig. 9 B-B'); en concreto, en los afloramientos a los que dio lugar la construcción de la Autovía Mudéjar a su paso por la localidad de Calamocha.

Se han distinguido tres trazas de falla principales: la traza del Polígono Agroalimentario, la traza oeste y la traza este de los taludes de la Autovía Mudéjar (ver situación de todas ellas en el mapa geológico). En el mapa geológico aparece la traza de una cuarta falla paralela, situada al este de todas las anteriores, pero ésta no ha podido ser observada a escala de afloramiento y no podemos aportar más información sobre ella. En los apartados siguientes se describe cada una de las fallas estudiadas ordenadas de oeste a este.

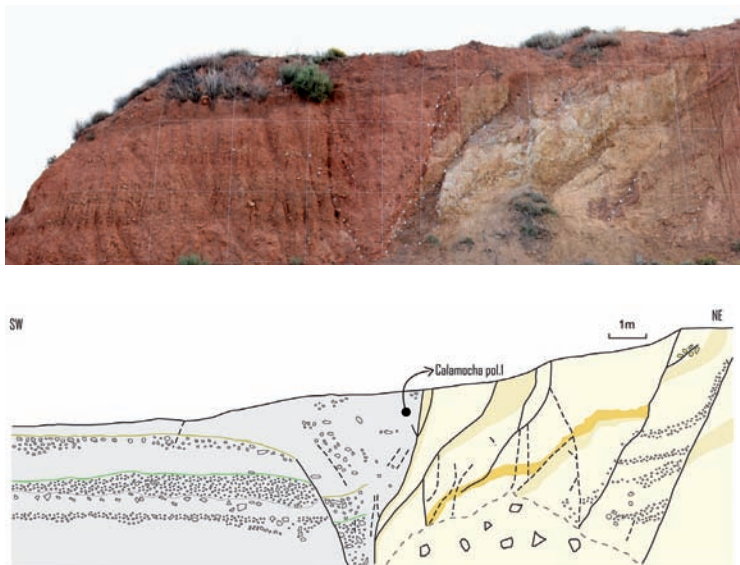


Figura 6. Falla del Polígono Agroalimentario. (A) Aspecto de campo del talud estudiado. (B) Corte de detalle: Pleistoceno en gris (bloque superior) y Rojo 0-C en tonos amarillos (bloque inferior). Calamocha pol. 1: situación de la muestra tomada para la datación por luminiscencia óptica (OSL). (C) Representación estereográfica de los planos y estrias de falla medidos en el corte.

