

¿Qué nos indica la orientación preferente de minerales detectada a partir del estudio de la fábrica magnética?

Meaning of the preferred orientation of minerals detected by magnetic fabric analysis

RUTH SOTO

Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Unidad de Zaragoza. C/Manuel Lasala 44, 9B, 50006 Zaragoza, España. E-mail: r.soto@igme.es

Resumen La técnica de la Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética (ASM) o estudio de la fábrica magnética tiene aplicaciones muy importantes en Ciencias de la Tierra. En este trabajo se presentan los fundamentos del análisis de la Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética y varias de sus aplicaciones. El éxito de esta técnica reside en que permite conocer la petrofábrica de una roca o sedimento de forma rápida y con gran sensibilidad a partir de la determinación de la orientación preferente de todos sus minerales (ferromagnéticos s.l. + paramagnéticos + diamagnéticos). Se trata de una técnica muy usada y versátil debido a su gran aplicabilidad en varias especialidades de las Ciencias de la Tierra. En sedimentología y geología marina permite inferir las direcciones de flujo predominantes en el medio en el momento de depósito del material analizado, en tectónica las direcciones de extensión y/o compresión contemporáneas con el depósito y consolidación de la roca o sedimento, y en vulcanología y en el estudio de granitos, las direcciones de los flujos magmáticos durante su emplazamiento.

Palabras clave: Anisotropía de la susceptibilidad magnética, fábrica magnética, orientación preferente, petrofábrica.

Abstract *The analysis of the Anisotropy of Magnetic Susceptibility (AMS) or magnetic fabric analysis has important applications in Earth Sciences. This work explains the meaning of the analysis of the Anisotropy of Magnetic Susceptibility and its main applications. The success of this technique resides in its ability to infer the petrofabric of a rock or sediment quickly and with high sensitivity by analysing the preferred orientation of their minerals (ferromagnetic s.l. + paramagnetic + diamagnetic). It is a very common and versatile technique due to its high applicability in several fields in Earth Sciences. In the case of sedimentology and marine geology, it allows to infer the predominant current directions that prevailed during the deposition process of the analysed material. In tectonics, it allows to infer the extensional and/or compressional directions contemporaneous to the deposition and consolidation of the rock or sediment, and in vulcanology and granite studies, the magmatic flow directions during their emplacement.*

Keywords: *Anisotropy of magnetic susceptibility, magnetic fabric, preferred orientation, petrofabric.*

INTRODUCCIÓN

La configuración geométrica y espacial de todos los componentes que forman una roca o sedimento se denomina petrofábrica o fábrica (Fig. 1). Cualquier tipo de roca puede presentar orientación preferente de sus componentes (incluidos sus poros), aunque es necesario que éstos no sean esféricos o equidimensionales (Fig. 1). Algunos de los procesos que con más frecuencia ocurren en la naturaleza como son la compactación del sedimento o la compresión de rocas debido a procesos tectónicos provoca la orientación preferente de sus minerales (Fig. 1). Co-

nocer la orientación preferente de los minerales en una roca o sedimento aporta información muy valiosa: (1) de su historia geológica, y (2) de las condiciones reinantes durante su formación. Además de estas ventajas científicas, su análisis puede resultar de gran utilidad para conocer las anisotropías mecánicas de las rocas ornamentales, que se utilizan como material de construcción.

Los análisis tradicionales de la petrofábrica de una roca se realizan a través de su reconocimiento visual, pero teniendo en cuenta que es necesario la observación de varios planos con diferente orientación para obtener la orientación y distribución co-

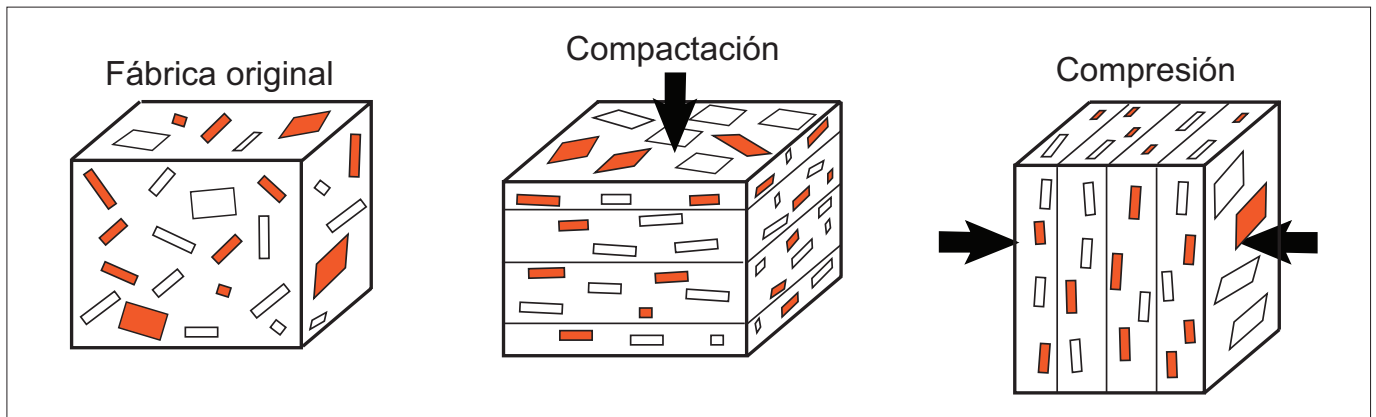


Fig. 1. Bloques 3D donde se observa el efecto de la compactación y compresión en una fábrica original isotropa.

recta de sus minerales en tres dimensiones. Estos análisis se realizan en campo sobre afloramientos (Fig. 2a), a través de diferentes secciones de muestras de mano cuando es posible realizar un reconocimiento macroscópico de los minerales (Fig. 2b) o a partir de láminas delgadas analizadas en microscopio petrográfico cuando éstos son microscópicos (Fig. 2c). El estudio de la petrofábrica no implica el uso de grandes técnicas, pero es muy laborioso.

Como complemento a estas técnicas más clásicas, desde los años 50 se ha aplicado una técnica basada en las propiedades magnéticas de los sedimentos y rocas, denominada fábrica magnética o análisis de la Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética, conocida también por sus siglas ASM. Esta técnica, como veremos a continuación, presen-

ta un amplio abanico de aplicaciones en Ciencias de la Tierra, lo que la hace muy valiosa para científicos especialistas en estratigrafía, tectónica o vulcanología. Cada una de las aplicaciones va acompañada de una propuesta de actividad para realizar en el aula con los alumnos. Las actividades están compuestas por bloques diagrama muy visuales que permitirán al alumnado aplicar los conceptos explicados y mejorar así el proceso de aprendizaje.

¿QUÉ ES LA FÁBRICA MAGNÉTICA O ANISOTROPÍA DE LA SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA?

Los minerales presentes en un sedimento o roca presentan distinta respuesta o capacidad a magnetizarse bajo un campo magnético determinado. Esta propiedad física recibe el nombre de **susceptibilidad magnética** y representa la suma de las susceptibilidades magnéticas de todos los minerales presentes en la roca o sedimento, es decir, los minerales ferromagnéticos s.l. (ej. magnetita, goethita, hematites), paramagnéticos (ej. filosilicatos como biotita o clorita) o diamagnéticos (ej. cuarzo, calcita) (ver descripción de minerales desde el punto de vista magnético en artículo de Villalaín, 2016a, en este monográfico).

