

EVOLUCION DE CUENCAS TENSIONALES EN SISTEMAS DE FALLAS LATERALES CALIFORNIA Y BAJA CALIFORNIA

J. Urrutia Facugauchi

Laboratorio de Paleomagnetismo y Geofísica Nuclear
Instituto de Geofísica, UNAM, D. Coyoacán 04510 D.F. MEXICO

RESUMEN

Las cuencas tensionales desarrolladas en sistemas de fallas laterales presentan un patrón característico en sus relaciones geométricas. Estas cuencas frecuentemente tienen formas romboides, en las cuales la mitad de su largo (L) mantiene una relación con el ancho (W), de tal forma que $L = 1.6 W$. Esta relación se conserva para cuencas de diferentes tamaños y situadas en distintos ambientes tectónicos. La relación geométrica puede explicarse como resultado de un movimiento de rotación, que ocurre durante el origen y evolución de la cuenca. Las cuencas en la frontera de placas Pacífico-Norte América parecen haberse originado por este mecanismo.

ABSTRACT

Pull-apart basins developed in strike-slip fault systems present a characteristic geometric relationship, which is related to their origin and evolution. The basins generally show a rhomb like shape with a half-length (L) to width (W) relation of $L = 1.6 W$, which holds for a range of scale and a variety of tectonic environments. The geometric pattern may be explained as a result of local rotation of the basin as it develops. The rotation model for the origin and evolution of pull-apart basins is here applied to the right-lateral transform faults system of the Pacific-North American plate boundary.

INTRODUCCION

El desplazamiento lateral a lo largo de segmentos de fallas con cambios de orientación o discontinuidades en echelon, ocasiona tensión y subsidencia o bien compresión y elevación, dependiendo del sentido de desplazamiento lateral y de la discontinuidad de la falla. Como resultado, en los sistemas de fallas laterales se forman sistemas de grabens y horsts, los cuales presentan una amplia diversidad de tamaños y un patrón regional generalmente complejo (por ejemplo Fig. 1). Estos sistemas se han referido en la literatura como "pull-apart basins" y "pressure ridges" (aquí denominados como cuencas tensionales y bloques de presión). El origen y evolución de estas cuencas tensionales y bloques de presión han atraído la atención de muchos investigadores; sin embargo, un modelo de aplicación general ha sido difícil de obtener. El modelo

más sencillo propuesto asume que estas estructuras se desarrollan a partir de una discontinuidad o curvatura en las fallas (Fig. 2.). Con ello, el ancho queda fijo a un valor inicial, mientras que el largo aumenta con el desplazamiento lateral (y el tiempo). De aquí que los largos deben de mostrar una correlación positiva con la magnitud de desplazamiento total (y edad): Aydin y Nur (1982) investigaron las relaciones geométricas y en marcado contraste con lo esperado, encontraron que los largos y anchos guardan una sencilla relación, independiente de la escala y ambiente tectónico de las cuencas (Fig. 3). Esta correlación entre los anchos y los largos de las cuencas implica la ocurrencia de un mecanismo que controla la evolución geométrica de las cuencas. En este trabajo se examina brevemente un modelo evolutivo para las cuencas tensionales y se mencionan los sistemas de cuencas tensionales generadas a lo largo del sistema de fallas laterales de California y Baja California.

MODELO EVOLUTIVO

La relación entre el ancho (W) y la mitad del largo (L) es:

$$L = 1.6 W \quad (1)$$

Considerando que esta relación se mantiene para estructuras con muy diferentes escalas y en distintos ambientes tectónicos (Fig. 3), el mecanismo que controla los cambios en geometría forma parte integral del origen y evolución de las cuencas. Además, el mantener esta simplicidad a pesar de las múltiples complicaciones que afectan las relaciones geométricas en sistemas de fallas laterales sugiere que el proceso debe de ser simple y estable. Una posible explicación para el origen y evolución de las cuencas tensionales propuesta recientemente (Urrutia-Facugauchi, 1987, 1988) involucra la rotación de bloques en el interior de la cuenca. En este modelo evolutivo, la rotación de bloques forma el mecanismo fundamental para el origen y posterior evolución de las cuencas tensionales y como uno de sus resultados se tiene la relación sencilla entre los largos y anchos de las estructuras. La rotación de bloques constituye además un mecanismo simple para resolver las dificultades geométricas inherentes en desplazar los dominios adyacentes a segmentos de fallas en y alrededor de discontinuidades y en la terminación de las