Tectónica activa de la falla de Calamocha en la fosa del Jiloca

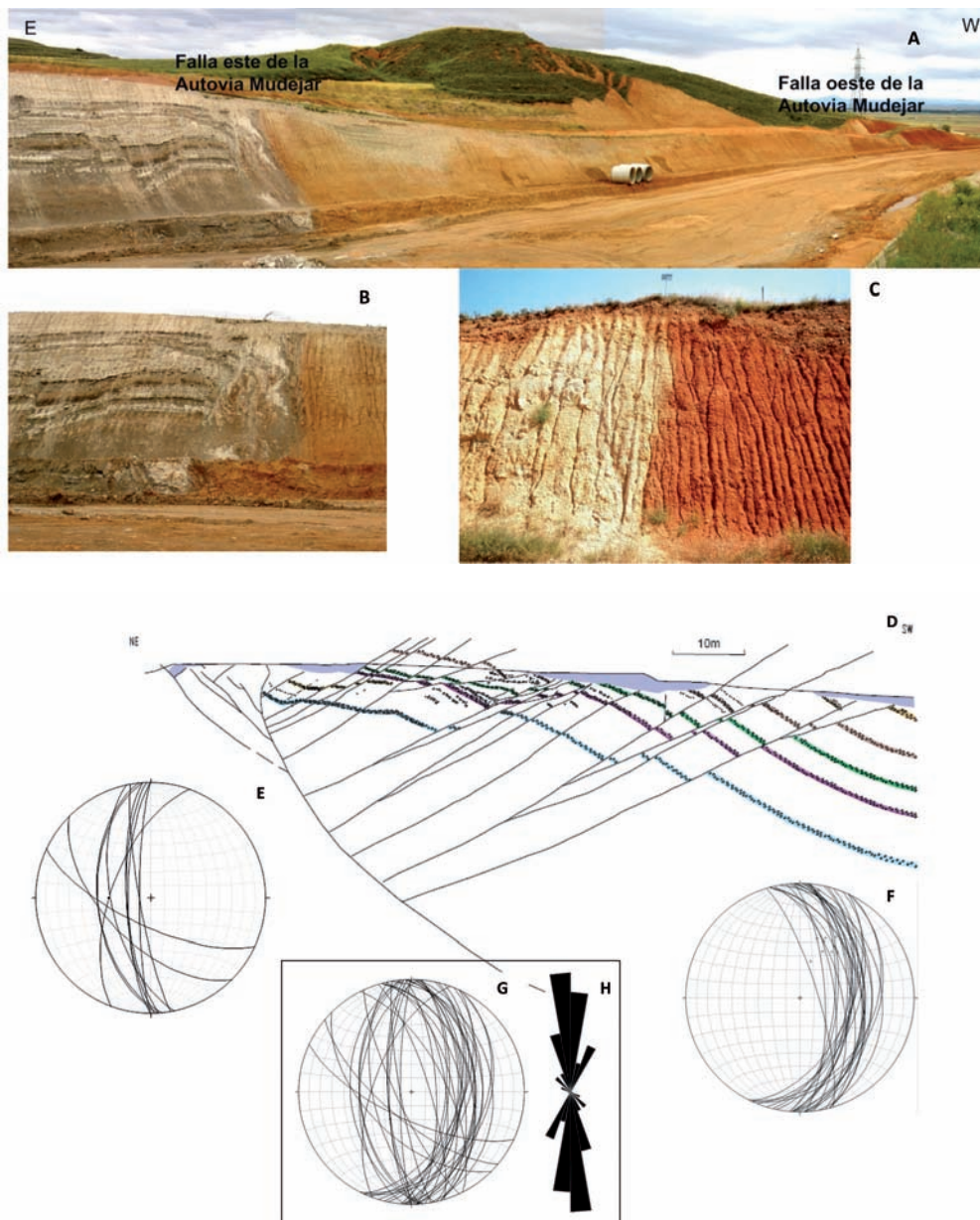


Figura 7. (A) Imagen panorámica de la falla de Calamocha en la que aparecen las trazas este y oeste de la Autovía Mudéjar, poniendo en contacto materiales del Mioceno pertenecientes a las Calizas de Nombrevilla 3, en tonos blancos y grises, al Rojo O-B, en tonos crema, y al Rojo O-C, en tonos rojizos más intensos, (B) Foto de detalle de la traza oeste de la Autovía Mudéjar. (C) Foto de detalle de la falla oeste de la Autovía Mudéjar. (D) Corte de detalle de falla de Calamocha correspondiente la traza oeste de la Autovía Mudéjar. (E) Representación estereográfica de las ciclográficas de los planos de fallas sintéticas pertenecientes al bloque inferior de la falla. (F) Ciclográficas de los planos de falla antitéticos del bloque superior (las cruces representan los polos de los planos de estratificación). (G) y (H) Representación estereográfica sintética de todos los planos de falla y su diagrama en rosa.

Falla del Polígono Agroalimentario

Por el oeste, aparece la zona de falla del Polígono Agroalimentario (Fig. 6). Esta falla pone en contacto los depósitos del Cuaternario, en el bloque superior, con la unidad Rojo 0-C.

En detalle, se pueden observar la mayor parte de planos de falla buzando hacia el suroeste (sintéticos con la falla principal) y algunos planos antitéticos. La mayor parte de los planos de rotura aparecen en el bloque inferior, afectando al Rojo 0-C. En el bloque superior sólo se observa una falla relevante, en este caso antitética, a un par de metros de distancia de la falla principal (Fig. 16B). Las fracturas muestran una dirección dominante NNW-SSE, con buzamientos mayoritariamente comprendidos entre 45° y 80° W, y estrías con cabeceos dispersos.