En condiciones isotropas, la intensidad de magnetización de una roca o sedimentos sería igual en todas las direcciones del espacio. Pero en la naturaleza, la mayoría de rocas o sedimentos son anisótropos, es decir, la respuesta ante una magnetización no es igual en todas sus direcciones del espacio, existiendo direcciones preferentes de magnetización en función (1) del tipo de mineral presente (según su susceptibilidad magnética y su anisotropía), (2) cómo están orientados los distintos minerales en el espacio, y (3) su concentración (ver Fig. 3 y su explicación). La medida de la intensidad de magnetización (susceptibilidad magnética) en todas las direcciones del espacio se denomina medida de la **fábrica magnética** o de la **anisotropía de la susceptibilidad magnética** y aporta información de la orientación preferente de los minerales que componen una roca o sedimento. Para un cuerpo anisótropo, la susceptibilidad magnética se describe matemáticamente como un tensor de segundo orden. Gráficamente, se representa como un elipsoide, con tres ejes ortogonales que corresponden a las direcciones principales de susceptibilidad magnética

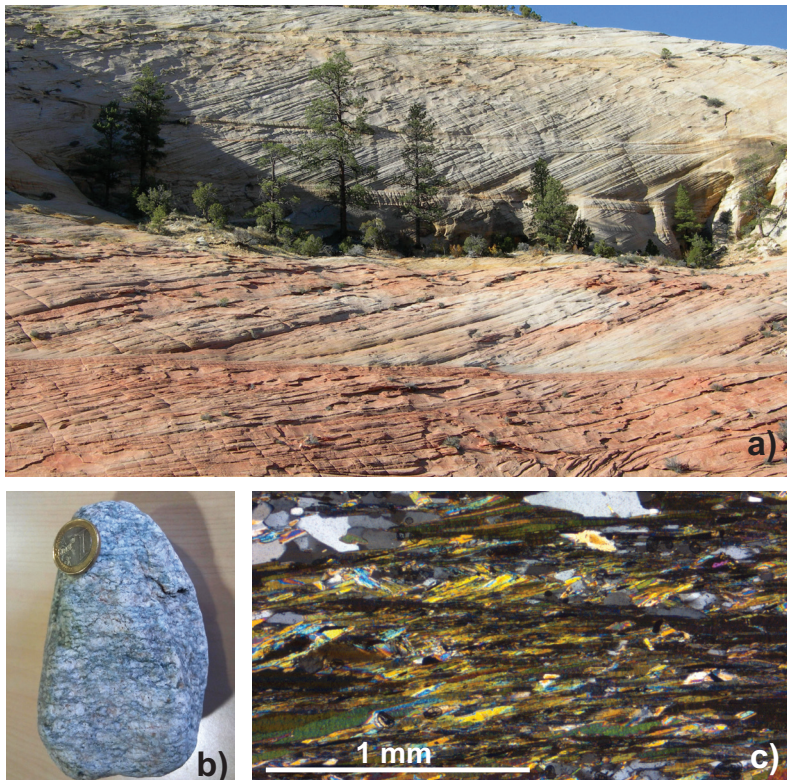


Fig. 2. Orientación preferente de minerales a diferentes escalas. a) Macroescala. Estratificación cruzada creada por efecto del viento. Areniscas de la Formación Navajo (Zion Canyon, Utah, EEUU). b) Mesoescala. Muestra de mano de gneiss (macizo del Canigó, Pirineo Oriental) con orientación preferente de minerales. c) Microescala. Lámina delgada de gneiss con orientación preferente de minerales (macizo del Aston, Pirineo Oriental). Foto cortesía de Pilar Clariana.

(Tarling y Hrouda, 1993). El eje mayor del elipsoide (k_{max}) se corresponde con la dirección que presenta mayor susceptibilidad magnética y será, por tanto, la dirección preferente de magnetización y en muchos casos, la dirección de orientación preferente

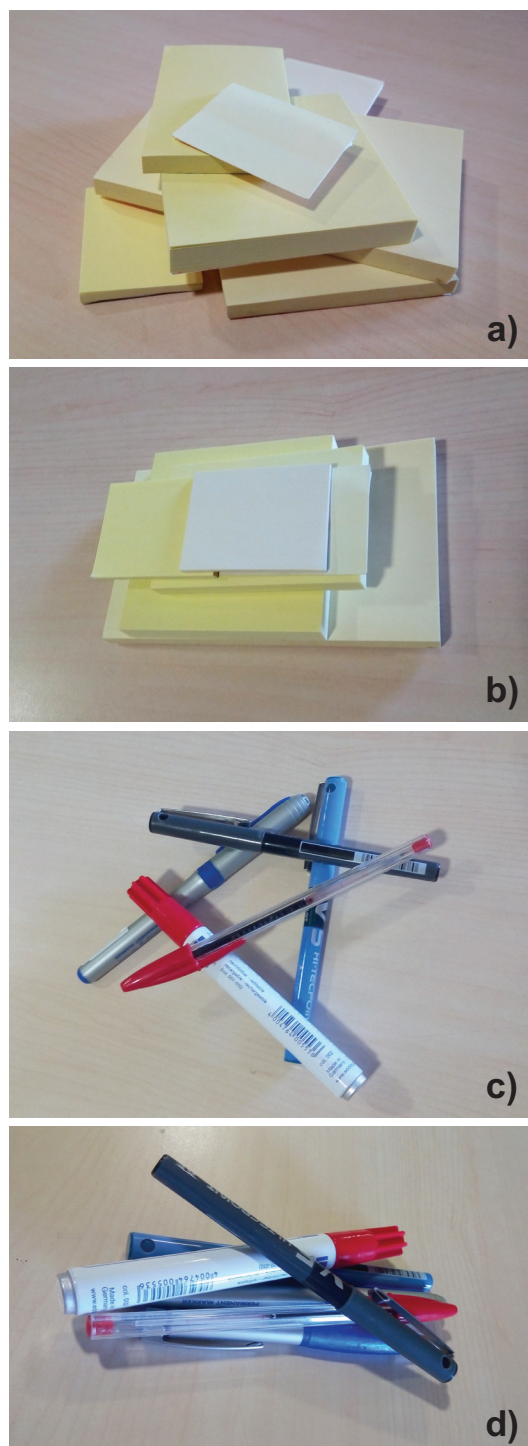


Fig. 3. Orientación preferente de elementos (que simulan distintos minerales) anisótropos teniendo en cuenta el tipo de elemento y su orientación. a) Distribución de elementos anisótropos planares simulando la formación de una laminación sin una orientación preferente de flujo. b) Idem con orientación preferente de flujo. c) Distribución de elementos anisótropos alargados sin una orientación preferente a lo largo del eje mayor de los elementos, pero sí con dicho eje dispuesto en el mismo plano. d) Idem con orientación preferente a lo largo del eje mayor de los elementos.

te de los minerales presentes en la roca o sedimento. Los ejes intermedio y menor del elipsoide (k_{int} y k_{min}) se corresponden con las direcciones de susceptibilidad magnética intermedia y menor (Tarling y Hrouda, 1993).