fallas. Estudios paleomagnéticos y estructurales en varios sistemas de fallas laterales indican que la rotación de bloques es una característica de estos sistemas (por ejemplo, Freund, 1970, 1974; MacDonald & Opdyke, 1972; Garfunkel, 1974; Freund & Tarling, 1979; Luyendyk et al., 1980; Urrutia-Facugauchi, 1981; Ron et al., 1984; Urrutia-Facugauchi & Böhnel, 1988).

El mecanismo de origen y evolución de las cuencas se ilustra en la Fig. 4. En discontinuidades (fallas en echelon, curvaturas, etc.) el movimiento lateral produce extensión y deformación en la zona entre los segmentos de falla (Fig. 4a), lo que ocasiona subsidencia y rotación (Fig. 4b). El proceso en primera aproximación presenta simetría axial, de aquí que el proceso de extensión y subsidencia produce la formación de "dos" cuencas gemelas (Fig. 4d). El proceso de rotación puede ser reproducido geoméricamente por medio de formar dos rectángulos dorados. Esta rotación resulta en la relación de $L = 1.6 W$ que corresponde a dos rectángulos dorados y que constituyen la cuenca tensional. Esta geometría se mantiene por el efecto de rotación ya que al continuar el desplazamiento lateral la rotación traslada la zona de deformación hacia una nueva configuración con la misma geometría (Fig. 4e). Este proceso de evolución produce el desarrollo de cuencas interiores (Fig. 4f), las cuales se han documentado en algunos sistemas (Sanders & Simmons, 1979). La relación de 1: 1.6 que caracteriza las cuencas tensionales (Fig. 3) corresponde a la relación dorada que frecuentemente representa sistemas de crecimiento en organismos (Honda, 1971) y se emplea en arte y arquitectura. La relación dorada puede encontrarse a partir de la serie o progresión geométrica de Fibonacci (para términos mayores de 3) y que esta dada por:

0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 14, 21, 34, 55, (2)

La serie fue desarrollada por Leonardo de Pisa hacia 1218. La relación dorada (o sección aurea) ha sido utilizada en numerosas pinturas y estructuras tales como "San Jerónimo" de Leonardo de Vinci, "La Parade" de Seurat, "L. Place de la Concorde" de P. Mondrian, el Partenon de Atenas, Grecia y casas habitación del arquitecto francés Le Corbusier. La construcción geométrica de esta sección dorada se logra por rotación a partir de un cuadrado. En la naturaleza este proceso de rotación esta involucrado en el crecimiento de organismos tales como los caracoles de los nautilus o las relaciones en flores tales como el girasol. Esta relación curiosa y simple representa bien el proceso de formación y evolución de las cuencas tensionales. Detalles adicionales sobre el origen y evolución de las cuencas tensionales se incluyen en Urrutia-Facugauchi (1988).

SISTEMA DE FALLAS LATERALES DE CALIFORNIA Y BAJA CALIFORNIA

El sistema de falla de San Andrés en California y su

continuación en el Golfo de California en el sistema compuesto de fallas y la dorsal oceánica constituye parte del límite entre las placas de Norte América y Pacífico (Fig. 5). El desplazamiento lateral asociado al movimiento relativo entre las placas ha generado en las discontinuidades una serie de cuencas tensionales tanto en el interior del golfo como en el continente (Fig. 5). El sistema de fallas aproximadamente sigue un círculo menor alrededor del polo relativo de rotación, en donde las discrepancias angulares entre este círculo y la orientación de las fallas produce las relaciones requeridas para la formación de cuencas tensionales. La magnitud del desplazamiento (cambio de velocidad) esta en relación con la distancia angular al polo de rotación. En la porción sur de California (Fig. 6) varios estudios paleomagnéticos han documentado rotación de bloques asociada a los desplazamientos laterales (por ejemplo, Luyendyk et al., 1980; Hornafius et al., 1986). De acuerdo al modelo examinado en este trabajo, una de las predicciones (o pruebas) esta relacionada a la magnitud de las rotaciones, el desplazamiento lateral total y la edad de la estructura. La magnitud de la rotación debe incrementarse con el tiempo. Para el sur de California y norte de México esta es la relación observada (Fig. 7). Los resultados paleomagnéticos disponibles para la región sur de California cubren los últimos 25 Ma e indican rotaciones de varias decenas de grados (Fig. 7). La magnitud de estas rotaciones se incrementa con el tiempo (y la magnitud de los desplazamientos laterales totales).

