

EVOLUCIÓN TECTÓNICA DEL BORDE ORIENTAL DE LA CUENCA DEL VIAR (ZONA SUDPORTUGUESA)

E. García-Navarro y S. Sierra

Dpto. de Geología, Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Huelva, 21819 Palos de la Frontera, Huelva.

Resumen: La Cuenca del Viar contiene un relleno tipo «molasa» de depósitos fluviales y lacustres de carácter detrítico con intercalaciones de coladas basálticas. Los tramos inferiores contienen abundante flora fósil de edad Autuniense (Pérmico inferior). El límite oriental de la Cuenca del Viar coincide con el contacto de la Zona de Ossa-Morena (ZOM) con la Zona Sudportuguesa (ZSP). Dicho límite es una zona de cizalla frágil con desarrollo de fallas inversas y cabalgamientos. El cabalgamiento principal tiene una vergencia hacia el SW, produciendo un pliegue de geometría cilíndrica en el bloque de muro (Cuenca del Viar). Como consecuencia del ascenso del bloque de techo, se produce la erosión de parte de la cobertera pérmica. Durante el Autuniense y con posterioridad, tuvieron lugar procesos de deformación frágil que culminaron con la superposición de la ZOM sobre la Cuenca del Viar. El estudio de estos procesos mediante análisis poblacional de fallas revela que no se produjeron cambios significativos en la orientación de los paleoesfuerzos (dos de los ejes principales de esfuerzo horizontales, uno de ellos con orientación NE-SW y el tercero situado en la vertical). Sólo tuvo lugar el intercambio de los valores relativos de los ejes. A partir de estos datos, se deduce un episodio extensivo en el Autuniense con una dirección de extensión NE-SW y un episodio compresivo post-autuniense, que dió lugar a la Falla inversa del Viar y cuya dirección de compresión es NE-SW.

Palabras clave: Cuenca del Viar, Autuniense, análisis poblacional de fallas, paleoesfuerzos.

Abstract: The Viar Basin is filled up by molasse-type detritic fluvial and lacustrine sediments, interbedded with basic lava flows. The lower levels have abundant fossil flora of Autunian age (Lower Permian). The eastern Viar Basin margin is coincident with the boundary between the Ossa-Morena and South-Portuguese zones (Spanish Iberian Massif). This boundary is a brittle shear zone marked by the development of reverse faults and thrusts. The main thrust dips to the northeast. A cylindrical fold appears in the footwall to the main thrust (Viar Basin). The upward movement of the hanging wall produced the erosion of the Permian cover materials. The process of brittle deformation took place during the Autunian and later on, and finished with the superimposition of the Ossa-Morena zone on the Viar Basin. The fault analysis does not record major changes in the orientation of the paleostress axes (two of the main stress axes are horizontal, one of them with a NE-SW trend, and the third one is vertical), but only the exchange of relative values of these axes. These data are consistent with an extensional episode during the Autunian with a NE-SW extension and a post-Autunian compressional episode, that gave place to the Viar reverse fault and with a NE-SW orientated compressional axis.

Key words: Viar Basin, Autunian, fault analysis, paleostress.

García-Navarro, E. y Segura, S. (1998): Evolución tectónica del borde oriental de la Cuenca del Viar (Zona Sudportuguesa). *Rev. Soc. Geol. España*, 11 (3-4): 223-232

La tectónica de fracturación que afectó a la Península Ibérica después de las fases principales del ciclo hercínico (Arthaud y Matte, 1975, 1977) condicionó la aparición, durante el Carbonífero Superior-Pérmico Inferior, de pequeñas cuencas continentales de carácter molásico. La Cuenca del Viar fue una de ellas, y representa en la actualidad la única manifestación de sedimentación pérmica en la parte española de la Zona Sudportuguesa (ZSP). Presenta una geometría estrecha y alargada en dirección NW-SE (Fig. 1), y queda alineada con la parte más oriental de la ZSP en contacto con la Zona de Ossa-Morena (ZOM). Así, su límite oriental coincide con el contacto que separa a estas dos importantes zonas del Macizo Ibérico. Este límite fue

modificado por procesos tectónicos postsedimentarios cuya huella quedó reflejada en los sedimentos y rocas sedimentarias que rellenan la cuenca.

En cualquier proceso tectónico, producido por un determinado campo de esfuerzos, existe una relación espacial y genética entre las micro- o mesoestructuras y las macroestructuras que se generan durante el mismo. La medida sistemática de fallas en determinados puntos del borde oriental de la cuenca y su análisis matemático permite desvelar el estado de esfuerzos relacionado con la configuración de este límite.

Este trabajo pretende caracterizar el borde oriental de la Cuenca del Viar desde el punto de vista tectono-estratigráfico. Con este objetivo, se ha estudiado la defor-

