

EVIDENCIAS GEOMORFOLÓGICAS Y ESTRUCTURALES DEL LEVANTAMIENTO TECTÓNICO RECIENTE DEBIDO AL MOVIMIENTO INVERSO DE LA TERMINACIÓN SUDOCCIDENTAL DE LA FALLA DE ALHAMA DE MURCIA (CORDILLERA BÉTICA ORIENTAL).

R. Soler, E. Masana y P. Santanach

Departament de Geodinàmica i Geofísica, Universitat de Barcelona, Zona Universitària de Pedralbes, 08028 Barcelona (eula@natura.geo.ub.es).

Resumen: La falla de Alhama de Murcia (Cordillera Bética Oriental) es una falla de desgarre sinistrorsa con componente inversa. En la zona analizada, entre Puerto Lumbreras y Huércal-Overa, su orientación cambia desde NNE-SSO a ENE-OSO. En esta zona se dispone más perpendicular a la dirección de máximo acortamiento regional (N-S a NNO-SSE) y desaparece hacia el oeste. En este trabajo analizamos la actividad tectónica reciente del sector mediante 1) un estudio geomorfológico de los abanicos aluviales y de la red de drenaje, y 2) un estudio de la dislocación vertical de los abanicos aluviales. Como resultado, se han obtenido valores bajos (hasta 0,04) en los índices de elongación de las cuencas, altos (hasta 7,5) en el índice de gradiente, saltos verticales en los abanicos aluviales del Pleistoceno reciente de hasta 20 metros (140 m acumulados durante el Cuaternario), y estrías de falla con cabeceos muy altos. Todo indica que hay un levantamiento activo en la zona, y que la componente vertical del deslizamiento es más importante aquí que en el resto de la falla de Alhama de Murcia.

Palabras clave: levantamiento, tectónica activa, salto vertical, red de drenaje, abanicos aluviales, falla de Alhama de Murcia, Béticas orientales.

Abstract: The Alhama de Murcia fault (Internal Betics) is an active sinistral strike-slip fault with reversal component. Its trend changes from NNE-SSO to ENE-OSO between Puerto-Lumbreras and Huércal-Overa, where it strikes more perpendicular to the regional shortening direction and disappears to the west. The recent tectonic activity of this sector is analyzed here by using: 1) A geomorphologic study of the alluvial fans and drainage features, and 2) An evaluation of the vertical offset of the alluvial fans. Low values (down to 0.04) in the basin spacing index and high values (up 7.5) in the gradient index have been found. Pleistocene alluvial fans display vertical offsets of up to 140 meters and show dip-slip slickensides. According to these results an active uplift in the studied area is suggested being the vertical component more important here than on the other sectors of the fault.

Key words: uplift, active tectonics, vertical offset, fluvial network, alluvial fans, Alhama de Murcia fault, Oriental Betics.

Soler, R., Masana, E. y Santanach, P. (2003): Evidencias geomorfológicas y estructurales del levantamiento tectónico reciente debido al movimiento inverso de la terminación sudoccidental de la falla de Alhama de Murcia (Cordillera Bética oriental). *Rev. Soc. Geol. España*, 16(3-4): 123-134.

La falla de Alhama de Murcia está considerada como una de las fallas más activas de las Béticas orientales (Silva *et al.*, 1992a, 1993; Martínez-Díaz y Hernández-Enrile, 1992a, Martínez-Díaz *et al.*, 2001). Fue descrita por primera vez por Montenat (1973) entre Alcantarilla y Alhama de Murcia y, más tarde, se observó su continuación hasta Huércal-Overa (Bousquet y Montenat, 1974). Se extiende a lo largo de 80 km desde Abanilla hasta Huércal-Overa, con una orientación general NE-SO, limitando el borde noroccidental de la cuenca del Guadalentín (Fig. 1). Se comporta como una falla direccional sinistrorsa con componente inversa, bajo un campo de esfuerzos regional con dirección del esfuerzo máximo horizontal entre NNO-SSE y NNE-SSO desde

el Mioceno Superior hasta el Cuaternario (Bousquet y Montenat, 1974; Bousquet *et al.*, 1976; Armijo, 1977; Briand, 1981; Silva *et al.*, 1992a, b, 1997; Baena *et al.*, 1993; Martínez-Díaz y Hernández-Enrile, 1992b, 1996; Martínez-Díaz 1998).

Estudios paleosismológicos recientes en el sector de Lorca-Totana indican que esta falla es capaz de generar grandes terremotos (Martínez-Díaz y Hernández-Enrile, 1999; Martínez-Díaz *et al.*, 2001; Masana *et al.*, 2001). Estos autores sugieren un período de recurrencia de unos 15.000 años y una tasa de deslizamiento de 0,10-0,20 mm/año para la componente vertical. La componente direccional se ha estimado en 0,15-0,32 mm/año a partir de la orientación de estrías en el plano

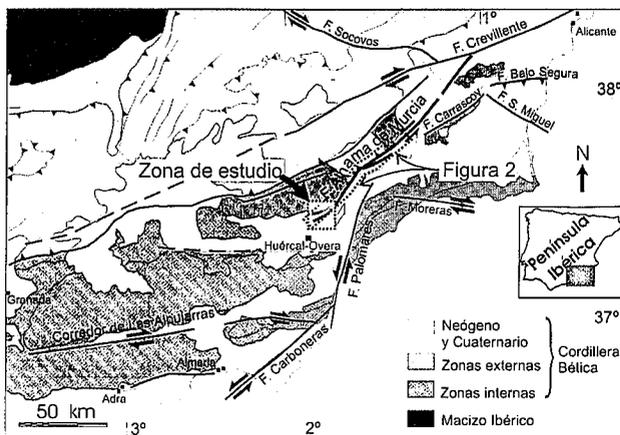


Figura 1.- Situación de las principales fallas que estructuran la Cordillera Bética oriental. En este mapa, (modificado de Martínez-Díaz *et al.*, 1978) se distinguen: 1) Zonas Externas (antepais) y 2) zonas Internas, formadas por unidades de rocas metamórficas del basamento (complejos Nevado-Filábride y Alpujárride), así como de rocas metamórficas de bajo grado y sedimentos del complejo Maláguide separadas por cuencas neógenas. El estudio se ha centrado en la terminación meridional de dicha falla.

de falla. Sin embargo, con los datos actuales, dichos resultados no son directamente extrapolables a la totalidad de la falla dada su posible segmentación. Esta segmentación se basa principalmente en cambios en la orientación de la falla y en diferencias en la dislocación asociada a cada uno de los tramos- (Silva *et al.*, 1992a, 2003, Martínez Díaz y Hernández-Enrile, 1999).

En el trabajo que aquí presentamos se describe la tectónica reciente de la terminación meridional de la falla de Alhama de Murcia al sur de Puerto Lumbreras, en la cuenca de Huércal-Overa. El objetivo principal es aportar datos que permitan comparar las tasas de deslizamiento entre los diferentes sectores de la falla. Esto se realiza mediante un análisis geomorfológico, estructural y neotectónico de los indicios de actividad tectónica actual en la zona.

La falla de Alhama de Murcia. Abanicos aluviales asociados

Se ha elaborado un mapa geomorfológico de los alrededores de la falla para poder correlacionar los diferentes sectores de la misma. La cartografía abarca desde Alhama de Murcia, al norte, hasta Huércal-Overa, al sur. Para la interpretación geomorfológica se han utilizado fotografías aéreas a escala 1:33.000 y mapas topográficos a escala 1:25.000 como base para la cartografía (Fig. 2).

