

Fábrica magnética (ASM) de diques andesíticos autunienses con enclaves corticales del sector de Maicas (Anticlinal de Montalbán, Cadena Ibérica Oriental)

Magnetic fabric (AMS) of autunian andesitic dykes with crustal xenoliths in the Maicas sector (Montalbán Anticline, Eastern Iberian Chain)

Andrés Gil, Marceliano Lago, Óscar Pueyo y Carlos Galé

Departamento de Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza. C/ Pedro Cerbuna 12, 50009, Zaragoza.

ABSTRACT

The Montalbán Anticline (Eastern Iberian Chain) represents a matchless framework of Autunian hypovolcanic calc-alkaline (dykes and sills) intrusions within the Iberian Chain. In the Maicas sector (NO of Montalbán Anticline) the dykes contain several types of metamorphic and granitic xenoliths from a deep origin. The xenoliths can be considered as passive markers and thus the dykes of this sector constitute very interesting bodies in order to determine both the flow regime characteristics and the related stress regime. The application of the anisotropy of the magnetic susceptibility technique (AMS) to one dyke of the Maicas sector, where a high content in metamorphic and granitic xenoliths occur, reveals a geometrical pattern of both the magnetic foliation and lineation within the dyke which is consistent with a turbulent flow regime linked to the xenoliths emplacement. The obliquity between the mean magnetic lineation and the dyke wall, strongly suggest an emplacement mode of the magma linked to an oblique extension regime which is consistent with the structural Autunian framework in the Iberian Chain.

Key words: Andesitic dykes, Autunian, Eastern Iberian Chain, Magnetic fabric

Geogaceta, 46 (2009), 31-34

ISSN: 0213683X

Introducción

El Anticlinal de Montalbán representa el afloramiento más suroriental de materiales paleozoicos de la Cadena Ibérica Oriental (Fig. 1A). Esta estructura, de orientación Ibérica (NW-SE), se caracteriza por un núcleo con un amplio afloramiento de materiales carboníferos y, en menor proporción de edad devónica, donde intruyen diques de afinidad calcoalcalina, siempre por debajo de la discordancia infra-triásica (Torres *et al.*, 1991).

La presencia de diques tardihercínicos es especialmente singular en el sector de Maicas (extremo NO del Anticlinal de Montalbán), tanto por la cantidad como por la abundancia de enclaves de origen profundo (Fig. 1B). Estos diques corresponden a la primera de las dos etapas de emplazamiento diferenciadas en la Cordillera Ibérica para las manifestaciones hipovolcánicas de edad Autuniense (Lago *et al.*, 2004). Petrologicamente los diques se caracterizan por una composición de andesitas anfibólicas y la presen-

cia de enclaves de naturaleza ígnea y metamórfica.

Desde un punto de vista cinemático, los enclaves representan marcadores pasivos de la modalidad del flujo ígneo. Es por este motivo que la reconstrucción de los rasgos de la petrofábrica del magma andesítico que los engloba resulte vital a la hora de interpretar el régimen de flujo y su modo de emplazamiento. La técnica de la anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM), dirigida al estudio de la fábrica magnética en intrusiones ígneas tabulares (sills y diques), ha demostrado ser una herramienta de gran utilidad para determinar no sólo direcciones de flujo (Ellwood, 1978; Cañón-Tapia *et al.*, 1996; Geoffroy *et al.*, 2002) sino, también, diferencias en el régimen de flujo ígneo (Féménias *et al.*, 2004, Poland *et al.*, 2004).

El dique estudiado representa un cuerpo tabular con una longitud aflorante de unos cincuenta metros, un espesor medio del orden de 8 metros y una orientación media N150°E, 90° (Fig. 2A). A lo largo del dique aparecen acumulaciones de enclaves

con tres tipos de composiciones: a) granitos y aplitas con un variable contenido de granate, b) metapelitas y c) cuarcitas. Presentan dimensiones variables (desde pocos centímetros a cuerpos con una dimensión máxima en torno a los 50 cm), siendo común un amplio grado de mezcla de los diversos litotipos (Fig. 2C y D). A lo largo del dique los enclaves de aplitas y granitoides son mayoritarios respecto a otras composiciones (esquistos y cuarcitas).

Los resultados del estudio detallado de la fábrica magnética del dique andesítico se emplean para la reconstrucción del patrón direccional del flujo ígneo. El patrón geométrico, revelado por la orientación de las direcciones principales de susceptibilidad a lo largo del dique, se emplea para inferir un modelo de emplazamiento del material ígneo consistente con los datos petro-estructurales característicos del marco tardihercínico.

