

# Cálculo automático del desplazamiento en un sector del sistema falla-dique de Plasencia

*Automatic calculation of displacement in a sector of the Plasencia fault-dike system*

P. J. Rincón(\*), J. Hermosilla(\*\*), R. Vegas(\*), G. Pascual(\*\*), A. Muñoz-Martín(\*), J.M. Martínez-Solares(\*\*)

(\*Dpto. de Geodinámica, Fac. de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense; 28.040, Madrid.

e-mail: Ruidera@eucmax.sim.ucm.es

(\*\*) Instituto Geográfico Nacional. C/ General Ibáñez Ibero nº 3; 28003, Madrid

## ABSTRACT

*By means of the use of a new methodology of structural analysis, based in the combination of photogrammetry restitution technics and geological maps, the dynamics and kinematics of a sector of Plasencia fault-dike system has been analysed. The precision of this methodology allows to characterise the existence of elevations and depressions (associated with the strike-slip dynamics of the fault-dike system), and the detection of some rotated blocks (limited by inverse and directional-inverse faults) located in the vicinity of the main fracture zone. This methodology will signify an interesting tool for the finite or discrete element modelling in preferential fracture zones.*

**Key words:** photogrammetric restitution, distributed deformation, Plasencia fault-dike system, central Spain

*Geogaceta*, 27 (1999), 143-146

ISSN: 0213683X

## Introducción

Tradicionalmente, el cálculo del desplazamiento relativo sucedido en los planos de falla se realizaba de un modo aproximado, considerando informaciones cartográficas y topográficas de los afloramientos deformados. No parece existir un modo más adecuado de hacerlo. Ante esta situación sólo cabe perfeccionar bien las síntesis cartográficas a emplear, bien las síntesis topográficas sobre las que situar a las anteriores, o bien mejorar ambas y el modo según el cual éstas han de ser analizadas e interpretadas conjuntamente. En este trabajo proponemos una metodología que considera mejoras tanto en la síntesis topográfica como en la interpretación posterior. Sin embargo, nuestros objetivos no son sólo metodológicos ya que también pretendemos obtener conclusiones estructurales acerca del dinamismo real ocurrido en un sector del *Sistema Falla-Dique de Plasencia* situado en la provincia de Cáceres (Fig. 1).

## Metodología de trabajo

La metodología de este análisis estructural consiste, simplemente, en cuantificar el desplazamiento ocurrido a lo largo del plano de falla de puntos inicialmente adyacentes. El hecho sería poco novedoso si no fuera por las dimensiones



**Figura 1:** Localización del área de trabajo (rectángulo interior) sobre un modelo digital del terreno (S.G.E., 1995). El recuadro exterior (trazo discontinuo) supone una ampliación (deformada) para este sector del 200%.

*Figure 1:* Location of the studied area (inner square) over a digital model of the surface (S.G.E., 1995). The outer square (discontinuous line) shows a deformed ampliation (200%) for this sector.

consideradas, por la posibilidad de analizar al mismo tiempo más de un plano de falla hectométrico/kilométrico, y por la precisión de los cálculos. La dificultad principal de la metodología estriba en la calidad de la síntesis cartográfica utilizada, a partir de la cual *habrán de ser identificados los pares de puntos teóricamente homólogos* desplazados después por la actividad de las fallas (Fig. 2).

Una vez seleccionada el área de estudio, mediante la restitución fotogramétrica correspondiente a la base topográfica digital del Instituto Geográfico Nacional (I.G.N.) obtuvimos el modelo digital del terreno (M.D.T.) y las ortofotos correspondientes con una precisión métrica. Posteriormente, se procedió a seleccionar los niveles litológicos más representativos o "capas guía" (los más competentes mecánicamente) sobre los cuales habrían de ser identificados los puntos homólogos. La metodología empleada durante el proceso fotogramétrico puede esquematizarse en los puntos siguientes:

1. Conversión de los fotogramas (en nuestro caso fotografías aéreas a escala 1:30.000) en imágenes digitales mediante un *escáner fotogramétrico* adecuado.