En superficie, la falla de Alhama de Murcia se manifiesta por un sistema complejo de fallas. En algunos sectores está representada por varias fallas sub-paralelas que forman un corredor tectónico, mientras que en otros se reduce a una única falla. Algunos autores la han subdividido en diferentes segmentos. Silva *et al.* (1992a, 1996, 2003) proponen tres segmentos en base a la geometría de la falla, la geometría fractal y la distribución de la sismicidad: a) Huércal-Overa / Lorca, que se caracteriza por la presencia de inflexiones y ramifi-

caciones en la traza de la falla y en su terminación meridional por una estructura en "cola de caballo"; b) Lorca / Alhama, caracterizado por la presencia de un corredor tectónico con rasgos de extensión y compresión simultáneos y c) Alhama / Alcantarilla, separado del anterior por una zona donde la traza de la falla se pierde. Posteriormente, Martínez-Díaz y Hernández-Enrile (1999), en función del control diferencial sobre la creación de relieve, de la sismicidad y de la actividad paleosísmica asociadas proponen una subdivisión en dos segmentos del sector Lorca-Alhama quedando la falla subdividida en los siguientes cuatro segmentos: a) Puerto Lumbreras-Lorca, donde la falla controló el levantamiento de la Sierra de las Estancias y donde la sismicidad es mínima; b) Lorca-Totana, donde la falla controló la evolución de la cuenca neógena de Lorca, de la que está separada actualmente por la Sierra de la Tercia, formada por la componente inversa de la falla; es la zona con mayor concentración de sismicidad de la falla; c) Totana-Alhama de Murcia, con expresión superficial suave; y d) Alhama de Murcia-Alcantarilla, sin un relieve claro asociado y con pocas evidencias de deformación reciente, posiblemente debido a que es relevada en su actividad por la falla de Carrascoy situada en el lado opuesto de la depresión del Guadalentín.

Al pie de los relieves generados por la falla, se superponen varias generaciones de abanicos aluviales cuaternarios que se abren hacia la cuenca del Guadalentín y de Huércal-Overa y cuya evolución ha estado controlada por la actividad de la falla. Se han propuesto varias divisiones para agrupar los diferentes abanicos aluviales en la cuenca del Guadalentín (Silva *et al.*, 1991, 1992c; Baena *et al.* 1993; Silva 1994; Martínez-Díaz *et al.*, en prensa) y en la zona de Huercal-Overa (Guerra 1992, Wenzens y Wenzens, 1995, Briend, 1981). Algunos autores utilizan el término glacis cuando hacen referencia a los materiales aluviales cuaternarios de esta cuenca (Voermans *et al.*, 1980; Briend, 1981; Wenzens y Wenzens, 1995). Sin embargo la morfología y las facies dominantes se corresponden a pequeños abanicos aluviales instalados al pie de los relieves (Guerra, 1992), por lo que, en este trabajo, se utiliza el término abanico aluvial.

Se proponen aquí 6 generaciones diferentes de abanicos aluviales según: 1) el grado de preservación de la superficie original del cono aluvial y 2) su posición topográfica relativa. Se incluye además una séptima unidad formada por los depósitos fluviales actuales. Las dos generaciones aluviales más antiguas (G1 y G2) se han reconocido en afloramiento pero no son cartografiables a la escala de la figura 2. G1 está formada por una capa de conglomerados subangulosos muy compactados y se encuentra en unos pocos cerros testigo; y G2 está constituida por gravas y arcillas anaranjadas bastante consolidadas. Mediante la fotointerpretación se han distinguido (Fig.2) abanicos de las generaciones: tercera (G3), que corresponde a los abanicos más altos topográficamente y más degradados morfológicamente; cuarta (G4), claramente inactivos actualmente y que

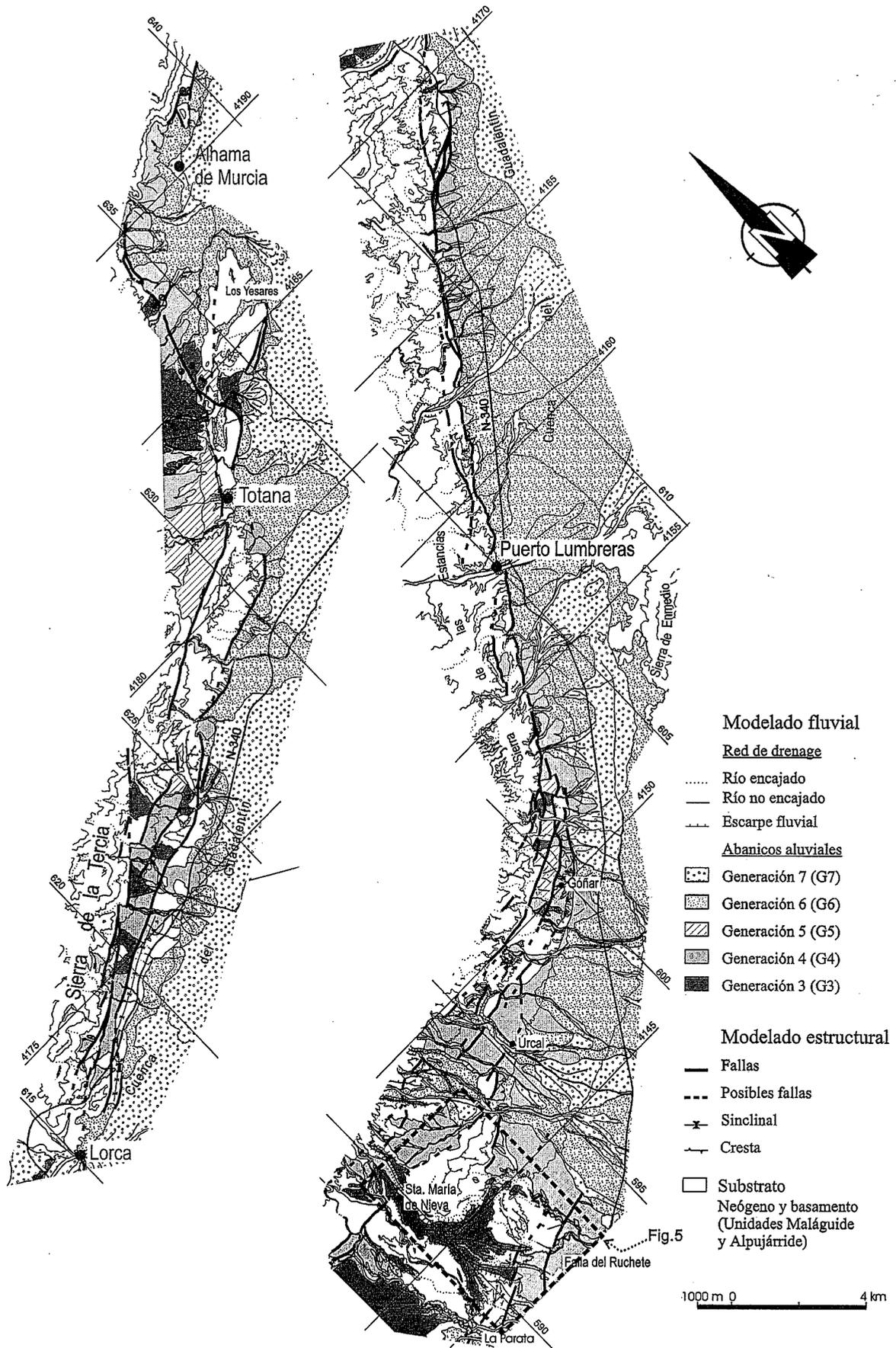


Figura 2.- Mapa geomorfológico de la falla de Alhama de Murcia entre Alhama de Murcia y Huércal-Overa (ver situación en Fig. 1), en el cual se representan las diferentes generaciones de abanicos aluviales dispuestos al pie del relieve generado por la falla. El drenaje se caracteriza por ser irregular y poco evolucionado, lo cual es característico de frentes activos, y las ramblas encajadas en el bloque levantado quedan sistemáticamente desviadas al cruzar la falla, lo cual evidencia el carácter direccional de la misma. En este mapa también se pone de manifiesto que la falla de Alhama de Murcia termina, en su zona más meridional, en una estructura tipo *horsetail splay*. Situación en la figura 1. Coordenadas UTM.