Falla oeste de la Autovía Mudéjar

La siguiente zona de falla hacia el este es la que pone en contacto los materiales de Rojo 0-C en el bloque superior con el Rojo 0-B en el bloque inferior (Fig. 7A). Se trata de una falla de dirección subparalela a la anterior y alto buzamiento ($171, 76^\circ$ W).

En el bloque inferior se observan otras fracturas y fallas sintéticas de menor tamaño, mientras que en el bloque superior aparecen gran cantidad de fallas antitéticas. Los estratos del bloque superior pueden seguirse gracias a niveles de cantos. La composición de los cantos es principalmente cuarcítica y aparecen costras carbonatadas a lo largo de algunos planos de estratificación. Las capas muestran un buzamiento entre 25° y 45° y direcciones en torno a WNW-ESE. Este bloque superior aparece fracturado por las numerosas fallas antitéticas (Fig. 6C). Estas fallas tienen saltos aparentes comprendidos entre 50 y 300 cm, que han sido evaluados a partir del desplazamiento que producen en diferentes niveles de gravas correlacionados a lo largo de todo o una parte del corte.

Las fallas sintéticas del bloque inferior presentan una dirección $170-180^\circ$ acorde con las de otros puntos de la falla, y buzamientos altos entre 50° y 80° W (Fig. 7E). Las direcciones de las fallas antitéticas del bloque superior se encuentran muy concentradas en dirección N-S y tienen buzamientos más pequeños, en algunos casos de sólo 30° E (Fig. 7F). Representadas las direcciones de todo el conjunto de fallas en un diagrama en rosa (Fig. 7G), se observa una dirección dominante clara de 175° .

Falla este de la Autovía Mudéjar

La traza de la falla este se observa, asimismo, con claridad en los taludes de la autovía (Fig. 8A y B). En su bloque levantado, al este, también afloran otras fallas de

menor salto (Fig. 8), tanto sintéticas como antitéticas, a una de las cuales se asocia un mecanismo de *roll-over* (Fig. 8A). Algunas forman claramente un sistema conjugado (Fig. 8B), y en varias han podido medirse estrías de falla.

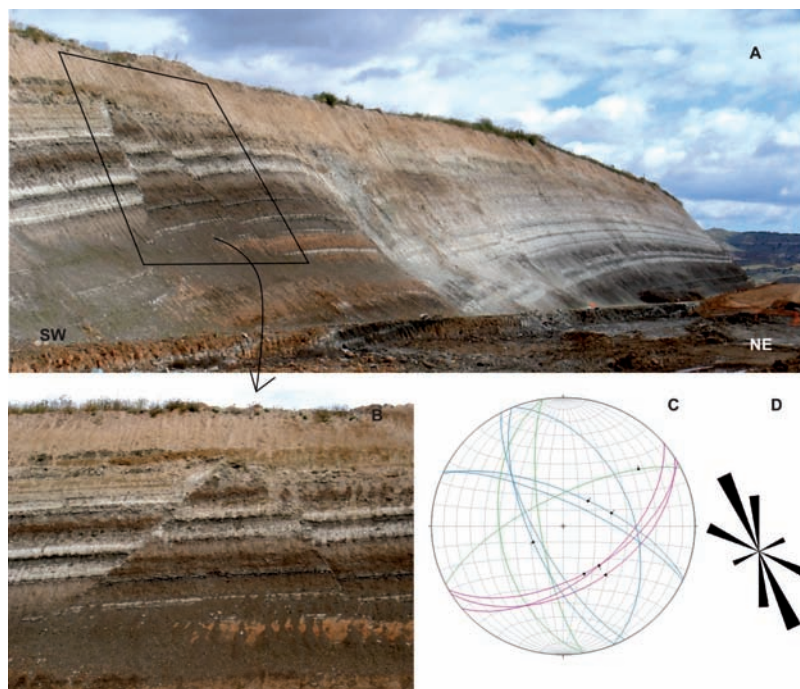


Figura 8. (A) Imagen panorámica de la traza norte de los taludes de la autovía, en la que se observa un anticlinal de *roll-over* en los materiales del Rojo O-A. (B) Fallas conjugadas aflorantes en los taludes de la autovía. (C) Representación estereográfica de todos los planos de falla y sus estrías medidos en los taludes de la autovía. (D) Diagrama en rosa de las direcciones de las fallas de los taludes.

