

Trabajo de Fin de Grado/ Grado Amaierako Lana

Grado en Geología / Geologiako gradua

# ANÁLISIS DE LA FÁBRICA MAGNÉTICA EN PLIEGUES CILÍNDRICOS Y CÓNICOS DE BARRIKA (VIZCAYA)

**Autor/a:**

SARA ÁLVAREZ CORRAL

**Director/a:**

JOSE MARÍA TUBIA MARTÍNEZ

Dpto. Geodinámica, Facultad de Ciencia y Tecnología (UPV/EHU)

## ÍNDICE

1. TEMA DE TRABAJO Y OBJETIVOS.....	1
2. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA Y ENCUADRE GEOLÓGICO .....	1
3. MÉTODOS Y ESTADO ACTUAL DEL TEMA: ANISOTROPÍA DE LA SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (ASM) .....	4
4. OBSERVACIONES Y DATOS GEOLÓGICOS .....	8
4.1. Características de campo y petrográficas de los materiales. ....	8
4.2. Geometría y elementos estructurales de los pliegues .....	9
5. ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA .....	12
5.1. Valores de la susceptibilidad magnética y de su anisotropía .....	13
5.2. Caracterización de la mineralogía magnética .....	15
6. LA FÁBRICA MAGNÉTICA .....	16
6.1. Parámetros escalares .....	16
6.2. Parámetros direccionales de la ASM .....	17
7. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	18
7.1. Tipos de fábricas magnéticas .....	19
7.2. Correlación entre la fábrica magnética y los elementos estructurales en el pliegue cilíndrico.....	20
7.3. Influencia del plegamiento sobre la fábrica magnética.....	22
8. CONCLUSIONES .....	23
9. BIBLIOGRAFÍA.....	24
10. ANEXOS .....	27
ANEXO I: ESTADOS FERROMAGNÉTICOS .....	27
ANEXO II: METODOLOGÍA DE MUESTREO .....	27
ANEXO III: ACCESORIO KAPPABRIDGE PARA PRUEBA DE CALENTAMIENTO ..	32
ANEXO IV: RESULTADOS DE ASM .....	33
ANEXO V: TABLA DE MEDIDAS $S_0$ .....	35
ANEXO VI: FOTOGRAFÍAS ADICIONALES.....	37

## 1. TEMA DE TRABAJO Y OBJETIVOS

Este Proyecto de Fin de Grado consiste en un estudio sobre la anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM) de calcarenitas que afloran en los acantilados de Barrika (Vizcaya). Sus objetivos son: a) establecer los tipos de fábricas magnéticas de las rocas estudiadas, b) comprobar el grado de correlación entre la fábrica magnética y las estructuras presentes en las rocas y c) analizar si la deformación relacionada con el plegamiento afectó a la fábrica magnética primaria, de origen sedimentario, de las turbiditas. Con esa finalidad se han seleccionado dos pliegues, uno cilíndrico y otro de tipo cónico, caracterizados por presentar afloramientos continuos de los dos flancos y de la zona de charnela.

El proyecto ha necesitado ocho días de campo, para obtener datos estructurales sobre los pliegues y extraer muestras para el estudio magnético, y siete sesiones de laboratorio, cinco para la medición de la susceptibilidad magnética y dos para el reconocimiento petrográfico de láminas delgadas. El tratamiento de los datos magnéticos ha requerido aprender el uso de los programas informáticos *Safir4* y *Anisoft*. La proyección estereográfica de los datos direccionales de campo se ha realizado manualmente y también mediante la aplicación del programa *Stereonet 9.5* (Cardozo y Allmendinger, 2013). La recopilación bibliográfica, regional y temática, y la redacción de la memoria completan el tiempo consumido para realizar este trabajo de fin de grado.

En este trabajo se exponen los resultados obtenidos mediante la técnica de ASM en los dos pliegues mencionados y se correlacionan con las estructuras de la zona. El desarrollo del proyecto, en el que se incluye la perforación de muestras en el campo, su preparación y los análisis de las propiedades magnéticas de las muestras se han realizado con ayuda de los equipos del Departamento de Geodinámica de la Universidad del País Vasco.

## 2. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA Y ENCUADRE GEOLÓGICO

La zona de estudio se encuentra ubicada en el tramo centro-occidental del litoral vizcaíno, y pertenece a la comarca de Uribe Costa. Más concretamente se sitúa en los acantilados de la playa de Barrika, a la que se accede desde Bilbao por la carretera BI-2122. Una vez allí, podemos contemplar los dos pliegues sobre los que se centra el estudio; según descendemos, el cilíndrico se ubica a la izquierda del acceso y el cónico a la derecha.

Desde el punto de vista geológico, los pliegues seleccionados proceden del Sinclinorio de Vizcaya (Fig. 1A) de la Cuenca Vasco-Cantábrica (CV-C). Esta cuenca se extiende desde el oeste de Navarra hasta aproximadamente la mitad oriental de Cantabria, y comprende el País Vasco y el norte de las provincias de Burgos y Palencia.

Uno de los rasgos geológicos más llamativos de la CVC es la gran potencia de materiales Mesozoicos, sobre todo Cretácicos, que acumula, indicando una tasa de subsidencia muy elevada durante este periodo. Distintas estimaciones cifran la potencia máxima de esta sucesión entre los 12 km (Brinkmann y Logters, 1968) y los 17 km (Lotze, 1960).

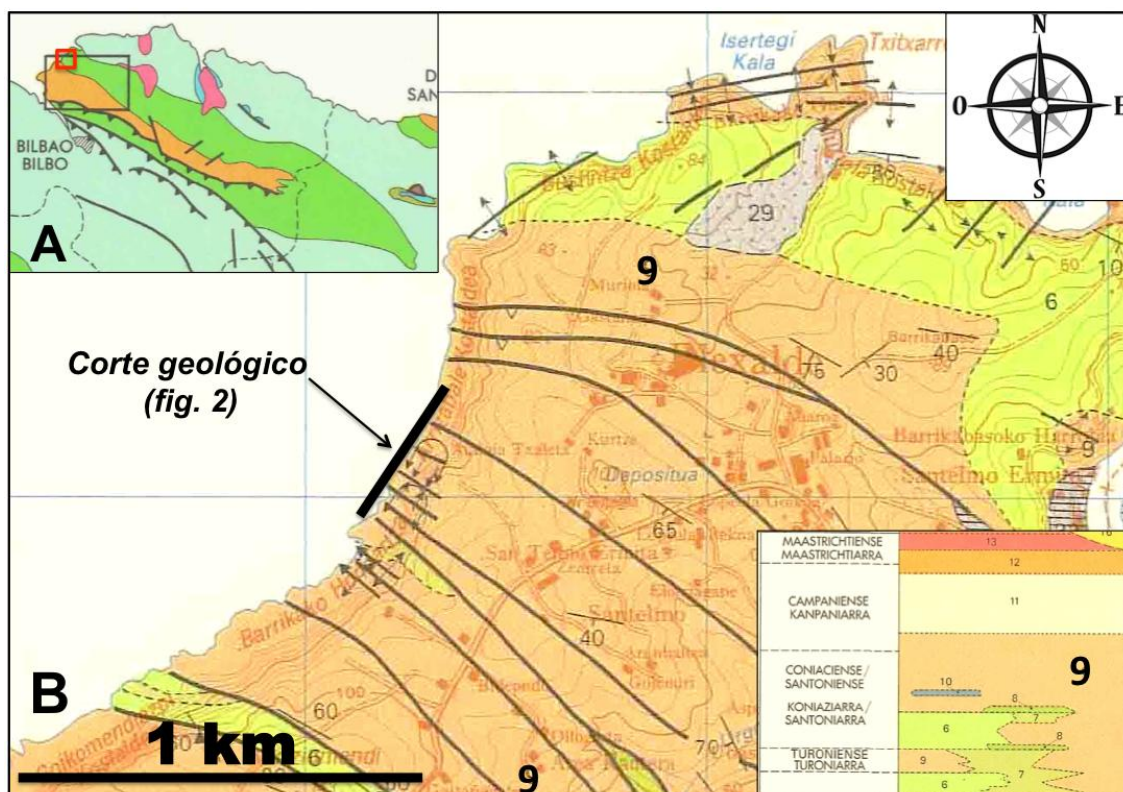


Figura 1. Esquema de localización geográfica y geológica. A) Mapa geológico simplificado del Sinclinorio de Vizcaya. El cuadro rojo ubica la zona de estudio en el extremo NE del flanco noreste del sinclinorio. B) mapa geológico en detalle que muestra los materiales de la zona de estudio, pertenecientes al Cretácico Superior y que forman un Flysch Detrítico Carbonatado.

La zona de estudio pertenece al Arco Vasco, una de las tres zonas en las que se subdivide la CVC junto con el Dominio Navarro-Cántabro y el Dominio Peri-Asturiano. El Arco Vasco se extiende entre la ría de Bilbao al oeste y los Macizos Paleozoicos Vascos en el sector oriental, y es la zona con mayor complejidad estructural de la Cuenca Vasco-Cantábrica (Feuillée y Rat, 1971). Gracias a sus características geológicas y estructurales se dice que esta zona es el equivalente a la Zona Norpirenaica (Choukroune, 1976; Cuevas y Tubía, 1999). Está caracterizado por un arqueamiento,

con una concavidad hacia el Mar Cantábrico, de las estructuras cartográficas principales que son el Anticlinorio de Bilbao, el Sinclinorio de Vizcaya, el Anticlinal del Norte de Vizcaya y el Monoclinal de Guipúzcoa, cuyas orientaciones varían desde N120°E (sector occidental) hasta N60°E (sector oriental). Como se ha apuntado anteriormente, en el Arco Vasco predominan los materiales de edad Mesozoica, quedando los de edad Terciaria restringidos al núcleo del Sinclinorio de Vizcaya y al Monoclinal de Guipúzcoa. Estudios previos (Cuevas *et al.*, 1998 y 1999) indican que el Arco Vasco es un ejemplo de tectónica de inversión positiva con una complejidad geométrica importante, atribuible a la formación de cuencas pull-apart con dimensiones reducidas y aisladas unas de otras, acomodando el desplazamiento sinistro de la Placa Ibérica con respecto a la europea, en el Cretácico inferior (Olivet, 1996); un desencadenamiento posterior de tectónica de inversión local que se asocia a procesos de diapirismo durante el Cretácico inferior (Ríos, 1948; Brinkmann y Lögters, 1968; Campos, 1976) y finalmente el efecto de la tectónica compresiva regional.

Dentro del Arco Vasco, el Sinclinorio de Vizcaya (Fig. 1A) presenta una estructura simple, que se complica hacia el Oeste. El núcleo de esta unidad estructural corresponde al Sinclinal de Guecho, que desde Punta Galea presenta un eje que se eleva progresivamente hacia el Este, a través del segmento de Berriaga y Bizcargui y del sinclinal de Oiz, que concluye periclinalmente en la peña Egoarbitza. A partir de aquí, los materiales Eocenos del núcleo del sinclinorio desaparecen, y se sustituyen por potentes masas de flysch que presentan interestratificaciones de basaltos submarinos que denotan la existencia de importantes fracturas del zócalo subyacente.

En cuanto a la situación geológica (Fig. 1B), tras analizar en detalle la hoja N° 37- IV de Getxo (Arriola *et al.*, 1993), se aprecia que los dos pliegues en cuestión afectan a una secuencia turbidítica caracterizada por la alternancia de margas, margocalizas y calcarenitas que constituyen el Flysch Detrítico Carbonatado de edad Cenomaniense Medio-Campaniense Inferior (Fig. 1B).

La figura 2 muestra el corte geológico del tramo de los acantilados de Barrika que incluyen los dos pliegues considerados. Los pliegues de ese sector del flanco norte del Sinclinorio de Vizcaya son asimétricos y repliegan a pliegues y cabalgamientos más antiguos que también tienen vergencia hacia el Norte (Cuevas *et al.*, 1982). Los pliegues presentan una vergencia general hacia el NE y ejes subhorizontales de dirección media N130E. Localmente aparecen ejes con direcciones variables e

inclinaciones importantes que no están en consonancia con el plegamiento general y que se han relacionado con la actuación de fallas de salto en dirección (Cuevas *et al.*, 1982).

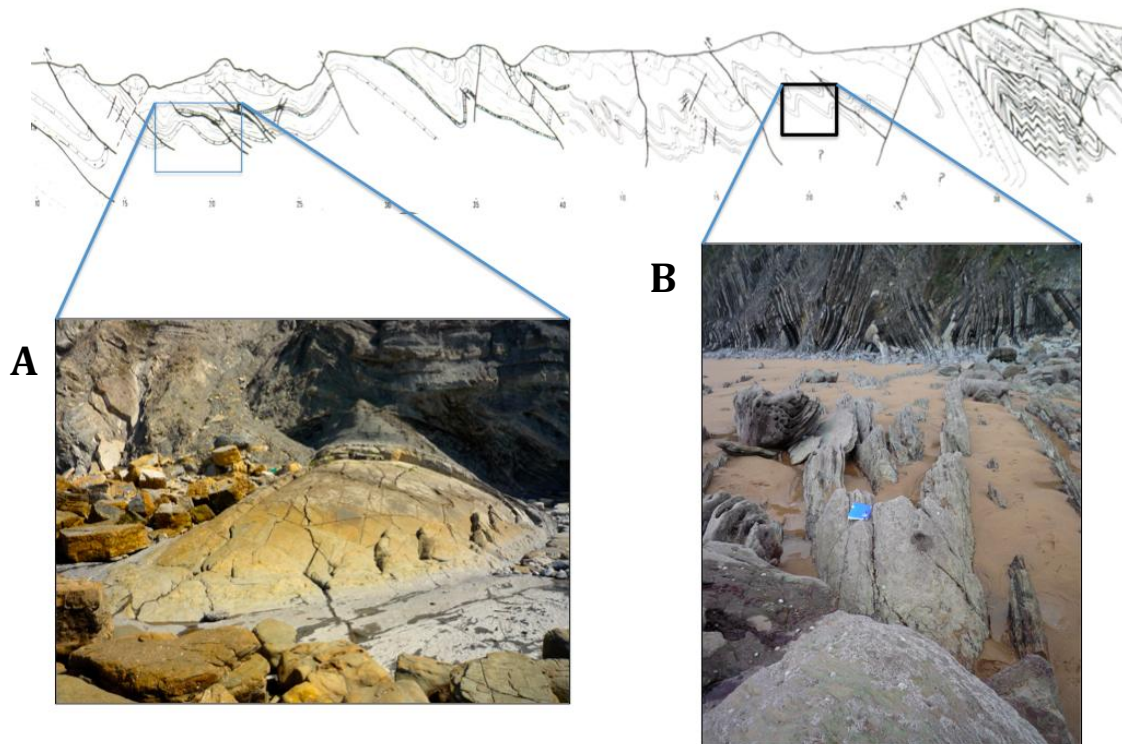


Figura 2. Corte geológico del sector estudiado (Cuevas *et al.*, 1982; modificado). Se indica la ubicación de los pliegues, cilíndrico (A) y cónico (B), seleccionados para este trabajo.