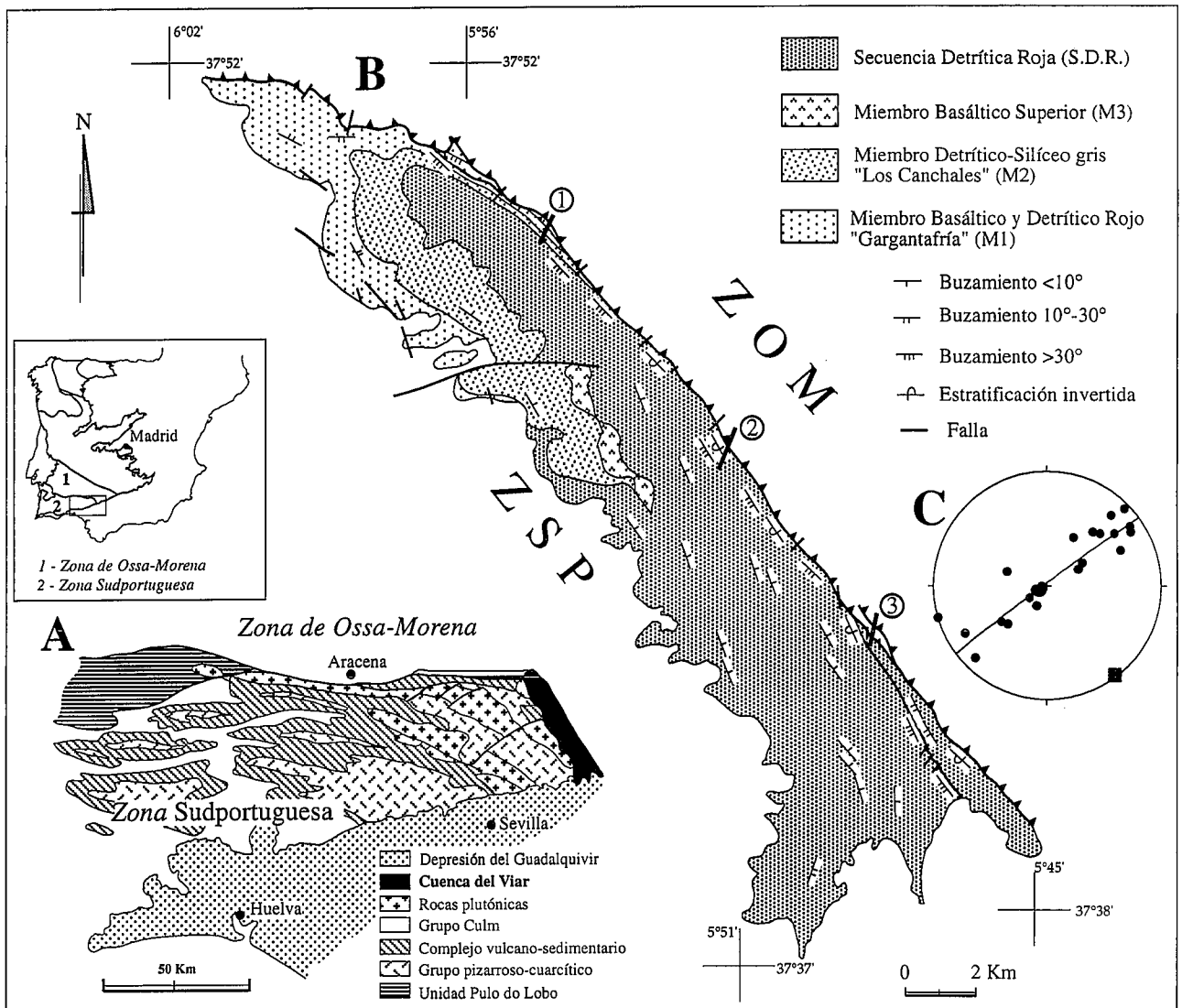


Figura. 1.- Situación geológica de la Cuenca del Viar. 1A: Esquema cartográfico de la Zona Sudportuguesa. 1B: Mapa geológico de la Cuenca del Viar. Los puntos 1, 2, 3, corresponden a la situación de los cortes de la figura 3. ZPS=Zona Sudportuguesa. ZOM=Zona de Ossa-Morena. C: Proyección equiareal (hemisferio inferior) de los polos de la estratificación de la Cuenca del Viar (35 datos); el cuadrado representa la posición del eje del pliegue definido por la estratificación.

mación asociada a dicho borde para evaluar el control estructural del contacto ZSP-ZOM sobre la geometría y extensión cartográfica actual de la cuenca. Por otro lado, se ha hecho un estudio poblacional de las fallas asociadas a este importante límite, para reconocer los estados de esfuerzos que han operado desde el Autuniense.

Marco geológico

El límite entre las zonas de Ossa-Morena y Sudportuguesa es un contacto tectónico de orden mayor en el Macizo Ibérico, que ha sido interpretado como una sutura hercínica (Crespo-Blanc y Orozco, 1988; Quesada, 1991; Castro *et al.*, 1996a; Castro *et al.*, 1996b). Al norte, la ZOM está formada por rocas intensamente deformadas siguiendo una directriz estructural NW-SE. Una amplia variedad de rocas (mármoles, metapelitas, gneises, rocas calcosilicatadas, calizas...), con edades comprendidas entre el Precámbrico y el Carbonífero, han sido deformadas bajo diferentes con-

diciones metamórficas. Al noreste del área estudiada destacan vastas extensiones de rocas plutónicas (granitos, granodioritas). En la ZSP, situada al sur del citado contacto, se desarrolla una tectónica poco profunda caracterizada por cabalgamientos y pliegues que tienen una vergencia hacia el S y SW (Simancas, 1983; Silva *et al.*, 1990). Esta deformación afectó a una sucesión estratigráfica devono-carbonífera que fue establecida por Schermerhörn (1971). Las rocas más antiguas constituyen el denominado Grupo PQ (Grupo de pizarras y cuarcitas), constituido por pizarras, filitas y cuarcitas y cuyo muro no se conoce. Estas rocas afloran en los núcleos de domos cuyo eje largo se dispone con una orientación aproximada E-W (Fig. 1A). El Grupo PQ queda rodeado por rocas volcanosedimentarias pertenecientes al denominado Complejo Vulcanosedimentario (CVS) con importantes y complejos cambios laterales de facies y de espesor. El CVS aloja importantes yacimientos de sulfuros masivos cuyo significado y génesis ha sido revisado recientemente (Sáez *et al.*, 1997).

Dataciones recientes basadas en criterios palinológicos han permitido establecer para el muro del CVS una edad Fameniense superior (Oliveira *et al.*, 1997). Depósitos turbidíticos de tipo flysch recubrieron a las secuencias litoestratigráficas anteriores (Moreno, 1993). Simultáneamente con la deformación, y con posterioridad a ella, se produce la intrusión de rocas ígneas plutónicas formando un importante batolito en el extremo oriental de la ZSP (de la Rosa, 1992). La parte oriental de este batolito constituyó el zócalo sobre el que se depositaron los sedimentos pérmicos de la Cuenca del Viar. Finalmente, los sedimentos terciarios de la Depresión del Guadalquivir cubrieron las zonas meridionales de la ZSP y de la Cuenca del Viar.

Estratigrafía

La serie estratigráfica tipo de la Cuenca del Viar está representada por depósitos detríticos y volcánicos (Fig. 2). Coincide, de manera general, con el modelo de relleno que caracteriza a las cuencas continentales pérmicas del resto de los Hercínides Europeos. Los materiales de la Cuenca del Viar se disponen en una secuencia mixta de «capas grises y rojas» e intercalaciones de lavas básicas (basaltos) hacia la base de la columna, y sólo «capas rojas» hacia el techo. Las unidades litológicas que forman el relleno de esta cuenca son, de muro a techo (según Simancas, 1983): a) Miembro basáltico y detrítico rojo «Gargantafría» (M1), b) Miembro detrítico-silíceo gris «Los Canchales» (M2), c) Miembro basáltico superior (M3) y d) Secuencia Detrítica Roja (SDR). Los tramos inferiores (Miembros M1 y M2) contienen abundante flora fósil datada por Broutin (1981) como Autuniense.

Los tres primeros miembros afloran exclusivamente en la mitad norte de la cuenca, donde existe la mayor variabilidad litológica (Fig. 1B). En cambio, la SDR se extiende mayoritariamente en el sector meridional. Todos ellos llegan a contactar con la ZOM en el límite oriental de la cuenca (Fig. 1A).

Los materiales del Miembro basáltico y detrítico rojo «Gargantafría» constituyen la base de la columna estratigráfica (Fig. 2). Consisten en capas rojas de conglomerados, areniscas groseras y lutitas, intercaladas con niveles de basaltos. Las rocas detríticas se presentan en cuerpos lenticulares y tabulares, cuyo ordenamiento interno consiste en estratificaciones cruzadas en surco, granuloclasificaciones normales y estructuras masivas. Los basaltos son de naturaleza toleítica olivínica (Simancas y Rodríguez Gordillo, 1980) y se presentan en tramos de potencia métrica a decamétrica, aunque a veces llegan a superar los 100 m.

