

Estimación del acortamiento en áreas afectadas por rotaciones y su contrastación con datos paleomagnéticos

Estimate of bulk shortening in rotated areas tested with paleomagnetic data

H. Millán Garrido (*), E.L. Pueyo Morer (*,**), A. Pocoví Juan (*)

(*) Dpto. Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza. c/ Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza.

(**) Lab de Paleomagnetismo, I.C. de la Tierra «Jaume Almera» C.S.I.C. c/Solé i Sabarís s/n 08028 Barcelona

ABSTRACT

An extension of Cooper's (1983) method allows the calculation of the bulk strain in rotated areas. If the maximum rotation of an area is known it is possible to determine the extreme values of bulk shortening for a specific cross section. This type of estimation has been tested in the Sierras Exteriores (Southern Pyrenees), using paleomagnetic data, and demonstrates that the calculation of bulk shortening in rotated areas may be done obtaining satisfactory results.

Key words: Balanced and restored cross section, rotation, paleomagnetism, Southern Pyrenees.

Geogaceta, 20 (4) (1996), 755-758

ISSN: 0213683X

Introducción

El objetivo de la realización de cortes geológicos compensados y restituidos es definir la geometría y el acortamiento que resultan de la evolución de cualquier dominio deformado, con todas las implicaciones que de ello se derivan. Los cortes habitualmente se trazan verticales y en dirección perpendicular al rumbo de las estructuras, que generalmente coincide con la dirección de transporte. No obstante, las técnicas de compensación y restitución (ya sea por medio de la conservación de áreas o de longitudes) sólo son válidas si toda la deformación existente está confinada en el plano en el que se realiza el corte; todos los resultados obtenidos de la aplicación de dichas técnica en zonas donde existan direcciones de transporte no contenidas en el plano de corte pueden inducir errores considerables (Elliott, 1976; Elliott y Johnson, 1980) que dependerán del valor de rotación.

Cuando se dispone de datos estructurales situados fuera del plano del corte, existen dos procedimientos de integrar los correctamente: 1) proyectarlos sobre el corte atendiendo a su rumbo e inmersión (Price, 1981), y 2) construir el corte según la localización de los datos disponibles (cortes oblicuos) y calcular trigonométricamente las variaciones debidas a la oblicuidad (Cooper, 1983).

Por otra parte, el paleomagnetismo es una herramienta apropiada para detectar y

| CORTE | Acortamiento | Rotación | Zona | Estac. | β | Rotac. |
|-------------|--------------------------------|----------|--|--------|---------|--------|
| S. Marzal | 10 - 13.7 Km. 0.32 - 0.47 | 27 - 23° | Sto. Domingo | AR02 | 9° | +20 |
| Río Gállego | 18.7 - 25 Km. 0.56 - 0.63 | | | GU03 | 10° | +30 |
| Arguls | 25.2 - 33.4 Km. 0.58 - 0.65 | 17 - 14° | La Peña | GA03 | 7° | +27 |
| S. de Guara | 32.7 - 44.2 Km. 0.56 - 0.63 | | | AR06 | 7° | -7 |
| | | 24 - 15° | Belsué-Arguls | VL01 | 8° | +42 |
| | | | | AR13 | 4° | +20 |
| | | 0° | Bloque Inferior (del cabalgamiento basal) | AR16 | 5° | +17 |
| | | | | AR12 | 9° | +21 |
| | | | | PAE1 | 5° | +19 |
| | | | | AR04 | 7° | -9 |
| | | | | AR01 | 11° | -1 |
| | | | | GU02 | 20° | +4 |
| | | | | GA02 | 8° | +4 |

Tabla 1: Relación de los valores de rotación obtenidos a partir de la diferencia de acortamiento de los cortes restituidos y los datos paleomagnéticos existentes en los sectores definidos.