### 3. MÉTODOS Y ESTADO ACTUAL DEL TEMA: ANISOTROPÍA DE LA SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (ASM)

En la fase inicial del trabajo se han aplicado los métodos habituales en estudios con geología de campo y análisis petrográfico de láminas delgadas. Posteriormente, se ha utilizado de la metodología de la ASM. Este apartado se centrará en la descripción metodológica de la técnica geofísica de la ASM, por ser menos conocida en los círculos geológicos.

La susceptibilidad magnética,  $k$ , es la propiedad física que expresa la respuesta o capacidad de un material para magnetizarse bajo la acción de un campo magnético inductor externo (Tarling y Hrouda, 1993). Es importante tener en cuenta que esta propiedad fluctúa considerablemente con la temperatura, la concentración, forma, tamaño y tipo de minerales que forman las rocas, así como de la magnitud del campo magnético externo (Dinarès-Turell *et al.*, 1991). En un material isótropo, la relación entre el campo magnético inductor ( $H$ ) y el magnetismo inducido ( $M$ ) es lineal y se rige por la siguiente expresión, en la que  $k$  es una magnitud escalar (Tensor de orden 0):

$$M \text{ (Teslas)} = k \times H \text{ (Teslas)} \Rightarrow k = \frac{M}{H}$$

Esta técnica es no destructiva y puede aplicarse a cualquier tipo de rocas, porque no necesita que esta contenga marcadores específicos, como fósiles deformados, ooides, etc. Además, tiene la ventaja de que permite detectar fábricas débiles incluso en rocas aparentemente isótropas, en las que no se aprecian estructuras a simple vista. En rocas con fábricas bien desarrolladas, las principales direcciones de susceptibilidad magnética están estrechamente relacionadas con la orientación de sus estructuras (e.g. foliación, lineación, direcciones de paleocorrientes).

Los minerales pueden agruparse en tres categorías, según su comportamiento magnético al ser sometidos a un campo magnético débil y a temperatura ambiente:

1) **Diamagnéticos:** Sin un campo inductor, los minerales tienen un momento magnético nulo. En cambio, si se exponen a su influencia la imanación inducida es de sentido contrario a la del campo inductor. La susceptibilidad diamagnética ( $k_{\text{día}}$ ) es negativa, constante ( $k_{\text{día}} = -1.4 \times 10^{-5}$  SI) e independiente de la temperatura (Hrouda, 1982). Minerales diamagnéticos: calcita, cuarzo, feldespatos y apatito.

2) **Paramagnéticos:** Sin campo inductor, los minerales tienen un momento magnético nulo. En cambio, si se exponen a su influencia, adquieren una imanación inducida en la misma dirección que el campo aplicado. La susceptibilidad paramagnética ( $k_{\text{para}}$ ) es positiva. Minerales paramagnéticos: biotita, clorita, moscovita, anfíbol y piroxeno (Hrouda, 1982).

3) **Ferromagnéticos s.l.:** Estos minerales presentan una ordenación de los momentos magnéticos en ausencia de un campo magnético inductor externo. Según su ordenación y su respuesta frente a un campo inductor se distinguen tres estados (Hrouda, 1982): ferromagnetismo, ferrimagnetismo y antiferromagnetismo (véase el anexo I). Minerales ferromagnéticos: magnetita, pirita.

La susceptibilidad magnética de una roca es la suma de las contribuciones parciales de todos los minerales de la roca:  $k = k_{\text{día}} + k_{\text{para}} + k_{\text{af}} + k_{\text{f}}$ . Sin embargo, la influencia de cada categoría magnética depende de su susceptibilidad intrínseca y de su concentración (Tarling and Hrouda, 1993). En la figura 3 se exhiben los valores de susceptibilidad para minerales representativos de cada comportamiento magnético (Tarling and Hrouda, 1993).

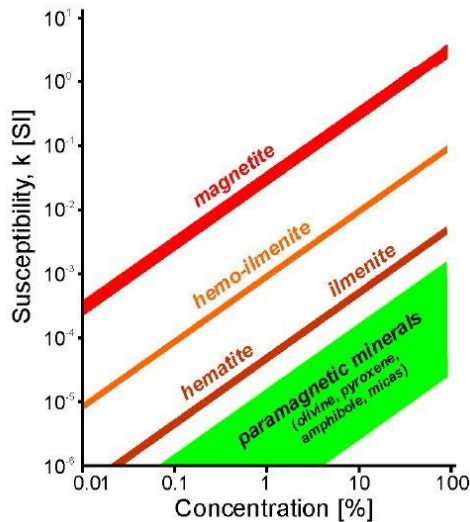


Figura 3. Aportación de minerales con diferente comportamiento magnético a la susceptibilidad total de una roca (Tarling y Hrouda, 1993). Obsérvese que basta una presencia mínima de magnetita ( $\approx 0,01$  %) para originar una susceptibilidad similar a la de un 80 % de silicatos paramagnéticos.

La ASM es la variabilidad direccional de la susceptibilidad magnética. Dicha variabilidad direccional puede deberse a factores intrínsecos de las rocas, como la estructura cristalográfica y la anisotropía intrínseca de los minerales, o externos, como procesos de flujo o deformaciones capaces de reorientar las direcciones preferentes de susceptibilidad del material (Tarling y Hrouda, 1993). En un cuerpo anisótropo, los campos magnéticos  $M$  y  $H$  no son colineales y la susceptibilidad magnética ( $k$ ) se expresa como un tensor de segundo orden, que equivale geoméricamente al elipsoide de la susceptibilidad magnética. Por lo tanto:

$$k = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{pmatrix}$$

Teniendo en cuenta que esta matriz es simétrica, se puede diagonalizar y simplificar como sigue:

$$k = \begin{pmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{pmatrix}$$

Siendo  $k_1 \geq k_2 \geq k_3$  los valores de la susceptibilidad a lo largo de los tres ejes ortogonales del elipsoide y  $k = (k_1 + k_2 + k_3)/3$  la susceptibilidad media.

Las variaciones del valor de  $k$  a lo largo de esos tres ejes permiten diferenciar los tres tipos de fábricas magnéticas representados en la figura 4: a) lineares (elipsoide prolato), b) planares (elipsoide oblato) y, c) triaxiales o plano-lineares (Tarling y Hrouda, 1993).



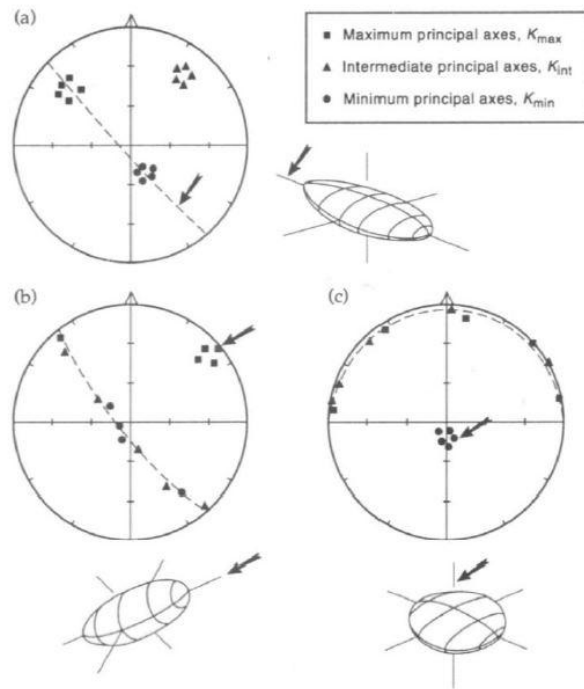


Figura 4. Diferentes agrupaciones de los datos direccionales en función del tipo de elipsoide representativo de la fábrica magnética, en proyección estereográfica, hemisferio inferior: (a) elipsoide triaxial; (b) elipsoide oblató; (c) elipsoide oblató (Tarling and Hrouda, 1993).

Las medidas de ASM proporcionan dos tipos de datos: direccionales (de naturaleza vectorial) y cuantitativos (de índole escalar). Los primeros incluyen a la lineación y a la foliación magnéticas, correspondientes al eje  $k_1$  y al plano perpendicular a  $k_3$ , respectivamente (Tarling and Hrouda, 1993).

Con respecto a los datos cuantitativos, teniendo en cuenta las variaciones del valor de  $k$  a lo largo de los ejes principales del elipsoide magnético ( $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ), los parámetros utilizados de forma habitual (Tarling y Hrouda, 1993) son:

Susceptibilidad magnética media:  $k=1/3(k_1+k_2+k_3)$ . Define la media aritmética de los módulos de los tres ejes principales del elipsoide de susceptibilidad magnética.

Anisotropía total:  $P=k_1/k_3$ . Indica el grado de anisotropía total de la roca y está definido como la relación existente entre los semiejes máximo y mínimo del elipsoide. Si no hay minerales ferromagnéticos y después de corregir el diamagnetismo (D) obtenemos que:  $P_{para} = (k_1-D)/(k_3-D)$  o también  $P_{para\%} = 100 \times [(k_1+1,4/k_3+1,4)-1]$ .

Anisotropía lineal:  $L=k_1/k_2$ . Define la intensidad de la lineación o el grado de alargamiento del elipsoide de ASM.:  $L_{para\%} = 100 \times [(k_1+1,4/k_2+1,4)-1]$ .

Anisotropía planar ( $F=k_2/k_3$ ). Indica el grado de aplastamiento del elipsoide de ASM o intensidad de la foliación.  $F_{para\%} = 100 \times [(k_2+1,4/k_3+1,4)-1]$ .

Parámetro de Flinn. ( $P_{flinn} = L_{para\%}/F_{para\%}$ ). Expresa la forma del elipsoide magnético. Si:  $0 < P_{flinn} < 1$ ; tendremos un elipsoide oblató y una fábrica planar. Si  $P_{flinn} > 1$ , indicará un elipsoide prolato y una fábrica lineal.

## 4. OBSERVACIONES Y DATOS GEOLÓGICOS

### 4.1. Características de campo y petrográficas de los materiales.

Los materiales estudiados son niveles de calcarenitas intercalados entre margas. Solo se han analizado calcarenitas porque en el pliegue cónico son los únicos materiales presentes y en pliegue cilíndrico las margas aparecen exclusivamente en una zona pequeña e intensamente deformada de su arco interno, lo que ha impedido la extracción de muestras orientadas.

En este trabajo se ha llevado a cabo el estudio de 6 láminas delgadas de calcarenitas procedentes del pliegue cilíndrico. Tanto al microscopio petrográfico como con la lupa binocular, se aprecian una serie de características comunes para todas ellas. Presentan un porcentaje de calcita cercano al 75%. Se trata, como se aprecia en la Fig. 5, de rocas formadas mayoritariamente por granos de calcita de carácter micrítico (granos cuyo tamaño de grano es  $< 4 \mu\text{m}$ ) y que presenta una textura granular siendo un agregado de partículas cementadas. Además, aparecen en menor proporción moscovita (aproximadamente un 6%), granos de cuarzo sub-redondeados (mono- y policristalino) de tamaño arena muy fina junto con feldespato y plagioclasa.

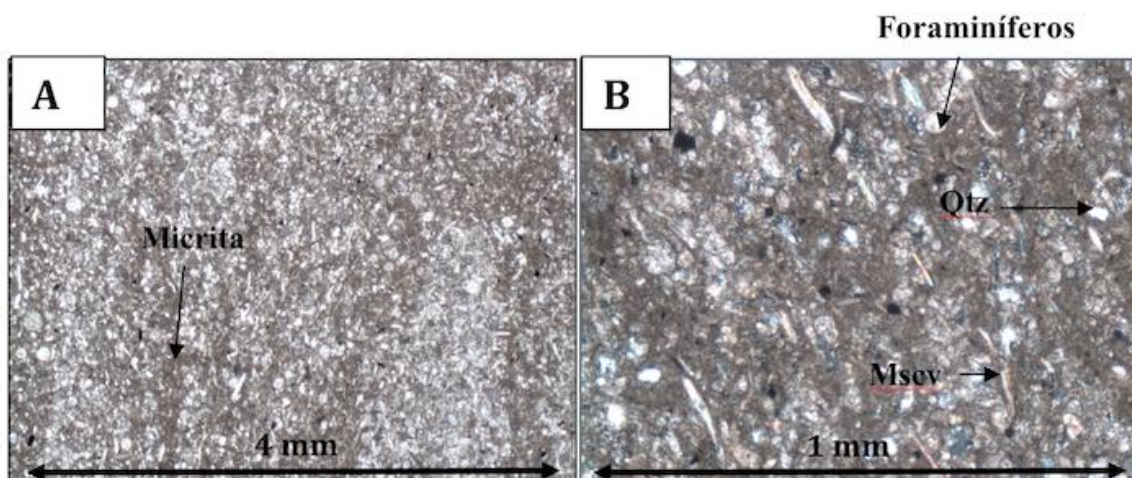


Figura 5. Imagen al microscopio petrográfico de las calcarenitas. A) s-2b (2.5x0.07) PPL (luz transmitida); B) s-2b (10x0.22). XPL (nicoses cruzados).