Las rocas del Miembro detrítico-silíceo gris «Los Canchales» son capas grises constituidas por areniscas, conglomerados de grano fino, lutitas y nivelillos de carbón. Estos materiales suelen estar muy silicificados y su aspecto de campo contrasta notablemente con el resto de los depósitos de la cuenca. Aparecen en estratos tabulares de potencia decimétrica, en los que dominan las estructuras masivas, laminación horizontal y estratificación cruza-

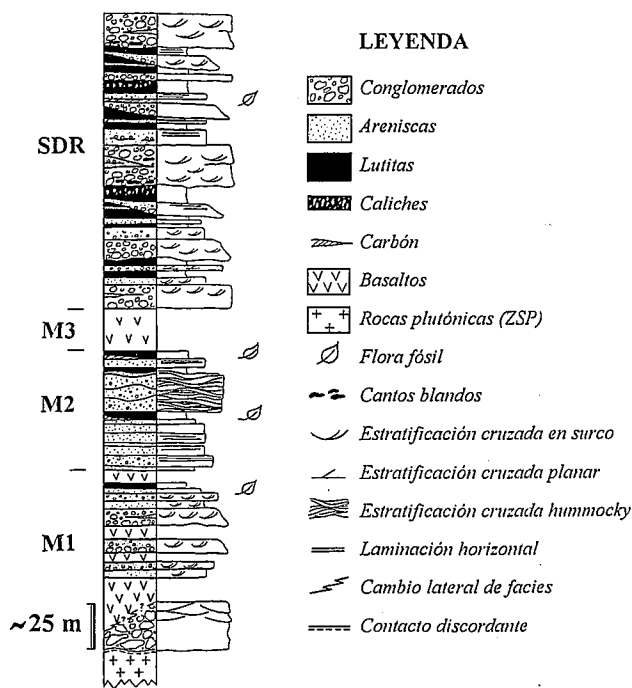


Figura 2.- Columna estratigráfica de la Cuenca del Viar. M1: Miembro Basáltico y Detrítico Rojo «Gargantafría». M2: Miembro Detrítico-Silíceo gris «Los Canchales». M3: Miembro Basáltico Superior. SDR: Secuencia Detrítica Roja.

da de tipo hummocky. Su depósito se atribuye a medios lacustres (Simancas *et al.*, 1983).

La SDR conforma el techo de la columna estratigráfica general. Esta constituida por capas rojas de conglomerados, areniscas y lutitas, agrupadas en secuencias granodecrecientes. Los conglomerados forman la base de estas secuencias. Son poligénicos y polimodales, con un contenido en matriz variable. Definen cuerpos tabulares de más de 10 m de potencia, construidos por unidades canaliformes menores que les confieren una organización interna muy compleja (Sierra *et al.*, 1995). Las areniscas constituyen tramos de menor potencia formados por cuerpos de geometría variable, ya sea canaliforme, tabular o lobulada. Representan el depósito de pequeñas barras, relleno de canales y *crevasse-splay*. Asociados a estas facies aparecen niveles centimétricos de carbón. Los tramos lutíticos están constituidos por arcillas arenosas con niveles de nódulos y costras carbonatados correspondientes a suelos tipo caliche. El estudio sedimentológico de los materiales de la SDR pone de manifiesto su origen fluvial en ríos de baja sinuosidad cuyas corrientes fueron enérgicas y muy fluctuantes (Sierra, 1995). Las paleocorrientes se dirigían hacia el NW con cierta dispersión de unas medidas a otras. A partir del análisis textural composicional de las areniscas de la SDR, Sierra y Moreno (1997) han puesto de manifiesto que la Cuenca del Viar debió de tener una extensión mayor hacia el NE y que su geometría actual está en relación con la evolución postsedimentaria del contacto entre las Zona de Ossa-Morena y la Zona Sudportuguesa.

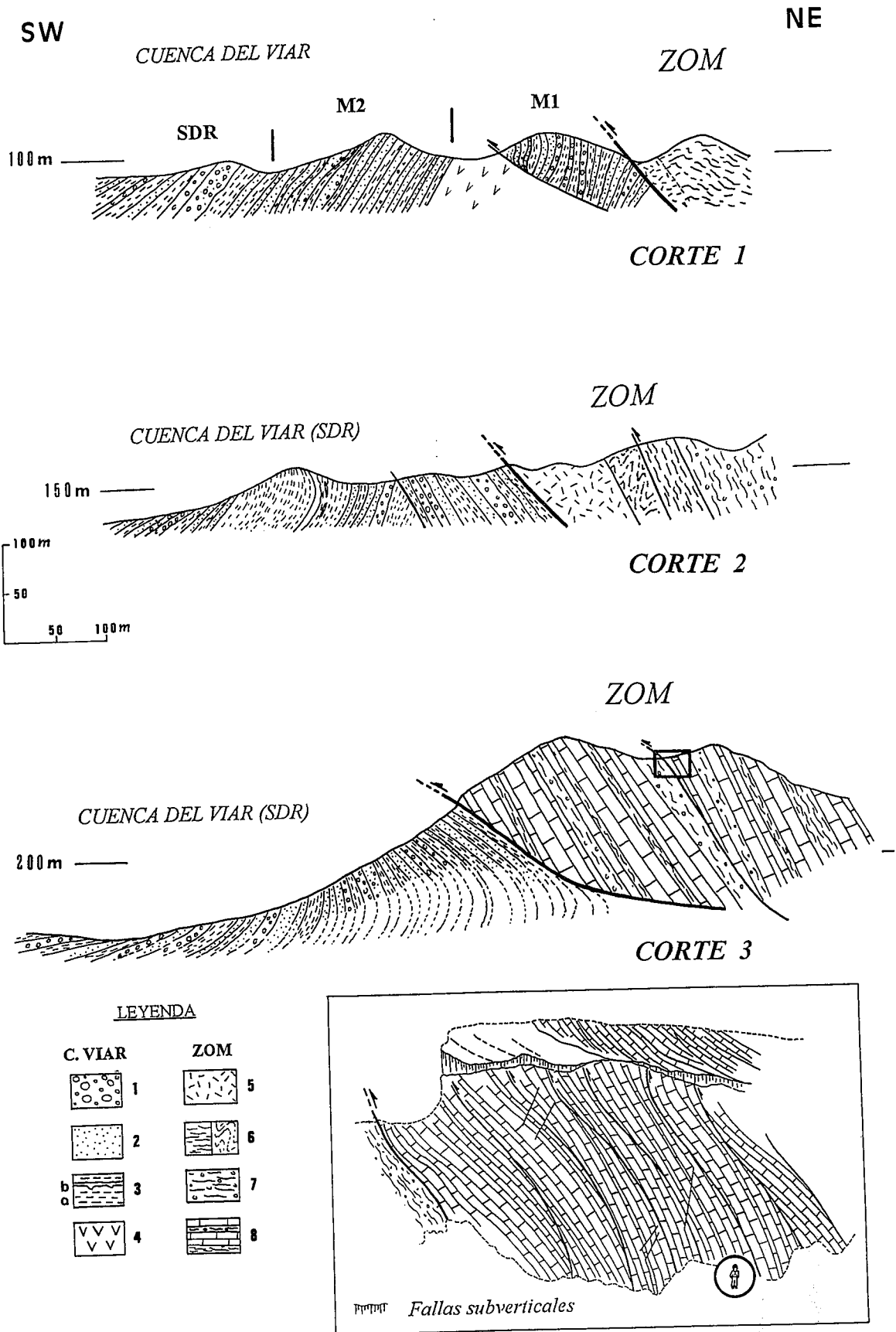


Figura 3.- Cortes geológicos transversales al límite oriental de la Cuenca del Viar (ver situación en figura 1). En el corte 3 se presenta un esquema detallado de la zona enmarcada señalada en el mismo. M1: Miembro Basáltico y Detrítico Rojo «Gargantafría». M2: Miembro Detrítico-Silíceo gris «Los Canchales». SDR: Secuencia Detrítica Roja. ZOM: Zona de Ossa-Morena. **LEYENDA:** 1: Conglomerados. 2: Areniscas. 3a: Lutitas. 3b: Lutitas con caliche. 4: Basaltos. 5: Roca de falla. 6: Filitas. 7: Gneises. 8: Mármoles con intercalaciones de gneises, rocas calcosilicatadas y filitas.

