

# Movimientos absolutos en fallas

Por M. DOBLAS (\*) y J. RUBIO (\*\*)

## RESUMEN

En este trabajo se pretende demostrar la importancia que tienen, tanto el estudio, como la representación gráfica de los movimientos absolutos en fallas, cuestiones hasta ahora prácticamente ignoradas en la literatura.

Para aclarar los conceptos de absoluto y relativo se efectúa un estudio teórico aplicando la noción de sistemas equivalentes, y el análisis vectorial del desplazamiento.

La representación gráfica propuesta aquí para los movimientos absolutos, clasifica las fallas en veintiocho tipos, y tiene una finalidad eminentemente práctica, destinada a completar y dar verdadero sentido genético a las fallas, tanto en mapas como en cortes geológicos.

Se proponen también algunos criterios para el reconocimiento de estos movimientos absolutos, recalándose el interés de futuros estudios en este sentido.

## ABSTRACT

In this paper we intend to show the importance of both, the study, and the graphical representation of absolute motions in faults, a topic unknown in the literature.

In order to clarify the notions of absolute and relative, we develop a theoretical study based on the concept of equivalent systems, and on the vectorial analysis of the displacements.

We propose a graphical representation for absolute motions which classifies faults in twenty eight types, with a practical meaning, aimed to complete and give genetical sense to the faults in geological maps and cross-sections.

We also propose some criteria for the recognition of these absolute motions, outlining the interest of future studies in this sense.

## INTRODUCCION

A la hora de estudiar el movimiento de una falla, se suele considerar el desplazamiento relativo de los dos labios de la misma, y sin embargo el movimiento absoluto no se tiene en cuenta normalmente (salvo en raras ocasiones, HAMBLIN, 1984).

Paradójicamente, se llevan utilizando desde hace bastante tiempo en geología estructural, conceptos relacionados con movimientos absolutos, tales como los de alóctono/autóctono, sobrecorrimien-

to/infracorrimiento, desprendimiento gravitacional, etc.

Según algunos autores, estos movimientos son imposibles de determinar (RAMSAY & HUBER, 1983): «La determinación de los vectores absolutos del desplazamiento, depende del conocimiento de la posición inicial y final de un punto en relación con un sistema de coordenadas fijo, con un origen inamovible. No tenemos tales puntos fijos, o anclas, a partir de los cuales podemos deducir desplazamientos geológicos, y por ello no podemos medir desplazamientos absolutos.»

Sin embargo, si que es posible estudiar movimientos absolutos en un sentido más restringido: no se trata de deducir los desplazamientos absolutos de un punto en el contexto de la Tierra desde sus primeros tiempos hasta hoy en día, que

(\*) Departamento de Geodinámica, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense, Ciudad Universitaria, 28040 Madrid.

(\*\*) Instituto «Arquitecto Pedro Gumiel», Avenida Reyes Magos, s/n., Alcalá de Henares.

sería a lo que se refieren RAMSAY & HUBER (1983), sino de estudiar el carácter más o menos activo o pasivo de los labios de una falla, a la escala de un mapa geológico, de un afloramiento, o de una muestra experimental de laboratorio, escogiendo para ello un punto de referencia dentro de un entorno o bloque que nosotros podemos considerar fijo, y esto con una finalidad eminentemente práctica destinada a resolver problemas geológicos.

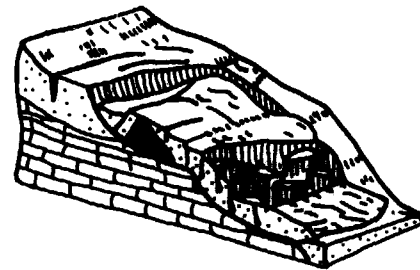
En primer lugar, es obvio que estos desplazamientos existen y pueden reconocerse (HAMBLIN, 1984). De hecho, los desplazamientos absolutos se suelen emplear rutinariamente en los experimentos de laboratorio sobre movimientos en fallas, donde se mueve uno de los bloques, mientras el otro permanece fijo. Uno de los ejemplos más evidentes de movimiento absoluto, es el del clásico corrimiento de tierras de origen gravitacional, como el que se representa en la figura 1a (TER-STEPANIAN, 1962).

En segundo lugar, del estudio e identificación de los movimientos absolutos en una falla podemos llegar a reconstruir la historia completa o real de la deformación sufrida por la misma. En la figura 1b (i), se representa el desplazamiento relativo dextral de una falla, a partir del cual sólo obtenemos información sobre los estados inicial y final de la deformación. Sin embargo, y como se

INTERES DEL ESTUDIO DE ESTOS MOVIMIENTOS

Existen varias razones que justifican sobradamente el estudio e intento de representación de estos movimientos.

A)



B)

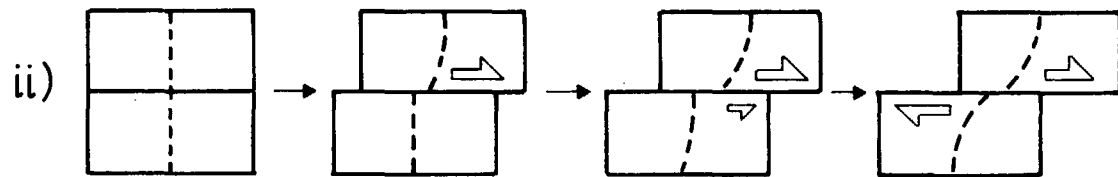


Figura 1.—Dos aspectos de la importancia de los movimientos absolutos: A) Un clásico ejemplo de desprendimiento de tierras de origen gravitacional (TER-STEPANIAN, 1962). B) Movimiento relativo dextral (i), que nos indica únicamente los estados inicial y final de la deformación;

y movimientos absolutos (ii), que podrían eventualmente diferenciarse en el anterior, con los cuales obtenemos información sobre los estados inicial, intermedio y final de la deformación.

aprecia en la figura 1b (ii), este movimiento relativo dextral puede ser el resultado de una serie de episodios contrastados de movimientos absolutos (todos ellos dextrales).

En tercer lugar, intuitivamente, parece evidente que el movimiento teórico representado por las flechas empleadas en la simbología de desplazamientos relativos, es el más difícil de obtener en la práctica; es decir, que ambos labios de una falla se muevan en direcciones opuestas con, exactamente, la misma cuantía de movimiento. Y esto es así, porque la naturaleza es esencialmente heterogénea, tanto en cuanto al tipo y repartición de los materiales rocosos, como a la distribución y transmisión de las fuerzas que les afectan.

Además, estos movimientos confieren verdadero significado genético a las fallas: así, por ejemplo, podremos diferenciar entre una falla normal debida a un levantamiento generalizado de un área, y una falla normal debida a un hundimiento generalizado, cuestión de obvio interés para el establecimiento de la geotectónica regional asociada a esa deformación.

Finalmente, del estudio de los movimientos absolutos de una falla, y de la deformación interna diferencial del entorno de la misma, podemos obtener valiosas pistas para la localización de posibles yacimientos (distintas de las normalmente consideradas en los movimientos relativos).

MOVIMIENTOS ABSOLUTOS Y RELATIVOS. EL CONCEPTO DE SISTEMAS EQUIVALENTES

A la hora de identificar movimientos absolutos, lo más importante es fijar un marco de referencia válido, que nos permita definir el carácter activo o pasivo de los labios de una falla. Si adoptáramos el concepto de RAMSAY & HUBER (1983), deberíamos estudiar para cada punto su evolución completa desde el principio hasta el fin, teniendo en cuenta todos los movimientos que le afectaron, los locales, los regionales, los de la Tierra, etc., y esto es obviamente imposible.

Sin embargo, a nosotros nos interesa buscar marcos de referencia que nos permitan utilizar los movimientos absolutos desde un punto de vista práctico. Para ello, debemos definir primero lo que entendemos por movimientos absolutos y relativos, y como veremos, se pueden distinguir dos tipos de cada uno de ellos.