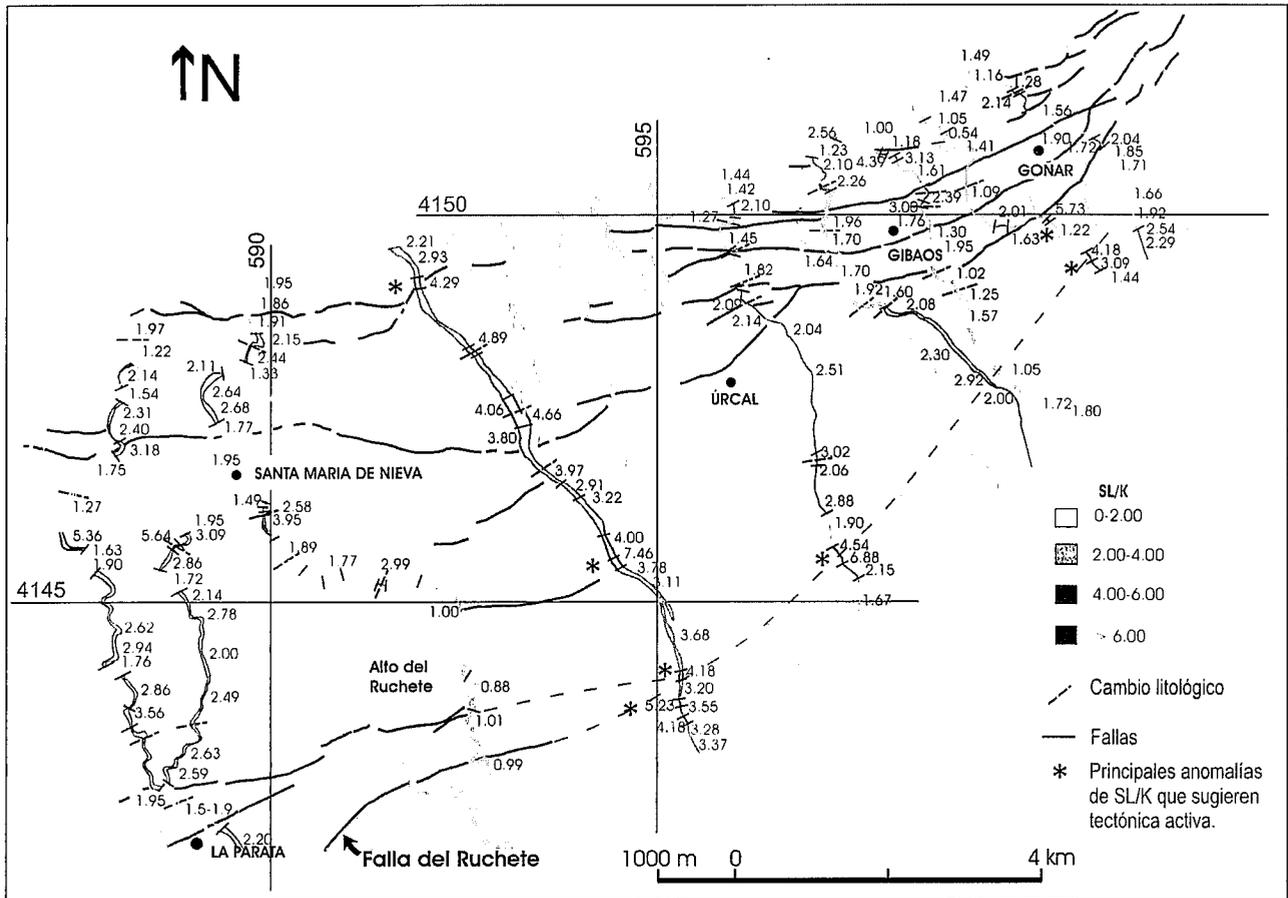


Figura 3.- Mapa con los valores del índice de gradiente calculado para las principales ramblas del sector estudiado de la cuenca de Huércal-Overa (ver situación en la Fig. 1). Los valores de SL/K (índice de gradiente) diferentes de 1 indican anomalías en el drenaje que pueden ser debidas a cambios litológicos, a cambios en el nivel de base o a deformaciones tectónicas. Con un asterisco se han señalado las anomalías en el índice que podrían ser debidas a tectónica activa. En el sector sudoriental hay cierta correlación en estas anomalías, lo cual sugiere la continuación hacia el NE, de la Falla del Ruchete.

conservan unas superficies afectadas por un estadio inicial de degradación; quinta (G5), que aflora sólo en zonas donde la falla forma corredores tectónicos; y sexta (G6); correspondiente a los abanicos más recientes. La unidad (G7) corresponde a depósitos de cauce y llanuras de inundación actuales. Todas ellas están formadas básicamente por gravas y arcillas grisáceas no consolidadas, con algunas pasadas de conglomerados e intercalaciones de paleosuelos más o menos desarrollados.

La Tabla I relaciona las unidades propuestas por otros autores (nombres originales entre paréntesis) con las generaciones de abanicos descritas en este trabajo (G1 a G7). Las características de G1 son claramente coincidentes con las de la *dalle conglomeratique* descrita por Briend (1981) y el "glacis antiguo" descrito por Wenzens y Wenzens (1995). De acuerdo con dichos autores esta unidad se depositó en el Cuaternario antiguo, entre 1.900 y 900 ka. Las generaciones de abanicos entre G2 y G5 son consideradas por algunos autores de forma agrupada, como Briend (1981) que describe una única unidad de *calloutis* por encima de los conglomerados cementados G1, o Baena *et al.*, (1993) que describe una unidad de abanicos que atribuye al Tirreniense I con una edad comprendida entre 700 y 125 ka. Tanto Wenzens y Wenzens (1995), como Silva *et al.*,

(1992c), o Martínez-Díaz, (1998) consideran solo dos generaciones de abanicos atribuibles al grupo G2 a G5, con ciertas discrepancias en sus edades. A pesar de ello en general no rebasan el rango 700-125 ka. La unidad Qp de Martínez-Díaz (1998) coincide con la generación G4. El comportamiento diferenciado de los diferentes frentes montañosos producto de la segmentación de la falla impone limitaciones a la correlación. A pesar de ello, la unidad P de Martínez-Díaz (1998) podría corresponder a la generación G3 si se tienen en cuenta los siguientes dos aspectos: 1) G5 es muy local y está ligada a entornos muy afectados por la tectónica reciente, y 2) G2 es también una unidad solamente descrita en la zona de Huércal-Overa, posiblemente también relacionada directamente con el elevado levantamiento de dicha zona. Las generaciones G6 y G7 son atribuibles a las terrazas encajadas de Wenzens y Wenzens (1995), a las unidades 76 y 74 de Baena *et al.* (1993), a la fase 3 de Silva *et al.* (1992c) y a la unidad Qhp de Martínez Díaz, (1998). En general hay coincidencia en atribuir al Pleistoceno Superior y al Holoceno a las generaciones G6 y G7 respectivamente.

La cronología relativa propuesta por estos autores se establece por correlación usando los siguientes criterios: 1) comparación de secuencias geomorfológicas y litoestratigráficas, 2) altura relativa (Wenzens y Wen-

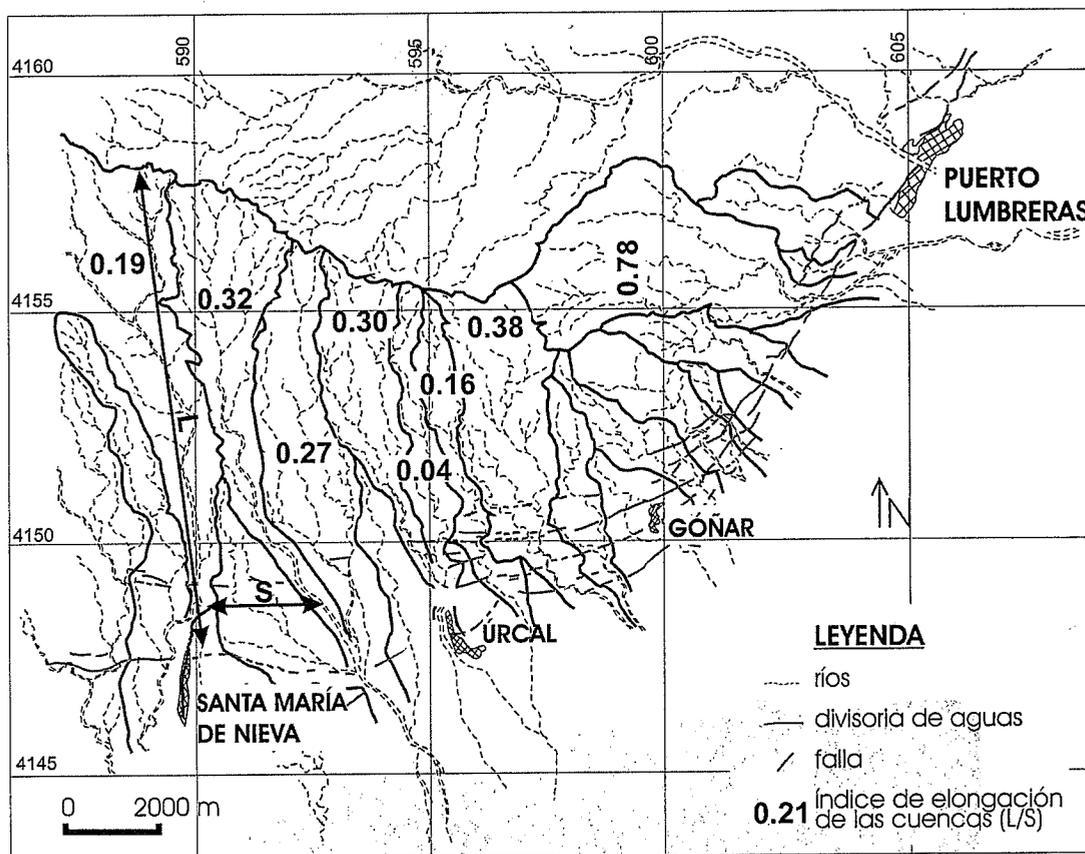


Figura 4.- Valores del índice de elongación de cuencas.

