CARLOS SANZ DE GALDEANO
JOSÉ A. PELÁEZ

FALLAS ACTIVAS EN LA CORDILLERA BÉTICA

UNA APROXIMACIÓN A PARTIR DE LA INFORMACIÓN TECTÓNICA Y SÍSMICA

G R A N A D A
2 0 1 1

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra sólo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley.

Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos —www.cedro.org), si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra.

© CARLOS SANZ DE GALDEANO
(IACT. CSIC-Univ. Granada), csanz@ugr.es
JOSÉ ANTONIO PELÁEZ MONTILLA
(Univ. Jaén), japelaez@ujaen.es
© UNIVERSIDAD DE GRANADA
FALLAS ACTIVAS EN LA CORDILLERA BÉTICA
I.S.B.N.: 978-84-338-5195-6.
Depósito legal: Gr./367–2011.
Edita: Editorial Universidad de Granada.
Campus Universitario de Cartuja. Granada.
Diseño de cubierta: Josemaría Medina Alvea.
Fotocomposición: Portada Fotocomposición, S. L. Granada
Imprime: Imprenta Comercial. Motril. Granada.
Printed in Spain *Impreso en España*

PRÓLOGO

Este libro se ha publicado con la intención de dar una visión general, no detallada, del conocimiento actual que se posee de las fallas activas de la Cordillera Bética.

En su confección se han utilizado buena parte de los datos de neotectónica, tectónica activa y sismicidad conocidos, de manera que de la conjunción de los mismos ha resultado una propuesta de fallas activas y también un buen número de dudas. Los datos más fiables permiten determinar fallas activas, y los menos fiables, así como las numerosas lagunas de conocimiento, plantean retos en los que se debe avanzar en la investigación, sin querer decir que no haya que hacerlo incluso en los sectores mejor conocidos.

Esta visión de conjunto es útil para la prevención de riesgos naturales, particularmente de los que provienen de los terremotos que pueden llegar a generar las fallas activas, suministrando datos esenciales para la planificación de los usos que pueden tener los distintos sectores de la Cordillera Bética.

El libro *Fallas activas en la Cordillera Bética* es una contribución del proyecto *Tectónica Activa en las Béticas. Peligrosidad sísmica y de movimientos de ladera (CGL2007-60535/BTE)*, del que el Prof. Carlos López Casado es el Investigador Principal, cuya publicación se planteó como uno de los resultados que se querían conseguir. En él se muestran parte de los logros obtenidos tanto en este proyecto como en uno previo, el titulado *Sismicidad y Tectónica activa en la Cordillera Bética oriental. Aplicación a la reducción de riesgos de naturaleza geológica (CGL2004-01636/BTE)*. Agradecemos a A. Caballero (del IACT) su arduo trabajo e interés al confeccionar muchos de los mapas incluidos aquí.

Carlos Sanz de Galdeano
José A. Peláez

INTRODUCCIÓN

Hay un gran número de trabajos y artículos que se refieren a la tectónica activa, a la sismicidad o a ambos aspectos considerados de forma conjunta en la Cordillera Bética. No existe sin embargo hasta ahora un libro que aúne los datos existentes y analice los diversos sectores de la cordillera y que esté hecho con el fin de dar una visión global del tema. Este vacío es el que se pretende llenar, pero no se agotará el tema con él, ni mucho menos. Y esto es así, por un lado, porque aún existen numerosos aspectos no bien conocidos y, por otro, porque sería muy extenso detallar en el presente libro el conjunto de datos actualmente existente. Un antecedente a este trabajo se encuentra en el trabajo de Sanz de Galdeano *et al.* (1995), en el que la generalización y simplificación de los datos fue forzosamente mucho mayor.

