

Problemas de Geología Estructural

5. Rotaciones

Rosa Blanca Babín Vich¹. David Gómez Ortiz².

¹Departamento de Geodinámica. Facultad de Ciencias Geológicas.
Universidad Complutense de Madrid. José Antonio Novais, s/n. 28040-Madrid.

rosbabin@geo.ucm.es

²Área de Geología-ESCET. Universidad Rey Juan Carlos. Tulipán, s/n. 28933-Móstoles.

david.gomez@urjc.es

Resumen: la rotación de líneas o planos representa un ejercicio común en Geología Estructural que puede realizarse más fácilmente mediante proyección estereográfica que utilizando oras técnicas. Sin embargo, para ello es preciso conocer los diferentes métodos existentes en función de las características del eje de rotación, es decir, en función de que éste sea horizontal, vertical o inclinado. Se describen aquí los diferentes procedimientos acompañados de numerosos ejemplos prácticos.

Palabras clave: Eje de rotación. Ángulo de rotación. Sentido de rotación.

INTRODUCCIÓN

Para resolver algunos problemas en Geología Estructural, es necesario simular la rotación física en el espacio de un elemento estructural alrededor de un eje de orientación conocida. Esta rotación puede ser necesaria, por ejemplo, para conocer la orientación original de una serie plegada que actualmente está aflorando bajo una superficie de discordancia basculada. Será necesario rotar los elementos geométricos de la discordancia y del pliegue un ángulo determinado alrededor de un eje de rotación conocido, y de esta forma hallar la orientación inicial de la serie plegada.

Este proceso es bastante diferente a todo lo que se ha explicado hasta el momento, Babín y Gómez (2010 a, b, c y d), donde simplemente se movía el transparente alrededor de la chincheta colocada en el centro de la falsilla, para medir y proyectar los distintos datos estructurales. En este transparente teníamos un norte fijo, por tanto las orientaciones de líneas y planos nunca cambiaban con respecto a la falsilla de referencia.

Cuando rotamos una línea o un plano en el espacio, su orientación cambia con respecto a nuestra falsilla de referencia y este elemento estructural se reorienta en función de la rotación sufrida. Para efectuar una rotación o bien para definirla, es necesario conocer el **ángulo de rotación**, el **sentido de la rotación** (agujas del reloj,

contrario a las agujas del reloj), desde donde se está mirando ese sentido de giro (punto de vista) y la **orientación del eje de giro**. Por ejemplo: giro de 60° en sentido de las agujas del reloj, visto desde el norte, del plano con orientación $170^\circ-25^\circ E$, alrededor de un eje inclinado orientado $32^\circ/225^\circ$.

Existen distintos métodos para efectuar rotaciones de elementos estructurales. Aquí se va a utilizar el que se considera más sencillo de comprender y al mismo tiempo, más fácil de visualizar, aunque el alumno puede consultar otros libros de Geología Estructural donde se explican los pasos para llevar a cabo las rotaciones con distintos métodos.

En general, se usan dos procedimientos básicos para llevar a cabo una rotación:

- rotación alrededor de un eje vertical (la inmersión del eje es de 90°).
- rotación alrededor de un eje horizontal (la inmersión del eje es de 00°).

La rotación alrededor de un eje inclinado (inmersión del eje entre 00° y 90°) es más fácil de llevar a cabo mediante una combinación de rotaciones alrededor de ejes horizontales y/o verticales.

ROTACIÓN ALREDEDOR DE UN EJE VERTICAL

Es el tipo de rotación más sencillo. El eje de rotación se sitúa en el centro de la falsilla, que corresponde a la posición de cualquier línea vertical dentro del estereograma. Podemos hacernos una idea de lo que representa este tipo de rotación observando la figura 1. La rotación de una línea alrededor de un eje vertical da lugar al movimiento del punto que representa la línea a lo largo de un círculo menor que es coaxial con la primitiva. Este círculo menor no se corresponde con los círculos menores representados en la falsilla.

Para visualizar la situación, imaginar una línea inclinada con uno de sus extremos fijo en el eje de rotación vertical. Si esta línea gira alrededor de este eje, su extremo libre describe un cono vertical y circular que intersecta a la semiesfera inferior según un círculo menor. Esta línea tiene una nueva orientación después del giro, de forma que ha variado su sentido de inmersión, pero el ángulo de inmersión sigue siendo el mismo. En el caso de un plano, el ángulo de buzamiento se mantiene y solo cambia la dirección del plano después de efectuar el giro.

Para especificar el sentido de rotación, podemos indicar sentido de las agujas del reloj, dextral, derecho, etc. intuitivamente, cuando el giro es de derecha a izquierda, y al contrario cuando el giro es de izquierda a derecha (contrario a las agujas del reloj, sinistral, izquierdo, etc.).

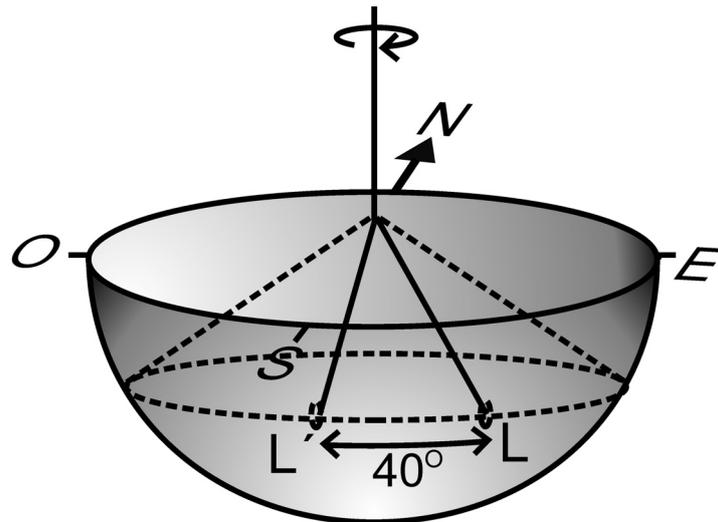


Figura 1. Rotación de una línea L un ángulo de 40° alrededor de un eje vertical, visto en el hemisferio inferior de la esfera.

