



MÉTODO β -STRESS PARA CORREGIR LA ORIENTACIÓN DE LOS EJES PRINCIPALES DEL ESFUERZO DETERMINADOS A PARTIR DEL ANÁLISIS POBLACIONAL DE SISTEMAS INCOMPLETOS DE FALLAS CON SIMETRÍA ORTORRÓMBICA

β -stress method to correct the orientation of the main axis of effort based on the population analysis of incomplete systems of faults with orthorhombic symmetry

Carlos Fernández, Manuel A. Camacho Cerro, Encarnación García Navarro y Francisco M. Alonso Chaves

Dpto. de Geodinámica y Paleontología, Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Huelva, 21071-Huelva, Spain.

Abstract: *The techniques of fault-slip stress inversion can be used on faults that follow the slip model (with four fault sets arranged in a system with orthorhombic symmetry) to determine the position and magnitude of the principal stress axes. In incomplete fault systems (less than four sets) the calculated stress axes are commonly inclined. It is shown here that, in complete fault systems, variations in fault dip and striae pitch do not modify the trend or the plunge of the here-called invariant stress axis (σ_1 for reverse faults and σ_3 for normal faults). This feature allowed us to propose a new empirical technique, the β -stress method, to correct the position of the invariant stress axes in incomplete fault systems. One of the assumptions of the method is that one of the principal stress axis is vertical. The β -stress method yields the horizontal deviation angle, β , between the trend of an inclined invariant axis determined from an incomplete fault system, and the theoretical, correct attitude of this axis, which would have been measured if the four sets of the complete system were available at the studied outcrop. The method has been successfully applied to correct the orientation of the principal stress axes obtained after stress inversion of Miocene and Pliocene-Quaternary faults located in the Gulf of Cádiz.*

Key words: *Faults, stress axes, correction method, stress fields, Gulf of Cádiz.*

Resumen: En fallas que siguen el modelo de deslizamiento, la utilización de las técnicas de análisis de poblaciones de fallas para obtener la orientación y magnitud de los ejes principales del esfuerzo a partir de sistemas incompletos (menos de cuatro familias), suele proporcionar orientaciones inclinadas para dichos ejes. Se puede demostrar que, en sistemas completos (es decir, con cuatro familias de fallas), las variaciones en el buzamiento de las familias de fallas y en el cabeceo de las estrías no modifican la dirección ni la inmersión del aquí llamado eje invariante del esfuerzo (σ_1 para fallas inversas y σ_3 para fallas normales). Esta observación ha permitido desarrollar un método empírico para corregir la orientación de los ejes invariantes del esfuerzo en sistemas incompletos de fallas, al que se ha denominado método β -stress, asumiéndose que uno de los ejes principales del esfuerzo es vertical. La técnica consiste en la determinación de la desviación en el ángulo medido en la horizontal (ángulo β) entre la dirección de inmersión del eje invariante inclinado calculado a partir del sistema incompleto, y la posición no desviada del eje que teóricamente debe haber afectado al sistema de fallas, y que habríamos medido en caso de haber dispuesto de las cuatro familias del sistema. El método se ha aplicado con éxito para la corrección de los ejes del esfuerzo obtenidos tras el análisis de fallas de edades miocenas y plioceno-cuaternarias localizadas en el área emergida del Golfo de Cádiz.

Palabras clave: Fallas, ejes del esfuerzo, método de corrección, campos de esfuerzos, Golfo de Cádiz.

Fernández, C., Camacho Cerro, M.A., García Navarro, E. y Alonso Chaves, F. M. (2011): Método β -stress para corregir la orientación de los ejes principales del esfuerzo determinados a partir del análisis poblacional de sistemas incompletos de fallas con simetría ortorrómbica. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 24 (1-2): 85-99.

La determinación del estado de esfuerzos en la litosfera es una importante tarea que ha concitado numerosos trabajos durante las últimas décadas (véase, p. ej., el artículo de Zoback, 1992, como referencia clásica y, para información más actualizada, el portal del World Stress Map Project, <http://dc-app3-14.gfz-potsdam.de/>). Entre las aplicaciones de esta determinación puede citarse la comparación de los campos de esfuerzos medidos con los teóricamente esperables a partir de las distintas fuentes de fuerzas que supuestamente mueven las placas o intervienen en la convección mantélica (Wuming *et al.*, 1992; Richardson, 1992; Lithgow-Bertelloni y Guynn, 2004), o las múltiples utilidades que aporta el conocimiento del estado de esfuerzos actual en Ingeniería Geológica (p. ej., González de Vallejo *et al.*, 2002). Uno de los grupos de técnicas más utilizados en la actualidad para obtener información acerca del esfuerzo es el enfocado en el análisis dinámico de conjuntos o poblaciones de fallas. El punto de partida de esta metodología se puede situar en el trabajo de Anderson (1905, 1951). Durante los últimos quince o veinte años, sin embargo, algunos estudios han puesto en entredicho la aplicabilidad de las técnicas de inversión de esfuerzos basadas en el análisis del deslizamiento en fallas, bien por interacciones entre fracturas cercanas (Nieto-Samaniego y Alaniz-Álvarez, 1995), bien por rotaciones de bloques (Twiss y Unruh, 1998). A pesar de ello, es posible determinar paleoesfuerzos a partir de fallas si el macizo rocoso presenta un comportamiento macroscópico plástico-friccional y puede ser considerado como lineal e isótropo a la escala de observación y desde el punto de vista de dicho comportamiento (Twiss y Unruh, 1998; Yamaji, 2003). Un gran número de determinaciones independientes del estado de esfuerzos en ejemplos naturales y en muestras numéricas o artificiales, demuestran la utilidad de las técnicas de análisis de poblaciones de fallas para determinar esfuerzos (p. ej., Yamaji, 2003). Otro de los problemas que suelen encontrarse tales técnicas es la obtención de ejes principales de esfuerzos inclinados. Aunque, en algunos casos, dicha inclinación responde a la orientación original del estado de esfuerzos, en muchas ocasiones es consecuencia de algún defecto o desviación producida durante el proceso de medición o tratamiento de las fallas. Un ejemplo especialmente claro y común es el sesgo en la medición de las orientaciones y del número de familias de fallas que viene impuesto por las condiciones del afloramiento. Este trabajo aporta una nueva técnica desarrollada para corregir el error cometido como consecuencia de este tipo de limitaciones al determinar los ejes principales del esfuerzo. Una de las principales características del método es que asume que uno de los ejes principales del esfuerzo es vertical, luego no puede ser usado en situaciones en las que este principio no se cumpla. Tras explicar las técnicas de análisis poblacional de fallas utilizadas en este trabajo, se indicarán las desviaciones que es esperable obtener en la orientación de los ejes del esfuerzo cuando se parte de sistemas de fallas en los que falta alguna de las familias que teóricamente deben componerlos. A continuación, se detallarán los fundamentos y procedimiento de aplicación de la técnica. Finalmente, se expondrán los resultados de su utilización en un ejemplo

real, el estudio de la deformación frágil que ha afectado a la cuenca de antepaís con respecto al cabalgamiento cortical de Gibraltar (área emergida del Golfo de Cádiz) desde el Mioceno hasta la actualidad.

Técnicas para determinar la orientación de los ejes principales del esfuerzo a partir de sistemas de fallas

Condiciones especificadas por los modelos de Anderson (1951) y de Reches (1983)

El modelo dinámico propuesto por Anderson (1951) ha conocido un notable éxito debido a la sencillez con la que explica las diferentes asociaciones de fallas que deben encontrarse en la corteza cuando se ve sometida a los tres tipos de regímenes tectónicos básicos (extensional, transcurrente y contractivo). Dicho modelo predice el desarrollo de un sistema de fallas conjugadas (Fig. 1A). En el caso de que la corteza pueda considerarse isótropa y, por tanto, los ejes principales del esfuerzo y de la deformación interna coinciden en dirección, el máximo esfuerzo compresivo (σ_1) y el eje de máximo acortamiento (ϵ_3) se sitúan en la bisectriz del ángulo agudo de las dos familias de fallas (Fig. 1A). Por otro lado, la mínima compresión (σ_3) y el eje de máximo estiramiento (ϵ_1) coinciden con la bisectriz del ángulo obtuso. Por su parte, σ_2 y ϵ_2 se sitúan en la intersección de ambas familias de fallas. Dada la especial configuración del modelo, $\epsilon_2=1$, ya que no puede haber deformación longitudinal ni angular en esa dirección. Por lo tanto, el modelo de Anderson (1951) es aplicable en todas las situaciones en las que la corteza se vea sometida a una deformación interna plana. Si representamos las fallas del modelo andersoniano en un diagrama cabeceo/buzamiento (De Vicente, 1988; Capote *et al.*, 1991), quedarán proyectadas en la línea de cabeceo (*pitch*) 90° si son fallas de movimiento en buzamiento puro (Fig. 1A), o en la de 0° si son fallas de movimiento en dirección puro.

Por otro lado, el modelo de deslizamiento de Reches (1983), basado en los experimentos de Reches y Dietrich (1983), muestra que sería necesaria la actuación de cuatro familias de fallas con simetría ortorrómbica para poder acomodar una deformación general (no plana), no rotacional (Figs. 1B, 2). En estas condiciones, el cabeceo de las estrías puede desviarse significativamente de los valores extremos (0° y 90°) y las fallas aparecerán representadas en el interior del diagrama cabeceo/buzamiento (Fig. 1B).

Los movimientos relativos entre las placas tectónicas sobre la superficie de un planeta de geometría aproximadamente esférica, como la Tierra, son siempre rotacionales (McKenzie y Parker, 1967). Como consecuencia de ello, los vectores de velocidad lineal relativa en los límites de placas son habitualmente oblicuos a dichos límites. Esto es especialmente cierto en el caso de los límites convergentes (Dewey *et al.*, 1998), pero se verifica también en ciertas transformantes (Bilham y King, 1989) o en límites divergentes (Chorowicz y Sorlien, 1992). El resultado de esta cinemática en los límites de placas es que se producen historias de deformación no planas, que son las que dominan en los grandes cinturones orogénicos (Jiang, 2007), in-