Este libro pretende dar una visión aproximada del conjunto de fallas activas de la Cordillera Bética, pero hay que entenderlo como un documento provisional de trabajo con el cual se puede avanzar. Las lagunas de conocimiento que existen tienen múltiples causas, algunas de las cuales se deben a que:

a) Hay sectores no estudiados con el detenimiento que requieren.

b) Incluso en sectores relativamente bien conocidos, no son visibles todas las fallas activas/sismogenéticas. Esto se debe a que no siempre afloran, o a que su traza se ha borrado por diversas razones. Se tiene constancia de la existencia de esas fallas, pues hay sectores en los que las fallas no se reconocen y sin embargo se producen terremotos.

c) Las incertidumbres en la localización de los terremotos, tanto en superficie como en profundidad, aunque cada vez menores, hacen que, en particular, las fallas no visibles sean difíciles de situar.

d) Se desconoce la segmentación de las fallas.

e) Tampoco son bien conocidos los movimientos que ha tenido cada falla a lo largo de su historia, ni los valores del desplazamiento de la falla en cada punto de su traza.

A estos aspectos aún se pueden añadir otros, pero a pesar de todos ellos, ya se tiene conocimiento de gran parte de las fallas que se han movido durante el periodo neotectónico y de las que actualmente son activas o potencialmente activas.

En cada sector en que dividimos la Cordillera Bética se presenta el conjunto de fallas neotectónicas para, junto con la sismicidad y los mecanismos focales conocidos, apuntar las que se pueden considerar fallas activas. Generalmente no se dan datos muy precisos de cada una de las fallas, pues normalmente ya están descritas y, además, si se introdujeran esos datos, no estaríamos ante un texto manejable, sino ante una gruesa enciclopedia. Por esto, y con el objetivo de que si algún lector se siente interesado por datos concretos pueda ir a los trabajos originales, se citan a numerosos autores, sin agotar su número, para que pueda ir a las fuentes de gran parte de los datos. Una de las más importantes se encuentra en los mapas geológicos a escala 1:50000 del IGME, que generalmente no se citan en las referencias salvo para llamar la atención de algún rasgo concreto; pero entiéndase que en muchas ocasiones son el origen de los datos más fiables, por lo que, además de las referencias indicadas en cada sector, hay que tenerlos en cuenta.

Por otra parte, dada la escala a la que se presentan los datos, la traza de muchas fallas está simplificada, así como el número de las líneas de falla visibles en superficie, más o menos paralelas (*splays*), y que parecen unirse en profundidad, las cuales podrían asociarse a una falla principal.

No pocas fallas que se citan como activas tienen escasa longitud y por tanto, teóricamente, no serían capaces de producir terremotos importantes. Aún así es conveniente indicarlas, pues en muchos casos nuestro conocimiento es insuficiente, y no sabemos si en profundidad, como seguramente ocurre en ciertos casos, su longitud y continuidad son mayores.

En la lectura de diversos trabajos previos, y bien posiblemente en los futuros, se observa a veces que los autores, por el afán de buscar fallas activas, llegan a exagerar algún dato. Es algo humano, pues cuando se busca con afán un determinado objetivo, a veces se termina por encontrarlo, aunque sea a costa de forzar o reinterpretar la realidad, máxime cuando los datos disponibles pueden ser también descritos y entendidos de otro modo diferente. Esto también nos ha podido ocurrir. De igual modo puede pasar lo contrario, que por prudencia no se afirme que una determinada falla sea activa, cuando los datos disponibles parecen indicarlo.

Los términos neotectónico, falla activa, falla capaz y falla potencialmente activa varían su significado en distintos trabajos. A veces neotectónico se usa referido a procesos o estructuras realmente activos, con movimientos ocurridos durante el Holoceno, por lo que su significado coincide con el de falla activa.

Este último término tampoco es totalmente preciso, pues en algunos casos se refiere a fallas que se han movido desde inicios del Holoceno, hace unos 10000 años, mientras que en otros casos este plazo puede abarcar el Pleistoceno superior o incluso todo el Pleistoceno o, al contrario, puede referirse tan solo a las fallas que presentan sismicidad asociada. De igual modo, el término de falla potencialmente activa tiene un significado no muy preciso (véanse para estos significados y dificultades de uso de la terminología, por ejemplo, los trabajos de Slemmons y Depolo, 1986, y Machette, 2000).

