

## Bailes y giros en la corteza superior: de la Tectónica de Placas a la rotación de un pliegue

*Dances and gyres of the upper crust: from Plate tectonics to the rotation of a fold*

**BELÉN OLIVA URCIA<sup>1</sup> Y EMILIO L. PUEYO<sup>2,3</sup>**

<sup>1</sup> Dpto. de Geología y Geoquímica, Facultad Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid Ciudad Universitaria de Cantoblanco, 28049 Madrid. E-mail: belen.oliva@uam.es

<sup>2</sup> Instituto Geológico y Minero de España, Unidad de Zaragoza, C/Manuel Lasala 44, 9<sup>º</sup>B, 50006 Zaragoza. E-mail: unaim@igme.es

<sup>3</sup> Unidad Asociada en Ciencias de la Tierra IGME-Universidad de Zaragoza.

**Resumen** El registro del campo magnético en rocas del pasado, particularmente su orientación (declinación e inclinación magnéticas), ha sido fundamental para desentrañar rotaciones y movimientos de placas tectónicas. El paleomagnetismo a esa escala de trabajo es esencial a la hora de realizar reconstrucciones paleogeográficas a lo largo del tiempo geológico, lo que ha sido una piedra angular para el desarrollo de la teoría de la tectónica de placas. Por otro lado, a una escala espacial de trabajo de mayor detalle, el paleomagnetismo permite detectar rotaciones de eje vertical asociadas a la formación de orógenos en relación principalmente a los desplazamientos diferenciales de cabalgamientos y fallas. Estas rotaciones son difíciles de detectar con precisión por otros métodos. A escala de pliegues métricos - decamétricos, el precisar la edad de la adquisición de la remanencia en relación a la edad de formación de los pliegues, es fundamental a la hora de entender los procesos que conllevan a la formación de los cinturones de pliegues y cabalgamientos. En este trabajo se presentan cinco actividades que ayudan a comprender el por qué se utiliza el paleomagnetismo para detectar rotaciones y “paleoposiciones” de placas tectónicas, así como la deformación asociada a la formación de orógenos.

**Palabras clave:** Deformación, magnetización remanente natural, oroclinal, paleolatitud, rotación.

**Abstract** *The record of the magnetic field in rocks from the past, particularly its orientation (magnetic declination and inclination) has been crucial to disentangle plate tectonics rotations and movements. At that working scale, paleomagnetism is essential to reconstruct paleogeographies along the geologic timeline, which has been a stepping stone for the development of the plate tectonics theory. On the other hand, at a more detail working scale, paleomagnetism allows to detect vertical axis rotations associated to orogen formation, related mainly to differential shortening of thrusts and folds. These rotations are difficult to detect precisely by other means. At metric – decametric scale, determining the acquisition time of the remanence in relation to the fold development is decisive in order to understand the processes accompanying the formation of fold and thrust belts.*

**Keywords:** *Deformation, natural remanent magnetization, oroclinal, paleolatitude, rotation.*

### INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, las reconstrucciones paleogeográficas a lo largo de la historia estaban basadas en datos sedimentológicos, petrológicos y paleontológicos. Sin embargo, el descubrimiento de las anomalías magnéticas del fondo oceánico a partir de ~1960, supuso una revolución en las Ciencias de la Tierra, apoyando el desarrollo de la teoría de la deriva continental y de la tectónica de placas.

Los datos paleomagnéticos de los fondos oceánicos han permitido realizar reconstrucciones paleogeográficas más precisas. La utilización del registro paleomagnético de rocas que se encuentran en zonas actualmente emergidas, ha contribuido a confirmar las reconstrucciones de las posiciones de las placas hasta el Jurásico de forma independiente (desde hace ~160 Ma hasta la actualidad), y a esclarecer la paleogeografía anterior a la generación de los fondos oceánicos actuales (anterior a ~160 Ma).

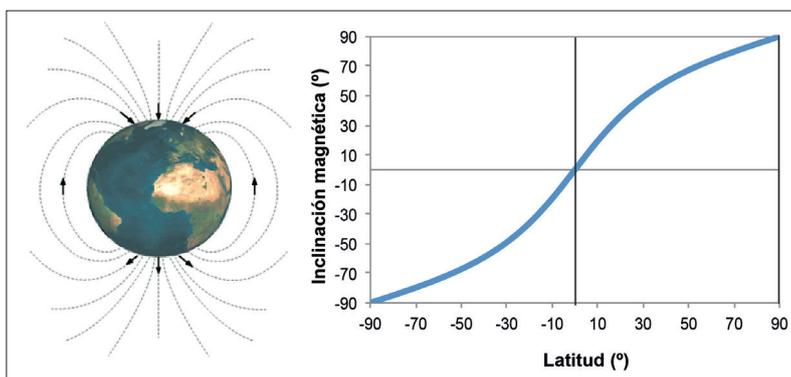
Por otra parte, la aplicación que permite precisar la posición de las placas en el pasado ha sido utilizada para realizar reconstrucciones paleoambientales y de circulación oceánica (Poulsen *et al.*, 1998), fundamentales para entender los cambios climáticos del pasado del sistema Tierra (Larrasoña y Mochales, 2016, en este volumen).

A una escala de trabajo de mayor detalle, pasando de la tectónica de placas a la deformación a escala de orógeno o, todavía a mayor escala, en cinturones de pliegues y cabalgamientos, el paleomagnetismo es esencial para descifrar la evolución espacial y establecer una secuencia de eventos geológicos que ayudan a entender el proceso de la formación de orógenos (como los Pirineos o los Alpes). Los ejemplos que se van a desarrollar en las actividades aquí presentadas están relacionados con datos paleomagnéticos reales del orógeno pirenaico y alpino.

El paleomagnetismo se fundamenta en la asunción de que el campo magnético de la Tierra es predominantemente dipolar y centrado con el eje de rotación terrestre si se consideran periodos de tiempo geológicamente despreciables (hipótesis del *Geocentric Axial Dipole*; GAD por sus siglas en inglés), además de la capacidad que algunos minerales concretos (ferromagnéticos) tienen para registrar ese campo magnético bajo determinadas circunstancias y de forma estable y duradera (Villalán, 2016). Es una técnica que requiere de sofisticados aparatos electrónicos y magnéticos para medir esa orientación del campo magnético terrestre del pasado en las rocas (brújulas fósiles). Por tanto, la utilidad del método es más sencilla de describir con ejemplos bien conocidos de la geología europea y, por ello, en este artículo se proponen las siguientes actividades con el fin de:

- i) Reconocer que la inclinación magnética informa sobre la latitud de un punto en la superficie terrestre. La actividad propone utilizar datos de inclinación magnética de la península Ibérica del Pérmico al Eoceno, para conocer su paleolatitud.
- ii) Reconocer rotaciones de eje vertical a escala de placa tectónica, por medio de la declinación magnética. Como ejemplo concreto se trabajará con la rotación de Iberia respecto a Europa estable. Para ello se propone manipular una fotocopia de un mapa con la situación geográfica de la Europa actual y otra fotocopia con la península Ibérica donde se han representado una selección de los vectores pleomagnéticos previos a la rotación.

Fig. 1. Representación sencilla de las líneas de campo magnético terrestre (izquierda) y representación gráfica de la fórmula de modelo de campo magnético geocéntrico axial que relaciona la inclinación magnética de un punto con su latitud (derecha). A mayor latitud, mayor inclinación magnética y viceversa.



- iii) Reconocer rotaciones de eje vertical a escala de frente de pliegues y cabalgamientos y su relación con el desplazamiento y acortamiento involucrados en los procesos de deformación. En concreto se presentará el ejemplo de las Sierras Exteriores, en el Pirineo, cuya formación está asociada a fuertes variaciones laterales de acortamiento. Como actividad para visualizarlo y entenderlo se propone “modelizar” el cabalgamiento basal surpirenaico con una sábana de rayas. Este recurso permite entender cómo las rotaciones ayudan a desentrañar la estructura y evolución geológica de un cinturón de cabalgamientos.
- iv) Reconocer rotaciones de eje vertical a escala de orógeno y su relación con los procesos de indentación entre placas. La geometría de las placas que colisionan en contextos compresivos puede condicionar la geometría final de los orógenos que podrán presentar estructuras curvadas (u oroclinales). Para entender esta actividad se propone realizar el modelo sencillo de los Alpes utilizando, de nuevo, la sábana de rayas.
- v) Reconocer rotaciones de eje horizontal y determinar la edad del momento de magnetización de rocas sedimentarias respecto a la edad de los procesos de deformación que las afecta (las pliega). Se propone realizar por equipos un ejercicio de datación de la magnetización en relación a la deformación que genera pliegues; se utilizará el ejemplo de la remagnetización posterior al plegamiento que se ha analizado en las Sierras Interiores Pirenaicas.

## ACTIVIDADES SOBRE BAILES Y GIROS EN LA CORTEZA SUPERIOR

Las actividades propuestas a continuación se basan en datos relacionados con la placa Ibérica, sus cambios de latitud y los giros que ha experimentado a lo largo del tiempo. Además, se presentan ejemplos relacionados con la Geología del Pirineo y los Alpes donde se detalla la información sobre rotaciones de eje vertical y horizontal deducidos gracias al paleomagnetismo.

### Bailes de Iberia en el pasado: paleolatitud de la placa Ibérica a lo largo del tiempo

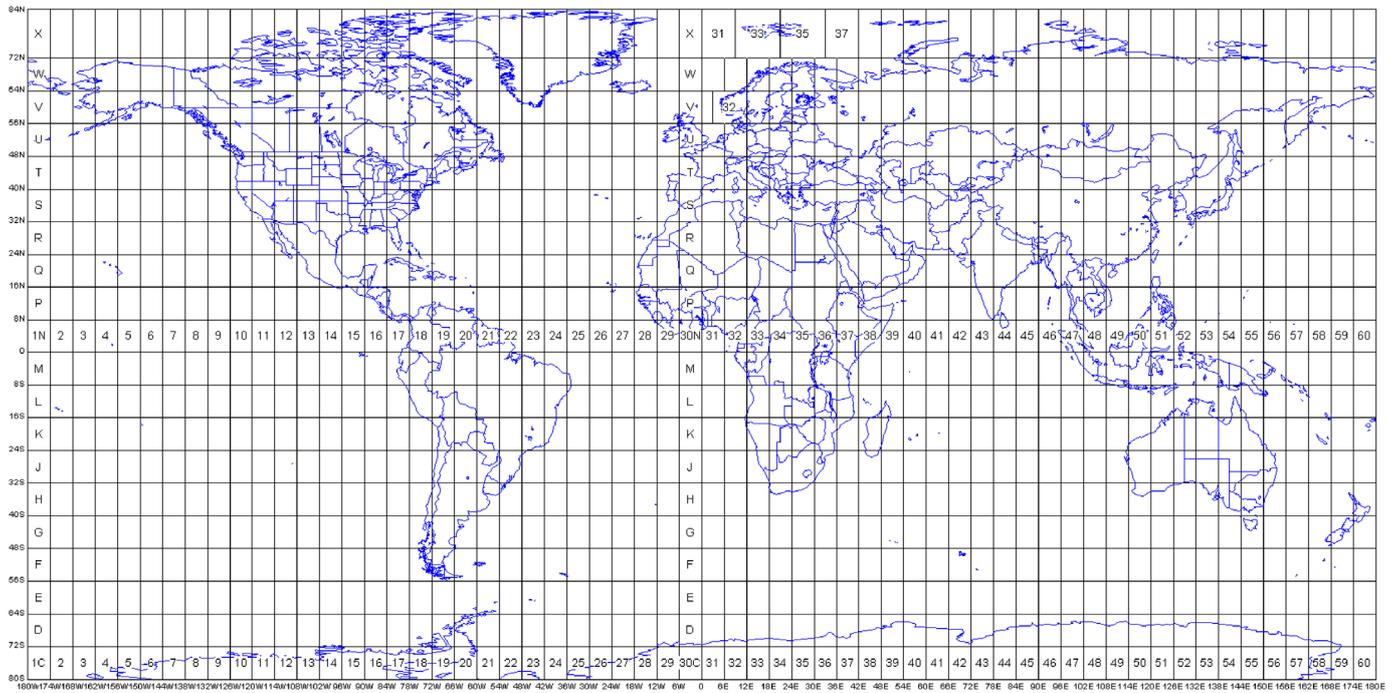
La actividad que se propone está relacionada con el modelo de dipolo geocéntrico axial que caracteriza el comportamiento del campo magnético terrestre en un 90% de las observaciones realizadas (Butler, 1992). La fórmula que responde a esta actividad se detalla así:

$$\tan I = 2 \tan \lambda$$

donde  $I$  es la inclinación magnética en un punto de la esfera terrestre y  $\lambda$  es la latitud de ese punto. La representación gráfica de la fórmula aparece en la figura 1. Así, para una latitud de  $40^\circ$  N (Madrid) la inclinación magnética de una aguja imantada libre será de casi  $60^\circ$  respecto a la horizontal.

*Concepto:* Relación entre el valor de la inclinación magnética y la latitud en un punto.

*Objetivo:* Comprender que la inclinación magnéti-



ca de una placa ha podido variar a lo largo del tiempo geológico debido a la tectónica de placas. Esas variaciones de la inclinación permiten reconstruir la posición de la placa tectónica, es decir, su paleolatitud.

**Material:**

1. Fotocopia de un mapamundi donde aparecen los paralelos representados (en tamaño A4). Se muestra un ejemplo en la figura 2.
2. Cuatro fotocopias de la península Ibérica (a escala equivalente a como aparece representada en el mapa anterior), con las letras de las edades escritas en la península: Pérmico, Triásico, Cretácico y Eoceno.

Los datos paleomagnéticos promedio que se van a utilizar provienen de una compilación realizada a partir de datos previos en Oliva Urcia (2004). El promedio para una edad presenta el dato de la declinación y la inclinación magnéticas acompañados de valores estadísticos  $\alpha_{95}$  y  $\kappa$  que indican la fiabilidad de la media (Villalaín, 2016). (tabla I).

En la actividad se va a utilizar solamente el dato de la inclinación magnética promedio para esas cuatro edades.

*Descripción de la actividad:* De manera individual, los estudiantes van a pegar 4 veces la península Ibérica sobre el mapamundi. Ayudados con la gráfica de la figura 1, pasarán el dato de inclinación magnética (de una edad determinada) a la paleolatitud de la península para esa edad. De tal manera, se podrá ver el recorrido de la península Ibérica desde el Pérmico al Eoceno.

La actividad se puede extender discutiendo sobre la paleolongitud. Los datos paleomagnéticos “solos” no ofrecen ese dato, debido a la simetría radial de las líneas de campo (la declinación siempre apunta al norte) (Fig. 3). Para recomponer la posición de las placas se deben tener en cuenta las dimensiones de las mismas, la posición relativa entre

Fig. 2. Mapamundi obtenido en [www.dmap.co.uk](http://www.dmap.co.uk).

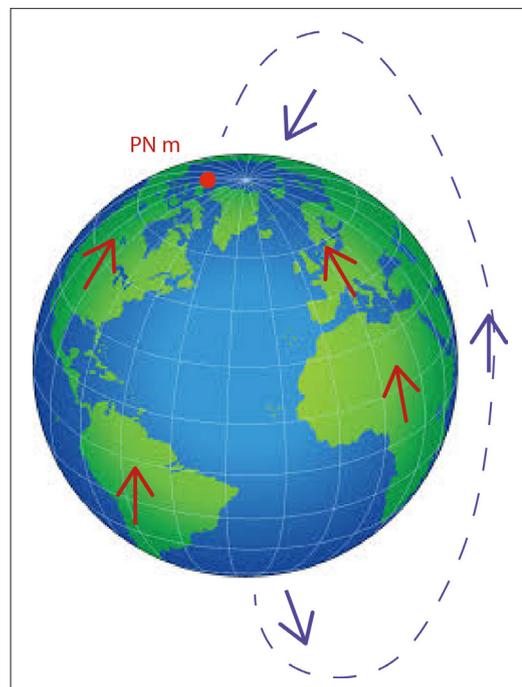


Fig. 3. Representación de la declinación magnética en rojo (apuntando al Polo Norte magnético -PN m-) y la inclinación magnética en azul. Se recomienda consultar la versión digital.

EDAD	DECLINACIÓN (°)	INCLINACIÓN (°)	$\alpha_{95}$	$\kappa$
Pérmico	342	00	14	33
Triásico medio-sup.	358	20	8	56
Cretácico superior	2	44	7	94
Eoceno	6	52	5	477

Tabla I. Datos paleomagnéticos promedio (declinación, inclinación y valores estadísticos del promedio) por edad. Se va a utilizar solamente el dato de la inclinación magnética.

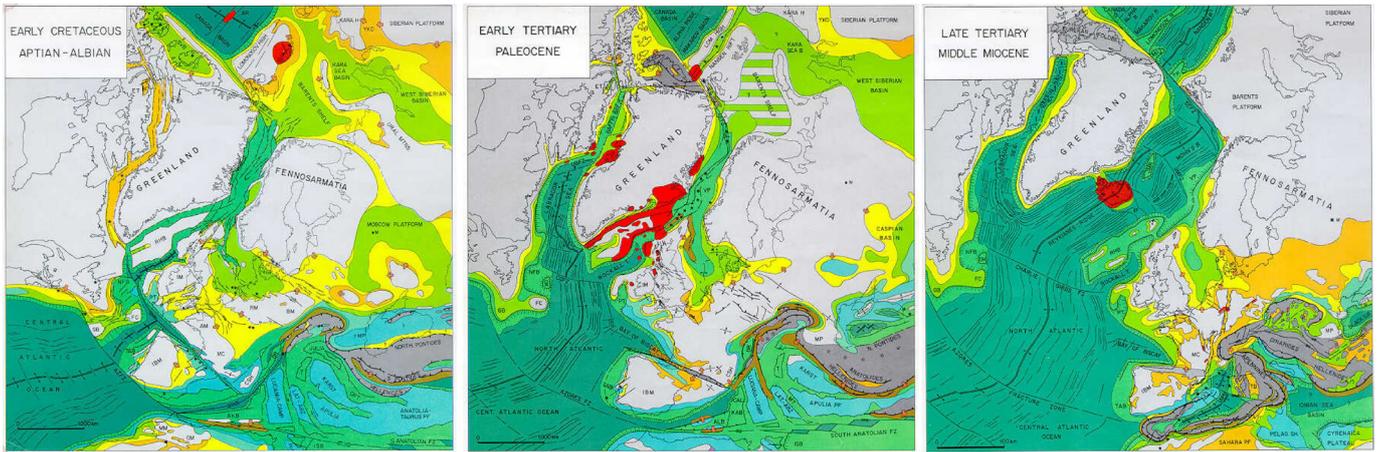


Fig. 4. Reconstrucción del SW de Europa (Ziegler y Roure, 1999) desde el Cretácico Inferior al Mioceno ilustrando la apertura del Golfo de Vizcaya.

ellas y las anomalías de fondo oceánico (si existen en ese intervalo temporal). Este puzzle no siempre arroja soluciones únicas especialmente cuando no existe registro de fondo oceánico. Por ejemplo, a lo largo de la acumulación de datos paleomagnéticos, se han planteado varias opciones de amalgama de Pangea (i.e., Pangea A y Pangea B) (Muttoni *et al.*, 2003). Estas opciones han sido reconciliadas recientemente al tener en cuenta la calidad y fiabilidad de datos paleomagnéticos provenientes de areniscas y lutitas rojas (Permo-Triásico), ya que pueden experimentar un aplanamiento de la inclinación magnética, lo que conlleva a cálculos erróneos de su paleolatitud (Domeier *et al.*, 2012).

### Giro de Iberia

El giro de eje vertical de Iberia respecto a Europa estable durante el Cretácico Inferior es un buen ejemplo de la utilidad del paleomagnetismo en relación a la posición relativa de placas y microplacas en el pasado.

Esta rotación está relacionada con la apertura del Golfo de Vizcaya debida a la generación de corteza oceánica (Fig. 4). Los datos paleomagnéticos pérmicos provienen de zonas actualmente emergidas que se encuentran en la península Ibérica.

**Concepto:** Rotación de eje vertical de una placa a partir de la observación de la variación de la declinación magnética. Las variaciones de la declinación

magnética de zonas estables en placas tectónicas informan sobre rotaciones de eje vertical que han afectado a la placa.

**Objetivo de la actividad:** Comparar datos de declinación magnética que han variado en el tiempo geológico y deducir la rotación de eje vertical a escala de placa.

**Fases de la actividad:** El profesorado trabajará previamente con el alumnado sobre la adquisición de la remanencia natural, el significado de las componentes magnéticas; declinación e inclinación, el modelo de dipolo geocéntrico axial terrestre, la declinación magnética respecto al norte geográfico y los mapas actuales de la declinación magnética (prácticamente 0° para Iberia en la actualidad como se representa en la figura 5).

**Material necesario:** una fotocopia donde se representa la situación actual con el vector de declinación magnética dibujado en Iberia y Europa estable (Francia) (el vector magnético apunta al norte magnético) (Fig. 5). Una fotocopia de la placa Ibérica donde se han superpuesto los vectores paleomagnéticos previos a la rotación cretácica Fig. 6. Los estudiantes han de tener un transportador de ángulos.

**Desarrollo:** La práctica consiste en reconstruir la paleogeografía de la placa Ibérica antes de su rotación respecto a Europa estable.

Para ello se utiliza un mapa de Europa donde se han representado los vectores magnéticos actuales que se encontrarían en rocas formadas en la actualidad (Fig. 5). La actividad se puede hacer algo más

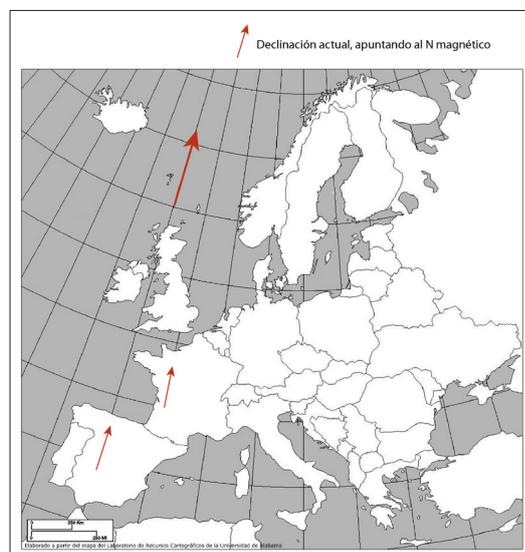


Fig. 5. Declinación magnética actual para Iberia, donde no hay prácticamente variación en la declinación (N geográfico y N magnético se solapan).