Para estudiar estos movimientos, podemos aplicar algunas nociones vectoriales del movimiento (o velocidad) de un punto.

Sean dos puntos homólogos (A) y (B), situados cada uno en un labio diferente de una falla, y en las zonas afectadas por la deformación interna en relación con el movimiento de la misma (fig. 2a). El hecho de que estos puntos sean homólogos, significa que antes del juego de la falla estaban juntos (A' y B' en la figura). Nótese que AA' y BB' no tienen por qué ser iguales, y en ello está la esencia del reconocimiento de movimientos absolutos. El movimiento de la falla puede considerarse de dos maneras distintas.

En primer lugar, utilizando el movimiento relativo que se emplea clásicamente en mapas y cortes geológicos. En este caso, se consideran dos vectores velocidad: la velocidad relativa de (A) con respecto a (B),  $\vec{V}_B^A$ , y la velocidad relativa de (B) con respecto a (A),  $\vec{V}_A^B$ . Estos dos vectores son de igual magnitud y de sentido contrario, ya que por definición, según la teoría de vectores,

$\vec{V}_B^A = -\vec{V}_A^B$ , y esto nos explica el por qué se usan dos flechas iguales y opuestas en la clásica simbología relativa. Este es el primer tipo de movimiento relativo que existe, denominado «movimiento relativo con referencias recíprocas», ya que en él cambiamos dos veces de punto de referencia, primero (A) y luego (B).

En segundo lugar, conviene tomar otros dos puntos de referencia distintos de los anteriores (fig. 2a): un punto real (O), no afectado por la deformación interna condicionada por la falla, situado en un bloque que incluye a la misma y a las zonas que deforma, y que presenta en conjunto el mismo desplazamiento de arrastre; y un punto teórico (O<sub>1</sub>), coincidente con la posición que tenía (O) antes de moverse el bloque, y desde el cual estudiamos el arrastre del mismo. Obtenemos, en primer lugar, un par de ecuaciones al efectuar el cambio de referencia de las ecuaciones relativas recíprocas, al punto (O<sub>1</sub>), una aplicada a (A) (velocidad absoluta de A con respecto a O<sub>1</sub>,  $\vec{V}_{O_1}^A$ ), y otra aplicada a (B) (velocidad absoluta de B con respecto a O<sub>1</sub>,  $\vec{V}_{O_1}^B$ ):

$$\vec{V}_{O_1}^A = \vec{V}_A + \vec{V}_{O_1}^A \quad \vec{V}_{O_1}^B = \vec{V}_B + \vec{V}_{O_1}^B$$

Los términos  $\vec{V}_A$  y  $\vec{V}_B$  repre-

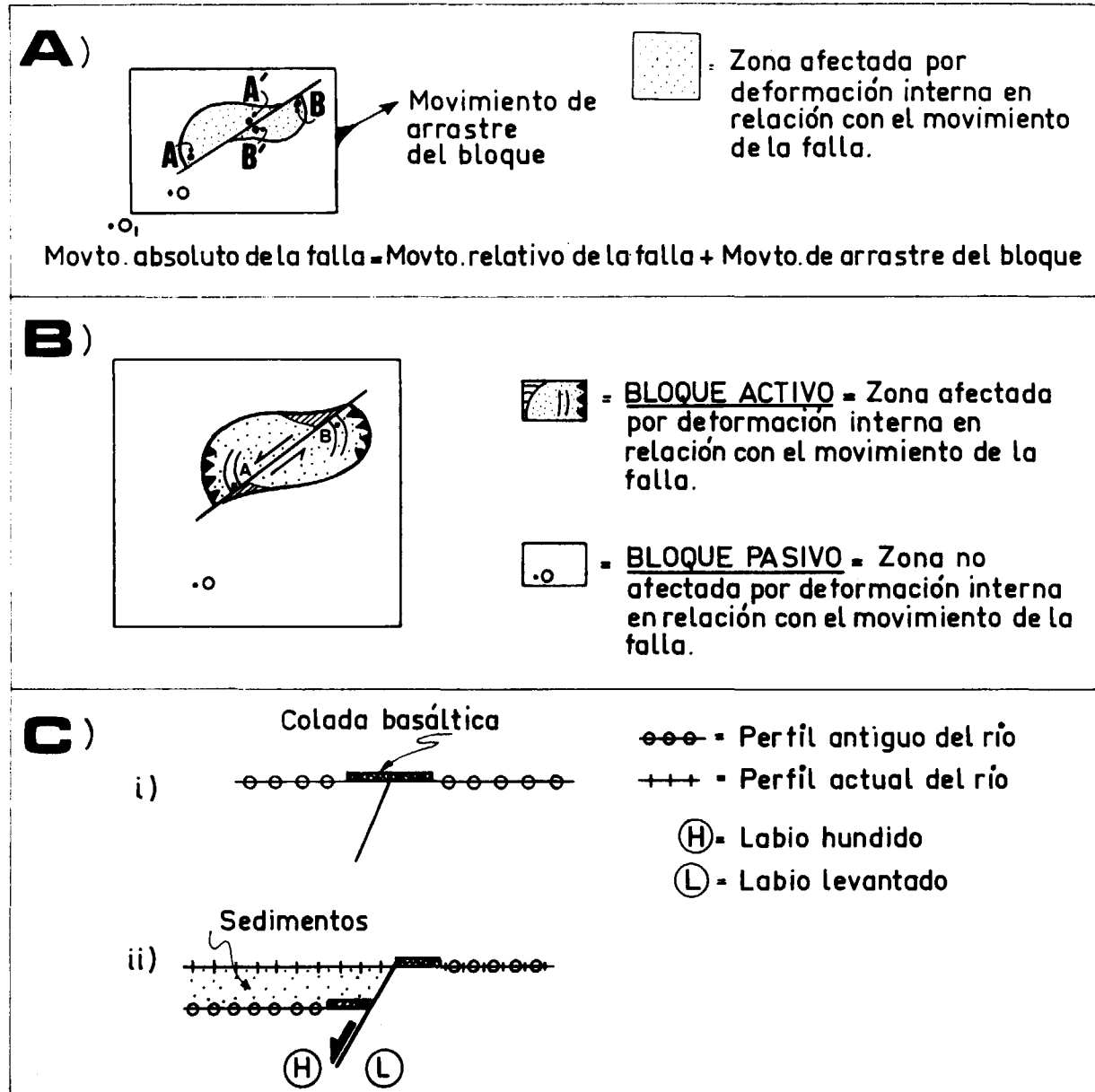


Figura 2.—Los conceptos de absoluto y relativo, y de marco de referencia para los movimientos absolutos: A) Definición del movimiento absoluto como la composición de otros dos movimientos. B) Los conceptos de bloque activo y bloque pasivo. C) Marcadores de referencia propuestos por HAMBLIN (1984) para movimientos absolutos en fallas normales (i, estado indeformado; ii, estado deformado, en el cual sólo se mueve el labio hundido).

sentan el segundo tipo de movimiento relativo a que nos referíamos antes, denominado «movimiento relativo con referencia única», ya que A' y B' son coincidentes. Los términos  $\vec{V}_{O_1}^{A'}$  y  $\vec{V}_{O_1}^{B'}$  son iguales, y representan la velocidad de arrastre del bloque que incluye a (A), (B), (A'), (B') y (O), con

respecto a (O<sub>1</sub>). Se observa que el movimiento absoluto de un punto es igual a la suma de los movimientos relativo y de arrastre. Cuando la velocidad de arrastre es nula, o la consideramos como tal, el movimiento absoluto coincide con el «relativo con referencia única»: así, un movimiento se

puede considerar absoluto, respecto de un origen (O<sub>1</sub>) ligado a un sólido, se mueva o no éste a su vez respecto de otros sólidos, sin más que restar la componente de arrastre a los demás miembros. En segundo lugar, podemos considerar el arrastre nulo, y referimos entonces el movimiento de (A) y (B) al punto fijo (O) incluido en nuestro bloque. Obtenemos así el movimiento absoluto de (A)

con respecto a (O), ( $\vec{V}_O^A$ ), y el movimiento absoluto de (B) con respecto a (O), ( $\vec{V}_O^B$ ). Obtenemos dos ecuaciones de las cuales sólo una es independiente ya que  $\vec{V}_B^A = -\vec{V}_A^B$ :  $\vec{V}_O^A = \vec{V}_B^A + \vec{V}_O^B$ , y  $\vec{V}_O^B = \vec{V}_A^B + \vec{V}_O^A$ . Lo interesante y novedoso en este caso

es que  $\vec{V}_O^A$  y  $\vec{V}_O^B$  no tienen por qué ser iguales, y esto es lo que nos permite definir los movimientos absolutos de ambos labios de una falla. Por lo tanto, de ahora en adelante, para estudiar los movimientos absolutos de una falla, consideraremos los desplazamientos de ambos labios (que contienen respectivamente a A y a B), con respecto a un punto de referencia (O), fijo, y no deformado por la falla. Estas condiciones son válidas, siempre que la falla sea finita y que su entorno se deforme internamente (como ocurre en la mayoría de los casos).