La fábrica magnética

Para el estudio de la fábrica magnética se han utilizado un total de 65 puntos

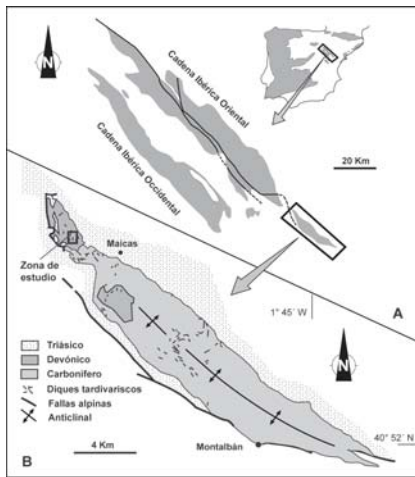


Fig. 1.- A) Situación del Anticlinal de Montalbán en el contexto de la Cordillera Ibérica. **B)** Esquema geológico simplificado del Anticlinal de Montalbán y localización del dique estudiado.

Fig. 1.- A) Location of the Montalbán Anticline within the Iberian Chain. B) Geological sketch of the Montalbán Anticline and location of the studied dyke.

de muestreo repartidos a lo largo de 13 transversales a través del dique (Fig. 2B), obteniendo un total de 274 especímenes. La medida de la ASM se realiza en un susceptómetro KLY3S (AGICO). El tensor de susceptibilidad magnética se obtiene a partir de la medida de la suscep-

tibilidad a lo largo de determinadas direcciones sobre los especímenes de roca (Jelinek, 1981).

Mineralogía magnética

Los valores promedio de la susceptibilidad media (K_m) para las distintas transversales, varían entre 203×10^{-6} [SI] (transversal MA7) y 337×10^{-6} [SI] (transversal MA3) con un valor medio de 272.6×10^{-6} [SI] para el conjunto del dique. En el gráfico de susceptibilidad media (K_m) frente al grado de anisotropía (P') (Fig. 3A) quedan definidos dos grupos de especímenes con valores promedio de K_m de 170 y 350×10^{-6} [SI] respectivamente. El grupo con valores más elevados corresponde a especímenes inalterados (con biotita y hornblenda primarias como fases mayoritarias), frente a los valores por debajo de 250×10^{-6} [SI] que representan especímenes con evidentes síntomas de alteración (presencia de clorita secundaria a partir de biotita). La medida de la variación de la susceptibilidad con la temperatura para especímenes alterados e inalterados con un equipo CS-02 (Agico) (Fig. 3D y E) muestra una contribución paramagnética (ajuste a una hipérbola de la curva de calentamiento para la variación de la susceptibilidad entre 25 y 200° C) en-

tre el 2 y 8%. Estos valores ponen de manifiesto la importante contribución ferromagnética a la susceptibilidad de las muestras. El brusco incremento de la susceptibilidad entre 400° y 600° C (figuras insertadas en la Fig. 3D, E), obtenido para las curvas de calentamiento, seguido de un descenso brusco hasta valores próximos a 0 (pico de susceptibilidad asociado al efecto Hopkinson), sugiere la presencia de magnetita cuya Temperatura de Curie (dependiente de la composición) es 580° C. El incremento de la susceptibilidad durante el enfriamiento sugiere la creación de magnetita en el horno posiblemente a partir de la destrucción de silicatos y micas de Fe (Fig. 3D, E).

Forma y orientación de los elipsoides magnéticos

En las fábricas analizadas destaca tanto su bajo grado de anisotropía magnética (con un valor medio de 1.007) como la elevada dispersión de la forma de los elipsoides magnéticos (Fig. 3A, B). La relación entre la susceptibilidad media (K_m) y la forma de los elipsoides magnéticos (T) indica que la variabilidad de formas de los elipsoides magnéticos es independiente del grado de alteración de los especímenes, observándose, en ambos casos, una proporción similar de elipsoides oblatos y prolatos (Fig. 3C).