La moscovita, en proporciones cercanas al 7%, destaca por su fuerte orientación preferente (Fig. 5B), coincidente con la traza de la estratificación. Entre los minerales accesorios destacan la biotita y los circones (en menor cantidad). También hay abundantes microfósiles y agregados de calcita en microfracturas perpendiculares a la estratificación.

## 4.2. Geometría y elementos estructurales de los pliegues

Los pliegues cilíndricos están caracterizados por contener una línea de orientación constante (eje del pliegue) que puede ser desplazada paralelamente a lo largo de la superficie plegada sin perder contacto con ella (Fig. 6). Los pliegues que no cumplen con esta condición se denominan pliegues no cilíndricos.

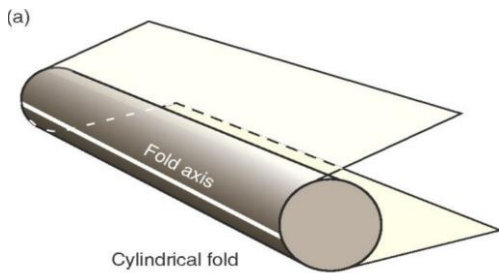


Figura 6. Esquema que representa un pliegue cilíndrico (tomado de Senanayake, 2017).

El pliegue cilíndrico es de geometría angular y tiene un flanco largo y otro corto que determinan que sea vergente hacia el NE. Este pliegue deforma a una secuencia multicapa, formada por niveles alternantes de calcarenitas y margas con potencias variables. Las calcarenitas forman pliegues isopacos, pero las margas presentan charnelas engrosadas y flancos adelgazados. Esas variaciones estructurales en rocas con distinta competencia permiten mantener prácticamente invariable la geometría angular en todas las capas que dibujan el pliegue (Fig. 7A). Las margas solo



Figura 7. A) Niveles de calcarenitas que describen la misma geometría angular del pliegue. La sección no corresponde al perfil del pliegue, por lo que el ángulo entre flancos es inferior al ángulo apical. B) Estrangulamiento de charnela en las margas que afloran en el núcleo del pliegue.

afloran en el acantilado (Fig. 2A). Como se ve en la figura 7B, en el núcleo del pliegue las margas están engrosadas con respecto a los flancos y provocan el estrangulamiento de la zona de charnela. El pliegue carece de foliación de plano axial.

A continuación se muestra el diagrama de proyección estereográfica para el pliegue cilíndrico (Fig. 8). Concretamente se han tomado 50 medidas por flanco más 6 en la zona de charnela.

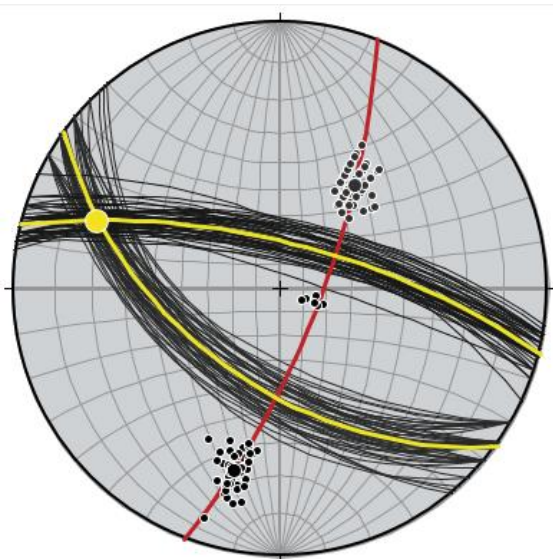


Figura 8. Proyección estereográfica equiangular (hemisferio inferior) del pliegue cilíndrico. Aparecen marcadas la orientación media del eje y de los flancos del pliegue (amarillo) y el perfil del pliegue (rojo). Número de medidas: 106.

Los dos flancos del pliegue están muy bien definidos y el eje del pliegue (el punto amarillo se corresponde con su valor medio) coincide con la intersección de los dos flancos (Fig. 8). Estas características del diagrama estereográfico son propias de pliegues angulares, con flancos prácticamente planos y una zona de charnela rectilínea y muy estrecha. A partir de este diagrama se obtienen datos como la orientación del eje ( $18^\circ/292^\circ$ ) y la superficie axial (dirección:  $N115^\circ E$ ; buzamiento:  $78^\circ SO$ ). Atendiendo al ángulo entre flancos,  $58^\circ$ , se trata de un pliegue apretado.

Los pliegues cónicos se forman por el arqueamiento de una superficie alrededor de un eje situado oblicuamente a esa superficie (Fig. 9). Por ello la superficie plegada se ajusta a parte de un cono en vez de a un cilindro. Esto puede ocurrir (1) deformando una superficie previamente plegada o (2) en los cierres de un pliegue cilíndrico (Stauffer, 1964). La sección transversal de un pliegue cónico puede ser un segmento de un círculo (pliegue cónico circular), un segmento de una elipse (pliegue elíptico cónico), (Haman, 1961), o una combinación de segmentos de diferentes elipses. Se supone que la forma cónica básica circular se forma por rotación pura sin componente de deformación en el plano plegado, mientras que la elíptica implica el aplastamiento de un pliegue cónico circular.

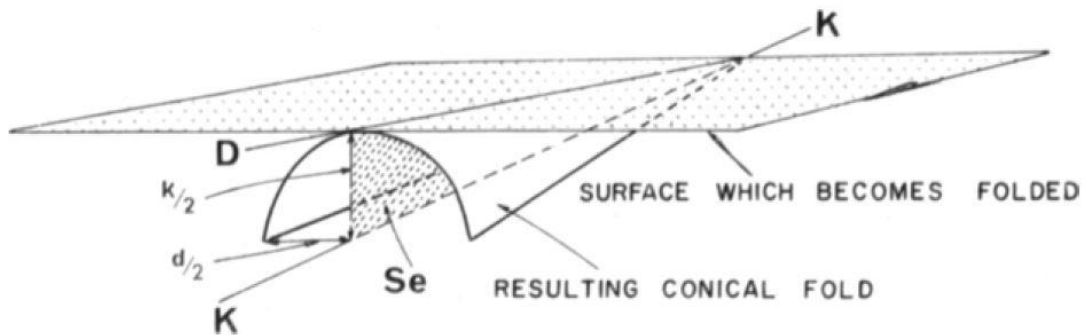


Figura 9. Esquema que muestra los elementos geométricos de un pliegue cónico ( $K$ : eje del cono;  $DK$ : generatriz del cono) y su formación a partir de la rotación de una superficie plana en torno a un eje oblicuo a dicha superficie (Haman, 1961).

Los elementos geométricos de un pliegue cónico han sido definidos por Haman (1961) como sigue (Fig. 9): la superficie ( $Se$ ) que bisecta (divide en dos partes) el ángulo entre los puntos de inflexión en las extremidades opuestas del pliegue, el eje central ( $K$ ), el eje del vértice ( $D$ ) que es la línea de intersección de la superficie bisectante (dividida) ( $Se$ ) con el pliegue cónico, el ángulo de vértice ( $K$ ) que es el doble del ángulo entre  $D$  y  $K$ , el ángulo de vértice ( $d$ ) que es el ángulo de vértice entre las extremidades medido en un plano perpendicular a  $Se$  y paralelo a  $K$ . El eje del vértice también puede definirse como la charnela del pliegue (Stauffer, 1964).

El pliegue cónico estudiado corresponde al cierre peri-anticlinal de un pliegue concéntrico (Fig. 2B). El pliegue tiene un perfil semicircular y alcanza un radio de curvatura de 8 metros en su cúspide (Fig. 10).



Figura 10. Cúspide del pliegue cónico, donde se aprecia su geometría semicircular y el desarrollo de fracturas abiertas, de tensión, características en el arco externo de los pliegues.

De acuerdo con el desarrollo de numerosas fracturas de tensión (abiertas) sub- paralelas a la zona de charnela (Fig. 10), la capa que describe la estructura forma parte del arco externo del pliegue. La deformación por extensión que se produce localmente en el arco externo impide la formación de estrangulamientos de charnela como el observado en el pliegue cilíndrico (Fig. 7B)

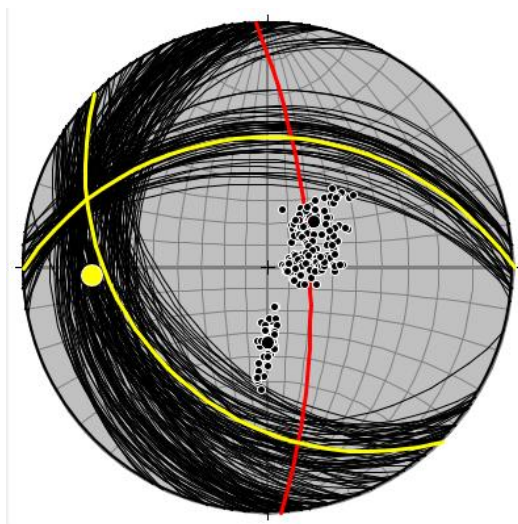


Figura 11. Diagrama  $\beta$  para el conjunto de medidas de  $S_0$  ( $n = 120$ ) en el pliegue cónico. Se observa una dispersión elevada de las líneas de máxima pendiente ( $n = 85$ ) a lo largo de la zona de charnela (el punto amarillo marca su orientación media). El círculo mayor perpendicular a esa orientación (rojo) no contiene al conjunto de los polos de  $S_0$ , en contraste con el plano equivalente (el perfil del pliegue) del pliegue cilíndrico.

En este pliegue he tomado 70 medidas del flanco izquierdo, 50 del derecho y 85 de la charnela, para poder reflejar el cambio gradual en la orientación de las capas. Los resultados se muestran en la Fig. 11. El diagrama estereográfico refleja que se trata de un pliegue abierto, con un ángulo entre flancos de aproximadamente  $100^\circ$ , ligeramente asimétrico y que su plano axial buza unos  $80^\circ$  hacia el Suroeste. Además, la inclinación de  $S_0$  en la zona de charnela aumenta desde  $7^\circ$  en la cúspide del pliegue hasta  $33^\circ$  en el vértice del cono.

## 5. ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA

El análisis de la susceptibilidad magnética está basado en las medidas de 42 muestras procedentes de 13 estaciones de sondeo en el pliegue cilíndrico y de 57 muestras extraídas en 27 estaciones para el pliegue cónico. Las publicaciones sobre ASM utilizan habitualmente un número de muestras más elevado, porque los valores de  $k$  y la fábrica magnética pueden variar mucho en muestras de un mismo testigo. Sin embargo, el test inicial efectuado en la estación S-1 demostró la similitud de las medidas en cada sondeo, lo que permitió limitar el número de muestras por estación. La homogeneidad de las medidas se ha confirmado en las restantes estaciones de muestreo. La figura 12 muestra la localización de las estaciones de muestreo en cada uno de los dos pliegues. La metodología de muestreo aparece recogida en el Anexo II.

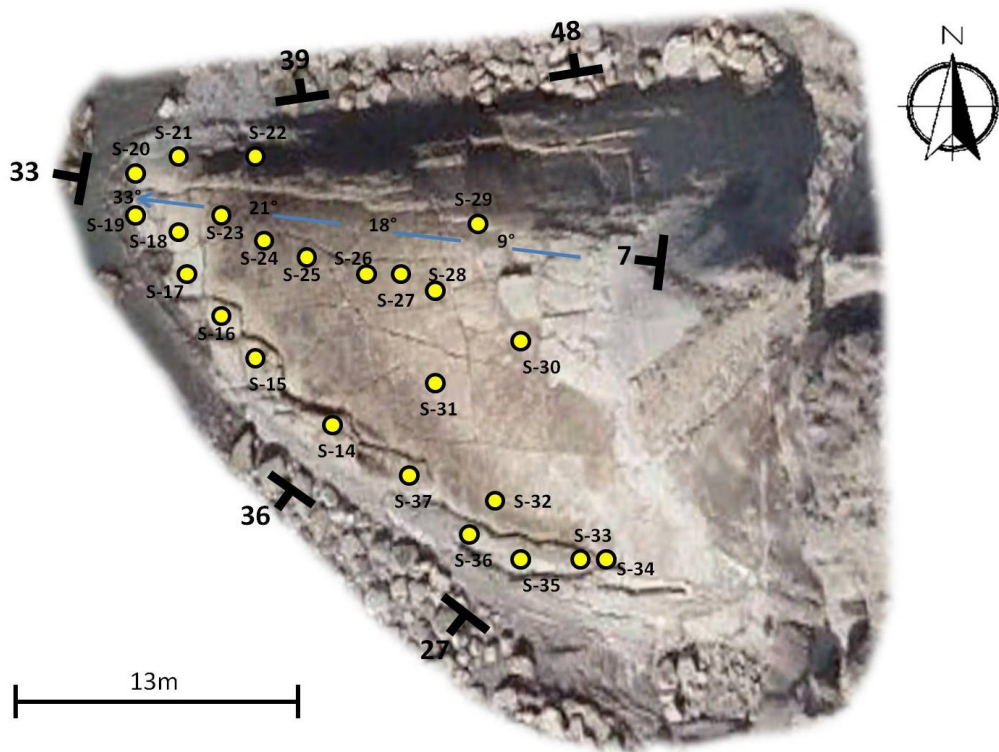
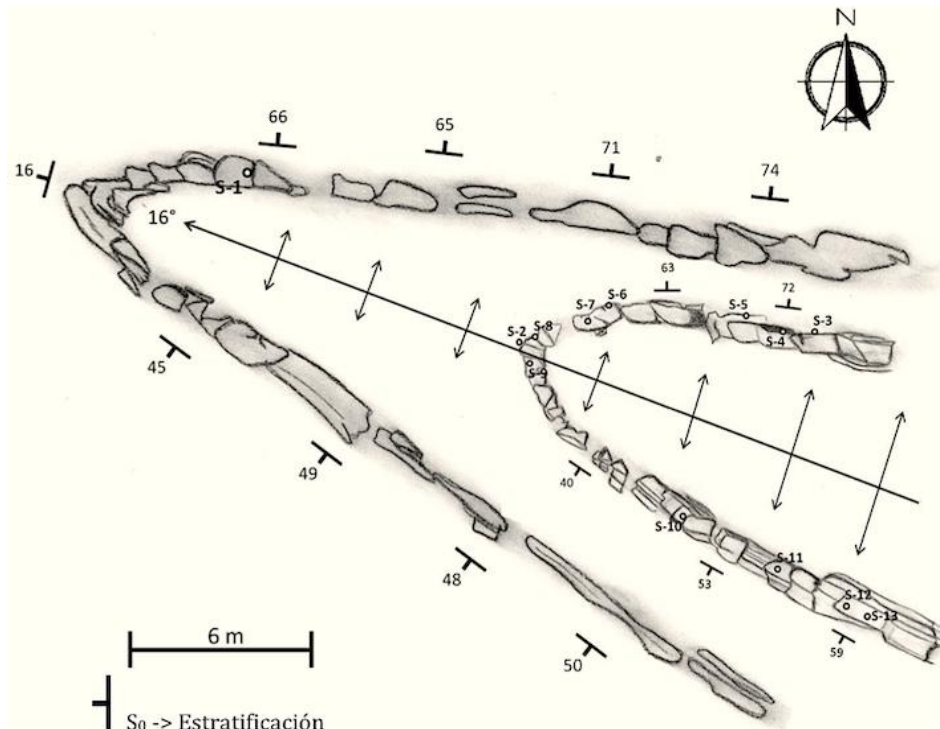


Figura 12. Localización de las estaciones de muestreo en ambos pliegues.