Los movimientos absolutos que acabamos de definir, son «movimientos absolutos sensu-lato», ya que para nuestros puntos de referencia (O) u (O<sub>1</sub>), siempre podemos encontrar otro punto de referencia (O<sub>2</sub>) más alejado y con movimiento diferente, de tal modo que el movimiento absoluto respecto de (O) u (O<sub>1</sub>) es relativo respecto de (O<sub>2</sub>). La cadena de movimientos de unos respecto de otros puede repetirse un número finito de veces hasta llegar al verdadero «movimiento absoluto sensu-stricto» al que se refieren RAMSAY & HUBER (1983): aquél tomado desde un punto de referencia final, fijo, y solidario con la rotación de la Tierra (como por ejemplo un punto caliente). Sin embargo, a nosotros nos interesan los «movimientos absolutos sensu-lato», porque son los que podemos definir y utilizar a la escala del afloramiento o del mapa geológico.

En resumen, existen dos tipos de movimientos relativos («movimientos relativos con referencias recíprocas», que son los que se representan en mapas y cortes geológicos, y «movimientos rela-

tivos con referencia única»), y dos tipos de movimientos absolutos («sensu lato» y «sensu stricto»).

Todo este trabajo pretende demostrar que los «movimientos absolutos sensu lato», aportan una información nueva que normalmente no se considera con los clásicos «movimientos relativos con referencias recíprocas». Además estos últimos presentan dos insuficiencias fundamentales:

i) Una se refiere a la imposibilidad de utilizarlos para hacer analogías entre las magnitudes cinemáticas y dinámicas: así, de los desplazamientos relativos de una falla, podemos deducir las condiciones cinemáticas de la deformación, pero sin embargo, la dinámica (causas) de este movimiento no debería ser inferida sólo a partir de estos movimientos relativos.

ii) Además, con el concepto de desplazamientos relativos, cometemos el error de considerar como absolutamente equivalente, lo que sólo lo es parcialmente.

Para ello debemos explicar lo que se entiende por sistemas equivalentes. Todo sistema cinemático o dinámico está constituido por un par de magnitudes: una resultante de fuerzas y un momento del par de fuerzas, en el sistema dinámico; o una resultante de rotaciones (o velocidad angular) y un momento resultante (o velocidad lineal), en el sistema cinemático.

De este modo se define un sistema como absolutamente equivalente a la realidad, a aquel que tiene el mismo par (resultante y momento) que aquélla.

Sin embargo, en los movimientos recíprocamente relativos, los sistemas suelen ser sólo parcialmente equivalentes, ya que teniendo igual momento, tienen distinta resultante (o a la inversa).

Nuestro objetivo, precisamente, es convertir el sistema parcialmente equivalente inicial (movimientos relativos, en uno que sea totalmente equivalente (movimientos absolutos), de modo que el par resultante-momento sea lo más parecido posible a la realidad: para clarificar estas ideas supongamos un tren que pasa a toda velocidad por el andén de una estación; el movimiento relativo andén/tren que podríamos representar nos da sólo una información parcial, y sin embargo el movimiento absoluto nos indica que sólo se mueve el tren y no el andén, lo cual es mucho más realista.

Que los sistemas sean o no equivalentes se tra-

duce en la realidad en consecuencias sustanciosas, como veremos más adelante (distribución de las zonas de compresión y distensión, de la deformación interna, etc.).

En resumen, usamos como marcador de referencia para los movimientos absolutos, el estado de la deformación interna del entorno que rodea a una falla, desde un punto de referencia (O) no afectado por esta deformación, definiéndose así los conceptos de bloque activo y bloque pasivo (fig. 2b).

El único marcador de referencia propuesto hasta ahora para movimientos absolutos, es el de HAMBLIN (1984), que analiza los desplazamientos verticales en fallas normales del «Basin & Range», en el SO de los Estados Unidos. Este autor se basa en los perfiles antiguos y recientes de ríos a ambos lados de una falla (fig 2c): si ambos perfiles no coinciden en una sección vertical de uno de los labios de la falla, este labio subió o bajó (labio H en la figura) con respecto a su posición anterior, y si ambos perfiles coinciden en otro labio, éste se considera fijo (labio L en la figura).

**MOVIMIENTOS ABSOLUTOS EN FALLAS. UNA REPRESENTACION GRAFICA**

En la clásica representación de fallas basada en movimientos relativos, se distinguen cuatro tipos básicos, fallas sinestrales, dextrales, normales, e inversas (fig. 3).

Proponemos en este trabajo una nueva simbología que permite representar los movimientos ab-

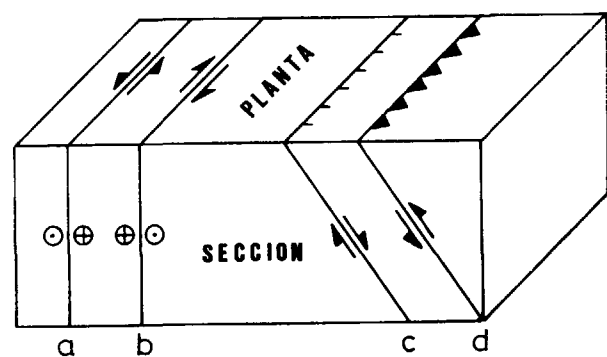


Figura 3.—Los cuatro tipos de fallas que se definen mediante la clásica representación gráfica de los movimientos relativos: sinestral (a), dextral (b), normal (c) e inversa (d).

solutos en las fallas, tanto en mapas, como en cortes geológicos (fig. 4a). Obtenemos así veintiocho tipos básicos de fallas (fig. 4b; siete variantes para cada uno de los cuatro tipos de la figura 3). Esta es una verdadera clasificación genética, ya que nos permite identificar y representar los movimientos reales de los dos labios de una falla. Esta simbología puede utilizarse a la vez que la clásica de movimientos relativos, y añadir así una información nueva en mapas y cortes geológicos. También pueden representarse las variaciones espaciales de estos movimientos a lo largo de una falla, o las variaciones temporales de los mismos.

A continuación veremos algunos ejemplos de aplicación de esta nueva simbología (fig. 5).

En primer lugar, mediante la figura 5a, recordamos que no siempre se pueden identificar fallas normales e inversas, con regímenes distensivos y compresivos, respectivamente: pueden en efecto aparecer fallas normales bajo regímenes compresivos (fig. 5a, i), y fallas inversas bajo regímenes distensivos (fig. 5a, ii). En este sentido, el estudio y representación de los movimientos absolutos puede ser clave para identificar el tipo de régimen tectónico. Asimismo, es posible obtener fallas inversas o normales tanto con episodios de subsidencia como de levantamiento (ver casos 6 y 7 en la fig. 4): en la figura 5b, se muestra un ejemplo de fallas normales producidas por el ascenso y empuje de un domo salino (SMITH & REEVE, 1970). HAMBLIN (1984), distingue tres tipos de movimientos absolutos en fallas normales de la Provincia del «Basin & Range» (fig. 5c). Finalmente, en el último ejemplo, vemos cómo pueden diferenciarse varios tipos de fallas normales e inversas en base a desplazamientos absolutos verticales (fig. 5d): el modelo corresponde al de la cuña tectónica de MIGLIORINI (1948) para los Apeninos.