DISCUSION

El modelo de desarrollo de las cuencas tensionales por rotación permite explicar de forma sencilla las características geométricas, independientemente del ambiente tectónico y escala. El mantener esta relación de 1: 1.6 en la aparentemente amplia diversidad de sistema de fallas laterales sugiere que el proceso es estable y eficiente. Su relación con el rectángulo dorado o sección aurea, la cual se presenta en la naturaleza en fenómenos de crecimiento de animales y plantas y su empleo en arte y arquitectura no constituyen una fortuita curiosidad. Esta relación implica que el proceso es resultado de un proceso dinámico que es energéticamente favorable y eficiente. Detalles adicionales, así como una discusión más completa se presentan en Urrutia-Facugauchi (1988 y en preparación).

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Representación esquemática de características geométricas de cuencas tensionales. Puede observarse la forma romboidal de 'S' o de 'Z', que esta asociada al desplazamiento lateral (magnitud y sentido). Las formas corresponden a sistemas de falla lateral dextral con

fallas. Estudios paleomagnéticos y estructurales en varios sistemas de fallas laterales indican que la rotación de bloques es una característica de estos sistemas (por ejemplo, Freund, 1970, 1974; MacDonald & Opdyke, 1972; Garfunkel, 1974; Freund & Tarling, 1979; Luyendyk et al., 1980; Urrutia-Facugauchi, 1981; Ron et al., 1984; Urrutia-Facugauchi & Böhnel, 1988).

El mecanismo de origen y evolución de las cuencas se ilustra en la Fig. 4. En discontinuidades (fallas en echelon, curvaturas, etc.) el movimiento lateral produce extensión y deformación en la zona entre los segmentos de falla (Fig. 4a), lo que ocasiona subsidencia y rotación (Fig. 4b). El proceso en primera aproximación presenta simetría axial, de aquí que el proceso de extensión y subsidencia produce la formación de "dos" cuencas gemelas (Fig. 4d). El proceso de rotación puede ser reproducido geoméricamente por medio de formar dos rectángulos dorados. Esta rotación resulta en la relación de $L = 1.6 W$ que corresponde a dos rectángulos dorados y que constituyen la cuenca tensional. Esta geometría se mantiene por el efecto de rotación ya que al continuar el desplazamiento lateral la rotación traslada la zona de deformación hacia una nueva configuración con la misma geometría (Fig. 4e). Este proceso de evolución produce el desarrollo de cuencas interiores (Fig. 4f), las cuales se han documentado en algunos sistemas (Sanders & Siemmons, 1979). La relación de 1: 1.6 que caracteriza las cuencas tensionales (Fig. 3) corresponde a la relación dorada que frecuentemente representa sistemas de crecimiento en organismos (Honda, 1971) y se emplea en arte y arquitectura. La relación dorada puede encontrarse a partir de la serie o progresión geométrica de Fibonacci (para términos mayores de 3) y que esta dada por:

0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 14, 21, 34, 55, (2)

La serie fue desarrollada por Leonardo de Pisa hacia 1218. La relación dorada (o sección aurea) ha sido utilizada en numerosas pinturas y estructuras tales como "San Jerónimo" de Leonardo de Vinci, "La Parade" de Seurat, "L. Place de la Concorde" de P. Mondrian, el Partenon de Atenas, Grecia y casas habitación del arquitecto francés Le Corbusier. La construcción geométrica de esta sección dorada se logra por rotación a partir de un cuadrado. En la naturaleza este proceso de rotación está involucrado en el crecimiento de organismos tales como los caracoles de los nautilus o las relaciones en flores tales como el girasol. Esta relación curiosa y simple representa bien el proceso de formación y evolución de las cuencas tensionales. Detalles adicionales sobre el origen y evolución de las cuencas tensionales se incluyen en Urrutia-Facugauchi (1988).