zens, 1995), 3) grado de evolución de los perfiles edáficos de los caliches (Silva *et al.*, 1992c, atribuye caliches poco desarrollados al Pleistoceno Superior, maduros al medio y masivos al inferior), y 4) correlación con otras zonas de las Béticas mejor estudiadas (Baena *et al.*, 1993 aplica también la correlación con zonas marinas emergidas). A parte de estos datos de cronología relativa se ha datado radiométricamente por U/Th en 30 ka un caliche situado a techo de la unidad G4. La unidad aluvial sobre la que se formó el caliche sería, consiguientemente, anterior a esta edad (no es posible, sin embargo, indicar la cantidad de tiempo transcurrido entre la formación del abanico y la del suelo).

Terminación suroccidental de la falla de Alhama de Murcia: la cuenca de Huércal-Overa

Entre Puerto Lumbreras y Huércal-Overa la orientación de la falla de Alhama de Murcia cambia de NE-SO a E-O (Fig. 2) y, a la vez, se ramifica formando un *horsetail splay* (Briend, 1981, Briend *et al.*, 1990, Silva *et al.*, 1992a, Martínez-Díaz, 1998). Hacia el oeste la traza de las diferentes fallas se pierde. Los materiales afectados por la falla de Alhama de Murcia en la zona de Huércal-Overa son, en superficie, sedimentos neógenos y cuaternarios que rellenan la cuenca de Huércal-Overa. Dicha cuenca está situada entre la Sierra de las Estancias (Unidad Alpujarride), al norte, y la sierra de los Filábrides (Unidad Nevado-Filábride), al sur. Algunos autores

(Briend *et al.*, 1990, Briend 1981, Montenat *et al.*, 1990) piensan que su evolución ha estado controlada por la terminación de la falla de Alhama de Murcia, como una cuenca *tipped wedge* (Crowell, 1974), mientras que otros (Guerra 1992; Vissers *et al.*, 1995) atribuyen su formación a un colapso extensional tardi-orogénico de finales del Mioceno Medio dentro del bloque de las Zonas Internas, que no va ligado a la tectónica direccional. Según esta última interpretación, un conjunto de semifosas pretortonienenses constituyen el substrato de la cuenca (Mora, 1993). Desde el Tortonienense hasta el Messiniense superior se depositan sedimentos de relleno de cuenca, primero continentales y luego básicamente marinos, mientras que todos los sedimentos post-messinienses son continentales (Briend, 1981, Briend *et al.*, 1990).

Este sector es idóneo para llevar a cabo el estudio sobre la actividad más reciente de la falla, ya que: 1) la traza de la zona de falla es aquí casi perpendicular a la dirección de máximo acortamiento regional, por lo que cabe esperar que se reduzca la componente direccional de las fallas que la componen, 2) los abanicos aluviales del cuaternario se ven afectados por la zona de falla y 3) existen varias anomalías en el drenaje características de zonas con deformación activa, algunas de las cuales se exponen a continuación.

A continuación se exponen los resultados del estudio del drenaje y de los desplazamientos asociados a las diferentes fallas que conforman la terminación meridional de la falla de Alhama de Murcia.

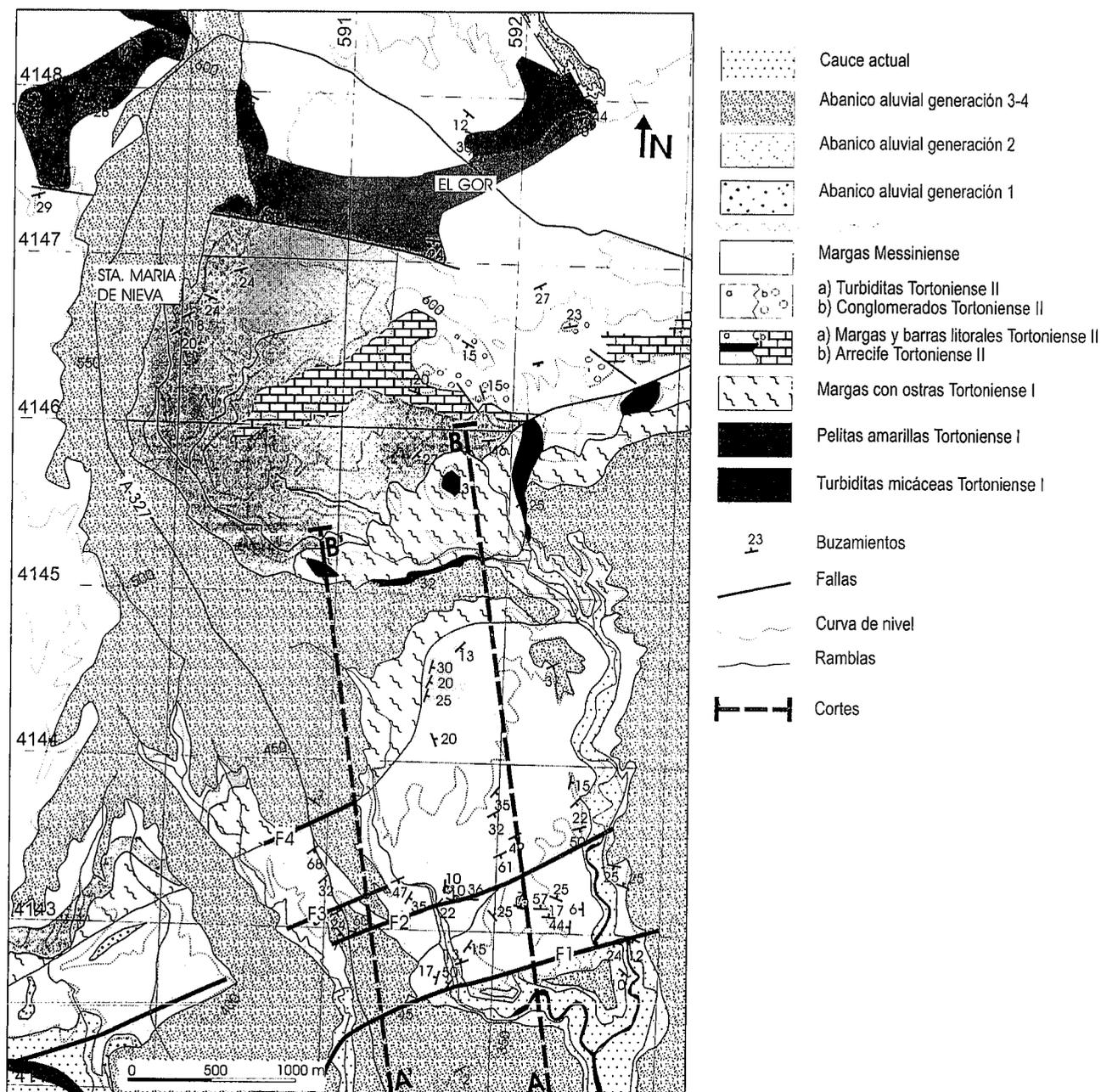


Figura 5.- Mapa geológico del sector de la falla del Ruchete (ver situación en Fig. 2) donde se sitúan los cortes geológicos realizados en la zona (Fig. 6). Se han representado tanto los materiales neógenos como los sedimentos cuaternarios, ambos afectados por deformación. También se han incluido los buzamientos utilizados para realizar los cortes.

