

LAS CORRECCIONES ESTRUCTURAL Y TECTONICA EN EL TRATAMIENTO DE LOS DATOS MAGNETICOS

J. SELLES MARTINEZ*

(Recibido: 12 de agosto, 1987)

(Aceptado: 22 de octubre, 1987)

Dedicado a la memoria del Ing. D. A. Valencio.

RESUMEN

Se analizan las limitaciones del Test de Plegamiento tradicional, destacando su inaplicabilidad en el caso de pliegues con geometría cónica. Se desarrolla una técnica de corrección para el caso de pliegues cilíndricos con eje buzante, caso que no era tenido en cuenta por el Test de Plegamiento tradicional. Se analizan las características generales de una superficie cónica con eje horizontal y se desarrollan las técnicas de corrección a aplicar en el caso de pliegues cónicos con eje del cono horizontal y con eje del cono buzante. Se desarrolla una técnica para obtener la corrección a aplicar cuando las muestras provienen de bloques rotados sobre superficies de fallas inclinadas. Se propone una definición para "corrección estructural" y "corrección tectónica". Se presenta una serie de diagramas estereográficos que permiten individualizar las características geométricas de una estructura plegada a partir de la representación polar de los datos de rumbo e inclinación de los planos de estratificación.

ABSTRACT

Limitations of conventional "fold test" are analyzed, pointing out their failure when working with conical folds. A procedure is developed for the case of a cylindrical fold with plunging axis, which was not taken into account by the fold test. General properties of conical surfaces are analyzed and techniques to use in the case of folds with horizontal or plunging cone axes are developed. A technique to be applied to the case of a collection of samples from a rotated block associated with a tilted fault is also presented. "Structural" and "Tectonic" corrections are differentiated. Stereographic diagrams helping in the identification of geometrical characteristics of folds are presented.

* *Geología estructural, Depto. de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Pabellón 2, Ciudad Universitaria, CP 1428, Buenos Aires, ARGENTINA.*

INTRODUCCION

Al realizar estudios paleomagnéticos sobre estructuras plegadas es regla de aplicación general imprimir una rotación a los vectores representativos de la magnetización remanente de muestras obtenidas en diferentes puntos de muestreo. Ello se realiza con el propósito de eliminar la desviación producida por la deformación del macizo rocoso. La misma es deducida a partir de los datos de rumbo e inclinación de las superficies de estratificación en cada afloramiento. De esta forma, la mayor o menor coherencia en la posición de los vectores remanencia, obtenidos antes y después de aplicar la corrección, permitiría establecer si la información paleomagnética retenida en la roca es anterior o posterior al proceso deformante.

Este procedimiento (Graham, 1949; Mc Elhenny, 1964), si bien es adecuado en el caso de pliegues cilíndricos con ejes horizontales, es incorrecto cuando aparecen estructuras más complejas, como pliegues buzantes, pliegues de tipo cónico, fallas rotacionales, o bien episodios secuenciales con ejes no coincidentes. La situación se complica cuando la estructura muestreada forma parte de un bloque cortical que ha sufrido movimientos relativos con respecto a los adyacentes, ya que los mismos no son tenidos en cuenta al realizar la corrección por estructura.

La MRE, la mecánica de la deformación y la corrección por estructura tradicional

Dos aspectos que deben ser cuidadosamente evaluados al realizar la interpretación de los resultados de un estudio paleomagnético son: *a)* La naturaleza de la magnetización remanente aislada, que se considera representativa de la magnetización remanente adquirida durante su génesis, y *b)* Las características de la deformación. Con respecto a la primera digamos que en determinadas circunstancias la MRE (Magnetización remanente estable), aislada, pudo haber sido adquirida en circunstancias en las cuales la posición del plano S_s pudo o no ser paralela a la que tenía durante la depositación del sedimento, a la intrusión del filón capa o al derrame de la colada, etcétera. Esto como consecuencia de fenómenos tales como oscilaciones de la cuenca, compactación diferencial, fenómenos tectónicos sindeposicionales, etcétera. Además, siendo la magnetización remanente producto de la acción del campo magnético sobre partículas con una determinada composición química y cristalográfica, producida en un medio caracterizado por condiciones físicoquímicas específicas, cualquier variación en las características del medio interferirá en la memoria magnética del sedimento e inclusive, posteriormente, en la de la roca, máxime si tenemos en cuenta

que el campo magnético en sí mismo ha podido sufrir cambios en el lapso que media entre uno y otro estado. Fenómenos como cementaciones, desarrollo de clivaje, elevaciones y hundimientos de la cuenca, etcétera, pueden complicar aún más el panorama.