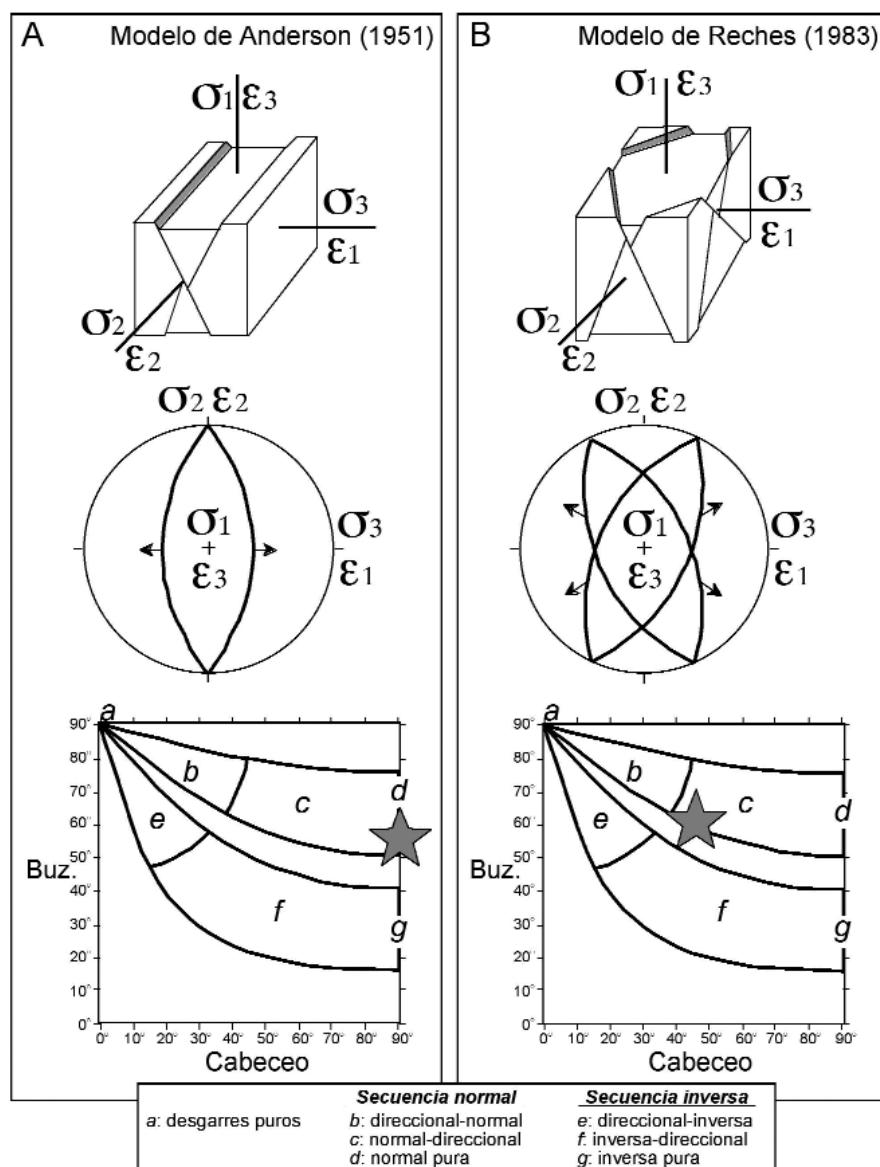


Fig. 1.- (A) Predicciones de la teoría de fracturación de Anderson (1951). Arriba: Distribución de los ejes principales del esfuerzo ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$) y de la deformación ($\epsilon_1 \geq \epsilon_2 \geq \epsilon_3$) y geometría de las dos familias de fallas conjugadas. Centro: Proyección esférica de los elementos mostrados en el bloque anterior. Las flechas señalan el sentido de desplazamiento para el bloque de techo en cada plano de falla (círculos mayores). Abajo: Representación del sistema de fallas andersonianas en el diagrama cabeceo/buzamiento (estrella). Los distintos campos del diagrama corresponden a los definidos por De Vicente (1988). (B) Modelo de deslizamiento de Reches (1983). Símbolos como en la figura 1A. Arriba: Sistema ortorrómbico de fallas. Cuatro familias de fallas se disponen simétricamente con respecto a los ejes principales del esfuerzo y de la deformación. Centro: Proyección esférica de los elementos indicados en el bloque de arriba. Abajo: Proyección del sistema ortorrómbico de fallas en el diagrama cabeceo/buzamiento (estrella).

cluso bajo las condiciones típicas del comportamiento frágil. Este mecanismo puede verse acentuado por la aparición de procesos de partición de la deformación que obedecen a variados grados de desacoplamiento entre las placas (Fitch, 1972; McCaffrey, 1992; Jiang *et al.*, 2001). En definitiva, resulta habitual observar en el afloramiento (p. ej., Fernández *et al.*, 1997) sistemas de fallas neoformadas o reactivadas con geometrías que difieren de las andersonianas, y que coinciden en buena medida con las predicciones del modelo de Reches (1983). A pesar de ello, en raras ocasiones se encuentran en un mismo afloramiento las cuatro familias con simetría ortorrómbica (Fig. 2), y lo más habitual es que observemos ejemplos con menos de cuatro familias (Fig. 3). A estos sistemas es a los que denominaremos en este trabajo sistemas incompletos de fallas. Es importante añadir que no se trata de sistemas complejos de fallas, como los descritos por Nieto-Samaniego y Alaniz-Álvarez (1995), en los cuales no sería posible determinar el estado de esfuerzos (Nieto-Samaniego, 1999). De ahora en adelante, asumiremos que trabajamos con sistemas de fallas con simetría ortorrómbica, que satisfacen el modelo de deslizamiento.

Técnicas de inversión de esfuerzos a partir de datos de deslizamiento a lo largo de fallas

En la actualidad se dispone de numerosas técnicas para la determinación del estado de esfuerzos responsable de la actividad de un sistema de fallas dado. En este sentido, se puede citar el método de Diedros Rectos (Pegoraro, 1972; Angelier y Mechler, 1977), que permite obtener una primera aproximación de la orientación de los ejes principales del tensor de esfuerzos. Además, se emplean habitualmente dos técnicas analíticas basadas en la condición de que la orientación de la componente de esfuerzo de cizalla sobre un plano de falla dado (parámetro que se puede establecer a partir de la ecuación de Bott, 1959) determina el vector de movimiento sobre el mismo. Se trata del método de Inversión de Esfuerzos (Reches, 1987; Reches *et al.*, 1989) y del método de Etchecopar (Etchecopar *et al.*, 1981; Etchecopar, 1984). En ambos casos es posible calcular la orientación y magnitud relativa de los ejes principales del esfuerzo a partir de los datos geométricos y cinemáticos que se pueden medir en una población de fallas.

El método de Diedros Rectos es de sencilla aplicación

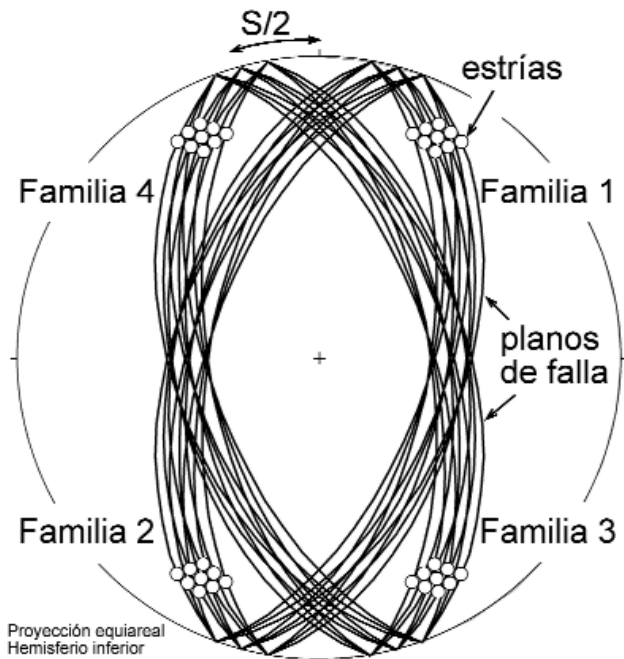


Fig. 2.- Representación en proyección esférica de los cuatro sistemas de fallas con simetría ortorrómbica (1 a 4) resultantes de una deformación general (no plana), de acuerdo con el modelo de deslizamiento (Reches, 1983). El ángulo $S/2$ corresponde a la mitad de la separación entre las direcciones de las familias de fallas.

e interpretación, pero no permite separar los efectos debidos a distintos estados de esfuerzos que han podido afectar sucesivamente al mismo conjunto de fallas. El método de Inversión de Esfuerzos (Reches, 1987; Reches *et al.*, 1989) incluye en su formulación el criterio de rotura de Navier-Coulomb, y proporciona una solución óptima para cada coeficiente de fricción considerado, utilizando aproximaciones iterativas basadas en distintos principios. La elección del tensor de esfuerzos a partir del conjunto de soluciones óptimas mencionadas se realiza atendiendo a distintos criterios, incluyendo los ángulos PAM (*principal axes misfit*) y SM (*slip misfit*), y considerando que la solución adoptada debe corresponder a un coeficiente de fricción cercano a los valores sugeridos por la ley de Byerlee (1978). Finalmente, el método de Etchecopar (Etchecopar *et al.*, 1981; Etchecopar, 1984) es un método iterativo que aplica un gran número de tensores de esfuerzos distintos a la misma población de fallas, obteniendo la estría teórica para cada tensor y plano de falla. El tensor de esfuerzos preferido como solución será el que haga menor el ángulo entre los cabeceos de las estrías teóricas calculadas para el conjunto de fallas y las medidas en el campo. Adicionalmente, dicho tensor debe mostrar un histograma de desviaciones angulares entre las orientaciones de estrías reales y teóricas con forma de semi-campana de Gauss, y su aplicación a las fallas estudiadas debe cumplir los requisitos del criterio de rotura de Navier-Coulomb.

Por otra parte, es aconsejable comparar los resultados de los métodos anteriores con los del análisis cinemático de los datos de fallas. Para ello se puede utilizar el método de De Vicente (1988), que permite estimar la forma y orientación del elipsoide de la deformación y evaluar la desvia-

ción con respecto a las predicciones del modelo de Anderson (deformación plana) que muestran las poblaciones estudiadas, suponiendo que uno de los ejes principales de la deformación es vertical.

Determinación de la orientación de los ejes principales del esfuerzo en sistemas incompletos de fallas

Evaluación de las técnicas de análisis de poblaciones de fallas

Las técnicas de estimación del tensor de esfuerzos mencionadas pueden, en nuestra experiencia, ser utilizadas con éxito para predecir la orientación de sistemas conjugados completos, con simetría ortorrómbica, del tipo de los propuestos por Reches (1983). Para demostrar esta afirmación se ha obtenido un conjunto de muestras ideales, teóricas, de fallas (con un total de 36 fallas en cada muestra, agrupadas en cuatro familias, dentro de las cuales hay variaciones de hasta 10° en la dirección y buzamiento de las fallas y en el cabeceo de las estrías; ver, p. ej., la Fig. 2), que se ajustan al modelo de deslizamiento. El ángulo de variación considerado (10°) se ha establecido de manera arbitraria, como un ejemplo de posible dispersión en la orientación de las fallas y de sus vectores de desplazamiento. Cada muestra varía en el buzamiento promedio del conjunto de fallas, en el cabeceo promedio de las estrías y en el valor del ángulo $S/2$ (Fig. 2, se trata del ángulo medido en la horizontal que separa las direcciones de los dos pares de familias de fallas). Los resultados se muestran en la figura 4, donde se aprecia que tanto para fallas normales como para fallas inversas, los dos métodos utilizados (Reches, 1987 y Etchecopar *et al.*, 1981) permiten determinar de manera inequívoca la posición (dirección de inmersión e inmersión) de uno de los ejes principales del esfuerzo. Este eje es el mínimo esfuerzo compresivo (σ_3) para fallas con componente normal de movimiento según el buzamiento (Fig. 4A) y el máximo esfuerzo compresivo (σ_1) para fallas inversas (Fig. 4B). A este eje se le denomina "invariante" en este trabajo. La posición de los otros dos ejes principales es fija dentro de ciertos intervalos de cabeceo promedio de las estrías, y se intercambia para márgenes muy estrechos de variación en el cabeceo (Fig. 4). Este intercambio en la orientación de los ejes no invariantes se produce al pasar de un sistema de fallas con movimiento en buzamiento puro a otros con componentes significativos de movimiento lateral. La posibilidad de encontrar ejes principales inclinados no es nula, pero es baja, ya que el intercambio en la posición de los ejes principales se produce para variaciones muy pequeñas en el cabeceo de las estrías (Fig. 4).

