

# Modelos analógicos de la formación de lacolitos

## Analogie models of laccolith formation

T. Román Berdiel (\*), D. Gapais (\*\*) y J.P. Brun (\*\*)

(\*) Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Zaragoza, 50009 Zaragoza.

(\*\*) Géosciences Rennes (UPR 4661, CNRS), Université de Rennes 1, 35042 Rennes Cédex, France.

### ABSTRACT

*Dynamically scaled analogue models of laccolithic intrusions have been made. Experiments consisted of the injection of a Newtonian fluid (low-viscosity silicone putty) into a sandpack, with or without an interbedded ductile layer of silicone putty acting as a potential décollement level. Boundary conditions were chosen to analyze the influence of the thickness of the brittle cover and of the décollement layer on the pattern of intrusion. Further experiments were made to examine the effects of an extensional regime during intrusion.*

**Key words:** intrusion, laccolith, analogue modelling, granite, Variscan belt.

Geogaceta, 20 (4) (1996), 901-904

ISSN: 0213683X

### Introducción

Los lacolitos son intrusiones magmáticas concordantes de geometría lenticular. Una característica geométrica de los lacolitos es la superficie basal plana y concordante. Esto sugiere que se han emplazado a lo largo de discontinuidades por encima de capas de la corteza relativamente resistentes a través de las que asciende el magma (Gilbert 1877). Los lacolitos naturales se encuentran generalmente emplazados a poca profundidad, unos pocos kilómetros (Barksdale 1937, Mudge 1968, Johnson & Pollard 1973), y por tanto sobradamente por encima de la transición corteza frágil-dúctil.

Se han realizado modelos experimentales de lacolitos desde el principio de siglo (Howe 1901, McCarthy 1925, Hurlburt & Griggs 1939, Pollard & Johnson 1973, Dixon & Simpson 1987, Merle & Vendeville 1992). Tanto los experimentos de Pollard & Johnson (1973) como los de Dixon & Simpson (1987) utilizan materiales con comportamiento elástico y plástico para representar los materiales de la cobertera (parafina y gelatina respectivamente) e imponen condiciones que obligan al material inyectado (grasa y silicona respectivamente) a extenderse por encima de los materiales del basamento. Por lo tanto, los materiales y las condiciones en los límites elegidas en sus experimentos imponen la formación de intrusiones con geometría de lacolito. En recientes estudios de intrusiones, Merle & Vendeville (1992) utilizan una cobertera de arena que permite su fracturación, pero el objetivo de este trabajo era el de estudiar las deformaciones producidas en la cobertera por la intru-

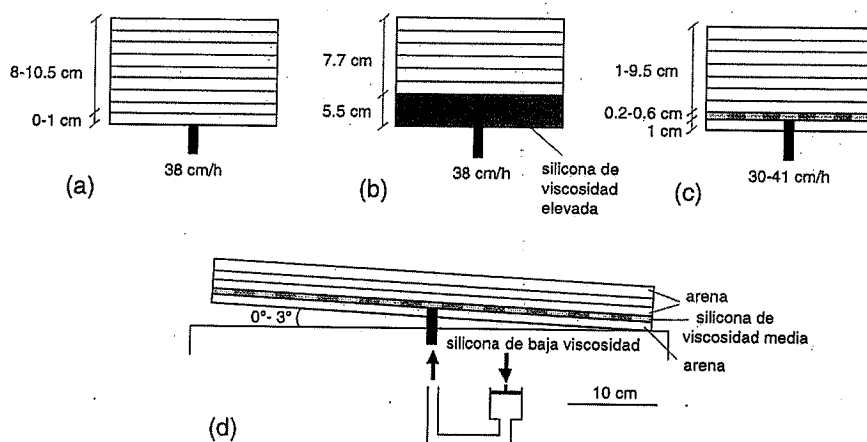


Fig. 1. Esquema del dispositivo experimental. (a) Experimentos monocapa, (b) experimentos bicapa, (c) y (d) experimentos tricapa con o sin deslizamiento gravitacional contemporáneo a la inyección.