Geometría y cinemática del borde oriental

Falla inversa del Viar

El límite norte de la Cuenca del Viar está estructurado en un conjunto de escamas y cabalgamientos frágiles de dirección aproximada E-W, desarrollados en niveles muy superficiales (Simancas, 1985). Por su parte, el límite oriental es una zona de falla buzante al noreste con movimiento del bloque de techo hacia el SW, llegando a ponerse los materiales de la ZOM sobre los sedimentos de la cuenca (Fig. 3).

El análisis geométrico detallado de la zona de falla del borde oriental pone de manifiesto la existencia de una falla principal (Falla inversa del Viar), con carácter de rampa respecto al bloque de muro, que constituiría la falla basal en relación con la propagación de una serie de fallas inversas y cabalgamientos. La traza de esta falla tiene una dirección media de N140°E en la parte norte, y de N150°E hacia el sur (Fig. 1B). Su longitud mínima es de 25 km, ya que el extremo meridional de la misma queda cubierto por sedimentos neógenos de la depresión del Guadalquivir (Fig. 1). La complejidad tectónica en la zona de Almadén de la Plata hace difícil establecer con seguridad la prolongación de la falla hacia el norte. La medida sistemática de estrías y fibras de crecimiento sintectónico a lo largo de la zona de cizalla ha permitido establecer que la dirección de transporte tectónico para el bloque de techo es hacia N225°E.

La orientación de la estratificación en el labio inferior está condicionada por la existencia de un pliegue (Simancas, 1983, 1985). Los sedimentos de la Cuenca del Viar definen una estructura sinclinal con un eje ligeramente inclinado hacia el SE (Fig. 1C). Los buzamientos de los sedimentos pérmicos son, en general, relativamente bajos (inferiores a 10°), y sólo en las proximidades de la falla adquieren altos buzamientos, llegando en ocasiones a invertirse. La dirección media de los estratos, en las proximidades del límite oriental, varía progresivamente de norte a sur, desde N135°E a N165°E, por lo que resulta ser subparalela a la de la falla principal (Fig. 1B). Del análisis geométrico del sinclinal del labio inferior de la falla, se deduce un pliegue cilíndrico con pequeñas variaciones de la orientación del eje (Fig. 4: A, B(2) y D(3)), las cuales se asocian a los cambios en la orientación de la traza de la falla. Las inclinaciones del eje del pliegue, en los diferentes sectores en los que han sido calculadas, son sistemáticamente hacia el SE o subhorizontales. Así, en la parte septentrional es horizontal y de dirección N134°E (Fig. 4A). En la parte central del contacto, el eje se inclina 16° hacia N142°E (Fig. 4B(2)), y en la parte sur el eje tiene una inmersión de 5° hacia N161°E (Fig. 4D(3)).

En el bloque de techo se individualizan distintas escamas tectónicas, que separan conjuntos litológicos diferentes pertenecientes todos ellos a la Zona de Ossa-Morena (Fig. 3). En general, se trata de un abanico de escamas orientadas en dirección NW-SE. Una de las escamas más importantes es la de Sierra Traviesa, formada por mármoles, gneises, rocas calcosilicatadas... (Fig. 3, corte 3).. En el interior de las escamas, existe

una deformación previa en la que la estructura más significativa es una foliación tectónica de tipo esquistosidad. En los gneises la fábrica planar es de tipo milonítica. La dirección de la foliación es NW-SE y buzamientos, en general, superiores a 45° (Fig. 4B(3) y 4E(5)). Es frecuente que los planos de foliación sean reaprovechados por fallas posteriores (ver esquema del corte 3 en Fig. 3).

En las proximidades a las fallas principales se observan, a veces, pequeños arrastres en la foliación y en muchos casos desarrollo de importantes brechas de falla.

Orientación y distribución de los sistemas de fallas a lo largo del contacto ZOM-ZSP

Con el objetivo de obtener el estado de esfuerzos ligado a la estructuración del borde oriental de la cuenca, se ha hecho una medida sistemática de fallas en las proximidades del contacto de la ZSP-ZOM (Fig. 4). Primero se hará una descripción breve de las fallas medidas y luego se describirán los resultados del análisis dinámico.

En la *zona central del contacto* se realizaron medidas de fallas inversas en filitas, gneises (Fig. 4B) y en mármoles (Fig. 4C), pertenecientes a la ZOM. La dirección de las fallas es NW-SE y buzamientos al noreste. Las fallas medidas en mármoles constituyen los datos de la Estación 1, utilizados para el cálculo del tensor de esfuerzos en el apartado de análisis dinámico.

En la *zona sur*, se han medido fallas en mármoles de la ZOM de tipo inverso o dextral de dirección cercana a la N-S (Fig. 4D(2)). Al otro lado del contacto, las fallas desarrolladas en los materiales de la cuenca (conglomerados y lutitas de la SDR), no mostraron estrías (Fig. 4D(1)), aunque sí se observó desplazamiento relativo de los labios. Próxima a este punto del contacto pero más hacia el este se sitúa la Estación 2 de medida para análisis poblacional (Fig. 4E).

Análisis dinámico

El análisis poblacional de fallas es una metodología cada vez más utilizada para obtener el estado de esfuerzos causante del movimiento de un conjunto de fallas. Esta metodología o aproximación al cálculo del tensor de esfuerzo, que viene desarrollándose sobre todo a partir de los años 60, ha dado lugar a variados y numerosos métodos. De entre ellos, se han elegido para este trabajo los métodos de los diedros rectos (Angelier y Mechler, 1977) y el de inversión de esfuerzos (Reches, 1987; Reches *et al.*, 1992).

Previamente a la aplicación de dichos métodos, se ha procedido primero a la separación de las fallas en diferentes grupos, que pudieron haber actuado en momentos distintos. Con este objetivo se han establecido varias familias en función de criterios de campo (relaciones de corte de unas con respecto a otras) y se ha deducido el orden relativo de las mismas, siempre que esto ha sido posible.