SISTEMA DE FALLAS LATERALES DE CALIFORNIA Y BAJA CALIFORNIA

El sistema de falla de San Andrés en California y su

continuación en el Golfo de California en el sistema compuesto de fallas y la dorsal oceánica constituye parte del límite entre las placas de Norte América y Pacífico (Fig. 5). El desplazamiento lateral asociado al movimiento relativo entre las placas ha generado en las discontinuidades una serie de cuencas tensionales tanto en el interior del golfo como en el continente (Fig. 5). El sistema de fallas aproximadamente sigue un círculo menor alrededor del polo relativo de rotación, en donde las discrepancias angulares entre este círculo y la orientación de las fallas produce las relaciones requeridas para la formación de cuencas tensionales. La magnitud del desplazamiento (cambio de velocidad) está en relación con la distancia angular al polo de rotación. En la porción sur de California (Fig. 6) varios estudios paleomagnéticos han documentado rotación de bloques asociada a los desplazamientos laterales (por ejemplo, Luyendyk et al., 1980; Hornafius et al., 1986). De acuerdo al modelo examinado en este trabajo, una de las predicciones (o pruebas) está relacionada a la magnitud de las rotaciones, el desplazamiento lateral total y la edad de la estructura. La magnitud de la rotación debe incrementarse con el tiempo. Para el sur de California y norte de México esta es la relación observada (Fig. 7). Los resultados paleomagnéticos disponibles para la región sur de California cubren los últimos 25 Ma e indican rotaciones de varias decenas de grados (Fig. 7). La magnitud de estas rotaciones se incrementa con el tiempo (y la magnitud de los desplazamientos laterales totales).

DISCUSION

El modelo de desarrollo de las cuencas tensionales por rotación permite explicar de forma sencilla las características geométricas, independientemente del ambiente tectónico y escala. El mantener esta relación de 1: 1.6 en la aparentemente amplia diversidad de sistema de fallas laterales sugiere que el proceso es estable y eficiente. Su relación con el rectángulo dorado o sección aurea, la cual se presenta en la naturaleza en fenómenos de crecimiento de animales y plantas y su empleo en arte y arquitectura no constituyen una fortuita curiosidad. Esta relación implica que el proceso es resultado de un proceso dinámico que es energéticamente favorable y eficiente. Detalles adicionales, así como una discusión más completa se presentan en Urrutia-Facugauchi (1988 y en preparación).

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Representación esquemática de características geométricas de cuencas tensionales. Puede observarse la forma romboidal de 'S' o de 'Z', que está asociada al desplazamiento lateral (magnitud y sentido). Las formas corresponden a sistemas de falla lateral dextral con

discontinuidad o escalón de tensión.

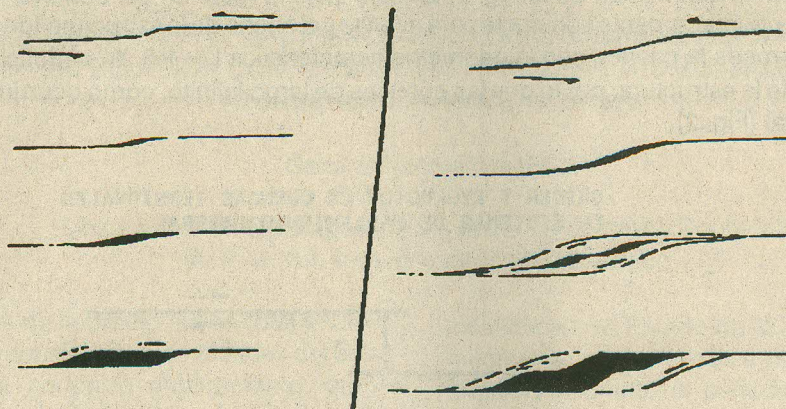


Fig. 2. Modelo idealizado de formación de una cuenca tensional. Note que en este modelo se predice que la longitud de la cuenca aumenta en función de la magnitud del desplazamiento lateral, mientras que el ancho permanece invariable (Aydin & Nur, 1982)