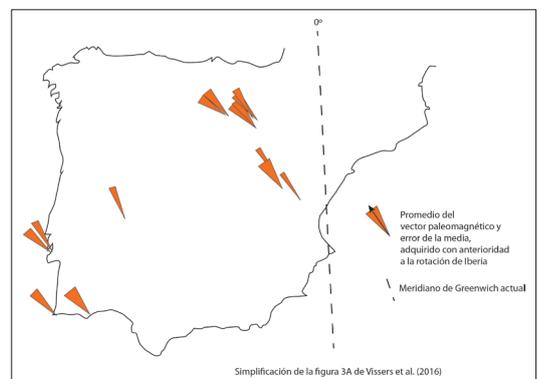


Fig. 6. La península ibérica con la representación del vector paleomagnético previo a la rotación cretácica y su error. El origen del cono marca el punto de muestreo (modificada de Vissers *et al.*, 2016).

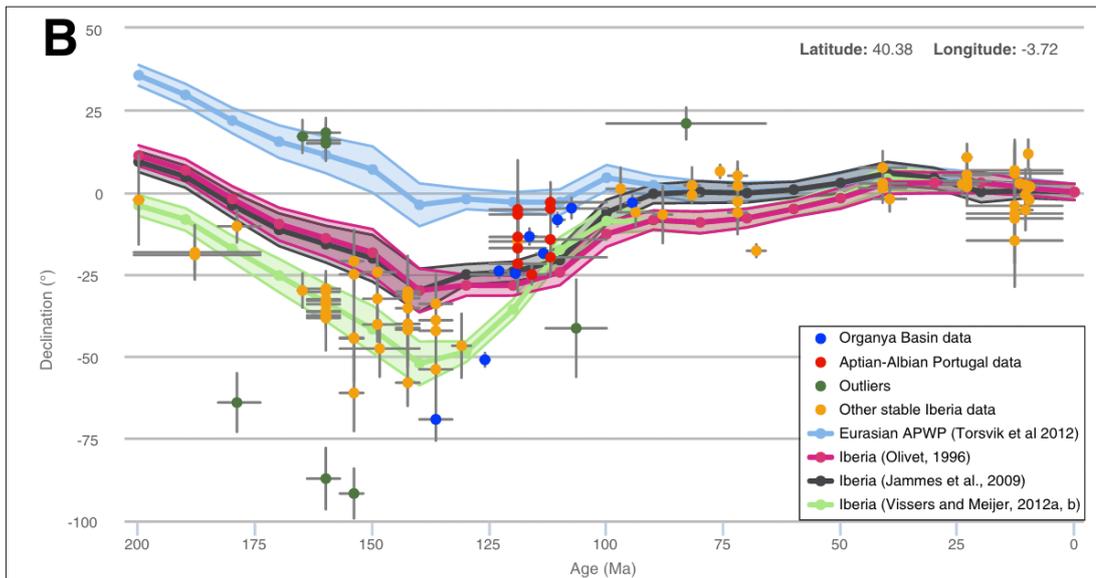


Fig. 7. Figura tomada de *Visser et al., (2016)* donde se representa la declinación de los diferentes sitios estudiados agrupados por colores dependiendo de la región de donde proceden. Cuenca de Organyà en azul (Pirineo oriental deformado), en rojo datos del Cretácico de Portugal estable y en amarillo datos de Iberia estable. Se recomienda consultar la versión digital.

compleja si se pide a los estudiantes que dibujen la declinación del vector magnético actual, es decir, que pinten la flecha roja (tras explicar los conceptos arriba mencionados).

Seguidamente, se entrega una fotocopia de la placa Ibérica, donde se han representado unos vectores paleomagnéticos previos a la rotación cretácica (Fig. 6). Los estudiantes deben hacer casar esos vectores pre-rotación con el campo magnético pre-rotación y calcular el tipo de rotación (en el sentido de las agujas del reloj [horaria] o al contrario [antihoraria]) y la magnitud de rotación (en grados, calculados con el transportador de ángulos) que ha experimentado la placa ibérica desde el Cretácico Inferior.

La rotación de Iberia en el Cretácico ha sido y es objeto de numerosos estudios paleomagnéticos y de reconstrucción del movimiento de placas (rotaciones de placas siguiendo polos eulerianos). El primer trabajo paleomagnético en rocas actualmente emergidas donde se calculó en  $\sim 35^\circ$  la rotación de Iberia respecto a Europa estable es de Van der Voo (1969). Posteriormente, la recopilación de datos paleomagnéticos (declinación) de Iberia respecto a Europa y África (Van der Voo, 1993; *Visser et al., 2016* –Fig. 7-) permiten representar de manera más completa, aunque sin certidumbre absoluta, dicha rotación.

Sin embargo, concretar la edad y la velocidad de la rotación sigue siendo objeto de estudio, ya que aparecen discrepancias entre los datos paleomagnéticos de zonas emergidas y los datos de las anomalías del fondo oceánico, además de la dificultad de reconciliar los datos paleomagnéticos con los correspondientes polos de rotación finita en un modelo cinemático único y fiable (*Neres et al., 2012*). A la vista de los datos paleomagnéticos en zonas actualmente emergidas, se aconseja realizar una revisión de los datos paleomagnéticos del Cretácico en la península Ibérica, especialmente en relación a: i) la edad precisa del dato paleomagnético, ya que pueden existir datos relacionados con remagnetizaciones no detectadas anteriormente, ii) prestar atención a los criterios estadísticos del cálculo del promedio utilizado y iii) corregir la dirección paleomagnética en función de posibles errores de inclinación de las capas o los debidos al aplastamiento

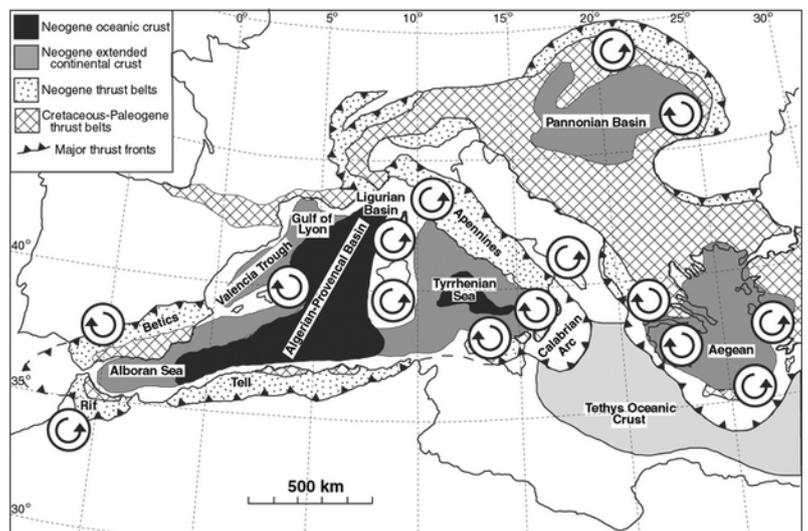
de la dirección paleomagnética durante el enterramiento (especialmente en facies rojas del Triásico) (*Neres et al., 2013*).

Además, como se recoge en *Visser et al. (2016)*, alguno de los datos utilizados en Iberia provienen de zonas deformadas (ej: cuenca de Organyà) lo que aún dificulta más la reconstrucción de la posición de Iberia “estable” (ver actividad siguiente).

La actividad se puede completar comentando estos problemas que aparecen recogidos en las publicaciones mencionadas. También se pueden visualizar rápidamente las variaciones de la declinación magnética de placas diferentes a lo largo del tiempo en [paleolatitud.org](http://paleolatitud.org) (*Koymans et al., 2016*).

Dentro del contexto cinemático del Mediterráneo occidental, por medio de variaciones de la declinación magnética, se han detectado rotaciones de eje vertical tanto horarias como antihorarias (Fig. 8) relacionadas con el desarrollo de orógenos sobre zonas de subducción que unen cuencas extensionales (*Krijgsman y Garcés, 2004*). En concreto, Cerdeña ha rotado  $45^\circ$  respecto a Europa, entre 20.5 y 15 Ma en relación a la apertura oceánica en la cuenca Argelina-Liguro-Provenzal como consecuencia del retroceso de la subducción de Adria/Ionia hacia el

Fig. 8. Tomada de *Krijgsman y Garcés (2004)* donde se representan los principales orógenos y cuencas neógenas además de las rotaciones detectadas paleomagnéticamente.



E-SE (Gattacceca *et al.*, 2007). El arco de Gibraltar se ha considerado como el análogo occidental del arco calabrés por sus características geodinámicas, aunque el desarrollo de la curvatura es anterior en el arco de Gibraltar (previo al Mioceno) que en el calabrés (Plio-Pleistoceno) (Krijgsmán y Garcés, 2004).

### Jugando con un mantel a cuadros

**Concepto:** La Geología Estructural trata de descomponer los movimientos (traslación y rotación) y cambios de forma (deformación interna) que los volúmenes de rocas han sufrido en el tiempo durante la formación de las cadenas de montañas. Dejando aparte los cambios de forma o volumen (deformación interna), los desplazamientos en la vertical y horizontal acomodados por pliegues y fallas son relativamente fáciles de caracterizar desde el punto de vista geométrico utilizando los horizontes estratigráficos (referencia 2D de primer orden en el espacio). Sin embargo las rotaciones de eje vertical son una variable esquivada y de precisión limitada utilizando indicadores convencionales (p.e. paleocorrientes) porque se desconoce su orientación original.

El paleomagnetismo, más allá de las curvas de deriva polar aparente de las placas, supuso una revolución en este campo a partir de los años 60 (Norris y Black, 1961) cuando, por primera vez, se utilizó para entender si los habituales cambios de orientación de los frentes montañosos están (o no) relacionados con rotaciones de eje vertical. Estos autores aplicaron las técnicas paleomagnéticas para discernir si la disposición del frente de cabalgamientos de Alberta (Canadá), con cambios importantes en la orientación de su traza, era original o respondía a rotaciones acomodadas durante su formación.

Para detectar rotaciones nos fijamos en la componente horizontal del vector paleomagnético; la declinación. La declinación esperable (referencia) se obtiene de posiciones no deformadas (“estables”) de la placa que reflejan la dinámica de dicha placa (y no la del cinturón de pliegues y cabalgamientos). Si comparamos la referencia con la declinación observada en las zonas deformadas obtendremos, de forma absoluta, el valor de rotación de eje vertical asociado a la deformación. La representación de dichas rotaciones sobre las cartografías geológicas se suele plasmar como un cono cuyo eje representa el valor de la declinación encontrada en esa localidad y cuyo semi-ángulo es igual al ángulo de confianza para el 95% de la distribución (conocido como  $\alpha_{95}$  en la literatura especializada) (Villalaín, 2016b, en este volumen), ya que el paleomagnetismo tiene diversas fuentes de dispersión natural y ésta debe ser cuantificada. Adicionalmente se muestra el valor de la referencia de manera que, de un vistazo, se pueden relacionar las rotaciones detectadas sobre los elementos geológicos del mapa.