El análisis direccional de la fábrica magnética se ha realizado con la ayuda de la proyección estereográfica de los ejes principales de susceptibilidad (K_{max} , K_{int} , K_{min}). Para cada punto de extracción se han obtenido los valores direccionales promedio de los ejes K_{max} (lineación magnética) y de los ejes K_{min} (polo del plano de foliación magnética) considerando una distribución unimodal Fisheriana, que han permitido reconstruir las trayectorias de la foliación y lineación magnética del dique (Fig. 4A). Con los datos direccionales globales, correspondientes a los ejes K_{max} y K_{min} , se han obtenido sendos estereogramas sintéticos (Fig. 4A). A pesar del bajo grado de anisotropía de los especímenes y la elevada variabilidad de formas de los elipsoides magnéticos, tanto en el caso de los ejes K_{max} como de los ejes K_{min} , se definen claros patrones direccionales anisótropos caracterizados por: a) una orientación del máximo de los ejes K_{min} compatible con el polo correspondiente a la superficie media del dique y b) una lineación magnética promedio (máximo de los ejes K_{max}) oblicua a la orientación media de dicha superficie.

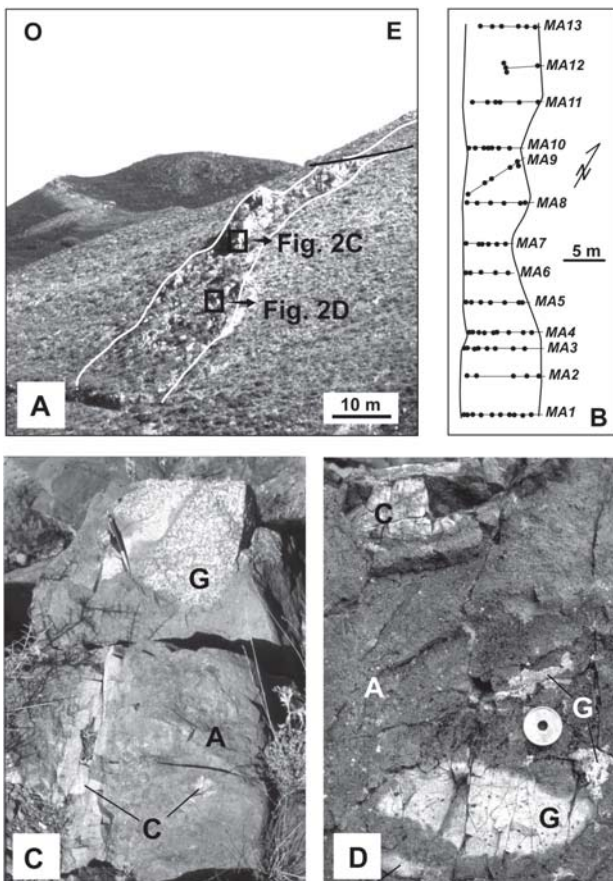
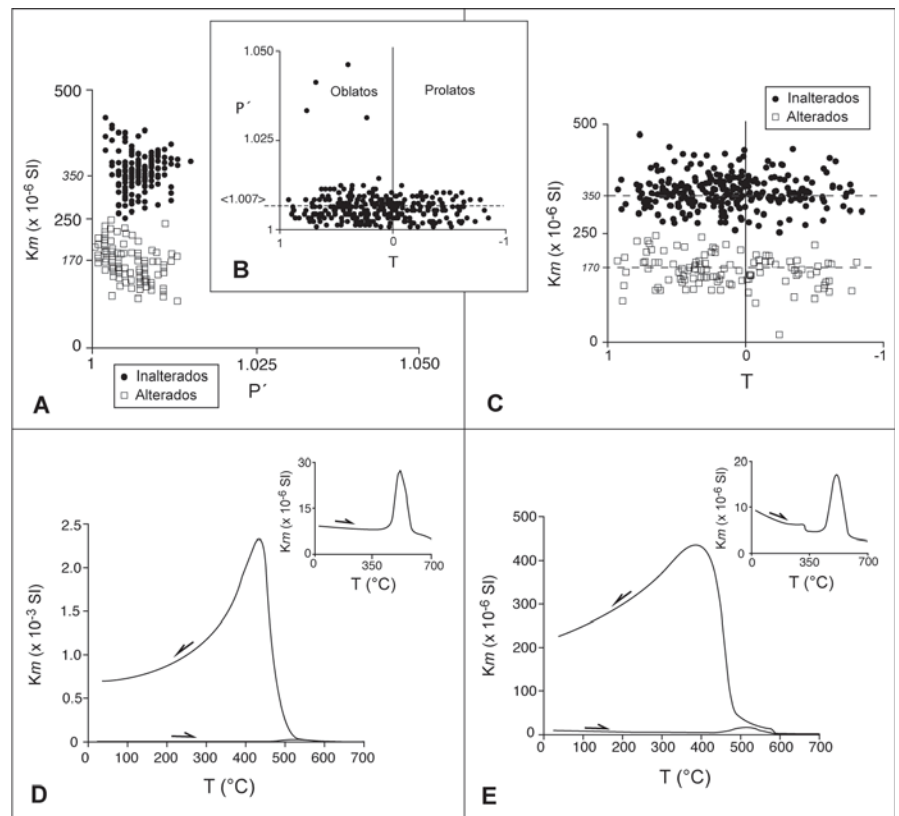