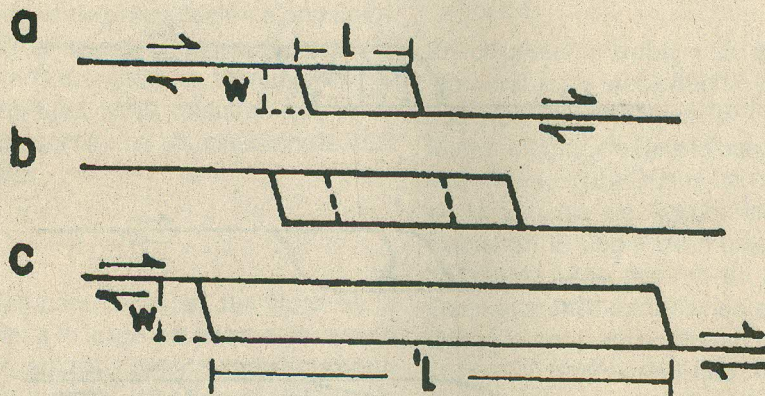


Fig.3. Relación geométrica entre el ancho y el largo para 70 estructuras tensionales (tomada de Aydin & Nur, 1982). (a) Gráfica logarítmica para anchos (W) y largos (L). Observe que la relación es: $\log_{10}(L) = C1 + \log_{10}(W) + \log_{10} C2$, donde $C1 = 1.0$ y $C2 = 3.2$. Esto puede simplificarse a la siguiente relación entre el largo y ancho de: $L = 1.6 W$. (6) Histograma de frecuencias para los cocientes largo-ancho de las estructuras tensionales.

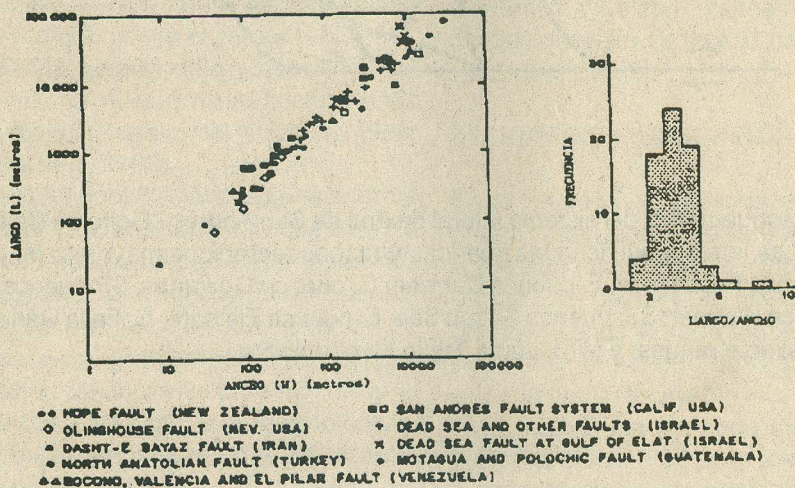


Fig. 4. Representación esquemática del modelo propuesto para la evolución de cuencas tensionales (Urrutia, 1987, 1988). Note que a diferencia del modelo de la Fig. 2, en este caso la rotación del dominio interior de la cuenca mantiene una relación aproximadamente constante para el largo y el ancho de la estructura (de acuerdo a la relación de la Fig. 3). Una vez formada la cuenca con la geometría característica $L = 1.6 W$, el desplazamiento lateral es tomado por la rotación de la estructura, por lo que las cuencas de largo infinito, como ocurriría con el caso simple de desplazamiento lateral (Fig. 2).