*Fig. 1. Sketch of experimental settings. (a) Single-layer experiments, (b) two-layer experiments, (c) and (d) three-layer experiments with or without syn-injection gravitational sliding.*

sión, y no el de estudiar las condiciones de formación de los lacolitos.

El objetivo de este estudio es el de ayudar a entender cuales son las condiciones de formación y cuál es la geometría de los lacolitos emplazados en una corteza frágil. Argumentamos en particular que un parámetro crítico para que se forme un lacolito es la presencia de una capa de baja resistencia que actúa como un potencial nivel de despegue.

### Condiciones experimentales

#### Dispositivo experimental y materiales

El dispositivo experimental consiste en

una placa basal de madera pulida que comporta un tubo de 10 mm de diámetro en su parte central. El fluido es empujado dentro del tubo por un pistón conducido a velocidad constante por un motor (Fig. 1). Los modelos, cuadrados de 50 cm de lado y altura variable de 2.6 a 13.2 cm, se construyen sobre la placa basal centrados sobre el punto de inyección.

Para la corteza frágil se ha utilizado arena seca de Fontainebleau, que está constituida en un 90% por cuarzo con un tamaño de grano máximo de 500  $\mu\text{m}$ . Su peso específico medio es 1500  $\text{Kg m}^{-3}$ . La arena seca de Fontainebleau tiene un ángulo de fricción interno cercano a 30° y una cohesión despreciable.