### 5.1. Valores de la susceptibilidad magnética y de su anisotropía

Los valores de la susceptibilidad magnética del pliegue cilíndrico varían entre  $84.19 \times 10^{-6}$  y  $189.1 \times 10^{-6}$  SI y su valor medio es de  $151.18 \times 10^{-6}$  SI. En el caso del pliegue

cónico la dispersión es menor, entre  $72.85 \times 10^{-6}$  y  $116.7 \times 10^{-6}$  SI y el valor medio de  $k$  es inferior, de  $90.2 \times 10^{-6}$  SI. Esos valores son característicos de rocas en las que la fábrica magnética es de origen paramagnético esencialmente.

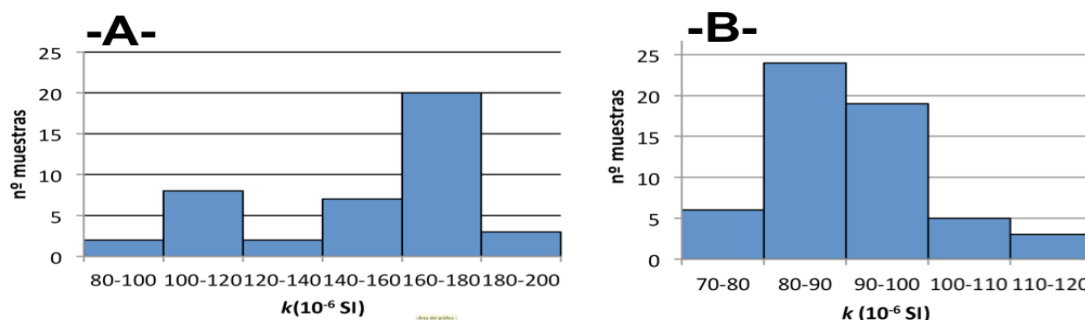


Figura 13. Histogramas de frecuencia para los valores de  $k$  correspondientes al pliegue cilíndrico (A) y cónico (B).

El hecho de que más del 75 % de las muestras del pliegue cilíndrico superen el valor máximo de  $k$  en el pliegue cónico (Fig. 13 A) sugiere que las calcarenitas del pliegue cónico son más carbonatadas y su contenido en micas detríticas inferior.

A continuación se muestran los diagramas del parámetro de la anisotropía total,  $P = k_1/k_3$ , frente al logaritmo de la susceptibilidad magnética,  $k$ , para los dos pliegues (Fig. 14). La determinación de la anisotropía puede dar información sobre la influencia relativa de los procesos, sedimentarios y tectónicos, que han actuado durante el desarrollo de la petrofábrica que caracteriza a las calcarenitas estudiadas.

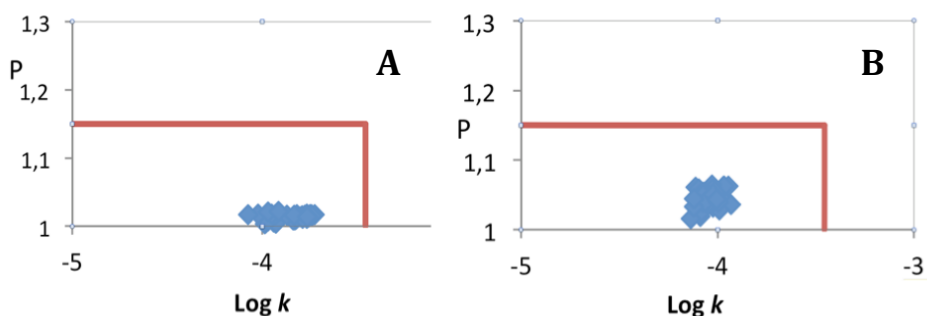


Figura 14. Diagramas  $P$  vs.  $\text{Log } k$  en el pliegue cilíndrico (A) y en el cónico (B).

Como se observa en la figura 14, todas las muestras caen en el campo de los materiales paramagnéticos, situado a la izquierda de la línea roja vertical (Bouchez, 1997). Existe una tendencia de nube de puntos claramente horizontal en el caso del pliegue cilíndrico que demuestra la falta de correlación entre  $k$  y  $P$ , mientras que en el cónico dicha nube se encuentra más concentrada. También se aprecia que en conjunto los valores de  $P$  son mayores en el cónico. Ninguna muestra alcanza los valores de  $P$



(línea roja horizontal) correspondientes al dominio de materiales en los que la anisotropía se debe a deformaciones plásticas en estado sólido. Esto indicaría que la fábrica magnética de las calcarenitas es fundamentalmente sedimentaria y que la deformación de los procesos de plegamiento ha sido insuficiente para modificar apreciablemente la fábrica sedimentaria.

## 5.2. Caracterización de la mineralogía magnética

Para comprobar el carácter esencialmente paramagnético de las calcarenitas se ha analizado la variación de  $k$  con respecto a la temperatura de la muestra S-10, que procede del pliegue cilíndrico y se ha seleccionado por ser la que mayor valor de  $k$  ( $189,1 \times 10^{-6}$  SI) ha proporcionado. El proceso de medición cuasi-continua de  $k$  abarca el rango de temperaturas entre  $25^\circ$  y  $700^\circ$  C. Las medidas se han realizado en una atmósfera de argón para evitar la oxidación de la muestra durante la fase de calentamiento. El equipo utilizado se muestra en la figura 1 del Anexo III. El resultado del ensayo se expresa mediante las curvas termomagnéticas representadas en la Fig. 15.

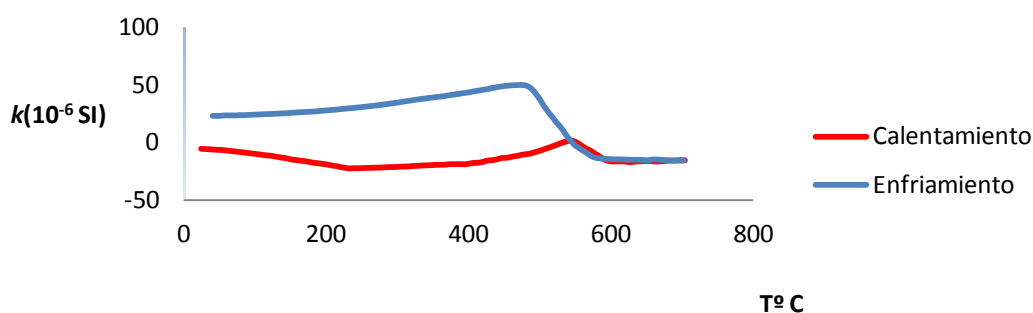


Figura 15. Curvas generadas en el proceso de calentamiento y enfriamiento de la muestra S-10, caracterizada por tener un valor medio de  $k = 189,1 \times 10^{-6}$  SI.

En la curva de calentamiento, el aumento de  $k$  por encima de  $400^\circ$  C, hasta alcanzar un máximo en torno a  $550^\circ$  C, y su brusco descenso a temperaturas entre  $570^\circ$ - $580^\circ$  C, indican la existencia de magnetita, ya que esos valores coinciden con el pico de Hopkinson y la temperatura de Curie, respectivamente, de la magnetita (Taling y Hrouda, 1993). Sin embargo, los bajos valores de  $k$  de la muestra, junto con el hecho de que entre  $22^\circ$  C y aproximadamente  $350^\circ$  C, la curva de calentamiento presente un trazado similar al de una hipérbola, es indicativo de que la susceptibilidad está controlada por minerales paramagnéticos (Tarling y Hrouda, 1993). Es decir, que el contenido en magnetita es inferior al 0,01 % en peso de la roca, de acuerdo con los rangos de susceptibilidad característicos para distintos tipos de minerales (Fig. 3).

Además, valores tan bajos de  $k$  son característicos de silicatos pobres en hierro, como la moscovita observada en el análisis petrográfico de las láminas delgadas. El calentamiento de la muestra hasta temperaturas de 700° C produce la neo-formación de magnetita. Esto hace que las curvas de calentamiento y de enfriamiento no sean reversibles y que la curva de enfriamiento registre un valor de  $k$  superior al de la curva de calentamiento.

## 6. LA FÁBRICA MAGNÉTICA

Los parámetros de la ASM, obtenidos a partir de las medidas efectuadas mediante el susceptómetro Kappabridge MFK1-A del Departamento de Geodinámica de la UPV/EHU, se muestran en las tablas 1 y 2 del Anexo IV. La primera de ellas corresponde al pliegue cilíndrico y la segunda al cónico.

### 6.1. Parámetros escalares

A continuación se presentan los gráficos de la variación de  $P$  con respecto a  $k$  (Fig. 16A) y el de los parámetros F-L o diagrama de Flinn (Fig. 16B). El primer gráfico permite apreciar, más claramente que la figura 15, las diferencias de los valores de  $k$  y  $P$  en los dos pliegues estudiados. El cilíndrico muestra valores prácticamente constantes de anisotropía total, aproximándose a una recta. Sin embargo, la susceptibilidad exhibe una dispersión amplia. En el pliegue cónico, por el contrario, la susceptibilidad apenas varía pero la anisotropía total es más variable y alcanza valores superiores a los del pliegue cilíndrico.

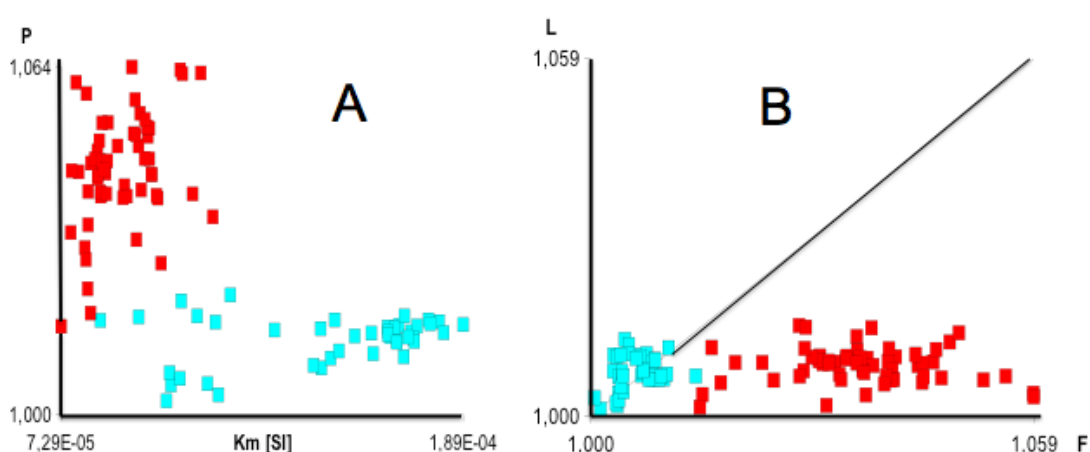


Figura 16. A) Gráfica  $P$  vs.  $k$ . B) Gráfico de Flinn. Los valores del pliegue cilíndrico se muestran en azul, y los del cónico en rojo.

El diagrama de Flinn (Fig. 16B) muestra que el pliegue cilíndrico, representado por los cuadrados azules, tiene una fábrica predominantemente plano-lineal, aunque algunos de los valores tienen tendencia a aproximarse hacia fábricas más lineales. El pliegue cónico, indicado por cuadrados rojos, también presenta una fábrica plano-lineal, aunque ciertos valores se extienden sobre las fábricas de carácter planar. Teniendo en cuenta entonces que ambos pliegues presentan una fábrica plano-lineal (Fig. 16B), el elipsoide de susceptibilidad magnética es de tipo triaxial ( $k_1 > k_2 > k_3$ ), en el que tanto la foliación como la lineación magnética están bien definidas.

## 6.2. Parámetros direccionales de la ASM

Para comprender de una manera más clara el interés geológico de los datos direccionales, a continuación se consideran las variaciones de orientación de los ejes principales del elipsoide de la fábrica magnética a lo largo de las capas plegadas.

En el pliegue cónico los ejes  $k_3$  del elipsoide magnético (Fig. 17B) presentan una distribución equiparable a la de los polos de la estratificación (Fig. 17A). En cuanto al eje  $k_1$  se observa una concentración de la mayoría de las medidas en torno a la dirección NO-SE, con variaciones de inclinación desde la horizontal hasta  $32^\circ$  NO similares a las medidas en el campo a lo largo de la zona de charnela.