3.3.2. Actividad cuaternaria

Este apartado se basa en el estudio de detalle realizado en dos de los afloramientos ya descritos: el Polígono Agroalimentario y la falla oeste de la Autovía Mudéjar. Estos cortes fueron estudiados mediante una metodología de estudio paleosísmico en el marco de una campaña de campo realizada con el equipo del proyecto de investigación que dirige el profesor J.L. Simón. Esto incluyó la limpieza de los taludes, la superposición de cuadrículas y la toma de fotografías, muestras y medidas de orientaciones de estratificación y planos de falla.

En ambos cortes de detalle se observan cómo ciertas fallas presentan movimientos que afectan a materiales del Cuaternario, y que por tanto han sido activas durante este periodo.

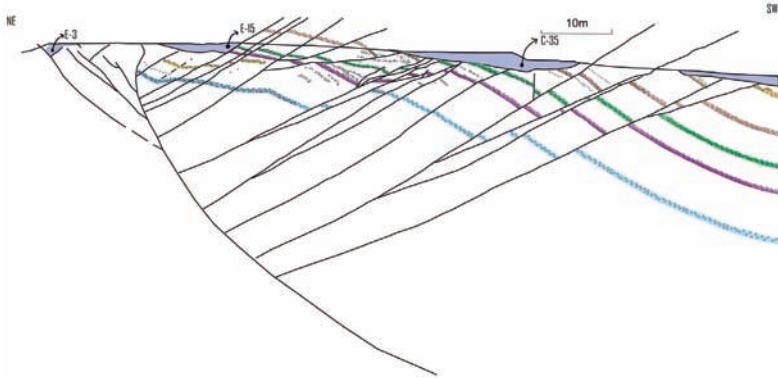


Figura 9. Corte sur de los taludes de la autovía en el que están indicadas las localizaciones de las dataciones OSL. Los materiales grisáceos corresponden a depósitos cuaternarios.

Como ya se ha comentado previamente, la falla oeste de la Autovía Mudéjar (Fig. 7C) pone en contacto los materiales del Rojo 0-B en el bloque inferior, muy fracturado, con los del Rojo 0-C en el bloque superior. En el bloque superior se observan gran cantidad de fallas antitéticas de dirección NW-SE y buzamientos entre 30° y 50° E.

Durante el estudio paleosismológico se realizaron varias dataciones de esos depósitos cuaternarios por medio del método de Luminiscencia Ópticamente Estimulada (OSL). En el bloque inferior la mayor parte de las fallas son sintéticas a excepción de dos pequeñas fallas antitéticas. Una de ellas pone en contacto materiales del Cuaternario con materiales del Rojo 0-C. En su bloque superior se realiza una datación (Fig. 9). En el bloque superior se observan otras fallas antitéticas fosilizadas por otro depósito cuaternario, lo que indica que las fallas se habrían formado previamente a estos depósitos. Se realizaron dataciones en ambos depósitos cuaternarios.

Los resultados obtenidos indican que se trata de materiales de edades muy recientes, todos ellos del Pleistoceno superior. Las muestras datadas en el talud de la Autovía Mudéjar se han situado en la Figura 9 y sus resultados son:

- Muestra E-3: 11.079 ± 882 años BP
- Muestra E-15: 35.311 ± 2311 años BP
- Muestra C-35: 53.144 ± 3654 años BP

Los materiales más antiguos (53.144 ± 3654 años BP) son los encontrados en la muestra C-35. Están depositados fosilizando varias fallas (Fig. 9). En cambio, otras fallas antitéticas, algunas de las más próximas a la falla principal, se han reactivado muy recientemente (hasta casi el Holoceno).

El corte del Polígono Agroalimentario muestra asimismo un contacto claro entre materiales del Cuaternario en el bloque superior y la unidad Rojo 0-C, con lo que también esta rama de la falla tiene actividad cuaternaria. En este caso las dataciones OSL muestran una edad del Pleistoceno superior algo más antiguo:

- Muestra Calamocha pol.1: 69.917 ± 5488 años BP

Estos resultados confirman que ha habido actividad recurrente en la falla de Calamocha durante el Pleistoceno Inferior y, por tanto, puede definirse como una falla activa.