Con respecto a la mecánica del plegamiento, dos son los mecanismos de deformación que pueden desarrollar pliegues: *a)* Arqueamiento como resultado de una compresión con rotación de todos los puntos respecto a la charnela, y *b)* el plegamiento por flujo, el que al menos teóricamente podría no estar asociado con un acortamiento real, pero que implica desplazamientos subparalelos al plano axial sin rotación de los flancos alrededor de la charnela.

Dado que en realidad los fenómenos de plegamiento por flujo son precedidos siempre por un cierto porcentaje de arqueamiento, están así asociados a un acortamiento real. La estructura final es por lo tanto resultante de ambos procesos. La generalidad de los pliegues es entonces resultante de procesos complejos en los que actúan condicionantes de tipo reológico y geométrico. El plegamiento "concéntrico" puro no puede desarrollarse más allá de un acortamiento cuya relación es la del semicírculo al diámetro; si es necesario superar ese límite, el proceso pasará a producir fracturas inversas o pliegues similares. En estos casos (y sin entrar en el campo de la deformación no homogénea) se supone que el desplazamiento se produce a lo largo de determinados planos (microfracturación, clivaje), cuya orientación puede ser variable a escala del pliegue. Estos planos están íntimamente asociados a fenómenos de disolución de material, reorientación de minerales preexistentes o formación de especies nuevas, todo ello con importante incidencia en la información paleomagnética. Al respecto cabe señalar que ya Graham (*op. cit.*) destaca que su prueba de plegamiento es válida "bajo circunstancias apropiadas (ausencia de flujo o cizallamiento)" y en su figura 26 muestra la desviación que se introduce en la orientación de los vectores como resultado de la deformación plástica. Recientemente otros autores (*e.g.* Cogne y Bonhommet, 1987) han señalado que en ciertas condiciones la prueba de plegamiento no es significativa en sí misma. Dado que el tratamiento de este tema escapa al objetivo del presente trabajo, se remite al lector a los autores citados para un análisis más extenso del mismo. De todos modos resulta claro que si la información paleomagnética es modificada durante o con posterioridad al plegamiento, la dispersión de la magnetización remanente no se reducirá al aplicar la corrección. Cuando se trabaja con horizontes de diferentes características litológicas, existe además el peligro de que no todos ellos hayan sido modificados al mismo tiempo y/o con la misma inten-

sidad. Para obtener los mejores resultados de la prueba de plegamiento deberían utilizarse numerosas muestras pertenecientes a un solo nivel estratigráfico que abarque todo el perfil geométrico y así determinar cuál es la corrección más adecuada.

La corrección estructural

El procedimiento se inicia con la determinación de la geometría del pliegue bajo análisis; para ello pueden utilizarse las técnicas habituales de geología estructural basadas en la proyección estereográfica. La representación estereográfica de los polos de los planos de estratificación permite una rápida identificación de dichas características geométricas. En la figura 1 se presentan los bloques diagrama y los estereogramas correspondientes a pliegues con diferentes características geométricas y posición espacial. Es sumamente difícil establecer *a priori* la posición espacial inicial del eje de la superficie cilíndrica o cónica, es por ello que para los ejemplos que se tratarán se los supone horizontales. Ensayos con diferentes valores de buzamiento de los mismos podrán orientar acerca de la posición original en aquellos casos en los que se considere conveniente su investigación (pliegues de tipo parasítico, pliegues asociados a fallas). La presencia de superficies axiales inclinadas o curvas podría sugerir nuevas posibilidades de corrección por vuelco o repliegue de la estructura mayor.

Pliegues cilíndricos con eje horizontal

Para este caso es válida la corrección tradicional consistente en aplicar una rotación igual y opuesta a la inclinación de los estratos mediante un eje horizontal coincidente con el rumbo de éstos. Sea, por ejemplo, el caso de figura 2a en la cual a una muestra en el flanco izquierdo del pliegue se le aplicará una rotación de 20° en sentido horario según un eje de orientación norte-sur, mientras que a una en el flanco derecho le corresponderá una rotación de 50° en sentido antihorario. En la figura 2b se presenta el estereograma, mostrándose la rotación correspondiente de los vectores paleomagnéticos asociados. La coincidencia lograda después de aplicar la corrección indica la conveniencia de utilizar la misma, ya que estaríamos frente a un caso de magnetización pretectónica.