Para describir la fábrica magnética de una roca o sedimento se utilizan varios parámetros que fundamentalmente se basan en las relaciones existentes entre la magnitud de los diferentes ejes del elipsoide de susceptibilidad magnética (Tarling y Hrouda, 1993). Todos ellos dan información del tamaño del elipsoide de susceptibilidad magnética, su grado de anisotropía con respecto a una esfera y la forma del elipsoide (Fig. 4a). Los elipsoides de susceptibilidad magnética pueden ser alargados (o prolato), de tipo cigarro puro o balón de rugby, aplastados

Fig. 4. a) Tipología de elipsoides (prolato, oblato y triaxial) en función de la magnitud de sus ejes y comparación con la esfera. b) Descripción gráfica de la lineación (definida por el eje de susceptibilidad magnética mayor, k_{max}) y la foliación magnética (plano que contiene los ejes de susceptibilidad magnética mayor e intermedio, k_{max} y k_{int}).

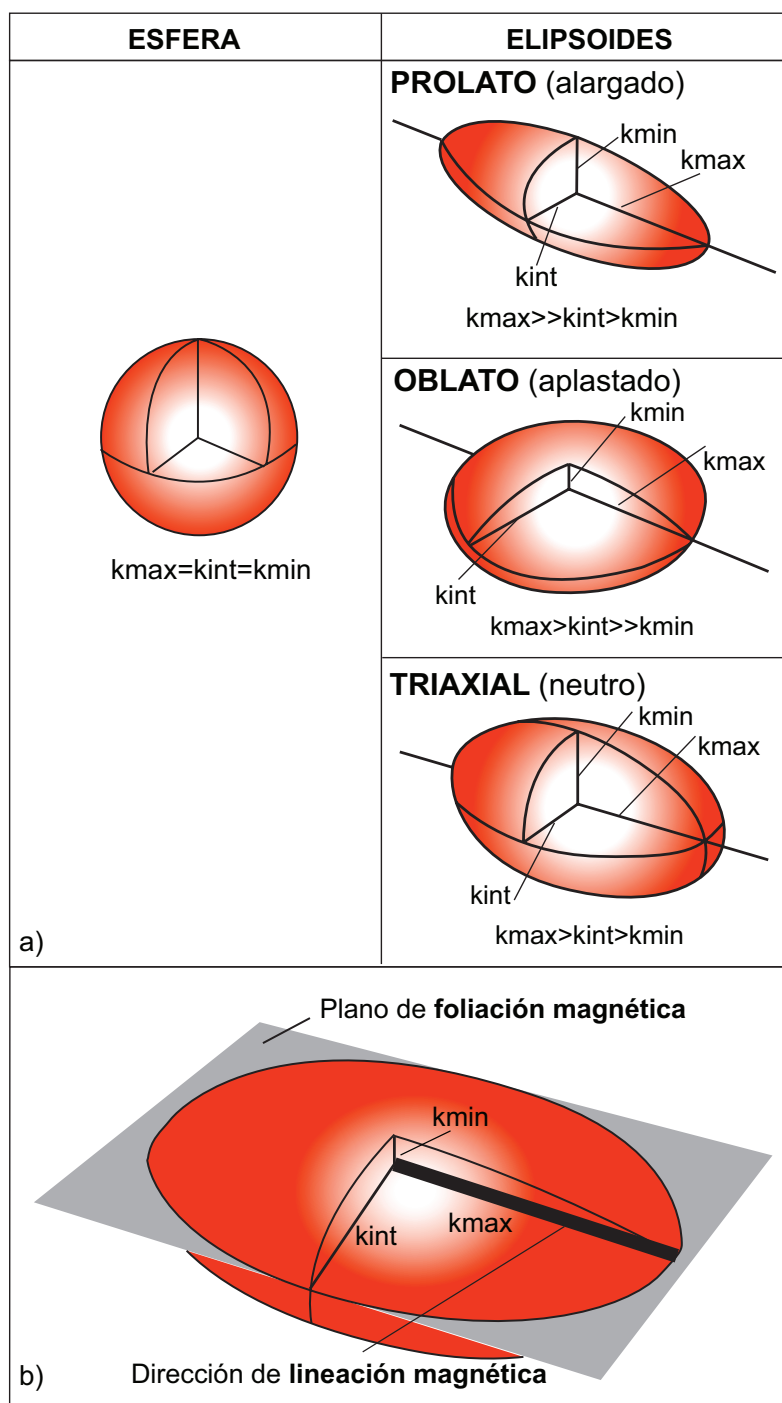


Fig. 5. a) Muestreo en el campo con taladro eléctrico con adaptador para broca especial y refrigerado con agua. b) Aspecto del afloramiento una vez extraídas las muestras. c) Muestras cilíndricas para su análisis de ASM tomadas del sondeo Martón-1 realizado en Zuera (prov. Zaragoza) para analizar los depósitos continentales Cenozoicos de la cuenca del Ebro. d) Aparato de medida (susceptómetro) del Laboratorio de Fábricas Magnéticas (Dpto. Ciencias de la Tierra) de la Universidad de Zaragoza. Foto cortesía de Teresa Román.



(u oblatos), de tipo lenteja, o neutros (triaxiales). En todos ellos se puede definir una foliación magnética (plano que contiene a los ejes de susceptibilidad magnética mayor e intermedio, k_{max} y k_{int}) y una lineación magnética (definida por el eje de susceptibilidad magnética mayor k_{max}) (Fig. 4b).

El éxito de esta técnica radica en sus grandes ventajas, ya que (1) se trata de una técnica no destructiva, es decir, la muestra de roca o sedimento queda intacta tras su análisis, (2) puede ser usada en prácticamente cualquier tipo de roca o sedimento, (3) los instrumentos de medición presentan gran sensibilidad pues detectan orientaciones preferentes de elementos no detectables por inspección visual o de microscopio, y (4) su medida es muy rápida, pues el análisis de una muestra solo tarda 3 minutos.

¿CÓMO SE MIDE LA ASM?

Cada medida de la fábrica magnética o de ASM se realiza en una muestra de roca o sedimento de unos 10.5 cm^3 (Fig. 5). Este tipo de muestras son las mismas que se extraen en el campo para realizar

estudios de paleomagnetismo (ver artículo de Villaláin, 2016a, de este monográfico) (Fig. 5). El método de extracción, orientación, siglado y preparación de la muestra también es idéntico. Una vez en el laboratorio, las muestras son medidas en unos aparatos denominados susceptómetros (Fig. 5). En España hay varios centros que cuentan con este tipo de aparatos. Para obtener un dato representativo y fiable de un afloramiento se toman un mínimo de ocho muestras. En cada muestra se obtiene un elipsoide magnético que, junto con los elipsoides magnéticos del resto de muestras analizadas del mismo afloramiento, se tratan estadísticamente para obtener una media representativa.