**CRITERIOS DE RECONOCIMIENTO DE MOVIMIENTOS ABSOLUTOS EN FALLAS**

Los únicos criterios propuestos hasta ahora para reconocer movimientos absolutos son los ya mencionados de HAMBLIN (1984).

Trataremos ahora de exponer algunos de los criterios que pueden emplearse, a la espera de otros muchos que fueran propuestos en un futuro,

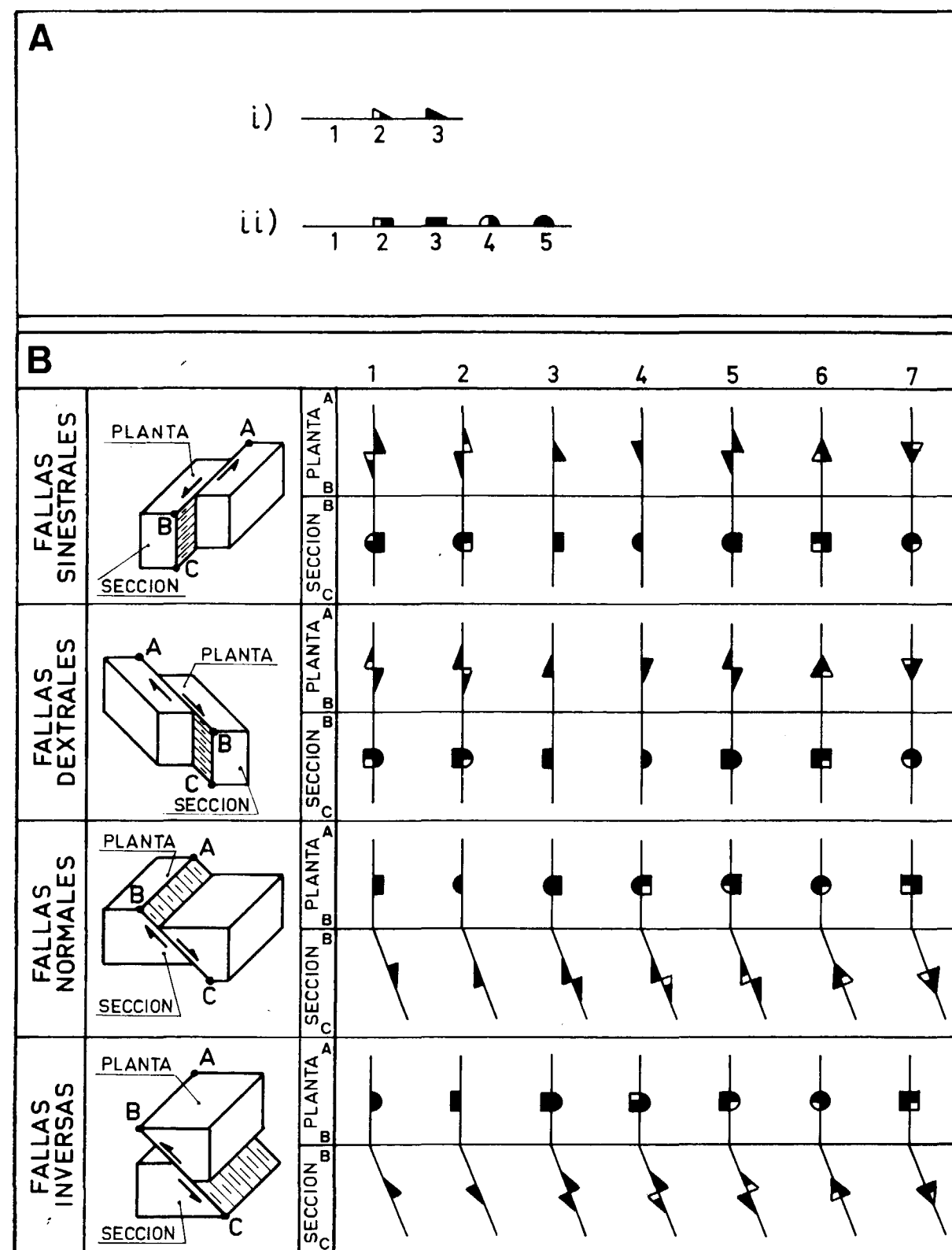


Figura 4.—Nueva simbología y representación gráfica que se propone para los movimientos absolutos en las fallas: A) Simbología empleada para cada labio de la falla: i) Para fallas en dirección, en planta, y fallas en buzamiento, en sección (1, sin movimiento; 2, movimiento mínimo en esta dirección; y 3, movimiento máximo en esta dirección). ii) Para fallas en buzamiento, en planta, y fallas en dirección, en sección (1, sin movimiento; 2, movimiento mínimo hacia abajo; 3, movimiento máximo hacia abajo; 4, movimiento mínimo hacia arriba; y 5, movimiento máximo hacia arriba). B) Los veintiocho tipos de fallas que se definen mediante movimientos absolutos (7 tipos para cada uno de los 4 movimientos relativos básicos), con sus simbologías para representación en planta y en sección.