2. Obtención de un M.D.T. a partir del fichero gráfico que contenía la restitución numérica de la zona. Los elementos cartográficos empleados para la consecución del modelo digital son aquellos que definen la morfología del terreno (curvas de nivel, puntos acotados e hidrografía).

3. Obtención de las ortofotografías digitales correspondientes a los fotogramas utilizados mediante los pasos siguientes:

3.1. Introducción de los datos de partida, a partir de imágenes digitales, canevas de aerotriangulación y del M.D.T.

3.2. Cálculo de la rectificación diferencial, considerando un tamaño determinado de píxel de salida y un proceso de interpolación bicúbica.

3.3. Salida de la información digital. Obtención de una ortofoto a la escala determinada cuyas coordenadas planimétricas U.T.M. (x,y) sean semejantes a las de la síntesis topográfica contenida en el mapa geológico a usar con posterioridad (cartografía geológica más topografía).

4. Levantamiento por digitalización de la cartografía geológica que interesa fotointerpretar y representar a partir de las ortofotografías. En este punto del pro-

ceso se obtienen directamente las coordenadas planimétricas (x,y) en proyección U.T.M., a las cuales se les incorpora la coordenada altimétrica a partir del *modelo digital del terreno* calculado previamente.

5. De este modo se dispone de una *cartografía tridimensional* ("fotografía" tridimensional) referenciada geográficamente y con precisiones métricas.

En nuestro caso (Rincón, 1999), a partir de la interpretación de imágenes de satélite LANDSAT de esta misma zona (a escala 1:100.000), de la observación de las propias fotografías aéreas, y de la información estructural proporcionada por la hoja geológica correspondiente, se realizó la cartografía de las principales fracturas que disectaban a la zona de estudio. De esta manera se dispuso de un modelo tridimensional del terreno con precisiones métricas: *cualquier punto observable sobre las fotografías aéreas podría ser ahora bien referenciado espacialmente.*

El paso siguiente consistió, por tanto, en conocer cual era la posición (X, Y, Z) tanto de la traza de las fracturas como de las trazas de los niveles litológicos considerados. Para ello se había procedido, primero, a digitalizar en dos dimensiones

