

Problemas de Geología Estructural

7. Pliegues

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-ES CET. Universidad Rey Juan Carlos. Tulipán, s/n. 28933-Móstoles.

david.gomez@urjc.es

Resumen: Las estructuras plegadas constituyen la deformación dúctil más frecuente en Geología, y por tanto es uno de los elementos más representados en Geología Estructural. El empleo de la proyección estereográfica para representar elementos tales como flancos del pliegue, líneas de charnela o planos axiales resulta muy útil por su facilidad para obtener las relaciones angulares entre estos elementos. Además, cuando existe superposición de diversas fases de plegamiento y/o el número de pliegues a representar es elevado, la proyección estereográfica constituye la técnica de mayor utilidad.

Palabras clave: Pliegue. Flanco. Charnela. Plano axial. Superposición de pliegues.

PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LAS SUPERFICIES PLEGADAS. DEFINICIONES

Una superficie plegada se caracteriza por su forma continua curvada, cóncava o convexa. Esta estructura será visible en todas aquellas rocas que presenten superficies planares, como es la estratificación en rocas sedimentarias o la foliación en rocas metamórficas, y hayan sufrido una o varias fases de plegamiento.

Los pliegues son manifestaciones de la deformación dúctil en la superficie de la tierra, y se forman en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas como respuesta a los esfuerzos aplicados asociados con movimientos de placas y formación de cinturones montañosos. Su geometría es variable y refleja la reología de la roca, las condiciones de deformación y el radio de la deformación.

Aparecen a todas las escalas como estructuras aisladas o formando parte de un sistema de plegamiento, y son el resultado de una deformación continua. Su afloramiento en una topografía determinada da lugar a gran diversidad de formas, siendo un problema a menudo difícil el reconocer los distintos diseños de corte obtenidos para el mismo pliegue, según sea la dirección del corte. Como ejemplo, podemos considerar un conjunto de pliegues aproximadamente cilíndricos (Fig. 1). Un

corte perpendicular al eje del cilindro, dibuja una sección circular de curvatura constante. Un corte vertical, produce en dos dimensiones una sección elíptica y un corte horizontal, equivalente a un mapa, dibuja otra sección elíptica de distinta amplitud y curvatura que la anterior.

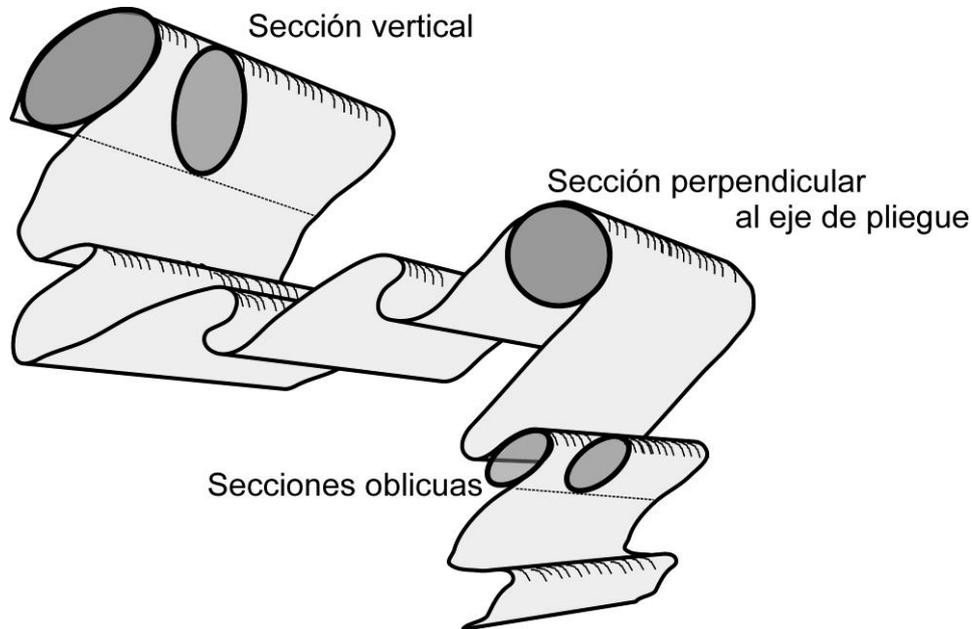


Figura 1. Secciones circulares y elípticas, resultantes de cortes del pliegue con planos de distinta orientación.

Dado que existe variación de curvatura según la orientación del corte efectuado, la dificultad para el análisis de pliegues en tres dimensiones puede ser importante. La proyección estereográfica ayuda a este análisis mediante el estudio de las orientaciones de los distintos elementos determinantes en la descripción de los pliegues, que junto con su forma, van a definir completamente el pliegue. Estos elementos son los siguientes:

- **Flancos.** Partes de la superficie plegada comprendidas entre dos zonas de charnela sucesivas.
- **Línea de charnela.** Línea de máxima curvatura de la superficie plegada.
- **Eje de pliegue.** Línea imaginaria, que moviéndose paralelamente a sí misma en el espacio, genera la superficie plegada. Tiene orientación, pero no localización. En pliegues cilíndricos coincide con la línea de charnela.
- **Superficie axial o Plano axial.** Superficie que contiene a las sucesivas líneas de charnela de todos los estratos plegados. Para su estudio, se asimila a un plano.
- **Ángulo interflancos.** Ángulo que forman entre sí los dos flancos del pliegue, medido en un plano perpendicular a ellos. De los dos ángulos posibles, agudo y

obtuso, el ángulo interflancos es el que contiene al plano axial del pliegue. Si no se conoce la orientación del plano axial, se asimila al plano bisector de este ángulo en una de sus dos posibilidades: mayor o menor de 90° . Se elegirá el que proceda en función de las características del pliegue.

Conocidas las orientaciones de estos elementos geométricos, podemos definir perfectamente el pliegue, su vergencia, simetría, forma, etc. Es importante tener en cuenta que la proyección estereográfica no va a distinguir entre un anticlinal y un sinclinal que tengan flancos con la misma orientación, simplemente nos va a definir su forma y la orientación de sus elementos en el espacio.

Para orientar en el espacio los flancos del pliegue, mediremos en el campo dirección y buzamiento como hacemos con cualquier plano, o bien sentido de buzamiento y buzamiento. De la misma forma orientamos la superficie axial del pliegue, ya que para nuestro estudio se va a asimilar a un plano.

En un pliegue cilíndrico, la línea de charnela y el eje del pliegue tendrán la misma orientación, que vendrá definida bien mediante dirección e inmersión, dirección y cabeceo sobre el plano axial del pliegue, como línea de intersección de los flancos del pliegue, etc. Son válidos todos los métodos conocidos para determinar la orientación de una línea en el espacio.

A continuación, se van a exponer los procedimientos para obtener la orientación de los distintos elementos del pliegue, utilizando los datos obtenidos en el campo y su representación en proyección estereográfica.

MEDIDA DE LA ORIENTACIÓN DE LA LÍNEA DE CHARNELA DEL PLIEGUE

En muchas ocasiones, el afloramiento no permite medir directamente la línea de charnela, porque el pliegue no está expuesto de forma tridimensional. Si existe algún relieve local que permita la exposición del pliegue en tres dimensiones, se podrá medir directamente la orientación de la línea de charnela.

En pliegues cilíndricos, la orientación de la línea de charnela y del eje del pliegue coinciden, por tanto se habla de eje de pliegue como concepto más universal dentro del propio pliegue. En el caso de los pliegues cónicos, no existe el concepto de eje de pliegue tal como se ha enunciado, por tanto se hablará de orientación de línea de charnela a la hora de definir la geometría del pliegue.

Para obtener la orientación de la línea de charnela/eje de pliegue, se miden en el campo superficies de estratificación (dirección y buzamiento) correspondientes a los dos flancos, como mínimo, una medida de cada flanco. El procedimiento es el siguiente:

- Proyectamos las medidas obtenidas en el campo para los flancos del pliegue.
- Estos planos se cortan en un punto. Este punto representa su línea de corte, por tanto es la línea de charnela del pliegue. Medimos su dirección, inmersión y/o cabeceo sobre cada uno de los planos de estratificación proyectados.

Si resolvemos el problema mediante proyección polar:

- Proyectamos los polos correspondientes a las medidas de los dos flancos.
- Buscamos el círculo mayor que contiene a los polos.
- El polo de este círculo mayor corresponde a la línea de charnela del pliegue. Medimos su orientación.

Cuando existen muchas medidas de estratificación en ambos flancos y zona de charnela, es posible que todos los círculos mayores correspondientes a estas medidas no se corten exactamente en el mismo punto, pero sí en puntos muy próximos que nos definen un área muy pequeña. Tomamos como línea de charnela el punto medio de esta área. En proyección polar, no todos los polos van a estar exactamente en el mismo plano. Ajustamos los polos lo más aproximadamente posible a un círculo mayor, y su polo definirá la línea de charnela.

Ejemplo 1. En un área de escaso afloramiento, se observan dos flancos de un pliegue con orientaciones: $090^{\circ}-24^{\circ}\text{S}$ y $N30^{\circ}\text{E}-42^{\circ}\text{NO}$. Hallar la orientación de la línea de charnela del pliegue.

- Siguiendo el procedimiento anteriormente enunciado, proyectamos ambos flancos, bien mediante sus círculos mayores o en proyección polar (Fig. 2).
- El punto de corte de ambos círculos (línea de corte de ambos flancos), es la línea de charnela, o bien el polo del plano que contiene a los dos polos de los flancos.
- Leemos la orientación correspondiente y los ángulos de cabeceo sobre los flancos.

Línea de charnela (β): $234^{\circ}/14^{\circ}$

Cabeceos sobre los flancos: 38°O y 29°S .

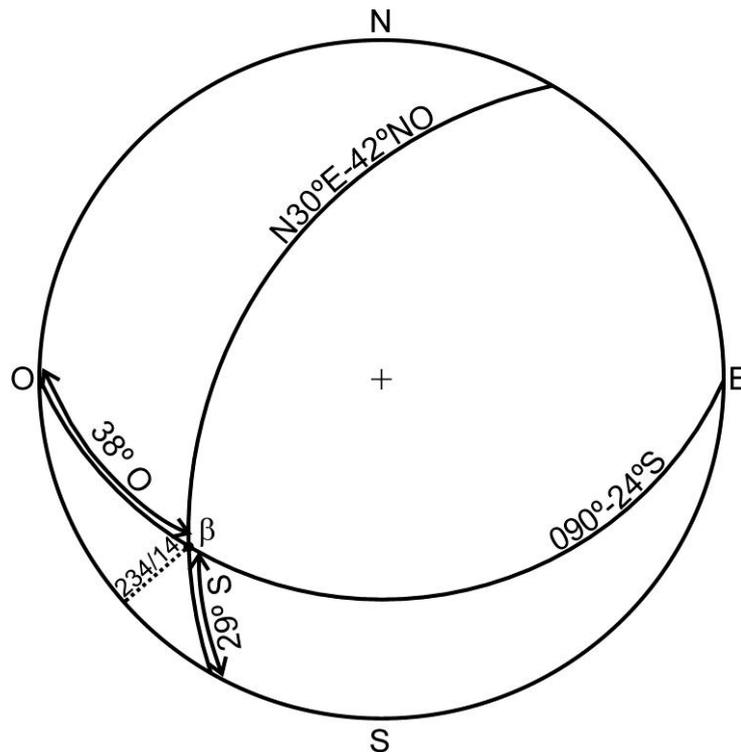


Figura 2. Resolución del ejemplo 1 del texto, mediante proyección ciclográfica. Ver texto para su explicación.