Pliegues cilíndricos con eje buzante

En estos casos la corrección por estructura debe ser realizada en dos etapas, primero horizontalización del eje y luego "planchado" de la estructura en forma similar al

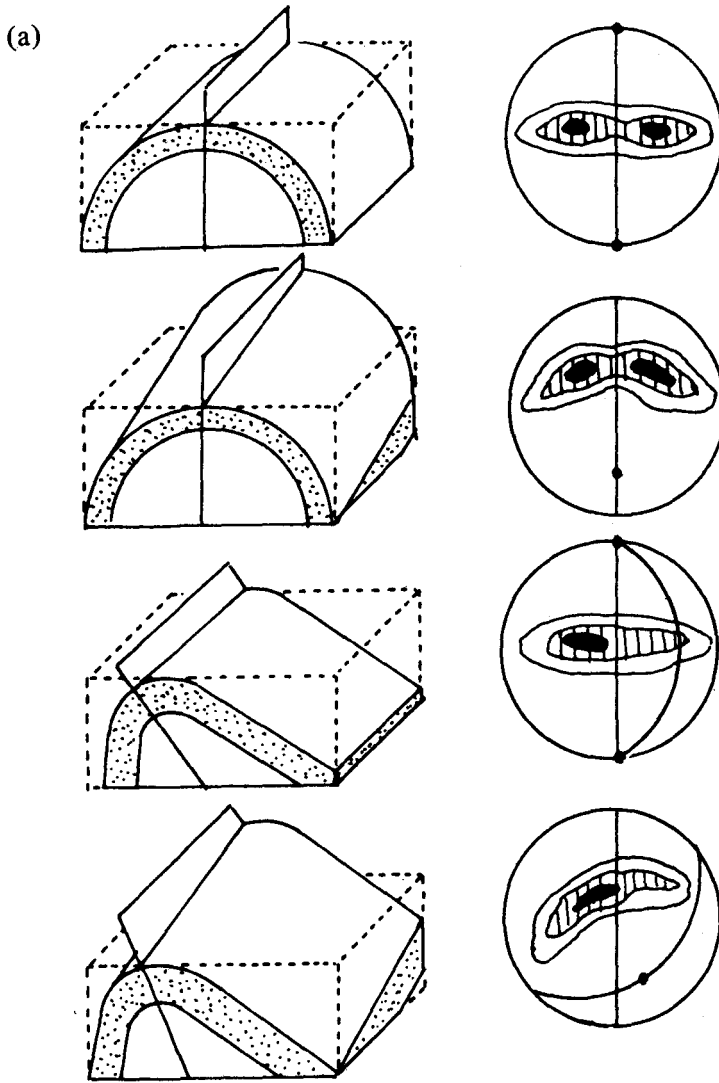
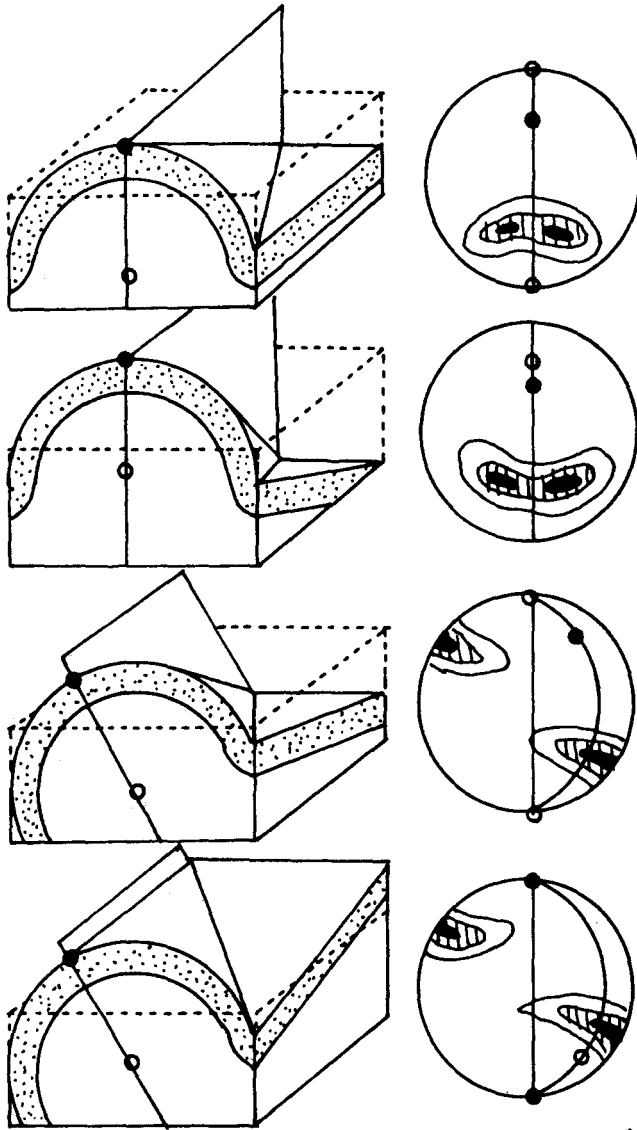


Fig. 1. Bloques-diagrama y estereogramas de algunos tipos de pliegues. a) Pliegues cilíndricos. b) Pliegues cónicos.