A una escala de más detalle, el paleomagnetismo también ha sido muy útil para discernir el origen y formación de la curvatura de muchos orógenos del planeta, uno de los problemas más fascinantes de la geodinámica interna (Carey, 1995). Los orógenos curvados (u oroclinales) son y han sido comunes en todos los ciclos orogénicos a lo largo de la historia geológica del planeta (Bolivia, Karakorum, Cordillera Cantábrica, etc...). Las curvaturas pueden ser primarias (disposición original de las cuencas que poste-

riormente se deformarán) o secundarias (debidas a procesos de rotación que acontecen durante la deformación). Para detectar el origen de la curvatura se realiza un análisis sencillo comparando en abscisas (x) la dirección estructural (*strike* en inglés) frente a la rotación observada paleomagnéticamente en diferentes posiciones estructurales (en ordenadas; y). Este diagrama se denomina *oroclinal test* (Eldredge *et al.*, 1985); si el valor de la pendiente del ajuste en dicho gráfico es 0, la curvatura existía antes de los procesos de deformación (que no la han modificado). Si por el contrario es 1, la curvatura se ha generado durante la deformación. Por supuesto existen todos los términos intermedios de curvaturas “mixtas”.

**Objetivos:** Comprender cómo las rotaciones de eje vertical son comunes en cinturones de pliegues y cabalgamientos y están relacionadas con la diferencia de desplazamiento (McCaig y McClelland, 1992) acomodada a lo largo de una falla. Esto provoca un movimiento diferencial (rotación) en los materiales desplazados por encima de dicha falla.

- A una escala regional, la dinámica de convergencia de placas y los procesos de colisión entre ellas son responsables de la generación de trazas curvas a escala orogénica (oroclinales).
- Comprender cómo los geólogos utilizan el paleomagnetismo para detectar dichos movimientos

### Caso de estudio: Sierras Exteriores (Pirineos):

Las Sierras Exteriores Altoaragonesas (provincias de Huesca y Zaragoza) representan la emersión más meridional en superficie del cabalgamiento basal Surpirenaico. Más hacia el Sur las evidencias de deformación son escasas o poco intensas por lo que se pueden considerar como el límite geológico de la cadena pirenaica. Las Sierras han sido profusamente estudiadas desde el punto de vista de la geología estructural (Nichols, 1987; McElroy, 1990; Millán *et al.*, 1995, 2000; Teixell y San Segundo, 1995; Oliva-Urcia *et al.*, 2012).

Una de las peculiaridades de dicho cabalgamiento es que su movimiento no es uniforme ni en el espacio ni en el tiempo. En el sector oriental (Sierra de Guara) se ha podido calcular un acortamiento por compresión de unos 30 km (hacia el Sur), mientras que en el sector Occidental (Sierras de Salinas y Santo Domingo) ese acortamiento se reduce a 15 y 10 km respectivamente. Si movemos los dos extremos de un folio hacia delante sobre una mesa con esa misma proporción (3:1) enseguida entenderemos que el folio necesita rotar.

Si nos detenemos en el sector más occidental (Sierra de Santo Domingo) se observa que, el cabalgamiento basal se “simplifica” mucho y acaba formando un gran pliegue (homónimo) que deforma casi toda la secuencia sedimentaria (de más de 5 km). Hacia Navarra este pliegue se desdibuja y desaparece. La terminación occidental (periclinal) del pliegue de Santo Domingo es una de las estructuras más bellas y espectaculares del frente de cabalgamiento surpirenaico (Pueyo *et al.*, 2015) (Fig. 9).

Los datos paleomagnéticos existentes en la región (Hogan y Burbank, 1996; Pueyo *et al.*, 2003, 2004) atestiguan rotaciones de eje vertical importantes en el sentido de las agujas del reloj (horarias) de hasta 45°. Por el contrario el flanco Sur de

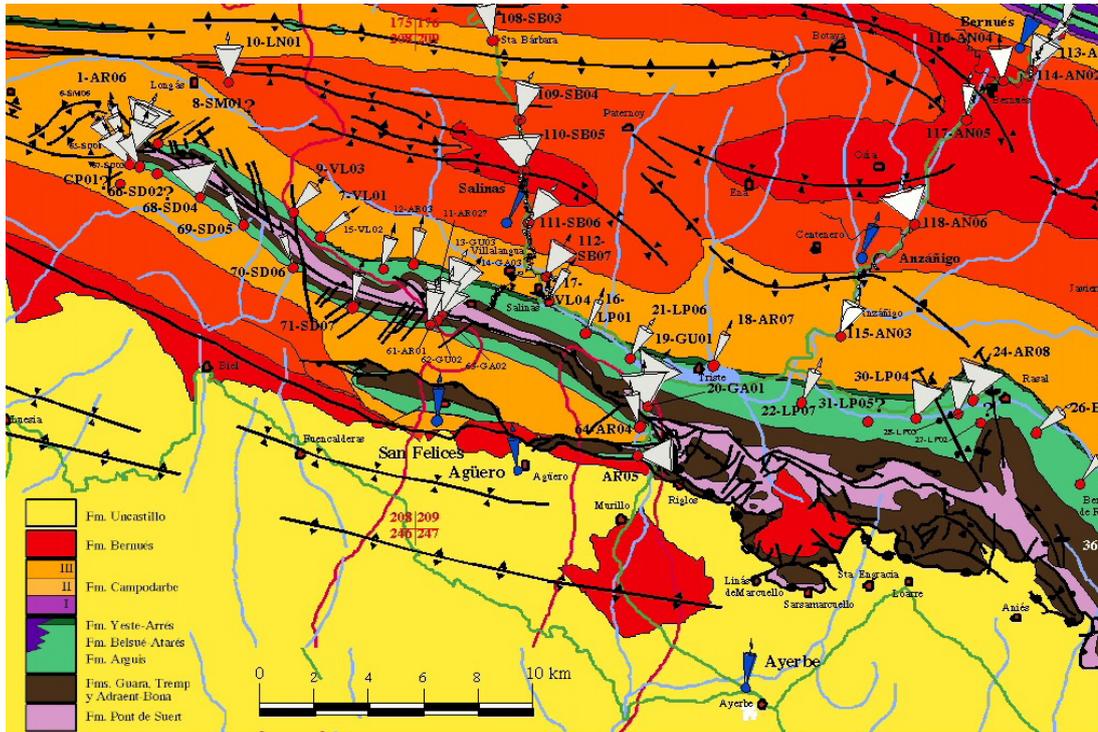


Fig. 9. Mapa geológico de las Sierras Exteriores con la posición de los vectores paleomagnéticos estudiados en rocas eocenas de la Formación Arguis. La referencia de esa edad es NoosE (posterior a la rotación de Iberia) por lo que la lectura de la orientación del eje del cono representa la rotación detectada (Pueyo, 2000).

la estructura muestra ausencia de rotaciones (sector desde el embalse de La Peña hasta la falla de Santa Engracia (71-SD06) o rotaciones antihorarias moderadas desde Santa Engracia hacia el Oeste (1-AR06).

**Materiales:**

- Un mantel o sábana de rayas.
- Una o varias mantas
- Una superficie lisa sobre la que apoyarla

**Ejecución del modelo de las Sierras Exteriores con vectores paleomagnéticos:**

En esta actividad vamos a tratar de reproducir la estructura de la terminación occidental del cabalgamiento basal en las S<sup>a</sup> Exteriores, el anticlinal de Santo Domingo.

- Extendemos la sábana de rayas sobre una manta gruesa extendida sobre el suelo (Fig. 10).
- Alineamos las rayas sobre el supuesto norte (hay que pensar que el eje del anticlinal tiene

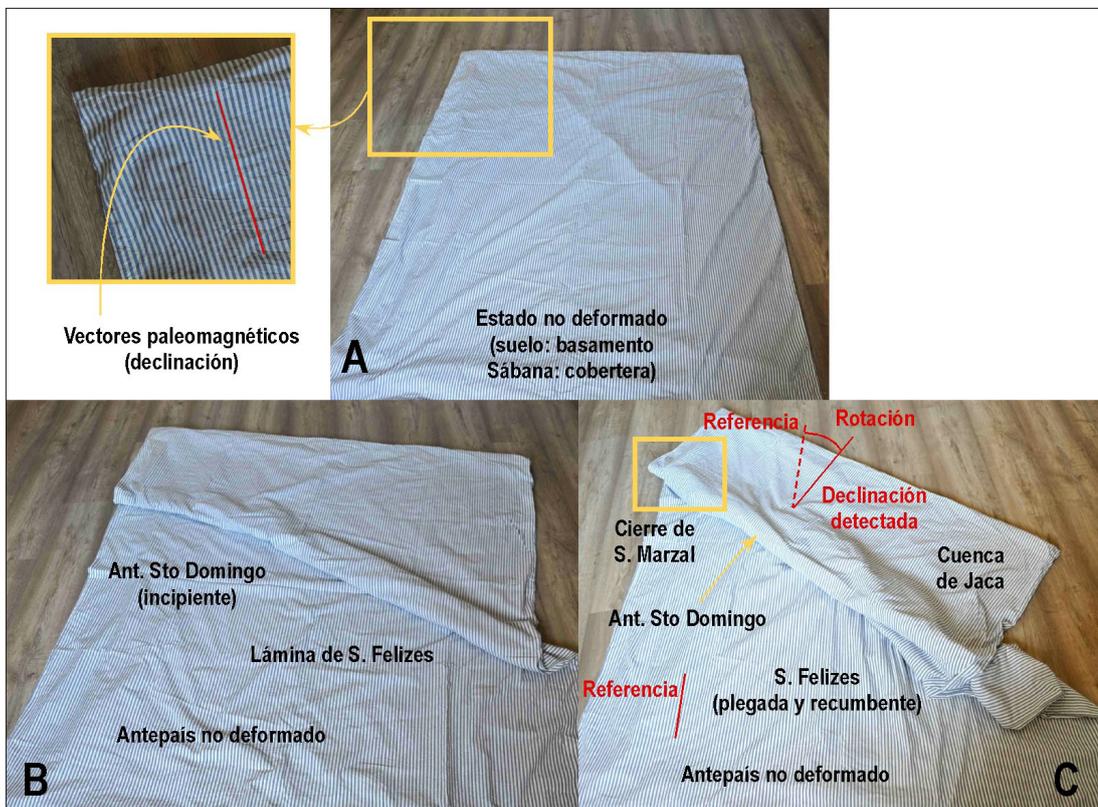


Fig. 10. Fotografías de la evolución del modelo-sábana sencillo del sector Occidental de las Sierras Exteriores. A) Estado no deformado (Luteciense, ff 45 M.a.), la deformación pirenaica no ha llegado a esta posición. B) El frente de cabalgamiento llega en el Bartonense-Priabonense (ff 35 M.a.) y genera la lamina de San Felices y un tenue anticlinal de Santo Domingo. C) Las estructuras previas son plegadas (lámina recumbente de San Felices) o reapretadas (Santo Domingo), en este momento se necesita una rotación en sentido horario muy importante para explicar tanto la fuerte inmersión de San. Marzal, como las rotaciones observadas paleomagnéticamente (líneas rojas). Se recomienda consultar la versión digital.