Procedimiento

- Proyectar la línea, plano o polo correspondiente.
- Girar sobre la circunferencia primitiva la dirección del elemento elegido, contando el ángulo de rotación en el sentido indicado, a partir de la dirección. Marcamos la nueva dirección obtenida.
- Colocar la nueva dirección sobre un plano vertical de la falsilla (caso de una línea) o sobre el diámetro N-S (caso de un plano o su normal), y contar la misma inmersión anterior en el caso de línea o polo o bien el mismo buzamiento en el caso de un plano. Dibujar y leer la orientación del nuevo elemento después de la rotación.

Ejemplo: la orientación de una línea es $40^\circ/220^\circ$. Hallar su nueva orientación después de efectuar un giro de 50° en sentido de las agujas del reloj, alrededor de un eje vertical (Fig. 2).

- Marcar sobre la primitiva la dirección de la línea.
- Proyectar el punto que representa la línea (L). Mover sobre la primitiva la marca de la dirección 50° siguiendo el sentido que indica el problema. La nueva dirección de la línea será 270° ($220^\circ + 50^\circ$). Si el giro fuera en sentido contrario, se restarían los 50° .
- Colocando esta dirección sobre uno de los diámetros verticales, contar el valor de la inmersión (40°) y colocar la línea en su nueva posición (L'). Su orientación será $270^\circ/40^\circ$.

ROTACIÓN ALREDEDOR DE UN EJE HORIZONTAL

Como ayuda para visualizar la rotación de una línea alrededor de un eje horizontal, coger un lápiz con las dos manos y dejando fijo uno de los extremos, girar el otro alrededor de la horizontal. La línea que rota va cambiando de orientación según va rotando y va formando un cono en el espacio. Este cono tiene un eje horizontal que corresponde al eje de rotación.

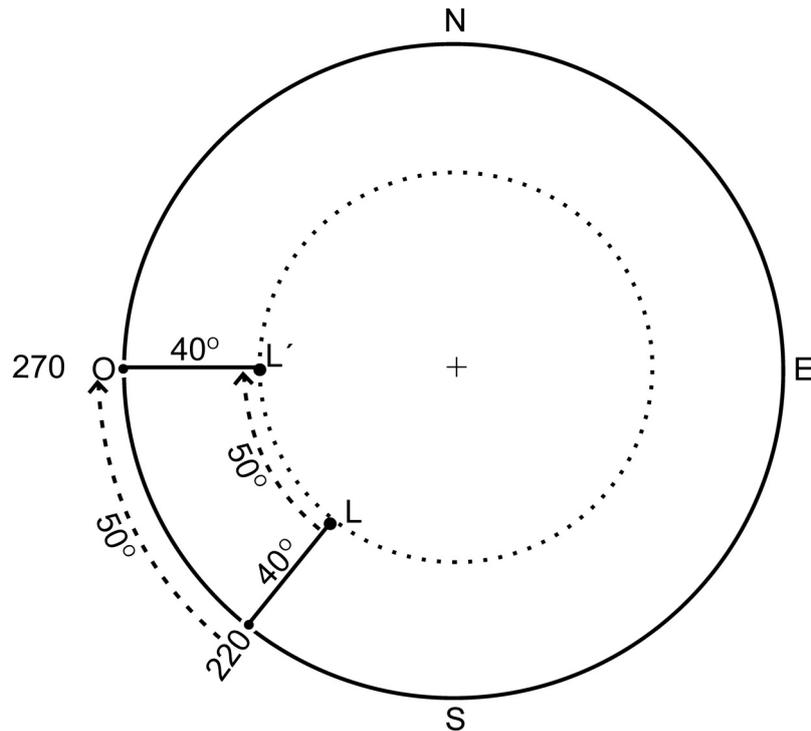


Figura 2. Rotación alrededor de un eje vertical. Ver texto para su explicación.

Como ya sabemos, los conos se proyectan como círculos menores. El eje de rotación ocupa el centro del círculo menor definido por la línea que rota, por tanto, si la rotación se efectúa a lo largo de los círculos menores de la falsilla, el eje de rotación debe estar situado en su centro, que corresponde a cualquiera de los polos norte o sur de la falsilla.

Cualquier línea horizontal, en este caso el eje de rotación, está situada sobre la circunferencia primitiva. Cuando al rotar un elemento estructural un ángulo determinado se pasa la primitiva y hay que continuar contando (“se sale de la falsilla”), el elemento estructural reaparecerá en el extremo diametralmente opuesto del estereograma. Para efectuar una rotación alrededor de un eje horizontal, el camino a seguir es el indicado en la figura 3 A, donde se explica el giro de un plano alrededor del eje N-S de la falsilla, que a su vez coincide con la dirección del plano que queremos rotar. El camino a seguir es el siguiente:

Procedimiento

- Proyectar sobre la primitiva la posición del eje de rotación.
- Proyectar la línea, polo o plano que se va a rotar.
- Girar el transparente hasta que el eje de rotación coincida con el diámetro N-S de la falsilla. Este eje estará situado sobre el polo norte o sur. En esta posición, el elemento estructural objeto del giro queda situado sobre un círculo menor de la falsilla.
- Mover sobre este círculo menor el ángulo indicado y en el sentido indicado. Marcar la nueva posición de la línea, polo o plano después del giro.

En el caso de que la rotación sea de un plano proyectado en proyección ciclográfica, el procedimiento es el mismo. Cuando el eje de giro está situado sobre el diámetro N-S, movemos puntos individuales del círculo mayor (plano) a lo largo de los círculos menores sobre los que se encuentran. Con estos nuevos puntos, buscando el círculo mayor que los contiene (moviendo el transparente sobre la falsilla) y hallamos la posición del plano rotado. Con mover dos puntos del plano inicial, es suficiente.