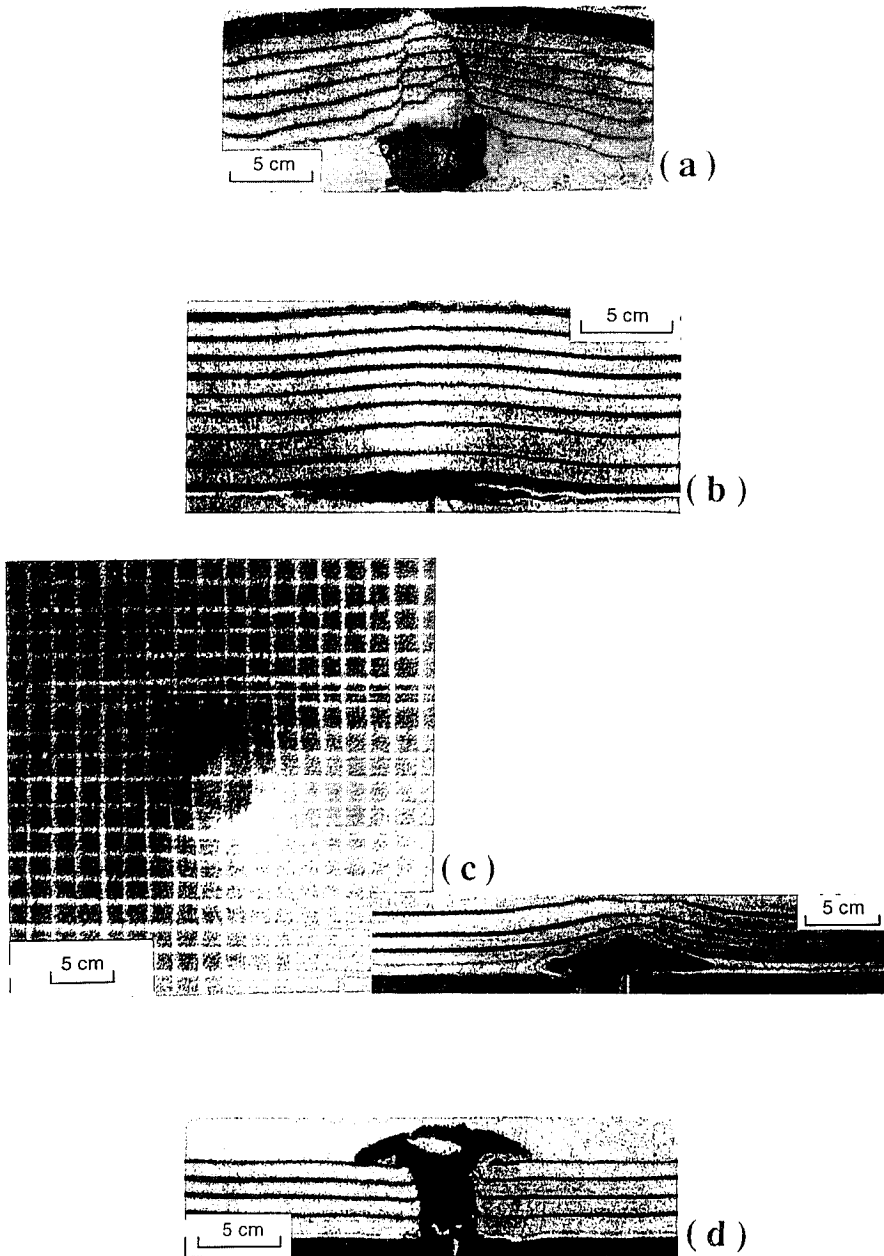


Fig. 2. Estadios finales de cuatro experimentos estáticos. (a) Corte central del modelo monocapa de arena. (b) Corte central del modelo tricapa I-1. (c) Vista de superficie y corte central del modelo tricapa II-3. (d) Corte central del modelo tricapa I-5.

Fig. 2. Final stages of representative static experiments. (a) Central cross-section within single sand layer model. (b) Central cross-section within three layer model I-1. (c) Surface view and central cross-section of three layer model II-3. (d) Central cross-section within three layer model I-5.

Para representar los materiales dúctiles se ha utilizado silicona (goma GS1R de Rhône-Poulenc), que es casi perfectamente newtoniana. Se han utilizado tres tipos diferentes de silicona. Silicona standard, de viscosidad media ( $\mu = 7.5 \times 10^3 \text{ Pa s}$ ,  $\rho = 1270 \text{ Kg m}^{-3}$ ), utilizada para introducir capas dúctiles en el interior de los paquetes de arena. Silicona de baja viscosidad ( $\mu = 2.5 \times 10^3 \text{ Pa s}$ ,  $\rho = 1330 \text{ Kg m}^{-3}$ ), utilizada para representar la intrusión. Para la corteza dúctil se ha utilizado una silicona de viscosidad elevada ( $\mu = 1.5 \times 10^4 \text{ Pa s}$ ,  $\rho = 1400 \text{ Kg m}^{-3}$ ).

Tipos de modelos

Se han construido tres tipos de experimentos (Fig. 1).

(1) Modelos constituidos únicamente de arena. Estos modelos se han realizado para observar la geometría de la intrusión en una corteza frágil homogénea. En estos experimentos la inyección se realiza en la base del paquete de arena (Fig. 1a).

(2) Modelos bicapa constituidos por una capa basal de silicona de viscosidad elevada y, situada encima, una capa de arena. En estos modelos, la silicona de viscosidad baja se in-

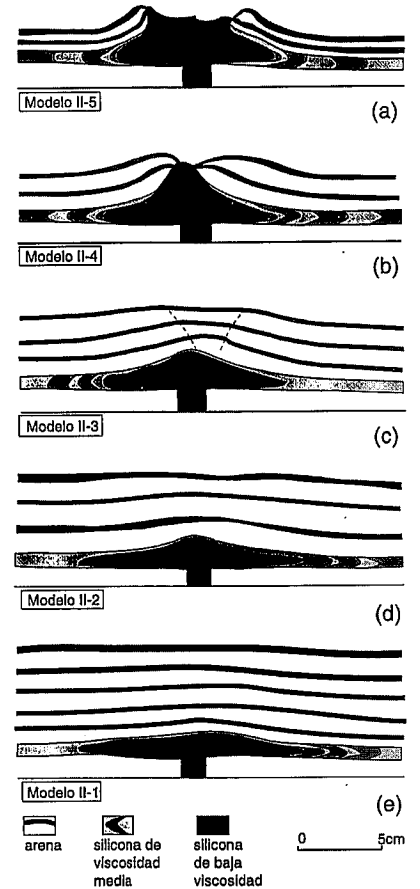


Fig. 3. Cortes centrales de los estadios finales de cinco experimentos tricapa diferentes con el mismo espesor del nivel de despegue (6mm) y con espesor creciente (1 - 5.6 cm) de la cobertera de arena.