(b)



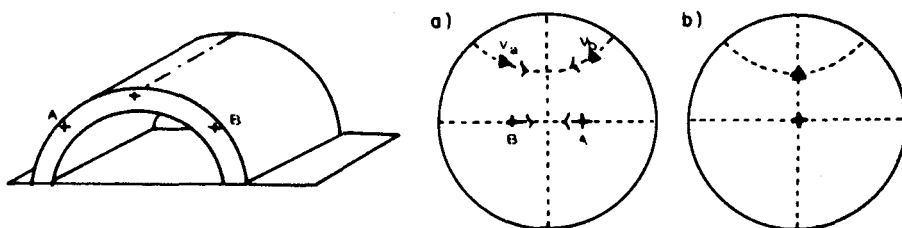


Fig. 2. Aplicación de la corrección por estructura tradicional. a) Estereograma en el que se muestra la posición de los polos a Ss de dos muestras (A y B) y los vectores paleomagnéticos asociados (V_a y V_b). Las flechas indican el sentido de rotación. El desplazamiento se realiza sobre arcos de circunferencias menores. b) Situación después de haberse aplicado la corrección por estructura. Al llevar A y B a la horizontal los vectores V_a y V_b se desplazan hasta coincidir.

caso anterior. Para la primera parte se aplica al conjunto de datos una rotación según un eje perpendicular al plano axial del pliegue. El ángulo de rotación es igual al buzamiento del eje del pliegue y su sentido opuesto.

Sea el caso de la figura 3a, en la cual los datos corresponden a tres muestras situadas en los flancos y la charnela del pliegue. El eje del mismo buza 20° al Sur, por lo tanto, el eje auxiliar de rotación tiene una orientación Az 90 y el giro debe realizarse en sentido horario. En la figura 3b se han llevado los polos de la estratificación y los vectores a su nueva posición y en la figura 3c se ha aplicado la corrección tradicional. La coincidencia lograda señala que la magnetización es de origen pretectónico.

Aun en el caso de suponer que la posición del eje del pliegue sea de origen primario, debe realizarse la operación en la forma indicada.

Pliegues cónicos con eje del cono horizontal

Se estudiarán sólo aquéllos cuya forma corresponde a la de conos rectos (sector perpendicular al eje del cono circular). La formación de un pliegue cónico conlleva la rotación según dos ejes, uno coincidente con el eje del cono y otro perpendicular a él y que podemos localizar en el caso más general, como en posición vertical cuando el primero es horizontal. La determinación de la rotación según el eje vertical se basa en el siguiente razonamiento: en la figura 4a se observa una superficie cónica, siendo B el ápice del cono y el arco ADEC una semicircunferencia sobre un plano

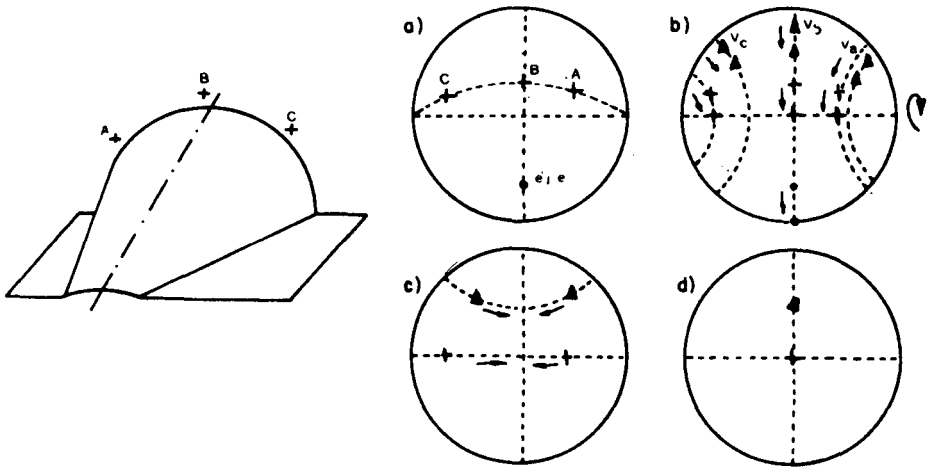


Fig. 3. Aplicación de la corrección en el caso de un pliegue cilíndrico con eje buzante. a) Estereograma mostrando la ubicación de los polos de las muestras y la posición del eje del pliegue. b) Rotación de los polos A, B y C resultante de la horizontalización del eje del pliegue. c) Rotación de los polos A, B y C y de los vectores asociados según el eje del pliegue.