- una orientación fWNW-ESE (N150E).
- Reproducimos el pliegue asumiendo una geometría cónica cuyo ápice se encuentra al W de San Marzal (terminación del pliegue).
- Comprobamos que un pliegue cónico necesita una rotación importante para producirse, y que la inmersión del pliegue hacia el oeste depende de la rotación acomodada. Acomodarla en un flanco, en el otro o en ambos depende de la cinemática (historia) del pliegue. Afortunadamente el paleomagnetismo nos ayuda a discernir entre ambos extremos.

- Comprobamos que la magnitud de acortamiento (desplazamiento de la sábana) varía necesariamente a lo largo de la estructura.

### Alpes

Los Alpes, al igual que el Pirineo, representan el orógeno de colisión que se produjo por la convergencia de las placas africana y euroasiática. Puesto que el movimiento de África, además del acercamiento S-N, sufre una rotación antihoraria desde el Jurásico hasta el Eoceno, las magnitudes de acortamiento en los Alpes son mucho mayores que en el

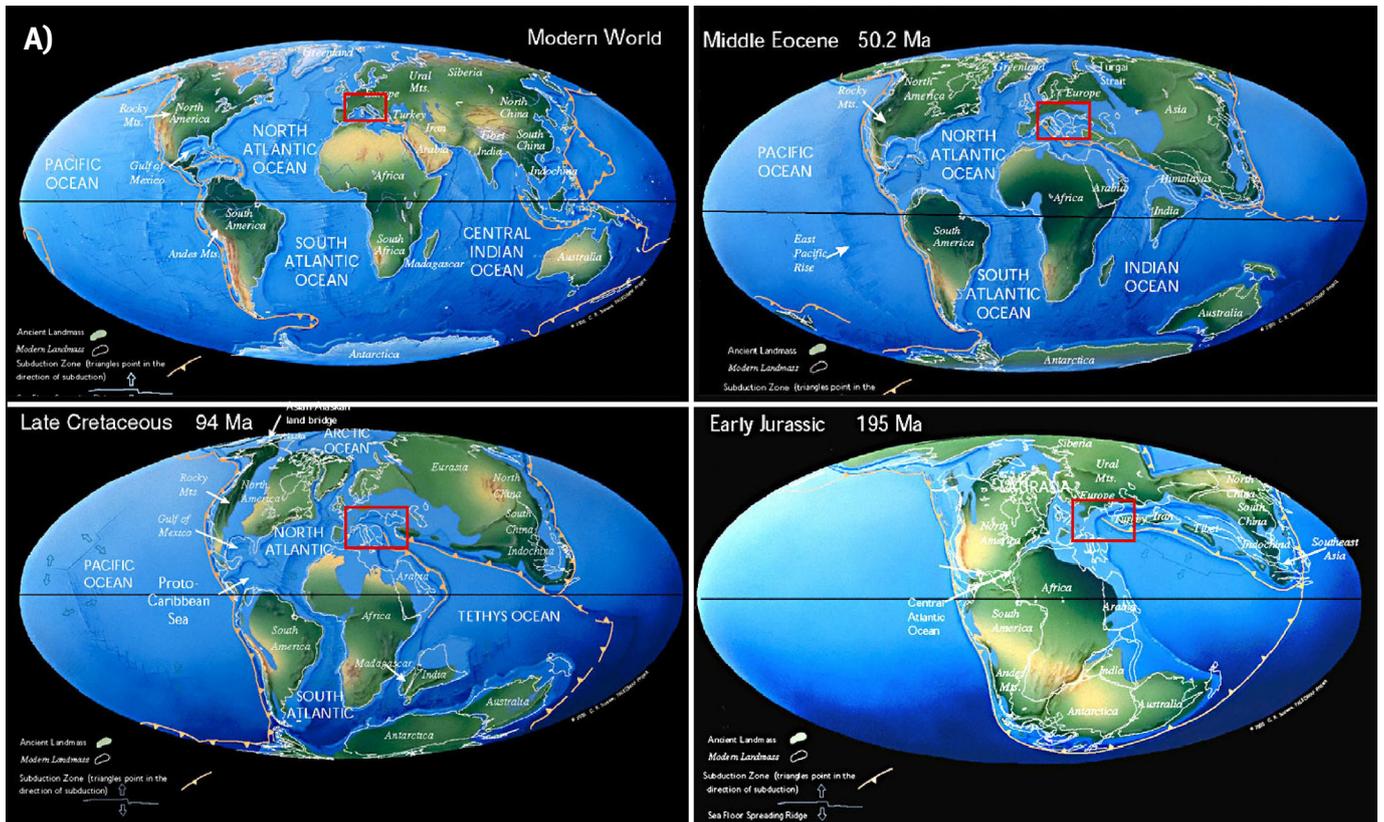
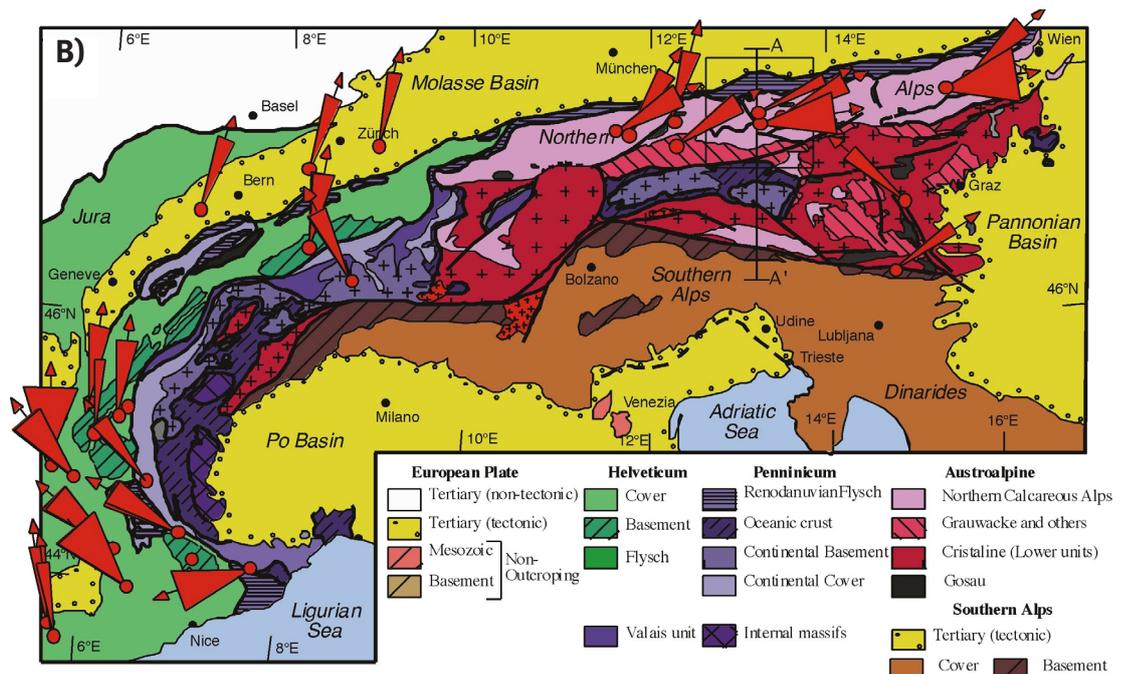


Fig. 11. A) Reconstrucción de las placas desde el Jurásico hasta la actualidad (Scotese, 2004). La posición de los Alpes se recuadra en rojo B) Mapa geológico de las Alpes con la posición de los vectores paleomagnéticos estudiados promediados por grandes unidades estructurales (ver compilación de datos en Pueyo et al., 2007). Se recomienda consultar la versión digital.



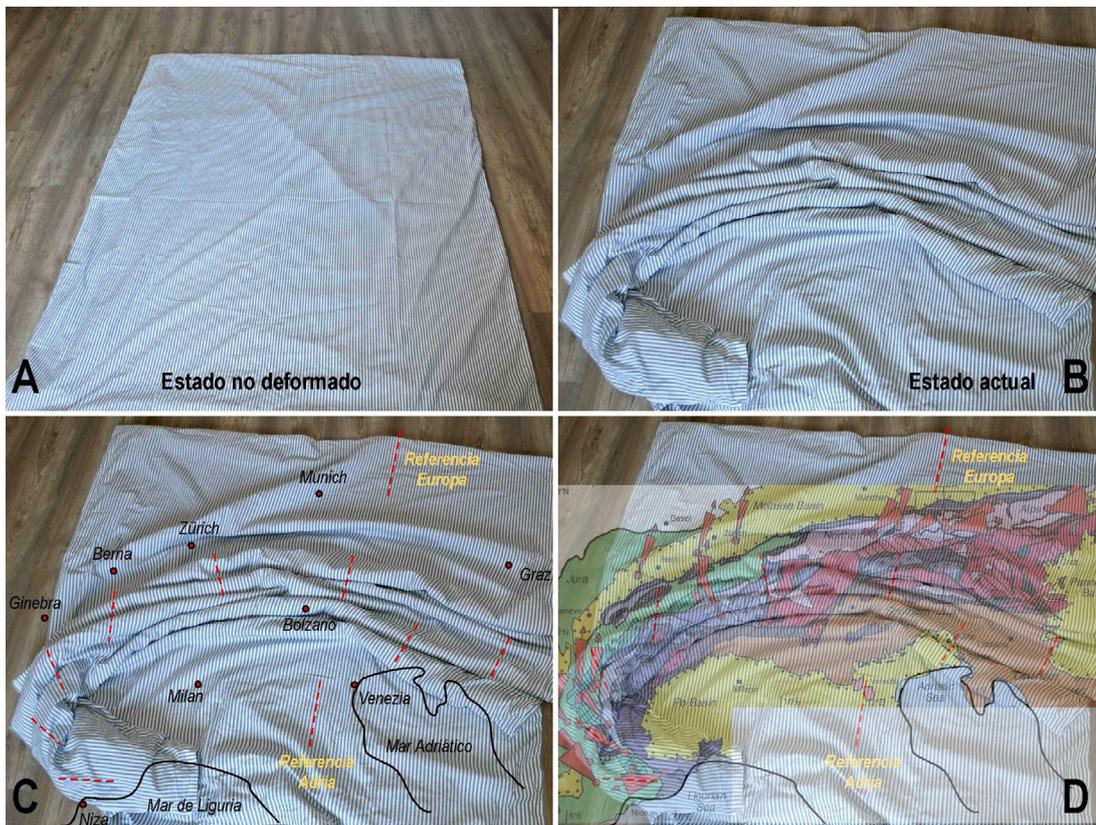


Fig. 12. Modelización sencilla de la distribución de rotaciones (detectadas paleomagnéticamente) en los Alpes.

Pirineo. Este proceso geodinámico produjo el cierre del océano Tethys y sus ramas septentrionales (peninica, meliata, etc...) dotando de una gran complejidad a la cadena. Además de todos estos factores, la colisión final de Apulia ya en el Terciario y la geometría en forma de "M" de la lineación periadriática (Schmid *et al.*, 1989), produjo un reapretamiento de las estructuras y rotaciones significativas de las unidades alpinas. Llamamos especialmente la atención las importantes magnitudes en los Alpes Marítimos (entorno de Niza) que superan los 90° de rotación antihoraria o las de sentido opuesto y similar magnitud en los Alpes Calcáreos del Norte (en Austria) (Fig. 11).