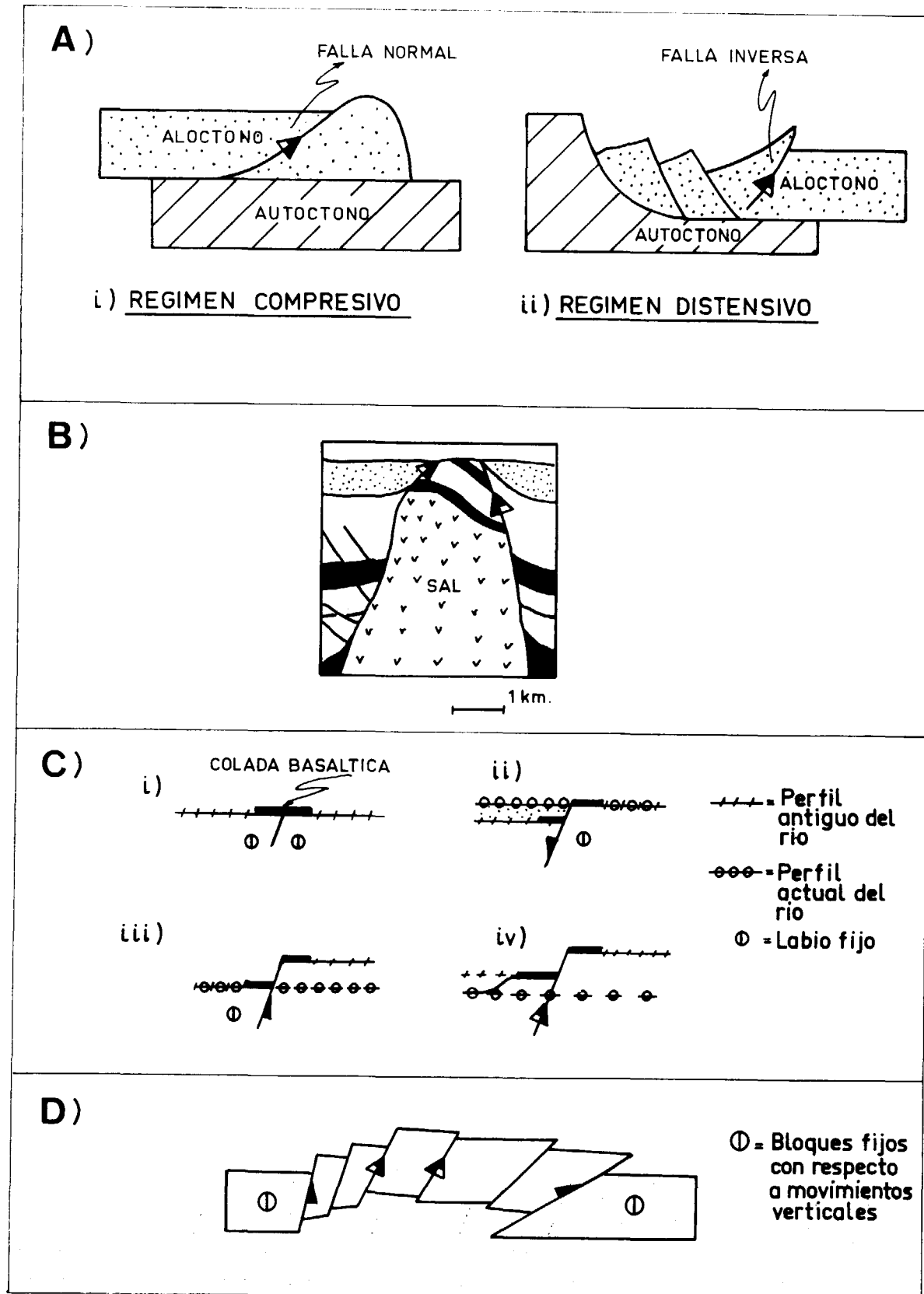


Figura 5.—Ejemplos de aplicación de esta nueva simbología: A) Falla normal generada bajo régimen compresivo (i), y falla inversa generada bajo régimen distensivo (ii). B) Fallas normales debidas al empuje y ascenso de un domo salino (SMITH & REEVE, 1970). C) Los tres tipos de movimientos absolutos distinguidos por HAMBLIN (1984) en fallas normales: i, estado indeformado; ii, movimiento únicamente del labio hundido; iii, movimiento únicamente del labio levantado; iv, movimiento de ambos labios hacia arriba. D) Movimientos absolutos en fallas normales e inversas del modelo de cuña tectónica de MIGLIORINI (1984).

caso de que alguna línea de investigación avanzara en este sentido.

Se pueden diferenciar cuatro tipos de criterios para reconocer desplazamientos absolutos: criterios sedimentarios, criterios geomorfológicos, criterios en espejos de falla y criterios basados en la deformación interna diferencial en ambos labios de una falla.

Los movimientos absolutos pueden deducirse mediante criterios sedimentarios en ciertas cuencas de origen tectónico. En la figura 6a se representa un ejemplo teórico, en el cual, como consecuencia de una distensión a modo de «fichas de dominó», se depositan unos sedimentos en el bloque hundido. Aunque ambas fallas normales (1) y (2) presentan idénticos movimientos relativos, sus movimientos absolutos son bien diferentes: mientras que en la falla (1) sólo baja el labio de la derecha, en la falla (2) bajan ambos labios; como consecuencia de ello, los sedimentos recubren a los dos labios de la falla (2), y sólo al labio de la derecha de la falla (1). En la figura 6b se muestra un ejemplo real en el graben de Ohara en Nueva Zelanda (LENSEN, 1958): del depósito diferencial de sedimentos en el graben, y de la no deformación de los estratos en los labios externos, resulta obvio que se ha hundido el graben sin que se hayan movido los labios externos de las fallas.

Existe un criterio geomorfológico utilizable sólo en fallas actuales, en las cuales no haya habido todavía, ni erosión, ni sedimentación. Se puede inferir que en fallas con movimientos subverticales, el levantamiento y el hundimiento de un labio, producirán, respectivamente, una elevación y una depresión topográfica local. De este modo, estudiando las elevaciones o depresiones en los entornos de fallas actuales, podremos eventualmente deducir los movimientos absolutos, como en los tres ejemplos de la figura 6c.

Se propone también un criterio basado en la deformación diferencial de los espejos de falla, en ambos labios de la misma (fig. 6d). Supongamos un bloque activo que se mueve sobre un bloque pasivo fijo, y que en ambos aparezcan espejos de falla: estos espejos de falla pueden presentar estructuras diferentes muy significativas. El bloque activo de una falla (aún cuando ésta conserva la misma dirección de movimiento general), puede tener (y de hecho tiene) movimientos irregulares debidos a variaciones momentáneas de velocidad en los dos extremos paralelos a la dirección de

la falla (causados, por ejemplo, por obstáculos locales), y como consecuencia de ello, sufrirá pequeñas rotaciones a lo largo de ejes perpendiculares al plano del movimiento. De este modo, a causa de estas rotaciones, el bloque activo variará ligeramente de posición en el espacio. De los muchos tipos de estrías presentes en los espejos de falla, uno que es bastante común es el que se debe a la marca de desgaste producida por un grano libre rotando solidariamente con la falla. En este tipo, es donde podemos observar estructuras diferenciales en los espejos de falla (fig. 6d). En la figura hemos representado las estrías producidas por tres granos en ambos labios de la falla (el grano 1 es uno que hacemos coincidir arbitrariamente con el eje de rotación del labio activo, y los granos 2 y 3 se sitúan fuera de este eje de rotación). Se observa que la estría formada por el grano (1) sólo presenta tramos rectos (AB-BC-CD), mientras que en las estrías de los granos (2) y (3) existen tramos rectos (AB-BC-CD) y curvos (BB-CC). Los tramos rectos corresponden al movimiento general de la falla en una dirección, mientras que los curvos corresponden a las rotaciones momentáneas. La diferencia esencial entre el bloque activo y el bloque pasivo, es que en el primero los tramos rectos (AB-BC-CD) varían de dirección como consecuencia del cambio de posición espacial del bloque en su conjunto, cosa que no ocurre en el bloque pasivo, donde los tramos rectos siempre están en una misma dirección. En la figura, todas estas estructuras se han exagerado con objeto de explicar mejor este criterio, pero es obvio que en la naturaleza las cosas no son tan espectaculares.

Los movimientos absolutos en fallas producen deformaciones internas que son diferentes en ambos labios de las mismas; nos detendremos más a fondo en este criterio porque parece ser el de más fácil aplicación práctica. En la figura 7a vemos un ejemplo real descrito por ARTHAUD & MATTAUER (1972), y en él se observa que las deformaciones en el campo frágil (estilolitos y grietas de tensión) se localizan en el labio probablemente más activo de la falla. MATTAUER (1976), describe otro ejemplo similar, que puede ser interpretado también con movimientos absolutos. En experimentos de laboratorio, se observa asimismo cómo las deformaciones frágiles tienden a localizarse en el labio activo de las fallas (ver por ejemplo KINGMA, 1958, DUNN y otros, 1973, y SUPPE, 1985). En el campo frágil-dúctil, podemos utilizar los clásicos ejemplos experimentales de CLOOS (1939):