Table 1: Rotation values obtained from the difference of shortening arising from the cross sections and the ones revealed by the paleomagnetic data.

evaluar rotaciones. Esto se debe a la posibilidad que ofrece de contrastar direcciones del campo magnético terrestre registrado en las rocas de la zona estudiada, con direcciones de referencia determinadas en zonas estables (no rotadas).

En las Sierras Exteriores aragonesas se encuentra un excelente laboratorio natural para el análisis del acortamiento en áreas rotadas. Su estructura está ligada a la evolución del frente de cabalgamiento surpirenaico durante el Luteciense-Mioceno inferior; la cobertera mesozoico-terciaria, despegada en las facies incompetentes del Triásico, se superpone medianamente el cabalgamiento basal, o

cabalgamientos imbricados del mismo, por encima de los depósitos oligo-miocenos de la Cuenca del Ebro. En el Sector Occidental de las Sierras Exteriores la estructura dominante es un gran anticlinal de despegue, de edad Chattien se-Mioceno inferior, que pliega el cabalgamiento basal (Millán *et al.*, 1995; Millán, 1996).

A lo largo de todo el conjunto de Sierras Exteriores se ha demostrado la existencia de un giro horario generalizado (Hogan, 1993; Pueyo *et al.*, 1994; Pueyo *et al.*, 1995) y de magnitud variable según la edad y la posición estructural de los materiales de cada estación. En relación con este giro, se ha detectado que el

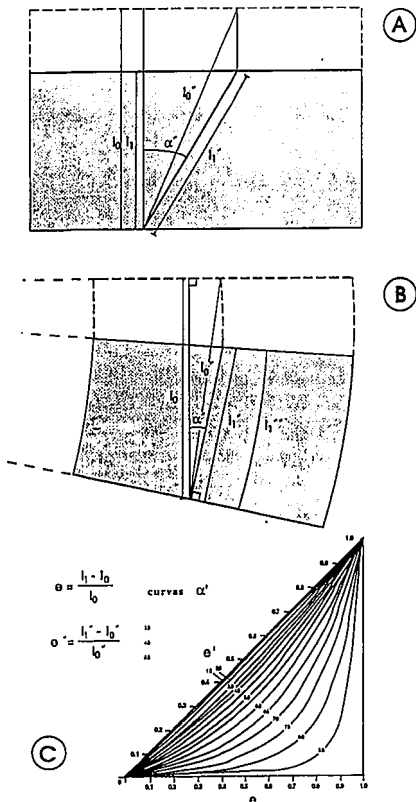


Fig. 1.- Relaciones trigonométricas para el cálculo del acortamiento en: A) cortes paralelos y oblicuos a la dirección de transporte (tomado de Cooper 1983); B) cortes situados en áreas rotadas. C) Abaco de Cooper (1983) que relaciona los valores de acortamiento en cortes realizados según la dirección de transporte (e) con valores correspondientes a direcciones oblicuas (e') en función del ángulo entre ellas (α').

Fig. 1.- Trigonometric relationships to calculate: A) bulk shortening in cross sections which are oblique or parallel to the transport direction (from Cooper, 1983), B) bulk shortening in cross sections located in rotated areas. C) Cooper's (1983) abacus. It allows the bulk strain calculated from an oblique section (e') to be related with the bulk strain of the corresponding normal section (e) if the angle between both profiles is known (α').

acortamiento de la serie alóctona se reduce hacia el W (Millán, 1996).

En este trabajo se pretende demostrar que los valores de acortamiento en estructuras afectadas por rotaciones, determinados por cortes geológicos y aplicando una extensión del método de Cooper (inicialmente diseñado para restituir cortes oblicuos a la dirección de transporte), son válidos. Para ello se contrastan los valores de giro implícitos en las diferencias de acortamiento obtenidos tras la restitución de una serie de cortes realizados en las Sierras Exteriores, con los valores de giro determinados por métodos paleomagnéticos en esa misma zona.