3.4. Interpretación estructural, cinemática y evolución

La cartografía y los cortes presentados en los apartados anteriores permiten establecer el estilo y la relación geométrica de aquellas fallas individuales que se asocian dentro de la estructura global de la falla de Calamocha. Adicionalmente, a través de los dos cortes de detalle del Polígono Agroalimentario y de la Autovía Mudéjar se han podido precisar aspectos cinemáticos y dinámicos de las mismas, y verificar su actividad cuaternaria reciente.

En términos generales, a partir de lo que se observa en el mapa geológico (Anexo I), la falla de Calamocha presenta una dirección NNE-SSW con ciertas ramificaciones y cambios de dirección hacia N-S.

En el **sector norte**, la falla pone en contacto el Terciario (Plioceno) en el bloque superior, con el Paleozoico en el bloque inferior. Presenta una dirección aproximadamente 160 (no es posible medirla en un afloramiento). El único afloramiento en esa zona corresponde a dos pequeñas fallas sintéticas de dirección 170 que afectan al Plioceno. El salto vertical de la falla en este sector se estima en 140 m (Rubio y Simón, 2006).

En el **sector central** se encuentra el Cuaternario en el bloque superior en contacto con el Mioceno en el bloque inferior. En el mapa geológico la dirección de la falla parece ser N-S; sin embargo, según las medidas tomadas en los tres afloramientos principales, en esta zona la falla aparece dividida en, al menos, cuatro fallas. Es aquí donde se ha realizado el estudio de detalle en tres sectores: la traza del Polígono Agroalimentario, la traza oeste y la traza este de los taludes de la Autovía Mudéjar.

En el *Polígono Agroalimentario* la falla principal aflorante pone en contacto materiales del Cuaternario con materiales del Rojo 0-C. Las fallas adyacentes son en su mayoría sintéticas a esta principal excepto una antitética. El salto de falla estaría en torno a 35 m y sería la falla más reciente según la datación OSL.

La traza oeste de la Autovía Mudéjar pone en contacto materiales del Rojo 0-C, en el bloque superior, y Rojo 0-B, en el bloque inferior. Las fallas adyacentes son en su mayoría antitéticas a la principal y el salto de falla se estima en unos 50 m. La disposición de las fallas antitéticas en relación con los buzamientos que presentan los estratos indican una estructura difícil de interpretar:

- a) Por un lado las fallas antitéticas presentan un buzamiento más reducido, hasta 30° , de lo que, suelen presentar las fallas normales. Además, su disposición sugiere que podría tratarse de un sistema de fallas asociado a una estructura en roll-over, como resultado de la respuesta gravitacional del bloque superior al deslizamiento sobre una falla lítrica (Fig. 10A y B).
- b) Por otro lado, los estratos no muestran su buzamiento original de depósito, sino que se encuentran buzando hacia el SW con un ángulo máximo de 45° . Esto indica una estructura en gancho de falla o un monoclinal de acomodación.

Ambas deformaciones son, en principio, poco compatibles: una indica una disminución del buzamiento de la falla en profundidad y la otra sugeriría un aumento de buzamiento. Para explicarlo, hay que tener en cuenta que el buzamiento de las capas afectadas aumenta al alejarnos del plano de falla principal. Esto no es coherente con un gancho de falla simple, y sugiere que o bien más al oeste se produce un aumento del buzamiento de la falla, o bien ésta se conecta con otra falla enterrada sobre la cual se habría producido un monoclinal de acomodación. Esa falla podría ser la misma que aflora en el Polígono Agroalimentario, que hacia el SW es cubierta por los sedimentos cuaternarios.

Como consecuencia de este basculamiento, los planos de falla antitéticos basculan hacia el sur perdiendo su grado de inclinación inicial. Así mismo, los estratos afectados por las fallas antitéticas aumentan su buzamiento hacia el suroeste, para luego volver a disminuir.