MEDIDA DE LA ORIENTACIÓN DEL PLANO AXIAL DEL PLIEGUE

Hay que recordar que para dibujar un plano en proyección estereográfica cuando su orientación no es conocida, es necesario partir de dos líneas perfectamente orientadas pertenecientes a este plano, bien sean dos buzamientos aparentes u otra dos líneas contenidas en el plano. Proyectadas estas dos líneas, el plano buscado será aquel círculo mayor que las contenga.

En el caso del plano axial de un pliegue, sabemos que contiene a la línea de charnela, pero es necesario conocer una segunda línea para poder orientar el plano en el espacio. Si no podemos obtener este dato en el afloramiento, suponemos, aunque no siempre es cierto, que el plano axial es el plano bisector del ángulo formado por los dos flancos del pliegue (ángulo interflancos). Conocido este ángulo y su punto medio, el plano axial será aquel que contenga a la línea de charnela y a este punto medio. La forma de proceder es la siguiente:

- Proyectamos los dos flancos del pliegue como en el caso anterior, y la línea de charnela (β) será la línea de corte de los dos flancos.
- Dibujamos el plano perpendicular a los dos flancos para poder medir el ángulo entre ellos, de la siguiente manera:

- ✓ Colocamos la línea de charnela sobre el diámetro E-O de la falsilla y dibujamos el plano que está a 90° de ella, contados sobre este diámetro, o bien.
- ✓ Dibujamos los polos correspondientes a los dos flancos y el plano que los contiene. Este plano es perpendicular a los dos flancos.
- En este plano, colocado sobre un círculo mayor, contamos el valor del ángulo interflancos. Hay que tener en cuenta que siempre van a existir dos ángulos, uno agudo y otro obtuso. El estilo del pliegue nos dirá cual de los dos ángulos es el válido en cada caso.
- Marcamos el punto medio del ángulo. Con este punto y la línea de charnela dibujamos el plano que los contiene, que corresponde al plano axial del pliegue, y medimos su orientación.

Ejemplo 2. Con los mismos datos del problema anterior, hallar la orientación del plano axial del pliegue. En el campo se ha visto que los planos axiales tienden a la vertical.

- Continuamos con el estereograma anterior, y dibujamos el plano perpendicular a los dos flancos por cualquiera de los procedimientos expuestos (Fig. 3).
- A lo largo de este plano contamos el valor del ángulo interflancos, en este caso para el ángulo obtuso, ya que el plano axial se acerca a la vertical.
- Con el punto medio de este ángulo (133°) y la línea de charnela, dibujamos el plano axial del pliegue, que tiene una orientación de $054^\circ-82^\circ\text{SE}$.

Observar en la figura, que el plano axial correspondiente al ángulo interflancos agudo, tiene un ángulo de buzamiento pequeño, está próximo a la horizontal, por tanto no satisface las condiciones del problema.

ESTEREOGRAMAS CORRESPONDIENTES A PLIEGUES CILÍNDRICOS

Si dividimos la superficie de un pliegue cilíndrico en porciones, cada una de ellas contiene una línea que es paralela al eje del pliegue. Dos planos tangentes a la superficie plegada, se cortarán según una línea paralela al eje del pliegue.

Todas las medidas de estratificación tomadas en la superficie plegada, corresponden a una serie de círculos máximos que representan las orientaciones de esta superficie en diferentes puntos del pliegue, y todos ellos se cortan en un punto común que representa el eje del pliegue. Este punto se identifica con la letra griega β .

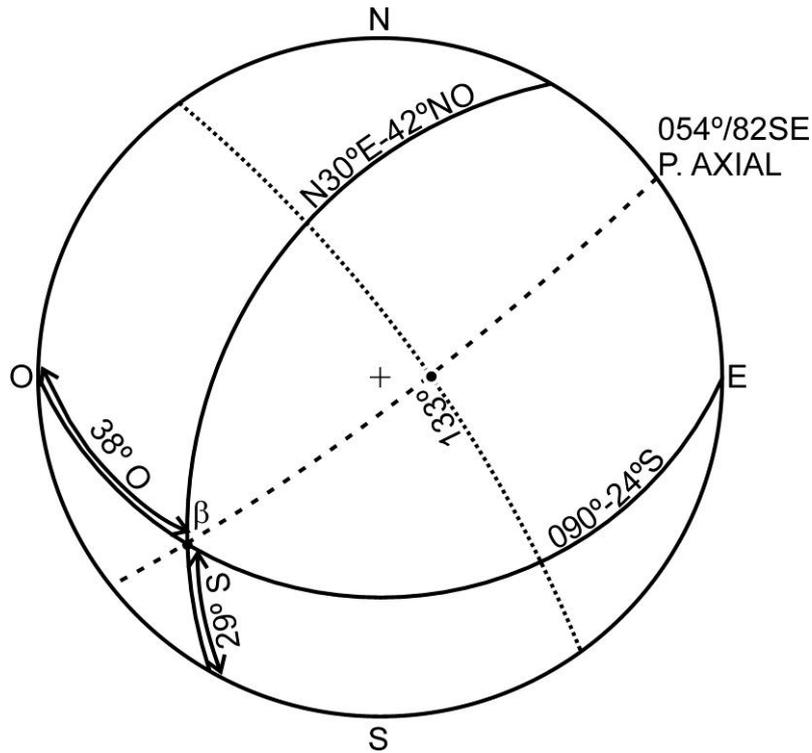


Figura 3. Resolución del ejemplo 2 del texto, mediante proyección ciclográfica. Ver texto para su explicación.

En la práctica, los pliegues reales no son perfectamente cilíndricos, por tanto los círculos máximos no se cortan en un punto común y la orientación del eje del pliegue puede ser subjetiva. En este caso, es aconsejable realizar un diagrama de polos con las medidas obtenidas en el afloramiento, conocido como diagrama π . El círculo mayor que contiene a todos los polos, se conoce como círculo π .

En un pliegue cilíndrico, cada uno de los polos es perpendicular al eje del pliegue, por tanto los polos son paralelos a un plano perpendicular al eje del pliegue. Todos los polos se disponen aproximadamente sobre un mismo círculo mayor, cuyo polo representa la orientación del eje del pliegue / línea de charnela (Fig. 4).

Un diagrama π puede darnos más información acerca de la forma del pliegue. Por ejemplo, en un pliegue con charnela redondeada, la densidad de puntos será uniforme a lo largo del círculo π . En el caso de un pliegue con flancos planares y charnela angular, aparecerán dos concentraciones máximas de puntos correspondientes a los dos flancos y el ángulo entre estos máximos nos define el valor del ángulo interflancos. Los modelos de estereograma pueden ser muy variados según la forma y geometría del pliegue (Babín y Gómez, 2010).

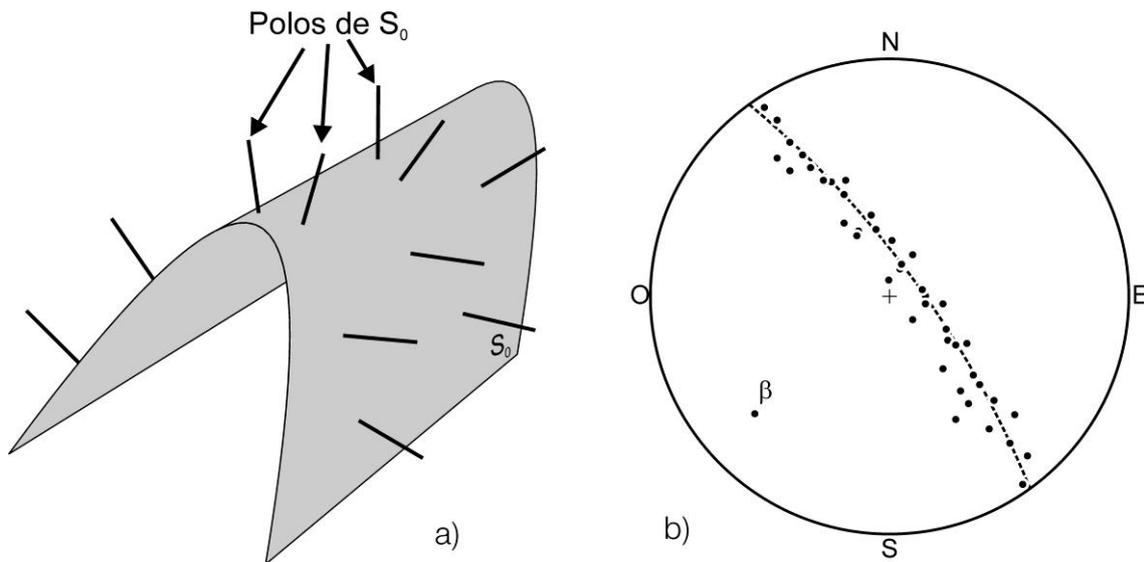


Figura 4. a) Pliegues cilíndricos en tres dimensiones, con un conjunto de líneas perpendiculares a la superficie de estratificación en esos puntos. b) Representación estereográfica de dichas líneas (polos), para hallar la orientación del eje del pliegue.

ESTEREOGRAMAS CORRESPONDIENTES A PLIEGUES NO CILÍNDRICOS

Si la superficie plegada es cónica con un valor μ (ángulo apical para el cono) conocido, cada polo forma un ángulo de $(90^\circ - \mu/2)$ con respecto al eje del cono, por tanto, los polos de las superficies de estratificación generan un cono coaxial con un ángulo apical de $(180^\circ - \mu)$. Esto quiere decir que los polos definen un círculo menor cuyo centro representa el eje del cono. Este eje puede ser rotado a la primitiva y los círculos menores de la falsilla se usan para analizar las relaciones angulares en el pliegue (Fig. 5 A y B).