Fig. 2.- A) Aspecto de campo del dique estudiado. **B)** Esquema de los puntos de extracción de muestras para el estudio de la fábrica magnética **C)** y **D)** Ejemplos de enclaves de rocas metamórficas (cuarcitas: C) y graníticas (G).

Fig. 2.- A) Field aspect of the studied dyke. B) Location sketch for the sampling cores. C, D) Examples of metamorphic xenoliths within the later-Variscan andesitic dyke (cuarcitic: C and granitic: G).

Fig. 3.- A) Grado de anisotropía (P') frente a susceptibilidad media (K_m) de todos los especímenes analizados. B) Gráfico de anisotropía de todos los especímenes analizados. P' = Grado de anisotropía, T = Forma de los elipsoides magnéticos. C) Relación entre la susceptibilidad media (K_m) y la forma (T) de los elipsoides magnéticos (Jelinek, 1981), D,E) Curvas termomagnéticas (curvas K - T) representativas de especímenes alterados (D) e inalterados (E). Las figuras insertadas reflejan la evolución detallada de las curvas de calentamiento correspondientes a los especímenes alterados (D) e inalterados (E).

Fig. 3.- A) Anisotropy degree (P') against bulk susceptibility (K_m) of all the analyzed specimens. B) Anisotropy plot for all the analyzed specimens. P' : Anisotropy degree, T : Shape of the magnetic ellipsoids, C) Relationship between the mean susceptibility (K_m) and the shape (T) of the magnetic ellipsoids (Jelinek, 1981), D,E) Representatives K - T thermomagnetic curves (susceptibility versus temperature) for both the altered (D) and non-altered specimens (E). The insert plots reflect the detailed progression of the heating curves corresponding to both the altered and non-altered specimens.



Interpretación petro-estructural de la fábrica magnética

Independientemente del modelo que se emplee para describir la relación entre el movimiento de material ígneo de intrusiones tabulares y los ejes principales del elipsoide de la susceptibilidad magnética (dirección de flujo paralela a la dirección de la lineación magnética o inferida a partir de la disposición simétrica de las foliaciones magnéticas en las paredes del dique), la geometría del flujo ígneo (materializada a través de mapas de trayectorias de foliación y lineación magnética) está estrechamente condicionada por el régimen, laminar o turbulento, del propio flujo. Los mapas de la figura 4 representan cartografías de la foliación y lineación magnética obtenidos a partir de los datos direccionales en los distintos puntos de muestreo a lo largo del dique estudiado.

Foliación magnética

La foliación magnética sigue una disposición oblicua a las paredes del dique, no identificándose un patrón imbricado de las foliaciones magnéticas en relación a las paredes del dique, síntoma inequívoco del efecto friccional de las paredes durante el emplazamiento (Geoffroy *et al.*, 2002; Callot y Guichet, 2003). En varios puntos, la foliación magnética forma

un ángulo muy elevado con la pared (fundamentalmente en relación a la pared oriental) del dique. Una característica general es el trazado sinuoso de la foliación magnética a lo largo de la mayor parte del dique. Estas características geométricas apoyan la presencia de un régimen de flujo no laminar como responsable de la disposición de la foliación magnética a lo largo del dique. Independientemente del patrón irregular y curvo de la foliación magnética a lo largo del dique, el estereograma sintético de los ejes K_{min} (Fig. 4) pone de manifiesto un predominio de foliaciones magnéticas paralelas a la superficie media del dique. En detalle, se observan zonas donde $K3$ es polo de la pared media del dique y zonas de convergencia de las foliaciones que se corresponden con zonas de mayor densidad de enclaves.

En cuanto a los enclaves graníticos y metamórficos, su distribución en relación al patrón de la foliación magnética no es aleatorio (Fig. 4A). La zona de máxima concentración de enclaves se localiza en las proximidades de la zona de trayectorias de foliaciones convergentes. Desde un punto de vista cinemático tanto el patrón direccional de la foliación magnética como la distribución de los enclaves son compatibles con un esquema 3D caracterizado por un movimiento vertical y turbulento del magma (trayectorias convergentes) y un desplazamiento horizontal

que, unido a una pérdida de fuerza ascensional del magma, explica la acumulación de enclaves en sectores próximos al conducto (Fig. 4A). Otros dos sectores con enclaves aislados se corresponden con zonas de trayectorias complejas en planta.