Fig. 3. Central cross-sections of final stages of five different three layer experiments with same thickness of décollement layer (6 mm) and increasing thicknesses (1 - 5.6 cm) of sand overburden.

yecta en el límite silicona-arena con el objeto de examinar la cinemática de la intrusión en la transición corteza frágil-dúctil (Fig. 1b).

(3) Modelos tricapa constituidos por un paquete de arena que contiene en su interior una capa de silicona de viscosidad media. El propósito de estos experimentos es estudiar el efecto que produce una capa de baja resistencia que actúa como un nivel de despegue potencial dentro de la cobertera, por encima de la transición frágil-dúctil. La intrusión se inyecta en la base de la capa de baja resistencia (Fig. 1c). Se han realizado dos series de experimentos tricapa estáticos, con capas de baja resistencia de 2 y 6 mm, respectivamente. En cada serie, se han realizado varios experimentos con diferente espesor de arena. En una tercera serie de experimentos, los modelos se han inclinado  $3^\circ$  con el propósito de examinar los

efectos de una deformación sincronica a la inyección y producida por deslizamiento gravitacional (Fig. 1d).

**Dimensionamiento**

Los modelos han sido dimensionados dinámicamente siguiendo los principios de Hubbert (1937) y Ramberg (1981). Se ha elegido una relación de longitudes de  $10^5$ , es decir que 1 cm en los modelos es equivalente a 1 Km en la naturaleza. El campo gravitatorio y las densidades y viscosidades se imponen por las condiciones experimentales y por los materiales utilizados. Las dimensiones restantes (duración de los experimentos, esfuerzos y velocidad de deformación) vienen impuestas por el dimensionamiento.

La velocidad de ascensión del magma utilizada en el laboratorio es del orden de  $0.8 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$  ( $31 \text{ cm h}^{-1}$ ) y corresponde a  $10^{-8} \text{ m s}^{-1}$  ( $27 \text{ cm año}^{-1}$ ) en la naturaleza. La duración del proceso de intrusión es de  $1.4 \times 10^4 \text{ s}$  (4 h) en el laboratorio y corresponde a  $10^{13} \text{ s}$  ( $0.5 \times 10^6 \text{ años}$ ) en la naturaleza. En todos los experimentos, el volumen de silicona inyectada ha sido de  $98.175 \text{ cm}^3$  que corresponde con  $98 \text{ km}^3$  en la naturaleza.

**Resultados experimentales**

En los experimentos monocapa y bicapa nunca se han obtenido lacolitos. En los experimentos monocapa las intrusiones presentan geometría de diapiros más o menos cilíndricos (Fig. 2a). En los experimentos bicapa se han obtenido intrusiones en forma de champiñón dentro de la capa basal de silicona.

Los experimentos tricapa dan lugar a la formación de lacolitos o de intrusiones que perforan la capa de arena y llegan a emerger en la superficie (Fig. 2b-d y 3), dependiendo de una serie de parámetros críticos que discutimos en las siguientes secciones.

**Espesor de la cobertera de arena**

Para un espesor dado de la capa de baja resistencia ( $2 \text{ ó } 6 \text{ mm}$ ), los cambios en el espesor de la cobertera vienen marcados por las siguientes características.