En el presente trabajo, el término neotectónico se referirá a aquellas estructuras, generalmente fallas, que se han movido a partir del Mioceno superior, es decir, hace unos 10 Ma, incluso algo menos, del orden de solo 8 Ma. Se toma este periodo de tiempo pues fue cuando se instaló en la Cordillera Bética (así como en el Rif y muchos otros puntos del Mediterráneo occidental) una compresión de dirección aproximada NNO-SSE, acompañada generalmente de una tensión prácticamente perpendicular. Antes, durante el Mioceno inferior y medio, la traslación de la Zona Interna Bética hacia el Oeste producía una compresión de dirección ONO-ESE.

Esta situación de compresión casi N-S, alternando, según los momentos y los sitios, con una tensión perpendicular (a veces es más importante la tensión que la compresión) iniciada en el Mioceno superior, se mantiene hasta la actualidad. Es por ello que en las Béticas se adopta este periodo de tiempo para las deformaciones neotectónicas.

El término falla activa lo referimos a aquellas fallas que tienen movimientos recientes, es decir, que afectan al Pleistoceno, o lo que es lo mismo, al conjunto del Cuaternario. Son en terminología de Machette (2000) las llamadas *Quaternary active faults*. Hacemos este uso amplio y no restringido del término, pues en gran parte de los casos el Cuaternario de las Béticas no está datado, e incluso no pocas veces no se puede distinguir con certeza del Plioceno. Si la falla presenta sismicidad asociada, entonces es claro que se trata de una falla activa, pero en otros muchos casos no es fácil de asegurar. Por tanto, podemos englobar en ese término fallas que se han movido en los últimos 2.58 Ma (límite actualmente aceptado para el Plioceno/Cuaternario). En algún caso, fallas que afectan a materiales antiguos pero que muestran escarpes frescos no atribuibles tan solo a la simple erosión que desmantela parte del relieve, también han sido consideradas activas.

Los términos falla potencialmente activa y falla capaz —difíciles en la práctica de separar— se pueden usar para aquellas fallas neotectónicas de las que hay indicios de haberse movido durante el Cuaternario, pero no una certeza total de ello, y que por sus características, por ejemplo, su orientación, podrían moverse en la actualidad. El uso de estos términos implica, evidentemente, una cierta incertidumbre.

De esta manera, las fallas neotectónicas abarcan a las potencialmente activas y a la fallas activas, siendo estas últimas las más recientes. Como orientación al lector, cuando se disponga de datos precisos de movimientos recientes o de una clara relación con la sismicidad se señalará. En la mayor parte de los casos, usaremos tan solo los términos de falla neotectónica y falla activa.

En las que consideramos fallas activas se indicarán algunas diferencias marcadas con distinto color. Aquellas dibujadas en los gráficos en color negro son fallas que muestran rasgos geológicos de actividad reciente, del Cuaternario; a veces del Plioceno. En azul se marcan aquellas fallas neotectónicas de las que no se tiene constancia de movimientos recientes, pero a las que aparentemente se les podría asociar algún terremoto o agrupamiento de terremotos, siempre teniendo en cuenta las limitaciones de dichas asociaciones. En rojo se indican fallas supuestas, deducidas principalmente por concentraciones de terremotos. Son las que encierran una mayor incertidumbre, pues tanto su propia existencia como la longitud o dirección de la traza son solo interpretaciones. Son un intento de explicación de la existencia de algunos terremotos o agrupamientos de terremotos sin que conozcamos las fallas a las que atribuirlos.

A alguna de las fallas dadas como fallas activas se les han atribuido terremotos localizados en sus inmediaciones. El criterio, en un buen número de casos, ha sido puramente espacial, en otros, nos hemos ayudado de datos de mecanismo focal. En todo caso, los errores, no solo en la localización de los terremotos y en su profundidad, sino en el conocimiento de los propios rasgos geológicos de la falla (continuidad en superficie, buzamiento, prolongación en profundidad, etc.), hacen que estas asociaciones deban ser consideradas con cuidado. Con esto se insiste en el grado de incertidumbre con el que aún se trabaja en este tipo de estudios.