El drenaje

La morfología fluvial es muy sensible a las deformaciones tectónicas. En Huércal-Overa, Wenzens y Wenzens (1995) analizaron la influencia de la tectónica de la región en la captura de los ríos y en las características del drenaje y sugirieron que hay un mayor levantamiento del margen oriental de dicha cuenca debido a la falla de Alhama de Murcia. El análisis de los perfiles longitudinales de los ríos (índice de gradiente) y de la forma de las cuencas de drenaje permite profundizar en estas hipótesis.

El índice de gradiente compara, para un segmento concreto del río, la pendiente real y la pendiente que esperaríamos según el modelo de equilibrio, considerando que el río es gradado, o dicho de otra forma, que circula

sobre sus propios sedimentos (Mackin, 1948). Para obtener el índice de gradiente para todo el río (K) se aplica,

$$K = \frac{H_i - H_f}{\ln L_f - \ln L_i} \text{ (Hack, 1973),}$$

donde H_i y H_f corresponden a las cotas inicial y final del perfil del río respectivamente y L_i y L_f corresponden a las distancias inicial y final a la divisoria de aguas. Para el cálculo del índice de gradiente en un segmento del río (SL) aplicamos,

$$SL = DH \times L / DL \text{ (Hack, 1973),}$$

donde DH es el incremento de altura del segmento, DL la longitud del segmento y L la distancia desde el cen-

	Huércal-Overa			Guadalentín		
	Briend, 1981	Wenzens y Wenzens 1995	Baena et al., 1993	Silva et al., 1992a, b y c	Martinez/Diaz, 1998	
>30 ka	G7	(terrazas encajadas)	Holoceno (76)	Pleist. sup-Holoceno (Fase 3)	Pleist. superior-Holoceno (Qph)	
	G6		10 ka			125 ka
	G5	(Glacis principal)	Tirreniano I (73)	Pleist. medio (Fase 2)	Pleist. medio-sup. (Qp)	
	G4					125 ka
	G3					700 ka
	G2	(Cailloutis 3)	(glacis 1)	1600 ka	Pleist. inferior (Fase 1)	Pleist. medio (P)
	G1	Cuaternario antiguo (dalle conglomeratique)	(glacis antiguo)	Strombus Coronatus	1900 ka	700 ka
	1900 ka	1900 ka				

Tabla I.- Síntesis de las unidades aluviales de las cuencas del Guadalentín y de Huércal-Overa propuestas por diversos autores y su relación con las generaciones G1 a G7 (ver el mapa geomorfológico de la Fig. 2). Cada columna muestra la equivalencia entre las unidades G1 a G7 y las publicadas por un autor. Se han indicado los rangos de tiempo que cada autor ha atribuido a sus unidades. El valor contenido en la primera columna se obtuvo por datación de un caliche desarrollado a techo de G4 mediante el método del U/Th. Nótese que en algunos casos los autores coinciden en las unidades y las edades; por ejemplo la base de G6 es prácticamente unánime y se le atribuye una edad de 125 ka. En otros casos las discrepancias son notables como en el caso de la base de G3 que parece más clara en el Guadalentín y cuya edad es variable según autores: para algunos se sitúa en el Pleistoceno Inferior y para otros en el Medio. Esto conlleva una incertidumbre elevada al atribuir edades a las diferentes unidades propuestas. Estas edades han sido usadas para estimar, con todas las limitaciones que ello implica, el salto vertical (Tabla II).

tro del segmento hasta la divisoria de aguas del río. A partir de la relación SL/K (Seeber y Gornitz, 1983) se puede saber si un segmento del río está en equilibrio ($SL/K=1$) o si presenta alguna anomalía ($1 > SL/K > 1$). Si $SL < 1$, significa que la pendiente es menor de lo que tendría que ser para estar en equilibrio. Y si $SL > 1$, la pendiente es mayor de lo que tendría que ser para estar en equilibrio.

Se ha calculado la relación SL/K para los cauces principales que drenan la Sierra de las Estancias en dirección a la cuenca de Huércal-Overa utilizando una base topográfica a escala 1:25.000 y considerando segmentos con un desnivel de 10 metros (Fig. 3). En general, la mayoría de valores obtenidos en el sector son superiores a 1, de lo que se deduce un incremento general de la pendiente de la vertiente sur del la Sierra de las Estancias. Sin embargo, dentro de esta tendencia, se observan anomalías puntuales algunas de las cuales podrían estar condicionadas por cambios litológicos, o bien podrían ser debidas a un cambio en el nivel de base. Aún así, en ciertos sectores no se puede descartar la influencia de la actividad de fallas (ver anomalías marcadas con asterisco en la figura 3, donde coinciden zonas con índice alto con trazas de fallas o con la prolongación de las mismas). Un buen ejemplo de ello es la continuación hacia el noreste de la falla del Ruchete, hacia donde pierde su traza en superficie por debajo de los abanicos aluviales más jóvenes. La alineación de las anomalías en el índice de gradiente en esta zona permiten enlazar dicha falla con el sector de Góñar donde convergen las diferentes ramificaciones de la falla de Alhama de Murcia. Aun así, el extremo suroeste de la

falla del Ruchete muestra anomalías bajas seguramente relacionadas con la mayor sinuosidad de las ramblas en parte condicionados por cambios litológicos ligados a la actividad de la falla. Según estos datos, la falla del Ruchete es de actividad muy reciente y constituye la expresión más meridional de la falla de Alhama de Murcia.

Por otro lado, el índice de elongación de las cuencas (L/S) establece la relación entre la longitud de la cuenca (L) y la separación entre canales a lo largo de un frente montañoso (S). Los frentes con fuerte levantamiento tienden a tener cuencas estrechas y largas (índice bajo). Wallace (1978) observa valores comprendidos entre 0,25 y 0,55 en los frentes activos en la zona de Basin and Range (EEUU) y valores de 0,87, en los frentes no activos. Relaciones similares se han descrito en zonas mediterráneas (Ferrer *et al.*, 1999, Briais *et al.*, 1990). En la terminación sudoccidental de la falla de Alhama de Murcia se distinguen dos grupos de cuencas según su índice de elongación (Fig. 4). En el sector de Puerto Lumbreras las cuencas se encajan cerca del frente en materiales cámbricos y precámbricos y en la cabecera en rocas triásicas subparalelamente a la estructura general de las mismas. Drenan de oeste a este y presentan un índice de elongación superior a 0,5. Contrariamente, en el sector de Úrcal, las cuencas se encajan en la cabecera en los mismos materiales triásicos pero oblicuamente a la estructura general de escala kilométrica, y aguas abajo, se encajan en los sedimentos neógenos de la cuenca de Huércal-Overa. Drenan de norte a sur y sus índices de elongación varían entre 0,05 y 0,35. Los valores obtenidos en el sector de Úrcal sugie-