**Ejecución Modelo de Alpes (Fig. 12):**

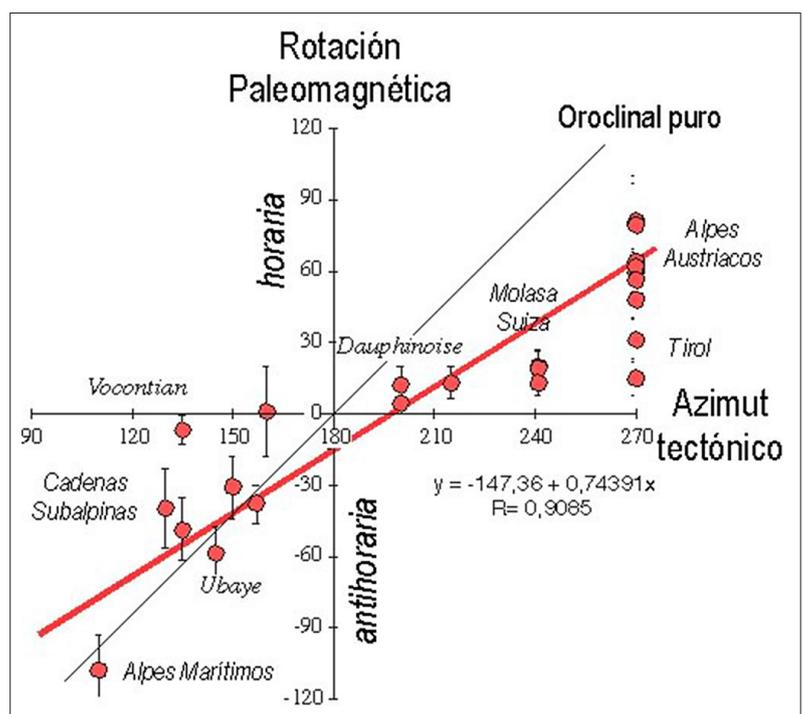
En esta actividad vamos a tratar de reproducir las rotaciones alpinas (terciarias) de los Alpes. Además de los valores extremos descritos (Alpes Marítimos y Calcáreos), debemos reproducir las rotaciones moderadas que se han detectado en los Alpes Suizos o en el Tirol Austriaco. Finalmente, las magnitudes relativas entre las placa Euroasiática y Apulia deben mantenerse según respetando los datos de referencia existentes que no predican rotaciones relativas (ni absolutas) de importancia entre ambas placas. Para ello desplazamos la sábana desde el Sur (Apulia) con ambas manos; la izquierda se desplazará hacia el NW-WNW y producirá el arco de los Alpes Marítimos, la derecha se desplazará hacia el NE-ENE en las unidades Austroalpinas.

Para finalizar esta actividad, se propone comentar el diagrama "oroclinal" de los Alpes (Fig. 13). En dicho diagrama se puede relacionar sin ninguna ambigüedad el valor de la rotación detectada

paleomagnéticamente y la posición estructural a lo largo de la cadena. Además de comentar los valores extremos (ya mencionados), conviene fijarse en:

- la dispersión de datos en algunos sectores (debido a la enorme complejidad estructural)
- la regresión de ajuste tiene una pendiente inferior a 1 (oroclinal puro) lo cual indica de la existencia de una curvatura previa anterior a la colisión por indentación de Apulia.

Fig. 13. Diagrama Oroclinal de los Alpes; en abscisas se representan las diferentes unidades de Oeste (Alpes Marítimos) a Este (Austroalpinas) y en ordenadas la rotación (promedio) de las diferentes unidades.



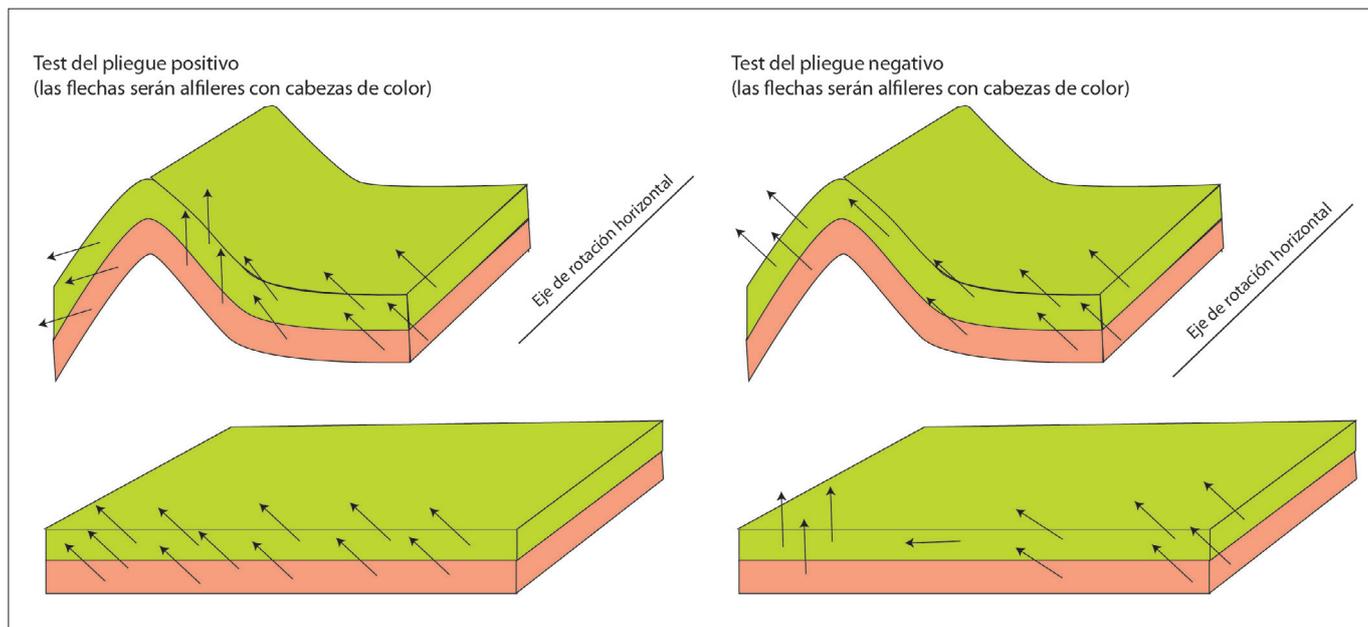


Fig. 14. Izquierda: Representación de un test del pliegue positivo (antes y después del plegamiento) (representado en la figura de abajo y arriba respectivamente). Los vectores magnéticos apuntan hacia el norte magnético y aparecen agrupados cuando las capas están en posición horizontal. Derecha: Representación de un test del pliegue negativo (antes y después del plegamiento, representado en la figura de abajo y arriba respectivamente). Los vectores magnéticos apuntan hacia el norte magnético y aparecen agrupados, cuando las capas están en posición plegada.

### ¿Qué va antes, el pliegue o la magnetización?

En esta actividad se va a trabajar con el concepto de inclinación magnética en rocas plegadas, rotaciones de eje horizontal y la prueba del pliegue (Butler, 1992). Este test se realiza siempre que las rocas sedimentarias donde se ha realizado el estudio hayan sido plegadas y permite determinar la edad de la deformación con respecto a la adquisición de la remanencia en las rocas. Otros tests de este tipo aparecen descritos en el artículo de Garcés y Beamud (2016) de este Monográfico. El estudio paleomagnético se basará en, al menos, dos puntos de muestreo en posiciones del pliegue con buzamiento muy contrastado (en ambos flancos). Así, si la remanencia es primaria (adquirida cuando las capas estratigráficas están en posición horizontal, es decir, en el momento de su formación), entonces ese vector puede pasar a proporcionar la información necesaria para calcular la paleolatitud de esa zona estable y utilizar el dato paleomagnético como en la actividad 2.

En el caso de que la remanencia sea posterior a la formación del pliegue, el dato paleomagnético informa sobre el momento en que se producen determinados eventos tectónicos (Izquierdo-Llavall *et al.*, 2015; Jelenska *et al.*, 2015; Cinku *et al.*, 2013), permiten datar hidrotermalismo y flujo de fluidos orogénicos (Ribeiro *et al.*, 2013; Elmore *et al.*, 2001; Evans *et al.*, 2000) y determinar el momento de la diagénesis por enterramiento (Blumstein *et al.*, 2004), es decir, informan de procesos importantes acaecidos durante la formación de los orógenos. La adquisición de la remanencia puede ocurrir también a la vez que se forma el pliegue. Este caso particular puede ser utilizado en la reconstrucción de la geometría de cuencas (Villalaín *et al.*, 2003), ejemplo que no se presenta en este manuscrito.

**Concepto:** El test del pliegue y qué implicaciones tiene en relación a la deformación de rocas sedimentarias.

**Objetivo:** Visualizar con un modelo sencillo en 3D qué agrupamientos muestran los vectores de la inclinación magnética antes y después del plega-

miento en los dos casos extremos de que la magnetización se adquiriera i) antes del plegamiento o ii) después del plegamiento.

**Fases de la actividad:** El profesorado debe recordar los procesos mediante los cuales las rocas sedimentarias adquieren la remanencia natural característica. Y posteriormente se debe recapacitar sobre procesos posteriores que pueden alterar la remanencia original adquirida en el momento de formación de las rocas sedimentarias (cuando las capas están en disposición horizontal). Estos procesos pueden ser debidos a aplastamiento, deformación al desarrollarse el pliegue, nuevas mineralizaciones, flujo de fluidos, disolución por presión y desarrollo de esquistosidad...

Recordar la información que proporciona el test del pliegue.

**Material a utilizar:** Planchas de goma eva de 5 mm de espesor cortadas y alfileres, de tal manera que se pueda realizar un test de pliegue positivo (la remanencia se ha adquirido cuando las capas se encontraban en disposición horizontal, Fig. 14 izda.) y un test del pliegue negativo (la remanencia se ha adquirido con posterioridad al plegamiento, Fig. 14 dcha.). Lo ideal sería que la actividad se realizase en grupos de 3 estudiantes. Una vez expuesta la teoría de la sesión, cada grupo debería construir un tipo de test de pliegue (o positivo o negativo).