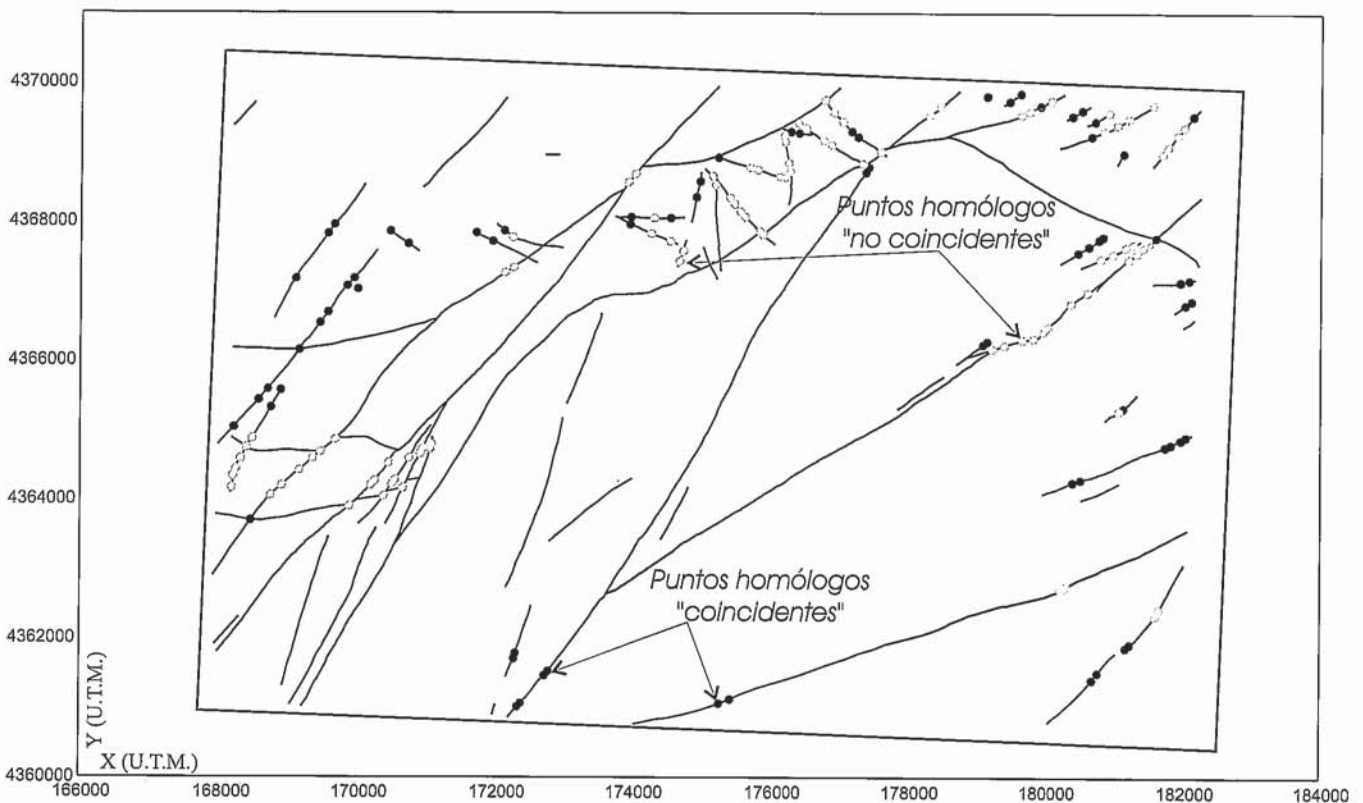


Figura 2: Disposición espacial de las fracturas consideradas y de los pares de puntos "homólogos" (coincidentes o no coincidentes).

Figure 2: Spatial disposition of the fractures considered and the pair of "homologous points" (coincident and not coincident).