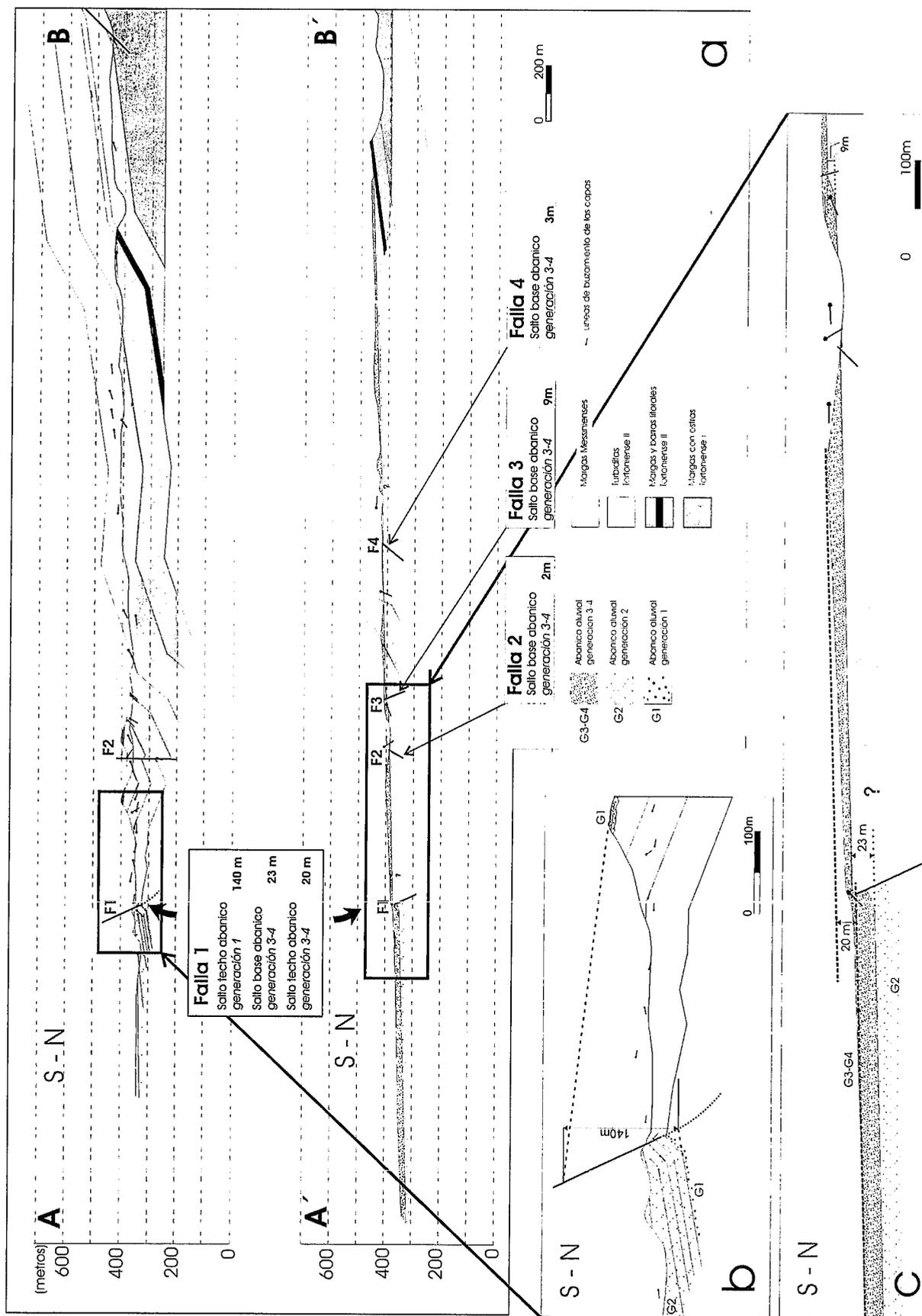


Figura 6.- a: Cortes geológicos transversales a la falla del Ruchete: A-B y A'-B' (ver situación en Fig. 5). Se aprecia la deformación que afecta a los materiales neógenos, que aunque mayoritariamente buzcan hacia el sur, están afectados por pliegues muy abiertos. b: Ampliación del corte A-B para apreciar el salto vertical de la falla del Ruchete que afecta al abanico G1. Los abanicos aluviales presentan pliegues de arrastre provocados por el movimiento de la falla. En el caso del abanico G2 incluso se han formado discordancias internas al pie de la falla. c: Ampliación del corte A'-B' en las zonas de falla F1, F2, F3, donde se observa el salto de la superficie y de la base del abanico G3-G4. Para calcular el salto de la superficie se han extrapolado las pendientes del abanico en zonas alejadas a la falla. Se observa como parte del abanico G3-G4 en el bloque superior ha sido erosionado.

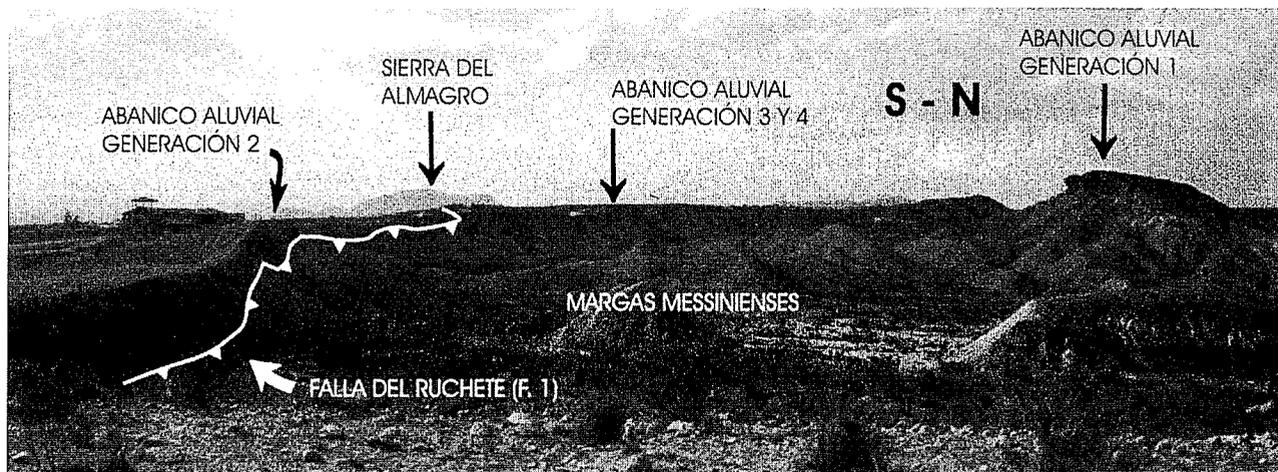


Figura 7.- En la fotografía se aprecia el contacto, debido a la falla del Ruchete, entre los abanicos aluviales cuaternarios y los materiales neógenos. La falla continúa hacia el oeste, hacia la Sierra de Almagro, provocando una dislocación en el abanico aluvial G3-G4. El cerro testigo, situado más al norte corresponde, al abanico aluvial más antiguo, G1.

ren una componente del levantamiento activo superior al de la zona de Puerto-Lumbreras (donde existe, además, una componente direccional), a pesar de que ambas zonas han experimentado el levantamiento de la Sierra de las Estancias causada por el movimiento de la falla de Alhama de Murcia.

La red de drenaje también se ve afectada por la tectónica direccional. La dislocación sinistrorsa de los ríos es frecuente y notoria a lo largo de la falla de Alhama de Murcia allí donde presenta una dirección NE-SO, lo que indica su direccionalidad. Hay buenos ejemplos de ello en el sector de Lorca-Totana y entre Lorca y Puerto Lumbreras (Rambla Alta, Rambla del Borruezo, Rambla del Saltador, Rambla del Buitre, etc.) donde gran parte de las ramblas son dislocadas en sentido dextrorso al cruzar la falla (Martínez-Díaz, 1998). En cambio en el sector de Huércal-Overa, de orientación este-oeste esta desviación es menos frecuente, de menor intensidad y se produce en ambos sentidos, dextrorso y sinistrorso, sugiriendo que aquí, la componente direccional no es tan importante.

Salto vertical y velocidad de deslizamiento

Los datos expuestos, junto con el estudio geomorfológico y el reconocimiento de campo, ponen en evidencia la actividad reciente vertical de la falla de Alhama de Murcia en el sector de Huércal-Overa durante el Cuaternario. A partir de aquí, el estudio se centra sobretodo en el sector más meridional de la zona de Huércal-Overa (Fig. 3), a lo largo de diversas fallas que se relevan formando una franja de orientación N80 formando la falla del Ruchete (Briend, 1981). Para establecer la deformación vertical durante el Cuaternario provocada por esta falla y otras fallas que afectan sedimentos recientes algo más al norte se ha realizado una cartografía geológica de la zona (Fig. 5) y se han levantado dos cortes geológicos en este sector, A-B y A'-B' (Fig. 6a). A pesar de que estas fallas a menudo no llegan a romper la superficie y sólo la pliegan, la dislocación vertical de

las superficies aluviales puede seguir siendo obtenida con la realización de un corte detallado.

Curiosamente la zona del Ruchete, donde hay muchas evidencias de tectónica reciente, es la única zona donde los índices de gradiente son próximos a 1, es decir, donde el río está próximo al equilibrio aunque esto puede explicarse por la morfología meandriforme de la rambla. A una escala menor, en el río Guadalentín a su paso por la falla de Alhama de Murcia, se han descrito incrementos súbitos de la sinuosidad que se atribuyen al levantamiento del bloque aguas arriba de la falla (Martínez-Díaz, 2000). En la zona estudiada aquí, el cambio puede ser debido al levantamiento del bloque superior de la falla inversa del Ruchete.