Lineación magnética

La cartografía de la lineación magnética reproduce, en buena medida, el patrón mostrado por la foliación (Fig. 4). En este caso tampoco se observa un patrón uniforme de trayectorias. Las zonas de mayor complejidad se corresponden bien con las encontradas para la foliación; una zona de trayectorias divergentes asociada a una máxima acumulación de enclaves y zonas donde las trayectorias muestran desviaciones importantes relacionadas con presencia de enclaves aislados. Del mismo modo, la mayor oblicuidad entre la lineación y la pared del dique se observa en el lado oriental. La enorme variabilidad en las inclinaciones de la lineación magnética (entre 5° y 75°), sin un patrón de reparto claro, también apoya la idea de un régimen de flujo turbulento.

A pesar del patrón no lineal de la lineación magnética, el estereograma sintético de los ejes K_{max} (Fig. 4A) muestra un máximo bien definido de orientación $N40^\circ, 014^\circ$, oblicuo en relación a la dirección media del dique. Desde un punto

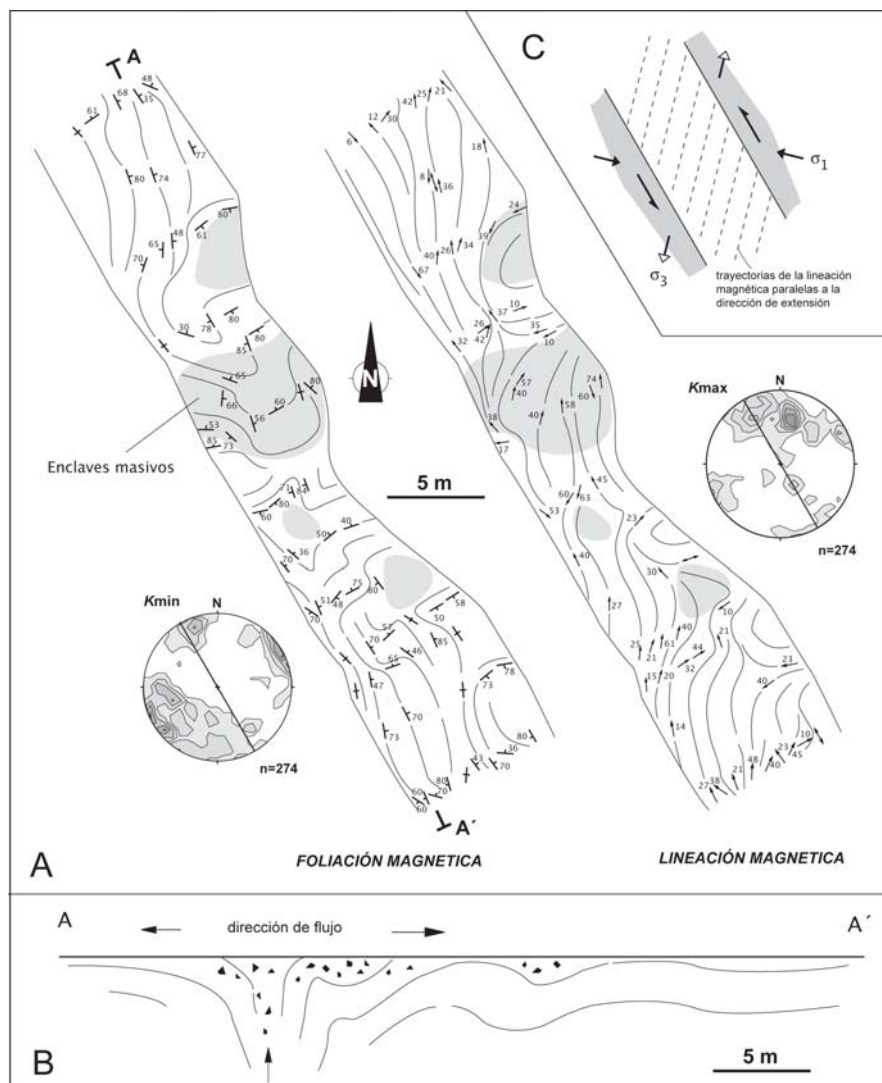


Fig. 4. A) Mapas de trayectorias de la foliación y lineación magnéticas y estereogramas (proyección equiareal, hemisferio inferior) sintéticos de la dirección de susceptibilidad mínima (K_{min}) y máxima (K_{max}). Intervalo de contorno = 1%. El círculo máximo en el estereograma representa la orientación media del dique. Las zonas con trama gris representan las zonas de acumulación preferente de enclaves. **B)** Corte sintético del dique. **C)** Esquema sintético de la relación entre la dirección de extensión (σ_3) y la lineación magnética en el dique estudiado. Explicación en el texto.