Extensión del método de Cooper a áreas rotadas

El método de Cooper (1983) permite calcular el acortamiento real a partir del acortamiento aparente obtenido en la restitución de cortes oblicuos a la dirección de transporte, o bien el acortamiento aparente que le corresponde a cualquier corte que forme un ángulo conocido con el corte paralelo la dirección de transporte, dado que (Fig. 1 A):

$$l_1 = l_1' \cos \alpha' \text{ y } l_0 = l_0' \cos \alpha'$$

$$\text{sen } \alpha = \text{tg } \alpha' [\cos \alpha' - l_1' / l_0']$$

Siendo (l_0): longitud inicial del corte,

(l_1): longitud final del corte (deformado)
 (l_0'): longitud inicial del corte oblicuo,
 (l_1'): longitud final del corte oblicuo
 (α): ángulo entre los cortes perpendicular y oblicuo a la dirección de transporte en el estado no deformado.

(α'): ángulo entre los cortes en el estado final (deformado)

Construido a partir de estas expresiones, el ábaco de la figura 1C relaciona los valores de acortamiento real (e) y aparente (e') en función del ángulo que forma el plano del corte oblicuo con el que contiene la dirección de transporte (α').

Extender el método de Cooper a cortes realizados en zonas que han sufrido

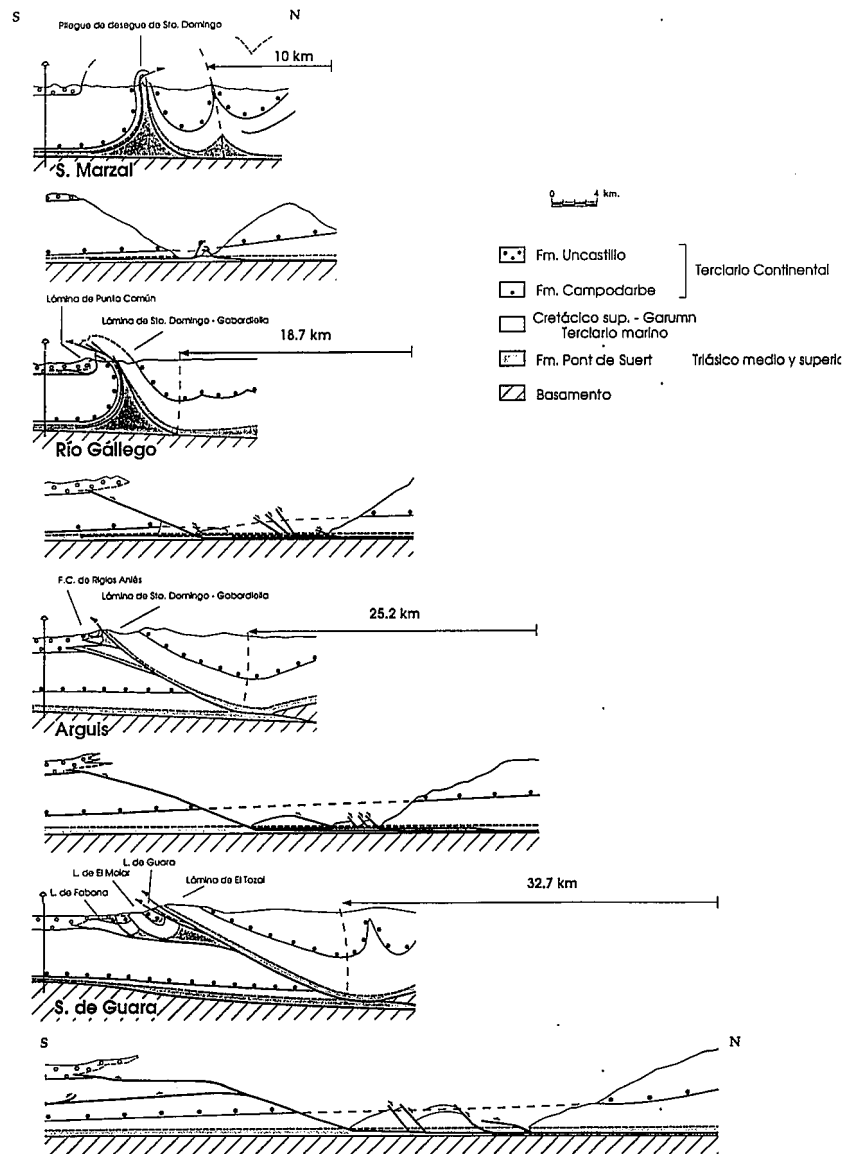


Fig. 2.- Cortes geológicos y cortes restituidos. Están distribuidos a lo largo de los tres sectores principales de las Sierras Exteriores (tomados de Millán, 1996); (ver situación en la Fig. 3).

Fig. 2.- Geological and restored cross sections of the Sierras Exteriores. They are distributed along the three main sectors of the Sierras Exteriores (from Millán, 1996); (See location in Fig. 3).

rotación (Fig. 1B) nos permite acotar el valor del acortamiento correcto de cada corte (e_c) entre dos valores extremos (e) y (e') ya que:

$$e > e_c > e'$$

Siendo (e): el acortamiento medido en cada corte supuesto coincidente con la dirección de transporte y (e'): el acortamiento corregido suponiendo que el corte forma un ángulo (α') que en los casos estudiados, como máximo, es el ángulo de rotación estimado para esta zona.