En pliegues no cilíndricos y no cónicos, tanto la superficie axial como el eje del pliegue varían de orientación y la construcción de los diagramas π da como resultado varias orientaciones posibles para el eje del pliegue. Esta geometría es frecuente en áreas de plegamiento superpuesto, donde para analizar los pliegues es conveniente subdividir la zona en dominios de pliegues cilíndricos. En pliegues no cilíndricos planos, la superficie axial es un plano de orientación constante, mientras que la orientación del eje del pliegue es variable. La orientación del plano axial se define como la correspondiente al círculo mayor que contiene los ejes de los distintos dominios de pliegues cilíndricos.

PLEGAMIENTO SUPERPUESTO. ANÁLISIS CON DIAGRAMAS π

Hablamos de plegamiento superpuesto cuando existe una fase de plegamiento que pliega a otra anterior. Dependiendo de su orientación, esta última puede dar lugar a reorientación de los pliegues anteriores.

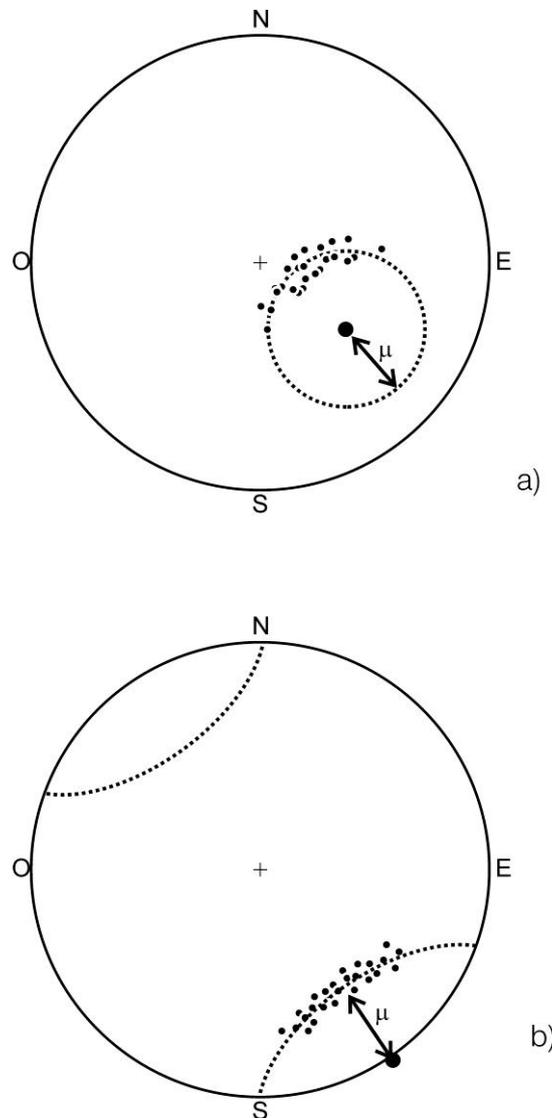


Figura 5. a) pliegue cónico con un valor de ángulo apical de μ . b) El mismo pliegue con el eje del cono rotado a la primitiva. En ambos casos, los polos de la estratificación están contenidos en un círculo menor de la falsilla.

En áreas de plegamiento superpuesto, hay múltiples generaciones de pliegues acompañados por distintos conjuntos de clivajes (esquistosidad, foliación). Cada uno de estos conjuntos, definido por una orientación determinada, nos muestra la orientación del plano axial de una generación de pliegues en particular. Analizando un área de plegamiento superpuesto, el primer paso es reconocer y definir dominios de plegamiento cilíndrico para una foliación. La foliación analizada puede tener diferente orientación en distintos dominios.

La primera orientación que debe ser medida en el área, es la correspondiente a la estratificación, que generalmente se nombra como S_0 . Las foliaciones sucesivas se nombran S_1 , S_2 , etc., de forma que la segunda ha plegado a la primera y a la estratificación y la primera ha plegado únicamente a la estratificación. La letra S nos define un plano (estratificación, foliación, esquistosidad, clivaje) y el subíndice la fase de plegamiento correspondiente dentro del conjunto de fases de plegamiento en una orogenia.

La geometría de las estructuras resultantes de la superposición de dos conjuntos de pliegues, puede ser muy compleja, y su análisis resulta relativamente sencillo utilizando métodos basados en la proyección estereográfica.

Vamos a considerar una primera generación de pliegues de S_0 (Fig. 6 A). La estratificación tiene diferentes orientaciones en ambos flancos del pliegue. La línea de charnela de esta primera fase es la línea de intersección de los dos flancos y la foliación desarrollada durante este plegamiento será S_1 , con la misma orientación que el plano axial del pliegue.

El plegamiento de segunda fase tiene un plano axial S_2 , con la orientación que se observa en la figura 6 B. Los pliegues de segunda fase pueden ser de dos tipos: pliegues F_2 de la estratificación y pliegues F_2 de una foliación de plano axial. Para conocer su geometría, debemos tener en cuenta:

- **Superficies axiales.** S_1 es una superficie curvada plegada durante F_2 , sin embargo S_2 tiene una orientación constante. Este criterio nos sirve de ayuda para distinguir las edades relativas de dos fases de plegamiento superpuestas.
- **Líneas de charnela.** La correspondiente al primer plegamiento está curvada, deformada por F_2 . Las líneas de charnela correspondientes a la segunda fase desarrollada en la estratificación, tienen una variedad de orientaciones dependiendo del flanco del pliegue de primera fase en el que se han formado.

Si llevamos a la proyección todos los datos correspondientes a una estructura polideformada, pueden dar lugar a figuras complejas difíciles de analizar. Por ejemplo, los polos de estratificación pueden aparecer dispersos, sin dibujar un círculo máximo característico de estructuras de geometría cilíndrica. En general, existen dominios dentro de la estructura en los que los elementos estructurales muestran una orientación constante. La interpretación estructural es mucho más sencilla si se separan los estereogramas por dominios o subáreas donde se cumplen estas características.

Límites de dominios

La figura 6 A muestra el mapa geológico de una estructura después de un primer plegamiento y en la figura 6 B se observan las pautas de un plegamiento superpuesto de forma sencilla. La estratificación S_0 se deforma dando lugar a pliegues F_1 con planos axiales y clivaje (S_1) asociados, de dirección N-S. Las trazas axiales sirven para dividir el

área mediante las orientaciones de los dos flancos de los pliegues F_1 en dos subdominios: un flanco buza al este y el otro al oeste.

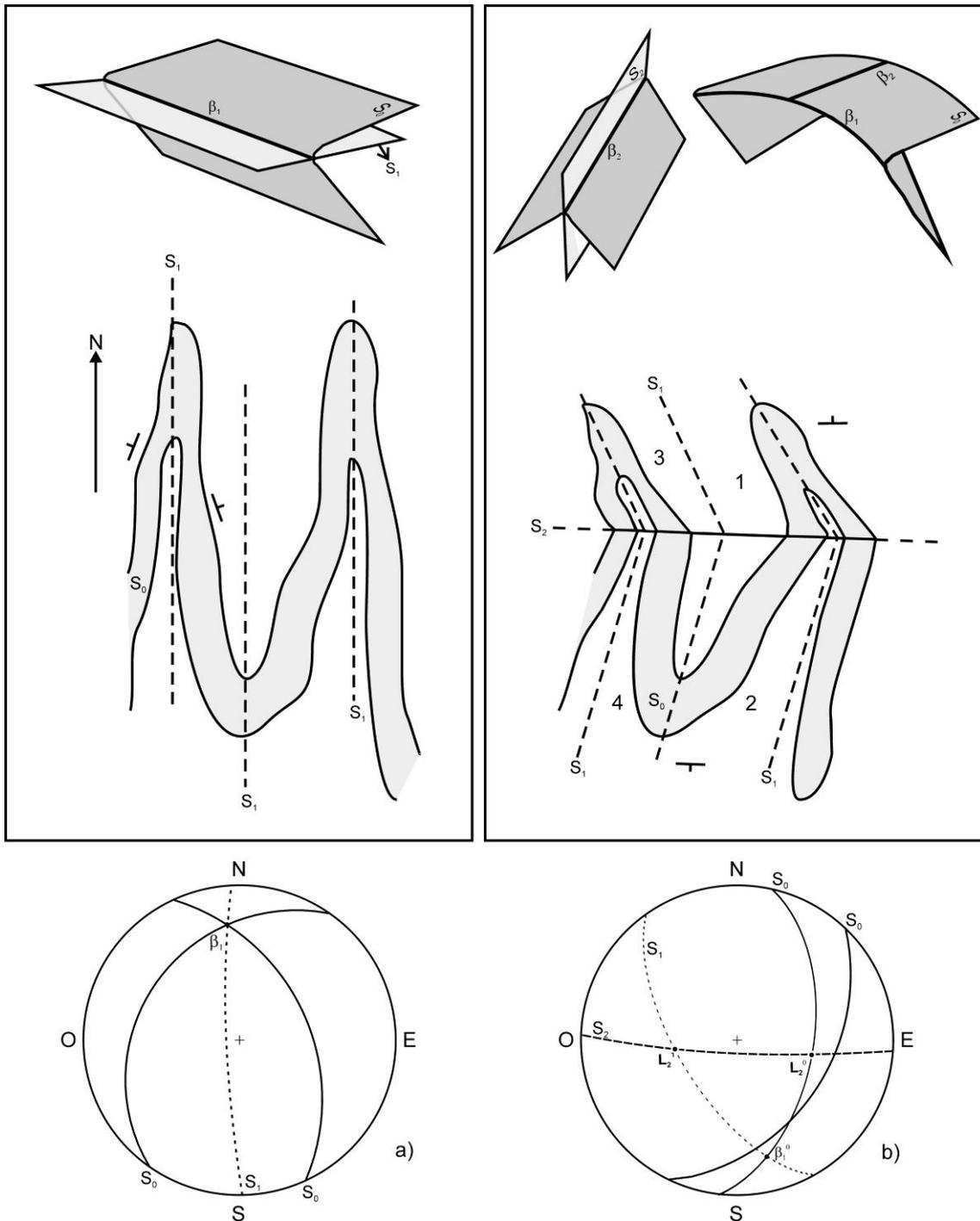


Figura 6. a) Serie plegada y estereograma resultante. b) Segunda fase de plegamiento, reorientación de los elementos estructurales y definición de dominios.

Después de la segunda fase de plegamiento (Fig. 6 B), las superficies de estratificación, planos axiales y superficies de clivaje aparecen replegados. Los pliegues F_2 tienen un plano axial S_2 con dirección E-W y las trazas axiales, en combinación con las de F_1 , dividen cada uno de los dominios anteriores en dos subdominios. En ambos casos,

para F_1 y F_2 , los límites de los dominios están definidos por las trazas axiales de los diferentes conjuntos de pliegues. Podemos diferenciar cuatro dominios nombrados en el dibujo como 1, 2, 3 y 4.