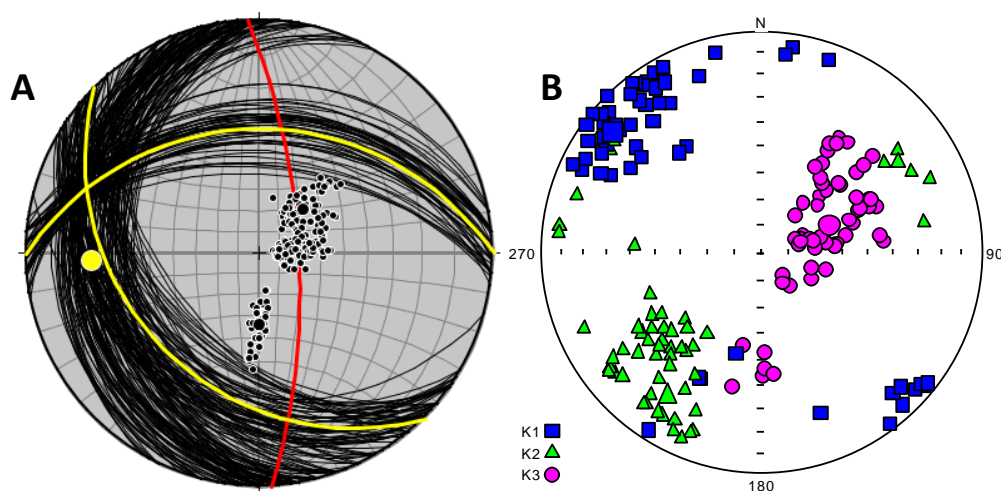


Figura 17. Pliegue cónico. A) Diagrama de proyección estereográfica de  $S_0$  y de los polos de  $S_0$ . B) Orientaciones de los tres ejes del elipsoide de la fábrica magnética. Se aprecia cómo los ejes  $k_3$  y los polos de  $S_0$  comparten patrones de distribución similares.

En este pliegue, la excelente concordancia de los polos de la estratificación (Fig. 17A) con el eje  $k_3$  de la fábrica magnética (Fig. 17B) demuestra que la estratificación y la foliación magnética comparten la misma orientación en cada zona del pliegue que se considere. Este hecho es congruente con la baja anisotropía mencionada previamente

(Fig. 14B) y consolida la interpretación de que en el pliegue cónico la deformación ha sido insuficiente para alterar la fábrica magnética de origen sedimentario. A pesar del carácter primario de la fábrica magnética, las variaciones de inclinación de la zona de charnela impiden restaurar el pliegue hasta la horizontal y, por lo tanto, este pliegue no sirve para determinar la orientación inicial del eje  $k_1$ .

El diagrama de orientación de los ejes de la fábrica magnética del pliegue cilíndrico es más complicado que en el pliegue cónico. Las complicaciones se manifiestan esencialmente en la divergencia entre los diagramas de polos de  $S_0$  y del eje  $k_3$  de la fábrica magnética (Fig. 18). Salvo dos ejes  $k_3$  de dirección N135°E, los

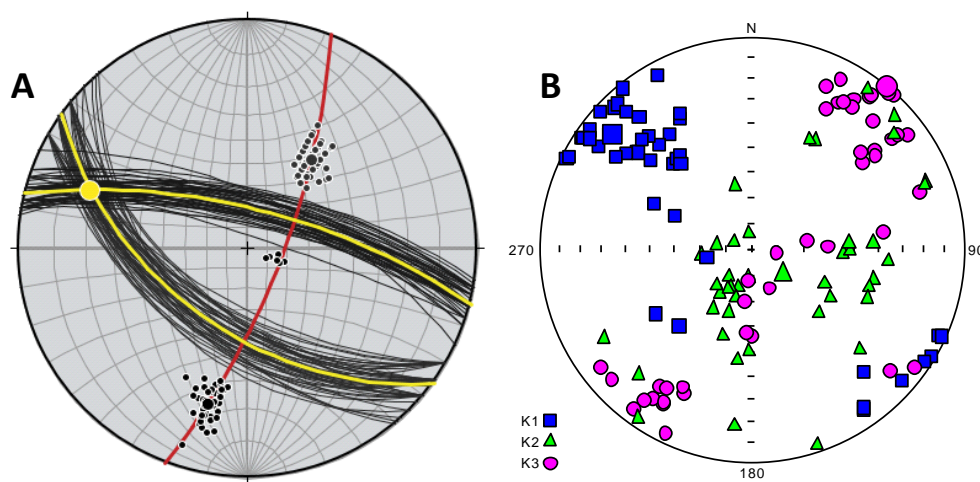


Figura 18. Pliegue cilíndrico. A) Proyección estereográfica de  $S_0$  y de los polos de  $S_0$ . B) Orientaciones de los tres ejes del elipsoide de la fábrica magnética. Se aprecia cómo los ejes  $k_3$  se reparten alrededor de un círculo máximo de dirección N40°E que buza unos 80° SE restantes se agrupan en un círculo máximo de elevado buzamiento y dirección aproximadamente N40°E (Fig. 18B) que no coincide con el perfil del pliegue definido por los polos de  $S_0$  (Fig. 18A). Además, aunque las medidas de  $k_3$  se concentran en tres máximos (que podrían considerarse equivalentes a las concentraciones de polos de  $S_0$  de los dos flancos y e la charnela), las posiciones de esos máximos tampoco concuerdan con las de los polos de  $S_0$ . Estas divergencias angulares podrían deberse a la influencia de la deformación sobre la fábrica magnética, por ello a continuación se presentará una interpretación detallada de la fábrica magnética, distinguiendo las zonas de los flancos y la charnela, y centrada en el análisis del pliegue cilíndrico.

## 7. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

Esta interpretación considera dos aspectos principales. El primero es el tipo de fábrica que caracteriza a las calcarenitas estudiadas y el segundo un análisis

comparativo de la fábrica magnética con los elementos estructurales del pliegue cilíndrico.

### 7.1. Tipos de fábricas magnéticas

Con este objetivo se presentan separadamente los resultados direccionales obtenidos en los flancos y en las charnelas de los dos pliegues. En el pliegue cónico se aprecia que, tanto en los flancos como en la charnela, los tres ejes del elipsoide de la fábrica magnética están agrupados en máximos (Fig. 19), lo que indica que la fábrica magnética es de tipo planar, con la foliación y la lineación magnéticas bien definidas. Este resultado concuerda con la información proporcionada por el diagrama de Flinn para el pliegue cónico (Fig. 16B).

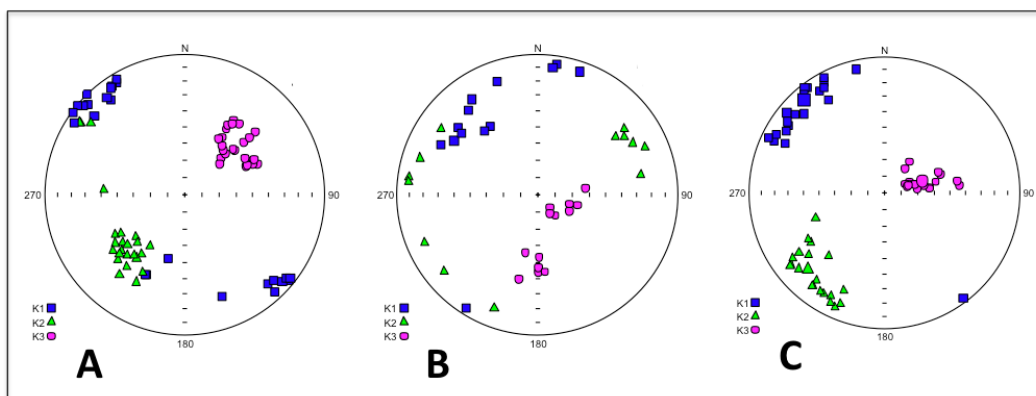


Figura 19. Proyección estereográfica equiareal de los ejes de la fábrica magnética en el pliegue cónico. A) Flanco largo, B) Flanco corto y C) Charnela.

En el pliegue cilíndrico los ejes  $k_1$ ,  $k_2$  y  $k_3$  sólo están agrupados en máximos bien diferenciados en el flanco largo del pliegue (Fig. 20A).

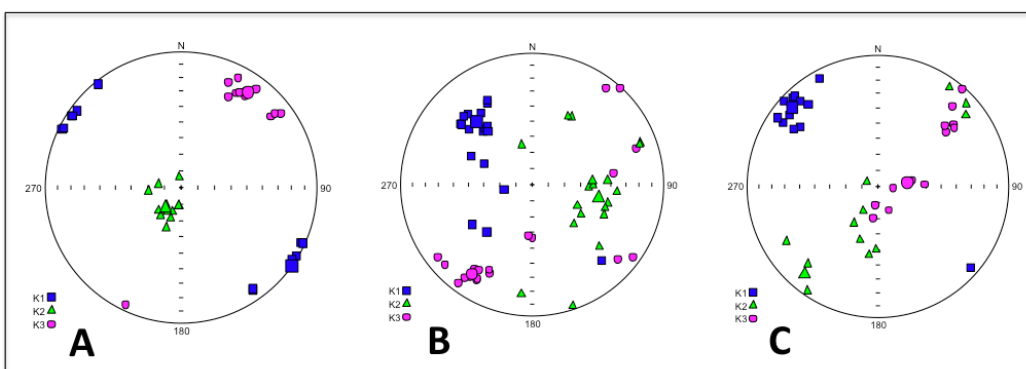


Figura 20. Proyección estereográfica equiareal de los ejes de la fábrica magnética en el pliegue cilíndrico. A) Flanco largo (n = 12), B) Flanco corto (n = 19) y C) Charnela (n = 12).

La zona de charnela presenta una buena concentración de  $k_1$ , mientras que los ejes  $k_2$  y  $k_3$  están dispersos en un círculo mayor perpendicular a  $k_1$  (Fig. 20C). Esos diagramas de orientación indican que mientras que en el flanco largo del pliegue se han desarrollado fábricas plano-lineares en la zona de charnela aparecen fábricas lineares. Estos dos tipos de fábricas ya habían sido detectados en el diagrama de Flinn correspondiente al pliegue cilíndrico (Fig. 16B). La interpretación del diagrama del flanco corto es más difícil de realizar con los datos disponible; haría falta disponer de datos adicionales, microestructurales y petrográficos, para saber si hay variaciones litológicas locales o estructuras de deformación locales, no penetrativas, que puedan originar fábricas magnéticas compuestas (sedimentarias + tectónicas).

## 7.2. Correlación entre la fábrica magnética y los elementos estructurales en el pliegue cilíndrico.

A continuación se presenta una interpretación más concreta sobre la fábrica magnética en el flanco largo y en la charnela del pliegue cilíndrico, a partir de las orientaciones medias de los ejes  $k_1$ ,  $k_2$  o  $k_3$  representados en las figuras 20A y 20C. En este análisis se considera esencialmente la orientación de la foliación magnética (plano  $k_1 - k_2$ ) con respecto a la orientación de  $S_0$  y de la superficie axial:

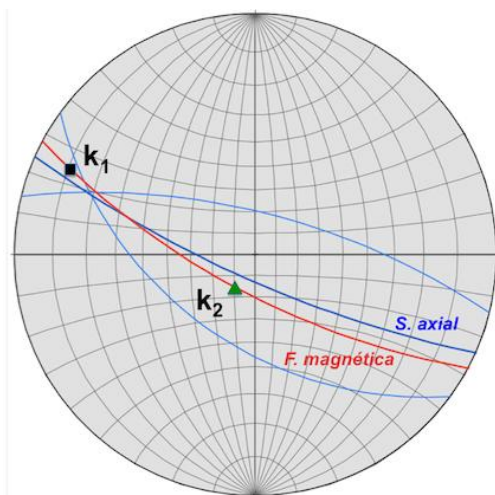


Figura 21. Proyección estereográfica equiangular (hemisferio inferior) de la orientación media de la foliación magnética (en rojo) y de los ejes  $k_1$  y  $k_2$  de las muestras procedentes del flanco sur del pliegue (en azul claro). Como la foliación magnética y la superficie axial (círculo mayor en azul más oscuro) son sub-paralelas, se puede concluir que la fábrica magnética es de tipo tectónico esencialmente.

Como se observa en la figura 21, la foliación magnética de las muestras extraídas en el flanco largo es prácticamente coincidente con la orientación de la superficie axial en vez de con la estratificación. Esto indica que la fábrica magnética refleja la deformación asociada al aplastamiento responsable del plegamiento.

Los resultados obtenidos en la zona de charnela son más complejos, ya que el eje  $k_3$  define dos agrupaciones claramente diferenciadas (Fig. 22A). La primera de ellas, con  $k_3$  coincidente con el polo de la estratificación, la foliación magnética es sub-

concordante con  $S_0$  (color naranja; trazo discontinuo) y, en consecuencia, proceden de muestras que conservan la fábrica magnética primaria, de origen sedimentario. En cambio, el segundo grupo está determinado por foliaciones magnéticas claramente oblicuas a  $S_0$  (color rojo; trazo continuo). Como este segundo grupo de foliaciones magnéticas tampoco concuerda con la orientación de la superficie axial, se interpretan como fábricas magnéticas compuestas (sedimentaria + tectónica).