Si giramos un plano alrededor de un eje horizontal cuya dirección coincide con la del plano, solo cambiará el buzamiento del plano (Fig. 3 B). Si el eje de rotación no es paralelo a la dirección del plano, cambiarán tanto dirección como buzamiento del plano después de la rotación.

Durante la rotación, el polo de un plano se mueve la misma “distancia” angular y en el mismo sentido que los puntos correspondientes del círculo mayor, por tanto la rotación de un plano se puede hacer también moviendo su polo a lo largo del círculo menor correspondiente. Una estructura lineal que tiene una orientación fija con respecto al plano también se moverá la misma “distancia” angular en el mismo sentido a lo largo de su círculo menor, de forma que está contenida en el plano antes y después de la rotación.

En las rotaciones es crítico visualizar el sentido de la rotación. Si rotamos un plano con dirección N-S y buzando al este, 60° en sentido contrario a las agujas del reloj visto desde el norte, su buzamiento decrece (Fig. 3 A), mientras que si giramos en sentido de las agujas del reloj con el mismo punto de vista, el buzamiento aumenta. La rotación de una capa invertida debe pasar primeramente por la posición vertical antes de ser rotado hacia la posición horizontal.

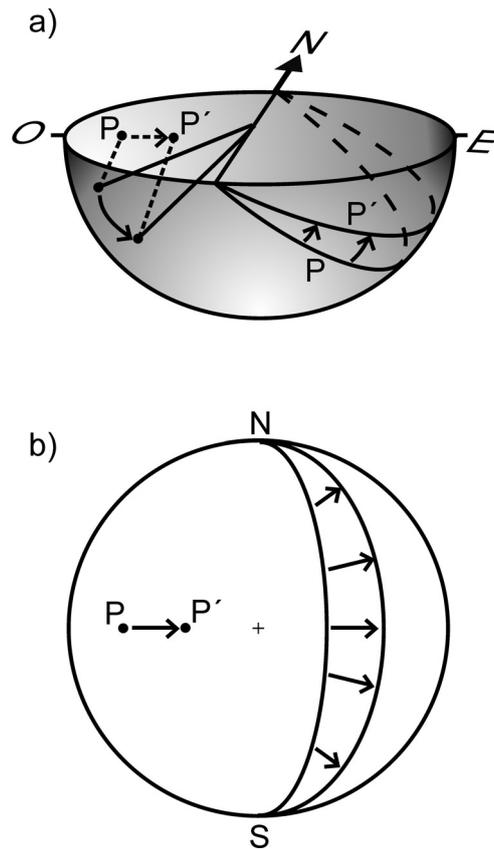


Figura 3. Rotación de un plano y de su polo alrededor de un eje horizontal con la misma dirección del plano (N-S). a) Visto en tres dimensiones. b) Estereograma en dos dimensiones.

Ejemplo: Girar el plano $N20^{\circ}E-40^{\circ}E$ alrededor de un eje horizontal de dirección 020° , una cuantía de 50° en sentido de las agujas del reloj visto desde el sur.

- Dibujar el plano y su polo y colocar su dirección sobre el diámetro N-S de la falsilla, de forma que estemos mirando desde el sur.
- En esta posición, mover al menos dos puntos del plano en el sentido indicado, a lo largo de los círculos menores en los que estén situados. Según el enunciado, debemos mover 50° de derecha a izquierda (Fig. 4).
- Con los nuevos puntos obtenidos, dibujar el plano rotado y leer su orientación: $020^{\circ}-90^{\circ}$. La dirección del plano no ha cambiado después de efectuar la rotación, ya que el eje de giro y el plano coinciden en dirección.
- Repetir el mismo proceso con el polo y verificar que plano y polo rotado están a 90° entre sí. El polo P' está sobre la primitiva (plano horizontal) como corresponde al polo de un plano vertical. Su dirección, 290° , está a 90° de la dirección del plano.

ROTACIÓN ALREDEDOR DE UN EJE INCLINADO

Cuando se gira una línea alrededor de un eje inclinado (eje de rotación) su orientación cambia, de forma que define un cono representado en el estereograma como un círculo menor. Una línea o un plano con una orientación inicial determinada, sufrirán un cambio completo de orientación después de la rotación.

Es posible efectuar esta rotación directamente, pero el método es difícil de visualizar. Es bastante más sencillo efectuar esta rotación en tres estadios sucesivos que son los siguientes:

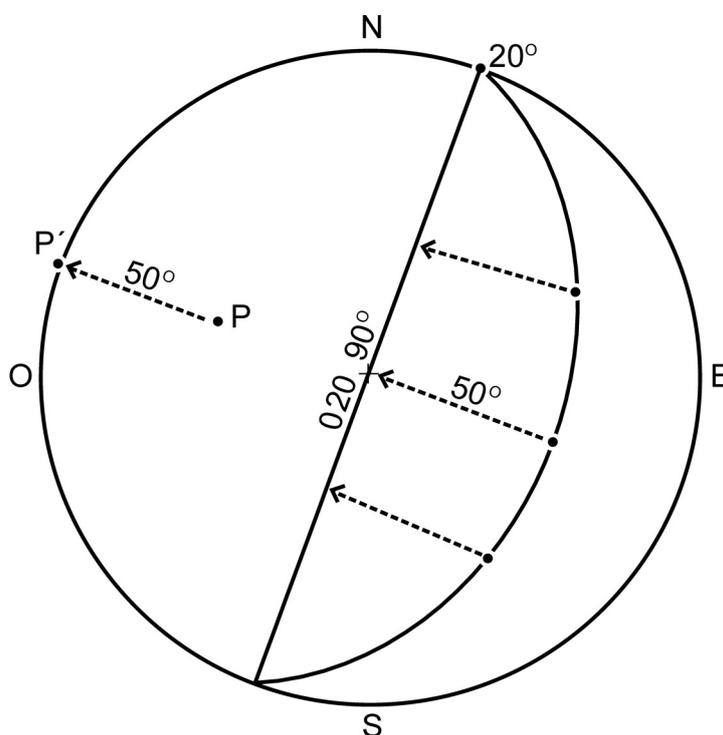


Figura 4. Rotación de un plano alrededor de un eje horizontal, coincidente con su dirección.