Dominios homogéneos respecto a un elemento estructural

S_2 es constante a lo largo de toda la estructura correspondiente a la figura 6 B, por tanto los cuatro dominios definidos anteriormente, son homogéneos con respecto a S_2 . Las líneas de charnela de los pliegues F_2 de la estratificación, tienen una orientación dada por la intersección de S_0 y S_2 . Hay dos dominios con respecto a la orientación de la línea de charnela, como se observa en los estereogramas: en los dominios 1 y 3 la orientación de la charnela es la misma, con inmersión hacia el N, mientras que en los dominios 2 y 4, la inmersión es hacia el S. El mismo razonamiento se puede hacer para los restantes elementos del pliegue final, buscando dominios homogéneos con respecto a un elemento geométrico definido.

CONCLUSIONES

Los problemas de relaciones angulares entre líneas y planos, aunque pueden resolverse por métodos de geometría descriptiva, son obvias las ventajas obtenidas al utilizar la proyección estereográfica. El método es mucho más rápido, sencillo y no necesita gran cantidad de dibujos con abatimientos, proyecciones sobre el plano horizontal, etc., propios de la proyección ortográfica. En el caso de superposición de plegamientos, la proyección estereográfica es el método más utilizado por los geólogos estructurales para definir los elementos geométricos de los distintos pliegues y ordenar las fases de plegamiento en el tiempo.

PROBLEMAS

Problema 1

En un pliegue cilíndrico, se ha podido medir un conjunto de superficies de estratificación que corresponden a los dos flancos del pliegue y zona de charnela. Hallar la orientación del eje del pliegue.

360°-30°E; N30°E-28°SE; 336°-40°E; N68°E-36°SE; 315°-60°NE; N95°E-56°S.

Si resolvemos el problema mediante proyección ciclográfica (Fig. 7 A), observamos que todos los círculos mayores se cortan en un punto. Este nos define la orientación del eje del pliegue y de la línea de charnela (β).

Si proyectamos los polos de los planos de estratificación, todos ellos están contenidos en un plano (círculo mayor) cuyo polo corresponde al eje del pliegue pedido (Fig. 7 B). En ambos casos, el eje del pliegue tiene una orientación de $116^{\circ}/27^{\circ}$.

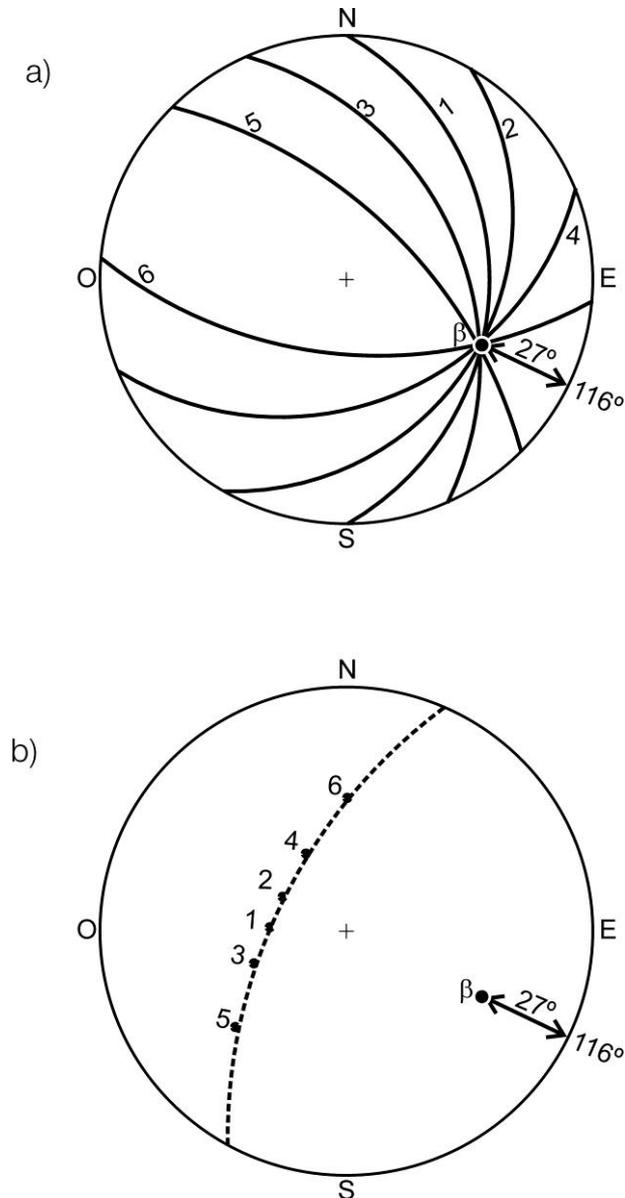


Figura 7. Resolución del problema 1. a) Mediante proyección ciclográfica. b) Mediante proyección polar.

Problema 2

En un estudio de campo, aparece un anticlinal tumbado con inmersión. La traza axial del pliegue tiene una orientación de $N45^{\circ}O$ y las medidas de estratificación se detallan a continuación. Calcular la orientación del eje del pliegue y de su plano axial.

Medidas de estratificación: N62°O-44°NE; N60°O-41°NE; N65°O-42°NE; N74°O-40°N; N70°O-38°N; N90°E-44°N; N80°O-42°N; N16°E-vertical; N0°E-74°E; N5°O-65°E; N10°O-63°E; N30°O-52°NE; N20°O-55°E; N23°O-50°E.

Recordar que la traza axial del pliegue es la línea de corte del plano axial con otro plano. Siempre que sea posible, este otro plano es el perpendicular al eje del pliegue, por tanto, la dirección de plano y traza axiales, coinciden.

- Proyectar las medidas de estratificación, bien en proyección ciclográfica o polar.
- Si se ha utilizado la proyección ciclográfica, todos los círculos se cortan en un punto, que define la orientación del eje del pliegue (β).
- Si se ha utilizado la proyección polar, todos los polos coinciden aproximadamente en un círculo mayor. El polo de este círculo mayor es el eje del pliegue (Fig. 8).
- El plano axial tiene una dirección de N45°O. Para hallar su buzamiento, se coloca esta dirección sobre el diámetro N-S de la falsilla y se traza el círculo máximo que con esa dirección, contiene al eje del pliegue deducido anteriormente.

Eje del pliegue: 016°/42°

Plano axial: N45°O-46°NE o bien 133°-46°NE

Problema 3

Sobre un flanco de un anticlinal de orientación 120°-22°SO, se observa una lineación con un cabeceo de 50°O. Sobre el flanco opuesto, orientado 083°-40°N, aparece una lineación casi horizontal. ¿Podría ser esto interpretado como que la lineación existía previamente sobre el plano sometido a posterior plegamiento?

Si la lineación es anterior al plegamiento y ahora aparece plegada, al “deshacer” el anticlinal y llevar los flancos a su posición horizontal original, las dos lineaciones deberían tener la misma dirección, o sea, sería una única lineación que ha sido plegada posteriormente. Por tanto, vamos a llevar el pliegue a su posición horizontal original para comprobar si esto se cumple.

Para llevar el pliegue a su posición original, primero se pone horizontal el eje del pliegue y a continuación, cada uno de los dos flancos.

- Representar en proyección ciclográfica los dos flancos del anticlinal con sus respectivas lineaciones. Los flancos se cortan en un punto (β), que representa el eje del pliegue (Fig. 9).
- Llevar el eje del pliegue a la horizontal, colocándolo sobre el diámetro E-O de la falsilla. El eje β pasa a la posición β' , sobre la primitiva.

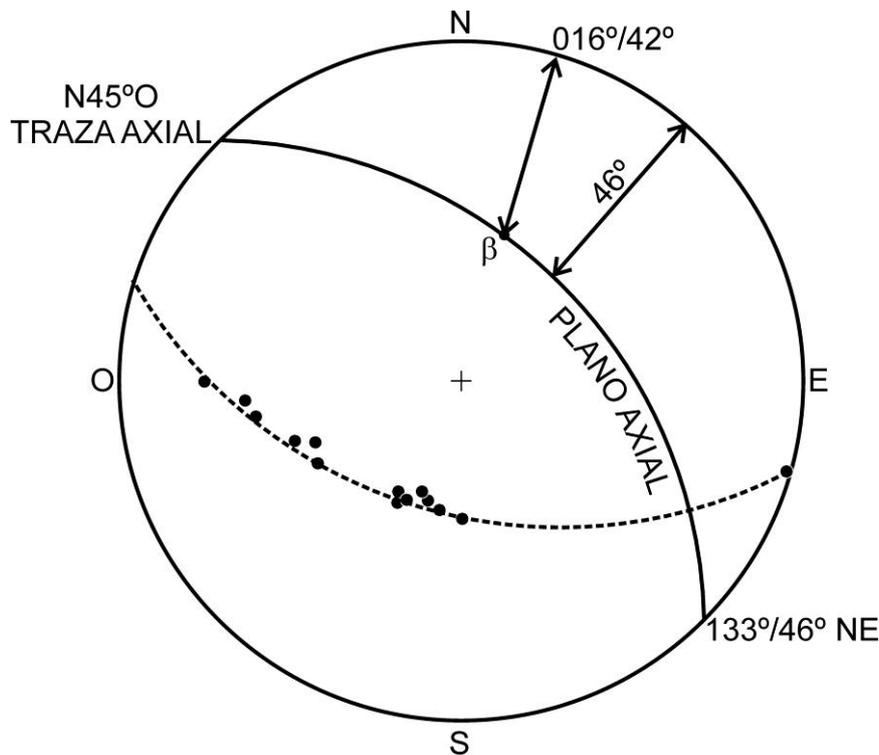


Figura 8. Resolución del problema 2. Ver texto para su explicación.

- El mismo movimiento sufrirán cada uno de los flancos. Para hallar su nueva posición movemos dos puntos, uno de ellos la lineación y otro punto cualquiera. Hallamos la nueva posición de los flancos y de las dos lineaciones. L_1 pasa a la posición L_1' y L_2 a L_2' .
- Dibujamos los círculos mayores que corresponden a los nuevos flancos, obteniendo un pliegue de charnela horizontal.
- Colocamos β' sobre el diámetro N-S de la falsilla, para hacer una rotación alrededor de un eje horizontal. Cada uno de los flancos pasa a la horizontal según su ángulo de buzamiento y las lineaciones L_1' y L_2' pasan a situarse sobre la primitiva, en las posiciones L_1'' y L_2'' .
- Ambas son horizontales, la primera con un sentido de 254° y la segunda de 78° . Observar que estos dos sentidos corresponden prácticamente a la misma

dirección, ($180^\circ+78^\circ=258^\circ$). Podemos concluir que efectivamente, la lineación es anterior al plegamiento.