Dada la frecuencia con la que se observan en la naturaleza sistemas incompletos de fallas como los de la figura 3, es importante saber si los métodos de inversión de fallas podrían servir en tales casos para determinar de manera inequívoca la posición de los ejes principales del esfuerzo. Los resultados de la aplicación de estos métodos a las muestras de la figura 3 se enseñan en la figura 5. En todas las muestras estudiadas el diagrama cabeceo/buzamiento

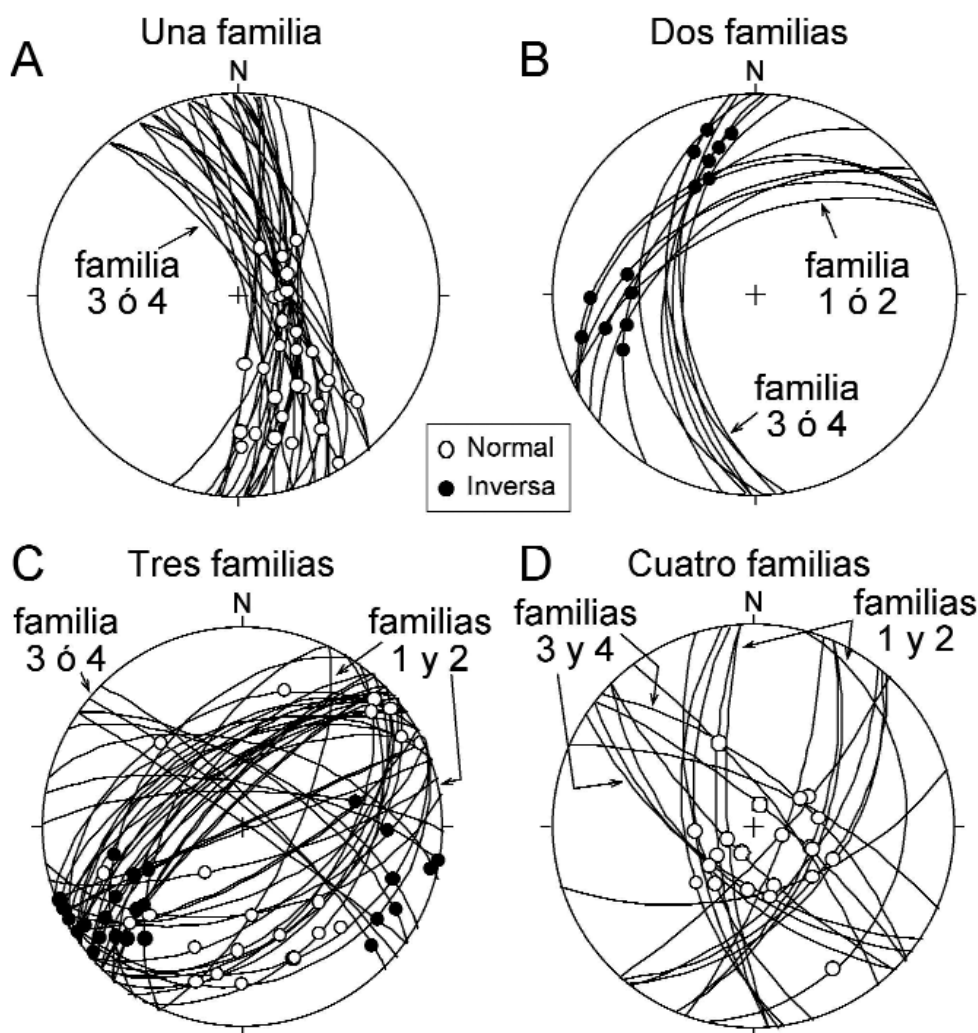


Fig. 3.- Ejemplos naturales (proyección equiareal, hemisferio inferior) de muestras de fallas con una sola familia (A), dos familias (B), tres familias (C) y cuatro familias (D) de fallas. Cada círculo mayor representa una falla, y los pequeños círculos situados sobre ellos indican la orientación de las estrías.

muestra notables desviaciones con respecto al modelo andersoniano. El otro rasgo destacable, aparte de la congruencia en los resultados obtenidos para los distintos métodos utilizados, es la disposición inclinada de los ejes principales del esfuerzo, especialmente para los casos con menos de cuatro familias de fallas (Fig. 5). Por su parte, cuando disponemos de las cuatro familias con simetría ortorrómbica, los tres ejes se localizan cerca de la vertical o de la horizontal (Fig. 5). Parece claro, por tanto, que cuando medimos sistemas incompletos de fallas los métodos convencionales de inversión de esfuerzos no proporcionan resultados fiables en lo que se refiere a la estimación de la orientación de los ejes principales del esfuerzo. Se recuerda que esta afirmación requiere asumir el requisito de que uno de los ejes principales del esfuerzo es vertical.

A continuación demostraremos que esta variación en la inclinación de los ejes principales estimados para sistemas incompletos puede ser sistemática y, por tanto, es posible establecer un método semi-cuantitativo para corregir la posición de los ejes determinados inicialmente, y ofrecer un resultado más fiable para establecer la orientación de los ejes principales del esfuerzo, suponiendo que no haya ha-

bido rotaciones posteriores o que éstas puedan ser caracterizadas y eliminadas previamente a la utilización de este método.

β -stress: Un nuevo método para corregir la orientación de los ejes principales del esfuerzo determinados en sistemas incompletos de fallas

Los ejes invariantes del esfuerzo que se determinan a partir de sistemas teóricos formados por cuatro familias conjugadas con simetría ortorrómbica, pueden ser usados para corregir los resultados obtenidos a partir de sistemas incompletos de fallas. De este modo, es posible estimar la posición teórica de los ejes principales del esfuerzo que habríamos obtenido de haber trabajado con sistemas completos y simétricos de fallas. Previamente, hay que demostrar que el sistema que estamos midiendo es verdaderamente incompleto, y no el resultado de una deformación plana. La mejor forma de comprobar si estamos tratando con dos o con cuatro familias conjugadas teóricas es mediante la aplicación del modelo de deslizamiento, a partir del diagrama cabeceo/buzamiento (Fig. 5). Una vez que el modelo de

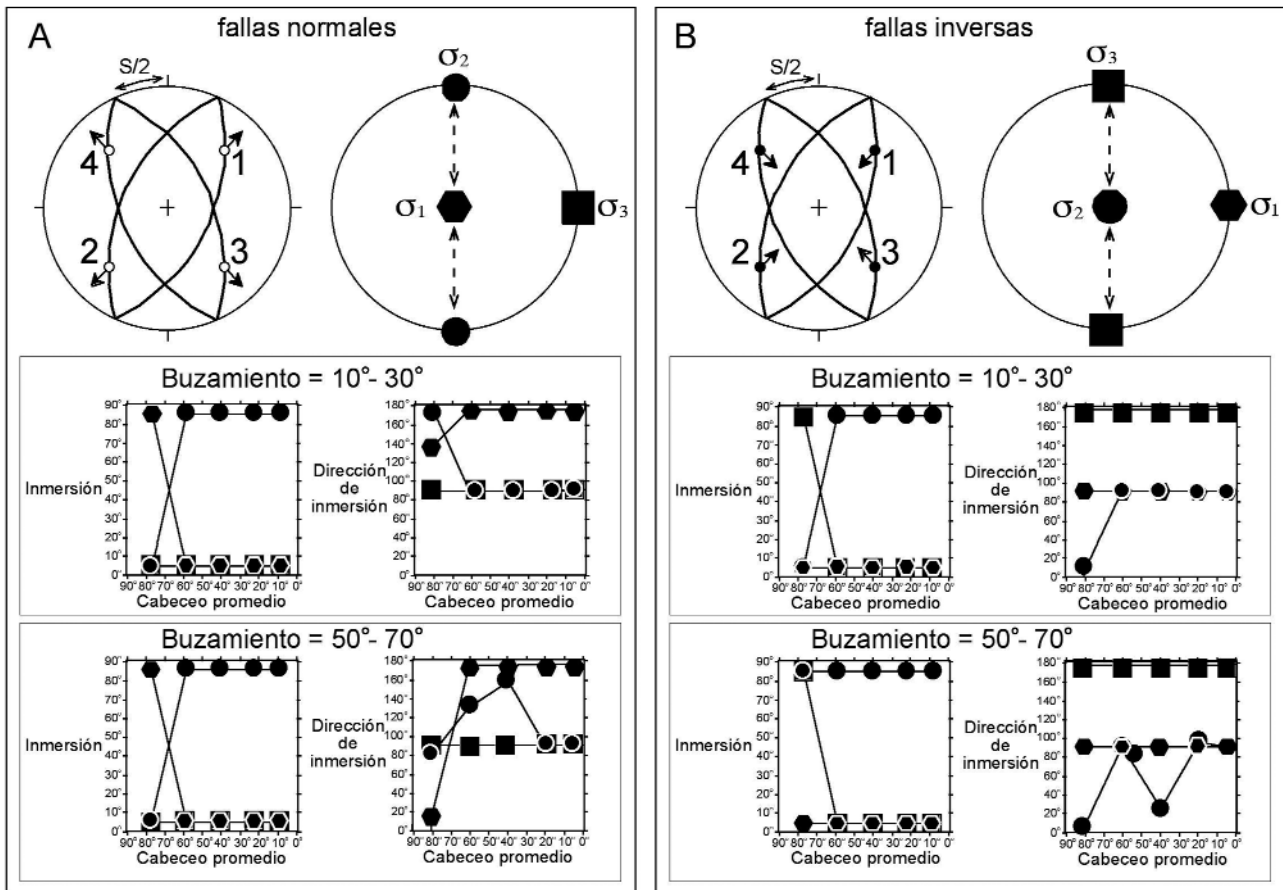


Fig. 4.- Definición del concepto de ejes invariantes del esfuerzo en sistemas de fallas con simetría ortorrómbica de acuerdo con el modelo de deslizamiento. En la fila superior se representan el sistema de fallas y la orientación de los ejes principales del esfuerzo en proyección esférica. En las filas central e inferior se indica cómo puede cambiar la inmersión y dirección de inmersión de los tres ejes principales del esfuerzo al considerar distintas muestras que difieren en el buzamiento medio de sus fallas y en el cabeceo promedio de las estrías. Para el caso de las fallas con componente de movimiento en buzamiento normal (A, arriba), la inmersión y la dirección de inmersión del eje σ_3 (cuadrados negros) permanecen estables al cambiar el buzamiento de las fallas y el cabeceo promedio de las estrías (A, centro y abajo). Se trata del eje invariante. Por el contrario, los ejes σ_1 (hexágonos) y σ_2 (círculos) presentan cambios importantes en su inmersión y dirección de inmersión al cambiar dichos parámetros. Por su parte, el eje invariante es σ_1 para fallas con componente inverso de movimiento en buzamiento (B). En ambos casos, la orientación de los ejes principales del esfuerzo se ha obtenido a partir del uso de diversas técnicas de análisis de poblaciones de fallas en muestras teóricas (ver el texto para mayor información). Las flechas señalan el sentido de desplazamiento para el bloque de techo en cada plano de falla.