1º. Rotar el eje inclinado a la horizontal alrededor de un segundo eje, que es horizontal y ortogonal al eje inclinado. Para ello, colocamos el eje de giro sobre el diámetro E-O de la falsilla y lo movemos hasta la circunferencia primitiva, sobre el plano horizontal. Todos los elementos estructurales existentes en el estereograma, rotarán los mismos grados y en el mismo sentido a lo largo de su círculo menor, para mantener las relaciones angulares entre ellos.

2º. Efectuamos el giro pedido, en este caso alrededor de un eje horizontal, como se ha explicado anteriormente. Nuevamente, todos los elementos del estereograma se mueven los mismos grados y en el mismo sentido.

3º. El eje de giro se rota a su posición inclinada original llevándolo nuevamente sobre el diámetro E-O y una vez más, todos los elementos proyectados se mueven los mismos grados y en el mismo sentido a lo largo de sus círculos menores.

Ejemplo: la orientación del flanco de un pliegue es N60ºO-40ºSO. ¿Cuál será su orientación después de una rotación de 40º en sentido contrario a las agujas del reloj, mirando hacia el sentido de la inmersión, alrededor del eje del pliegue, orientado 30º/S80ºO? (Fig. 5).

- Dibujar el estereograma del eje del pliegue (eje de rotación) y el flanco.
- Girar el transparente y colocar el eje de giro sobre el diámetro E-O de la falsilla. En esa posición, llevarlo a la horizontal. El giro efectuado ha sido de 30º. El eje E pasa a la posición E', sobre la circunferencia primitiva.
- Girar los mismos 30º y en el mismo sentido, el flanco del pliegue, con dos puntos elegidos al azar. En el estereograma se han utilizado el eje del pliegue y un punto A que pasa a la posición A'. Obtenemos la nueva orientación del flanco, con el eje del pliegue ya horizontal (Fig. 5 A).
- Llevar el eje de giro E' (ya horizontal) al diámetro N-S de la falsilla y efectuar la rotación de 40º en el sentido indicado, alrededor de un eje horizontal. Los puntos elegidos llegan a la circunferencia primitiva y entran por el punto diametralmente opuesto. Obtenemos la nueva posición del flanco del pliegue después de giro (Fig. 5 B).
- Una vez terminada la rotación, colocar nuevamente el eje de giro sobre el diámetro E-O de la falsilla y volverlo a su posición inclinada original. El flanco anteriormente obtenido se moverá los mismos grados en el mismo sentido, nuevamente a partir de dos puntos, uno de ellos el eje del pliegue. Esta posición del flanco nos da la nueva orientación, después de efectuar el giro: N20ºE-31ºO. En el diagrama corresponde al plano nombrado como "4 solución".

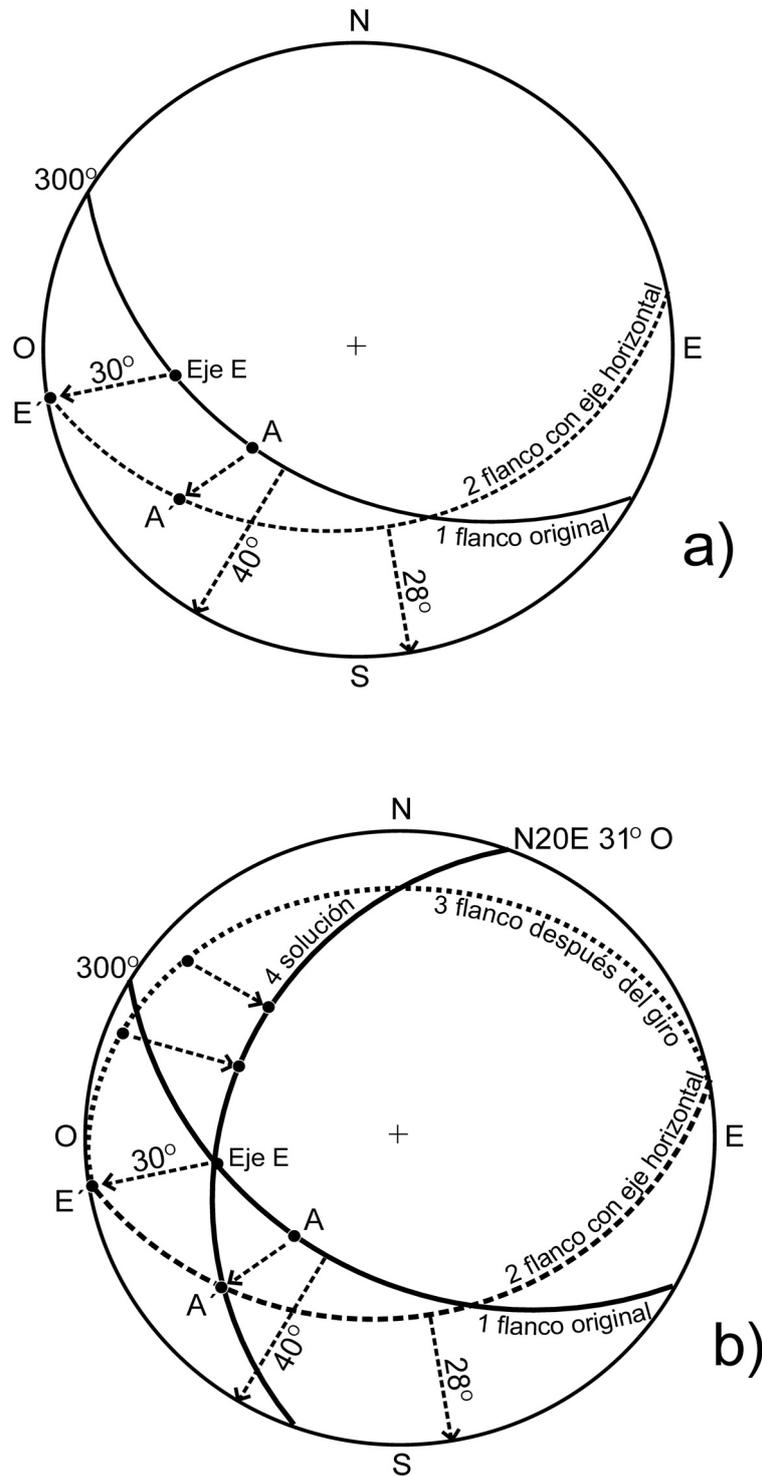


Figura 5. Rotación alrededor de un eje inclinado. Ver texto para su explicación.