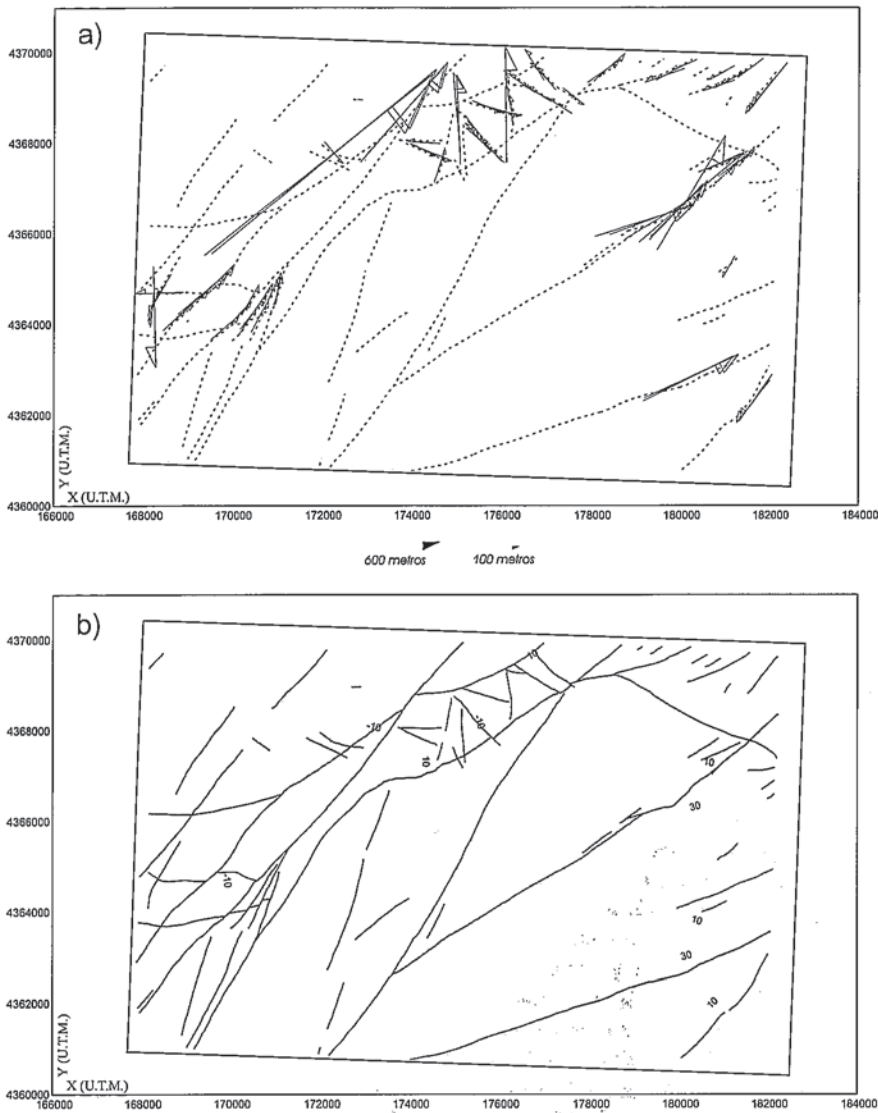


Figura 3: Representación gráfica de la magnitud y sentido de los desplazamientos cuantificados (a), así como de las elevaciones y depresiones concluidas (b).

Figure 3: Graphic representation of the magnitude and sense of the quantified displacements (a), so the elevations and depressions concluded (b).

tanto las fracturas como las "capas guía" (obtenidas de la síntesis geológica del I.G.M.E., 1982), utilizando el mismo sistema de coordenadas espaciales de referencia (coordenadas U.T.M.). Así, se logró un fichero informático estructurado en tantos niveles como fueron precisos (nivel 1: fallas, nivel 2: litología "a"; nivel 3: litología "b", ...). Posteriormente, a partir del uso del software elaborado al efecto por el I.G.N. para fotogrametría, mediante la comparación entre aquel modelo tridimensional del terreno y el fichero bidimensional, a cada punto de interés se le asignó (nivel a nivel) un valor de "Z". Desde este momento se dispuso de una cartografía geológica tridimensional; el paso siguiente implicaba definir los

puntos de interés y conocer sus coordenadas respectivas. Una vez logrados, estos valores fueron introducidos en una base de datos que facilitó la aplicación automática de fórmulas matemáticas que permiten obtener las distintas resultantes (magnitud y orientación de los posibles vectores definibles entre los puntos homólogos desplazados. Es necesario diferenciar los desplazamientos dextrógiros de los levógiros para no "acumular" desplazamientos contrarios, en nuestro caso los valores positivos representaron movimientos levógiros (tendencia regional del Sistema Falla-Dique de Plasencia), mientras que los valores negativos fueron equivalentes a movimientos en el plano de falla de tipo dextrógiro.

Finalmente, la base de datos generada de esta manera, junto con los resultados correspondientes a la aplicación de las diversas fórmulas matemáticas, puede ser interpolada mediante el software adecuado para proporcionar *mapas de isovalores de desplazamiento*. En nuestro caso, se ha empleado el programa SALTOS (Muñoz-Martín, 1998) mediante el cual, a partir de un fichero en el que se definen los valores espaciales de "X", "Y" y "Z" de puntos homólogos (y considerando uno de los puntos inmóvil con respecto a su semejante), es posible obtener todas las resultantes posibles bidimensionales y tridimensionales. Otra utilidad principal de este software radica en su capacidad para generar archivos traducibles mediante programas gráficos. Gracias a esta representación escalada es posible determinar y cuantificar las zonas donde se ha atenuado o resuelto mayor cantidad de deformación frágil (total o el valor de las componentes verticales y horizontales) así como el sentido y dirección del desplazamiento en las fallas.