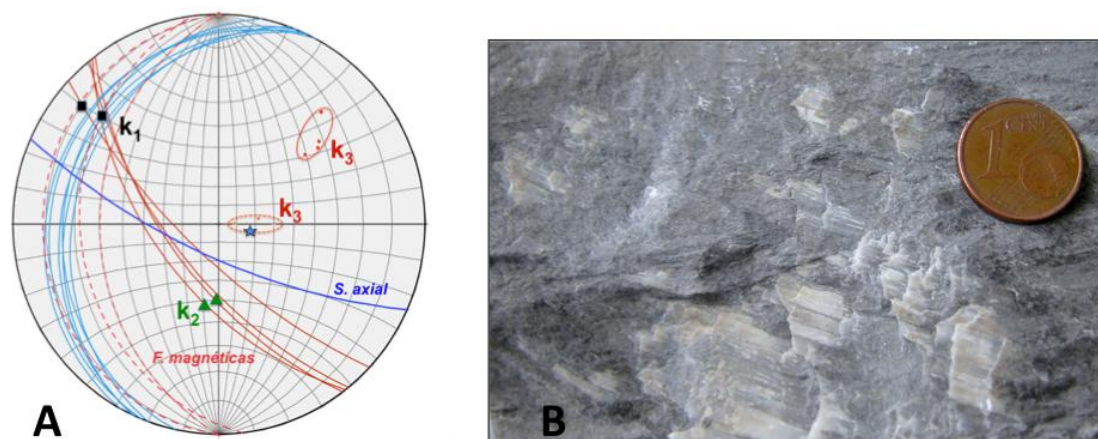


Figura 22. A) Proyección estereográfica equiangular (hemisferio inferior) de la estratificación (círculos mayores en azul claro), orientación media del polo de  $S_0$  (estrella azul) y de la foliación magnética en la charnela del pliegue cilíndrico. Obsérvese que la foliación magnética se distribuye en dos grupos con distintas orientaciones (círculos mayores rojos y naranjas). B) Sección perpendicular a la estratificación y oblicua al eje del pliegue (muestra S-2). Se aprecian numerosas fracturas no penetrativas y repartidas irregularmente en la roca. Atendiendo a su oblicuidad con el eje del pliegue y a las estrías se interpretan como fracturas de cizalla.

Al comprobar que parte de las muestras de la zona de charnela tienen fábricas compuestas, he reexaminado las estructuras de las charnelas de las capas plegadas. Esa última observación de campo me ha permitido detectar sistemas de fractura que no había observado en el estudio estructural inicial. Se trata de fracturas no penetrativas, pero que localmente presentan espaciados de menos de un centímetro. Son fracturas con elevado buzamiento, oblicuas al eje del pliegue y que contienen estrías de deslizamiento. Es decir, pueden ser consideradas como fracturas de cizalla. Las muestras de la estación S-2 proceden precisamente de uno de esos sectores y contienen numerosas microfracturas (Fig. 22B), por lo que posiblemente las fábricas magnéticas compuestas de la zona de charnela reflejan la aportación de ese sistema de fracturas a la anisotropía magnética total de las muestras.

El desarrollo de fábricas magnéticas de origen tectónico en el flanco largo del pliegue y de fábricas compuestas en la zona de charnela también podría explicar las diferencias en los valores de la anisotropía total (mayores en el pliegue cónico) y en los tipos de fábrica magnética determinados en las muestras de los dos pliegues (Fig. 16).

Esto se debe a que la superposición de fábricas magnética puede tener un efecto aditivo o sustractivo dependiendo de las orientaciones respectivas de cada una de las dos fábricas que se superponen. En el presente caso, la interferencia de la fábrica sedimentaria con la tectónica habría tenido resultados sustractivos.

### 7.3. Influencia del plegamiento sobre la fábrica magnética

La conservación de la fábrica magnética original en el primer grupo de muestras de la charnela (Fig. 22), junto con la inclinación uniforme del eje del pliegue (Fig. 8), permite restaurar las capas plegadas hasta su posición horizontal (Fig. 23) previa a la deformación y conocer la orientación inicial de la lineación magnética,  $k_1$ .

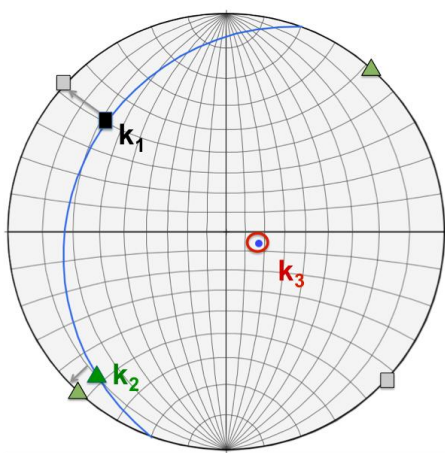


Figura 23. Restauración hasta la horizontal de la estratificación (círculo máximo azul) de la zona de charnela del pliegue cilíndrico. El eje de abatimiento es perpendicular al eje del pliegue. La dirección inicial de  $k_1$  sería N132°E (cuadrados grises) y la de  $k_2$  N42°N (triángulos verdes)

Como se ve en la figura 23, la lineación magnética presentaría una orientación N132°E en el momento de la adquisición de la fábrica magnética de origen sedimentario. Esta restauración de la fábrica magnética original también tiene interés para analizar teóricamente qué posiciones alcanzarían los ejes  $k_1$  y  $k_2$  en los dos flancos del pliegue al rotar la fábrica inicial alrededor del eje del pliegue (Fig. 24).

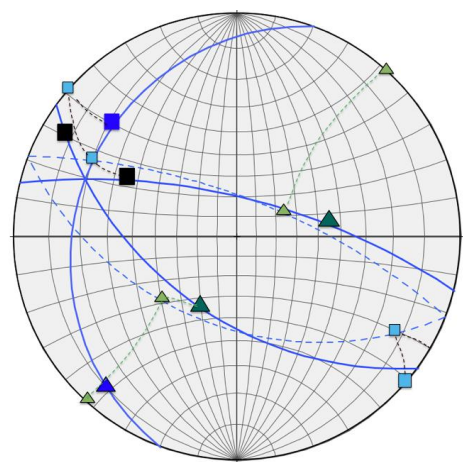


Figura 24. Cálculo de las orientaciones teóricas de  $k_1$  y  $k_2$  en los flancos del pliegue a partir de sus orientaciones iniciales (cuadrado y triángulo pequeños, respectivamente, sobre el círculo equatorial). En el estadio final, el eje  $k_1$  presentaría inclinaciones hacia el cuadrante NO, tanto para el flanco largo como para el corto, mientras que  $k_2$  se repartiría entre los cuadrantes SO (flanco largo) y NE (flanco corto).

Efectuando las dos rotaciones necesarias para generar un pliegue vergente hacia el NE y que tenga el eje ligeramente inclinado hacia el ONO se obtendría que el eje  $k_1$



(cuadrados negros) presentaría prácticamente la misma dirección N300°E en los dos flancos, con unos 6° de inclinación, en el flanco largo y de unos 35° en el corto (Fig. 24). El hecho de que la dirección sea prácticamente idéntica en los dos flancos se debe al bajo ángulo que forman el eje del pliegue y  $k_1$ . El eje  $k_2$  (triángulos verdes), en cambio, alcanzaría orientaciones perfectamente diferenciadas para cada flanco. Si se comparan estos resultados teóricos con los datos reales (Fig. 20 A y B) se aprecian divergencias significativas en muchas medidas, que reflejarían que la fábrica sedimentaria solo se ha conservado en unas pocas muestras.

## 8. CONCLUSIONES

Por su sensibilidad y facilidad de medición, la ASM es una técnica con la que se puede detectar la fábrica mineral de rocas aparentemente isótropas, que carecen de estructuras apreciables a simple vista (Cañón-Tapia, 2011). Para llevar a cabo el análisis, se necesita un estricto protocolo tanto para recoger las muestras en campo como para su posterior tratamiento. En él se encuentran incluidos el buen manejo de las herramientas y equipos, la marcación de las muestras y el proceso de corte.

Los valores de susceptibilidad magnética para ambos pliegues son bajos ( $151.18 \times 10^{-6}$  de media en el caso del cilíndrico y  $90.2 \times 10^{-6}$  para el cónico) indicando un carácter paramagnético debido a su composición mineral.

A partir del análisis direccional y de la forma de los elipsoides magnéticos, se comprueba que en ambos pliegues la fábrica magnética es de tipo plano-linear, exhibiendo un buen agrupamiento de los tres ejes principales  $k_1$ ,  $k_2$  y  $k_3$  y elipsoides triaxiales. En el pliegue cónico hay un porcentaje significativo de muestras con fábricas lineares. El pliegue cónico tiene valores más altos de anisotropía total, P, que el cilíndrico.

En el pliegue cónico las calacarenitas conservan la fábrica sedimentaria, mientras que el cilíndrico exhibe fábricas magnéticas más complejas, que reflejan superposición de fábricas de origen tectónico de diferente intensidad. En el flanco izquierdo la fábrica es esencialmente tectónica, subparalela a la superficie axial del pliegue, mientras que la charnela se han conservado fábricas magnéticas sedimentarias y localmente ha desarrollado fábricas compuestas (sedimentaria+ tectónica), de carácter sustractivo.

La restauración de la deformación en el pliegue cilíndrico ha permitido obtener la orientación primaria de la lineación magnética,  $k_1$ , dato de interés para posibles

trabajos futuros interesados en obtener información sobre las direcciones de paleocorrientes en este tipo de rocas turbidíticas de grano fino.

## Agradecimientos

Finalmente quería agradecer al profesor Txema Tubía su inestimable ayuda y enseñanzas que han sido piezas clave para el seguimiento y elaboración de este proyecto.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

AGICO, 2011. User Manual SAFYR4W. 45p.

Arriola, A., Eguiguren, E., García, I., Garrote, R., 1993. Mapa geológico nº37-IV (Algora). Escala 1: 25.000. Gobierno Vasco: Gráficas Indauchu, S.A-Gallarta (Vizcaya).

Bouchez, J. L., 1997. Granite is never isotropic: an introduction to AMS studies of granitic rocks. In *Granite: from segregation of melt to emplacement fabrics*. Springer Netherlands: 95-112.

Brinkmann, R., Lögters, H., 1968. Diapirs in western Pyrenees and Foreland, Spain. En : *Diapirism and Diapirs* (Eds.: J. Braunstein y G. D. O'Brian). *American Association of petroleum Geologist Memories*, 8: 275-292.

Campos, J., 1976. Estudio geológico del Pirineo Vasco, al Oeste del río Bidasoa. Tesis Doctoral, Univ. de Bilbao, 260.

Cañón-Tapia, E., 2011. AMS in Granites and Lava Flows: Two End Members of a Continuum. In *The Earth's Magnetic Interior*. Springer Netherlands: 263-280.

Cardozo, N., Allmendinger, R.W., 2013, Spherical projections with OSXStereonet: *Computers & Geosciences*, v. 51, p. 193 – 205, doi:10.1016/j.cageo.2012.07.021. (Stereonet 9.5).

Choukroune, P., 1976. Strain patterns in the Pyrenean chain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 283(1312): 271-280.

Collinson, D. W., 1983. *Methods in palaeomagnetism and rock magnetism*, 500 pp.

Cox, A., & Doell, R. R., 1960. Review of paleomagnetism. *Geological Society of America Bulletin*, 71(6): 645-768.

- Cuevas, J., Eguiluz, L., Ramón-Lluch, R., Tubía, J.M., 1982. Sobre la existencia de una deformación tectónica compleja en el flanco N del sinclinal de Oiz-Punta Galea (Vizcaya). *Investigación y espacio*, 5: 47-61.
- Cuevas, J., Aranguren, A., Badillo, J.M., Tubía, J.M., 1998. Tectónica de inversión en el sector central del Arco Vasco (Cuenca-Vasco Cantábrica). *Geogaceta*, 24: 95-98.
- Cuevas, J., Aranguren, A., Badillo, J.M., Tubía, J.M., 1999. Estudio estructural del sector central del arco Vasco (Cuenca Vasco-Cantábrica). *Boletín Geológico y Minero*, 110: 3-18.
- Dinarès-Turell, J., McClelland, E., Santanach, P., 1991. Significado de la fábrica magnética de algunas rocas sedimentarias de las Unidades sudpirenaicas. *Sociedad Geológica de España*, 4: 179-186.
- Feuillée, P., Rat, P., 1971. *Structures et paléogéographies pyrénéo-cantabriques*. En: Histoire structurale du Golfe de Gascogne, J. Debyser, X. Le Pichon y L. Montadert (Eds.): Technip. Paris, 1-48.
- Haman, P., 1961. Manual of the Stereographic Projection. *West Canadian Research Publications, Calgary, Series 1, No. 1*.
- Hrouda, F., 1982. Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. *Surveys in Geophysics*, 5(1): 37-82.
- Incoronato, A., Addison, F. T., Tarling, D. H., Nardi, G., & Pescatore, T., 1983. Magnetic fabric investigations of pyroclastic deposits from Phlegrean Fields, southern Italy. *Nature*, 306(5942): 461-463.
- Lotze, F., 1960. Zur Gliederung der oberkreide in der Baskischen Depression (Nordspanien). *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie*, 10: 132-144.
- Noltimier, H. C., 1971. Determining magnetic anisotropy of rocks with a spinner magnetometer giving in-phase and quadrature data output. *Journal of Geophysical Research*, 76(20): 4849-4854.
- Olivet, J.L., 1996. Cinématique de la plaque Ibérique. *Bulletin des Centres de Recherche Exploration-Production ElfAquitaine*, 20: 131-193.
- Porath, H., & Chamalaun, F. H., 1966. The magnetic anisotropy of hematite bearing rocks. *pure and applied geophysics*, 64(1): 81-88.

Ríos, J.M., 1948. Boletín Geológico y Minero, 60: 153-390.

Scriba, H., & Heller, F., 1978. Measurements of anisotropy of magnetic susceptibility using inductive magnetometers. *J. Geophys*, 44: 341-352.

Stauffer, M. R., 1964. The geometry of conical folds. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 7(2): 340-347.

Tarling, D., Hrouda, F., (Eds.), 1993. *The Magnetic anisotropy of rocks*. Chapman & Hall. Londres. Springer Science, 193 pp.

Vegas, N. 2004. *Los plutones de Ribadelago y Sotillo (Sanabria, zona Centro-Ibérica): Evolución estructural de granitoides emplazados por ascenso de diques*. Serie Nova Terra Nº 25. Ediciones do Castro. Laboratorio Xeolóxico de Laxe, ed. II. Seminario de Estudos Galegos. Area de Xeoloxía e Minería, ed. III.: 131-155.