La extensión del método de Cooper a zonas afectadas por rotaciones implica asumir que la longitud del arco es igual a su cuerda (Fig. 1 C), o bien corregirlo si el ángulo de rotación (α') es conocido, ya que:

$$(l_1) = 360 \text{ sen } (\alpha'/2) (l_{1..}) / \pi \alpha'$$

Siendo, ($l_{1..}$): longitud del arco del corte, y (l_1): longitud de la cuerda del corte.

Acortamiento. Cálculo de valores de rotación y contrastación con datos paleomagnéticos: Discusión

En cuatro cortes simplificados (Figs. 2 y 3) (S. Marzal, Río Gállego, Arguis y Sierra de Guara; tomados de Millán, 1996) se ha estimado el acortamiento a partir de la realización de cortes restituidos. Se ha utilizado como datum el techo del Cretácico superior.

La orientación de estos cortes está comprendida entre N 012-025 E. Teniendo en cuenta que la dirección del paleovector eoceno es N 005 E, y que la cobertera alóctona pre-luteciense ha sufrido un giro horario de aproximadamente 35°, podemos considerar que la dirección de los cortes estudiados puede discrepar respecto a la de transporte un valor que, como máximo, será el valor del ángulo de giro registrado por la estructura.

El cálculo del acortamiento se ha realizado considerando dos situaciones extremas. En un caso, suponiendo que los cortes presentados guardan un ángulo de 35° con la dirección de transporte, y en el otro, suponiendo que son paralelos a la dirección de transporte. El acortamiento real estará comprendido entre ambos valores.

A partir de las diferencias en las magnitudes de acortamiento obtenidas (brutas y corregidas según el método de Cooper, 1983) (ver Fig. 3 y Tabla 1) se ha calculado la rotación que producirían en una línea inicial L_1 (Fig. 3) de traza curva que uniría las líneas libres (*loose lines*) de cada corte, traza que, por otra parte, es subparalela a la orientación de rampa de bloque inferior autóctona (Millán 1996).