#### Contexto geológico de la aplicación real del método

Esta técnica se ha aplicado al cuadrante suroccidental de la Hoja 1:50.000, nº 703 ("Arroyo de la Luz"; I.G.M.E., 1982), en el cual está cartografiado un segmento destacable del *Sistema Falla-Dique de Plasencia*. Éste disecta a un afloramiento continuo de materiales de edad Precámbrico superior-Cámbrico inferior, y a una estructura sinformal orientada ONO-ESE ("Sinclinorio de la Sierra de San Pedro") característica del *Domínio de los Pliegues Verticales* de la Zona Centroibérica (Diez-Balda y Vegas, 1992) y en la cual afloran materiales de edad ordovícica, silúrica, devónica y carbonífera. El *sistema dique-falla de Plasencia* constituye uno de los elementos estructurales post-hercínicos más destacables de toda la Península Ibérica. Se corresponde con un cuerpo intrusivo básico encajado a lo largo de una *zona de falla* de unos 500 kilómetros de longitud (desde el Cabo de San Vicente hasta las proximidades de Ávila) y hasta diez kilómetros de anchura. Diversos autores han datado este dique obteniendo edades oscilantes entre los 200 Ma (Sebai *et al.*, 1991), los 192-132 Ma (Vegas *et al.*, 1997), y los 182-148 Ma (Schermerhorn *et al.*, 1978; Schott *et al.*, 1981). El comienzo de la apertura del océano Atlántico (en su sector central) debió suponer en la Península Ibérica el punto de partida para toda la evolución geodinámica

alpina. Así, el "sistema" representa uno de los mejores exponentes en el Macizo Ibérico del momento de la ruptura de la Pangea durante el Triásico-Jurásico.

### Conclusiones metodológicas y de la aplicación

Sin duda, una de las conclusiones metodológicas principales es que esta metodología permite disponer de ficheros tridimensionales precisos relativos a la topografía de cualquier área deseada. Cualquier consideración geológica o geofísica que requiera un conocimiento concreto del relieve en áreas no excesivamente extensas puede beneficiarse de la aplicación de esta técnica. En este trabajo se muestra una de estas aplicaciones posibles al campo de la geología estructural. En el cuadrante elegido existe un entramado de fallas orientadas hacia NE-SO, NNE-SSO, y N-S que evidencian desplazamientos sensibles tanto dextrógiros como sinistrosos (Fig. 3 a). Estos últimos son los más abundantes y definen la dinámica característica de la megafractura. De la misma manera, gracias a estas trazas de fracturas y a sus movimientos opuestos, es posible sugerir que la deformación debida a la dinámica del sistema se ha resuelto de un modo *distribuido*, afectando de manera diferencial a distintos bloques o unidades estructurales independientes del basamento hercínico (intensamente plegado). Así, en las proximidades a la traza principal de la falla los movimientos direccionales son predominantes. Fuera de esta traza preferente la deformación frágil se ha resuelto activando fallas inverso-direccionales dentro de un contexto general de bloques rotados. La propia dinámica direccional de una zona de falla tan compleja como la de Plasencia ha propiciado, además, la existencia de entornos locales transtensivos y transpresivos resueltos en elevaciones y depresiones más o menos nítidas, y con morfologías sigmoidales características *sensu* Sylvester (1988) (Fig. 3 b). En las proximidades a este sector, Capote *et al.* (1996) descri-

ben algunos ejemplos relacionados con este tipo de dinámica.