**Caso de estudio:** Remagnetización a escala regional detectada en la Zona Surpirenaica.

La zona donde se ha detectado esta remagnetización se corresponde con la cobertera mesozoico-cenozoica que aflora en las denominadas Sierras Interiores (Huesca) e incluye además un pequeño sector de rocas triásicas dentro de lo que se denomina Zona Axial de la cadena (Fig. 15). Las Sierras Interiores constituyen una alineación montañosa de materiales carbonatados que bordean por el sur a la Zona Axial. Al sur de dichas sierras se extiende la cuenca de Jaca-Pamplona y la cuenca de Aínsa. Estas Sierras conforman un cinturón de pliegues y cabalgamientos de rumbo WNW-ESE, con buza-

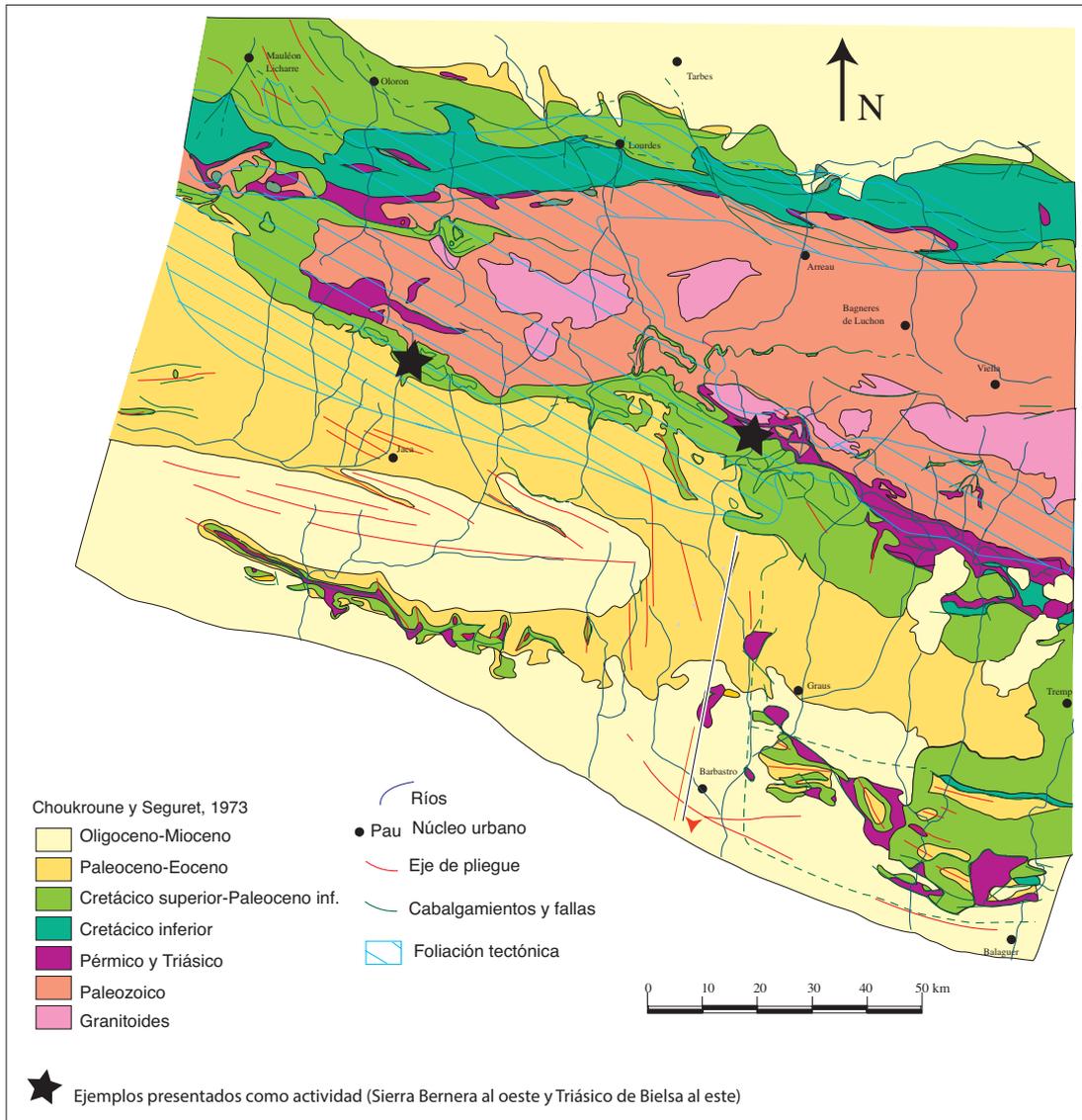
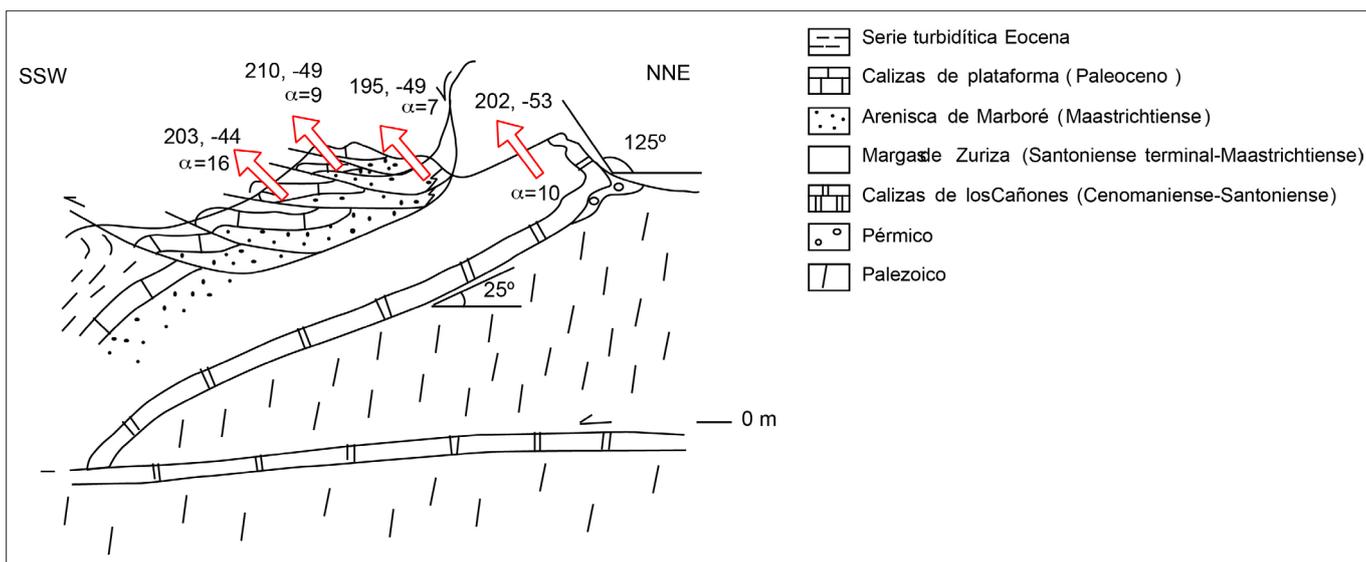


Fig. 15. Mapa geológico de la Zona Analizada en el Pirineo centro-occidental.

mientos variables. Este sistema de cabalgamientos de cobertera se denomina de Larra y Monte Perdido y afecta a la serie del Cretácico superior y a la serie calcárea y turbidítica terciaria. Los cabalgamientos

de cobertera aparecen basculados posteriormente hacia el sur debido a la actividad de otros cabalgamientos inferiores que afectan además de a rocas de la cobertera, a las rocas del Paleozoico (Gavarnie,

Fig. 16. Corte geológico de las Sierras Interiores (Sierra Bernera) en Huesca de Teixell (1992) donde se ha representado el vector magnético promedio (declinación, inclinación y  $\alpha_{95}$ ) para cada lámina de cabalgamiento estudiada (Oliva Urcia, 2004).



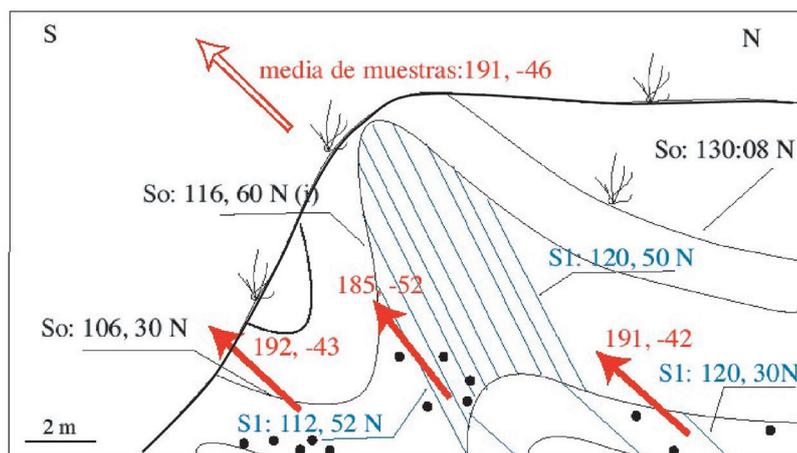


Fig. 17. Pliegue de areniscas y lutitas triásicas muestreado en la zona de Bielsa, con el vector magnético representado (declinación e inclinación) por sectores y el promedio total. So: plano de estratificación (i: invertido), S1: plano de esquistosidad (Oliva Urcia, 2004).

Bielsa, Millares, Guarga) (Teixell, 1992; Martínez-Peña y Casas, 2003).

En la parte más occidental de la zona estudiada, en Sierra Bernera (Huesca) se muestrearon estaciones paleomagnéticas (con un promedio de 8-10 muestras por estación) por cada lámina de cabalgamiento. Las rocas muestreadas son rocas carbonáticas del Cretácico superior. El análisis de los resultados paleomagnéticos se ha representado en la figura 16 sobre un corte geológico de Teixell (1992). Lo que se observa es que la inclinación magnética del promedio de cada lámina de cabalgamiento (representada con la flecha roja) es similar cuando las rocas están plegadas, es decir, se obtiene un test de pliegue negativo (Oliva Urcia, 2004).

A menor escala, en un pliegue de rocas rojas del Triásico superior de la zona de Bielsa, en la Zona Axial representado en la figura 17, se obtiene, al agrupar las muestras según el buzamiento de la capa estratigráfica, un resultado similar al ejemplo anterior. La inclinación magnética es similar en las zonas analizadas después del plegamiento.

## CONCLUSIONES

Estas actividades facilitan que los estudiantes comprendan la aplicación de la técnica del paleomagnetismo a la Geología Estructural y Tectónica.

La primera actividad ayuda a visualizar la inclinación magnética que queda registrada en las rocas del pasado y que permite posicionar placas tectónicas sobre la superficie terrestre en función del valor de la inclinación registrado.

La segunda actividad ayuda a visualizar cómo utilizar la declinación magnética para cuantificar rotaciones de eje vertical a escala de placa.

Las actividades tercera y cuarta muestran la utilidad del paleomagnetismo en relación a procesos de deformación de detalle. Por un lado se muestra un ejemplo y una práctica de rotaciones asociadas a sistemas de cabalgamientos (ejemplo del Pirineo) y por otro, y a una escala algo mayor, se ilustran las rotaciones relacionadas con procesos de colisión entre placas (ejemplo de Alpes).

La quinta actividad ayuda a visualizar la incli-

nación magnética, y su utilidad para determinar el momento de la magnetización en rocas plegadas y las implicaciones que ello conlleva.

Todas las actividades se concretan en ejemplos reales relacionados con la paleogeografía Ibérica y Europea: la posición de la placa Ibérica en el pasado, la rotación de la placa Ibérica respecto a Europa estable ocurrida en el Cretácico, la rotación asociada a cinturones de pliegues y cabalgamientos en el Pirineo y en los Alpes y la remagnetización post-pliegue observada en las rocas del Cretácico superior y Triásico de la Zona Surpirenaica (Huesca).