El método de los diedros rectos (Angelier y

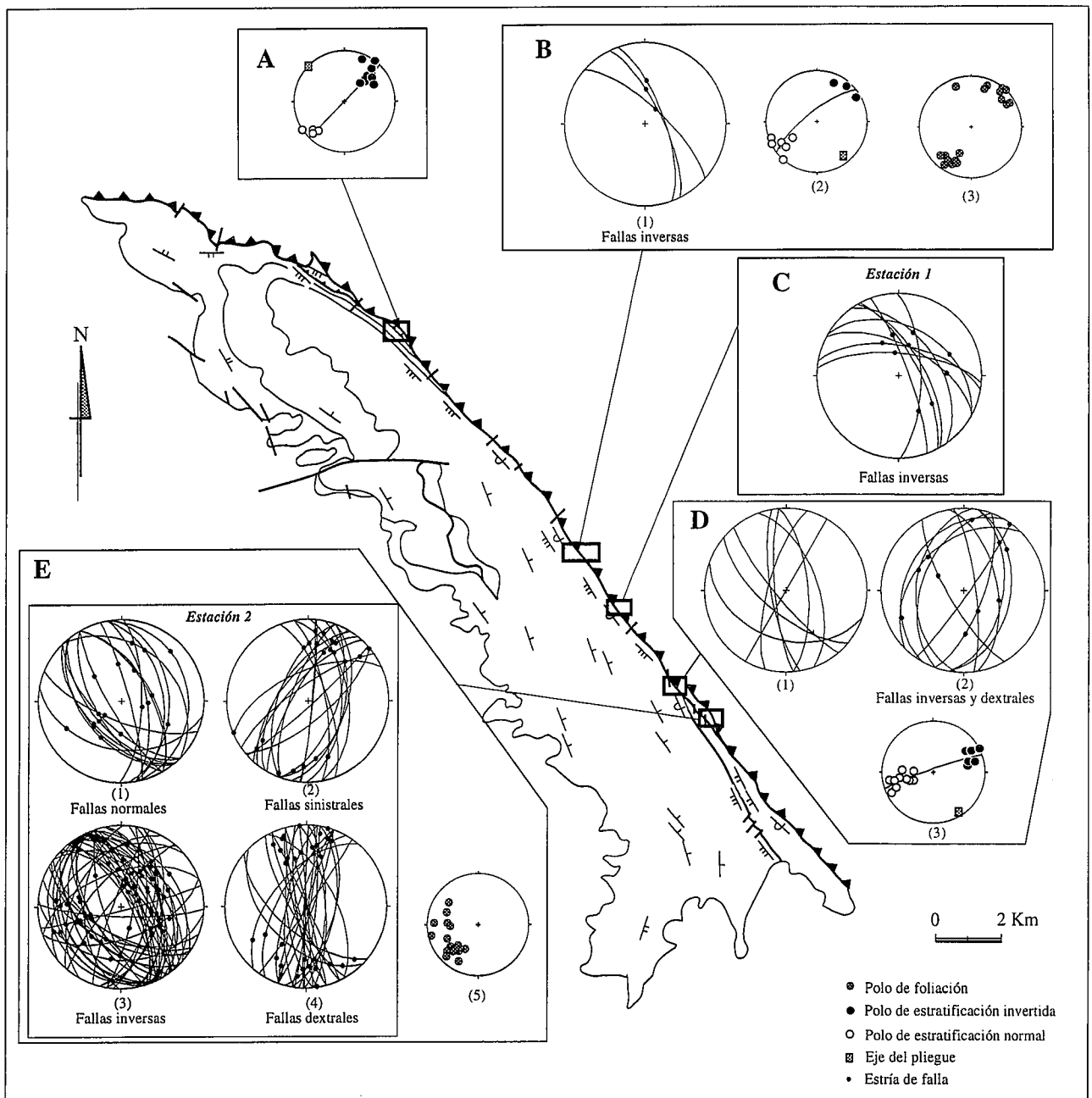


Figura 4. -Proyección equiareal (hemisferio inferior) de los datos estructurales medidos y situación de los mismos en la Cuenca del Viar; N= número de datos: **A:** Polos de la estratificación y eje del pliegue, N=13. **B:** (1) Fallas medidas en diversas rocas de la ZOM, N=3. (2) Polos de la estratificación y eje del pliegue en materiales de la cuenca, N=9. (3) Foliación de filitas en ZOM, N= 16. **C: Estación 1:** Planos de falla medidos en mármoles pertenecientes a la ZOM, N=9. **D.** (1) Planos de falla medidos en los materiales de la Cuenca, N=9. (2) Fallas medidas en mármoles en ZOM, N=11. (3) Estratificación y eje del pliegue definido por los materiales de la cuenca, N=16. **E: Estación 2:** (1), (2), (3) y (4) Fallas medidas en mármoles de ZOM, N= 18, 21, 59 y 32 respectivamente. (5) Foliación en los mármoles, N=16.

Mechler, 1977), también aplicable en Sismología, es un método gráfico que utiliza la proyección estereográfica o equiareal con el objeto de obtener zonas acotadas del espacio, en las que se encontrarán las direcciones de compresión o extensión comunes a todas las fallas de una población. Angelier (1994), demuestra que los ejes principales del esfuerzo máximo y mínimo, σ_1 y σ_3 , estarán respectivamente contenidos en las zonas de máxima compatibilidad en compresión o en extensión del conjunto de fallas siempre que su movimiento haya sido originado por un tensor de esfuerzo común. Este método no es aplicable a poblaciones de fallas

politensoriales. Para una buena interpretación de la solución obtenida habrá que tener en cuenta, por un lado, la existencia de geometrías especiales producto de la mezcla de fallas de distinto tipo (De Vicente *et al.*, 1992), y por otro, dos condiciones adicionales propuestas por Lisle (1987) para precisar la solución: los ejes de máxima compresión y de máxima extensión deben ser perpendiculares y además deben de estar contenidos en parejas opuestas de diedros.

El método de inversión de esfuerzos (Reches, 1987; Reches *et al.*, 1992) permite obtener resultados numéricos de las componentes del tensor de esfuerzo. Está

basado en la ecuación de Bott (1959) e incorpora, además en sus cálculos, el criterio de rotura de Coulomb. De esta forma, se obtienen las orientaciones y magnitudes de los esfuerzos principales para varios valores de coeficientes de fricción (μ) comprendidos entre 0 y 2, aportando un valor de la cohesión media para el conjunto de fallas. Todos los valores (magnitudes de los esfuerzos principales y cohesión) calculados por el método son referidos a un valor fijo de esfuerzo vertical, que se asume igual a 100. Con todos estos parámetros es posible elegir la solución óptima que más se adapte al contexto geológico de la zona de estudio. El método aporta también valores medios de la desviación entre las orientaciones de las estrías teóricas y reales (ángulo SM) asociadas a la población de fallas y de la desviación entre la orientación de los ejes de esfuerzo teóricos y reales (ángulo PAM). También aporta valores del error cuadrático medio del cálculo de cada uno de los tensores solución y el valor de la relación entre los ejes de esfuerzo ($\phi = \sigma_2 - \sigma_3 / \sigma_1 - \sigma_3$). En Reches *et al.* (1992), se propone como criterio básico de elección de la solución, que PAM sea el menor de todos los correspondientes a cada valor de μ . En este trabajo, aunque dándole menor prioridad, se ha tenido en cuenta además, que el ángulo SM y el error cuadrático medio sean lo menores posible, de acuerdo con Reches (1987), así como que la solución obtenida ajuste el mayor número posible de fallas.

Se han realizado, para este trabajo dos estaciones de medida, que se consideran representativas de la deformación asociada al borde oriental de la Cuenca del Viar. La Estación 1 se encuentra situada en la parte central del contacto (Fig. 4C), y la Estación 2 se sitúa en la parte sur del contacto en los mármoles de Sierra Traviesa (Fig. 4D). Los resultados gráficos se muestran en la figura 5.

Estación 1

En esta estación se han medido solamente fallas inversas. Muestran una dirección NW-SE, buzamientos mayores de 50° , y estrías con cabeceos mayores de 50° . Al ser tratadas por el método de diedros rectos se deduce una dirección de compresión ENE-WSW (entre $N20^\circ E$ y $N80^\circ E$). La dirección de distensión se sitúa cercana a la vertical. Del método de inversión de esfuerzos se ha escogido la solución correspondiente a $\mu=0.1$, con un error cuadrático medio de 3° . Para este coeficiente de fricción la inmersión y dirección de inmersión de los esfuerzos principales sería: $\sigma_1 = 26^\circ$ hacia $N34^\circ E$; $\sigma_2 = 5^\circ$ hacia $N302^\circ E$ y $\sigma_3 = 63^\circ$ hacia $N201^\circ E$. Esta solución explica un 89% de los datos (8 fallas de las 9 medidas) y corresponde a valores de PAM y SM aceptables. A partir de $\mu=0.2$ los valores de SM se hacen muy grandes, con lo que las soluciones son menos aceptables (Fig. 5).