Existe un espesor crítico del espesor de la cobertera por encima del cual los lacolitos se extienden lateralmente y deforman la cobertera levantándola, y por debajo del cual las intrusiones se introducen en la cobertera perforándola (Fig. 2b-d y 3). Este efecto refleja un balance entre las fuerzas verticales producidas por la intrusión y la resistencia del paquete de arena que constituye la cobertera.

Se ha observado que el diámetro máximo (D) de los lacolitos es proporcional al espesor ( $T_0$ ) de la cobertera ( $D = 7.75 + 1.22T_0$ ) (Fig. 4a), mientras que el espesor máximo (T) de los lacolitos es inversamente proporcional ( $T = 3.37 - 0.38T_0$ ) (Fig. 4b).

Las intrusiones son simétricas y cambian de forma lenticular a forma acampanada al

disminuir el espesor de la cobertera (Fig. 3).

**Espesor del nivel de despegue**

Con una capa de baja resistencia fina (2mm), el límite mínimo del espesor de cobertera para que se desarrollen lacolitos está en torno a 6 cm. Este valor baja hasta 2 cm para espesores de la capa de baja resistencia más elevados (6mm). (Fig. 2b-d y 3). Así, cuanto más profunda se produce la inyección, menor es el espesor mínimo de la capa de baja resistencia necesario para formar un lacolito. De esto se deduce que la resistencia de la base de la cobertera de arena es proporcional al espesor de la misma. Para el abanico de condiciones experimentales investigadas en nuestros modelos, El límite entre intrusiones perforantes (diapiros) y lacolitos conformes, se aproxima fuertemente a una línea recta que relaciona el espesor de la capa de baja resistencia con el de la cobertera (Fig. 5).

**Intrusión en régimen de deslizamiento gravitacional**

En esta situación, la capa de baja resistencia actúa como un despegue activo. En la cobertera frágil se desarrollan estructuras extensionales (Fig. 6): (1) un graben central, localizado encima del canal de alimentación, y (2) dos series de graben en échelon perpendiculares a la dirección de deslizamiento, y distribuidos a lo largo de dos zonas divergentes. Esta geometría refleja el movimiento diferencial de un bloque triangular de la cobertera entre dos zonas de cizalla frágiles-dúctiles.

La forma de la intrusión depende de la pendiente de la placa basal, y de las estructuras extensionales producidas en la cobertera. Las intrusiones muestran siempre techos bastante planos (Fig. 6b), en oposición a los experimentos estáticos (Fig. 2 y 3). Además, una característica geométrica de primer orden observada sistemáticamente en todos nuestros experimentos extensionales es la fuerte asimetría de la intrusión. Esta asimetría está siempre marcada por (Fig. 6b): (1) un desplazamiento importante de la intrusión con respecto al conducto de alimentación, como resultado del deslizamiento del paquete de arena, (2) el límite frontal de la intrusión buza más que el límite posterior, (3) una expansión fuertemente asimétrica de la intrusión a lo largo del despegue. Esta expansión asimétrica se expresa por el desarrollo de una lengua basal cizallada en la parte posterior de la intrusión, uniendo ésta con el canal de alimentación.

**Comparación con ejemplos de la naturaleza**

Ejemplos de estrecha relación entre el emplazamiento de lacolitos y discontinuidades de la corteza han sido encontrados en la Cadena Hercínica. Así, muchos granitos peraluminosos sintectónicos del sur de Bretaña son intrusiones tabulares (Vigneresse 1983)

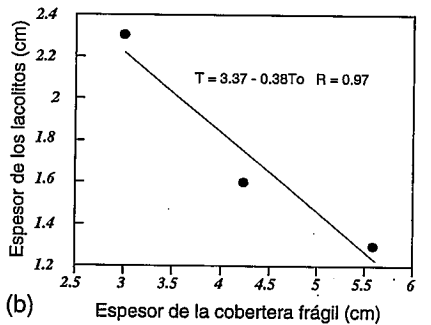
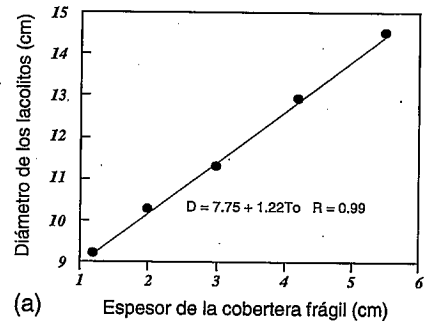