El conjunto de estos factores, por tanto, indica la presencia de un gancho de falla generado por la activación del plano de falla del Polígono Agroalimentario (Fig. 10, C). Este gancho afecta a las capas previamente fracturadas en relación con la falla sur de los taludes de la Autovía Mudéjar y con su estructura de *roll-over*.

No obstante, la inclinación de los estratos del corte oeste de la Autovía Mudéjar hace pensar que el gancho de falla esté relacionado con otra falla no visible situada más al sur o con un cambio de dirección de la falla del Polígono Agroalimentario. De ahí que el buzamiento de los estratos sea hacia el sur.

La traza este de la Autovía Mudéjar pone en contacto materiales del Rojo 0-B en el bloque superior con el Rojo 0-A. Las fallas que aparecen en torno a este sector son

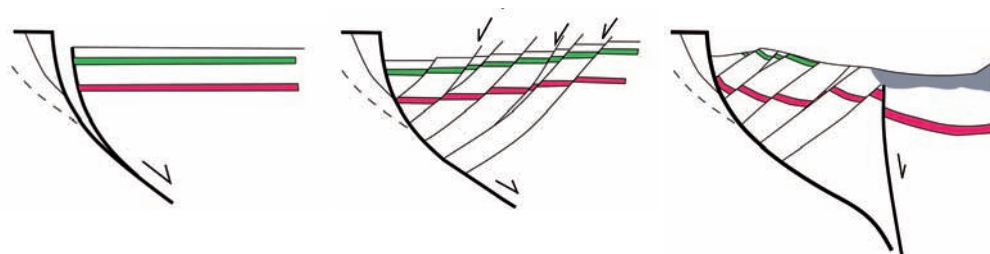


Figura 10. Esquema interpretativo de la evolución cinemática de las estructuras visibles en el talud de la Autovía Mudéjar. (A) Generación de la falla normal y el hipotético hueco que quedaría entre ambos bloques. (B) Estructura en *roll-over* como consecuencia de la generación de fallas antitéticas en el bloque superior. (C) Activación posterior de la segunda falla que genera la estructura de gancho de falla.

sistemas de fallas conjugadas y presentan un salto total de 60 m. El salto vertical acumulado en este sector (Fig. 9B), incluyendo todas las fallas descritas, sería de 210 m.

En el sector sur de la falla se ponen en contacto el glacis del cuaternario con las Calizas de Nombrevilla 1 y el salto de falla estimado sería de 160 m. La falla en este sector se disipa y en un afloramiento se puede observar una estructura de *roll-over* con dos fallas antitéticas.

El máximo desplazamiento de la falla se encuentra en el sector central con 210 m de salto vertical. El buzamiento medio del plano de falla es de 70-75°, y la dirección de movimiento, calculada a partir de las estrías de falla medidas en el afloramiento del Polígono Alimentario y en una falla de la Autovía Mudéjar, es hacia WSW (movimiento normal puro). Esto supone un salto neto máximo de la falla de Calamocha, en su movimiento extensional a lo largo del Plioceno superior-Cuaternario, de 220 m.

El periodo total que abarca este movimiento extensional sería de unos 3,6 millones de años, desde el inicio del Plioceno superior, probablemente igual que el que se ha interpretado para la falla de Concud (Simón *et al.*, 2010; Lafuente *et al.*, 2012). Esto supone una tasa de movimiento media de $220 \text{ m} / 3,6 \text{ Ma} = 0,06 \text{ mm/año}$.

Con todos estos resultados la evolución general la zona de estudio se podría resumir en lo siguiente: inicio con una posible etapa inversa de la falla; a continuación se produciría el relleno de la cuenca de Calatayud en su margen noreste; posteriormente se depositarían los materiales de Mioceno superior-Plioceno en su margen suroeste. Finalmente, bajo unos esfuerzos extensionales WSW-ENE, se produciría la inversión de la falla quedando como falla normal, que es la resultante actual (Fig. 11).