Los resultados confirman el carácter direccional del desplazamiento (aceptado tradicionalmente) en la traza de fracturación preferente (Fig. 3). Los desplazamientos máximos suceden en las proximidades a la traza principal del Sistema a favor del cual se ha cuantificado el desplazamiento horizontal máximo (2595 metros). Este mismo salto implica tan sólo una componente vertical de +20,7 metros. Así, la falla para este "par de puntos homólogos" supondría una falla *levógira* y de tipo *direccional-normal*. Del mismo modo, se ha detectado la existencia de todo un conjunto de bloques (de espesor desconocido) delimitados por fallas dextrógiros y levógiros con rumbos NE-SO/ENE-OSO y, en menor medida, N-S/NNO-SSE, cuantificándose la magnitud y orientación de sus desplazamientos. Mediante la definición sus bordes, su dinámica y los materiales que delimitan es posible confirmar el movimiento de estos bloques dentro de un contexto compresivo que provoca su rotación, resolviéndose la deformación de sus bordes en movimientos inverso-direccionales dextrógiros y levógiros indistintamente. Asociadas a esta dinámica se han detectado elevaciones y depresiones reales dada la precisión de esta metodología. Por tanto, la proximidad respecto a la traza principal del Sistema Falla-Dique condiciona no sólo la existencia de los desplazamientos máximos o mínimos en el plano de falla, sino también la activación diferente de un entramado de discontinuidades orientadas de manera distinta a la traza regional. Además, los bloques de dimensiones menores se localizan en las proximidades a la traza principal, y viceversa.

A partir del empleo de esta técnica se ha podido comenzar a cuantificarse todos estos desplazamientos tan complejo. El hecho de que existan numerosos puntos homólogos en los que no es posible cuantificar ningún desplazamiento proporciona información sobre las dimensiones de los segmentos supuestamente activos de

las fallas. Con respecto a este último punto, cabe también la posibilidad de la existencia de una atenuación frágil-dúctil a favor de los tramos aflorantes menos competentes (pizarras) intercalados entre los niveles cuarcíticos. Finalmente, creemos que esta metodología supondría una herramienta interesante en un planteamiento hipotético de modelización de la dinámica del sistema dique-falla mediante elementos discretos. Así mismo, sería de gran interés la utilización de esta modelización y del método aquí descrito en otros sectores del interior peninsular en los que se observa la existencia de cuencas transtensivas y elevaciones transpresivas ligadas a fallas direccionales.

### Bibliografía

- Capote, R., Villamor, P., Tsige, M. (1996): *Geogaceta*, 20 (4). 921-924.
- Diez Balda, M.A., Vegas, R. (1992): In: *Paleozoico Inferior de Ibero-América*. Univ. de Extremadura; pp. 523-534.
- I.G.M.E. (1982): Hoja nº 703: Arroyo de la Luz. Mapa Geológico de España. Escala 1:50.000.
- Muñoz-Martín, A. (1998): *Programa SALTOS*, inédito (entorno MS-DOS).
- Rincón, P.J. (1999). *Tesis Doctoral*, U.C.M.; 624 pp.
- Schermerborn, L.J.G., Priem, H.N.A., Boelrijk, N.A., Hebeda, E.H., Verduinen, E.A.T. y Verschure, R.H. (1978): *J. Geol.*, 86; pp. 299-309.
- Schott, J.J.; Montigny, R. y Thuizat, R. (1981): *Earth Pla net. Sci. Letters*, 36: 362-395.
- Sebai, A., Feraud, G., Bertrand, H. y Hanes, J. (1991): *Earth Planet. Sci. Letters* 104: 445-472.
- Servicio Geográfico del Ejército (1995): *Carta Digital de España* (CD-ROM); 36 pp.
- Sylvester, A. G. (1988): *Geol. Soc. Am. Bull.*, 100: 1666-1703.
- Vegas, R., Galindo, C. y Muñoz, M. (1997). In: *Evolución tectónica y estructura del margen continental*, Cádiz: 57-58.