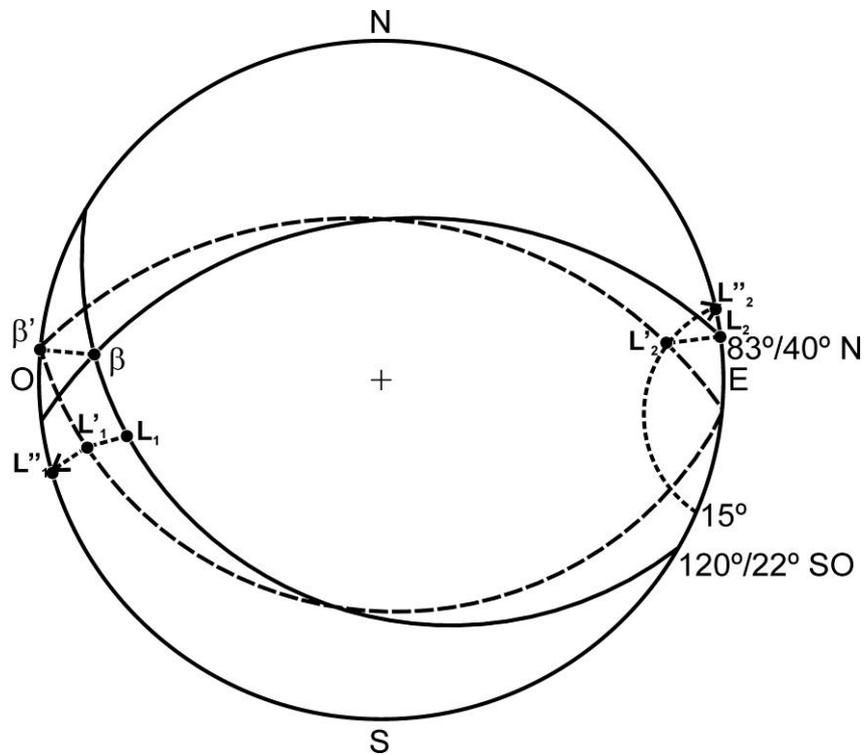


Figura 9. Resolución del problema 3. Ver texto para su explicación.

Problema 4

La orientación de los flancos de un pliegue angular es de $N15^\circ E-32^\circ SE$ y $N10^\circ O-72^\circ SO$. Hallar la orientación de la línea de charnela y del plano axial, así como la orientación de la traza axial según un plano horizontal.

- Dibujar los dos flancos del pliegue y hallar la orientación de la línea de charnela (Fig. 10). Esta es $174^\circ/12^\circ$.
- Dibujar el plano perpendicular a los dos flancos y contar el valor del ángulo interflancos. En este caso no tenemos datos para saber cuál de los dos ángulos es el válido, si el agudo o el obtuso. Elegimos uno de ellos o bien resolvemos el problema con ambos.
- Con el punto medio del ángulo y la línea de charnela, dibujamos el plano axial del pliegue cuya orientación es $000^\circ-70^\circ E$.

- Cualquier línea situada sobre el plano horizontal, tendrá una inmersión de 0° ya que es horizontal. En este caso, la traza axial tendrá la misma dirección del plano axial, 000° y su inmersión será de 0° .

Problema 5

Una serie plegada aflora bajo un plano de discordancia de orientación $150^\circ/54^\circ$. Las orientaciones de los flancos del pliegue son: $054^\circ/50^\circ$ y $290^\circ/40^\circ$. Hallar la posición de la línea de charnela del pliegue así como su orientación antes del basculamiento de la discordancia, indicando el sentido y cuantía del giro realizado. Calcular la orientación del plano axial antes y después del basculamiento de la discordancia (Fig. 11).

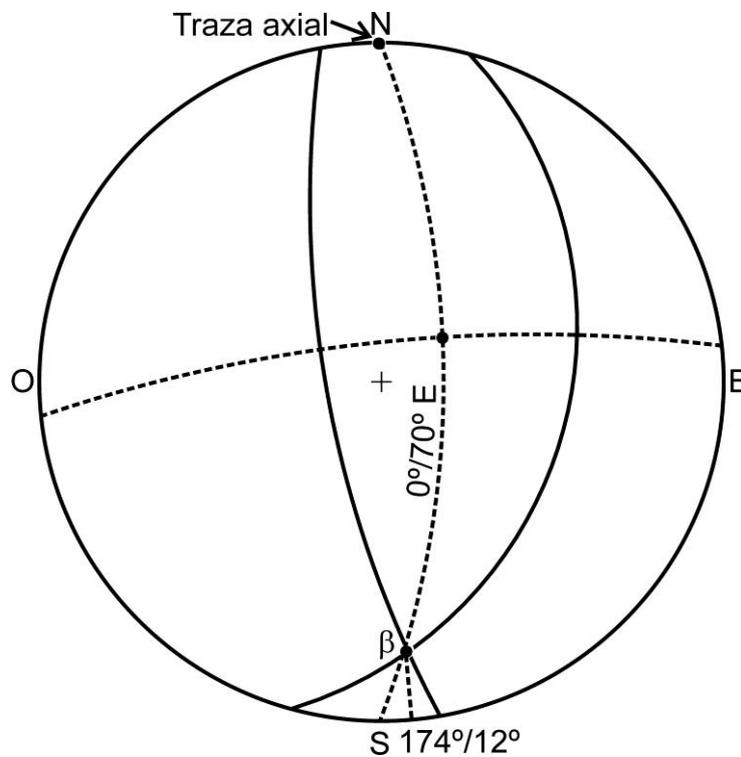


Figura 10. Resolución del problema 4. Ver texto para su explicación.

- Dibujar los círculos mayores correspondientes a la discordancia y a los dos flancos del pliegue.
- La línea de corte de los dos flancos, será la línea de charnela del pliegue (β), de orientación $348^\circ/26^\circ$.
- Con el punto medio del ángulo interflancos, se dibuja el plano axial del pliegue, de orientación $170^\circ-82^\circ$.

- Para hallar las orientaciones de línea de charnela y plano axial antes del basculamiento, colocamos la discordancia coincidiendo con un círculo mayor, por tanto su dirección está sobre el diámetro N-S de la falsilla.
- En esta posición, rotamos alrededor de un eje horizontal un ángulo equivalente al buzamiento de la discordancia, hasta que esta esté horizontal. La rotación es de 54° hacia los 150° .
- La misma rotación sufren tanto la línea de charnela como el plano axial. Antes del basculamiento de la discordancia, las orientaciones pedidas eran:

Línea de charnela (β'): $030^\circ/70^\circ$

Plano axial: $170^\circ-82^\circ E$.

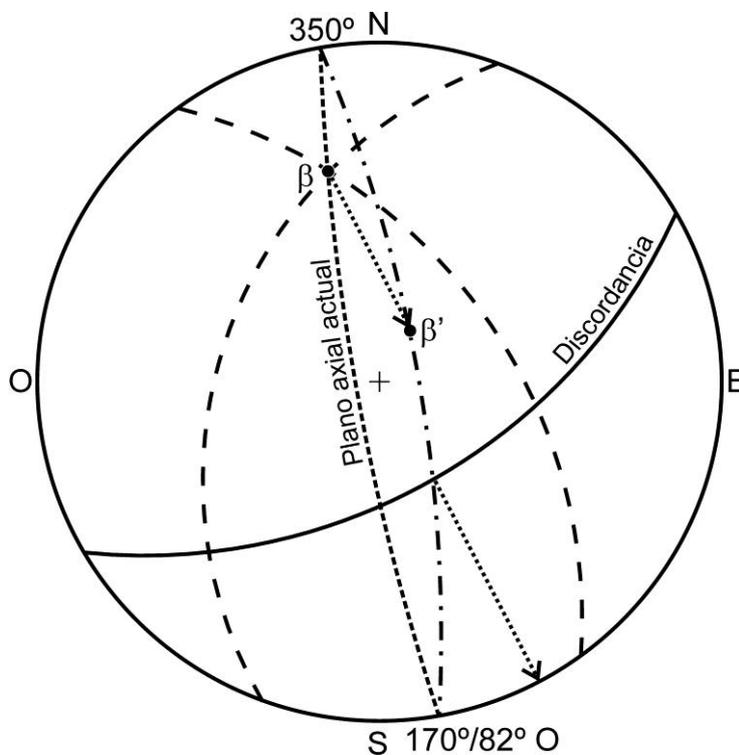


Figura 11. Resolución del problema 5. Ver texto para su explicación.

Problema 6

El flanco oriental de un pliegue tiene una orientación de $128-30^\circ NE$. Sobre él, la línea de charnela presenta un cabeceo de $38^\circ NO$. El flanco occidental del pliegue viene definido por un buzamiento aparente de 19° según la dirección $N69^\circ O$. Hallar la orientación del flanco occidental, de la línea de charnela y del plano axial del pliegue (Fig. 12).

- Representar el flanco oriental del pliegue y la línea de charnela (β).
- El flanco occidental será aquel que contenga al buzamiento aparente (β') y a la línea de charnela. Dibujarlo haciendo coincidir estos dos puntos en un círculo mayor. Su orientación es $N42^\circ E-21^\circ NO$.
- Orientar la línea de charnela mediante dirección e inmersión: $341^\circ/18^\circ$.
- Hallar el plano perpendicular a los dos flancos y contar el ángulo interflancos (146°). Hallar su punto medio.
- Con este punto y la línea de charnela, dibujar el plano axial del pliegue y orientarlo en el espacio: $N17^\circ O-82^\circ O$, suponiendo que es el que corresponde al ángulo obtuso.