deslizamiento nos ha permitido verificar este hecho, se obtiene la orientación de los ejes principales del esfuerzo mediante la utilización de los métodos oportunos de inversión de esfuerzos. A continuación, se define el parámetro β como el ángulo medido en la horizontal entre la dirección de inmersión del eje invariante (σ_3^0 para las fallas normales y σ_1^0 para las inversas) y la del eje correspondiente (σ_3 o σ_1) calculado a partir de sistemas incompletos de fallas (Fig. 6). La determinación de β se realiza llevando a la horizontal, según su dirección de inmersión, el eje principal invariante calculado a partir del correspondiente método de análisis de fallas sobre un sistema incompleto. El ángulo de rotación necesario para dicho abatimiento es α_i (fallas inversas) o α_n (fallas normales), mediante el cual obtenemos los ejes abatidos σ_3^n (fallas normales) o σ_1^i (fallas inversas). Es esperable que esta dirección no coincida con la auténtica orientación de los ejes principales del esfuerzo (σ_1^0 o σ_3^0 , Fig. 6). La diferencia entre ambas direcciones es precisamente el ángulo β (β_i para fallas inversas y β_n para fallas normales). Si somos capaces de determinar el ángulo

β para nuestra muestra, podremos determinar la orientación de los ejes principales del esfuerzo incluso en el caso de que nuestro sistema de fallas sea incompleto. El procedimiento para obtener el ángulo β se denomina en este trabajo método β -stress. Consiste en la utilización de una serie de ábacos calculados empíricamente a partir de sistemas teóricos completos e incompletos de fallas (idénticos a los descritos con anterioridad y en la Fig. 2, variando el número de familias consideradas), utilizando las técnicas de análisis de fallas indicadas anteriormente en este trabajo. Dichos ábacos se muestran en las figuras 7 a 9. La utilización de estos diagramas requiere en primer lugar identificar qué familia o combinación de familias estamos estudiando, con objeto de escoger el ábaco pertinente. A continuación, partiendo del cabeceo medio de las estrías de la muestra a analizar, se tomará la curva correspondiente al buzamiento medio de las fallas de la estación y se determinará el valor del ángulo β . Para la elección del ábaco es fundamental distinguir entre fallas normales e inversas. Los diagramas representados en la figura 7 consideran un ángulo de

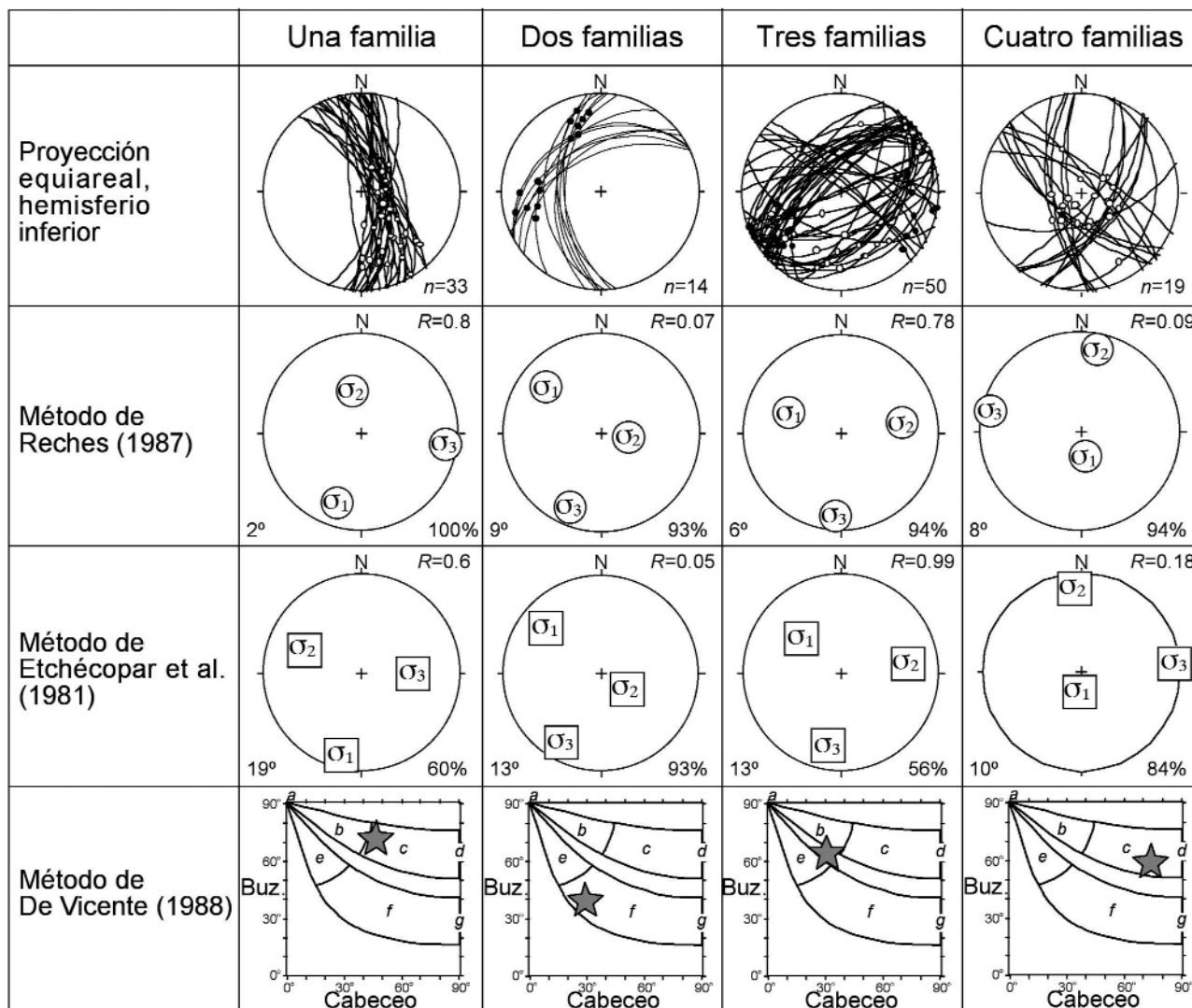


Fig. 5.- Resultado de la aplicación de los métodos de Reches (1983), Etchécopar *et al.* (1981) y De Vicente (1988) a las estaciones representadas en la figura 3. Puede apreciarse que en todos los casos la deformación involucrada es general (fila inferior). En los casos con una, dos o tres familias de fallas se obtienen ejes inclinados. Dado que el ejemplo con dos familias de fallas arroja valores de R (relación de esfuerzos principales) cercanos a 0 por todos los métodos empleados, los ejes σ_2 y σ_3 están deslocalizados dentro del plano que los contiene, pero al tratarse de fallas inversas, la orientación inclinada del eje invariante, σ_1 , no debe verse afectada por dicho valor de R . En el diagrama cabeceo/buzamiento, cada estación viene representada mediante una estrella. En la filas correspondientes a los métodos de Reches (1987) y de Etchécopar *et al.* (1981) los números situados en la esquina inferior derecha de cada cuadro señalan el porcentaje de fallas explicadas por el método (en la fila superior, n es el número de fallas medidas), mientras que los números de la esquina inferior izquierda se refieren al error cuadrático (Reches, 1987) y error medio (Etchécopar *et al.*, 1981), respectivamente. En ambos casos, la representación de las fallas en el diagrama de Mohr es congruente con el criterio de rotura de Navier-Coulomb.

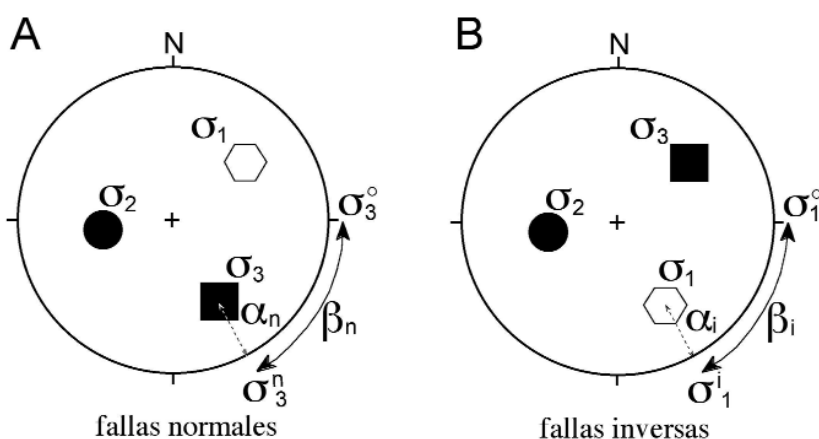


Fig. 6.- Definición del ángulo β para la aplicación del método β -stress. El eje invariante (σ_3 para fallas normales, A; y σ_1 para fallas inversas, B) determinado mediante los métodos de análisis poblacional sobre conjuntos incompletos de fallas (p. ej., Fig. 5) es llevado a la horizontal según su dirección de inversión (σ_3^n y σ_1^i , respectivamente). El parámetro β es el ángulo medido en la horizontal entre σ_3^n y σ_3^0 (A) o entre σ_1^i y σ_1^0 (B). Los ejes σ_1^0 y σ_3^0 representan la posición de los ejes invariantes que se habrían determinado en caso de disponer de sistemas completos de fallas, es decir, corresponden a la orientación real de dichos ejes del esfuerzo.

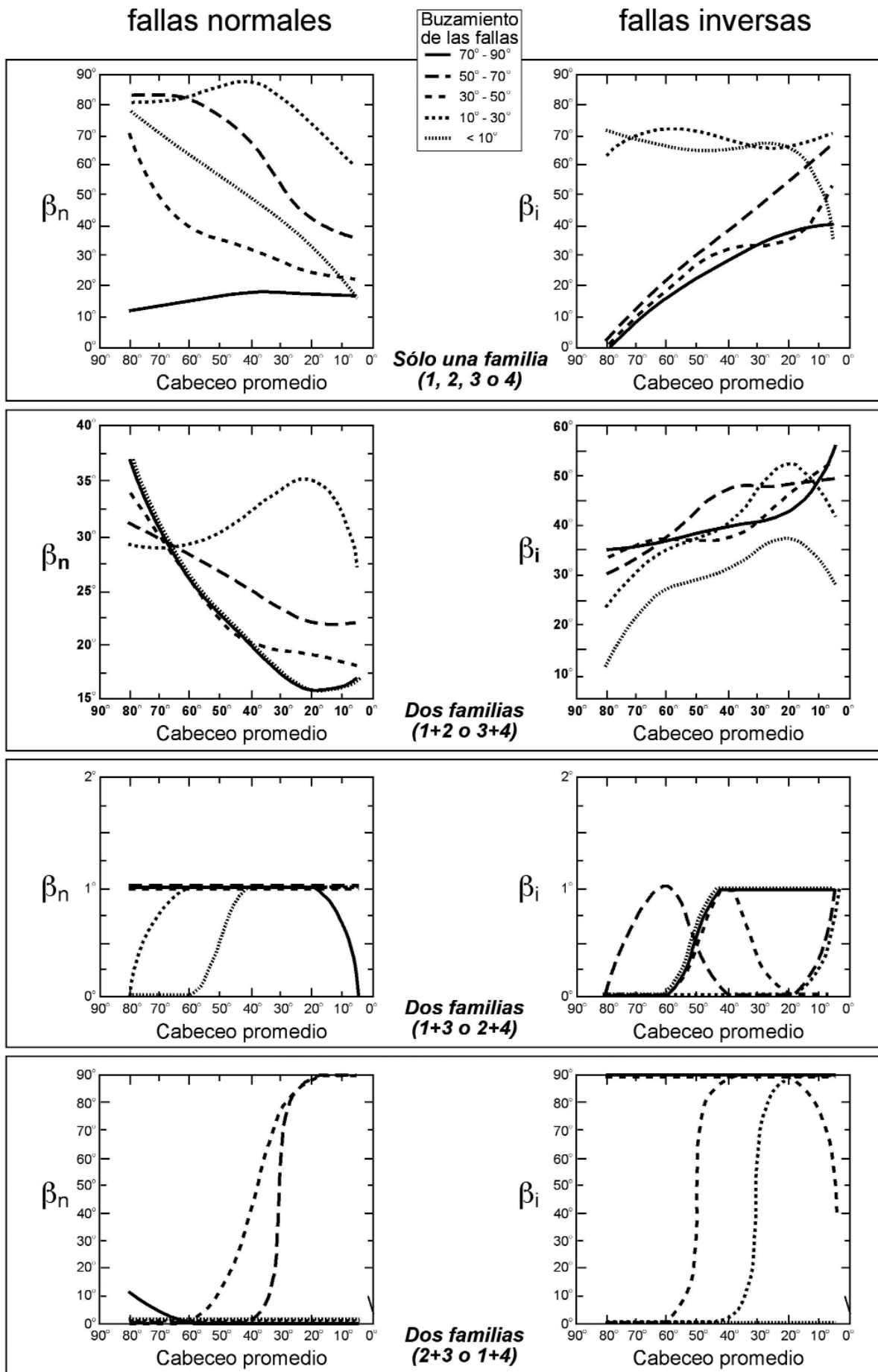


Fig. 7.- Ábacos para la obtención del valor del ángulo β para sistemas incompletos con una o dos familias de fallas. En todos los casos se asume que $S/2=10^\circ$. En el texto se ofrece una descripción completa de la obtención y uso de estos ábacos.