## 10. ANEXOS

### ANEXO I: ESTADOS FERROMAGNÉTICOS

- Ferromagnetismo: Aparecen momentos magnéticos paralelos entre sí y del mismo sentido. Por lo tanto el momento final no es nulo y se desarrolla una imanación espontánea. Con la influencia de un campo magnético inductor, la imanación inducida tendrá la misma dirección que la del campo aplicado. La susceptibilidad magnética aumenta al aumentar la temperatura. Un ejemplo sería el hierro puro (Tarling y Hrouda, 1993).

-Ferrimagnetismo: En este caso aparecen dos familias de momentos magnéticos opuestos y de intensidad diferente, dando lugar a un momento final no nulo y desarrollando una imanación espontánea. Si se encuentra bajo la influencia de un campo inductor se mantiene la situación de una división en dos grupos de momentos magnéticos paralelos, opuestos y con distintas intensidades. Aquí se engloban los óxidos de hierro y titanio, la magnetita, y la pirrotina monoclinica. La susceptibilidad magnética de los minerales ferromagnéticos ( $k_f$ ) es la suma de la susceptibilidad de minerales ferromagnéticos ( $k_{ferro}$ ) y ferrimagnéticos ( $k_{ferri}$ )  $\rightarrow k_f = k_{ferro} + k_{ferri}$  (Tarling y Hrouda, 1993).

- Antiferromagnetismo: Existen dos grupos de momentos magnéticos paralelos entre sí, con sentidos opuestos e igual intensidad, presentando un momento resultante nulo. Si se aplica un campo magnético inductor aparece una leve imanación inducida con la misma dirección que la del campo inductor, dando lugar a una débil susceptibilidad ( $k_{af}$ ). Aquí se engloban la ilmenita, la goethita, el hematites y la pirrotina hexagonal (Tarling y Hrouda, 1993).

### ANEXO II: METODOLOGÍA DE MUESTREO

Como primer paso para llevar a cabo un estudio de ASM debemos realizar un muestreo regular en la zona de trabajo. En este caso la toma de muestras tendrá lugar tanto en el pliegue cilíndrico como en el cónico. Las muestras que debemos obtener son pequeños testigos cilíndricos de roca que tienen que estar orientados. Los métodos de muestreo son esencialmente los mismos que los que se utilizan para obtener rocas orientadas con fines paleomagnéticos (Cox and Doell, 1960; Collinson, 1983; Incoronato, 1983). Todos estos métodos se basan en: i) Se debe llevar a cabo una

orientación y recogida de muestras rápida y precisa en el campo, ii) es importante el tamaño y forma de los especímenes necesarios para los diferentes instrumentos. También debe tenerse en cuenta que la mayoría de los errores direccionales en los estudios de la anisotropía magnética de las rocas ocurren durante el muestreo y la orientación del campo. Por lo tanto, es esencial un cuidado especial en la realización de todas las partes de este procedimiento.

La mayoría de los instrumentos empleados en estudios de anisotropía magnética son más sensibles a la forma de la muestra que sus equivalentes paleomagnéticos. Idealmente, cada espécimen para estudio anisotrópico sería una esfera exacta, pero estas son difíciles de fabricar y orientar, por lo que en nuestro caso usaremos cilindros que se muestran en la Fig. 1. Para reducir los efectos de las desviaciones desde una forma esférica, los núcleos se suelen cortar de manera que su altura sea el 86-90% de su diámetro. Las medidas utilizadas aproximadas cuentan con un diámetro  $d= 26.5\text{mm}$  y una altura de  $h= 23.3\text{mm}$ , dando lugar a una relación  $h/d=0.88$  en el que el efecto de forma es mínimo. Se pueden usar especímenes tanto mayores como más pequeños en función de la instrumentación disponible (Porath et al., 1966; Noltimier, 1971; Scriba y Heller, 1978; Collinson, 1983)

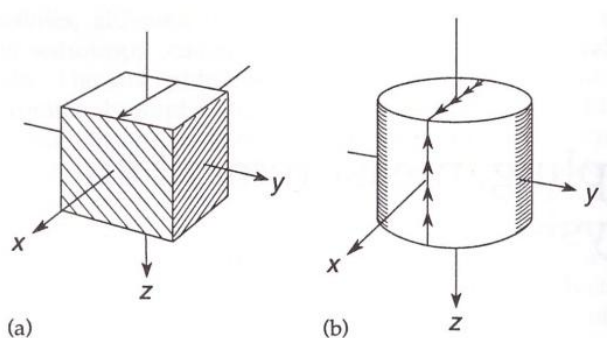


Figura 1. Ejemplares estándar. (a) Forma cúbica, (b) Forma cilíndrica, empleada en el proyecto. Tomado de Tarling and Hrouda, 1993.

El muestreo puede efectuarse mediante diferentes métodos: el primero de ellos es perforar las muestras y orientarlas directamente en el campo; el segundo es recoger muestras manuales orientadas *in situ* y posteriormente perforarlas. En general, se prefiere la perforación directa, ya que este método evita la introducción de errores durante la transferencia de las marcas de orientación y se reduce considerablemente el peso total de las muestras aunque esta ventaja es compensada por la necesidad de llevar el taladro y el agua refrigerante (Tarling and Hrouda, 1993).

El muestreo manual se lleva a cabo a partir de un bloque de roca con una superficie plana que le permite una orientación *in situ*. Después de la orientación, se

extrae dicha muestra del afloramiento utilizando un martillo y un cincel de latón (se debe eliminar cualquier contaminación de las herramientas). El bloque se vuelve a orientar en el laboratorio y se perforan ejemplares cilíndricos con herramientas no magnéticas eliminándose también los indicios de contaminación. En nuestro caso se han utilizado los dos métodos de muestreo, pero con un claro predominio del segundo. Hay que tener en cuenta que antes de llevar a cabo la perforación debemos pintar una serie de líneas o marcas paralelas en la roca por si esta se fractura.

Para la perforación de las muestras manuales orientadas se ha utilizado un taladro que consiste en un motor de motosierra con un adaptador para permitir el acoplamiento de una broca de perforación con diamante y un suministro de agua central para enfriar y limpiar los cortes de la broca representado en la Fig. 2 (a). La broca es de acero y la corona tiene diamante fijado en una matriz de bronce fosforoso. Para la perforación y orientación directamente en el campo se ha utilizado un taladro eléctrico portátil de la marca Makita.

Una vez perforadas las muestras debemos orientarlas. Para ello se coloca el orientador tres posiciones, Fig. 2 (b) y se registra la medida de la brújula en el cuaderno de campo. Seguidamente debemos marcar la parte superior e inferior de la perforación para dibujar el diámetro y pintar finalmente la flecha hacia donde buza dicha perforación. Una vez realizado el proceso introducimos el semitubo y partimos la base sin olvidar dibujar la continuación de las flechas en los laterales y poner la sigla de la muestra. Dicho proceso aparece representado en la Fig. 2(c).

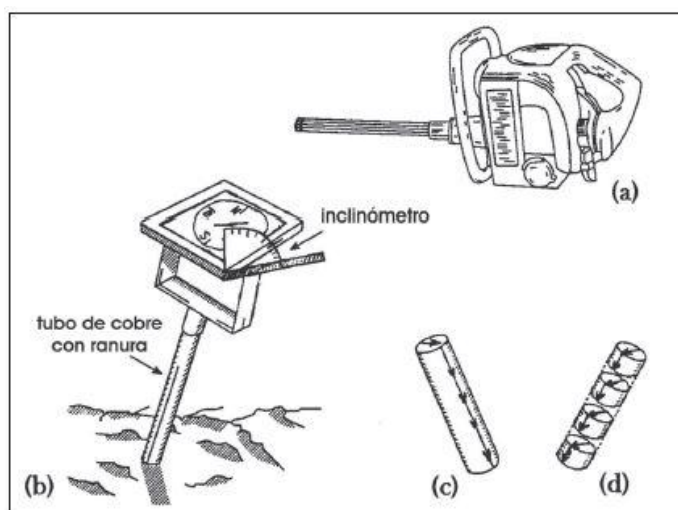


Figura 2. Muestreo de testigos. (a) Perforadora con motor de gasolina junto con la broca de perforación. (b) Orientador que consiste en un tubo hueco con una ranura. (c) Muestra obtenida con las marcas realizadas. (d) Muestra cortada en especímenes. Tomado de Tarling and Hrouda, 1993.

Una vez obtenidos los pequeños testigos cilíndricos de roca orientados, se cortan en el laboratorio con un disco amagnético. Al cortar se desechan las zonas alteradas expuestas en superficie así como los testigos que presenten enclaves o estén atravesados por diaclasas, por no ser representativos del conjunto de la roca. Las muestras sobrantes sirven para láminas delgadas y otro tipo de análisis Fig. 2(d) (Vegas, 2004).

Para la determinación de los valores de la ASM se utiliza un susceptómetro Kappabridge MFK1-A del Departamento de Geodinámica de la Universidad del País Vasco (Fig. 3). Este modelo mide la ASM de un espécimen que gira lentamente. Para ello hay que ajustar la muestra sólo en tres posiciones perpendiculares. La medición tiene lugar de una manera rápida (aproximadamente 2 minutos por espécimen) y precisa, aprovechando muchas determinaciones de susceptibilidad en cada plano perpendicular al eje de rotación del espécimen. El puente se pone a cero antes de la medición de la anisotropía después de insertar la muestra en la bobina de medición, por lo que se puede utilizar un rango bastante sensible. El software utilizado combina las mediciones en tres planos perpendiculares más un valor total para crear un tensor de susceptibilidad completo. Las 15 posiciones medidas por el Kappabridge aparecen en la Fig. 5. Los errores en la determinación de este tensor se estiman utilizando un método especial basado en el principio de estadística multivariante. (Tomado de: AGICO Advanced Geoscience Instruments Company).

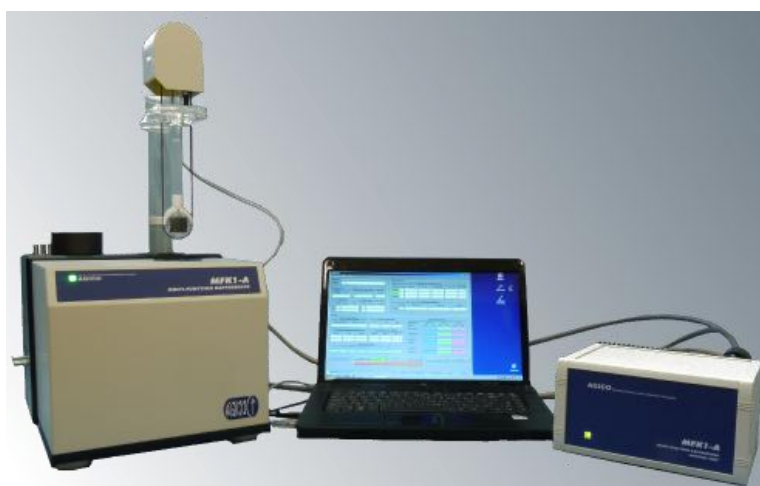


Figura 3. Aspecto del susceptómetro utilizado para este trabajo. Tomado de: AGICO Advanced Geoscience Instruments Company.



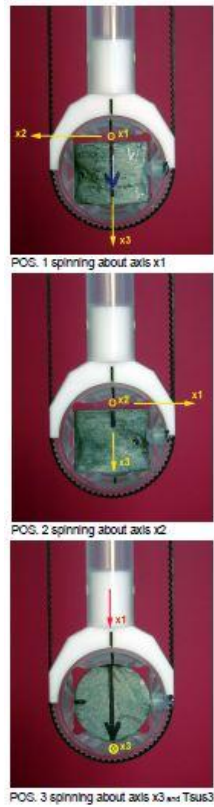


Figura 4. Imagen de las tres posiciones perpendiculares en las que hay que ajustar la muestra. Tomado de AGICO Advanced Geoscience Instruments Company

Static specimen measuring positions



Figura 5. Imagen de las 15 posiciones de medición de muestras estáticas. Tomado de AGICO Advanced Geoscience Instruments Company.

### ANEXO III: ACCESORIO KAPPABRIDGE PARA PRUEBA DE CALENTAMIENTO



Figura 1. Suplemento del Kappabridge para medir variaciones de alta temperatura de susceptibilidad magnética (Tomado de AGICO, 2017).