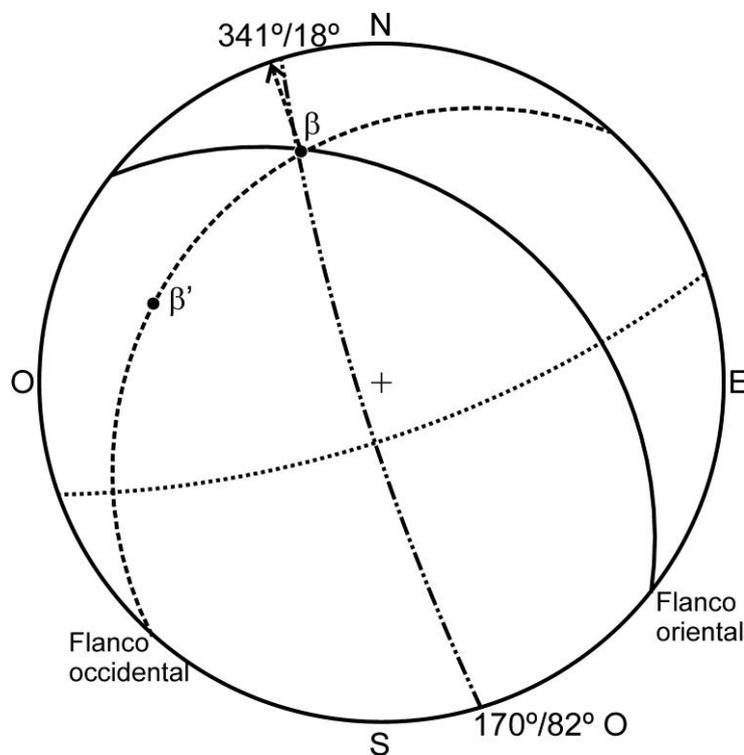


Figura 12. Resolución del problema 6. Ver texto para su explicación.

Problema 7

Los flancos de un pliegue tienen las siguientes orientaciones: $N50^\circ O-35^\circ NE$ y $N30^\circ E-60^\circ SE$. Si un dique de orientación $N30^\circ E-30^\circ SE$ corta al pliegue, ¿Cuál será el cabeceo de cada una de las líneas de corte del dique con ambos flancos, medido sobre cada flanco? (Fig. 13).

- Representar los flancos del pliegue y el dique mediante sus círculos mayores.
- Observar que el dique y uno de los flancos del pliegue, tienen la misma dirección (N30°E) y distinto buzamiento. Al tener la misma dirección, la línea de corte de ambos planos (A), es horizontal. Su orientación es 030°/0° y el ángulo de cabeceo sobre este flanco es de 0°.
- Para el otro flanco, la línea de corte (B) tiene una orientación de 086°/26° y el ángulo de cabeceo medido sobre el flanco, es de 48°SE. El cabeceo de esta línea de corte medido sobre el dique, sería de 60°NE.

Problema 8

Las siguientes orientaciones corresponden a los flancos opuestos de pliegues sin inmersión. Determinar el ángulo interflancos para cada pliegue y razonar el tipo de pliegue que corresponde a cada caso.

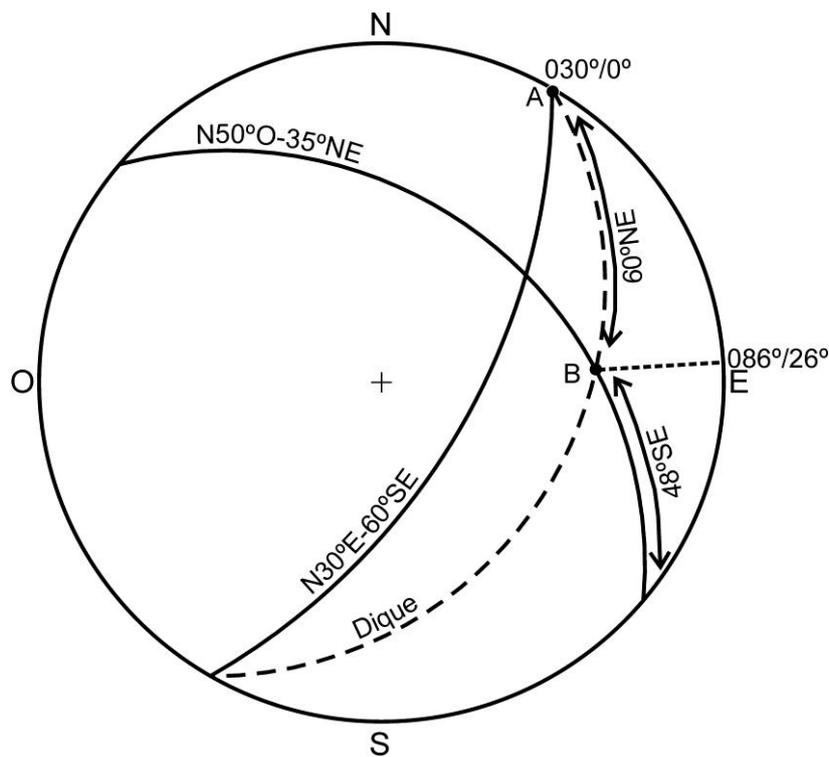


Figura 13. Resolución del problema 7. Ver texto para su explicación.

	Flanco A	Flanco B	Plano Axial
1)	360°-50°O	360°-30°E	360°-10°O
2)	360°-50°O	360°-30°E	360°-70°E
3)	360°-10°O	360°-50°O	360°-30°O
4)	360°-10°O	360°-70°E	360°-70°O

Dibujar cada uno de los pliegues en un transparente por separado, para poder compararlos después.

Una vez dibujados los estereogramas correspondientes, observamos que las líneas de charnela de los cuatro pliegues son horizontales, todas ellas con la misma orientación: $360^{\circ}/00^{\circ}$.

El primer pliegue (Fig. 14 A) corresponde a un pliegue asimétrico con el plano axial situado en el ángulo agudo entre los flancos. El valor del ángulo interflancos es de 80° . Si este pliegue corresponde a un anticlinal, este tendrá un flanco invertido que corresponde al A en la figura 14 A. Si se trata de un sinclinal, el flanco invertido sería el A en la misma figura.

El pliegue número 2, corresponde a un pliegue más simétrico que el anterior, con un plano axial de buzamiento grande. Su ángulo interflancos es de 100° y los posibles pliegues anticlinal o sinclinal se muestran en la figura 14 B.

En el tercer pliegue, tanto los flancos como el plano axial buzán en el mismo sentido, todos hacia el oeste. El estereograma muestra un ángulo interflancos de 40° , un pliegue asimétrico y con un flanco invertido, como se muestra en la figura 14 C.

Por último, el cuarto ejemplo, muestra un pliegue asimétrico con un ángulo interflancos de 100° , cuyo dibujo se muestra en la figura 14 D, al lado del estereograma correspondiente.

Observar que en cualquiera de los casos, el valor del ángulo interflancos nos aproxima a la geometría del pliegue, aunque no sepamos a partir del estereograma si se trata de un anticlinal o un sinclinal.

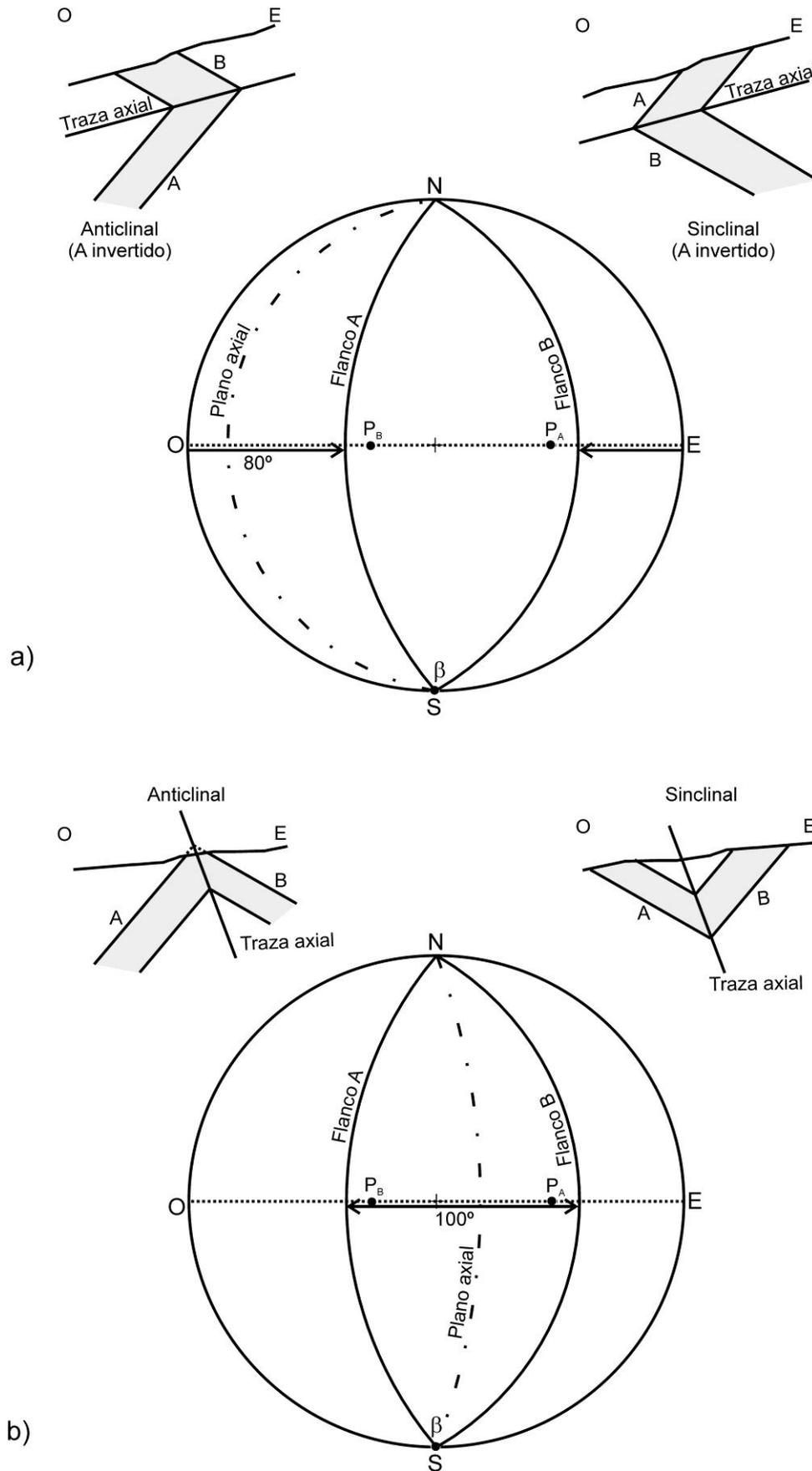


Figura 14. Resolución del problema 8. Ver texto para su explicación.