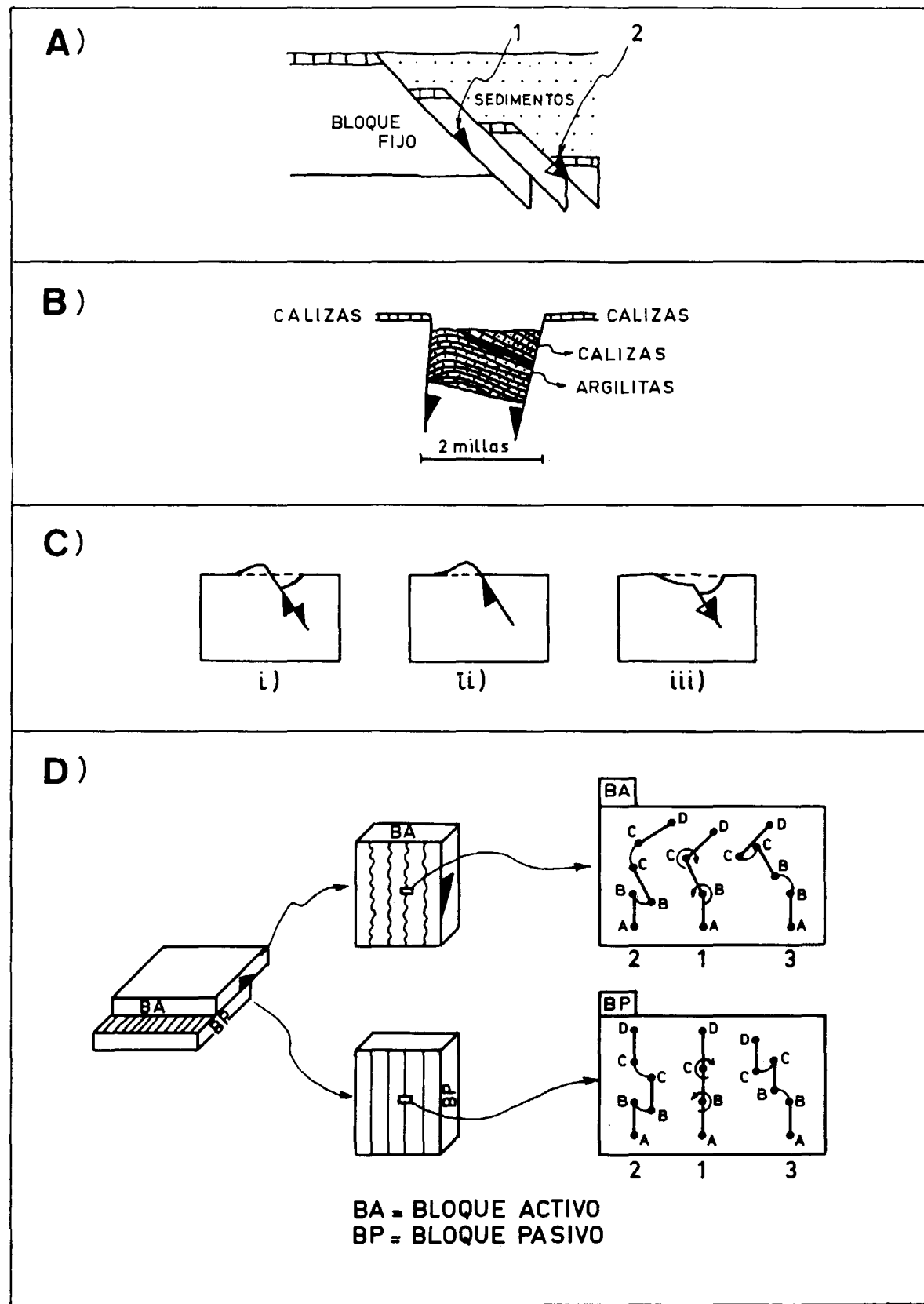


Figura 6.—Criterios sedimentarios, geomorfológicos y de estructuras diferenciales en espejos de falla, para reconocer movimientos absolutos: A) Modelo teórico de tectónica distensiva a modo de fichas de dominó: los sedimentos sólo recubren a los labios que se han movido hacia abajo (el labio de la derecha en la falla 1, y ambos labios en la falla 2). B) Graben de Ohara en Nueva Zelanda (LENSEN, 1958). C) Criterio geomorfológico para fallas actuales, basado en las elevaciones y depresiones topográficas localizadas en las inmediaciones de la falla: i, ambos labios se mueven en sentido contrario; ii, sólo se mueve el labio levantado; iii, ambos labios se mueven hacia abajo. D) Criterio basado en estructuras diferenciales en espejos de falla del bloque activo y del bloque pasivo (ver texto).

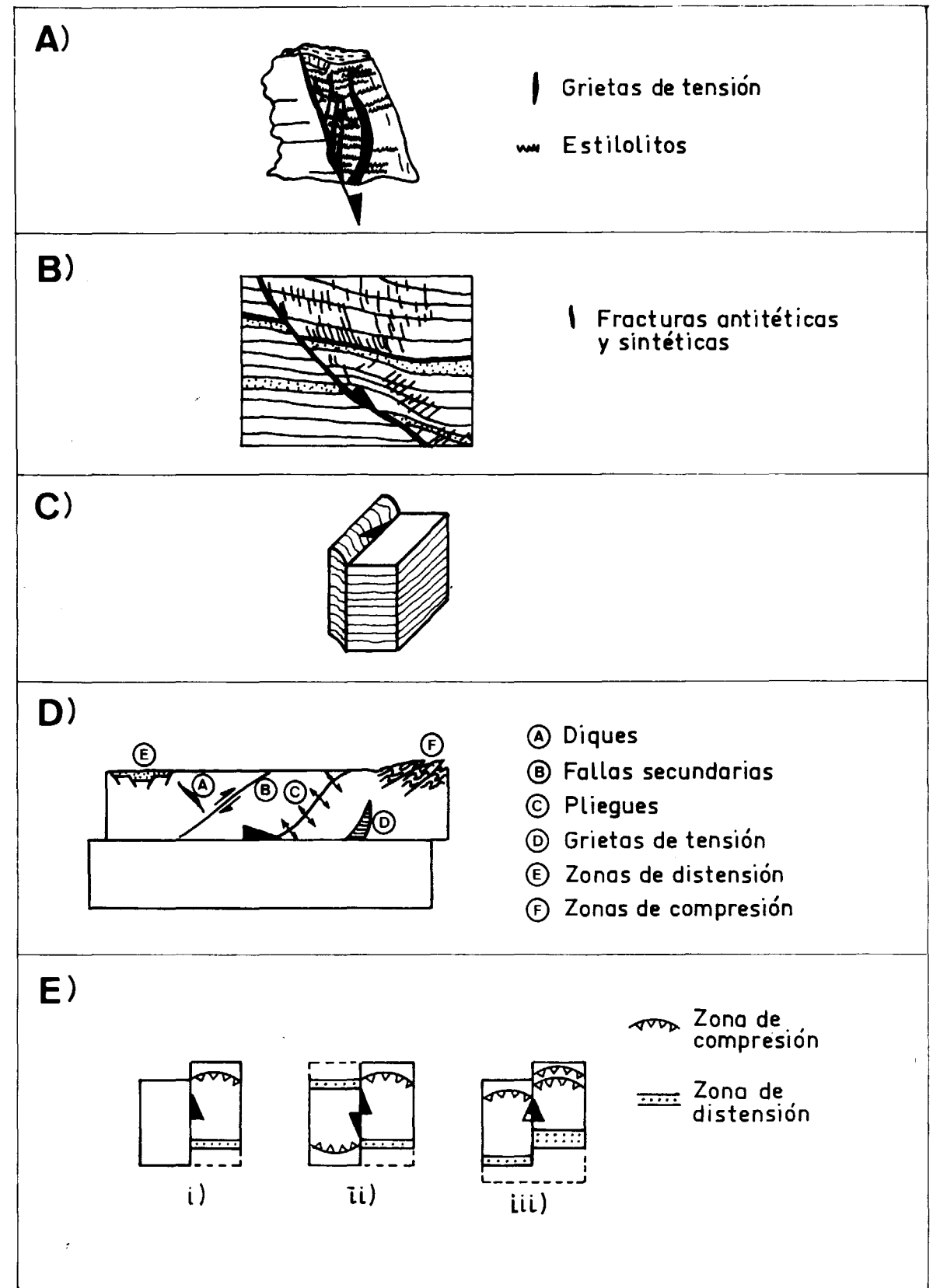


Figura 7.—Criterios de reconocimiento de movimientos absolutos, basados en la deformación interna diferencial de los dos labios de una falla: A) Deformaciones frágiles localizadas en el labio activo de la falla (ARTHAUD & MATTAUER, 1972). B) Deformaciones frágiles-dúctiles localizadas en el labio activo de la falla (CLOOS, 1939). C) Deformaciones dúctiles localizadas en el labio activo de la falla (basado en experimentos de EMMONS, 1969). D) Los seis tipos esenciales de deformaciones internas que podrán aparecer en el bloque activo de una falla. E) Criterio basado en la anchura y distribución de las zonas de distensión y de compresión a ambos lados de una falla: i, se mueve sólo el labio de la derecha; ii, se mueven ambos labios, pero en sentido contrario; y iii, se mueven ambos labios y en el mismo sentido.

en la figura 7b, se aprecia cómo los pliegues y fallas secundarias aparecen únicamente en el labio activo de la falla distensiva (otro ejemplo experimental en el campo frágil-dúctil puede verse en PELTZER y otros, 1982). En el campo dúctil, las deformaciones son también mucho más abundantes en el labio activo (fig. 7c; basado en experimentos de EMMONS, 1969).