separación ($S/2$) de 10° . Se ha comprobado en este trabajo que el ángulo de separación sólo modifica el valor de β cuando se trabaja con sistemas formados por una sola familia de fallas o con sistemas formados por dos familias. De acuerdo con ello, se han obtenido los diagramas correspondientes a una sola familia (Fig. 8) o dos familias de fallas (Fig. 9) para distintos valores del ángulo de separación.

El procedimiento rutinario de aplicación del método corrector β -stress consiste en seguir los siguientes pasos:

1.- Utilización de los métodos de análisis de poblaciones de fallas a la estación medida, determinando la posición de los ejes invariantes del esfuerzo. Se recomienda usar también los métodos basados en el modelo de deslizamiento (De Vicente, 1988) para obtener una indicación del valor aproximado de $S/2$ y de la forma general del elipsoide de la deformación, descartando los casos de deformación plana.

2.- Obtención de los valores medios de los ángulos de buzamiento de las fallas y de cabeceo de las estrías medidas.

3.- Escoger al ábaco oportuno (Figs. 7 a 9) a partir de los valores de los parámetros obtenidos en nuestra estación ($S/2$, cabeceo y buzamiento promedios, dirección de inmersión del eje invariante, número y tipo de familias de fallas). En el ábaco leeremos el valor del ángulo β aplicable.

4.- El ángulo β obtenido viene dado en valor absoluto. Deberá ser sumado o restado a la dirección de inmersión de los ejes invariantes abatidos siguiendo unas reglas sencillas. Si se trata de las familias 1, 2 ó 1+2 (Fig. 2) el ángulo β debe ser sumado, y restado en el caso de las familias 3, 4 ó 3+4. Por su parte, las combinaciones 1+3 y 2+4 arrojan valores de β cercanos a 0° (Fig. 7), mientras que 2+3 y 1+4 se corrigen con ángulos β de 0° o de 90° , dependiendo de la geometría del sistema (Fig. 7).

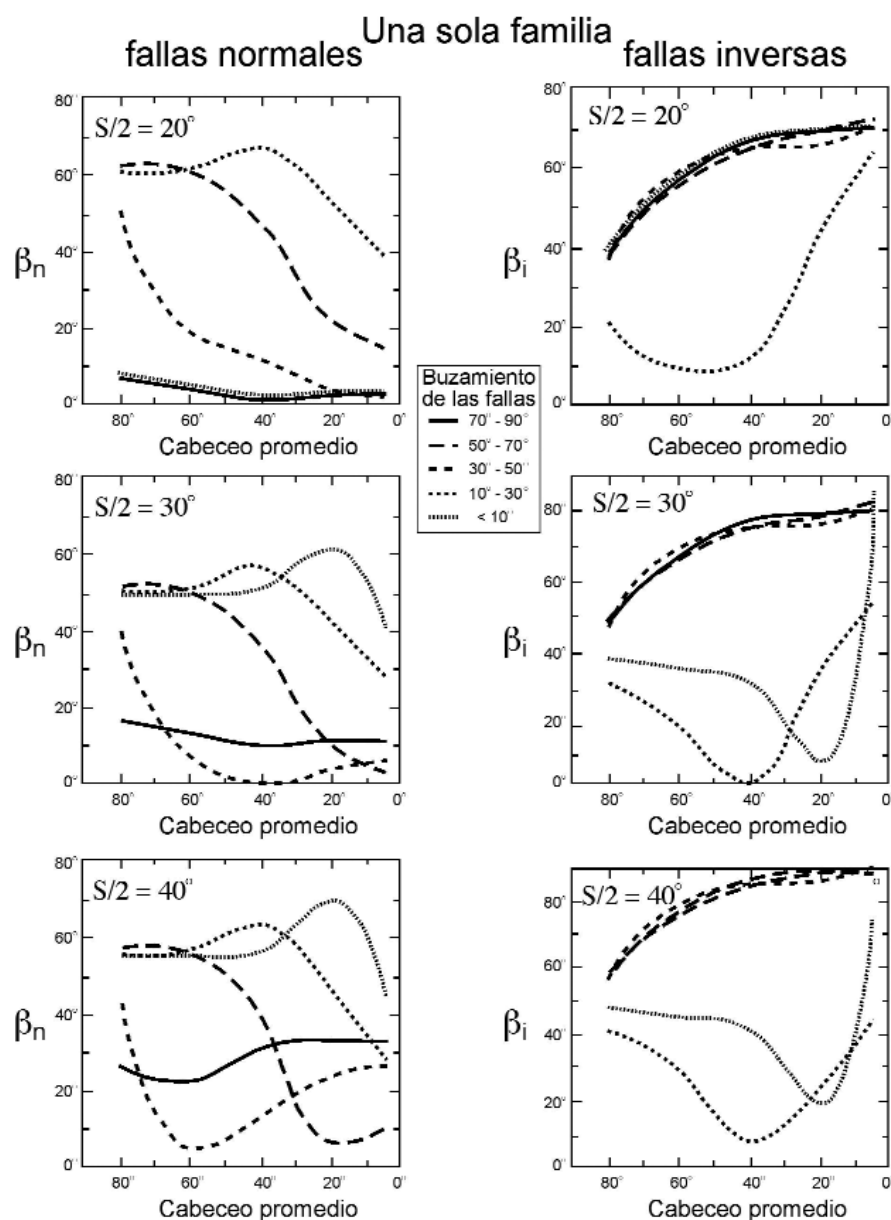


Fig. 8.- Ábacos para la obtención del valor del ángulo β para sistemas incompletos con una familia de fallas y valores de $S/2$ de 20° , 30° y 40° .

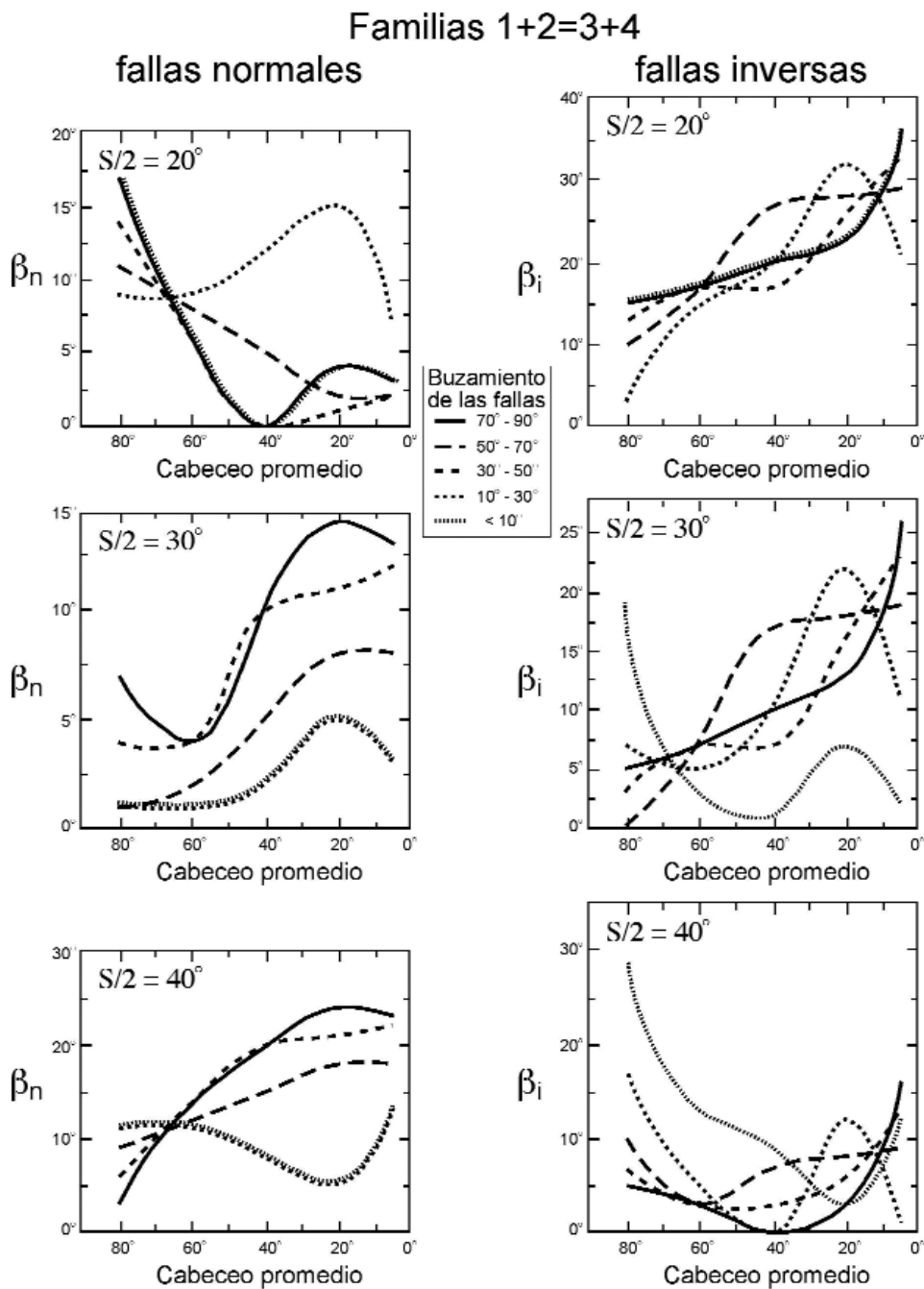


Fig. 9.- Ábacos para la obtención del valor del ángulo β para sistemas incompletos con dos familias de fallas (del tipo 1+2 ó 3+4) y valores de $S/2$ de 20°, 30° y 40°.

En estos dos últimos casos, los resultados son independientes del valor de $S/2$. Los ábacos realizados muestran que todas las combinaciones de tres familias de fallas arrojan valores de β prácticamente iguales a 0°.