CONCLUSIONES

Las rotaciones alrededor de un eje de orientación conocida, sea este horizontal, vertical o inclinado, son sencillas de resolver utilizando la proyección estereográfica. Se

pueden restituir series a su posición original, deducir antiguas direcciones de corriente e incluso, como se verá en el capítulo de fallas, conocer posiciones de elementos estructurales en el bloque girado de una falla rotacional.

Para definir correctamente una rotación en el espacio es necesario dar el valor del ángulo de rotación, su sentido y el punto de vista desde el cual estamos efectuando ese giro.

PROBLEMAS

Problema 1

Hallar la nueva orientación del plano $N30^{\circ}O-40^{\circ}NE$ y de su polo, después de girarlo 40° en el sentido de las agujas del reloj, alrededor de un eje vertical.

- Dibujar el estereograma correspondiente a ambos, polo (P) y plano (Fig.6).
- Contar sobre la primitiva los 40° correspondientes al giro, a partir de la dirección del plano y del sentido de inmersión del polo respectivamente.
- Con las nuevas direcciones obtenidas, pintar el plano rotado, conservando el buzamiento anterior y el polo, con su inmersión correspondiente.
- Leer las nuevas orientaciones del polo y el plano: $280^{\circ}/50^{\circ}$ y $010^{\circ}-40^{\circ}E$.

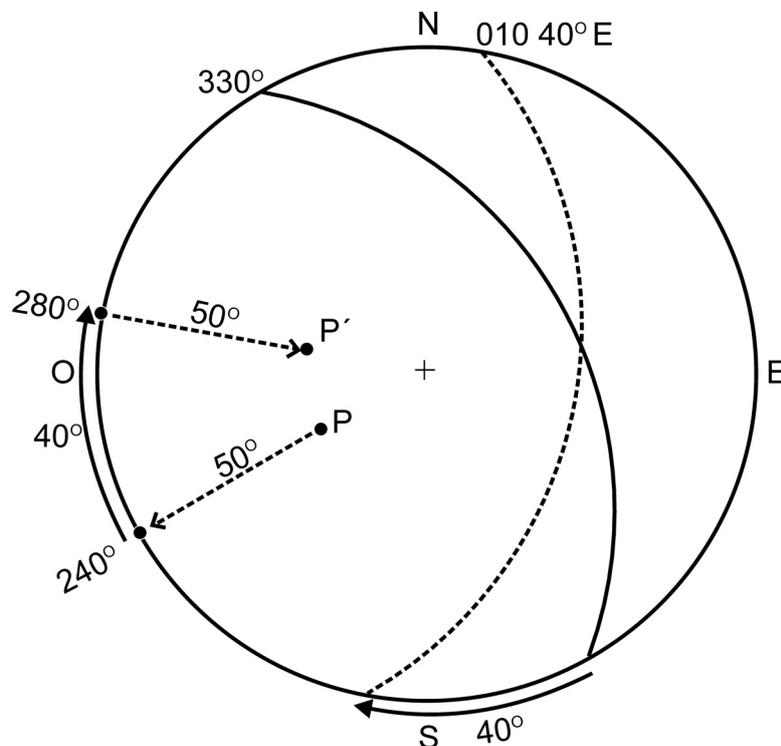


Figura 6. Resolución del problema 1. Ver texto para su explicación.

Problema 2

La orientación de una línea es $35^\circ/S50^\circ E$. ¿Cuál será su nueva orientación después de haber girado 40° en sentido contrario a las agujas del reloj, alrededor de un eje vertical? (Fig. 7).

- Dibujar la proyección de la línea (L) en el transparente.
- Contar sobre la primitiva a partir del sentido de inmersión de la línea, los 40° correspondientes a la rotación. El nuevo sentido de inmersión de esta línea es de 090° .
- Colocado el nuevo sentido de inmersión sobre un diámetro vertical, contar el ángulo de inmersión correspondiente (35°) y dibujar la nueva posición de la línea (L'). Su orientación es $090^\circ/35^\circ$.

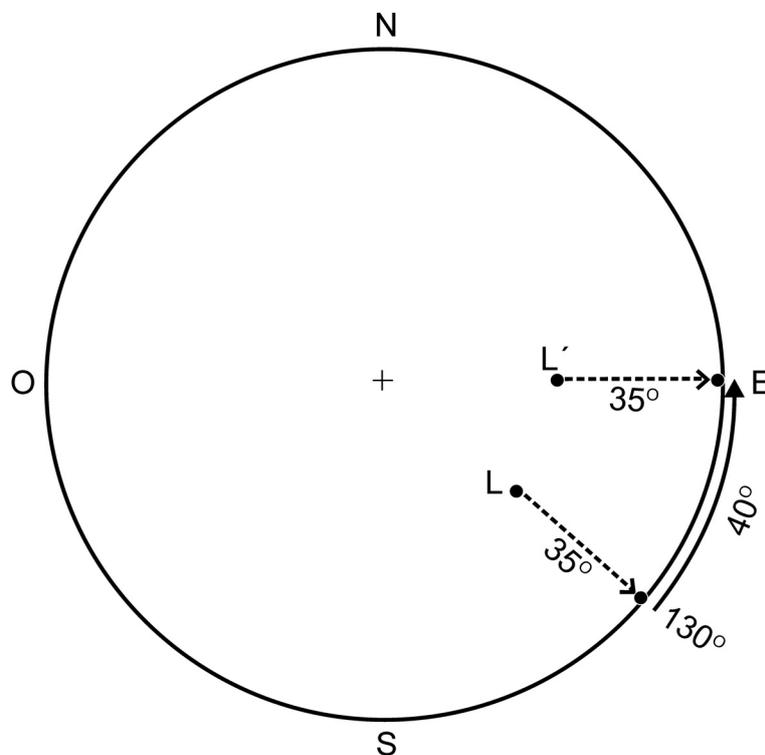


Figura 7. Resolución del problema 2. Ver texto para su explicación.