Lo ideal sería conocer para cada falla la información que se señala a continuación: a) tipo de falla, b) dirección o direcciones, si ésta cambia de forma notable, c) al menos, coordenadas de sus extremos, y de algunos puntos más si fuera necesario, d) longitud de la falla, al menos de su o sus segmentos activos, e) segmentación de la falla, f) anchura de la falla, en el caso de que se divida en varias superficies, g) buzamiento o inclinación de la falla, y siempre que sea posible, el cambio de buzamiento lateralmente y en profundidad, por ejemplo en fallas lístricas, cuyo buzamiento disminuye con la profundidad, h) profundidad que alcanza la falla, y si fuera posible, profundidades mínima (profundidad de la superficie sismogenética) y máxima a las que se producen terremotos ligados a ésta, i) área de la falla o de los segmentos considerados activos, j) sentido de movimiento, o más bien, de los diversos movimientos de la falla (es común que las fallas no siempre se muevan exactamente igual) y, ligado directamente a éste, el ángulo de desplazamiento (*rake* o *slip angle*),

que igualmente varía, k) tasa de desplazamiento calculada o estimada, l) tipos de terremotos que ha generado, m) mecanismos focales ligados, n) periodo de retorno o recurrencia de la falla, o) desplazamientos provocados por terremotos concretos, p) último terremoto generado y tiempo transcurrido desde éste, y finalmente, q) conocimiento del potencial sísmico de la falla.

Es evidente que en la totalidad de las fallas que se van a describir no tenemos datos para poder responder a esos requerimientos, y en conseguirlos aún se tardará muchos años. Para ello es preciso utilizar diversas técnicas geofísicas, particularmente sísmica de reflexión y gravimetría, estudios de paleosismicidad, dataciones a partir de diversos métodos, y una progresiva mejora en los datos de sismicidad en cuanto a mecanismos focales y localización, etc. Realizar esto llevará además al conocimiento de las fuentes sísmicas reales en la Cordillera Bética, sin necesidad de establecer fuentes sísmicas regionales, de carácter más general, obligados en buena medida por el desconocimiento en la geometría y dinámica de las fallas, y en la propia sismicidad.

Mientras, este libro muestra solo un panorama general de las fallas activas de la Cordillera Bética. Su conocimiento será mejorado con el aporte progresivo de datos concretos, algunos de los cuales, a su vez, serán inexactos. Pero ese es el camino a seguir en toda investigación.

CAPÍTULO PRIMERO
PRINCIPALES RASGOS GEOLÓGICOS DE LA CORDILLERA BÉTICA

C. Sanz de Galdeano

La Cordillera Bética, junto con el Rif en el Norte de Marruecos, forma el sector más occidental de las cadenas alpinas mediterráneas. Ocupa el Sur y Sureste de España a lo largo de unos 600 km, con unos 200 km de ancho. Su situación en el contexto del Mediterráneo Occidental puede verse en la Fig. 1.1. Se divide en varios dominios importantes: la Zona Externa, la Interna, los materiales del Campo de Gibraltar y las cuencas neógenas (Fig. 1.2).

1.1. LA ZONA EXTERNA

La Zona Externa ocupa los márgenes Sur y Sureste del Macizo Ibérico, en los que durante el Mesozoico (Secundario) y parte del Cenozoico (Terciario) se acumularon sedimentos. Se divide en Prebético y Subbético, y en ambos existen depósitos marinos, si bien el Subbético muestra facies más pelágicas, caracterizándose el Prebético por sedimentos de facies menos profundas, que en algún caso llegan a ser continentales.

1.1.1. El Prebético

Se divide a su vez en Prebético Externo e Interno, de acuerdo con su mayor o menor proximidad original al Macizo Ibérico.