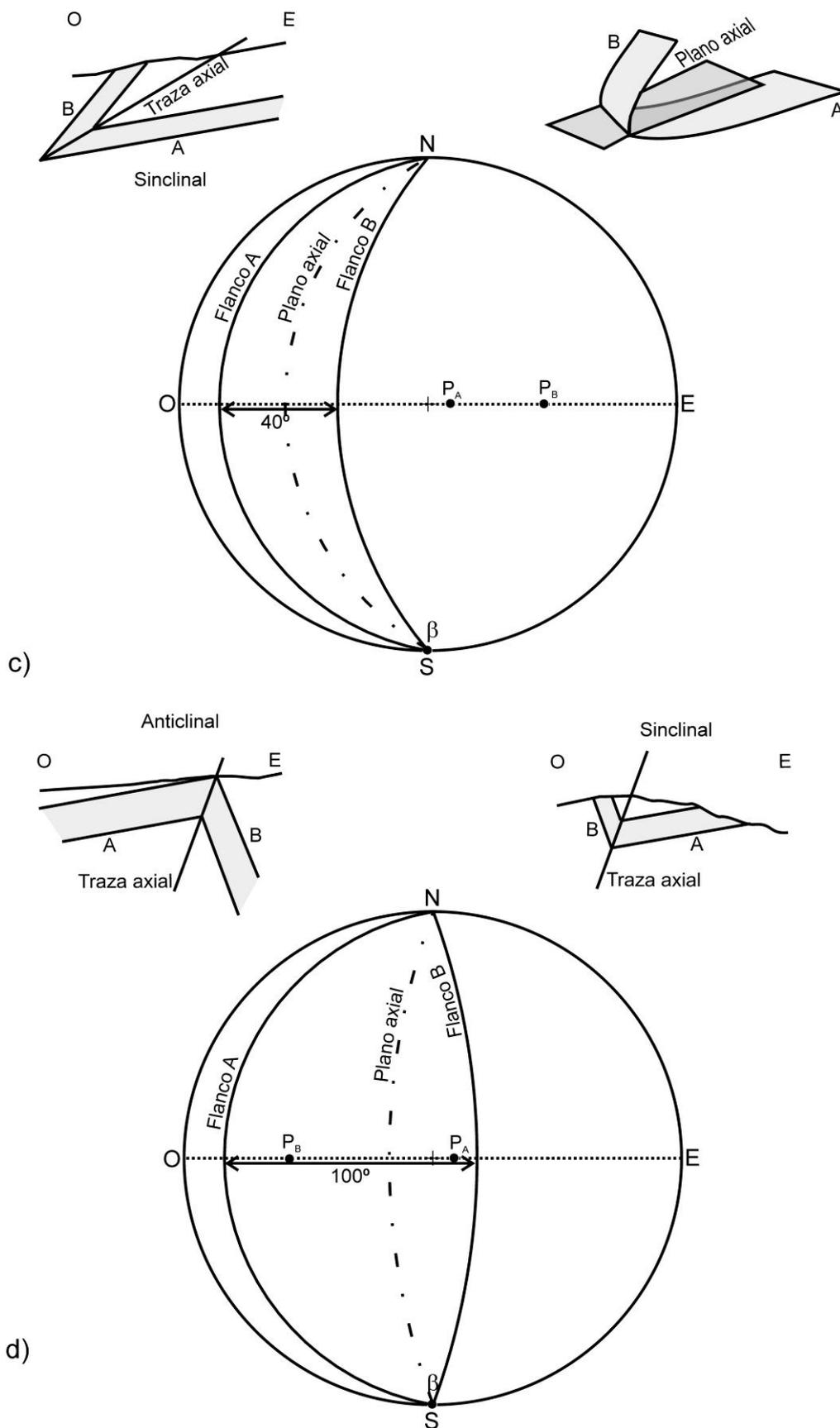


Figura 14 (Cont.). Resolución del problema 8. Ver texto para su explicación.

Problema 9

En una roca milonítica se han medido planos de foliación (N22°O-72°SO) en los que se observa una lineación mineral con un cabeceo de 20°N. La cartografía indica que la milonita y su foliación fueron plegadas con posterioridad. En localidades cercanas esta roca aparece como una gran antifirma, donde la foliación localizada sobre el otro flanco tiene una orientación de N64°O-48°NE.

Asumiendo que la lineación se formó cuando la milonita estaba horizontal, hallar su orientación antes del plegamiento, así como la orientación actual de la lineación sobre el flanco que buza hacia el noreste (Fig. 15).

- Dibujar el estereograma correspondiente con los dos flancos de la antifirma y la lineación L.
- El eje del pliegue será el punto de corte de los dos círculos mayores (β).
- Hay que poner el pliegue en la horizontal para medir la orientación de la lineación. Primero se pone el eje del pliegue horizontal (β') llevándolo al diámetro E-O, y se mueven los dos flancos y la lineación los mismos grados y en el mismo sentido. La nueva posición para la lineación es L'.
- Con el eje del pliegue horizontal y colocado sobre el diámetro N-S de la falsilla, llevamos ambos flancos a la horizontal según su buzamiento. Observar que la lineación (L'') ya en la horizontal, tiene una dirección de 158° o bien 338°, sin que sepamos cual de los dos sentidos es el correcto.
- Para hallar la orientación de la lineación sobre el otro flanco, reconstruimos el pliegue nuevamente, moviendo la lineación (338°) sucesivamente. Su posición final sobre el flanco (L^{IV}) nos da una orientación de 340°/36° o bien un cabeceo sobre el flanco de 54°NO.

Problema 10

En la región polideformada de la figura 16 A, aparece una serie plegada donde se observa un conjunto de pliegues en gancho. Una vez dividida la región en los dominios necesarios, deducir lo mas aproximadamente posible su historia deformativa, orientando en el espacio las distintas fases de plegamiento.

Dominio 1. Zona occidental del pliegue, con una traza axial de dirección 140° y las siguientes medidas de S_0 :

080°-46°N; 055°-34°O; 015°-30°O; N34°O-46°SO; N50°O- 62°SO

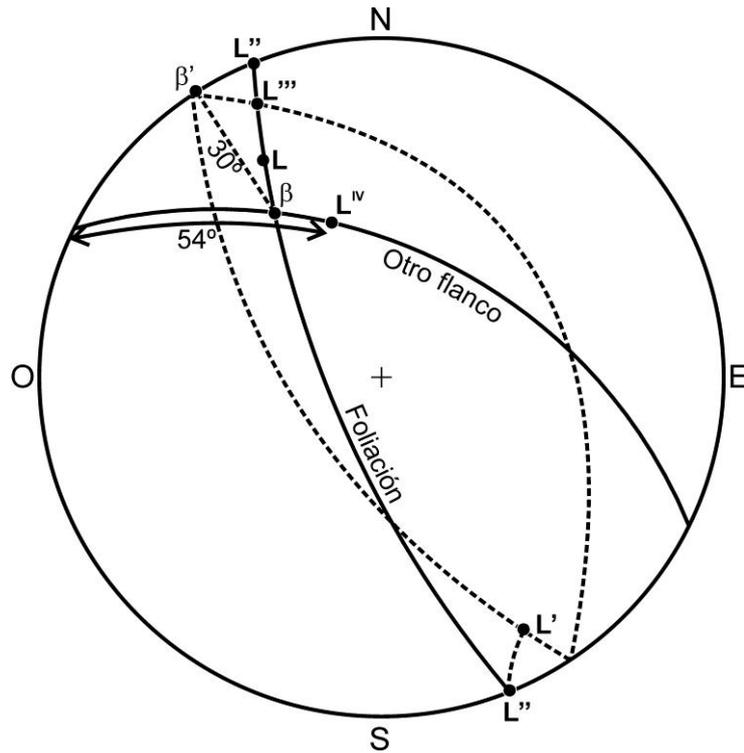


Figura 15. Resolución del problema 9. Ver texto para su explicación.

Dominio 2. Zona intermedia del pliegue. Su traza axial tiene una dirección de 040° y las medidas de S_0 en el afloramiento son:

$025^\circ-32^\circ\text{O}$; $005^\circ-20^\circ\text{O}$; $N40^\circ\text{O}-13^\circ\text{S}$; $N70^\circ\text{O}-14^\circ\text{S}$; $085^\circ-20^\circ\text{S}$

Dominio 3. Zona oriental del pliegue. La traza axial tiene una dirección de 120° y las orientaciones de S_0 son:

$N6^\circ\text{O}-52^\circ\text{O}$; $004^\circ-38^\circ\text{O}$; $060^\circ-20^\circ\text{N}$; $N70^\circ\text{O}-27^\circ\text{NE}$; $N55^\circ\text{O}-33^\circ\text{NE}$

En la figura 16 A, se ha tomado un pliegue en gancho para ilustrar el método a seguir en este tipo de problemas. En él se han medido directamente en el afloramiento, la orientación de las trazas axiales a lo largo de su recorrido, que se ha dividido en tres dominios principales, en función de la orientación de estas trazas. Cada uno de los dominios, viene definido por una serie de orientaciones de estratificación que se indican en el enunciado del problema, por una S_1 que aparece plegada y por una S_2 que corresponde a un segundo plegamiento. Con todos estos datos, vamos a representar un estereograma para cada uno de los dominios, con las medidas obtenidas, la traza axial y la posición de la línea de charnela del pliegue en cada caso.