En resumen, estas deformaciones internas en los labios de una falla, son criterios útiles para el reconocimiento de movimientos absolutos, porque tienden a desarrollarse preferentemente en el labio activo de la misma. Se pueden distinguir seis tipos esenciales de estructuras de la deformación en este labio, formando o no familias continuas (fig. 7d). Además, las deformaciones internas del tipo zonas de distensión y zonas de compresión (e y f en la figura 7d), pueden indicarnos el movimiento absoluto mediante dos criterios adicionales (fig. 7e): su localización en los labios de la falla (en uno solo, i, en los dos pero en lugares opuestos, ii, o en los dos pero en lugares paralelos, iii); y la anchura que presentan estas zonas (igual, ii, o diferente, iii).

Podemos aplicar estos criterios de la deformación interna diferencial en los labios de una falla, a algunos casos descritos por diferentes autores (fig. 8). Estas estructuras se observan mejor en cortes geológicos para las fallas en buzamiento, y en mapas geológicos para las fallas en dirección. En la figura 8a se muestra un ejemplo tomado de HAMLIN (1965), en el cual podemos deducir el movimiento absoluto en la falla normal, respectivamente, por la deformación y la no deformación de los estratos en el labio izquierdo y en el labio derecho de la falla. En la figura 8b se representa un ejemplo real de cómo deducir el movimiento absoluto mediante el criterio de la localización diferencial de zonas de distensión en un solo labio de una falla (ver figura 7d, caso e): se trata de la cuenca carbonífera de Ales en Francia, ARTHAUD & MATTE (1977) (i), y en (ii) vemos la interpretación que dan a este movimiento (en la cual hemos añadido nuestra simbología). Un ejemplo muy similar es el descrito por WILCOX y otros (1973) para una cuenca distensiva, localizada entre las fallas de San Gabriel y San Andreas, en California. En la figura 8c, se muestra el clásico ejemplo de la Falla Alpina en Nueva Zelanda: WELLMAN y otros (1952) (i), describen una serie de pliegues sólo

presentes en el labio S de la falla, y COTTON (1956) (ii), lo explica precisamente por el movimiento diferencial hacia el O de este labio. Otro ejemplo con pliegues y efecto de arrastre en los estratos, es el descrito por DENNIS (1972) para la falla Perry en Vermont (fig. 8d), y en él podemos deducir también el movimiento absoluto a partir de estas deformaciones internas diferenciales. La presencia común de fallas secundarias en ciertos labios de las fallas primarias, ha sido descrita abundantemente en la literatura, y se pueden interpretar con movimientos absolutos. Algunos de los casos más espectaculares, son los de la falla de El Pilar en Venezuela (ROD, 1956; WILCOX y otros, 1973), la falla Alpina en Nueva Zelanda (MOODY & HILL, 1956; CHINNERY, 1966), las fallas de Malborough en Nueva Zelanda (BISHOP, 1968), o la falla de Craven en el NE de los Estados Unidos (MCKINSTRY, 1953).

Finalmente, pueden usarse estos criterios de la deformación interna, a una escala más grande. En la figura 8e, se analiza el ejemplo del S de la provincia del «Basin & Range» en los Estados Unidos, descrito por WERNICKE y otros (1982): este área sufrió una extensión de dirección O-E, mientras que el bloque de Mojave en el S no se movió; de esto, y de la deformación diferencial de ciertas estructuras preexistentes, puede inferirse el movimiento absoluto en las fallas que limitan esta provincia hacia el S. Finalmente, en la figura 8f estudiamos el modelo propuesto por BURKE y otros (1978) para explicar la formación de la Placa Caribe: debido a una compresión de dirección N-S entre Norteamérica y Sudamérica, se produce una «macro-cuña» en el Caribe, que sale expulsada hacia el E; el movimiento absoluto en dirección O-E puede deducirse, de este modelo, y de la presencia en el bloque activo (Placa Caribe) de intensas deformaciones (inexistentes en los bloques septentrional y meridional).

### CONCLUSIONES

En este trabajo se introduce el concepto de movimientos absolutos en fallas, que permite dar un significado genético a estas estructuras, y que puede ser de utilidad tanto en mapas como en cortes geológicos.

Para aclarar los conceptos de absoluto y relativo se efectúa un estudio teórico, subdividiéndose los diferentes tipos de movimientos en cuatro: dos relativos y dos absolutos.