El Prebético Externo se caracteriza por su pequeño espesor de sedimentos. El Trías está formado por sedimentos clásticos, de color rojo predo-

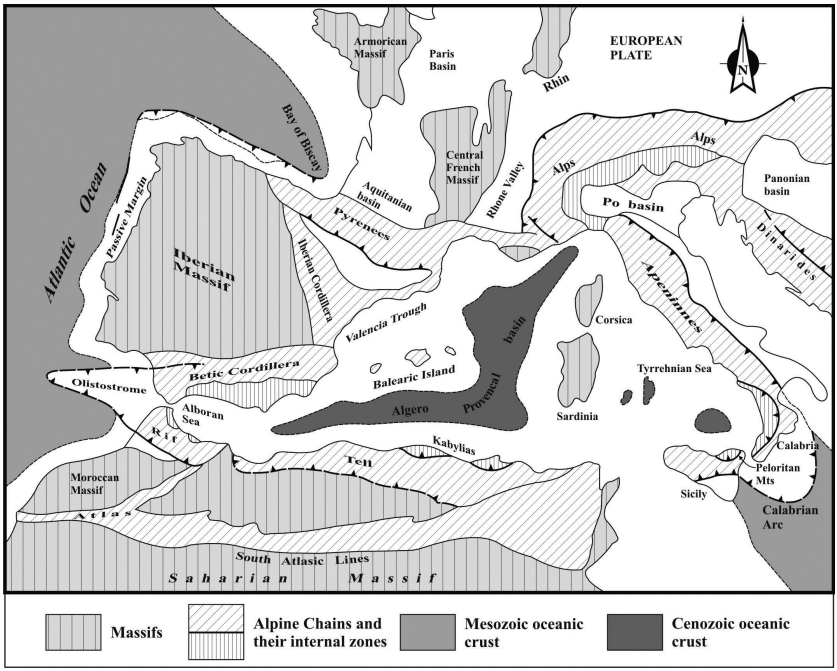

Fig. 1.1. *Esquema geológico del Mediterráneo occidental en cuya parte occidental se encuentra la Cordillera Bética (tomada de Sanz de Galdeano, 2000).*

minantemente, que hacia el interior (es decir, más lejos de las paleocostas del Macizo Ibérico, hacia el Sur o el Este) comienza a incluir carbonatos. En el Jurásico inferior y medio abundan las dolomías; el Jurásico superior corresponde a calizas nodulosas, margas y margocalizas y a facies de tipo *Purbeck* (detrítica). El Cretácico inferior está representado por facies detríticas tipo *Weald* y *Utrillas* del Valanginiense-Albiense (Baena y Jerez, 1982), mientras que el superior está formado por dolomías y calizas. Desde el Paleoceno estuvo emergido hasta la transgresión del Mioceno inferior (García Hernández *et al*., 1980).

El Prebético Interno tiene mayor espesor de sedimentos con menores lagunas estratigráficas. El Trías presenta claramente barras calizas de facies *Muschelkalk* intercaladas entre sedimentos pelíticos. El Jurásico inferior y medio es parecido al del Prebético Externo. El Jurásico superior presenta calizas, calizas nodulosas y margas. El Cretácico inferior muestra diversas facies progresivamente más pelágicas hacia el interior de la cuenca. El Cre-

tácico superior corresponde a dolomías y calizas pelágicas, y el Paleoceno presenta facies marinas someras, con algunos episodios continentales, hasta la llegada de los sedimentos calcareníticos y margosos del Mioceno inferior (García Hernández *et al*., 1980).

1.1.2. El Subbético

Entre el Prebético y el Subbético se ha diferenciado un subdominio llamado de las Unidades Intermedias. Por sus características es más afín al Subbético, incluso con sedimentos radiolaríticos del Jurásico medio/superior. Sin embargo, la existencia de importantes masas de arenas con características turbidíticas, cuya edad oscila entre el Barremiense y el Albiense (Cretácico inferior), le da unas características algo más externas que el Subbético. Es la transición entre ambos dominios, en un sector que puede considerarse como de talud continental.