perpendicular al eje del mismo. Se denomina α al ángulo apical del cono, y δ es el ángulo con vértice en X comprendido entre el punto D y la vertical XE. En la figura 4b se ha desplazado la superficie cónica sobre la horizontal, de forma tal que la línea EB coincida con la dirección de AB. El ángulo entre AB y AC ha sido denominado β y ρ el ángulo entre las direcciones EB y DB.

De la figura 5a surge que:

$$\widehat{DE} = 2 \widehat{XE} \pi \frac{\delta}{360^\circ}$$

y de la figura 5b

$$\widehat{DE} = 2 \widehat{EB} \pi \frac{\rho}{360^\circ}$$

Como el arco DE no cambia su dimensión, ambas ecuaciones pueden igualarse, por lo tanto:

$$2 \widehat{XE} \pi \frac{\delta}{360^\circ} = 2 \widehat{EB} \pi \frac{\rho}{360^\circ}$$

de donde

$$\rho = \delta \frac{XE}{EB}$$

y finalmente

$$\rho = \delta \operatorname{sen} \frac{\alpha}{2}$$

Definiremos la rotación vertical sufrida por el punto D al pasar de una posición a la otra (w_d) como la diferencia entre el rumbo de la línea DB en la figura 5b y el rumbo del plano tangente al punto D en la figura 5a. Como el ángulo viene referido a la dirección del eje del cono, la expresión que nos da el ángulo es:

$$w_d = \text{Rumbo de D} - (\text{Dirección del eje} + \rho)$$

El procedimiento a seguir es el siguiente:

Primero: Una vez representados los datos de actitudes de los planos de estratificación de las muestras, se verifica que los mismos se distribuyen sobre un arco de circunferencia menor (figura 5a).

Segundo: Se determina el AZ correspondiente al eje del cono (figura 5b).

Tercero: Se mide el semiángulo apical del cono. Para ello se debe medir el complemento del semiángulo entre la dirección del eje y el plano que contiene los polos (figura 5c).

Cuarto: Se mide el valor de δ correspondiente a cada muestra en la red estereográfica sobre el plano vertical que contiene los polos de acuerdo con lo indicado en la figura 5d.

Quinto: Se calcula el valor de ρ correspondiente a cada muestra, de acuerdo con la fórmula:

$$\rho = \delta \operatorname{sen} \frac{\alpha}{2}$$

Sexto: Se calcula el valor de w_d para cada muestra, según la fórmula:

$$w_d = \text{Rumbo de D} - (\text{dirección del eje} + \rho)$$

Séptimo: Se corrige cada muestra, primero en la forma tradicional según un eje horizontal coincidente con el rumbo de la estratificación y rotando un ángulo igual a su inclinación y luego se corrige, introduciendo la rotación w_d según un eje vertical. En

la figura 5e se presenta el resultado de aplicar la primera corrección y en la figura 5f el de adicionar la segunda a la misma muestra.

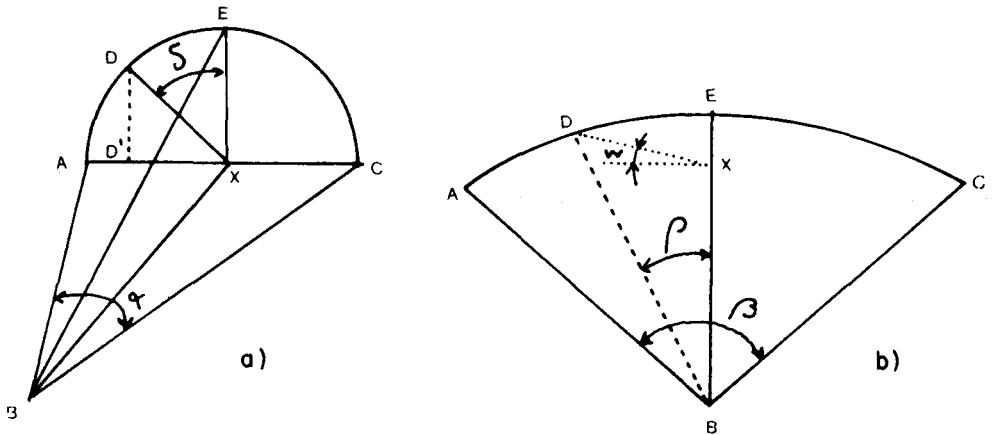


Fig. 4. Fundamento de la corrección a utilizar en el caso de pliegues cónicos con eje del cono horizontal. a) Identificación de los elementos geométricos sobre la superficie cónica. b) Análisis de la misma superficie al ser horizontalizada.