Problema 3

En una serie sedimentaria (SS) orientada $34^\circ/132^\circ$ se observa una estratificación cruzada planar (EC), de orientación $244^\circ/20^\circ$. Calcular la orientación de la estratificación cruzada antes del basculamiento de la serie sedimentaria.

- Dibujar la proyección de ambos planos, bien en ciclográfica o en polar (Fig. 8). En este caso, se ha resuelto en proyección polar.
- Antes del basculamiento, la serie sedimentaria estaba horizontal. Si rotamos esta serie hasta ponerla horizontal, la estratificación cruzada rotará los mismos grados y en el mismo sentido que la serie sedimentaria. Esta nueva posición será la que tenía antes del basculamiento.
- Colocar la dirección de la serie sedimentaria sobre el diámetro N-S de la falsilla. Su polo se situará sobre el diámetro E-O (SS).
- Rotar la serie sedimentaria alrededor de un eje de giro que coincide con su dirección, un ángulo de 34° que es el valor del buzamiento. De esta forma el plano está horizontal y coincide con la circunferencia primitiva y su polo está vertical en el centro de la falsilla (SS').
- En esta misma posición, rotar la estratificación cruzada (EC) los mismos 34° y en el mismo sentido, moviendo dos puntos del plano a lo largo de su círculo menor, o bien el polo del plano hasta la posición EC'.

Dibujar en proyección ciclográfica la posición de la estratificación cruzada antes del basculamiento, y medir su orientación: $018^\circ-48^\circ\text{O}$.

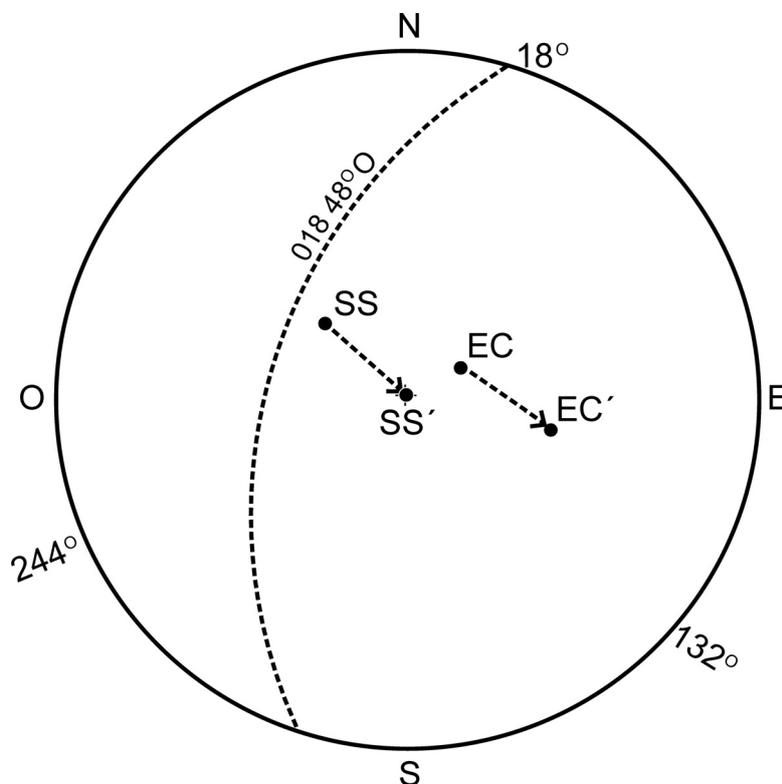


Figura 8. Resolución del problema 3. Ver texto para su explicación.

Problema 4

Una secuencia estratificada invertida está orientada N30°O-40°SO. En uno de los planos de estratificación aparece una lineación con un cabeceo de 30°NO. Calcular la orientación de la lineación cuando la estratificación estaba horizontal.

Antes de resolver el problema, pensar en la posición de la línea cuando la estratificación estaba horizontal. ¿Cuál será la inmersión de la línea en este supuesto?.

- Dibujar el plano de estratificación y la posición de la lineación (L) dentro del plano (Fig. 9).
- La secuencia está invertida. Para poner este plano horizontal primero hay que ponerlo vertical y después, con la secuencia ya en posición normal, llevarla a la horizontal. Rotamos el plano a la horizontal, pasando primero por la vertical. El polo del plano se coloca en el centro de la falsilla (P').
- La misma rotación se aplica a la lineación, que se moverá a lo largo del círculo menor en que está contenida, y se lee su posición inicial en el estereograma: L': 360°/00°, por tanto la lineación está horizontal y su sentido de inmersión será de 360° o bien, 000°.