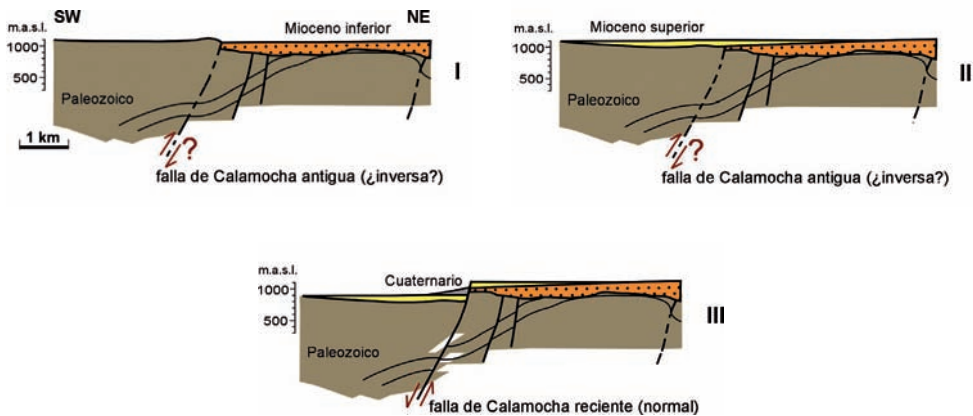


Figura 11. Representación de las etapas evolutivas que dan lugar a la falla de Calamocha actual. I. Falla de Calamocha inversa del Mioceno inferior que facilita el relleno de la cuenca de Calatayud. II. Erosión y depósito del Mioceno superior. III. Reactivación de la falla como normal.

4. Discusión

El estudio de la falla de Calamocha se ha abordado utilizando distintas metodologías que se complementan para poder caracterizar la estructura, su evolución y su actividad reciente. Resulta por ello interesante establecer comparaciones de los resultados obtenidos con otras fallas importantes de la zona que afectan a la fosa del Jiloca.

La depresión del Jiloca se encuentra unida a otras grandes depresiones como la de Calatayud y la cuenca de Teruel. Las tres fallas principales que limitan el margen este de la fosa del Jiloca son, de norte a sur, la falla de Calamocha, la falla de Sierra Palomera y la de Concud. Todas ellas tienen una dirección general Ibérica NW-SE.

Al igual que la falla de Calamocha, las fallas de Concud y Sierra Palomera fueron en origen estructuras extensionales formadas en la etapa de *rift* del Triásico superior, que posteriormente, en el curso de la tectónica compresiva paleógena, experimentaron una inversión positiva. A partir de mediados del Plioceno sufren una nueva inversión, esta vez negativa, momento en el que se genera la fosa del Jiloca, en el marco tectónico extensional del *rift* del Surco de Valencia. Se comportan desde entonces como fallas normales hasta la actualidad.

Resultan claras las similitudes entre las tres fallas. Todas ellas presentan edades similares y afectan a materiales de la misma época y siguen una misma dirección.

Los depósitos afectados datados mediante OSL, en la falla de Concud comprenden entre los 75.000 y 15.000 años BP (Simón et al., 2012), mientras que las de la falla de Calamocha, están comprendidos entre 69.917 ± 5488 y 11.079 ± 882 años BP. Ambas fallas presentan una magnitud de salto similar, entre 200 y 300 m, así como sus tasas de desplazamiento, 0.06-0.08 mm/a (Simón, 2012). En cambio, para la falla de Sierra Palomera se estima un mayor salto de falla, 400-440 m. Este echo podría deberse a que las fallas de Calamocha y Concud se sitúan en los extremos NW y SE, respectivamente, de la fosa del Jiloca, donde la acumulación de sedimentos y el desarrollo de estas fallas ha sido menor que en el sector central donde se sitúa la falla de Sierra Palomera.

En cualquier caso se trata de tres fallas de actividad cuaternaria. En concreto, la falla de Calamocha ha mostrado evidencias de esta actividad, descritas en este trabajo y visibles en afloramientos como el de la falla del Polígono Agroalimentario.

5. Conclusiones

El estudio de la falla de Calamocha se ha abordado utilizando distintas metodologías, como son una cartografía geológica o cortes de detalle que se complementan para poder caracterizar la estructura, su evolución y su reciente actividad.