Es importante tener en cuenta algunas limitaciones y casos especiales del método a la hora de llevarlo a la práctica. En primer lugar, si la relación entre los esfuerzos principales, R , presenta valores cercanos o iguales a 0 ó a 1, dos de los ejes principales del esfuerzo definen un plano, dentro del cual se encuentran deslocalizados. En caso de que uno de los ejes invariantes se ajuste a dicha condición, debe tomarse como referencia directamente la intersección del plano con el primitivo (obsérvese que ese no es el caso mostrado en la Fig. 5 para dos familias de fallas). Por otra

parte, como se indicó anteriormente, este método asume que los ejes principales del esfuerzo no actúan en posiciones inicialmente inclinadas. Este requisito se cumple de manera casi generalizada en las fallas debidas a campos de esfuerzos regionales en zonas de antepaís (p. ej., Zoback, 1992), y también en extensas regiones de los cinturones orogénicos (p. ej., Whittaker *et al.*, 1992; Engelder, 1993; Lisle *et al.*, 2006; Fossen, 2010). Por otra parte, es también más común en fallas recientes. Las variaciones a esta regla se deben a los efectos de fuerzas de flotabilidad o de flexión a escala litosférica, o a la influencia de efectos térmicos o topográficos a pequeña escala (inferior a 1 km; Zoback, 1992), rotaciones y plegamiento, heterogeneidades mecánicas o desviaciones de los campos de esfuerzos en las cer-

canías de grandes estructuras. Una discusión más completa de este hecho puede encontrarse en Lisle *et al.* (2006). En caso de que haya pruebas de la actuación de ejes inclinados del esfuerzo, este método no sería aplicable. Finalmente, si la región ha sufrido un basculamiento posterior a la formación y desplazamiento de las fallas, lo que suele haber sucedido cuando encontramos familias con buzamientos claramente distintos, dicha inclinación debería ser corregida antes de aplicar el método.

Evaluación del método: tectónica reciente en el Golfo de Cádiz

Situación geológica

El área escogida para ilustrar la aplicación de esta técnica de corrección de la dirección de los ejes principales de esfuerzos determinados a partir del uso de técnicas de inversión de datos de deslizamiento de fallas, se localiza en las cuencas neógenas situadas al SO de la Península Ibérica, originadas en relación con la Orogenia Alpina (Fig. 10). Estas unidades geológicas se encuentran situadas entre dos conjuntos tectónicos diferentes. Por un lado, al norte y oeste, los materiales variscos del Macizo Ibérico, que constituyen el margen más pasivo de estas cuencas. Por otro lado, al sur y este, las Cordilleras Béticas, formadas durante la Orogenia Alpina por la migración hacia el oeste del Dominio de Alborán (Fig. 10), dándole el carácter de antepaís a algunas de las cuencas neógenas aquí analizadas.

Los materiales neógenos de la zona presentan un carácter esencialmente marino. En la parte central y meridional de la zona estudiada, el Mioceno está constituido en su parte basal por unas arcillas azules con unos espesores que varían entre 50 y 100 metros (Benkhelil, 1976), que pasan de forma gradual hacia techo a unas biocalcarenitas (“caliza tosca”) y arenas con unas potencias que oscilan entre los

50 y 200 metros (Perconig y Granados, 1973; Benkhelil, 1976). Discordante sobre la serie miocena, aparecen unas arenas de tamaño de grano fino con intercalaciones margosas y niveles calcareníticos, con una potencia máxima para el conjunto de unos 50 metros. Por su posición en la serie, estos materiales han sido datados como Plioceno inferior y medio (Viguiet, 1974). El Plioceno superior se caracteriza por la presencia de unas calizas con niveles de sílex, siendo característica la existencia de gasterópodos de origen lacustre (Benkhelil, 1976). Por su parte, en la zona norte y noroccidental del área analizada, el Mioceno representa un ciclo esencialmente transgresivo que se inicia con la Calcarenita de Niebla (Civis *et al.*, 1987), de espesores variables, en general inferior a los 50 metros, por encima de la cual se identifica una potente serie margoarcillosa (hasta 2.000 metros de potencia en algunos sectores), las Arcillas de Gibraleón (Sierro, 1984; Civis *et al.*, 1987). La regresión que se produjo durante el Plioceno dio lugar a las Arenas de Huelva, unidad de potencia inferior a 30 metros (Sierro, 1984; Civis *et al.*, 1987; Galán y González, 1993), sobre las que se depositaron las Arenas de Bonares (Mayoral y Pendón, 1986), con espesores que varían entre 1 y 20 metros. A techo se encuentran gravas y arenas, denominadas Alto Nivel Aluvial por Pendón y Rodríguez Vidal (1986), que marcan el inicio de la evolución fluvial cuaternaria.

Resultados de los métodos de inversión de esfuerzos. Corrección de la orientación de ejes principales

Al aplicar los métodos de análisis poblacional de fallas a las estaciones de fallas medidas en los materiales neógenos del SO de la Península Ibérica, se obtiene que la inclinación de los ejes principales del esfuerzo (y de la deformación) es más patente a medida que disminuye el número de familias observadas en la estación. Calculado el

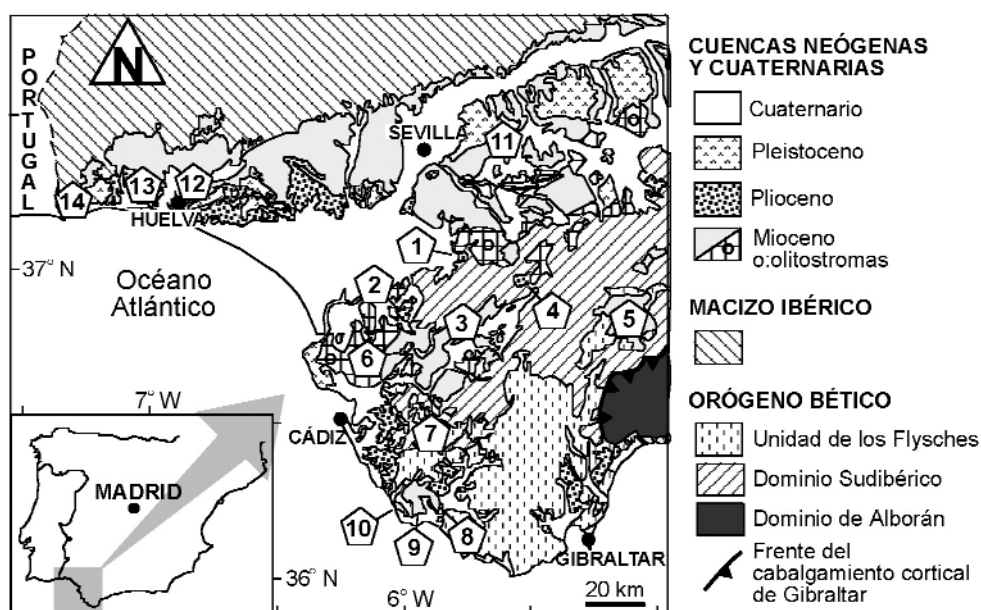


Fig. 10.- Esquema geológico de la región del Golfo de Cádiz con la situación de las estaciones de medidas de fallas analizadas en este trabajo.

ángulo de separación de las familias ($S/2$), se ha comprobado mediante el modelo de deslizamiento que en ninguna de las estaciones tenemos un modelo de tipo andersoniano. De acuerdo con estos datos, se ha aplicado el método β -stress a las estaciones que reunían las condiciones adecuadas, de acuerdo con lo indicado en este trabajo. El resultado puede apreciarse en la Tabla 1. En dicha tabla S_H describe las direcciones σ_1 (fallas inversas) o σ_2 (fallas normales), mientras que S_H modif. corresponde a dichos valores corregidos. Como ejemplo de las transformaciones efectuadas se muestran los valores de β obtenidos en dos estaciones distintas con fallas afectando a los materiales del Plioceno (Fig. 11). En el caso de la estación 3 (Fig. 11A), con fallas

normales, el cabeceo promedio es de unos $41^\circ \pm 10^\circ$ lo que, sumado a los valores de $S/2$ (10°) y de buzamiento promedio (30° - 50°) arroja un valor de β de $-32^\circ \pm 4^\circ$. El signo es negativo como consecuencia de que se trata de una sola familia del tipo 3 ó 4 (Tabla 1). Utilizando un razonamiento similar se observa que la estación 14, de fallas inversas, proporciona un valor de β de $+20^\circ \pm 5^\circ$ (Fig. 11B). Los resultados obtenidos en general hacen cambiar poco la dirección de S_H , pero en algunas estaciones las diferencias son significativas (Tabla 1). Con el fin de evaluar estadísticamente estas diferencias se han representado los histogramas de valores de β para las estaciones con fallas predominantemente normales e inversas (Fig. 12). Si to-

Estación	Edad	Familias	Tipo de fallas	n	σ_1	σ_2	σ_3	R	S_H	β	S_H modif.
1	Plioceno	Dos (1+3)	Inversas	14	303°/10°	92°/77°	212°/6°	0,42	123°	0° ± 0.1°	123° ± 0.1°
2	Plioceno	Dos (1+3)	Inversas	10	150°/53°	286°/28°	28°/22°	0,05	150°	0° ± 0.2°	150° ± 0.2°
3	Plioceno	Una (3 ó 4)	Normales	22	103°/64°	350°/11°	256°/24°	0,26	170°	-32° ± 4°	138° ± 4°
4	Mioceno	Una (3 ó 4)	Inversas	13	245°/19°	154°/0°	62°/70°	0,30	65°	-5° ± 9°	60° ± 9°
5	Mioceno	Dos (1+2)	Normales	12	129°/83°	275°/5°	5°/3°	0,19	95°	+24° ± 1°	119° ± 1°
5'	Plioceno	Una (3 ó 4)	Inversas	6	320°/52°	202°/19°	100°/31°	0,41	130°	-8° ± 9°	122° ± 9°
6	Plioceno	Una (3 ó 4)	Inversas	15	330°/65°	182°/22°	87°/13°	0,00	150°	-7° ± 13°	143° ± 13°
6'	Plioceno	Una (1 ó 2)	Inversas	12	150°/41°	292°/41°	42°/22°	0,10	150°	+4° ± 10°	154° ± 10°
7	Mioceno	Dos (2+3)	Normales	15	247°/53°	125°/24°	21°/28°	0,33	125°	+1° ± 0°	126° ± 0°
8	Mioceno	Cuatro	Normales	7	250°/85°	80°/4°	350°/0°	0,32	80°	0° ± 0°	80° ± 0°
9	Plioceno	Dos (1+3)	Inversas	16	160°/17°	67°/10°	306°/70°	0,46	160°	-0.9° ± 0.5°	159° ± 0.5°
10	Plioceno	Dos (1+3)	Inversas	9	120°/14°	212°/10°	334°/74°	0,46	120°	0° ± 0.7°	120° ± 0.7°
11 (*)	Mioceno	Una (1+3)	N e I	10	232°/56°	110°/19°	11°/26°	0,34	110°	0° ± 1°	110° ± 1°
12	Mioceno	Cuatro	Normales	19	181°/73°	325°/15°	84°/3°	0,18	145°	0° ± 0°	145° ± 0°
13	Mioceno	Dos (3+4)	Normales	13	120°/83°	300°/7°	210°/0°	0,15	120°	-30° ± 8°	90° ± 8°
14	Plioceno	Una (1 ó 2)	Inversas	15	120°/31°	232°/31°	356°/42°	0,69	120°	+20° ± 5°	140° ± 5°

El tipo de falla describe el componente de movimiento en buzamiento. Ángulos medidos desde el N y hacia el E. n= número de fallas. Orientación de los ejes principales: dirección de inmersión/inmersión. (*) Estación no fiable.