Estación 2

Se sitúa en la parte sur del contacto, en las canchales de mármoles de Sierra Traviesa (Fig. 4E (1), (2), (3) y (4)). La mayoría de las fallas muestran buenos crite-

rios cinemáticos asociados al deslizamiento, ya que se encuentran tapizadas por calcita sincinemática. En los mármoles de Sierra Traviesa se midieron un total de 130 fallas con dirección y sentido de movimiento. Del total de medidas se separaron los siguientes grupos: un 30% corresponden a fallas de tipo normal y sinistral. Un 45% corresponde a fallas inversas y un 25% son fallas con deslizamiento de tipo dextral.

Las fallas normales (Fig. 4E(1)) tienen una dirección NW-SE. El buzamiento más frecuente es el de 60° hacia el SW y muestran estrías cuyos cabeceos oscilan entre 45° y 90° . Las fallas sinistralas tienen una dirección media NNE-SSW. Los buzamientos más frecuentes están comprendidos entre 60° y 80° y las estrías presentan cabeceos menores de 40° . Ambos tipos de fallas se encuentran cortadas por las fallas de tipo inverso, y nunca al revés, por lo que deducimos que son anteriores a estas últimas. Con este criterio fueron tratadas conjuntamente para obtener el estado de esfuerzo anterior al que produjo la formación de las fallas inversas. Al aplicarles el método de los diedros rectos se obtiene que el esfuerzo máximo estaría situado próximo a la vertical. La dirección principal de distensión estaría situada entre las direcciones $N35^\circ E$ y $N70^\circ E$, y próxima a la horizontal. La solución escogida por el método de inversión de esfuerzos, es la correspondiente a un valor de $\mu=0.3$, la cual corresponde al valor mínimo de PAM. El error cuadrático es de 9° . Para este valor de coeficiente de fricción, el tensor obtenido explicaría un 85% de las fallas. σ_1 tendría una inmersión de 73° en dirección $N145^\circ E$, σ_2 se inclinaría 16° según $N324^\circ E$ y σ_3 estaría en posición horizontal con una dirección $N54^\circ E$.

Las fallas inversas son las más frecuentes. Muestran en general orientación NW-SE y buzamientos altos tanto al NE como al SW, siendo los primeros los más abundantes. Se encuentran desde escala centimétrica a decamétrica. Las fallas de mayores dimensiones buzaban al NE y conforman un sistema de escamas (Fig. 3, corte 3). Las estrías muestran cabeceos que oscilan entre 47° y 90° , siendo los más frecuentes los comprendidos entre 60° y 70° . Por el método de los diedros rectos se obtiene una dirección de compresión máxima NE-SW, comprendida entre $N10^\circ E$ y $N120^\circ E$. El mínimo esfuerzo principal estaría situado en posición vertical. Por su geometría, el diagrama obtenido corresponde a un estado de esfuerzo típico de fallas inversas. La solución elegida por el método de inversión de esfuerzos es la correspondiente a $\mu=0.2$. Este resultado es el que presenta un valor mínimo de PAM y explica el 100% de las fallas con un error cuadrático de 9° . Los esfuerzos principales σ_1 y σ_2 estarían cercanos a la horizontal y se inclinarían 11° en dirección $N64^\circ E$ y 12° según $N156^\circ E$, respectivamente. El eje σ_3 tendría una inclinación de 72° según $N291^\circ E$.

La última familia de fallas que debió de formarse es la de las fallas dextrales, las cuales, se encuentran en numerosas ocasiones cortando o desplazando a fallas inversas previas. Con una dirección media N-S, los buzamientos que presentan son en general mayores de