ORIGEN Y EVOLUCION DE CUENCAS TENSIONALES
EN SISTEMAS DE FALLAMIENTO LATERAL

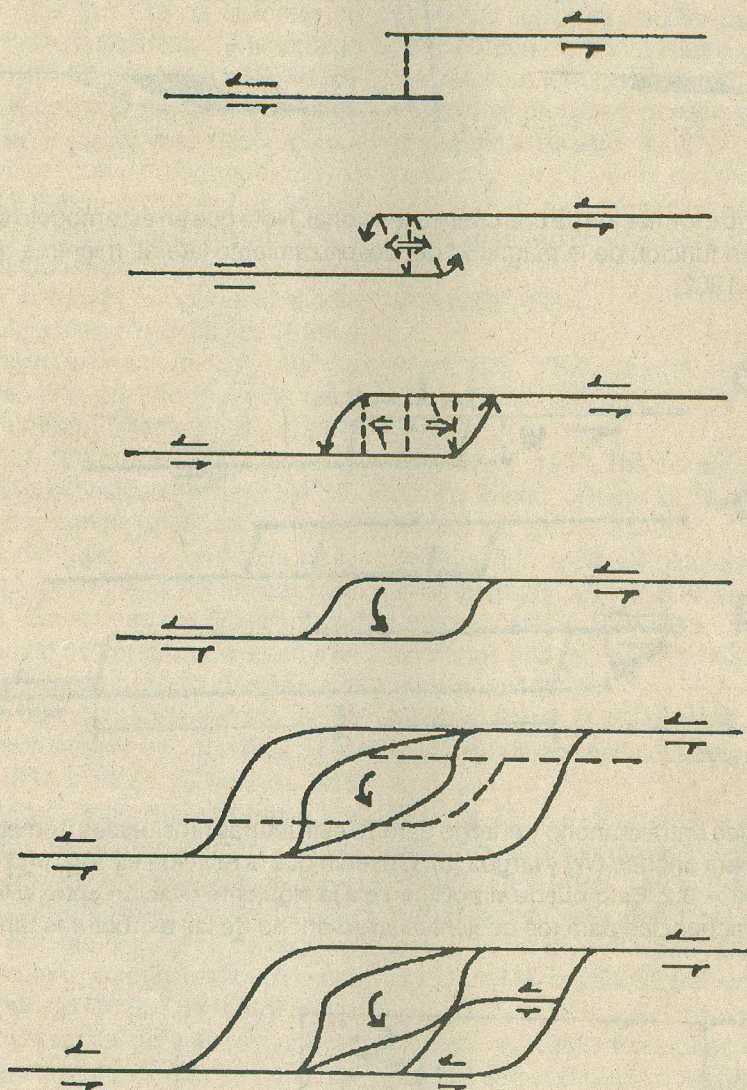


Fig. 5. Representación esquemática del sistema lateral dextral de San Andrés - Golfo de California y sus sistemas de cuencas Pacífico. Las letras identifican las cuencas y rasgos tectónicos mayores: M, cuenca Mazatlán; A., cuenca Alarcón; P, cuenca Pescadero; F, cuenca Carmen; G, cuenca Guaymas; SP, cuenca San Pedro Martír; D, cuenca Delfín; W, cuenca Wagner; SS, cuenca Salton Sea; E, cuenca Elsinore; G, Falla Garlock; DV, cuenca Valle de la Muerte; TR, Transverse ranges; y MTJ, Junta Triple Mendocino.