Fig. 4. Diámetro (a) y espesor (b) de los lacolitos con respecto al espesor de la cobertera de arena para la Serie-II (representada en la Fig.3). El espesor de las intrusiones ha sido representado sólo para aquellas no perforantes (modelos II-1, 2, 3, Fig. 3).

Fig. 4. Diameter (a) and thickness (b) of lacolith versus thickness of sand overburden for Series-II experiments (shown on Fig. 3). Intrusion thicknesses are reported for non-piercing intrusions only (models II-1, 2, 3, Fig. 3).

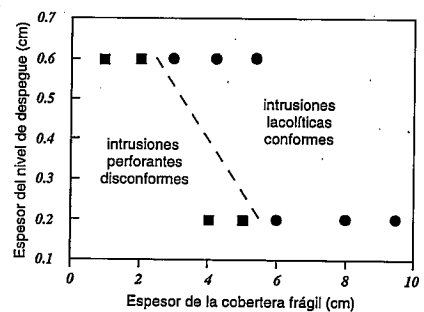


Fig. 5. Campos de lacolitos conformes e intrusiones perforantes de acuerdo al espesor de la capa de baja resistencia y al de la cobertera (series I & II).

Fig. 5. Fields of conformable lacoliths and of piercing intrusions according to thicknesses of soft layer and sand overburden (experiment series I & II).

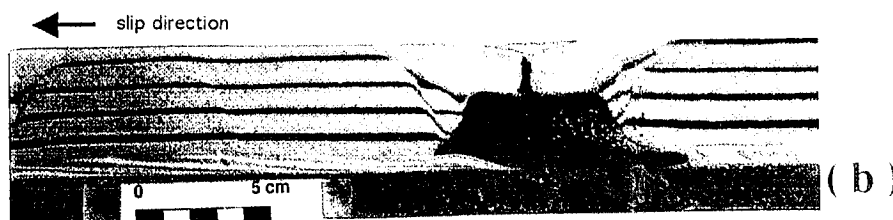
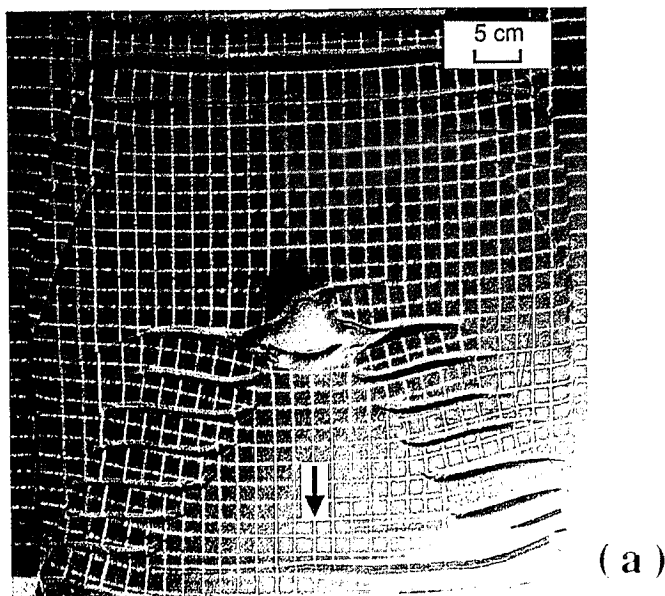


Fig. 6. Estadios finales de experimentos tricapa con deslizamiento gravitacional sincrónico a la inyección. (a) Vista de la superficie del modelo III-4; la flecha indica el sentido de deslizamiento. (b) Corte central del modelo III-1.