Pliegues cónicos con ejes buzantes

Para aplicar esta corrección se supone que la rotación del eje del cono se ha producido según un eje horizontal perpendicular a aquel. Una vez horizontalizado el eje del cono y rotados solidariamente todos los polos, el resto de la corrección es similar a la recién explicada.

Corrección por desplazamiento según fallas horizontales

Cuando las características del desplazamiento sobre el plano de falla son tales que el resultado neto consiste en la rotación de uno de los bloques con respecto al otro, se hace necesario el cálculo de la rotación introducida. Para ello se pueden utilizar las técnicas habituales de geología estructural (véase, por ejemplo, Sellés Martínez, 1988). Una vez obtenido el dato de la posición del eje de rotación γ y de la magnitud y sentido del giro, se procede del siguiente modo:

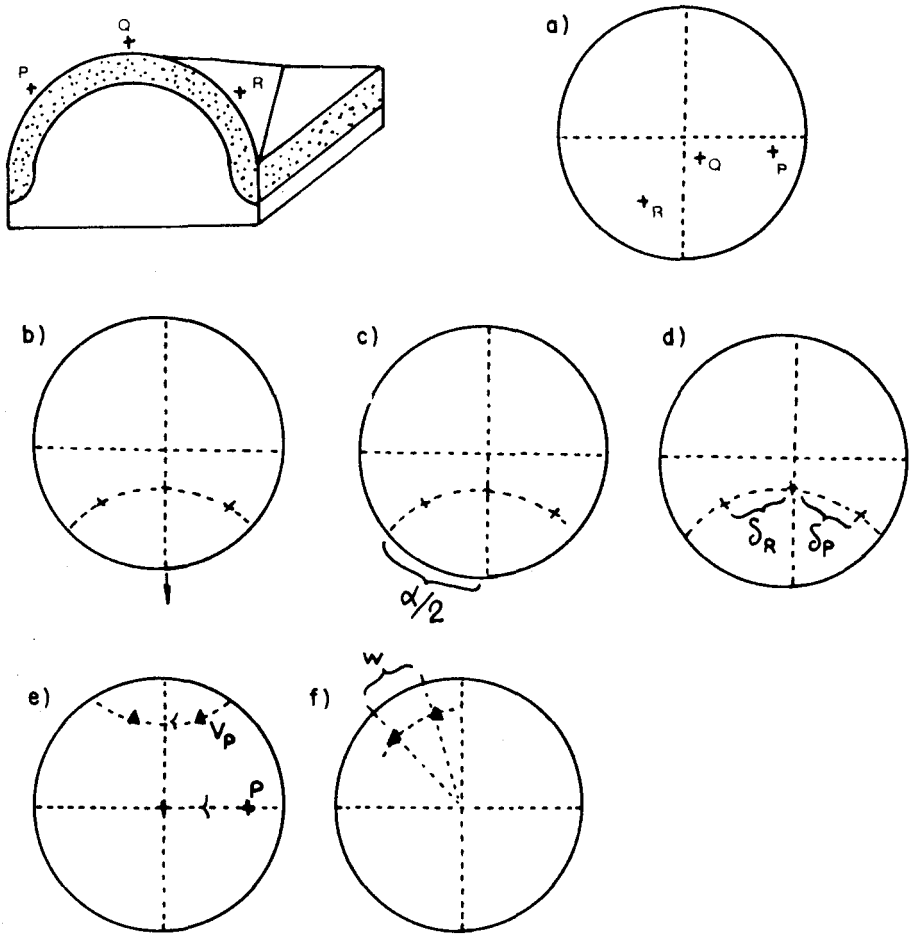


Fig. 5. Desarrollo de la corrección a utilizar a partir del esquema de la figura 4. a) Representación de los polos a S_s correspondientes a las muestras P, Q y R. b) Verificación de la alineación según un eje arco de circunferencia menor y trazado de la dirección del eje del cono. c) Medición del semiángulo apical del cono. d) Medición de los valores δ_P y δ_R sobre el arco de circunferencia menor. e) Corrección por la inclinación de cada muestra. f) Corrección por la rotación w para la misma muestra anterior.

Sea el caso de una muestra cuyo polo correspondiente a la estratificación se ubica en el Az 23 y buza 41° (punto A de la figura 6a); el vector paleomagnético correspondiente se localiza en el Az 178, con un buzamiento de 52° (punto V de la misma figura).