El análisis de la fábrica magnética o ASM presenta dos requisitos fundamentales:

- **Las muestras deben estar orientadas**, al igual que ocurre en la observación directa de la petrofábrica de una roca o sedimento a través de una muestra de mano o lámina delgada; debe ser posible reorientarlas a su posición original. Esto se realiza en el campo a partir de una brújula asegurándose que la roca o sedimento está *in situ*.
- Es imprescindible conocer el **comportamiento magnético de los diferentes minerales** que componen la roca y poder discernir en qué medida cada tipo de mineral (ferromagnético s.l., paramagnético o diamagnético) está contribuyendo a la fábrica magnética total de la roca.

En rocas en las cuales dominen los minerales paramagnéticos, la medida de la anisotropía de la susceptibilidad magnética reflejará la orientación preferente de este tipo de minerales y la fábrica magnética se podrá utilizar como un indicador geológico válido. Sin embargo, algunos minerales, como ciertos tipos de granos de magnetita presentan un comportamiento "anómalo" dando lugar a las denominadas fábricas magnéticas inversas en las que la dirección en la que la susceptibilidad magnética es mayor (k_{max}) no coincide con la dirección de mayor longitud del grano mineral dificultando así la interpretación de los resultados obtenidos.

APLICACIONES DEL ESTUDIO DE LA FÁBRICA MAGNÉTICA

Los estudios de ASM o fábricas magnéticas presentan aplicaciones en campos muy variados dentro de las Ciencias de la Tierra, que van desde su aplicación en sedimentología, geología marina, tectónica o magmatismo, e incluso usarse como bioindicador. A pesar de tratarse de una técnica de investigación especializada, es importante conocer la información y datos que aporta y como éstos son usados por los científicos para realizar, por ejemplo, reconstrucciones del medio sedimentario, paleoclimáticas, paleogeográficas y/o tectónicas.

En depósitos continentales

En medios sedimentarios continentales sin flujos tractivos, como el fondo de un lago, donde las partículas se depositan por decantación, los ejes

largos de los minerales (ej. planos basales de los filosilicatos) se dispondrán paralelos a la superficie de estratificación o superficie sobre la que se depositan sin ninguna dirección preferente, y los ejes cortos (ej. eje cristalográfico c) perpendiculares a ésta (Tarling y Hrouda, 1993). De este modo, el sedimento habrá adquirido su fábrica magnética primaria que no será modificada si no tienen lugar posteriormente procesos diagenéticos y/o tectónicos capaces de alterarla. Normalmente es sencillo identificar la superficie de estratificación en afloramiento, pero en caso de que no sea fácilmente identificable, esta técnica podría ayudarnos. Así, el plano formado por los ejes del elipsoide magnético mayor e intermedio se dispondrá paralelo a la superficie de estratificación o decantación y el eje menor de susceptibilidad perpendicular a éste.

En medios sedimentarios continentales con flujos tractivos, como ambientes fluviales, esta técnica sí que ha demostrado ser de gran utilidad para detectar la dirección de los flujos. Así, las partículas tenderán a rotar y reorientarse a posiciones más estables por efecto de la corriente. Cuando la velocidad del flujo sea importante, el eje largo de los minerales se dispondrá paralelo al flujo (Tarling y Hrouda, 1993). Este escenario generará elipsoides magnéticos cuyo eje de susceptibilidad mayor será paralelo al eje largo de los minerales y, por tanto, al flujo.

En el estudio de depósitos de antiguas cuevas, muy valiosos por su contenido en información arqueológica, paleontológica y paleoclimática, también se ha utilizado esta técnica para distinguir las condiciones hidrodinámicas reinantes en las mismas en el momento de su depósito (Parés et al., 2010). El análisis de la ASM de estos sedimentos nos puede informar sobre el plano de estratificación o decantación de los materiales del interior de la cueva, que puede, o no, ser horizontal, y sobre la dirección del flujo o la falta de éste si el material se depositó en un medio tranquilo (Parés et al., 2010).

Otra de las aplicaciones en estudios sedimentológicos más utilizada de la ASM ha sido el análisis de las secuencias de loess-paleosuelos chinos. Éstos son depósitos eólicos que se encuentran en la Meseta de Loess en el noroeste de China y constituyen un archivo geológico único para entender la evolución del clima paleomonzónico del Este asiático. Son numerosos los autores que gracias a la ASM han determinado la dirección de los paleovientos dominantes durante el depósito de este tipo de secuencias desde el Mioceno al Holoceno y han inferido las pautas climáticas del pasado y características del paleomonzón (e.g. Gong et al., 2015 y referencias en su interior).

En Geología marina

En sedimentos marinos el análisis de la ASM también ha demostrado su amplio y valioso uso. Como ocurre en medios sedimentarios continentales, los granos minerales que se encuentran en la columna de agua y se depositan en los fondos marinos sin influencia de corrientes se distribuirán en el plano deposicional de forma aleatoria, mientras que los depositados bajo la influencia de corrientes mostrarán una orientación preferente dentro

Actividad 1

En el bloque diagrama se han representado esquemáticamente tres ambientes sedimentarios relacionados con depósitos continentales. Se proponen tres cuestiones para ser trabajadas con el alumnado.

A. Identifica los tres medios sedimentarios que se aprecian en el diagrama.

B. De los depósitos asociados a los 3 medios sedimentarios existentes, ¿dónde y cómo aparecerá la lineación magnética con una orientación preferente?

C. ¿Qué tipo de elipsoide magnético encontraremos asociado a los depósitos lacustres? ¿Qué orientación presentará su foliación magnética?

Fig. 6. Actividad 1.

FÁBRICA MAGNÉTICA EN DEPÓSITOS CONTINENTALES		
TIPO DEPÓSITO	¿QUÉ INFORMACIÓN APORTA EL ESTUDIO DE SU FÁBRICA MAGNÉTICA?	¿PARA QUÉ SIRVE?
Sin flujos tractivos (ej. fondo lago)	Superficie de estratificación o superficie de decantación Plano de estratificación/decantación	Reconstrucción medio sedimentario
Con flujos tractivos (ej. depósitos fluviales)	Dirección de flujo ➔ Dirección de flujo Dirección de flujo	Reconstrucción medio fluvial
Cuevas	Superficie de estratificación o superficie de decantación Dirección de flujo si lo hay o detección de ausencia de flujos	Reconstrucción condiciones hidrodinámicas en antiguas cuevas
Loess	Dirección paleovientos	Evolución clima paleomonzónico del Este Asiático desde el Mioceno

de ese plano adquiriendo el sedimento una fábrica magnética caracterizada por un elipsoide magnético con el eje de susceptibilidad magnética mayor (k_{max}) paralelo al flujo reinante. Así, el análisis de la ASM de sedimentos marinos profundos es capaz de detectar cómo varía la fuerza de las corrientes marinas con el tiempo (Ellwood & Ledbetter, 1979) y cuáles han sido las direcciones de flujo

Tabla I. Cuadro resumen indicando qué tipo de datos aporta y aplicaciones del estudio de la fábrica magnética en sedimentos continentales.