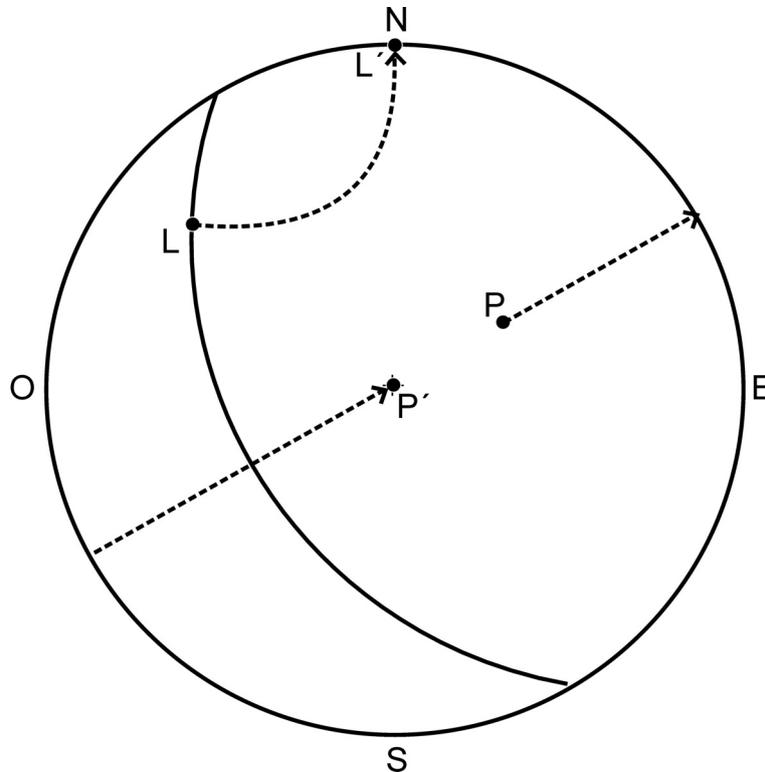


Figura 9. Resolución del problema 4. Ver texto para su explicación.

Problema 5

Una lineación mineral tiene una inmersión de 30° hacia los 220° . Calcular su nueva orientación después de una rotación de 30° en el sentido de las agujas del reloj, mirando desde el sur, alrededor de un eje horizontal de dirección $N10^\circ E$.

- Colocar en el estereograma la lineación mineral y el eje de giro sobre la primitiva (Fig. 10).
- Con el eje de giro sobre el diámetro N-S de la falsilla, efectuar el giro con los datos del problema. La línea L pasa a la posición L'.
- Leer la orientación de la nueva línea: $229^\circ/12^\circ$.

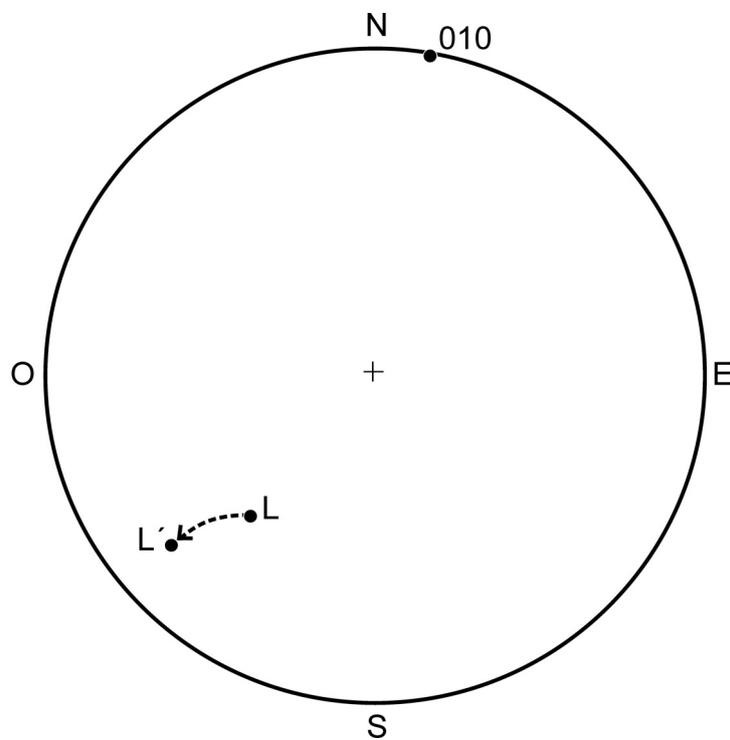


Figura 10. Resolución del problema 5. Ver texto para su explicación.

Problema 6

La orientación de un plano es $N20^\circ E-20^\circ SE$. ¿Cuál será su orientación después de una rotación de 30° en sentido contrario a las agujas del reloj, visto desde el sur, alrededor de un eje paralelo a la dirección? ¿Cuál será su orientación si la rotación es en sentido contrario?

- Dibujar el plano en el estereograma (Fig. 11).

- Dado que el eje de rotación tiene la misma dirección que el plano, se coloca esta dirección sobre el diámetro N-S de la falsilla, y se hace la rotación que indica el problema.
- En el primer caso, visto desde el sur, el movimiento correspondiente al giro es de izquierda a derecha, por tanto pasamos la primitiva y seguimos contando hasta completar los 30°. En el segundo caso, la rotación es al contrario, de derecha a izquierda.
- Leer las soluciones correspondientes a cada uno de los casos y observar que la dirección del plano no varía después de la rotación, únicamente cambia el valor del ángulo de buzamiento.

Primer caso: 020°-10°O o bien N20°E-10°O

Segundo caso: 020°-50°E

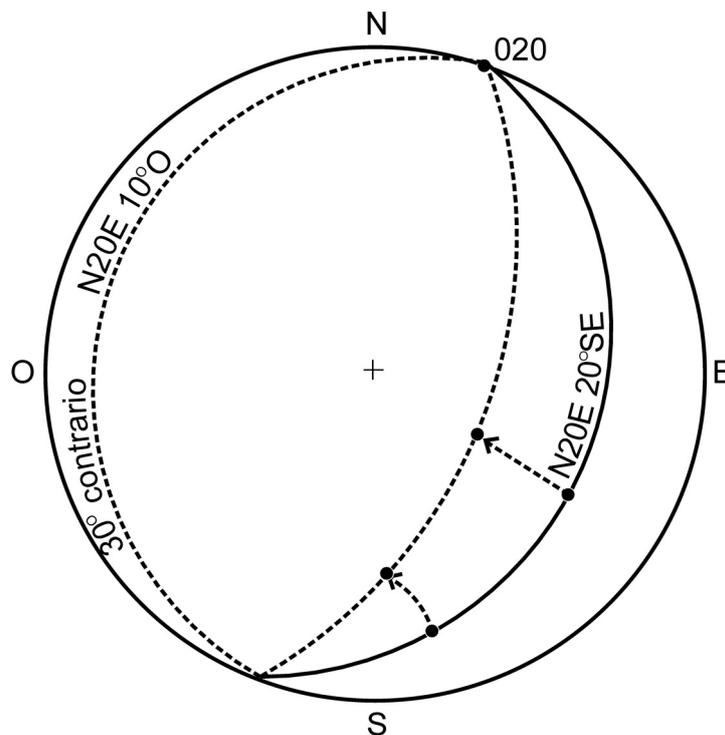


Figura 11. Resolución del problema 6. Ver texto para su explicación.