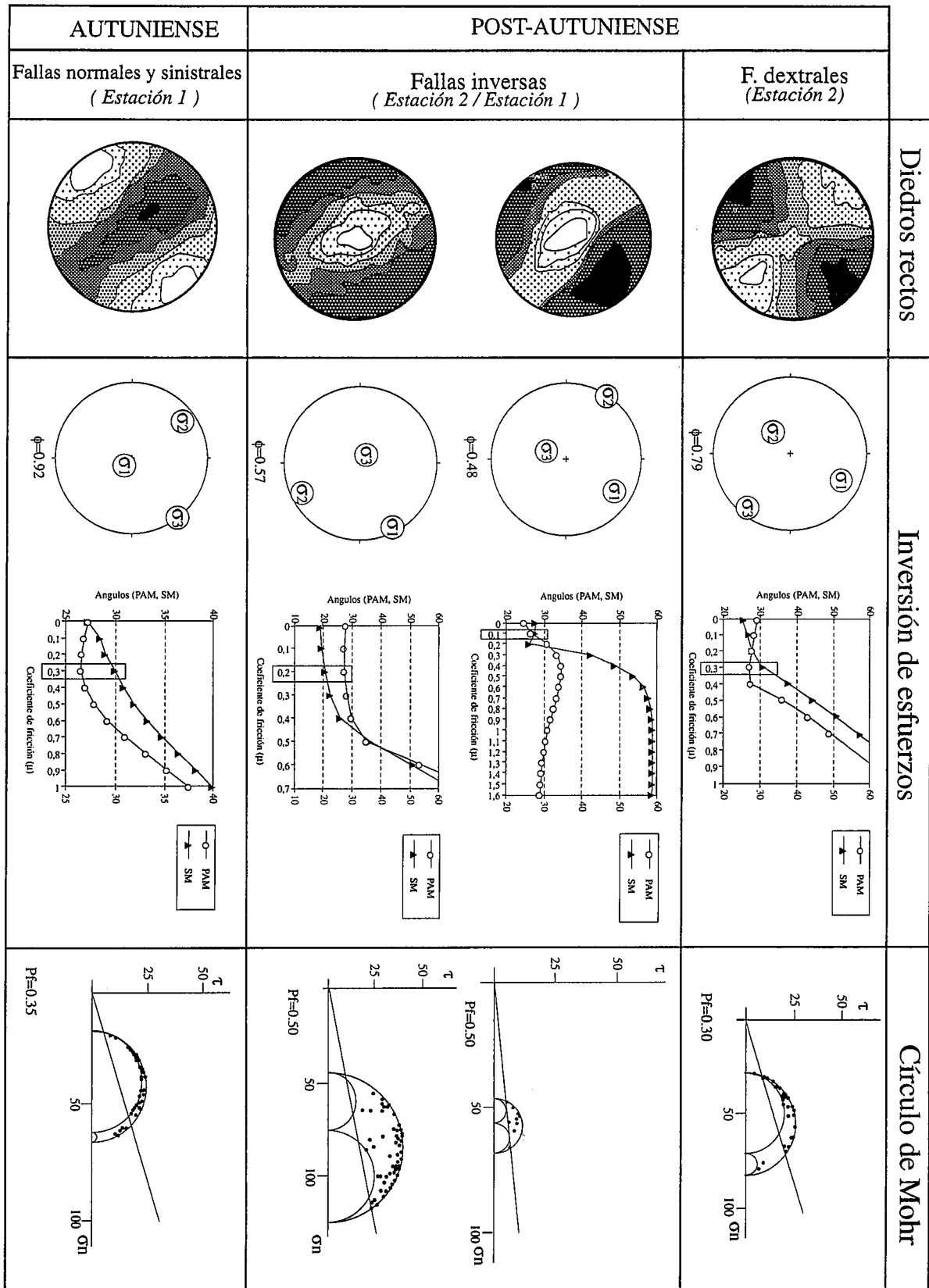


Figura 5.- Resultados gráficos del análisis dinámico mediante los distintos métodos de análisis poblacional. *Método de diedros rectos*: Proyección estereográfica de las zonas compatibles 100% en compresión (negro) hasta zonas 100% compatible con distensión (en blanco). La trama punteada representa zonas con porcentajes de compresión o tensión intermedios entre ambos extremos. *Método de inversión de esfuerzos*: Proyección equiareal de los resultados de la orientación de los esfuerzos principales y valores de $\phi = \sigma_2 - \sigma_3 / \sigma_1 - \sigma_3$. Gráfica en la que se representa la variación angular de los valores de PAM y SM en función de los coeficientes de fricción, (a partir de valores mayores de μ de los representados, aumentan mucho más PAM y SM, así como el número de fallas no explicadas por el tensor), el rectángulo representa la solución escogida. Representación en un diagrama de Mohr de los resultados de este método, Pf = Presión de fluidos relativa (más explicación en el texto).

70°. Los cabeceos más frecuentes están comprendidos entre los 20° y 30°. La solución aportada por el método de los diedros rectos, indica que la dirección de compresión máxima estaría comprendida entre N40°E y N60°E. La dirección de σ_3 estaría situada entre N110°E y N160°E. La solución escogida a partir del método de inversión de esfuerzos es la correspondiente a un $\mu=0.3$, en la que el error cuadrático es de 10° y explica el 91% de las fallas medidas. Esta solución es también la correspondiente a un valor mínimo del ángulo PAM y la orientación de los esfuerzos principales correspondientes es: σ_1 se inclina 26° en dirección N30°E, σ_2 se inclina 60° en dirección N238°E y σ_3 se inclina 11° según N126°E.

Aspectos mecánicos

Para todos los casos se deduce la existencia de cierta presión de fluidos (Pf), cuyos valores normalizados respecto del esfuerzo vertical ($\sigma_{33}=100$), vienen expresados en la figura 5. Esto viene avalado en campo, por la existencia de gran cantidad de carbonatos asociados al movimiento de las fallas, que aparecen tanto en los mármoles de la ZOM, como en las fallas desarrolladas en rocas pertenecientes a la Cuenca del Viar.

A partir de los resultados del método de inversión de esfuerzos y su representación en el círculo de Mohr, puede observarse que las fallas explicadas por los tensores calculados, quedan situadas por encima o sobre la línea de fracturación definida por el coeficiente de fricción medio y una cohesión prácticamente nula; las fallas no explicadas quedarían por debajo. El valor de la cohesión no puede ser determinado de forma independiente por este método por lo que, al igual que el resto de los métodos basados en la ecuación de Bott (1959), sólo explica el deslizamiento sobre planos determinados pero no la resistencia cohesiva (Muñoz, 1997). En todos los casos las fallas explicadas por cada tensor se proyectan con una disposición aleatoria dentro del abanico definido por la intersección de la línea de fracturación y el círculo de Mohr. Esta disposición obedece en parte al hecho de tratarse de planos previos reactivados (Muñoz, 1994, 1997), lo cual explicaría también los bajos coeficientes de fricción obtenidos. El hecho de que las fallas analizadas corresponden en la mayoría de los casos a discontinuidades anteriores rejugadas es perfectamente observable en campo ya que se han encontrado planos de falla con varias estrías, evidenciando que se han movido en momentos distintos, así como las relaciones de paralelismo de las fallas con la foliación o contactos litológicos (Fig. 3, corte 3).

Discusión

Los materiales de los tramos basales de la secuencia estratigráfica de la Cuenca del Viar han sido datados como Autuniense (Broutin, 1981). La apertura de dicha cuenca comenzó probablemente, a partir de esta edad, ligada a una extensión en la que tuvo lugar la extrusión de lavas básicas en diversos miembros de la serie (Miembro detrítico Rojo «Gargantafría» y Miem-

bro Basáltico Superior). Las fallas normales (y sinistralas) detectadas en la ZOM (Fig. 4E(1)), cuya dirección es paralela a la de la cuenca constituyeron probablemente el reflejo tectónico de esta apertura. La dirección de extensión calculada para las fallas anteriores a los procesos de deformación frágil contractiva que afectaron a su borde oriental, es NE-SW (perpendicular a la de la cuenca).

Con posterioridad a la génesis de la cuenca se formó una falla inversa principal (Falla inversa del Viar), en cuyo bloque de techo (ZOM) se desarrolló una serie de fallas inversas y cabalgamientos, y en cuyo bloque de muro (Cuenca del Viar) tuvo lugar la formación de un gran pliegue tumbado con un gran flanco inverso, que afectó a todos los materiales de la cobertera pérmica. La dirección de compresión durante este episodio se situó en dirección NE-SW, la cual es aproximadamente perpendicular, a la de la traza cartográfica de la Falla inversa del Viar. La formación de estas estructuras dió lugar a la erosión y reducción de gran parte de la extensión primitiva de la cuenca. Subsecuentemente al desarrollo de las fallas inversas se produjeron fallas dextrales, que aparecen sistemáticamente cortando a las fallas inversas, e incluso producen pequeños desplazamientos en la traza cartográfica de la Falla inversa del Viar en la parte central y sur (mapas de las Fig. 1 y 4). Aunque es difícilmente demostrable, una posible explicación a la presencia final de estas fallas dextrales podría ser el aumento de la presión litostática, debido al engrosamiento cortical producido por las fallas inversas previas que condujeron a aumentar el esfuerzo en la vertical con lo que éste pasó de ser σ_3 a ser σ_2 . Esta etapa contractiva debió de tener lugar con posterioridad al depósito de los materiales de la Cuenca del Viar, al menos posteriormente al Autuniense, ya que la edad de los materiales del techo de la serie (SDR) es desconocida.

El tratamiento mediante análisis poblacional de las fallas medidas cerca del límite ZOM-ZSP (realizado por los métodos de diedros rectos y de inversión de esfuerzos) muestra en primer lugar, gran coherencia en los resultados, obteniéndose orientaciones similares de los esfuerzos principales. Se comprueba además, la existencia de cierta presión de fluidos durante la fracturación y la presencia frecuente de reactivaciones de planos previos de discontinuidad (foliaciones, contactos litológicos, fallas).

Conclusiones

La configuración actual del borde oriental de la Cuenca del Viar se debe a deformaciones postautunienses. El análisis estructural geométrico de dicho borde revela la existencia de una asociación de fallas inversas y cabalgamientos. La falla basal tiene una orientación NW-SE y movimiento del bloque de techo al SW. En el labio inferior se produce un pliegue tumbado o volcado con un eje orientado NW-SE, subhorizontal o levemente inclinado al SE. Esta falla

tiene carácter de rampa para el bloque de muro, y constituye el frente de propagación de los cabalgamientos.