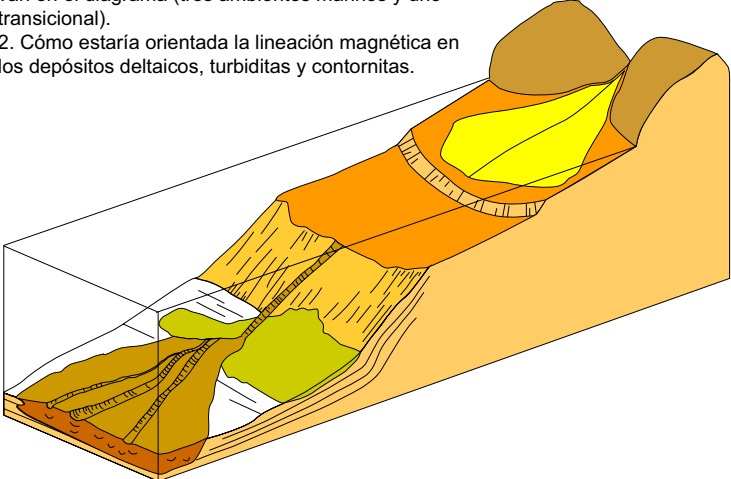
(Ledbetter y Ellwood, 1980). El conocimiento de las paleodirecciones de flujo del pasado de corrientes profundas marinas a través de esta técnica se ha desarrollado durante las últimas décadas gracias a las intensas investigaciones derivadas de los proyectos internacionales de perforación profunda

Fig. 7. Actividad 2.

Actividad 2

En el bloque diagrama se han representado esquemáticamente tres ambientes sedimentarios marinos y uno transicional y tres tipos de depósitos. Se proponen dos cuestiones para ser trabajadas con los alumnos.

1. Identifica qué ambientes sedimentarios se observan en el diagrama (tres ambientes marinos y uno transicional).
 2. Cómo estaría orientada la lineación magnética en los depósitos deltaicos, turbiditas y contornitas.



"Deep Sea Drilling Project" y el "Ocean Drilling Program". Estudiar la evolución de las corrientes oceánicas a través del estudio de los depósitos marinos profundos es fundamental para entender la paleoceanografía y paleoclimatología y predecir cómo pueden influir futuras variaciones de la dirección de las corrientes en el clima. Un ejemplo de su aplicación en geología marina es su capacidad para diferenciar entre depósitos contorníticos y turbiditas (e.g. Shor et al., 1984), cuya identificación en el análisis de cuencas y reconstrucciones paleogeográficas es muy importante en la búsqueda de recursos minerales y energéticos marinos y como indicadores del paleoclima, paleogeografía, paleotectónica y condiciones paleohidrológicas. Los depósitos contorníticos se forman debido a corrientes termohalinas de fondo (controladas por variaciones de densidad del agua marina en relación a diferencias de temperatura entre los polos y el ecuador) que circulan paralelas a las isobatas del fondo marino, mientras que las turbiditas o corrientes de turbidez son perpendiculares al talud marino y provienen del continente redistribuyendo grandes cantidades de sedimento clástico.

En sedimentos deltaicos, la ASM es útil para analizar si éstos se depositaron bajo dominio fluvial y/o mareal y las direcciones preferentes del flujo (Liu et al., 2001). Además, recientemente se ha visto su aplicabilidad en el estudio de depósitos de tsunamis de zonas tectónicamente activas (ej. Japón, Nueva Zelanda, Marruecos, Indonesia, Sumatra y Java) en los que no hay marcadores sedimentarios visibles que permitan diferenciarlos de depósitos de tormentas y reconstruir las direcciones de flujo causantes de estos depósitos (Wassmer et al., 2015).

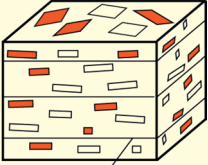
FÁBRICA MAGNÉTICA EN GEOLOGÍA MARINA		
TIPO DEPÓSITO	¿QUÉ INFORMACIÓN APORTA EL ESTUDIO DE SU FÁBRICA MAGNÉTICA?	¿PARA QUÉ SIRVE?
Depósitos de llanura abisal y/o plataforma sin flujos tractivos	Superficie de estratificación o superficie de decantación  Plano de estratificación/decantación	Reconstrucción medio sedimentario
Turbiditas	Dirección de flujo	Reconstrucción paleocorrientes oceánicas Reconstrucciones paleoclimáticas y paleogeográficas
Contornitas	Dirección de flujo	Reconstrucción paleocorrientes oceánicas Reconstrucciones paleoclimáticas y paleogeográficas
Sedimentos deltaicos	Dirección flujo predominante	Reconstrucción medio deltaico (dominio fluvial y/o mareal)
Depósitos de tsunamis	Dirección de flujo	Para diferenciarlos de depósitos de tormentas

Tabla II. Cuadro resumen indicando qué tipo de datos aporta y aplicaciones del estudio de la fábrica magnética en geología marina.

En Tectónica

Desde hace décadas, uno de los usos más extendidos del análisis de la ASM es su aplicación en geología estructural y tectónica para caracterizar la deformación de rocas y sedimentos. El fundamento es que en rocas sedimentarias la fábrica magnética se adquiere en el momento de su depósito y sus granos minerales se reorientan en función del estado de esfuerzos reinantes. El potencial y éxito de esta técnica radica en su alta sensibilidad, ya que es capaz de detectar bajos grados de deformación incluso en rocas aparentemente no deformadas y sin presencia de marcadores visibles de la deformación. Gracias al estudio de fábricas magnéticas se pueden inferir cuáles eran las direcciones de extensión en cuencas sedimentarias o las direcciones de acortamiento reinantes en un orógeno o en una cuenca de antepaís.

En contextos geodinámicos extensivos, como cuencas sedimentarias controladas por fallas normales, los materiales adquieren una fábrica magnética caracterizada por elipsoides magnéticos con una foliación magnética paralela a la estratificación y una lineación magnética perpendicular a las fallas normales y a los márgenes de la cuenca sedimentaria (Mattei et al., 1997) y, por tanto, paralela a la dirección de estiramiento (ver Fig. 4b para recordar qué es la foliación y lineación magnética).

En contextos compresivos, como cadenas de pliegues y cabalgamientos y cuencas de antepaís, la

foliación magnética se mantiene paralela a la estratificación y la lineación magnética paralela a la dirección de cabalgamientos y pliegues y por tanto, perpendicular a la dirección de acortamiento (Mattei et al., 1997). Por ejemplo, la aplicación del análisis de la ASM en el estudio de prismas de acreción activos como los de Barbados, Costa Rica o Nankai gracias a los sondeos realizados en el marco de los programas internacionales de "Deep Sea Drilling Project" y "Ocean Drilling Program" también ha demostrado su potencial para caracterizar el acortamiento que sufren las rocas que los forman (Owens, 1993).

Conforme aumenta la deformación en una roca, su fábrica magnética puede ir variando y evolucionando. Así, por ejemplo, un factor capaz de reorientar una fábrica magnética tectónica adquirida en el momento del depósito de la roca es el desarrollo de esquistosidad, es decir, la aparición de planos de ruptura potencial de origen tectono-metamórfico. Esto es debido a que los minerales presentes en la roca pueden sufrir una reorientación en función de estos nuevos planos creados. En ausencia de esquistosidad, la fábrica magnética adquirida en los depósitos de una cuenca sedimentaria, permanecerá inalterada y no se reorientará aunque la cuenca sedimentaria se invierta tectónicamente con posterioridad (Mattei et al., 1997).