En las inmediaciones de la falla aparecen materiales del Paleozoico, aunque predominan los materiales del Terciario y Cuaternario. La falla pone en contacto el Cuaternario, en su bloque hundido, con el Mioceno perteneciente a la Cuenca de Calatayud, al NE.

La falla de Calamocha presenta una dirección NNE-SSW con ciertas ramificaciones y cambios de dirección hacia N-S. Los cortes realizados revelan la actuación de fallas sintéticas y antitéticas que conforman una zona de falla compleja. La máxima deformación se encuentra en el sector central, donde el desplazamiento neto acumulado de toda la zona de falla, incluyendo todas las fallas descritas, sería de 220 m, lo que supone una tasa de movimiento media de 0,06 mm/año.

Gracias al estudio de detalle realizado en dos afloramientos de gran calidad (Polígono Agroalimentario y falla oeste en los taludes de la Autovía Mudéjar) se observa cómo ciertas fallas presentan movimientos que afectan a materiales del Cuaternario. Los resultados obtenidos de dataciones OSL realizados en los cortes de detalle indican que se trata de materiales de edades muy recientes, todos ellos del Pleistoceno superior. Estos resultados indican actividad de la falla de Calamocha durante el Pleistoceno superior y, por tanto, se trata de una falla activa.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer la realización de este trabajo a todos los profesores que me han ayudado. También a mis padres, hermano y amigos de la universidad, quienes con su apoyo incondicional me han ayudado día a día. Y en especial, me gustaría agradecerle a mi tutor, José Luís Simón, todo el tiempo que me ha dedicado y todo lo que me ha enseñado, al igual que al resto de miembros del grupo de investigación con los que realicé la campaña de campo de paleosismología en junio de 2012: Carlos Liesa, Luis Arlegui y Lope Ezquerro.

6. Bibliografía

- GARCÍA, F.J., GUTIÉRREZ, M., Lerános, B., (1988): Las superficies de erosión neógenas en el sector central de la Cordillera Ibérica. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 1, 135-142.
- GUTIÉRREZ, F.J., MASANA, E., GONZÁLEZ, A., LUCHA, P., GUERRERO, J., MCCALPIN, JP. (2009): Late Quaternary paleoseismic evidence on the Munébrega half-graben fault (Iberian Range, Spain) *Int J Earth Sci (Geol Rundsh)* 98, 1691-1703.
- HERNÁNDEZ, A., OLIVE, A., MOISSENET, E., PARDO, G., VILLENA, J., PORTERO, J.M., GUTIÉRREZ, M., AGUILAR, M.J., LEAL, M.C. (1983): Hoja geológica num. 491 (Calamocha. *Mapa Geológico de España E: 1:50000*. IGME, Madrid.
- LAFUENTE, P., ARLEGUI, L.E., LIESA, C.L., SIMON J.L., (2010): Paleoseismological análisis de una estructura extensional intraplaca: la falla de Concud (Cadena Ibérica, Este de España). *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)*, 101, 579-585.
- SIMÓN, J.L., (1983): Tectónica y neotectónica del sistema de fosas de Teruel. Teruel, 69, 21-97.
- (1989): Late cenozoic stress field and fracturing in the Iberian Chain and Ebro Basin. (Spain), *J. Struct. Geol.*, 11, 285-294.
- (2012): Evolución Alpina de la Cordillera Ibérica. Universidad de verano de Teruel. Departamento de Ciencias de la Tierra Universidad de Zaragoza. 1-40.
- SIMÓN, J.L., ARLEGUI, L.E., LAFUENTE, P., LIESA, C.L. (2012): Active extensional faults in the central-eastern Iberian Chain, Spain. *Journal of Iberian Geology*, 38 (1), 127-144.
- ROCA, E., GUIMERA, J. (1992): The Neogene structure of the eastern Iberian margin: structural constraints on the crustal evolution of the Valencia through (western Mediterranean). *Tectonophysics*, 203, 203-218.
- RUBIO, J.C. and SIMÓN, J.L. (2006): Tectonic subsidende v. erosional lowering in a controversial intramontane depression: the Jiloca basin (Iberian Chain, Spain) *Geol. Mag.* 144 (1), 2007, 127-141.