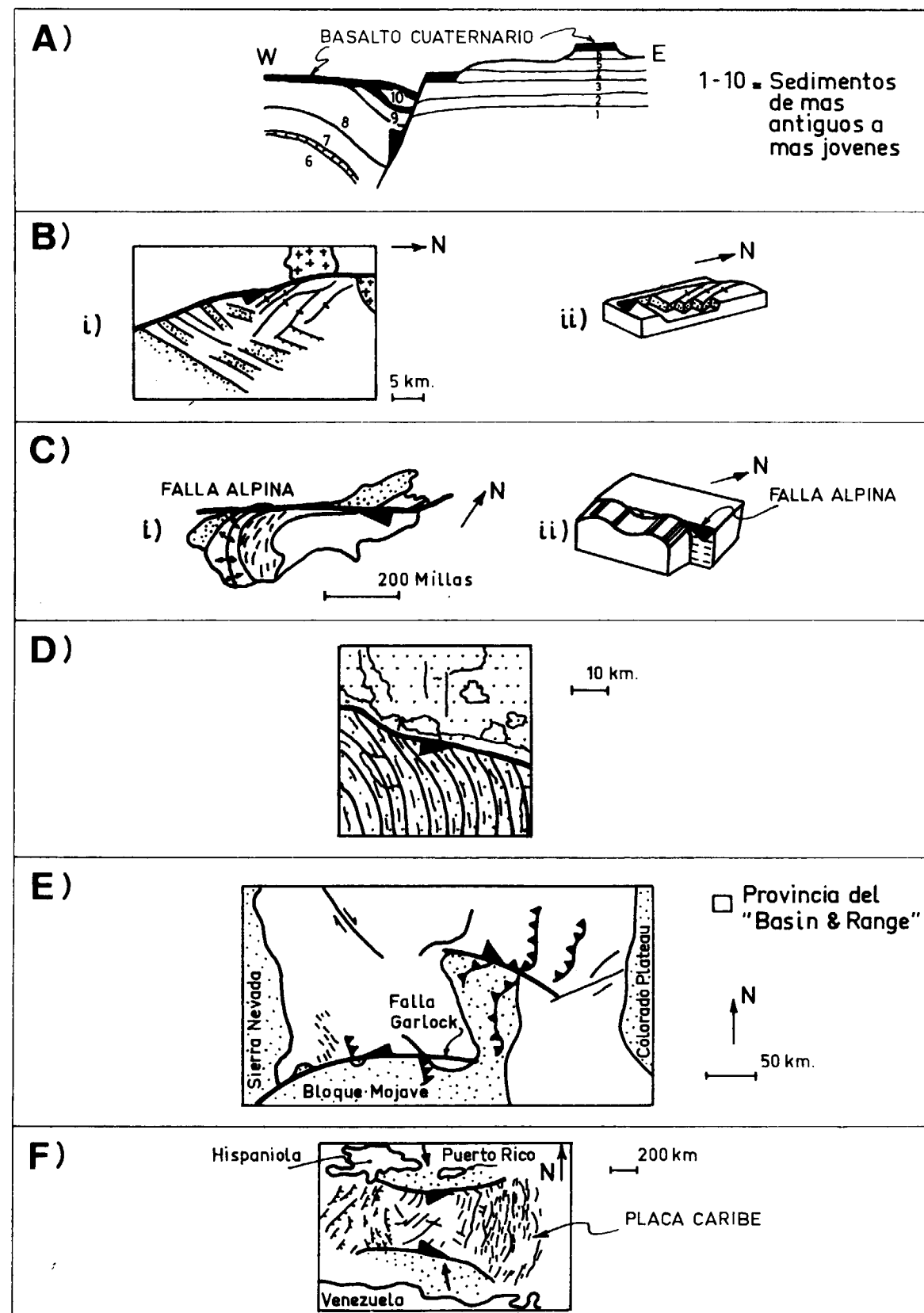


Figura 8.—Aplicación de los criterios de la deformación interna diferencial, a algunos ejemplos: A) Falla normal en la cual sólo se movió el labio hundido (HAMLIN, 1965). B) Cuenca distensiva de Ales en Francia, localizada en el labio S de la falla (ARTHAUD & MATTE, 1977): i, mapa geológico; ii, bloque diagrama interpretativo. C) Pliegues producidos en el labio S de la falla Alpina en Nueva Zelanda: i, mapa geológico de WELLMAN y otros (1952); ii, bloque diagrama interpretativo de COTTON (1956). D) Pliegues y efectos de arrastre localizados en el S de la falla de Perry (DENNIS, 1972). E) Movimientos absolutos en el S de la provincia del «Basin & Range» (interpretados a partir del mapa de WERNICKE y otros, 1982). F) Movimientos absolutos en la «cuña» formada por la Placa Caribe (interpretados a partir del mapa de BURKE y otros, 1978).

Mediante la elección de un punto de referencia dentro de un bloque que podemos suponer fijo para la escala del estudio considerado, definimos 28 tipos distintos de movimientos absolutos en fallas, que se representan con una nueva simbología. Esta simbología se aplica a diferentes ejemplos reales de fallas a distintas escalas, y se discuten algunas de sus implicaciones genéticas.

Se proponen también una serie de criterios que permiten identificar el tipo de movimiento absoluto que ha afectado a una falla.

Como hemos tratado de demostrar en este estudio, la representación e identificación de los movimientos absolutos en fallas puede ser de utilidad en geología.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los Profesores de la Universidad Complutense R. Capote, R. Babin y C. Casquet, la revisión y crítica de este manuscrito. Asimismo, se agradecen las críticas de una primera versión por parte del Profesor de la Universidad de Harvard en los Estados Unidos B. P. Wernicke. Finalmente, agradecemos muy especialmente la delimitación de E. Menéndez, y la utilización del ordenador personal Bull Micral 30 de la empresa Honeywell, S. A., para el procesamiento de textos.

## BIBLIOGRAFIA

- ARTHAUD, F., y MATTAUER, M. (1972): *Sur l'origine tectonique de certains joints stylolitiques parallèles à la stratification; leur relation avec una phase de distension (exemple du Languedoc)*. Bull. Soc. Geol. France (7), XIV, pp. 12-17.
- ARTHAUD, F., y MATTE, Ph. (1977): *Late Paleozoic strike-slip faulting in southern Europe and northern Africa: Result of a right-lateral shear zone between the Appalachians and the Urals*. Geol. Soc. Am. Bull., V. 88, pp. 1305-1320.
- BISHOP, D. G. (1968): *The geometric relationships of structural features associated with major strike-slip faults in New Zealand*. New Zealand Jour. Geol. Geoph., 11, pp. 405-407.
- BURKE, K.; FOX, P. J., y SENGOR, A. M. C. (1978): *Buoyant ocean floor and the evolution of the Caribbean*. Jour. of Geoph. Res., V. 83, B8, pp. 3949-3954.
- CHINNERY, M. A. (1966): *Secondary faulting; II Geological aspects*. Can. Jour. Earth Sci., V. 3, pp. 175-191.
- CLOOS, H. (1939): *Nebung, Spaltung, Vulkanismus*. Geo. Rund. Band 30 Zwischenheft 4A, pp. 406-527.
- COTTON, C. A. (1956): *Geomechanics of New Zealand mountain-building*. N. Zeal. Jour. of Sci. and Tech. B-38, pp. 187-200.
- DENNIS, J. G. (1972): *Structural Geology*. The Ronald Press Company, N. Y.
- DUNN, D. E.; LA FOUNTAIN, L. J., y JACKSON, R. E. (1973): *Porosity dependance and mechanism of brittle fracture in sandstones*. Jour. Geoph. Res. 78 (14), pp. 2403-2417.
- EMMONS, R. C. (1969): *Strike-slip rupture patterns in sand models*. Tectonophysics, 7 (1), pp. 71-87.
- HAMBLIN, W. K. (1965): *Origin of «reverse-drag» on the downthrown side of normal faults*. Geol. Soc. Am. Bull., V. 76, pp. 1145-1164.
- HAMBLIN, W. K. (1984): *Direction of absolute movement along the boundary faults of the Basin and Range-Colorado Plateau margin*. Geology, V. 12, pp. 116-119.
- KINGMA, J. T. (1958): *Possible origin of piercement structures, local unconformities, and secondary basins in eastern geosynclines, New Zealand*. N. Zeal. Jour. Geol. Geoph. I, pp. 269-274.
- LENSEN, G. J. (1958): *A method of graben and horst formation*. Jour. Geol., V. 66, núm. 5, pp. 579-587.
- MATTAUER, M. (1976): *Las deformaciones de los materiales de la corteza terrestre*. Ed. Omega.
- MCKINSTRY, H. E. (1953): *Shears of the second order*. Am. Jour. of Sci., V. 251, pp. 401-414.
- MIGLIORINI, C. I. (1948): *I cunei composti nell' orogenesi*. Soc. Geol. Ital. Bol., 67, pp. 31-142.
- MOODY, J. D., y HILL, M. J. (1956): *Wrench-fault tectonics*. Bull. Geol. Soc. Am., V. 67, pp. 1207-1246.
- PELTZER, G.; TAPPONIER, P., y COBOLD, P. (1982): *Les grands décrochements de l'est Asiatique: évolution dans le temps et comparaison avec un modèle experimental*. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, V. 294, pp. 1341-1348.
- RAMSAY, J. G., y HUBER, M. I. (1983): *The techniques of modern structural geology*. Volume 1: Strain analysis. Academic Press.
- ROD, E. (1956): *Strike-slip faults of northern Venezuela*. Bull. Am. Ass. Petro. Geol., V. 40, núm. 3, pp. 457-476.
- SMITH, D. A., y REEVE, F. A. E. (1970): *Salt piercement in shallow Gulf Coast salt structures*. Bull. Am. Ass. Petro. Geol., V. 45, pp. 1271-1289.
- SUPPE, J. (1985): *Principles of structural geology*. Prentice-Hall.
- TER-STEPANIAN, G. (1962): *Klassifizierung der Erdrutschrisse*. Geol. und Bauw., V. 28, pp. 204-213.
- WELLMAN, H. W.; GRINDLEY, G. W., y MUNDEN, F. W. (1952): *The alpine schists and the upper Triassic of Harper Pass (sheet S52), South Island, New Zealand*. Roy. Soc. N. Zeal. Trans. and Proc., V. 80, núm. 2, pp. 213-227.
- WERNICKE, B. P.; SPENCER, J. E.; BURCHFIELD, B. C., y GUTH, P. L. (1982): *Magnitude of crustal extension in the Southern Great Basin*. Geology, V. 10, pp. 499-502.
- WILCOX, R. E.; HARDING, T. P., y SEELY, D. R. (1973): *Basic wrench tectonics*. Am. Ass. Petro. Geol. Bull., V. 57, núm. 1, pp. 74-96.

Recibido: Abril de 1986.