Tabla 1. Orientación de los ejes principales del esfuerzo ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$) y valor estimado de la relación entre los esfuerzos principales, R, para las estaciones estudiadas (ver su ubicación en la Fig. 10). Los datos recogen los resultados de la aplicación de los métodos de Etchecopar (Etchecopar *et al.*, 1981; Etchecopar, 1984) y de Inversión de Esfuerzos (Reches, 1987; Reches *et al.*, 1989), que son virtualmente idénticos. Se indican además los valores originales y modificados de S_H (consultar el texto para una explicación del sentido con el que se utiliza aquí este término) y el ángulo β estimado para cada estación.

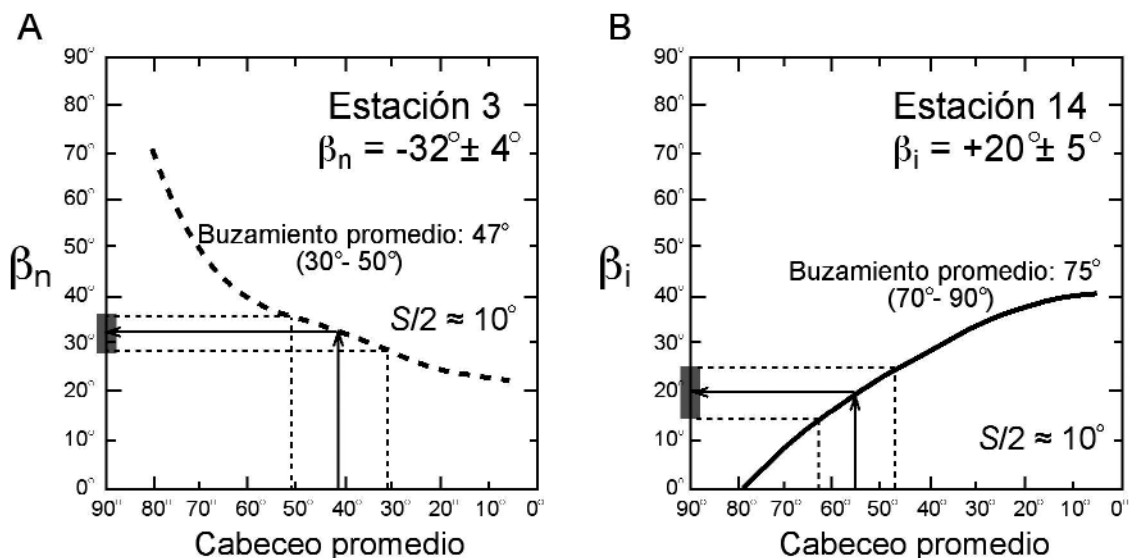


Fig. 11.- Ejemplos de obtención del ángulo β para dos de las estaciones analizadas. (A) Estación 3, fallas con componente normal de desplazamiento según el buzamiento. (B) Estación 14, fallas con componente inversa de desplazamiento según el buzamiento.

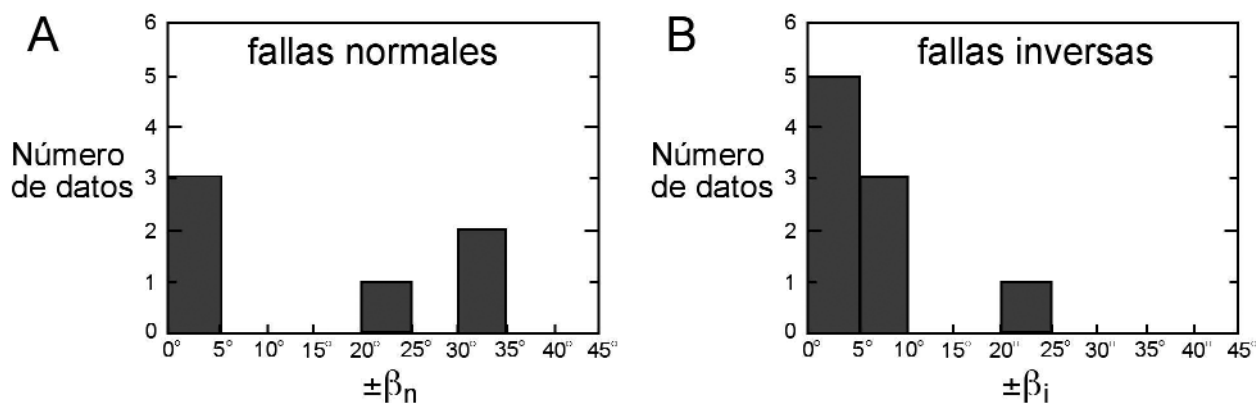


Fig. 12.- Histogramas de valores de los ángulos β (en valor absoluto) para todas las estaciones medidas en el caso de fallas con componente de movimiento según el buzamiento normal (A) e inverso (B).

amos como referencia un valor β de 5° para considerar como significativa la desviación entre el valor original y el corregido (basado en los errores de medida y en los errores cuadráticos o medios arrojados por los métodos de análisis utilizados), se concluye que la corrección es significativa en alrededor del 50% de las estaciones analizadas (3 de 6 para las fallas normales y 4 de 9 para las fallas inversas). En el caso de las estaciones con fallas normales las modificaciones son más importantes (β superiores a 20°), mientras que en las estaciones con fallas inversas la mayor parte de los casos arrojan correcciones inferiores a 10°. No se encuentra relación aparente de estos resultados con el valor de la relación R del elipsoide del esfuerzo, con el número de fallas medido en las distintas estaciones ni con el número de familias de fallas presentes en cada caso. Las diferencias observadas en la figura 12 pueden por tanto ser fortuitas, dado que tampoco se aprecian variaciones en las curvas de obtención de los valores de β para fallas normales e inversas (Figs. 7 a 9) que las expliquen.

En la Tabla 1 se ha asignado una edad miocena o pliocena (en realidad, plio-cuaternaria) a la actividad de las fallas medidas atendiendo principalmente a criterios de campo. Por ejemplo, la deformación en las estaciones determinadas en materiales pliocenos debe atribuirse a esa edad o más reciente. La edad de las fallas que afectan a materiales miocenos es algo más difícil de establecer. Siempre que se han observado materiales pliocenos cercanos, ha sido posible asumir como miocenas aquellas fallas cuyas direcciones o cinemática no coincidían con las típicas del Plioceno. A partir de estos resultados es posible obtener una idea de la distribución de campos de esfuerzos durante el Mioceno y Plioceno-Cuaternario en la zona estudiada. Una primera observación es que las fallas con componente de movimiento en buzamiento normal predominaron durante el Mioceno. En estos casos, los ejes de máxima compresión horizontal ($S_H = \sigma_2$) definen un campo de dirección E-O (Fig. 13A), que parece registrar los efectos en los sedimentos de la cuenca de antepaís de las Cordilleras Béticas del desplazamiento hacia el oeste del Dominio de Alborán (véase p. ej., Vera, 2004 y las referencias recopiladas en ese volumen relativas a la evolución tectónica de las Cordilleras Béticas), con extensión asociada en dirección aproximadamente N-S. Por el contrario, las fallas más

recientes (pliocenas y quizás cuaternarias) son principalmente inversas, con un campo de direcciones de máxima compresión horizontal ($S_H = \sigma_1$) orientado según NO-SE (Fig. 13B), de acuerdo por tanto con los esfuerzos neotectónicos registrados en la región y debidos al movimiento relativo de la Placa Africana con respecto a Iberia (p. ej., Herráiz *et al.*, 2000). En particular, el campo de esfuerzos mostrado en la Fig. 13B es congruente con la orientación y tipo de estado de esfuerzos (fallas inversas a inverso-direccionales) determinados por De Vicente *et al.* (2008) a partir de la inversión de mecanismos focales de terremotos.

Conclusiones

En condiciones de deformación general (no plana) y no rotacional, el modelo de deslizamiento de Reches (1983) predice que, bajo comportamiento frágil, las rocas acomodarán la deformación mediante el deslizamiento de cuatro familias de fallas, definiendo un sistema con simetría ortorrómbica. Dado que la deformación no plana debe ser la regla en extensas regiones corticales, especialmente las sometidas a condiciones de transpresión o transtensión, es esperable que la geometría de los sistemas de fallas en tales regiones se desvíe de la estrictamente andersoniana. Las técnicas de inversión de esfuerzos o de determinación de la deformación a partir del análisis de poblaciones de fallas permiten obtener buenos resultados cuando se aplican a sistemas como los predichos por el modelo de deslizamiento. Se demuestra en este trabajo que en sistemas con cuatro familias de fallas con simetría ortorrómbica, en fallas no rotadas, variaciones en el buzamiento de las fallas y en el cabeceo de las estrías provocan cambios significativos en la orientación de dos de los ejes principales del esfuerzo, siendo el tercero invariante. Dicho eje es σ_1 para las fallas con componente de movimiento en buzamiento inverso, y σ_3 para las fallas con movimiento normal. No obstante, es habitual que los sistemas que siguen el modelo de deslizamiento no se observen completos en el afloramiento, sea por la orientación del corte, por las condiciones de exposición, por desarrollo desigual de los distintos sistemas o por cualquier otro factor. En esa situación, los métodos de análisis de fallas proporcionan orientaciones de los ejes principales del esfuerzo que se desvían de los que teóricamente

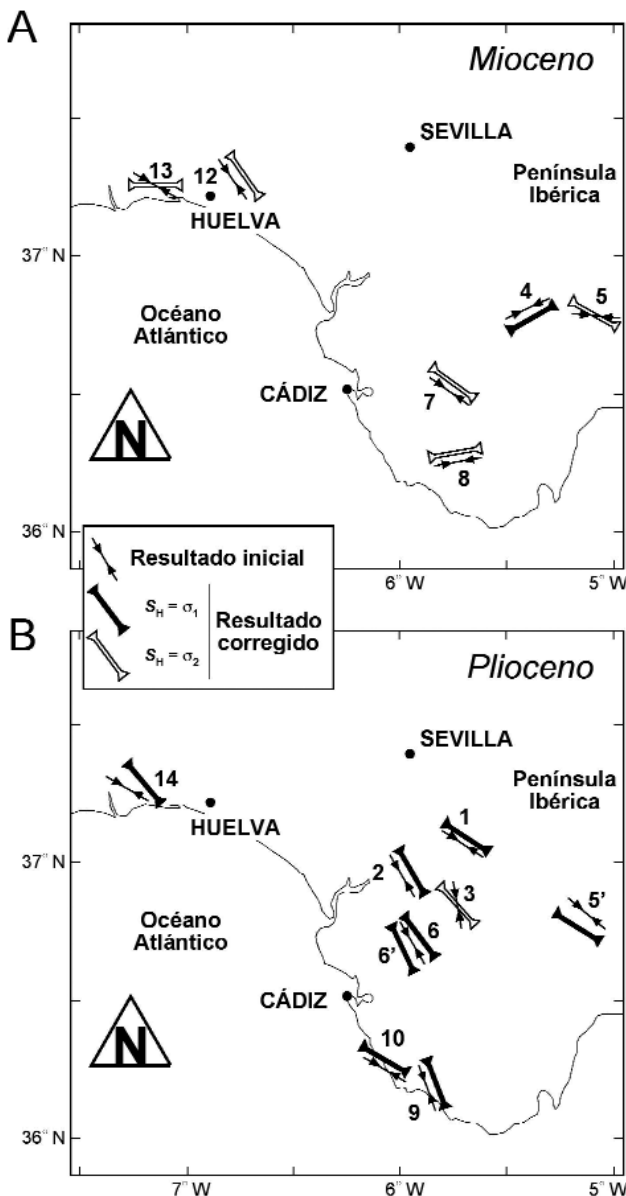


Fig. 13.- Mapas mostrando la orientación del eje S_H (ver definición en el texto) en la zona estudiada, calculado inicialmente mediante el uso de las técnicas de análisis de fallas, y la orientación corregida a través de la aplicación del método β -stress. (A) Mapa de orientación de S_H para fallas miocenas. (B) Mapa de orientación de S_H para fallas pliocenas y cuaternarias.

han producido el deslizamiento en las fallas estudiadas. En particular, cuando uno de los ejes principales del esfuerzo es vertical, se obtienen ejes inclinados. El método β -stress se ha desarrollado con objeto de corregir dichas desviaciones y determinar con mayor precisión la orientación de los ejes principales del esfuerzo. El método se basa en la utilización de unos ábacos obtenidos empíricamente a partir de muestras ideales, conocidos el tipo de sistema de fallas incompleto, el buzamiento promedio de las fallas y el cabeceo de sus estrías, así como el valor de $S/2$. La lectura de dichos ábacos nos proporciona el ángulo β que, siguiendo las reglas oportunas, sirve para corregir la orientación de los ejes principales del esfuerzo. El método ha sido aplicado para obtener la orientación corregida de los ejes de

esfuerzo horizontal de edades miocena y pliocena-cuaternaria en la región del Golfo de Cádiz.