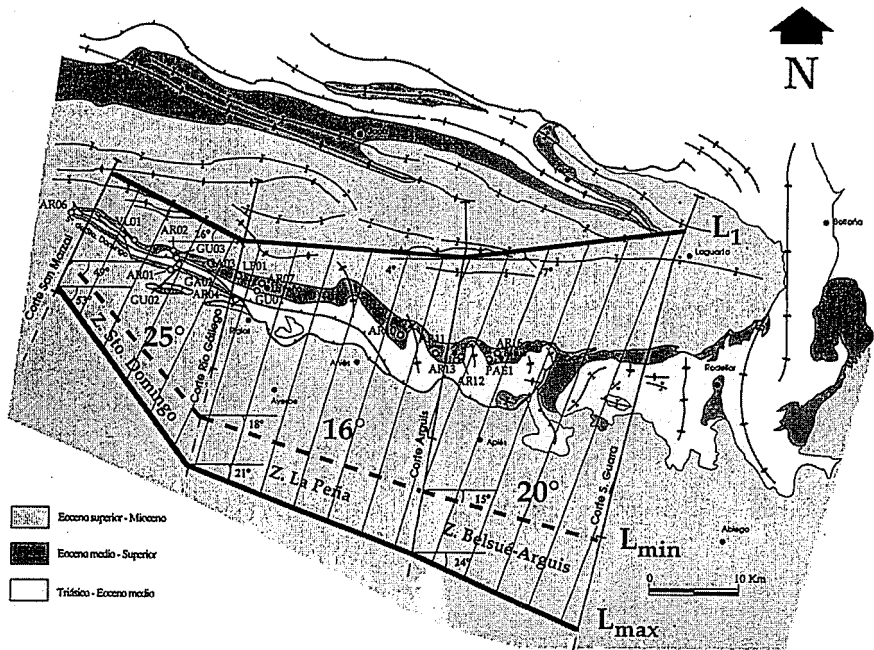


Fig. 3.- Esquema geológico en el que se muestra la situación de las estaciones paleomagnéticas y la de los cortes que aquí se presentan. La rotación definida para los tres sectores está determinada por las diferencias de acortamiento. L_1 : Línea de referencia inicial. L_{max} : Posición de la línea de referencia tras sufrir la traslación máxima (asumiendo que todo el acortamiento se resuelve por traslación, que los cortes son oblicuos y aplicando la corrección de Cooper). L_{min} : Posición de la línea de referencia tras sufrir la traslación mínima (estimada a partir de los cortes)

Fig. 3.- Location map for the paleomagnetic sites and for the cross sections in the study area. The rotations obtained for the three main sectors of the Sierras Exteriores have been determined from the difference of shortening. L_1 : Initial reference line; L_{min} : position of the reference line after experimenting minimum traslation (It has been obtained assuming that the whole shortening is due to traslation and that the cross sections are parallell to the transport direction); L_{max} : position of the reference line considering maximum traslation (It has been obtained considering that the strike of the cross sections differs 35° from the transport direction).

Dichos valores han permitido obtener datos de rotación en los tres porciones del conjunto estructural (Tabla 1), y que de W a E son: 1- Zona de Santo Domingo (limitada por los cortes de San Marzal y Río Gállego; 2) Zona de La Peña (limitada por los cortes de Río Gállego y Arguis); y 3) Zona de Belsué-Arguis (limitada por los cortes de Arguis y Sierra de Guara).

De los datos magnetotectónicos existentes en la zona estudiada (Pueyo *et al.*, 1994, Pueyo *et al.*, 1995) se han seleccionado dieciocho estaciones (Fig. 3 y Tabla 1) que o bien no están afectadas por rotaciones aparentes debidas a la geometría de la estructura, o bien éstas han sido corregidas. Cuatro de las dieciocho estaciones se localizan en el bloque inferior autóctono que aflora en el sector occidental de las Sierras Exteriores, registrando un giro no significativo, congruente con la interpretación de la estructura (ver Pueyo *et al.*, 1994). Todas las estaciones se acompañan de un ángulo de confianza β

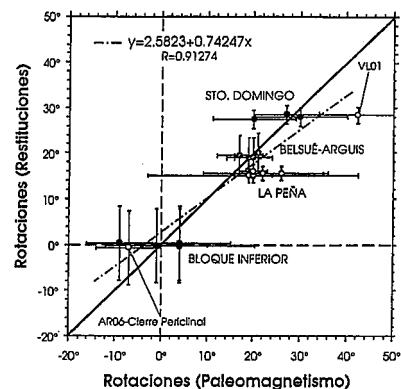


Fig. 4.- Correlación entre los valores de rotación obtenidos a partir de la diferencia de acortamiento de los cortes restituidos y los datos paleomagnéticos existentes.