SISTEMA DE CUENCAS - GOLFO DE CALIFORNIA
SISTEMA SAN ANDRES

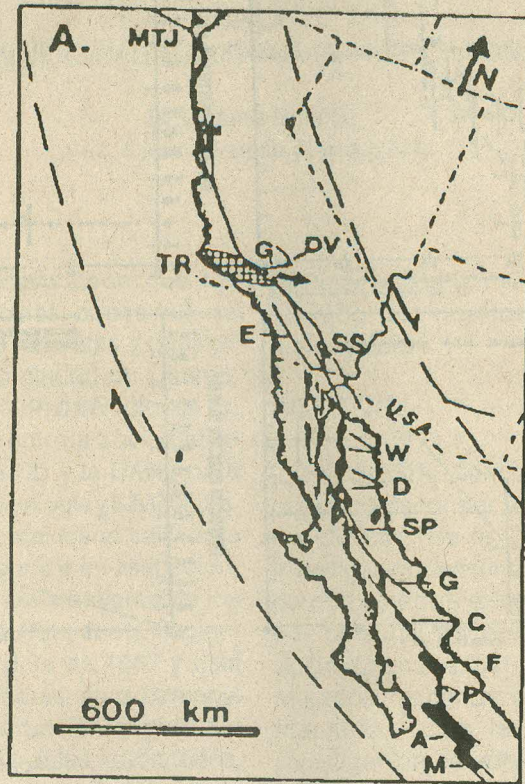


Fig. 6. Sistema de fallas y cuencas del sur de California en la zona de San Andrés (tomada de Hornafius et al., 1986). Mapa tectónico estructural de la región, que incluye a las fallas laterales mayores. Las flechas circulares y el número en el centro indican el sentido y la magnitud de las rotaciones estimadas por paleomagnetismo.

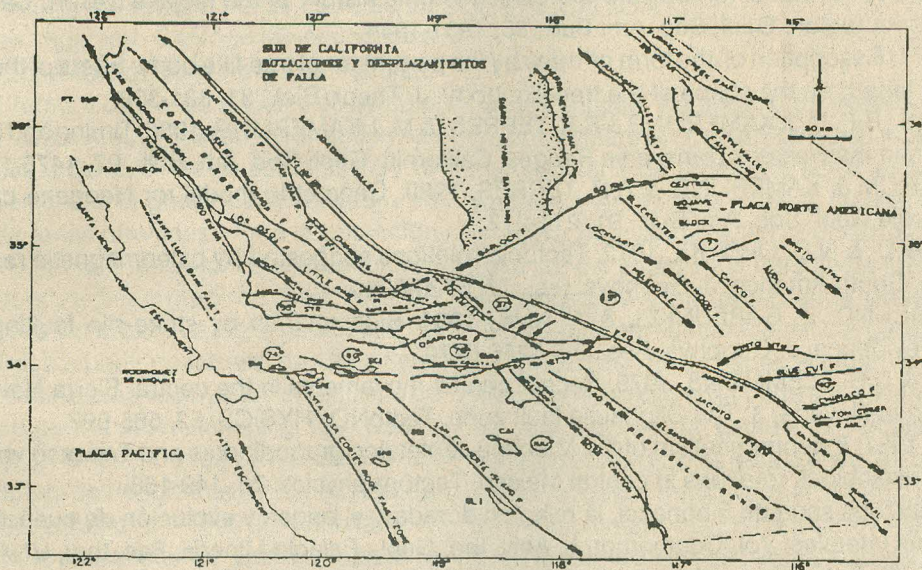
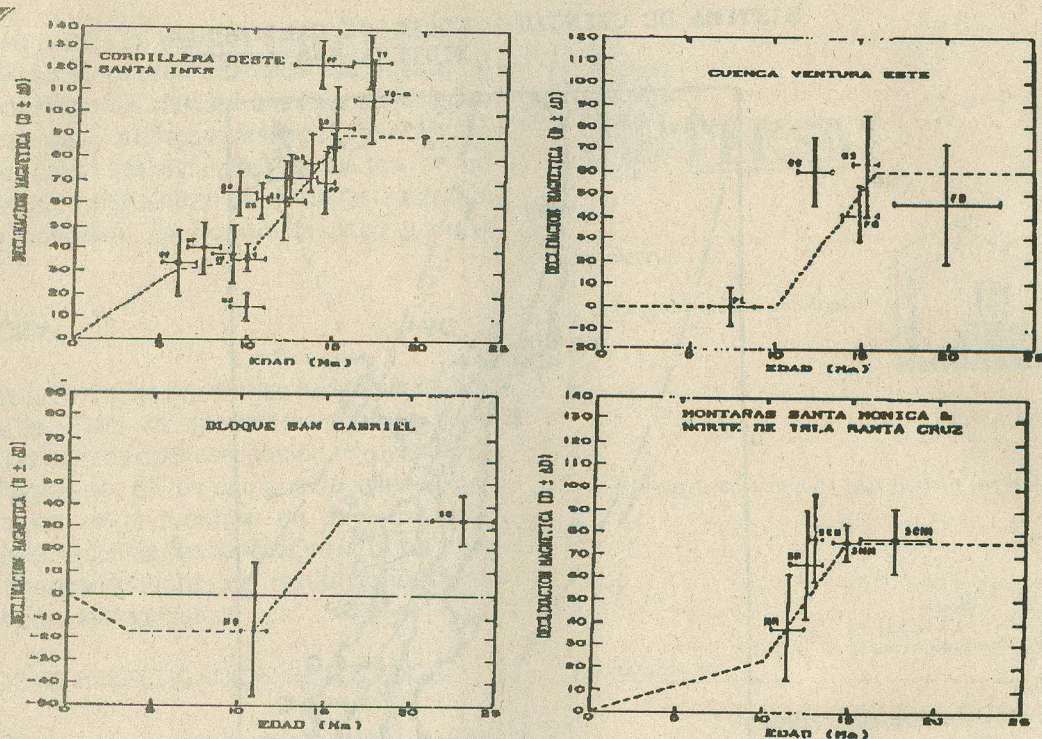