Las estrías observadas en los planos de falla que afectan al Cuaternario presentan cabeceos elevados que sugieren que el desplazamiento es predominantemente inverso. Esta cinemática es coherente con una dirección de máximo acortamiento comprendida entre NNO-SSE a norte sur, que coincide con la dirección de máximo acortamiento regional durante el Cuaternario reciente (Bousquet y Montenat, 1974, Bousquet *et al.*, 1976, Armijo, 1977, Briend, 1981, Silva *et al.*, 1992c, Martínez-Díaz y Hernández-Enrile, 1992b). Los cortes geológicos realizados tienen una orientación aproximadamente perpendicular a las fallas y pliegues, esto es N 166°. En los cortes se observa como los materiales neógenos buzan hacia el sur y presentan deformación en forma de pliegues muy abiertos con eje 10°/076°. Estos pliegues abiertos ya fueron descritos en la zona por Guerra (1992). También se observa como la falla del Ruchete, (F1) pone en contacto las margas messinienses y los materiales aluviales cuaternarios (Figs. 6b, 6c y 7). Pero la parte más superficial de los abanicos no llega a estar fallada, sino que sólo se deforma adaptándose al desnivel provocado por la falla (Fig. 6c). El resto de fallas (F2, F3 y F4) presentan saltos pequeños en comparación con la primera. Los abanicos aluviales afectados son principalmente G1, G2, G3 y G4.

	Edad	salto vertical	tasa de deslizamiento vertical	
G7	—10 ka—	20 m	<0,6 mm/a	
G6				
G5	—125 ka—			
G4	>30 ka			
G3				
G2	—700 ka—			27 m
G1	—900 ka—			140 m
	—1900 ka—			

Tabla II.- Edades atribuidas a las diferentes generaciones de abanicos aluviales observadas (G1-G7) según la Tabla I. Se indica también el salto vertical acumulado para algunas unidades causado por la falla del Ruchete, calculado en los cortes geológicos. Finalmente, a pesar de que las acotaciones cronológicas son muy inciertas, se especula con las posibles velocidades de deslizamiento vertical. La tasa de deslizamiento a techo de G4 podría ser mucho más baja de la que se muestra ya que se basa en la edad de un caliche instalado a techo, con lo que la edad del substrato (G4) puede ser mucho más antigua. La variación de valores para el techo de G1 se debe a la incertidumbre de la edad que podría oscilar entre 700 y 900 ka según Wenzens y Wenzens (1995).

Para estimar la dislocación en las diferentes generaciones de abanicos se han considerado las cuatro fallas anteriormente mencionadas y se han extrapolado las pendientes del techo y/o base de cada unidad en los dos bloques hasta su intersección con la falla. En algunos casos se ha considerado la pendiente del abanico sin tener en cuenta la de las zonas más cercanas a la falla ya que se encuentran deformadas por la misma. Estas estimaciones tienen sus limitaciones sobretodo teniendo en cuenta que los sedimentos son aluviales y pueden variar de potencia lateralmente. En la F1, el salto vertical mínimo de la superficie del abanico G3-G4 es de 20 metros, considerando una pendiente constante y que buena parte del frente del bloque levantado ha sido erosionado (Fig. 6c). El salto vertical de la base de este abanico en la misma falla es de 23 metros, y en las demás fallas es de 2 metros en la F2, 9 metros en la F3, y 3 metros en la F4. Teniendo en cuenta los respectivos buzamientos, el salto vertical total de la base de G3-G4 es de 27 metros (El salto en F2 y F4 es en sentido opuesto al desnivel total por lo que se debe sustraer). El abanico G2 presenta una gran potencia en el bloque inferior, en cambio no se encuentra en el bloque superior, ya sea porqué ha sido erosionado o bien porqué no se sedimentó. En el caso del abanico aluvial G1, el salto vertical mínimo es de 140 metros teniendo en cuenta su buzamiento y su supuesta posición en el bloque inferior (Fig. 6b). En resumen, el salto vertical total observado en el corte para cada una de las unidades es de, 20 metros para el

techo de G3-G4, 27 metros para la base de G3-G4 y 140 metros para el techo de G1.

A partir del salto vertical mínimo de las bases y techos de los abanicos aluviales de las diferentes generaciones se han estimado unos rangos para la tasa de deslizamiento vertical basados en las poco concisas edades ya discutidas (tablas I y II). Una datación más precisa de los materiales y de las superficies de colmatación de los distintos abanicos es necesaria para reducir la incertidumbre sobre las tasas de deslizamiento obtenidas ya que el valor de las edades se basa principalmente en consideraciones paleoclimáticas. Considerando las edades atribuidas a las generaciones G3-4, G2-G3-G4 y G1, se ha obtenido un rango de tasas de deslizamiento vertical de 0,16-0,6 mm/año (Tabla II). La componente de deslizamiento vertical mínima de la falla de Alhama de Murcia para el Pleistoceno Superior-Holoceno en el sector de Lorca-Totana es de 0,1-0,3 mm/año (Masana *et al.*, 2001), valor que estaría comprendido dentro del rango estimado pero en su segmento más lento (en Lorca-Totana el valor más plausible es 0,1 mm/año). Esta última consideración es coherente con el hecho de que se hayan observado mayores índices de levantamiento en el sector de Huércal-Overa. Cabe recordar, sin embargo, que en la zona de Lorca-Totana la componente neta del deslizamiento de la falla es principalmente direccional.

Conclusiones

A pesar del elevado grado de incertidumbre de las edades de las diferentes unidades, los diferentes datos expuestos sugieren que, en la terminación sudoccidental de la falla de Alhama de Murcia, la componente vertical del deslizamiento es mayor que en el resto de la parte meridional de la falla durante el Pleistoceno Superior y el Holoceno.

La red de drenaje muestra diversos elementos que apuntan esta hipótesis: 1) las cuencas tienen un índice de elongación mayor que hacia el norte, lo cual indica un aumento de la componente vertical en ese sector, 2) la sistemática desviación de los ríos en sentido sinistrorso al cruzar la falla en la zona norte indica direccionalidad; por el contrario, en Huércal-Overa no se observa una clara desviación de los ríos, sugiriendo un predominio de la componente según el buzamiento y 3) en la terminación sudoccidental de la falla de Alhama de Murcia hay anomalías importantes del índice de gradiente (hasta 7,46), que aunque pueden ser debidas a movimientos direccionales, son más características de zonas con movimientos verticales. Así mismo, las estrías de falla encontradas en la zona de Huércal-Overa muestran movimientos próximos a la dirección de máximo buzamiento.

Aun siendo la cronología de las unidades poco precisa, las tasas de deslizamiento vertical estimadas en la zona de Huércal-Overa son posiblemente mayores (0,1-0,6 mm/año) a las disponibles para la zona entre Lorca y Totana donde la falla de Alhama de Murcia tiene una orientación NE-SO (0,1 mm/año).

Agradecimientos

Este estudio se ha realizado en el marco del proyecto de la comisión Europea SAFE: Slow Active Faults in Europe. Assessing Fundamental input for risk in regions of low seismicity (ENGV-CT-2000-00023). Se agradecen las revisiones realizadas por José Martínez-Díaz y Pablo Silva que sin duda han enriquecido y mejorado este texto.