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo logístico y las discusiones científicas del grupo de investigación consolidado de la Universidad de Zaragoza GEOTRANSFER y del proyecto y DR3AM (CGL2014-54118-C2) del MINECO.

## BIBLIOGRAFÍA

- Blumstein, A. M., Elmore, R.D., Engel, M. H., Elliot, C. y Basu, A. (2004). Paleomagnetic dating of burial diagenesis in Mississippian carbonates, Utah, *J. Geophys. Res.*, 109, B04101, doi:10.1029/2003JB002698.
- Butler, R. F. (1992). *Paleomagnetism. Magnetic domains to geologic terranes*. Blackwell Scientific Publications. 319 pp.
- Carey, S. W. (1955). The orocline concept in geotectonics-Part I. *Papers and proceedings of the Royal Society of Tasmania*, 89, 255-288.
- Çinku, M. C., Hisarli, Z. M., Orbay, N., Ustaömer, T., Hirt, A. M., Kravchenko, S., Rusakov, O. y Sayin, N. (2013). Evidence of Early Cretaceous remagnetization in the Crimean Peninsula: a palaeomagnetic study from Mesozoic rocks in the Crimean and Western Pontides, conjugate margins of the Western Black Sea. *Geophysical Journal International*, 195(2), 821-843.
- Domeier, M., Van der Voo, R. y Torsvik, T. H. (2012). Paleomagnetism and Pangea: the road to reconciliation. *Tectonophysics*, 514, 14-43.
- Eldredge, S., Bachtadse, V. y Van der Voo, R. (1985). Paleomagnetism and the orocline hypothesis. *Tectonophysics*, 119, 153-179.
- Elmore, R. D., Kelley, J., Evans, M. y Lewchuk, M. T. (2001). Remagnetization and orogenic fluids: testing the hypothesis in the central Appalachians. *Geophysical Journal International*, 144(3), 568-576.
- Evans, M. A., Elmore, R. D., y Lewchuk, M. T. (2000). Examining the relationship between remagnetization and orogenic fluids: central Appalachians. *Journal of Geochemical Exploration*, 69, 139-142.
- Garcés, M. y Beamud, E. (2016). La Magnetoestratigrafía y la Escala del Tiempo Geológico basada en las inversiones del campo magnético terrestre. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 24.3, 282-293.
- Gattacceca, J., Deino, A., Rizzo, R., Jones, D. S., Henry, B., Beaudoin, B. y Vadeboin, F. (2007). Miocene rotation of Sardinia: new paleomagnetic and geochronological constraints and geodynamic implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 258(3), 359-377.
- Hogan, P. J. y Burbank D.W. (1996). Evolution of the Jaca piggyback basin and emergence of the External Sierra,

southern Pyrenees. In: *Tertiary basins of Spain the stratigraphic record of crustal kinematics*, Friend, P.F., Dabrio, C.J. (eds). Cambridge University Press, 153-160.

Izquierdo-Llavall, E., Sainz, A. C., Oliva-Urcia, B., Burmester, R., Pueyo, E. L. y Housen, B. (2015). Multi-episodic remagnetization related to deformation in the Pyrenean Internal Sierras. *Geophysical Journal International*, 201(2), 891-914.

Jeleńska, M., Kądziałko-Hofmokl, M., Bakhmutov, V., Poliachenko, I. y Ziółkowski, P. (2015). Palaeomagnetic and rock magnetic study of Lower Devonian sediments from Podolia, SW Ukraine: remagnetization problems. *Geophysical Journal International*, 200(1), 557-573.

Koymans, M. R., Langereis, C. G., Pastor-Galán, D. y van Hinsbergen, D. J. (2016). Paleomagnetism.org: an online multi-platform open source environment for paleomagnetic data analysis. *Computers & Geosciences*, 93, 127-137.

Krijgsman, W. y Garces, M. (2004). Palaeomagnetic constraints on the geodynamic evolution of the Gibraltar Arc. *Terra Nova*, 16(5), 281-287.

Larrasoña, J.C. y Mochales, T. (2016). ¿Qué aporta el magnetismo en estudios paleoclimáticos y medioambientales?. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 24.3, 304-314.

Martínez-Peña, M.B. y Casas-Sainz, A.M. (2003). Cretaceous-Tertiary tectonic inversion at the Cotiella Nappe (Southern Pyrenees, Spain). *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)* 92, 99-113.

McCaig, A. M., y McClelland, E. (1992). Palaeomagnetic techniques applied to thrust belts. En: *Thrust tectonics*, 209-216. Springer Netherlands.

McElroy, R. (1990). *Thrust kinematics and syntectonic sedimentation: the Pyrenean frontal ramp, Huesca, Spain* (Doctoral dissertation, University of Cambridge), 175 pp.

Millán, H. Pocoví, A. y Casas, A. (1995). El frente de cabalgamiento surpirenaico en el extremo occidental de las Sierras Exteriores: sistemas imbricados y pliegues de despegue. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 8(1-2), 73-90.

Millán, H., Pueyo, E.L., Aurell, M., Luzón, A., Oliva, B., Martínez, M.B. y Pocoví, A. (2000). Actividad tectónica registrada en los depósitos terciarios del frente meridional del Pirineo central. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 13(2), 279-300.

Muttoni, G., Kent, D. V., Garzanti, E., Brack, P., Abrahamsen, N. y Gaetani, M. (2003). Early Permian pangea 'B' to late permian pangea 'A'. *Earth and Planetary Science Letters*, 215(3), 379-394.

Neres, M., Font, E., Miranda, J.M., Camps, P., Terrinha, P. y Mirão, J. (2012). Reconciling Cretaceous paleomagnetic and marine magnetic data for Iberia: New Iberian paleomagnetic poles. *J. Geophys. Res.*, 117, B06102, doi:10.1029/2011JB009067

Neres, M., Miranda, J. M. y Font, E. (2013). Testing Iberian kinematics at Jurassic-Cretaceous times. *Tectonics*, 32(5), 1312-1319.

Nichols, G. J. (1987). The structure and stratigraphy of the Western External Sierras of the Pyrenees, Northern Spain. *Geological Journal*, 22(3), 245-259.

Norris, D.K. y Black, R.F. (1961). Application of paleomagnetism to thrust mechanics. *Nature*, 192(4806), 933-935.

Oliva Urcia, B. (2004). *Geometría y cinemática rotacional en las Sierras Interiores y zona Axial (sector de Bielsa) a partir del análisis estructural y paleomagnético*. Tesis, Universidad de Zaragoza 290p.

[https://www.researchgate.net/profile/Belen\\_Oliva-Urcia/publications?pubType=thesis](https://www.researchgate.net/profile/Belen_Oliva-Urcia/publications?pubType=thesis)

Oliva-Urcia, B., Casas, A. M., Pueyo, E. L. y Pocoví, A. (2012). Structural and paleomagnetic evidence for non-rotational kinematics in the western termination of the External Sierras (southwestern central Pyrenees). *Geologica Acta*, 10 (2), 125-144. doi: 10.1344/105.000001704

Poulsen, C.J., Seidow, D., Narron, E.J. y Peterson, W.H. (1998). The impact of paleogeographic evolution on the surface oceanic circulation and the marine environment within the Mid-Cretaceous Tethys. *Paleoceanography*, 13 (5), 546-559. DOI: 10.1029/98PA01789View/

Pueyo, E.L. (2000). *Rotaciones paleomagnéticas en sistemas de pliegues y cabalgamientos. Tipos, causas, significado y aplicaciones (ejemplos del Pirineo Aragonés)*. Unpublished PhD thesis, Universidad de Zaragoza. 296 pp.

Pueyo, E.L., Parés, J.M., Millán, H. y Pocoví, A. (2003). Conical folds and apparent rotations in paleomagnetism (A case studied in the Southern Pyrenees). In: *Paleomagnetism applied to tectonics; a tribute to Rob Van der Voo*. Edited by: Mac Niocaill, C.; Torsvik, T. H.; van der Pluijm, B. A. *Tectonophysics*, 362 (1-4), 345 - 366.

Pueyo, E.L., Pocoví, A., Millán, H., y Sussman, A. (2004). Map-view models for correcting and calculating shortening estimates in rotated thrust fronts using paleomagnetic data. Special Publication on Orogenic Curvature: Integrating Paleomagnetic and Structural Analyses (Eds.: Weil, A. y Sussman, A.). *Geological Society of America*, 383, 57- 71.

Pueyo, E.L., Mauritsch, H. J., Gawlick, H. J., Scholger, R. y Frisch, W. (2007). New evidence for block and thrust sheet rotations in the Central Northern Calcareous Alps deduced from two pervasive remagnetization events. *Tectonics*, 26, TC5011-TC5036 doi:10.1029/2006TC001965.

Pueyo, E.L., Pocoví, A., Sánchez, E. y Oliva-Urcia, B. (2015). The Sto. Domingo Anticline; the westernmost termination of the South Pyrenean sole thrust. & The San Marzal pericline; the ending of the Southwestern Pyrenean sole thrust. En: *Atlas of Structural Geology* Ed. Soumyajit Mukherjee. Elsevier (Amsterdam, Netherlands) ISBN: 978-0-12-420152-1, pp. 132.

Ribeiro, P., Silva, P. F., Moita, P., Kratinova, Z., Marques, F. O. y Henry, B. (2013). Palaeomagnetism in the Sines massif (SW Iberia) revisited: evidences for Late Cretaceous hydrothermal alteration and associated partial remagnetization. *Geophysical Journal International*, 195(1), 176-191.

Scotese, C. R. (2004). A continental drift flipbook. *The Journal of Geology*, 112(6), 729-741.

Schmid, S. M., Aebli, H. R., Heller, F. y Zingg, A. (1989). The role of the Periadriatic Line in the tectonic evolution of the Alps. *Geological Society, London, Special Publications*, 45(1), 153-171.

Teixell, A. (1992). Estructura alpina en la transversal de la terminación occidental de la zona axial pirenaica. Tesis Doctoral, Univ. de Barcelona, 252 p.

Teixell, A. y García Sansegundo, J. (1995). Estructura del sector central de la Cuenca de Jaca (Pirineos meridionales). *Rev. Soc. Geol. España*, 8(3), 215-228.

Van der Voo, R. (1969). Paleomagnetic evidence for the rotation of the Iberia Peninsula. *Tectonophysics*, 7, 5-56.

Van der Voo, R. (1993). *Paleomagnetism of the Atlantic, Tethys and Iapetus ocean*. Cambridge University Press, 411p.

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

Villalain, J.J., Fernández, G., Casas, A. y Gil Imaz, A. (2003). Evidence of a Cretaceous remagnetization in the Cameros Basin (North Spain): implications for basin geometry. *Tectonophysics*, 377, 101-117

Vissers, R. L., van Hinsbergen, D. J., van der Meer, D. G. y Spakman, W. (2016). Cretaceous slab break-off in the Pyrenees: Iberian plate kinematics in paleomagnetic and mantle reference frames. *Gondwana Research*, 34, 49-59.

Ziegler, P. A. y Roure, F. (1999). *Petroleum systems of Alpine-Mediterranean foldbelts and basins*. Geological Society, London, Special Publications, 156(1), 517-540. ■

*Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 14 de julio y aceptado definitivamente para su publicación el 2 de septiembre de 2016.*