Fig. 7. Diagramas de la magnitud de la rotación relativa (en forma de anomalías de declinación) en función de la edad para varias de las regiones estudiadas en el sur de California (Fig.6.). Observe que la magnitud de las rotaciones se incrementa con la edad (entre los 0 y 15 Ma) y que se tienen rotaciones de hasta 90 grados (tomada de Horanfius et al., 1986).



REFERENCIAS

- AYDIN, A. & a. NUR, 1982. Evolution of pull-apart basins and their scale independence. *Tectonics*, 1, 91-105.
- FREUND, R., 1970. Rotation of strike-slip faults in Sistan, Southeast Iran. *J. Geol.*, 78, 188-200.
- FREUND, R., 1974. Kinematics of transform and transcurrent faults. *Tectonophysics*, 21, 93-134.
- FREUND, R. & D.H. TARLING, 1979. Preliminary Mesozoic paleomagnetic results from Israel and inferences for microplate structure in the Lebanon. *Tectonophysics*, 60, 189-205.
- GARFUNKEL, Z., 1974. model for the Late Cenozoic tectonic history of the Mojave Desert, California and for its relation to adjacent region. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 85, 1931-1944.
- HONDA, H., 1971. Description of the form of trees by the parameter of tree-like body: Effect of the branching angle and the branch length on the shape of the tree-like body. *J. Theor. Biol.*, 31, 331-338.
- HORNAFIUS, J.S., B.P. M.J. KAMERLING & R.R. TERRES, & M.J. KAMERLING, 1986. Timing and extent of Neogene tectonic rotation in the western Transverse Ranges, California. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 97, 1476-1487.
- LUYENDYK, B.P., M.J. KAMERLING & R.R. TERRES, 1980. Geometric model for Neogene crustal relations in southern California. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 91, 211-217.
- MacDONALD, W.D. & N.D. OPDYKE, 1972. Tectonic rotations suggested by paleomagnetic results from northern Colombia, South America. *J. Geophys. res.*, 77, 5720-5730.
- RON, H., R. FREUND, Z. GARFUNKEL & A. NUR, 1984. Blok rotation by strike-slip faulting: Structural and paleomagnetic evidence. *J. Geophys. Res.*, 89, 6256-6270.
- SANDER, C.O. & D.B. SLEMMONS, 1979. Recent crustal movements in the central Sierra Nevada-Walker Lane region of California-Nevada, 3. The Oligocene fault zone. *Tectonophysics*, 52, 585-597.
- URRUTIA, A.J., 1981. Paleomagnetism of the Miocene Jantetelco granodiorites and Tepexco volcanic group and inferences of crustal block rotations in central Mexico. *Tectonophysics*, 76, 149-168.
- URRUTIA, J., 1987. La serie de Fibonacci, la relación dorada y el origen y evolución de cuencas tensionales en sistemas de fallas laterales. Vol. Conmemor. L. Aniv. Ing. Geol., Palacio Minería, Fac. Ing., UNAM, México, p.97.
- URRUTIA, J., 1988. Rotación de bloques en sistemas de fallas de desplazamiento lateral - Cuencas tensionales. *Geofis. Int.*, 28, 907-938.
- URRUTIA, J. & H. BONHEL, 1988. Tectonics along the Trans-Mexican volcanic belt according to paleomagnetic data. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 52, 320-329.