Problema 7

La serie situada sobre una discordancia angular, tienen una orientación de N10°E-50°O. La serie inferior está orientada N40°E-80°E. ¿Cuál era la orientación de la serie inferior antes del basculamiento de la discordancia?

Considerar en primer lugar, que las capas por encima de una discordancia, tienen la misma orientación que esta, y que la superficie de discordancia originalmente era horizontal. Para ponerla en su posición original, rotaremos la discordancia a la horizontal un ángulo igual al valor de su buzamiento, alrededor de un eje paralelo a la dirección de la discordancia.

- Proyectar la discordancia y la serie inferior mediante círculos mayores o con polos (Fig. 12). En este caso, el problema se ha resuelto mediante proyección ciclográfica.
- Colocar la dirección de la discordancia (eje de giro) coincidiendo con el diámetro N-S de la falsilla. Hacer una rotación de 50° (valor del buzamiento) alrededor de un eje horizontal que es la dirección del plano de discordancia, y poner este plano horizontal, coincidiendo con la circunferencia primitiva. Si trabajamos con polos, tener en cuenta que el polo de un plano horizontal es una línea vertical, situada en el centro de la falsilla.
- Rotar la serie inferior el mismo ángulo y en el mismo sentido que la discordancia. Este nuevo plano nos da la orientación de la serie inferior antes del basculamiento de la discordancia: $045^\circ-58^\circ\text{NO}$.

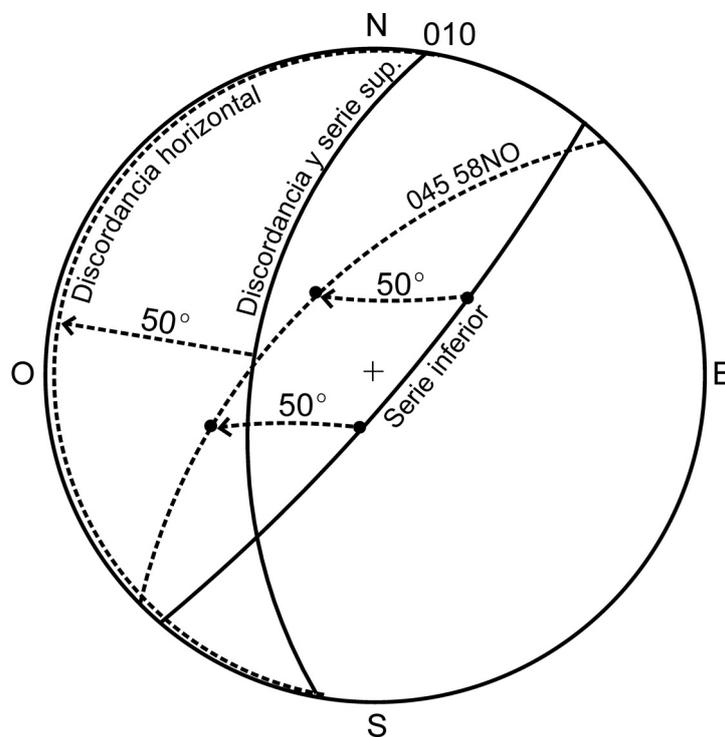


Figura 12. Resolución del problema 7. Ver texto para su explicación.

BIBLIOGRAFÍA

- Babín Vich, R. B. y Gómez Ortiz, D. 2010 a. Problemas de Geología Estructural. 1. Conceptos generales. *Reduca (Geología). Serie Geología Estructural, 2 (1): 1-10.*
- Babín Vich, R. B. y Gómez Ortiz, D. 2010 b. Problemas de Geología Estructural. 2. Orientación y proyección de planos en el espacio. *Reduca (Geología). Serie Geología Estructural, 2 (1): 11-23.*
- Babín Vich, R. B. y Gómez Ortiz, D. 2010 c. Problemas de Geología Estructural. 3. Orientación y proyección de líneas en el espacio. *Reduca (Geología). Serie Geología Estructural, 2 (1): 2 (1): 24-40.*
- Babín Vich, R. B. y Gómez Ortiz, D. 2010 d. Problemas de Geología Estructural. 4. Proyección polar de un plano. Proyección π . *Reduca (Geología). Serie Geología Estructural, 2 (1): 2 (1): 41-56.*

BIBLIOGRAFÍA DE CONSULTA

- Davis, G. H. 1984. Structural Geology of rocks and Regions. Wiley & Sons. 492 pp.
- Lheyson, P. R.; Lisle, R. J. 1996. Stereographic projection techniques in Structural Geology. Butterworth-Heinemann Ltd. Oxford. 104 pp.
- Marshak, S & Mitra, G. 1982. Basic methods of structural geology. Prentice & Hall. 446 pp.
- Phillips, F. C. 1971. The use of stereographic projection in Structural Geology. Edward Arnol. London. 90 pp.
- Ragan, D. M. 1987. Geología Estructural. Ed. Omega. Barcelona. 210 pp.
- Turner, F. & Weiss, L.R. 1963. Structural analysis of metamorphic tectonites. McGraw Hill. New York. 545 pp.

Recibido: 18 noviembre 2009.

Aceptado: 22 diciembre 2009.