EJEMPLO: ¿En qué dirección se extendía la península Ibérica durante el Mesozoico?

De entre todas las aplicaciones que presenta el análisis de la ASM o fábricas magnéticas, recientemente se ha visto su potencial para reconstruir las direcciones de extensión de las cuencas sedimentarias durante el Mesozoico y que, posteriormente, se invirtieron y comprimieron debido a la orogenia Alpina durante el Cenozoico. La reconstrucción de estas direcciones de extensión es importante para localizar las principales fallas normales de los márgenes de las cuencas sedimentarias. Comprender la geometría de estas cuencas es importante la caracterización de posibles reservorios geológicos con intereses socio-económicos o para utilizarlas como análogos de otras cuencas no accesibles, pero con alto interés económico.

Durante el Mesozoico se formaron en la Península Ibérica gran parte de las principales cuencas sedimentarias que podemos encontrar relacionadas con la apertura del océano Atlántico, golfo de Vizcaya y Neotethys; cuencas Permo-Triásicas, de Cameros y del Maestrazgo en la Cordillera Ibérica, cuencas Vasco-Cantábrica, Norpirenaica, de las Nogueras y de Organyà en los Pirineos y cuenca Lusitánica en Portugal. Gran parte de sus características extensionales han desaparecido o han sido enmascaradas por las estructuras compresivas ligadas a la orogenia Alpina que las invirtió tectónicamente haciendo rejuglar gran parte de sus estructuras extensionales. En este ejemplo se muestra la aplicación del estudio de la fábrica magnética a los materiales Mesozoicos de varios puntos de la cuenca Vasco-Cantábrica, cuenca de Cameros y

Actividad 3

En los bloques diagramas se han representado esquemáticamente tres escenarios tectónicos. Se proponen las siguientes cuestiones:

1. Identifica los tipos de estructuras que se observan en cada bloque diagrama,
2. Señala la orientación de la lineación magnética que encontraríamos en los sedimentos asociados que aparecen en amarillo y naranja.

Fig. 8. Actividad 3.

FÁBRICA MAGNÉTICA EN TECTÓNICA		
TIPO DEPÓSITO	¿QUÉ INFORMACIÓN APORTA EL ESTUDIO DE SU FÁBRICA MAGNÉTICA?	¿PARA QUÉ SIRVE?
Depósitos en cuencas sedimentarias extensivas	Dirección de extensión	Reconstrucciones tectónicas y paleogeográficas Estudio reservorios geológicos
Depósitos en cinturones de pliegues y cabalgamientos, prismas de acreción y cuencas de antepaís	Dirección de compresión	Reconstrucciones tectónicas y paleogeográficas Estudio reservorios geológicos
Depósitos de cuencas sedimentarias extensivas invertidas posteriormente	Dirección de extensión reinante en momento de formación de la cuenca sedimentaria	Reconstrucciones tectónicas y paleogeográficas Estudio reservorios geológicos

Tabla III. Cuadro resumen indicando qué tipo de datos aporta y aplicaciones del estudio de la fábrica magnética en tectónica.

cuenca Lusitánica (Fig. 9) (Soto et al., 2008, 2012).

Al analizar la fábrica magnética de muestras de estos materiales se obtienen una mayoría de elipsoides magnéticos oblatos o aplastados con la foliación magnética paralela a la superficie de estratificación. Esto nos indica que la compactación de estos materiales una vez sedimentados es uno de los procesos más importantes que controla su fábrica magnética. En segundo lugar, se obtienen direcciones de la lineación magnética que al comparlas con las direcciones extraídas del estudio de estructuras sin-extensionales (fallas normales, grietas, diaclasas) corresponden a la dirección de extensión reinante en la cuenca sedimentaria en el momento o poco después del depósito de los materiales. Si comparamos las direcciones de extensión obtenidas en las zonas de estudio para dos periodos de tiempo diferentes, el comprendido entre el Triásico y Jurásico inferior y el periodo entre el Jurásico medio y el Barremiense (Cretácico inferior) se observa que en la cuenca Vasco-Cantábrica y cuenca de Cameros la dirección de extensión ha permanecido constante y orientada NE-SW a lo largo de estos dos periodos, mientras que en la cuenca Lusitánica se produce un cambio en la orientación de la dirección de extensión de NW-SE a NE-SW entre los dos periodos de tiempo (Fig. 9). A pesar de que ambos periodos de extensión en la cuenca Lusitánica se deben al mismo fenómeno global, la

apertura del océano Atlántico durante el Mesozoico, la diferencia encontrada a partir del estudio de fábricas magnéticas en la cuenca Lusitánica podría responder a que entre el Jurásico medio y el Cretácico Inferior (Barremiense) se producen reajustes en la cuenca Lusitánica que hacen que las principales fallas normales activas varíen en el tiempo.

La aplicación, por tanto, del estudio de la fábrica magnética a los materiales que se depositaron de manera contemporánea a la formación de cuencas sedimentarias puede aportar información muy valiosa en relación a su génesis y al contexto tectónico que reinaba en el momento de su formación.

En Magmatismo

El análisis de la ASM también se ha aplicado a varios tipos de rocas ígneas con el objetivo de describir cómo ha sido su evolución. En rocas plutónicas y volcánicas, la orientación de los ejes de susceptibilidad magnética mayores del elipsoide, k_{max} o lineación magnética, pueden reflejar la dirección de los flujos magmáticos primarios.

En **rocas plutónicas** (p.ej. en granitos) se ha demostrado su validez para inferir las direcciones de los flujos magmáticos existentes durante el emplazamiento de estos cuerpos o caracterizar la deformación dúctil sufrida por éstos durante su emplazamiento (Bouchez, 1997).

En **rocas volcánicas**, la fábrica magnética puede reflejar el flujo de magma primario y contribuir a localizar las zonas de alimentación y salida de material volcánico o la deformación sufrida por estos materiales durante y después de su emplazamiento (Cañón-Tapia, 2004). En el caso de **ignimbritas**, dan información en relación a los procesos de transporte y depósito que las generan. En el estudio de **rocas subvolcánicas** (p.ej. diques) el análisis de la ASM también se viene utilizando para caracterizar las direcciones de flujo magmático durante su intrusión (Ernst y Baragar, 1992).