Primero: Se grafica la posición del polo de rotación, buzamiento 60° hacia el AZ 270 (punto P de la figura 6b) y se traza el arco de circunferencia máxima perpendicular a él (arco SN de la figura 6b).

Segundo: Se traza el arco de circunferencia máxima que pasa por el polo P y el punto A (arco TU de la figura 6c), el que pasa por el polo P y el punto V (arco XY en la misma figura).

Tercero: Se mide el valor angular comprendido entre los puntos A y V y aquéllos en los cuales los respectivos planos trazados en el *ítem* anterior intersecan el plano SN (puntos A' y V' de la figura 6d).

Cuarto: Teniendo en cuenta el sentido de rotación del eje (horario o antihorario, según corresponda) se desplazan los puntos sobre el arco SN tantos grados como suponga el caso. En el ejemplo, corresponde un giro de 30° en sentido horario. Téngase en cuenta que si la rotación ha sido en sentido horario para el bloque del cual provienen las muestras, la rotación que se debe introducir tiene sentido antihorario.

Como los datos representados se encuentran en el hemisferio inferior y el sentido del giro inicial fue antihorario, por lo que corresponde una corrección en sentido horario, el desplazamiento de los mismos sobre el plano de la red es hacia la derecha. No siempre es así; en algunos casos, y en función de las posiciones relativas de los polos de rotación y de los puntos a rotar, a desplazamientos en sentido horario pueden corresponder desplazamientos aparentes sobre la red en sentido antihorario.

Luego de la rotación, los puntos A' y V' pasan a ocupar las posiciones A'' y V'' de la figura 6e.

Quinto: Vuelven a trazarse ahora los arcos de circunferencias máximas que pasan por los puntos P y A'' y por P y V'' respectivamente (arcos EF y GH de la figura 6f) y sobre los mismos se mide el valor angular determinado en el *ítem* tercero, fijándose la posición de A''' y V''' tal como se ilustra en la figura 6f.

Si bien no sería estrictamente necesario realizar el traslado del polo de la estratifi-

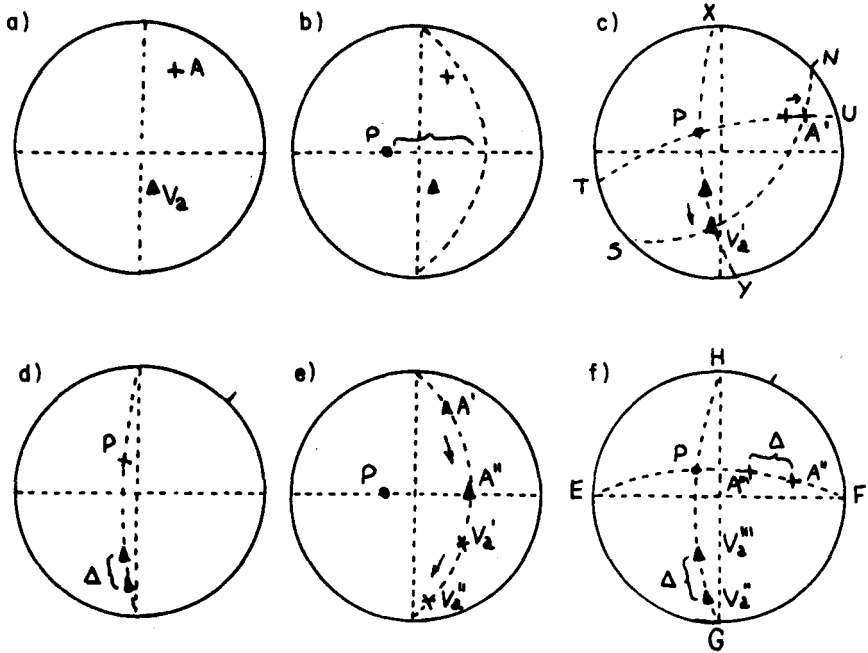


Fig. 6. Desarrollo de la corrección que debe aplicarse cuando existe rotación de uno de los bloques sobre el plano de falla. *a)* Localización del polo a Ss y del vector paleomagnético asociado (A y V_a respectivamente). *b)* Localización del polo de rotación (P) y del arco de circunferencia máxima ("ecuador") correspondiente a 90° del mismo. *c)* Trazado de los arcos que pasan por el polo P y los puntos A y V_a . *d)* Medición de los ángulos entre $A-A'$ y $V_a - V_a'$. El valor se mide directamente sobre el arco de circunferencia máxima trazado en el punto anterior. *e)* Rotación de los puntos A' y V_a' en sentido antihorario (el desplazamiento de los puntos se produce en este caso en sentido horario). Recuérdese que por convención la determinación del sentido de desplazamiento se hace teniendo en cuenta que el observador que imprime el giro se encuentra en el centro de la red. *f)* Trazado de los arcos que unen el polo P con los puntos A'' y V_a'' y determinación de la posición de los puntos A''' y V_a''' .

cación (puntos A a A''') el mismo sirve de control del procedimiento, ya que en la etapa final dicho punto A''' debe coincidir con el polo de la estratificación en el otro bloque estructural, el que ha sido considerado como "fijo" al calcular la rotación sobre el plano de la falla.