Del estudio de los paleoesfuerzos asociados a la deformación frágil que se desarrolló a partir de la formación de la cuenca se deduce que la orientación de los esfuerzos principales no ha variado, esencialmente, desde el Autuniense hasta la última deformación detectada. Lo que sí es evidente que se ha producido un intercambio entre los valores de los esfuerzos principales. Se puede hablar de dos episodios de deformación. El primero de ellos tuvo lugar durante el Autuniense y se desarrollaron fallas normales y fallas sinistralas, siendo la dirección de extensión NE-SW. Posteriormente a esta edad se produce una etapa compresiva, con el desarrollo de fallas inversas y fallas dextrales posteriores con una dirección de compresión NE-SW, que dieron lugar a la estructura actual del límite de la cuenca.

Deseamos expresar nuestro agradecimiento a Carlos Fernández y Carmen Moreno por los comentarios críticos realizados tras la lectura de este trabajo, así como a F. M. Alonso por sus observaciones a lo largo de la realización del mismo. Agradecemos así mismo las revisiones a este trabajo realizadas por los Drs. A. Muñoz y C. Sanz de Galdeano que han contribuido a la mejora del manuscrito original. Este trabajo ha sido financiado por el proyecto de la DGICYT PB 94-1085, así como por el Grupo de Investigación de la Junta de Andalucía RNM 0173

Bibliografía

- Angelier, J. (1994): Fault slip analysis and paleostress reconstruction. Cap. 4, En: *Continental Deformation*, (Paul L. Hancock, ed.): 53-120
- Angelier, J. y Mechler, P. (1977): Sur un méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et séismologie: La méthode des dièdres droits. *Bull. Soc. Géol. France*, 7: 1309-1318.
- Arthaud, F. y Matte, PH. (1975): Les décrochements tardihercyniens du Sud-Ouest de l'Europe. Géométrie et essai de reconstitution des conditions de la formation. *Tectonophysics*, 25: 139-171.
- Arthaud, F. y Matte, PH. (1977): Late paleozoic strike-slip faulting in southern Europe and northern Africa: Result of a right-lateral shear zone between the Appalachians and the Urals. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 88: 1305-1320.
- Bott, M. H. P. (1959): The Mechanics of Oblique Slip Faulting. *Geological Magazine*, 96: 109-117.
- Broutin, J. (1981): *Etude paléobotanique et palynologique du passage Carbonifère-Permien dans les bassins continentaux du Sud-Est de la Zone d'Ossa-Morena (environs de Guadalcanal, Espagne du Sud). Implications paléogéographiques et stratigraphiques*. Thèse Doctoral, Université Paris: 234 p.
- Castro, A., Fernández, C., de la Rosa, J., Moreno-Ventas, I. y Rogers, G. (1996a): Significance of MORB-derived Amphibolites from the Aracena Metamorphic Belt, Southwest Spain. *J. Petrol.*, 37: 235-260.
- Castro, A., Fernández, C., de la Rosa, J., Moreno-Ventas, I., EL Hmidi, H., El Biad, M., Bergamín, J.F. y Sánchez, N. (1996b): Triple-junción migration during Paleozoic plate convergence: the Aracena metamorphic belt, Hercynian massif, Spain. *Geol. Rundsh.*, 85: 180-185
- Crespo-Blanc, A. y Orozco, M. (1988): The Southern Iberian Shear Zone: a major boundary in the Hercynian folded belt. *Tectonophysics*, 148: 221-227.
- De la Rosa, J. (1992): *Petrología de las rocas básicas y granitoides del batolito de la Sierra Norte de Sevilla. Zona Sudportuguesa. Macizo Ibérico*. Tesis Doctoral. Univ. de Sevilla: 312p. (inérita).
- De Vicente, G.; Muñoz, A. y Giner, J.L. (1992): El uso del método de los Diedros Rectos: Implicaciones a partir del modelo de deslizamiento del análisis poblacional de fallas. *Rev. Soc. Geol. España*, 5 (3-4): 7-20.
- Lisle, R. J. (1987). Principal stress orientations from faults: an additional constraint. *Annales Tectonicae*, 1: 115-158.
- Moreno, C. (1993): Postvolcanic paleozoic of the Iberian pyrite belt: an example of basin morphologic control on sediment distribution in a turbidite basin. *J. Sedim. Petrol.*, 63: 1118-1128.
- Muñoz, A. (1994): *Campos de esfuerzo alpinos y reactivación de fallas en el sector de enlace entre la Sierra de Altomira y la Cordillera Ibérica*. Tesis de licenciatura. Universidad Complutense de Madrid: 123 pp.
- Muñoz, A. (1997): *Evolución geodinámica del borde oriental de la Cuenca del Tajo desde el oligoceno hasta la actualidad*. Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid: 331 p.
- Oliveira, J.T., Carvalho, P., Pereira, Z., Pacheco, N., Fernandes, J.P. y Korn D. (1997): Stratigraphy of Neves-Corvo Mine Region. En: SGE Field Conference Neves Corvo.
- Quesada, C. (1991): Geological constraints on the Paleozoic tectonic evolution of tectonostratigraphic terranes in the Iberian Massif. *Tectonophysics*, 185: 225-245
- Reches, Z. (1987): Determination of the Tectonic Stress Tensor from slip along faults that obey the Coulomb Yield Condition. *Tectonics*, 6: 849-861.
- Reches, Z., Baer, G. y Hatzor, Y. (1992): Constraints on the Strength of the Upper Crust from Stress Inversion of Fault Slip Data. *J. Geophys. Res.*, 97 (B9): 12.481-12.493.
- Sáez, R., Almodóvar, G.R. y Pascual, E. (1997): Geological constraints on massive sulphide genesis in the Iberian Pyrite Belt. *Ore Geology Reviews*, 11: 429-451.
- Schermerhörn, L.J.G. (1971): An outline stratigraphy of the Iberian Pyrite Belt. *Bol. Geol. Min.*, 82: 238-268.
- Sierra, S. (1995): *Análisis estratigráfico de la mitad sur de la cuenca pérmica del río Viar (Sevilla, España)*. Tesis de licenciatura, Univ. de Huelva: 94 p.
- Sierra, S., Colmenero J.R. y Moreno, C. (1995): La cuenca del río Viar: arquitectura fluvial. XIII Congreso Español de Sedimentología, Teruel: 117-118.
- Sierra, S. y Moreno, C. (1997): La cuenca pérmica del río Viar, SO de España: Análisis petrográfico de las areniscas. *Cuad. Geol. Ibérica*, 22: 447-472.
- Silva, J. B., Oliveira, J.T. y Ribeiro, A. (1990): Structural outline of the South Portuguese Zone. En: R.D. Dallmeyer and E. Martinez, Eds, *Pre-Mesozoic Geology of Iberia*. Springer-Verlag, Berlin, 348-362.
- Simancas, J.F. (1983): *Geología de la extremidad oriental de la Zona Sudportuguesa*. Tesis Doctoral, Univ. Granada: 438 p.(inérita).
- Simancas, J. F. (1985): Una zona de cizalla frágil tardía en el límite entre Ossa Morena y la Zona Sudportuguesa (Macizo Ibérico). *Cuad. Geol. Univ. Granada*, 12: 105-112
- Simancas, J.F. y Rodríguez Gordillo, J.F. (1980): Magmatismo basáltico hercínico tardío en el SW de Sevilla. *Cuad. Geol. Univ. Granada*, 11: 49-60.
- Simancas, J.F., Broutin, J. y Gabaldón, V. (1983): The Autunian of the Viar Area. En: Field trip «D», Carboniferous Geology of the Sierra Morena X International Carboniferous Congress: 86-104.

Manuscrito recibido el 5 de Octubre de 1997

Aceptado el manuscrito revisado el 27 de Julio de 1998