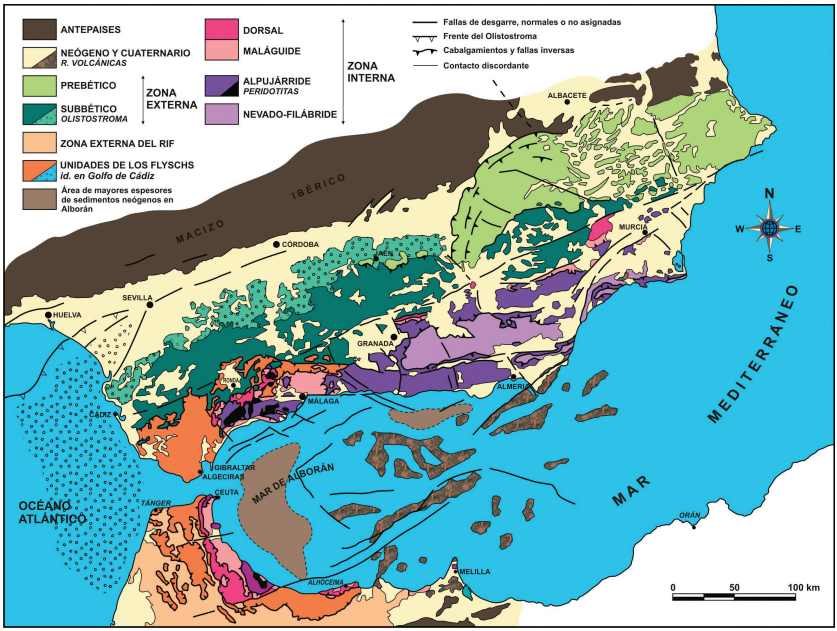

Fig. 1.2. *Esquema geológico de la Cordillera Bética.*

El Subbético propiamente dicho se divide en Externo, Medio e Interno (García Dueñas, 1967a, b). Esta división es clara en el sector central de la Cordillera, mientras que en el occidental apenas si se puede seguir, dada la enorme desorganización que sufre; en el oriental también es difícil, pues está peor representado por causas tectónicas y por la erosión.

El Trías presenta facies similares a las del Prebético Interno. El Lías inferior, y seguramente parte del Trías superior, presenta dolomías y calizas de plataforma. Esta plataforma carbonatada se fragmentó durante el Lías inferior (Vera, 1988), sobre todo a finales del mismo, y produjo la citada diferenciación del Subbético. El Subbético Externo y el Interno se mantuvieron como altos fondos durante el Jurásico y presentan facies condensadas, poco potentes, con calizas nodulosas y a veces calizas oolíticas (Sanz de Galdeano, 1973). Por el contrario, en el Subbético Medio se produjo una importante subsidencia, favorecida por la acción de fracturas, lo que permitió el depósito de materiales predominantemente margosos, e incluso de potentes sedimentos radiolaríticos (del Dogger y Malm). También en el Subbético Medio se localizan importantes masas volcánicas y subvolcánicas cuya edad oscila entre el Lías inferior y el Cretácico inferior (algunos afloramientos son más antiguos, del Trías medio?-superior). Estas rocas ígneas están mucho menos representadas en el Subbético Externo y en el Interno. Desde el Subbético Medio hacia el Externo, al Norte, y hacia el Interno, al Sur, se pueden ver transiciones estratigráficas en algunos sectores.

Durante el Cretácico se homogeneizaron notablemente las facies. El Cretácico inferior suele ser margoso blanco, aunque localmente pueda presentar algunas radiolaritas y también turbiditas, éstas últimas parecidas a las de las Unidades Intermedias. El Cretácico superior suele ser margoso y margocalizo de color salmón (tipo *Scaglia Rossa*) y con la misma facies se prolonga el depósito durante el Paleoceno. En muchos puntos existen importantes lagunas entre el Cretácico inferior y el superior.

En el sector sudoccidental del Subbético se ha distinguido el Penibético, cuyas características son asimilables al Subbético Interno, con un Jurásico carbonatado poco potente en sus sedimentos del Dogger-Malm, importantes lagunas estratigráficas durante el Cretácico inferior (margoso blanco) y con un Cretácico superior y Paleoceno bien desarrollado, algo más calizo, pero con el mismo color salmón. Algunos autores tienen tendencia a individualizarlo del Subbético Interno. De hecho, el Trías presenta una cierta mayor abundancia en materiales carbonatados, dentro de su similitud con el del Subbético, pero con una cierta transición hacia los Trías de facies alpina de la Zona Interna.