Referencias

- Armijo, R. (1977): *La zone de failles Lorca-Totana (Cordillères Bétiques, Espagne). Étude tectonique et néotectonique*. Thèse 3ème cycle, Univ. Paris VII, 229 p.
- Baena, J., Barranco, L.M., Zazó, C., Goy, J.L., Silva, P.G., Somoza, L. y Bardají, T. (1993): *Mapa neotectónico, sísmotectónico y de actividad de fallas de la Región de Murcia, escala 1:200.000 – 1:100.000*. ITGE, Madrid.
- Bousquet, J.C. y Montenat, C. (1974): Présence de décrochements NE-SW plio-quadernaires dans les Cordillères Bétiques Orientales (Espagne). Extension et signification générale. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 278: 2617-2620.
- Bousquet, J.C., Montenat, C. y Philip, H. (1976): Observations micro-tectoniques sur la compression nord-sud quadernaire des Cordillères Bétiques Orientales (Espagne méridionale-Arc de Gibraltar). *Bulletin de la Société géologique de France*, 18: 711-724.
- Briaís, A., Armijo, R., Winter, T., Tapponnier, P. y Herbecq, A. (1990): Morphological evidence for Quaternary normal faulting and seismic hazard in the Eastern Pyrenees. *Annales Tectonicae*, 4: 19-42.
- Briend, M. (1981): *Evolution morpho-tectonique du bassin néogène de Huércal Overa*. Tesis Doctoral. Univ. de Paris, 208 p.
- Briend, M., Montenat, C. y Ott d'Estevou, P. (1990): Le Bassin de Huércal-Overa. En: *Les bassins neogenes du domaine Bétique oriental (Espagne); tectonique et sédimentation dans un couloir de décrochement; I, Étude régionale*. Documents et Travaux de l'Institut Géologique Albert de Lapparent, 12-13: 239-259.
- Crowell, J.C. (1974): Origin of the late Cenozoic basins in southern California. En: *Tectonics and sedimentation* (W.R. Dickinson, Ed.). *Special Publication of the Society of Economic Paleontologists and Mineralogists*, 22: 190-204.
- Ferrer, P., Masana, E. y Santanch, P. (1999): Expresión geomorfológica de la actividad reciente de la falla de Amer (NE de la Península Ibérica). *Acta Geologica Hispanica*, 31: 17-24.
- Guerra, A. (1992): *La Cuenca Neógena del Corredor de Almanzora*. Tesis Doctoral. Univ. de Granada, 237p.
- Hack, J.T. (1973): Stream profile analysis and stream gradient index. *Journal of Research of the United States Geological Survey*, 1 (4): 421-429.
- Mackin, J.H. (1948): Concept of the graded river. *Bulletin of the Geological Society of America*, 50: 463-512.
- Martínez-Díaz, J.J. (1998): *Neotectónica y tectónica activa del sector Centro-occidental de la región de Murcia y sur de Almería (Cordillera Bética-España)*. Tesis Doctoral. Univ. Compl. de Madrid, 466 pp.
- Martínez-Díaz, J.J. (2000): Indicios morfológico indicativos de tectónica activa en el sector de Lorca-Totana de la falla de Alhama de Murcia. *Boletín Geológico y Minero*, 111-1: 67-76.
- Martínez-Díaz, J.J. y Hernández-Enrile, J.L. (1992a): Tectónica reciente y rasgos seismotectónicos en el sector Lorca-Totana de la Falla de Alhama de Murcia. *Estudios Geológicos*, 48: 153-162.
- Martínez-Díaz, J.J. y Hernández-Enrile, J.L. (1992b): Geometría y cinemática de la zona de cizallamiento Lorca-Totana (Falla de Alhama de Murcia). En: *III Congreso Geológico de España y VII Congreso Latinoamericano de Geología*, Salamanca. Simposios, 2: 420-430.
- Martínez-Díaz, J.J. y Hernández-Enrile, J.L. (1996): Origen y evolución neotectónica de la Sierra de la Tercia. Contribución a la segmentación tectónica de la Falla de Alhama de Murcia. En: *VI Conferencia Internacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio*, Granada, 2: 479-496.
- Martínez-Díaz, J.J. y Hernández-Enrile, J.L. (1999): Segmentación tectónica de la Falla de Alhama de Murcia y actividad paleosísmica asociada. Contribución a la determinación de la peligrosidad sísmica en la región de Murcia. *1º Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, 1: 75-87.
- Martínez-Díaz, J.J., Masana, E., Hernández-Enrile, J.L. y Santanach, P. (2001): Evidence for coseismic events of recurrent prehistoric deformation along the Alhama de Murcia fault, southeastern Spain. *Acta Geologica Hispanica*, 36: 315-327.
- Martínez-Díaz, J.J., Masana, E., Hernández-Enrile, J.L. y Santanach, P. 2003(en prensa): Morphotectonic and tectosedimentary development of an alluvial fan affected by paleosismic activity in a oblique slip fault (Alhama de Murcia Fault, Betic Cordillera-Spain). *Anali di Geofisica*.
- Masana, E., Santanach, P., Martínez-Díaz, J. y Hernández-Enrile, J.L. (2001): Evidence of recurrent pre-historic seismicity of the Alhama de Murcia fault (southeastern Spain). *Journal of Conference EUG XI* April 2001 Abstracts, 6 (1): 299.
- Montenat, C. (1973): *Les formations néogènes et quadernaires du Levant Espagnol*. Thèse Sci. Orsay, Paris Sud, 1170 p.
- Montenat, C., Ott d'Estevou, P. y Aellen de la Chapelle, M. (1990): Les séries neogenes entre Lorca et Huércal Overa. En: *Les bassins neogenes du domaine Bétique oriental (Espagne); tectonique et sédimentation dans un couloir de décrochement; I, Étude régionale*. Documents et Travaux de l'Institut Géologique Albert de Lapparent, 12-13: 281-286.
- Mora, M. (1993): *Tectonic and sedimentary analysis of the Huércal-Overa region, southeast Spain, Betic Cordillera*. Ph.D. Thesis, Oxford University, 300 p.
- Seeber, L. y Gornitz, V. (1983): River profiles along the Himalayan Arc as indicators of active tectonics. *Tectonophysics*, 92: 335-367.
- Silva, P.G. (1994): *Evolución geodinámica de la Depresión del Guadalentín desde el Mioceno superior hasta la actualidad: Neotectónica y Geomorfología*. Tesis Doctoral, Univ. Complutense de Madrid, 642 p.
- Silva, P.G. (1996): Geometría fractal de la Zona de Falla de Lorca-Alhama (Murcia, SE España). *Geogaceta*, 20: 1385-1388.
- Silva, P.G., Goy, J.L. y Zazo, C. (1991): Discordancias progresivas y expresión geomorfológica de los abanicos aluviales cuaternarios de la Depresión tectónica del Guadalentín (Murcia, SE España). *Geogaceta*, 11: 67-70.
- Silva, P.G., Goy, J.L., Somoza, L., Zazo, C. y Bardají, T. (1993): Landscape response to strike-slip faulting linked to collisional settings: Quaternary tectonics and basin formation in the Eastern Betics, southeastern Spain. *Tectonophysics*, 224: 289-303.

- Silva, P.G., Goy, D.L. y Zazo, C. (1992a): Características estructurales y geométricas de la falla de desgarre de Lorca-Alhama. *Geogaceta*, 12: 7-10.
- Silva, P.G., Goy, J.L., Zazo, C. y Bardají, T. (2003): Fault-generated mountain fronts in southeast Spain: geomorphologic assessment of tectonic and seismic activity. *Geomorphology*, 50: 203-225.
- Silva, P.G., Goy, J.L., Zazo, C., Bardají, T., Somoza, L., Dabrio, C.J. y Lario, J. (1992b): Evaluación geomorfológica de la actividad tectónica cuaternaria a lo largo de frentes montañosos de falla en el SE de España. En: *Actas del III Congreso Geológico de España y VIII Congreso Latinoamericano de Geología*, 2: 96-100.
- Silva, P.G., Harvey, A.M., Zazo, C. y Goy, J.L. (1992c): Geomorphology, Depositional style and Morphometric relationships of Quaternary alluvial fans in the Guadalentin Depression (Murcia, Southeast Spain). *Zeitschrift für Geomorphologie*, 36: 289-303.
- Vissers, R.L.M, Platt, J.P. y Van der Wal, D. (1995): Late orogenic extension of the Betic Cordillera and the Alboran domain: A lithospheric view. *Tectonics*, 14: 786-803.
- Voermans, F.M., Simon, O., Martín-García, L. y Gómez Prieto, J.A. (1980): *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 996 (Huércal-Overa)*. IGME, Madrid.
- Wallace, R. (1978): Geometry and rates of change of fault generated range fronts, North-Central Nevada. *Journal of Research of the U.S. Geological Survey*, 6: 637-650.
- Wenzens, E. y Wenzens, G. (1995): The influence of Quaternary tectonics on river capture and drainage patterns in the Huércal-Overa basin, southeastern Spain. En: *Mediterranean Quaternary river environments: refereed proceedings conference*, University of Cambridge, United Kindom, September 1992 (J. Lewin Ed.). A.A. Balkema, Rotterdam, 55-63.

Manuscrito recibido el 8 de enero de 2003

Aceptado el manuscrito revisado el 29 de agosto de 2003