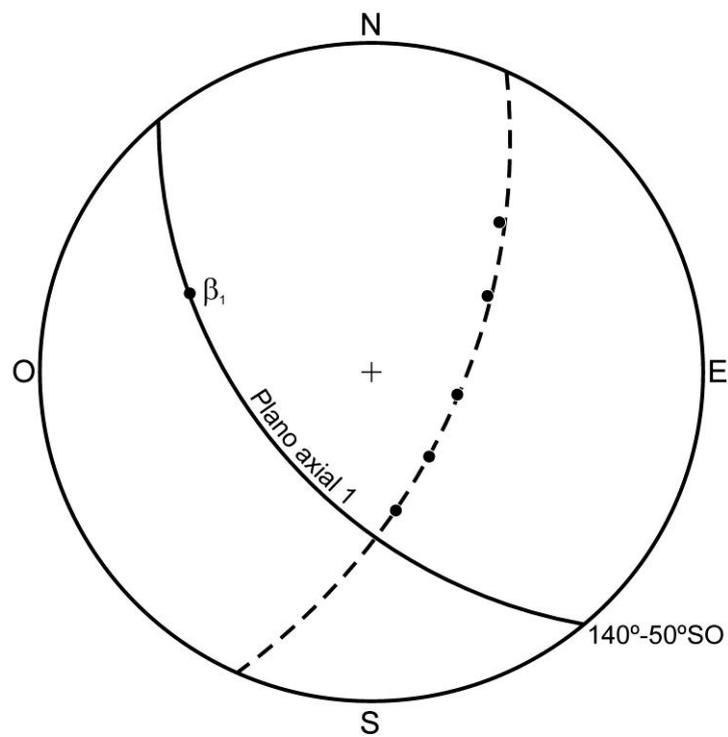
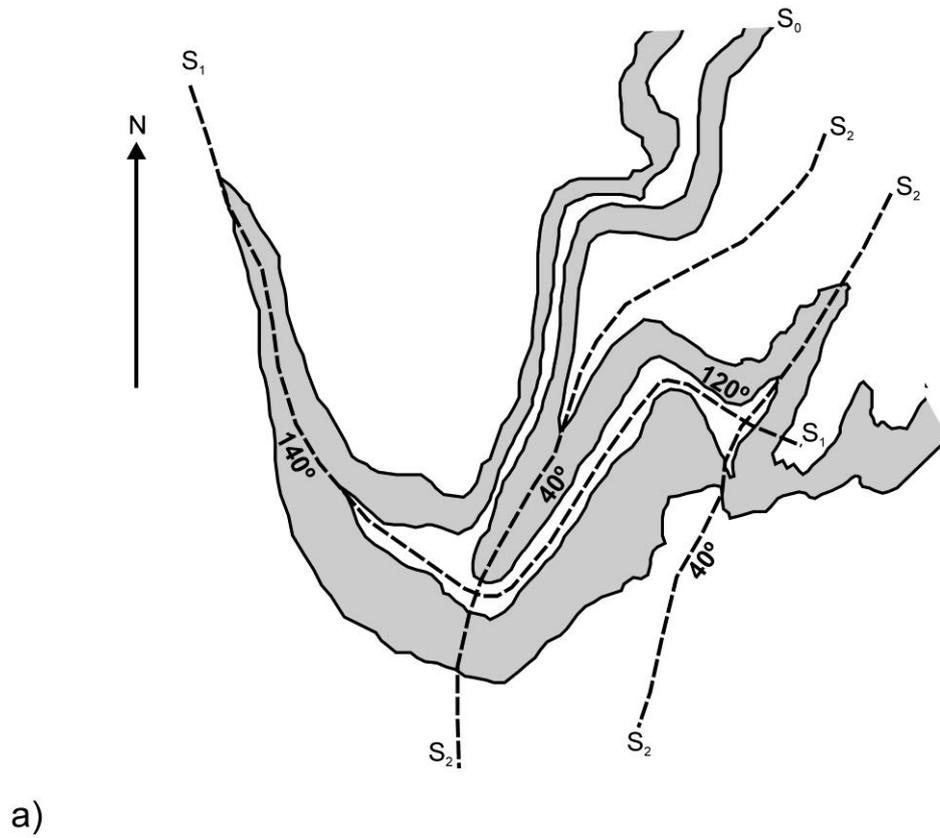


Figura 16. Resolución del problema 10. a): Estructura presente en la zona. b): Estereograma correspondiente al dominio 1.

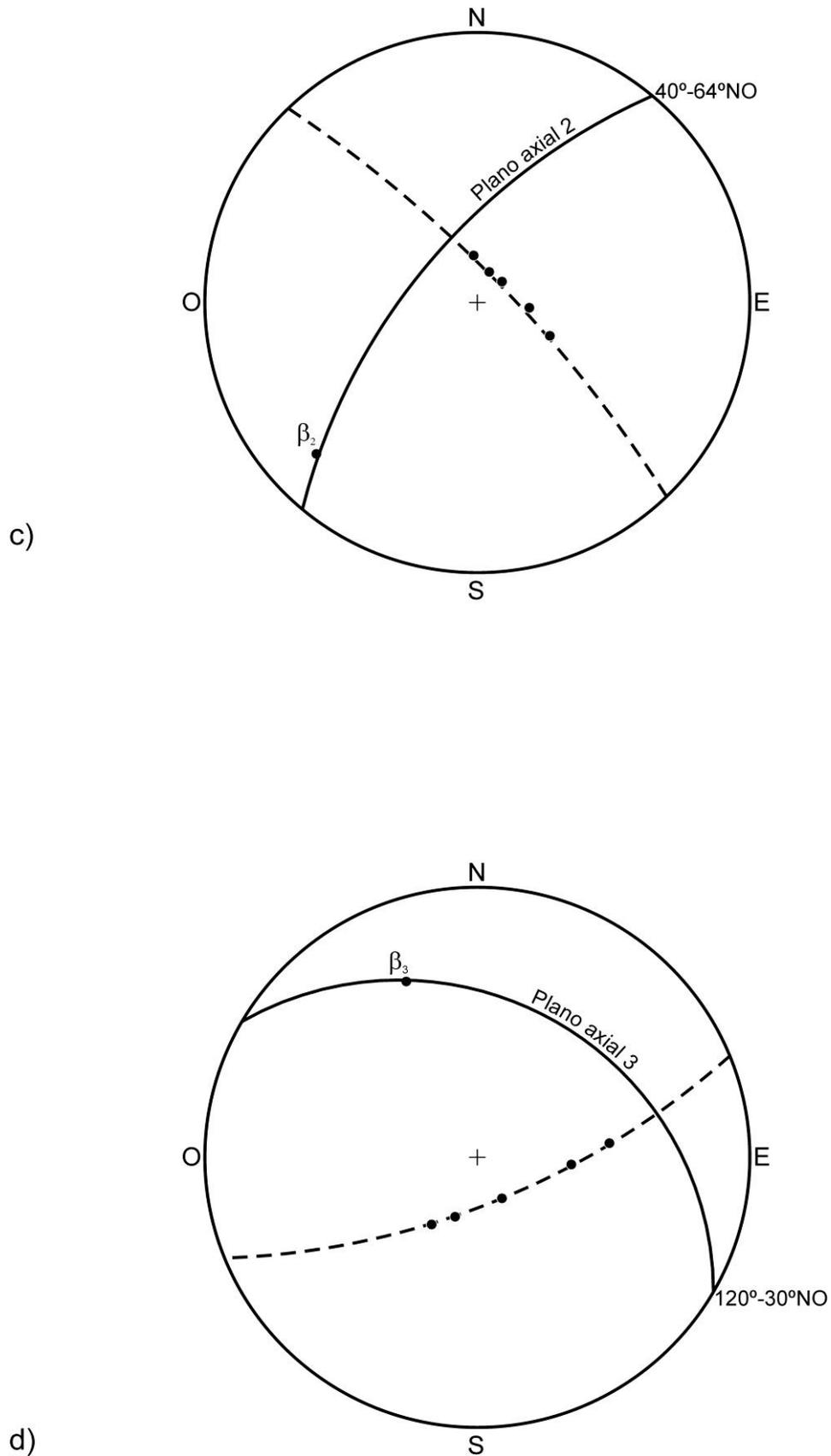


Figura 16 (Cont). Resolución del problema 10. c): Dominio 2. d): Dominio 3.

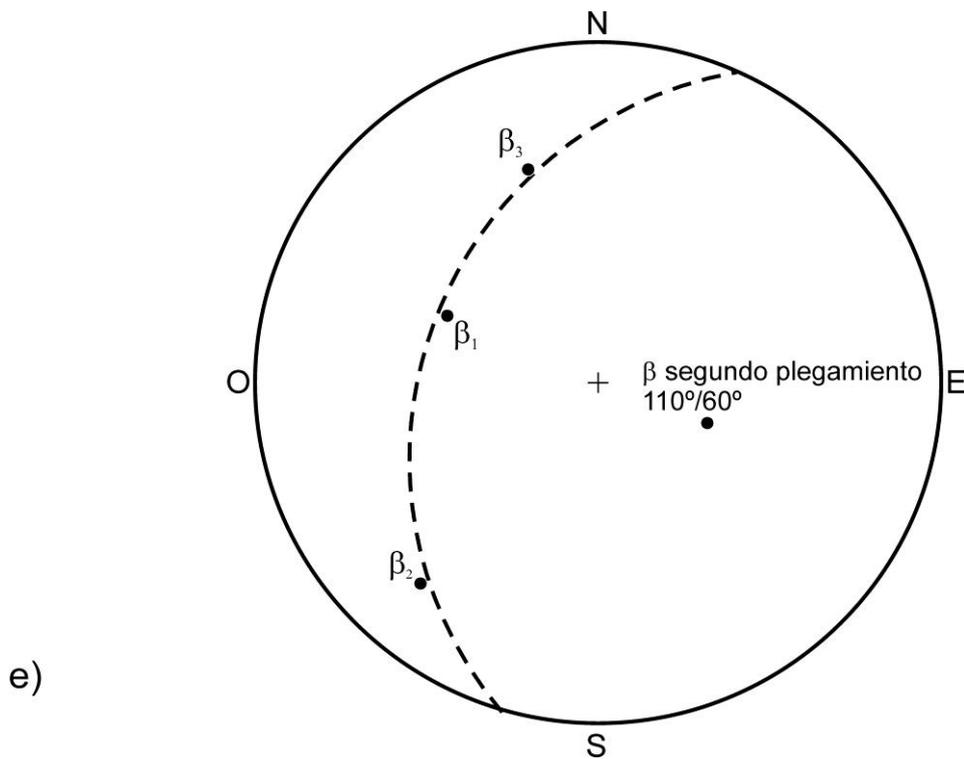


Figura 16 (Cont.). Resolución del problema 10. e): Orientación del eje de pliegue de la segunda fase de plegamiento.

Para el dominio 1 cuyo estereograma se representa en la figura 16 B, los polos correspondientes a las medidas de estratificación se sitúan en un círculo mayor cuyo polo corresponde a la línea de charnela para este dominio (β_1). Esta línea está orientada $294^\circ/32^\circ$. El plano axial de este pliegue será el que tenga una dirección de 140° (traza axial) y contenga a la línea de charnela, como se observa en el estereograma. Su orientación es $140^\circ-50^\circ\text{SO}$.

Para el dominio 2, el proceso a seguir es el mismo. Todos los polos se disponen en un círculo mayor (Fig. 16 C). Las orientaciones de línea de charnela (β_2) y del plano axial son respectivamente de $226^\circ/12^\circ$ y $040^\circ-64^\circ\text{NO}$.

Lo mismo para el dominio 3, representado en la figura 16 D. La línea de charnela (β) tiene una orientación de $338^\circ/20^\circ$ y el plano axial $120^\circ-30^\circ\text{NE}$.

Para conocer cuál es la orientación de la línea de charnela correspondiente al segundo plegamiento, pasamos a un nuevo diagrama las orientaciones obtenidas de las tres líneas de charnela correspondientes a cada uno de los tres dominios. En la figura 16 E, se observa como las tres se disponen según un círculo mayor. El polo de este círculo mayor corresponde a la posición de la línea de charnela del segundo plegamiento dentro de esta área polideformada. Su orientación es de $110^\circ/60^\circ$.

BIBLIOGRAFÍA

Babín Vich, R. B. y Gómez Ortiz, D. 2010. Problemas de Geología Estructural. 9. Análisis estructural mediante diagramas de contornos. *Reduca (Geología). Serie Geología Estructural*, 2 (1): 148-192.

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.