Para la utilización del método es preciso descartar previamente la actuación de ejes principales del esfuerzo originalmente inclinados, o debidos a basculamientos tardíos. Las situaciones en las que la relación de esfuerzos principales (R) se acerca a 0 o a 1 deben ser cuidadosamente estudiadas. Finalmente, cuando se dispone de más de una familia de fallas contemporáneas, es preciso comprobar que el buzamiento medio de los planos de falla es similar en cada una de ellas.

Agradecimientos

Este trabajo constituye un tributo a la memoria de José Manuel González Casado, que contribuyó intensamente al desarrollo de distintos campos de las Ciencias de la Tierra en España y, en particular, al desarrollo y aplicación de los métodos de análisis de poblaciones de fallas. Los autores de este trabajo tuvieron la fortuna de contar con su amistad y de compartir algunas de sus tareas investigadoras. Se agradece la excelente labor de los dos revisores, Gerardo de Vicente y Carlos Liesa, cuyas recomendaciones y observaciones han contribuido decisivamente a la mejora del manuscrito original.

Referencias

- Anderson, E.M. (1905): Dynamics of faulting. *Transactions Edinburgh Geological Society*, 8: 387-402.
- Anderson, E.M. (1951): *The dynamics of faulting and dyke formation with application to Britain*. 2nd Ed. Oliver & Boyd, Edinburgh.
- Angelier, J. y Mechler, P. (1977): Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en sismologie: la méthode des diedres droites. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 7 (19): 1309-1318.
- Benkhelil, J. (1976): *Etude neotectonique de la terminaison occidentale des Cordillères Bétiques (Espagne)*. Tesis Doctoral, Université de Nice.
- Bilham, R. y King, G. (1989): The morphology of strike-slip faults. Examples from the San Andreas fault, California. *Journal of Geophysical Research*, 94: 10204-10216.
- Bott, M.H.P. (1959): The mechanism of oblique-slip faulting. *Geological Magazine*, 96: 109-117.
- Byerlee, J. (1978): Friction of rocks. *Pure and Applied Geophysics*, 116: 615-626.
- Capote, R., De Vicente, G. y González Casado, J.M. (1991): An application of the slip model of brittle deformation to focal mechanism analysis in three different plate tectonic situations. *Tectonophysics*, 191: 399-409.
- Chorowicz, J. y Sorlien, C. (1992): Oblique extensional tectonics in the Malawi Rift, Africa. *Geological Society of America Bulletin*, 104: 1015-1023.
- Civis, J., Sierro, F., González, J., Flores, J., Andrés, I., Porta, J. y Valle, M. (1987): El Neógeno marino de la provincia de Huelva. Antecedentes y definición de las unidades litoestratigráficas. En: *Paleontología del Neógeno de Huelva* (J. Civis, Ed). Universidad de Salamanca, 9-12.
- De Vicente, G. (1988): *Análisis poblacional de fallas. El sector de*

- enlace Sistema Central-Cordillera Ibérica. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid.
- De Vicente, G., Cloetingh, S., Muñoz-Martín, A., Olaiz, A., Stich, D., Vegas, R., Galindo-Zaldívar, J. y Fernández-Lozano, J. (2008): Inversion of moment tensor focal mechanisms from active stresses around Microcontinent Iberia: Tectonic implications. *Tectonics*, 27: doi:10.1029/2006TC002093.
- Dewey, J.F., Holdsworth, R.E. y Strachan, R.A. (1998): Transpression and transtension zones. En: *Continental Transpressional and Transtensional Tectonics* (R.E. Holdsworth, R.A. Strachan y J.F. Dewey, Eds). Geological Society, London, Special Publications, 135, 1-14.
- Engelder, T. (1993): *Stress Regimes in the Lithosphere*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 457 p.
- Etchecopar, A. (1984): *Etude des états de contraintes en tectonique cassante et simulations de déformations plastiques (approche mathématique)*. Tesis Doctoral, U.S.T.L. Montpellier.
- Etchecopar, A., Vasseur, G. y Daignieres, M. (1981): An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensor from fault striation analysis. *Journal of Structural Geology*, 3: 51-65.
- Fernández, C., Casillas, R., Ahijado, A., Perelló, M.V. y Hernández-Pacheco, A. (1997): Shear zones as a result of intraplate tectonics in oceanic crust: The example of the Basal Complex of Fuerteventura (Canary Islands). *Journal of Structural Geology*, 19: 41-57.
- Fitch, T.J. (1972): Plate convergence, transcurrent faults, and internal deformation adjacent to Southeast Asia and the western Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 77: 4432-4460.
- Fossen, H. (2010): *Structural Geology*. Cambridge University Press, Cambridge, 463 p.
- Galán, E. y González, I. (1993): Contribución de la mineralogía de las arcillas a la interpretación de la evolución paleogeográfica del sector occidental de la Cuenca del Guadalquivir. *Estudios Geológicos*, 49: 261-275.
- González de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. (2002): *Ingeniería Geológica*. Prentice Hall, Madrid, 715 p.
- Herráiz, G., De Vicente, G., Lindo-Naupari, R., Giner, J., Simon, J.L., Gonzalez-Casado, J.M., Vadillo, O., Rodriguez-Pascua, M.A., Cicuendez, J.I., Casas, A., Cabanas, L., Rincon, P., Cortes, A.L., Ramirez, M. y Lucini, M. (2000): The recent (upper Miocene to Quaternary) and present tectonic stress distributions in the Iberian Peninsula. *Tectonics*, 19: 762-786.
- Jiang, D. (2007): Sustainable transpression: An examination of strain and kinematic in deforming zones with migrating boundaries. *Journal of Structural Geology*, 29: 1984-2005.
- Jiang, D., Lin, S. y Williams, P.F. (2001): Deformation path in high-strain zones, with reference to slip partitioning in transpressional plate-boundary regions. *Journal of Structural Geology*, 23: 991-1005.
- Lithgow-Bertelloni, C. y Guynn, J.H. (2004): Origin of the lithospheric stress field. *Journal of Geophysical Research*, 109: B01408, doi:10.1029/2003JB002467
- Mayoral, E. y Pendón, J.G. (1986): Icnofacies y sedimentación en zona costera. Plioceno superior (?) litoral de Huelva. *Acta Geologica Hispanica*, 21-22: 507-513.
- McCaffrey, R. (1992): Oblique plate convergence. Slip vectors, and forearc deformation. *Journal of Geophysical Research*, 97: 8905-8915.
- McKenzie, D. y Parker, R.L. (1967): The North Pacific: An example of tectonics on a sphere. *Nature*, 216: 1276-1280.
- Nieto-Samaniego, A.F. (1999): Stress, strain and fault patterns. *Journal of Structural Geology*, 21: 1065-1070.
- Nieto-Samaniego, A.F. y Alaniz-Álvarez, S.A. (1995): Influence of the structural framework on the origin of multiple fault patterns. *Journal of Structural Geology*, 17: 1571-1577.
- Pegoraro, O. (1972): *Application de la microtectonique à un étude de neotectonique. Le golfe Maliaque (Grèce centrale)*. Tesis Doctoral, U.S.T.L. Montpellier.
- Pendón, J.G. y Rodríguez Vidal, J. (1986): Caracteres sedimentológicos y geomorfológicos del Alto Nivel Aluvial Cuaternario en el litoral de Huelva. *XI Congreso Nacional de Sedimentología*, Barcelona, Resúmenes de las Comunicaciones, 129.
- Perconig, E. y Granados, L. (1973): La caliza tosca de Arcos de la Frontera. *XIII Coloquio Europeo de Micropaleontología*, Resúmenes, 55-58.
- Reches, Z. (1983): Faulting of rocks in three-dimensional strain fields, II. Theoretical analysis. *Tectonophysics*, 95: 133-156.
- Reches, Z. (1987): Determination of the tectonic stress tensor from slip along faults that obey the Coulomb yield condition. *Tectonics*, 7: 849-861.
- Reches, Z. y Dietrich, J.H. (1983): Faulting of rocks in three-dimensional strain fields, I. Failure of rocks in poliaxial, servo-control experiments. *Tectonophysics*, 95: 111-132.
- Reches, Z., Baer, G. y Hatzor, Y. (1989): The stress inversional fault slip data and focal plane solutions – the method and its application to tectonic analysis. En: *Annual Meeting of Israel Geological Society*, Proceedings.
- Richardson, R.M. (1992): Ridge forces, absolute plate motions, and the intraplate stress field. *Journal of Geophysical Research*, 97: 11739-11748.
- Sierro, F.J. (1984): *Foraminíferos planctónicos y bioestratigrafía del Mioceno superior-Plioceno del borde occidental de la Cuenca del Guadalquivir (SO de España)*. Tesis Doctoral, Universidad de Salamanca.
- Twiss, R.J. y Unruh, J.R. (1998): Analysis of fault slip inversions: do they constrain stress or strain rate? *Journal of Geophysical Research*, 103: 12205-12222.
- Vera, J.A. (editor) (2004): *Geología de España*. SGE-IGME, Madrid, 890 p.
- Viguier, C. (1974): *Le néogène de l'Andalousie nord-occidentale (Espagne)*. *Historie Géologique du Bassin du Bas Guadalquivir*. Tesis Doctoral, Université de Bordeaux.
- Whittaker, A., Bott, M.H.P. y Waghorn, G.D. (1992): Stresses and plate boundary forces associated with subduction plate margins. *Journal of Geophysical Research*, 97: 11933-11944.
- Wuming, B., Vigny, C., Ricard, Y. y Froidevaux, C. (1992): On the origin of deviatoric stresses in the lithosphere. *Journal of Geophysical Research*, 97: 11729-11737.
- Yamaji, A. (2003): Are the solutions of stress inversion correct? Visualization of their reliability and the separation of stresses from heterogeneous fault-slip data. *Journal of Structural Geology*, 25: 241-252.
- Zoback, M.L. (1992): First- and second-order patterns of stress in the Lithosphere: The World Stress Map Project. *Journal of Geophysical Research*, 97: 11703-11728.

MANUSCRITO RECIBIDO EL 17 DE ENERO DE 2012.

ACEPTADO EL MANUSCRITO REVISADO EL 29 DE MARZO DE 2012.