La corrección por tectónica

Si una vez efectuada la corrección correspondiente a la estructura observada y

consideradas las variaciones posibles, aún persistiera una diferencia en la posición del paleopolo obtenido con respecto al correspondiente a rocas de la misma edad, puede suponerse que se ha producido una deformación de mayor escala que la considerada, tal como plegamiento en estructuras de orden menor, rotación de bloques corticales en zonas de cizallamiento, fallamiento rotacional a escala regional, etcétera. Se propone la denominación de "corrección por tectónica" o "corrección tectónica" a la rotación necesaria en estos casos para hacer coincidir las posiciones polares observadas y las teóricas. Es importante tener en cuenta que esta corrección, si bien lleva a coincidencia ambas posiciones polares, puede no hacerlo (de hecho, la mayoría de las veces no lo hará) de acuerdo con la trayectoria real de la deformación, pues la misma desconoce (salvo que se puedan identificar parámetros geológicos de referencia) si la deformación presente se ha producido en un solo episodio o es el resultado de sucesivas deformaciones con ejes no coincidentes. Dicha corrección sólo nos indica, para decirlo con otras palabras, cuál es el camino más directo entre ambas posiciones polares. En algunos casos puede resultar de interés la descomposición de esta corrección en una componente vertical y otra horizontal. Las técnicas que permiten el cálculo de la rotación tectónica neta, así como algunas otras consideraciones de importancia sobre el tema pueden ser consultadas en MacDonald, 1980.

CONCLUSIONES

La representación estereográfica como herramienta de análisis y el estudio geológico del área muestreada brindarán la información necesaria para determinar la corrección estructural que debe aplicarse a las muestras recogidas con el fin de efectuar el estudio paleomagnético.

Si una vez realizada la corrección estructural apropiada persistiera aún una discrepancia entre las posiciones polares obtenidas y las teóricas, deben considerarse dos posibilidades:

a) Que la MRE aislada sea de carácter pretectónico, pero no de la edad asignada, pudiendo corresponder a cualquier momento entre la depositación y la deformación, en el cual se dieron las condiciones adecuadas para introducir una modificación en la remanencia magnética. Para verificar esta hipótesis sería suficiente la comparación de los resultados obtenidos con la traza de la curva de desplazamiento polar aparente durante el intervalo en cuestión.

b) Que la historia tectónica del área sea más compleja que lo supuesto por la corrección estructural y que hayan existido movimientos de mayor escala que la estructura considerada. Se ha propuesto denominar "corrección tectónica" a aquella utilizada para superponer a la corrección estructural aplicada y que sería necesaria para llevar a coincidencia los datos experimentales y los teóricos. Una vez determinada la corrección por tectónica, es necesario verificar si la misma presenta un carácter coherente, por sus características y mecanismo implícito, con el ambiente geotectónico al cual se asocia. En caso contrario, la causa de la discrepancia debe ser buscada en otras fuentes como magnetizaciones deficientemente aisladas, interpretación errónea de la estructura en el área de muestreo, mezcla de datos provenientes de distintas unidades estructurales, etcétera.

BIBLIOGRAFIA

- COGNE, J. P. and H. BONHOMMET, 1987. Paleomagnetism of deformed rocks: models and case histories. *EOS*, 68, 16, p. 297.
- GRAHAM, J. W., 1949. The stability and significance of magnetism in sedimentary rocks. *J. Geophys. Res.*, 54, 2, 131-167.
- MacDONALD, W., 1980. Net tectonic rotation. Apparent rotation and the structural tilt correction in paleomagnetic studies. *J. Geophys. Res.*, 85, B7, 3659-3669.
- McELHENNY, M. W., 1964. Statistical significance of the fold test in paleomagnetism. *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.* 8, 3, 338-340.
- SELLES MARTINEZ, J., 1988. La proyección estereográfica. Principios y aplicaciones en Geología Estructural. Asoc. Geol. Arg., Buenos Aires.