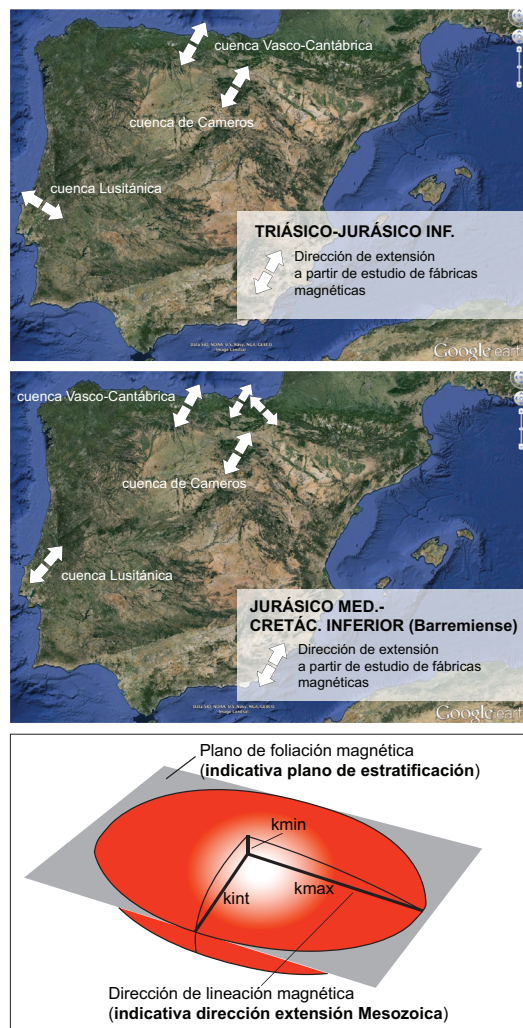
El estudio de paleofluidos y el poder monitorizar cómo ha sido la circulación hidrotermal en una roca es uno de los mayores desafíos en los estudios de metasomatismo. Se ha demostrado que la ASM puede definir las direcciones de flujo de este tipo de fluidos (e.g. Sizaret et al., 2003).

También, en caso de existir deformación previa a la total cristalización de la roca, las fábricas magnéticas de estas rocas pueden dar información del estado de esfuerzos tectónicos regional.

Como bioindicador

Recientemente se ha demostrado el poder de la ASM para definir el carácter biogénico de estromatolitos fósiles (Petryshyn et al., 2016). Los estromatolitos, estructuras laminadas con diversas formas, son una de las microbialitas (estructuras sedimentarias macroscópicas construidas por o influenciadas por microorganismos) mejor estudiadas puesto que las estructuras estromatolíticas de hace 3500 millones de años son uno de los indicios más antiguos de vida en la Tierra. El problema del estudio del registro fósil de este tipo de estructuras es que es muy fácil confundirlas con precipitaciones minerales no biogénicas y en su estudio microscópico, no siempre es fácil distinguir indicadores de su origen biogénico

Fig. 9. Dirección de extensión deducida a partir de la orientación de la lineación magnética (orientación de k_{max}) en la cuenca Vasco-Cantábrica, cuenca de Cameros y cuenca Lusitánica durante los periodos Triásico-Jurásico Inferior y Jurásico Medio-Cretácico Inferior (Barremiense). En general, en todos los materiales muestreados se obtienen elipsoides magnéticos oblatos (aplastados) con la foliación magnética paralela a la estratificación y la lineación magnética indicativa de la dirección de extensión reinante en la cuenca sedimentaria en el momento de depósito y consolidación de los materiales.



FÁBRICA MAGNÉTICA EN MAGMATISMO		
TIPO DEPÓSITO	¿QUÉ INFORMACIÓN APORTA EL ESTUDIO DE SU FÁBRICA MAGNÉTICA?	¿PARA QUÉ SIRVE?
Granitos y rocas plutónicas	Dirección flujos magmáticos durante emplazamiento Caracterización deformación dúctil contemporánea a emplazamiento	Reconstrucciones tectónicas y paleogeográficas
Rocas volcánicas	Dirección flujos de magma primario Caracterización deformación durante y posterior a su emplazamiento	Reconstrucción paleovolcán Reconstrucciones tectónicas y paleogeográficas
Ignimbritas	Dirección flujos de transporte y depósito	Reconstrucción paleovolcán Reconstrucciones tectónicas y paleogeográficas
Diques magmáticos	Dirección flujos magmáticos durante su intrusión	Reconstrucciones tectónicas y paleogeográficas
Paleofluidos	Dirección paleoflujos	Monitorizar paleocirculación hidrotermal relacionada con depósitos minerales

Tabla IV. Cuadro resumen indicando qué tipo de datos aporta y aplicaciones del estudio de la fábrica magnética en magmatismo.

FÁBRICA MAGNÉTICA COMO BIOINDICADOR		
TIPO DEPÓSITO	¿QUÉ INFORMACIÓN APORTA EL ESTUDIO DE SU FÁBRICA MAGNÉTICA?	¿PARA QUÉ SIRVE?
Estromatolitos	Orientación preferente de minerales magnéticos	Bioindicador (distinguir su origen biogénico frente a precipitaciones no biogénicas)

Tabla V. Cuadro resumen indicando qué tipo de datos aporta y aplicación del estudio de la fábrica magnética como bioindicador.

al estar su fábrica original alterada por diagénesis u otros procesos de recristalización posterior. En el trabajo pionero de Petryshyn et al. (2016), éstos indican que para estromatolitos que se forman a partir de láminas con una inclinación mayor de 30°, la ASM es capaz de distinguir si éstos son de origen biogénico o por el contrario son estructuras no bióticas. En el caso de estructuras no bióticas con láminas inclinadas más de 30°, los minerales magnéticos detríticos no se fijarán a las paredes de la estructura sino que se irán depositando junto a ella y, por tanto, no se obtendrá una fábrica magnética definida. Sin embargo, en paredes inclinadas de estromatolitos, las comunidades microbióticas fijarán a sus paredes los minerales magnéticos detríticos independientemente de su inclinación generando una fábrica magnética concreta.

CONSIDERACIONES FINALES

El análisis de la Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética (ASM) o estudio de la fábrica magnética constituye una técnica que nos ayuda a conocer la orientación preferente de los minerales en una roca o sedimento. Esta información es muy valiosa en diferentes campos de las Ciencias de la Tierra (sedimentología, geología marina, tectónica y magmatismo).

A pesar de que el estudio de la fábrica magnética es una técnica especializada, es importante para el alumnado conocer sus aplicaciones y la información que aporta para entender cómo avanza el conocimiento de una disciplina científica como la Geología en la realización de reconstrucciones del medio sedimentario, paleoclimáticas, paleogeográficas y/o tectónicas e incluso distinguir el origen biogénico o no de cierto tipo de sedimentos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca en el contexto de los proyectos CGL2013-42670-P y CGL2014-54118-C2-2-R del Ministerio de Economía y Competitividad. La autora agradece las revisiones realizadas por Teresa Román-Berdiel y un revisor anónimo, que han ayudado a mejorar el manuscrito original.