## ANEXO IV: RESULTADOS DE ASM

TABLA 1: Pliegue CILÍNDRICO

Muestra	k1 (Max)	k2 (Int)	k3 (Min)	kmean	Lpara	Fpara	Ppara	Pj	T
S-10A	1,0088	0,9987	0,9924	189,1E-6	1,010	1,006	1,017	1,017	-0,229
S-10B	1,0081	1,0001	0,9918	170,5E-6	1,008	1,008	1,016	1,016	0,023
S-10C	1,0077	0,9996	0,9926	174,0E-6	1,008	1,007	1,015	1,015	-0,071
S-11A	1,0100	0,9973	0,9927	179,0E-6	1,013	1,005	1,017	1,018	-0,467
S-11B	1,0079	0,9995	0,9926	168,2E-6	1,008	1,007	1,015	1,015	-0,091
S-11C	1,0068	1,0007	0,9925	157,7E-6	1,006	1,008	1,014	1,015	0,150
S-12A	1,0068	1,0000	0,9932	169,9E-6	1,007	1,007	1,014	1,014	0,001
S-12B	1,0072	1,0004	0,9924	162,5E-6	1,007	1,008	1,015	1,015	0,089
S-12C	1,0071	0,9999	0,9929	168,0E-6	1,007	1,007	1,014	1,014	-0,013
S-13A	1,0096	0,9978	0,9926	182,1E-6	1,012	1,005	1,017	1,018	-0,394
S-13B	1,0074	1,0012	0,9914	167,2E-6	1,006	1,010	1,016	1,016	0,224
S-13C	1,0075	1,0009	0,9916	169,4E-6	1,007	1,009	1,016	1,016	0,178
S-1-1	1,0024	1,0006	0,9970	104,6E-6	1,002	1,004	1,005	1,006	0,334
S-1-2-2	1,0012	1,0001	0,9987	103,3E-6	1,001	1,001	1,003	1,003	0,070
S-1-3	1,0026	1,0004	0,9970	115,2E-6	1,002	1,003	1,006	1,006	0,218
S-1-4	1,0023	0,9992	0,9986	118,3E-6	1,003	1,001	1,004	1,004	-0,687
S-1-5	1,0031	1,0004	0,9965	107,2E-6	1,003	1,004	1,007	1,007	0,164
S-2-1A	1,0094	0,9990	0,9916	95,29E-6	1,010	1,008	1,018	1,018	-0,158
S-2-1B	1,0081	1,0011	0,9909	84,19E-6	1,007	1,010	1,017	1,017	0,188
S-2-4	1,0085	1,0000	0,9916	117,4E-6	1,008	1,008	1,017	1,017	-0,003
S-3A	1,0087	0,9998	0,9915	152,0E-6	1,009	1,008	1,017	1,017	-0,036
S-3B	1,0071	1,0010	0,9919	167,3E-6	1,006	1,009	1,015	1,015	0,198
S-4A	1,0091	0,9997	0,9912	172,0E-6	1,009	1,009	1,018	1,018	-0,045
S-4B	1,0076	1,0009	0,9915	175,7E-6	1,007	1,010	1,016	1,016	0,176
S-4C	1,0088	0,9989	0,9922	179,5E-6	1,010	1,007	1,017	1,017	-0,190
S-5A	1,0067	1,0005	0,9928	174,8E-6	1,006	1,008	1,014	1,014	0,121
S-5B	1,0076	0,9998	0,9927	183,4E-6	1,008	1,007	1,015	1,015	-0,044
S-6A	1,0060	0,9985	0,9954	171,9E-6	1,008	1,003	1,011	1,011	-0,417
S-6B	1,0074	0,9998	0,9928	167,3E-6	1,008	1,007	1,015	1,015	-0,036
S-7A	1,0042	1,0001	0,9957	148,1E-6	1,004	1,004	1,009	1,009	0,038
S-7B	1,0056	0,9991	0,9953	150,7E-6	1,007	1,004	1,010	1,011	-0,268
S-7C	1,0046	0,9998	0,9956	145,8E-6	1,005	1,004	1,009	1,009	-0,080
S-5C	1,0086	0,9982	0,9932	134,5E-6	1,010	1,005	1,016	1,016	-0,340
S-8A	1,0064	0,9989	0,9947	153,2E-6	1,007	1,004	1,012	1,012	-0,275
S-8B	1,0078	0,9977	0,9946	169,9E-6	1,010	1,003	1,013	1,014	-0,530
S-8C	1,0077	0,9979	0,9944	174,9E-6	1,010	1,004	1,013	1,014	-0,469
S-9B	1,0060	0,9992	0,9948	163,0E-6	1,007	1,004	1,011	1,011	-0,209
S-9C	1,0084	0,9988	0,9927	147,9E-6	1,010	1,006	1,016	1,016	-0,222
S-2-2	1,0091	0,9997	0,9912	112,2E-6	1,009	1,009	1,018	1,018	-0,039
S-2-3A	1,0091	1,0024	0,9885	107,5E-6	1,007	1,014	1,021	1,021	0,355
S-2-3B	1,0110	0,9997	0,9893	121,8E-6	1,011	1,010	1,022	1,022	-0,041
S-9A	1,0081	0,9980	0,9939	173,1E-6	1,010	1,004	1,014	1,015	-0,431

TABLA 2: Pliegue CÓNICO

Muestra	k1 (Max)	k2 (Int)	k3 (Min)	kmean	Lpara	Fpara	Ppara	Pj	T
S-14A	1,0120	1,0060	0,9820	79,70E-6	1,006	1,024	1,031	1,032	0,604
S-14B	1,0209	1,0117	0,9674	95,66E-6	1,009	1,046	1,055	1,059	0,666
S-15A	1,0135	1,0045	0,9820	94,58E-6	1,009	1,023	1,032	1,033	0,438
S-15B	1,0123	1,0034	0,9843	80,01E-6	1,009	1,019	1,028	1,029	0,367
S-16A	1,0238	1,0113	0,9650	77,18E-6	1,012	1,048	1,061	1,064	0,586
S-16B	1,0204	1,0071	0,9725	89,15E-6	1,013	1,036	1,049	1,051	1,051
S-16C	1,0189	1,0079	0,9732	98,32E-6	1,011	1,036	1,047	1,049	0,529
S-16D	1,0185	1,0088	0,9728	97,00E-6	1,010	1,037	1,047	1,050	0,583
S-17A	1,0198	1,0099	0,9703	97,90E-6	1,010	1,041	1,051	1,054	0,606
S-17B	1,0190	1,0098	0,9712	95,24E-6	1,009	1,040	1,049	1,052	0,622
S-17C	1,0167	1,0076	0,9757	91,15E-6	1,009	1,033	1,042	1,044	0,566
S-18A	1,0210	1,0148	0,9642	80,18E-6	1,006	1,053	1,059	1,065	0,790
S-18B	1,0198	1,0113	0,9689	98,32E-6	1,008	1,044	1,053	1,056	0,673
S-18C	1,0204	1,0091	0,9704	93,79E-6	1,011	1,040	1,052	1,054	0,557
S-19A	1,0155	1,0085	0,9760	110,8E-6	1,007	1,033	1,040	1,043	0,651
S-19B	1,0144	1,0068	0,9789	116,7E-6	1,008	1,028	1,036	1,038	0,578
S-20A	1,0215	1,0177	0,9608	107,3E-6	1,004	1,059	1,063	1,071	0,876
S-20B	1,0212	1,0179	0,9610	113,2E-6	1,003	1059	1,063	1,071	0,894
S-20D	1,0136	1,0069	0,9795	80,65E-6	1,007	1,028	1,035	1,037	0,611
S-20C	1,0129	1,0015	0,9855	101,8E-6	1,011	1,016	1,028	1,028	0,174
S-21C	1,0223	1,0155	0,9621	107,8E-6	1,007	1,055	1,063	1,069	0,781
S-21A	1,0074	1,0037	0,9889	81,34E-6	1,004	1,015	1,019	1,020	0,609
S-21B	1,0095	1,0039	0,9867	80,51E-6	1,006	1,017	1,023	1,024	0,514
S-22A	1,0251	1,0112	0,9637	93,30E-6	1,014	1,049	1,064	1,067	0,555
S-22B	1,0224	1,0112	0,9665	94,22E-6	1,011	1,046	1,058	1,061	0,608
S-22C	1,0220	1,0072	0,9708	97,61E-6	1,015	1,038	1,053	1,054	0,434
S-23B	1,0194	1,0130	0,9676	86,40E-6	1,006	1,047	1,054	1,059	0,757
S-23A	1,0164	1,0067	0,9769	84,68E-6	1,010	1,030	1,040	1,042	0,515
S-24A	1,0178	1,0078	0,9744	77,94E-6	1,010	1,034	1,045	1,047	0,545
S-24B	1,0179	1,0094	0,9727	84,22E-6	1,008	1,038	1,047	1,050	0,631
S-24C	1,0169	1,0092	0,9738	85,71E-6	1,008	1,036	1,044	1,047	0,650
S-25A	1,0191	1,0041	0,9768	83,42E-6	1,015	1,028	1,043	1,044	0,297
S-25B	1,0193	1,0044	0,9763	83,38E-6	1,015	1,029	1,044	1,045	0,318
S-26A	1,0182	1,0084	0,9733	81,42E-6	1,010	1,036	1,046	1,049	0,571
S-26B	1,0167	1,0066	0,9767	80,64E-6	1,010	1,031	1,041	1,043	0,505
S-27B	1,0202	1,0113	0,9684	84,67E-6	1,009	1,044	1,054	1,057	0,664
S-27A	1,0160	1,0072	0,9768	84,30E-6	1,009	1,031	1,040	1,042	0,557
S-28A	1,0183	1,0105	0,9713	83,30E-6	1,008	1,040	1,048	1,052	0,674
S-28B	1,0173	1,0111	0,9717	82,58E-6	1,006	1,041	1,047	1,051	0,734
S-29A	1,0175	1,0079	0,9746	99,08E-6	1,009	1,034	1,044	1,046	0,561
S-29B	1,0161	1,0069	0,9770	91,88E-6	1,009	1,031	1,040	1,042	0,533
S-29C	1,0165	1,0073	0,9762	95,96E-6	1,009	1,032	1,041	1,043	0,551
S-30A	1,0162	1,0075	0,9763	84,21E-6	1,009	1,032	1,041	1,043	0,567
S-30B	1,0171	1,0110	0,9720	84,51E-6	1,006	1,040	1,046	1,051	0,736
S-31A	1,0173	1,0105	0,9721	86,21E-6	1,007	1,040	1,047	1,050	0,705
S-31B	1,0163	1,0109	0,9727	85,27E-6	1,005	1,039	1,045	1,049	0,757
S-31C	1,0150	1,0089	0,9762	90,75E-6	1,006	1,033	1,040	1,043	0,689
S-32A	1,0181	1,0124	0,9694	83,86E-6	1,006	1,044	1,050	1,055	0,770

<b>S-32B</b>	1,0144	1,0108	0,9749	85,92E-6	1,004	1,037	1,040	1,045	0,822
<b>S-33</b>	1,0209	1,0106	0,9685	97,05E-6	1,010	1,043	1,054	1,058	0,613
<b>S-34</b>	1,0188	1,0122	0,9690	94,37E-6	1,007	1,045	1,051	1,056	0,739
<b>S-35A</b>	1,0162	1,0064	0,9774	100,8E-6	1,010	1,030	1,040	1,041	0,499
<b>S-35B</b>	1,0169	1,0056	0,9776	100,4E-6	1,011	1,029	1,040	1,041	0,433
<b>S-36A</b>	1,0059	1,0043	0,9898	72,85E-6	1,002	1,015	1,016	1,018	0,810
<b>S-36B</b>	1,0115	1,0097	0,9788	75,63E-6	1,002	1,032	1,033	1,038	0,891
<b>S-37B</b>	1,0175	1,0086	0,9739	75,82E-6	1,009	1,036	1,045	1,047	0,598
<b>S-37A</b>	1,0167	1,0094	0,9738	98,94E-6	1,007	1,037	1,044	1,047	0,666

## ANEXO V: TABLA DE MEDIDAS S<sub>0</sub>

Pliegue CILÍNDRICO (medidas de la máxima pendiente)

Flanco Largo				
46/215	45/222	51/215	51/220	55/215
59/220	51/220	45/215	42/215	60/220
49/229	46/228	55/215	54/210	40/225
51/220	41/215	45/210	49/215	58/215
54/210	50/220	44/220	53/220	60/210
51/217	49/215	56/220	56/215	54/210
53/215	48/215	49/215	47/215	56/210
50/230	48/220	49/210	59/215	52/225
51/210	40/220	48/215	52/210	59/210
45/220	44/215	50/215	56/215	63/210

Flanco Corto				
64/025	66/012	67/010	74/014	70/015
75/015	72/010	71/015	75/012	63/008
63/013	65/017	74/015	69/018	64/010
70/015	62/011	78/014	69/016	79/012
77/015	69/010	70/012	69/012	66/015
73/014	61/011	74/012	71/015	69/015
72/015	66/014	66/020	74/018	69/020
69/015	64/009	84/018	78/010	62/018
71/011	66/010	76/015	74/010	74/015
66/015	75/012	72/015	65/014	74/018

Eje del pliegue		
20/290	12/292	18/295
16/282	11/298	16/294

Pliegue CÓNICO (medidas de la máxima pendiente)

Flanco Izquierdo				
22/210	37/216	32/224	37/240	30/225
21/215	40/220	24/220	35/240	33/234
21/214	34/220	21/225	40/245	26/224
22/220	40/225	22/230	26/236	36/226
31/210	30/220	41/226	24/240	26/224
34/215	25/228	43/225	31/245	25/222
29/214	21/226	47/230	31/250	31/215
23/212	16/224	49/230	34/250	34/220
23/220	42/222	22/230	33/245	45/220
19/222	46/225	24/230	21/244	33/214
19/225	44/225	21/230	39/244	28/212
23/222	27/224	21/238	29/240	26/214
27/225	19/220	21/240	33/240	25/212
27/215	34/220	36/232	35/230	27/195

Flanco Derecho				
36/355	34/008	39/000	49/005	32/355
34/000	40/000	29/356	35/358	19/350
43/005	31/000	37/355	27/002	30/000
36/005	39/358	44/000	29/355	29/001
25/355	34/005	48/002	33/000	30/354
19/348	37/355	49/006	31/355	29/002
26/006	36/359	46/005	30/355	40/000
39/000	34/355	42/002	24/350	33/000
34/005	50/005	40/002	27/350	29/002
24/358	53/003	32/358	30/000	31/354

Charnela				
7/260	14/246	16/270	14/295	29/250
11/270	20/260	10/260	16/284	25/274
09/284	16/262	10/284	20/275	25/270
08/270	13/268	17/300	14/298	30/270
13/260	14/272	24/258	19/295	32/255
09/274	19/270	22/250	23/260	30/268
11/285	14/248	16/255	22/265	31/255
11/248	19/250	13/296	27/266	30/268
12/264	15/272	15/280	23/265	26/270
09/278	16/260	15/256	24/270	26/265
11/254	16/265	16/265	25/260	31/252
17/250	15/260	15/284	24/290	31/274
16/260	20/268	16/268	28/260	31/270
14/255	14/260	13/275	29/262	34/268
13/268	16/256	20/255	24/275	25/260
10/275	19/250	21/284	26/260	31/260
13/260	24/250	18/265	22/275	33/268

**ANEXO VI: FOTOGRAFÍAS ADICIONALES**

Figura 1. Imagen de la zona interna del pliegue cilíndrico.



Figura 2. Capas del pliegue cilíndrico.



Figura 3. Imagen del pliegue cónico.



Figura 4. Toma de datos en el pliegue cónico.