Fig. 4.- Correlation between the rotation values obtained from the difference of shortening for each cross section and the values resulting from the paleomagnetic data.

que es igual o menor al $\alpha 95$ habitualmente utilizado en paleomagnetismo para ajustar las direcciones calculadas con el método de análisis de componentes principales (Kirschvink, 1980). $\beta < \alpha$ cuando la aplicación de otros métodos de análisis (por ej. círculos de desmagnetización, Bayley y Halls 1984, o la rutina de apilamiento; Scheepers y Zijdeveld, 1992) implica una buena correlación entre los distintos resultados y sus márgenes de confianza.

Se ha realizado un gráfico de contrastación entre los valores de giro obtenidos mediante la restitución y los obtenidos mediante el paleomagnetismo (Fig. 4). El error asociado a cada estación está representado en abcisas por el ángulo β ; en ordenadas está definido el error estándar de los valores de giro estimados a partir de las diferencias de acortamiento para cada zona. La regresión lineal da como resultado $y = 0.74 x + 2.58$ ($R = 0.91$) considerando los valores medios de las rotaciones estimadas en los cortes. Dicho resultado implica que la rotación predicha

por la diferencias de acortamiento es ligeramente menor que la constatada por el paleomagnetismo. Probablemente el valor máximo de giro deducido por las diferencias de acortamiento se aproxima mucho al valor real.

Los resultados obtenidos con el método propuesto son satisfactorios y demuestran que es posible acotar los valores de acortamiento en áreas rotadas, siempre que se conozca el valor de giro máximo experimentado por estas áreas.

Agradecimientos

Investigación financiada por el proyecto PB93-1218 DGICYT (MEC) y por una beca FPU (MEC) del segundo de los firmantes

Referencias

- Bailey, R.C. & Halls, H.C. (1984) *Journal of Geophysics*, 54: 174-182.
 Cooper, M.A. (1983) *Jour. Struc. Geol.*, 5 (2): 161-165.

- Elliott, D. (1976) *Phil. Trans. R. Soc. A* 283: 289-312.
 Elliott, D; Johnson, M.R.W. (1980) *Trans. R. Soc. Edimb.*, Earth Sci., 71: 69-96.
 Hogan, P.J. (1993) *Tesis Doctoral*, University of Southern California, 208 pp.
 Kirschvink, J.L. (1980) *J. R. Astron. Soc.*, 62: 699-718.
 Millán, H.; Pocoví, J.; Casas, A.M. (1995) *Rev. Soc. Geol. España*, 8 (1-2): 73-90.
 Millán, H (1996) *Tesis Doctoral*, Universidad de Zaragoza, 330 pp.
 Pueyo, E.L.; Parés, J.M.; Millán, H.; Pocoví, A (1994) *II Cong. del G.E.T.* (Jaca), Coms.: 185-188.
 Pueyo E.L.; Millán, H.; Pocoví, A; Parés, J.M. (1995) *XIII Cong. del G.E.S.* (Teruel), Coms.: 105-106.
 Price, R.A. (1981) *Spec. Pubs. Geol. Soc.* London, 9: 427-448.
 Scheepers, P.J.J. & Zijdeveld, J.D.A. (1992) *Geophys Res. Letters*, 19 (14): 1519-1522.
 Teixel, A.; García Sansegundo, J. (1996) *Rev. Soc. Geol. España*, 8 (3): 215-228.