Fig. 6. Final stages of three-layer experiments with syn-injection gravitational sliding. (a) Surface-view of model III-4; arrow points towards the slip direction. (b) Central cross-section within model III-1.

localizadas a lo largo de zonas de cizalla extensionales de escala cortical (Gapais *et al.*, 1993). También se está revelando actualmente que muchos granitos de Galicia son intrusiones tabulares (Aranguren & Tubía 1992), o están siendo interpretadas como tales (Román-Berdiel *et al.*, 1995), localizadas en litologías particulares (esquistos del Precámbrico y facies «ollo de sapo»), que actuarían como nivel de despegue potencial o capa de baja resistencia.

**Conclusiones**

(1) La formación de un lacolito requiere la existencia de una capa de baja resistencia o de un nivel de despegue potencial entre dos unidades competentes.

(2) El espesor crítico de la capa de baja resistencia necesaria para la formación de lacolitos disminuye con el aumento de la profundidad (espesor de la cobertera). Estos resultados sugieren que los lacolitos pueden aportar información sobre la estructura de la corteza que queda por debajo de su nivel de emplazamiento, tal como la no existencia de una capa de baja resistencia de espesor suficiente para permitir la expansión del magma.

(3) Los lacolitos obtenidos bajo coberteras de importante espesor muestran forma lenticular. Con la disminución del espesor de la cobertera, se desarrollan intrusiones en forma de campana y aumenta la deformación de la cobertera. La campana tiende a centrarse encima del canal de alimentación en los experi-

mentos estáticos.

(4) El diámetro de los lacolitos experimentales es proporcional al espesor de la cobertera.

(5) Un régimen de deslizamiento gravitacional contemporáneo a la inyección produce lacolitos asimétricos con un frente fuertemente pendiente y una lengua basal cizallada en la parte trasera. La asimetría de los lacolitos puede ser diagnóstico de la cinemática contemporánea al emplazamiento.

**Agradecimientos**

Agradecemos a J. J. Kermarrec por la construcción y el mantenimiento de los aparatos. Este trabajo fue financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (beca de T. R. B.).

**Referencias**

Aranguren, A. & Tubía J. M. 1992. *J. Struct. Geol.* 14, 1229-1237.  
 Barksdale, J. D. 1937. *Am. J. Sci.* 33, 321-359.  
 Dixon, J. M. & Simpson, D. G. 1987. *J. Struct. Geol.* 9, 87-103.  
 Gapais, D., Lagarde, J. L., Le Corre, C., Audren, C., Jegouzo, P., Casas Sainz, A. & Van Den Driessche, J. 1993. *C. R. Acad. Sci. Paris* 316, série II, 1123-1129.  
 Gilbert, G. K. 1877. *U.S. geogr. geol. Surv. Rocky Mountains Region*, 1-170.  
 Howe, E. 1901. *U.S. geol. Surv. 21st A. Rep.*, 291-303.  
 Hubbert, M. K. 1937. *Bull. geol. Soc. Am.* 48, 1459.  
 Hurlbut, C. S. & Griggs, D. T. 1939. *Bull. geol. Soc. Am.* 50, 1043-1112.  
 Johnson, A. M. & Pollard, D. D. 1973. *Tectonophysics* 18, 261-309.  
 Merle, O. & Vendeville, B. 1992. *C. R. Acad. Sci. Paris* 315, Série II, 1541-1547.  
 McCarthy, G. R. 1925. *J. Geol.* 33, 1-18.  
 Mudge, M. R. 1968. *Bull. geol. Soc. Am.* 79, 315-332.  
 Pollard, D. D. & Johnson, A. M. 1973. *Tectonophysics* 18, 311-354.  
 Ramberg, H. 1981. *Academie-Press*, London.  
 Román-Berdiel, T., Pueyo-Morer, E. L. & Casas-Sainz, A. M. 1995. *J. Struct. Geol.* 17, 1689-1706.  
 Vignerresse, J. L. 1983. *Bull. Soc. géol. minér. Bretagne* 15, 1-15.