BIBLIOGRAFÍA

- Bouchez, J.L. (1997). *Granite is never isotropic: an introduction to AMS studies in granitic rocks*. En: *Granite: from segregation of melt to emplacement fabrics* (Eds.: J.L. Bouchez, D.H.W. Hutton y W.E. Stephens). *Petrology and Structural Geology*, 8, 95–112.
- Cañón-Tapia, E. (2004). *Anisotropy of magnetic susceptibility of lava flows and dykes: A historical account*. En: *Magnetic Fabric: methods and applications* (Eds.: F. Martín-Fernández, C. Lüneburg, C. Aubourg y M. Jackson). Geological Society, London, Special Publication, 238, 205–225.
- Gong, H., Zhang, R., Yue, L., Zhang, Y. y Li, J. (2015). Magnetic fabric from Red clay sediments in the Chinese Loess Plateau. *Scientific Reports*, 5, 1–6.
- Ellwood, B.B. y Ledbetter, M.T. (1979). Paleocurrent indicators in deep-sea sediment. *Science*, 103, 1335–1337.
- Ernst, R.E. y Baragar, W.R.A. (1992). Evidence from magnetic fabric for the flow pattern of magma in the Mackenzie giant radiating dyke swarm. *Nature*, 356, 511–513.
- Ledbetter, M.T. y Ellwood, B.B. (1980). Spatial and temporal changes in bottom-water velocity and direction from analysis of particle size and alignment in deep-sea sediment. *Marine Geology*, 38, 245–261.
- Liu, B., Saito, Y., Toshitsugu, Y., Abdeldayem, A., Oda, H., Hori, K. y Zhao, Q. (2001). Paleocurrent analysis for the Late Pleistocene–Holocene incised-valley fill of the Yangtze delta, China by using anisotropy of magnetic susceptibility data. *Marine Geology*, 176, 175–189.

Mattei, M., Sagnotti, L., Faccenna, C. y Funicello, R. (1997). Magnetic fabric of weakly deformed clay-rich sediments in the Italian peninsula: Relationship with compressional and extensional tectonics. *Tectonophysics*, 271, 107-122.

Owens, W.H. (1993). Magnetic fabric studies of samples from Hole 808C, Nankai Trough. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 131, Ocean Drilling Program, pp. 301-310.

Parés, J.M., Pérez-González, A., Arsuaga, J.L., Bermúdez de Castro, J.M., Carbonell, E. y Ortega, A.I. (2010). Characterizing the sedimentary history of cave deposits, using archaeomagnetism and rock magnetism, Atapuerca (Northern Spain). *Archaeometry*, 52 (5), 882-898.

Petryshyn, V.A., Corsetti, F.A., Frantz, C.M., Lund, S.P. y Berelson, W.M. (2016). Magnetic susceptibility as a bio-signature in stromatolites. *Earth and Planetary Science Letters*, 437, 66-75.

Sizaret, S., Chen, Y., Chauvet, A., Marcoux, E. y Touray, J.C. (2003). Magnetic fabrics and fluid flow directions in hydrothermal systems. A case study in the Chaillac Ba-F-Fe deposits (France). *Earth and Planetary Science Letters*, 206, 555-570.

Shor, A.N., Kent, D.V. y Flood, R.D. (1984). *Contourite or turbidite? Magnetic fabric of fine-grained Quaternary sediments, Nova Scotia continental rise*. En: Fine-Grained

Sediments (Eds.: D.A.V. Stow y D.J.W. Piper). Geological Society London, Spec. Publ., 15, 257-273.

Soto, R., Casas-Sainz, A.M., Villalaín, J.J., Gil-Imaz, A., Fernández-González, G., del Río, P., Calvo, M. y Mochales, T. (2008). Characterizing the Mesozoic extension direction in the northern Iberian plate margin by anisotropy of magnetic susceptibility (AMS). *Journal of the Geological Society*, 165, 1007-1018.

Soto, R., Kullberg, J.C., Oliva-Urcia, B., Casas-Sainz, A.M. y Villalaín, J.J. (2012). Switch of Mesozoic extensional tectonic style in the Lusitanian basin (Portugal): Insights from magnetic fabrics. *Tectonophysics*, 536-537, 122-135.

Tarling, D.H. y Hrouda, F. (1993). *The Magnetic Anisotropy of Rocks*. Ed. Chapman and Hall, London, 217 p.

Villalaín Santamaría, J.J. (2016a). La historia del campo magnético terrestre registrada en las rocas. *Fundamentos del Paleomagnetismo. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 24.3, 261-274.

Villalaín Santamaría, J.J. (2016b). Técnicas en Paleomagnetismo. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 24.3, 275-281.

Wassmer, P.C., Gomez, C.A., Iskandasyah, T.Y.W.M., Lavigne, F. y Sartohadi, J. (2015). Contribution of Anisotropy of Magnetic Susceptibility (AMS) to reconstruct flooding characteristics of a 4220 BP tsunami from a thick unconsolidated structureless deposit (Banda Aceh, Sumatra). *Frontiers in Earth Science*, 3. ■

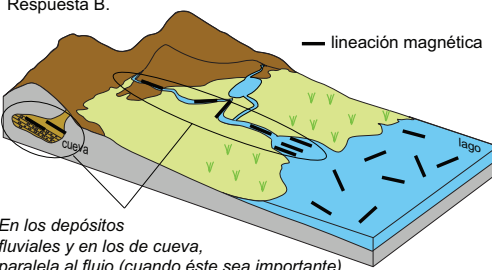
Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 17 de mayo y aceptado definitivamente para su publicación el 18 de julio de 2016.

Anexo 1. Respuesta Actividad 1.

Respuesta Actividad 1

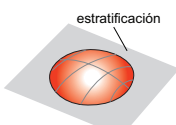
Respuesta A. Medio sedimentario lacustre, fluvial y cueva.

Respuesta B.



En los depósitos fluviales y en los de cueva, paralela al flujo (cuando éste sea importante).
En el resto, en los depósitos lacustres, la lineación magnética no presentará una orientación preferente.

estratificación



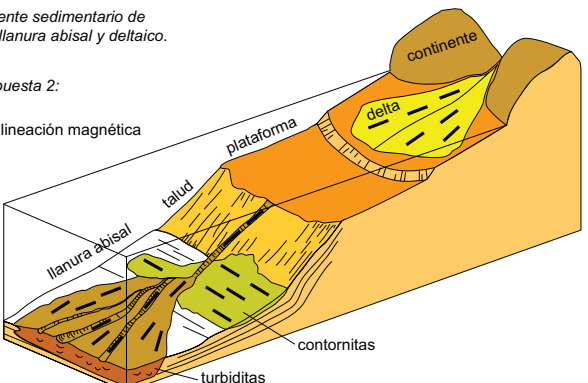
Respuesta C. Un elipsoide magnético oblatado con su foliación magnética paralela a la superficie de estratificación.

Anexo 2. Respuesta Actividad 2.

Respuesta Actividad 2

Respuesta 1. Ambiente sedimentario de plataforma, talud y llanura abisal y deltaico.

Respuesta 2:

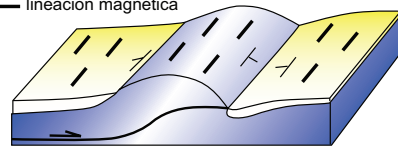


lineación magnética

Anexo 3. Respuesta Actividad 3.

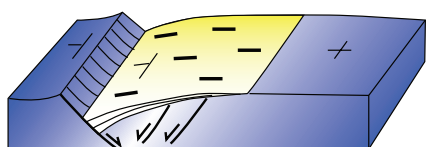
Respuesta Actividad 3

Piñeque (anticlinal) asociado a cabalgamiento



lineación magnética

Cuenca sedimentaria (half-graben) asociada a fallas normales



Cuenca sedimentaria (half graben) invertida a favor de cabalgamiento que anteriormente jugó como falla normal. Los materiales amarillos son sin-extensión y el naranja sin-compresión.