Fig. 4. A) Trajectory maps of both magnetic foliation and lineation and synthetic stereoplots (equal-area projection, lower hemisphere) of both the minimum (K_{min}) and maximum (K_{max}) susceptibility directions. Contour interval=1%. The great circle represents the mean orientation of the dyke wall. Gray areas correspond to sectors with preferred accumulation of xenolites. B) Synthetic cross-section of the studied dyke. C) Synthetic sketch showing the relationship between the extension direction (σ_3) and the magnetic lineation in the studied dyke. See text for explanation.

el ascenso y emplazamiento de material ígneo.

El cuerpo ígneo, de estructura tabular y proporciones decamétricas, engloba diversos tipos de enclaves metamórficos e ígneos de origen profundo que ponen de manifiesto el importante papel jugado por la etapa de fracturación tardihercínica en el emplazamiento de material subcortical.

El carácter turbulento del flujo ígneo es deducido a partir de los patrones de las trayectorias de la foliación y lineación magnética a lo largo de todo el dique. La ausencia de paralelismo entre la foliación magnética y las paredes del dique, la ausencia de un patrón imbricado de ésta en relación al efecto friccional de las paredes y el patrón general de las trayectorias de foliación y lineación magnética no pueden ser explicadas a través de un modelo de flujo uniforme.

La oblicuidad entre la orientación media de la lineación magnética y de las paredes del dique apoyan un emplazamiento durante un proceso de extensión oblicua de orientación NNE-SSO, compatible con el régimen transtensivo característico de la etapa de fracturación tardihercínica.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por una ayuda del Instituto de Estudios Turolenses (2006) y el grupo de investigación Geotransfer.

Referencias

Callot, J.P. y Guichet, X. (2003). *Tectonophysics*, 366, 207-222.
 Cañón-Tapia, E., Walker, G.P.L. y Herrero-Bervera, E. (1996). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 70, 21-36.
 Ellwood, B.B. (1978). *Earth and Planetary Science Letters*, 41, 254-264.
 Féménias, O., Diot, H., Berza, T., Gauffriau, A. y Demaiffe, D. (2004). *Journal of Structural Geology*, 26 (8), 1401-1418.
 Geoffroy, L., Callot, J.P., Aubourg, C. y Moreira, M. (2002). *Terra Nova*, 14, 183-190.
 Jelinek, V. (1981). *Tectonophysics*, 79, 63-67.
 Lago, M., Arranz, E., Pocoví, A., Galé, C. y Gil Imaz, A. (2004). En: *Permocarboniferous Magmatism and Rifting in Europe* (M. Wilson, E.R. Neuman, G.R. Davis, M.J. Timmerman, M. Heermans & B.T. Larsen, Eds.). Geological Society of London, Special Publications, 223, 465-490.
 Poland, M.P., Fink, J.H. y Tauxe, L. (2004). *Earth and Planetary Science Letters*, 219, 155-169.
 Torres, J.A., Lago, M., Pocoví, A. y Carls, P. (1991). *Teruel*, 82(1), 7-38.

de vista geométrico esta circunstancia está en desacuerdo con el modelo, frecuente, de imbricación asociado al efecto de arrastre provocado por las paredes del dique (Geoffroy et al., 2002). Sin embargo, la explicación de una lineación magnética oblicua a las paredes del dique encaja con un modelo genético de extensión oblicua de orientación NNE-SSO, simultánea al emplazamiento del magma. La extensión oblicua deducida es compatible con el carácter transtensivo de la fracturación tardihercínica en la Cordillera Ibérica a la

que se asocia el emplazamiento de las manifestaciones hipovolcánicas de edad Autuniense (Lago et al., 2004).

Conclusiones

El estudio de la fábrica magnética de un cuerpo andesítico de edad Autuniense en el sector NO del Anticlinal de Montalbán ha permitido establecer consideraciones cinemáticas sobre su modelo de emplazamiento: 1) tipo de régimen de flujo y 2) régimen tectónico que gobernó