



## COMPARACIÓN DE DOS MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE LA PALEOINTENSIDAD ABSOLUTA EN COLADAS MIOCENAS, PLEISTOCENAS E HISTÓRICAS DE LANZAROTE (ISLAS CANARIAS, ESPAÑA)

M. Calvo-Rathert<sup>1\*</sup>, J. Morales-Contreras<sup>2</sup>, A. Gogichaishvili<sup>2</sup>, A. Carrancho<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Física, EPS, Universidad de Burgos, 09006 Burgos, España

<sup>2</sup> UNAM, Instituto de Geofísica, Campus Morelia, LIMNA, Morelia, México

<sup>3</sup> Departamento de Ciencias Históricas y Geografía, Universidad de Burgos, 09001, Burgos, España

\* e-mail: [mcalvo@ubu.es](mailto:mcalvo@ubu.es)

### ABSTRACT

A paleomagnetic, rock-magnetic and paleointensity study has been carried out on 16 Miocene, Pleistocene and historical basaltic lava flows from Lanzarote (Canary Islands, Spain) with two main goals: (i) to compare paleointensity results obtained with two different techniques (Thellier-type and multispecimen) and (ii) to obtain new paleointensity data. Rock-magnetic experiments on selected samples from each site were carried out to find out the carriers of remanence and to determine their thermal stability and grain size. Paleomagnetic analysis generally showed a single component although in one site no consistent results could be obtained; so that a characteristic component could be determined in 15 flows, all displaying normal-polarity. Thellier-type paleointensity determinations were performed with the Coe (1967) method between room temperature and 581° C on small specimens. After heating, samples were left cooling down naturally during several hours. Multispecimen paleointensity determinations were carried out using the method of Dekkers and Böhnell (2006). A set of eight experiments was performed at a temperature of 450° C using laboratory fields from 10 to 80  $\mu$ T, with increments of 10  $\mu$ T. A very good agreement between results obtained with both methods was observed in five sites. However an extreme discrepancy was observed in two cases (LZ9 and TM1).

**Keywords:** Paleointensity, Thellier-type method, Multispecimen method, Rock magnetism, Canary Islands

### RESUMEN

Se ha realizado un estudio de paleomagnetismo, magnetismo de las rocas y paleointensidad en 16 coladas basálticas miocenas, pleistocenas e históricas de Lanzarote (Islas Canarias, España) con dos objetivos: (i) comparar resultados de paleointensidad obtenidos con dos técnicas diferentes (tipo Thellier y multiespécimen) y (ii) obtener nuevos datos paleointensidad. Se llevaron a cabo experimentos de magnetismo de las rocas en muestras seleccionadas de cada colada para determinar los portadores de la remanencia, su estabilidad térmica y su tamaño de grano. Los análisis paleomagnéticos generalmente mostraron la presencia de un solo componente, aunque en una colada no se obtuvieron resultados coherentes. Se determinó un componente característico en 15 coladas, en todos los casos de polaridad normal. Las determinaciones de paleointensidad de tipo Thellier se realizaron con el método de Coe (1967) en muestras pequeñas, entre temperatura ambiente y 581° C. Después de cada calentamiento, las muestras se dejaban enfriar de forma natural durante varias horas. Para las determinaciones de paleointensidad de tipo multiespécimen (Dekkers y Böhnell, 2006), se realizó un conjunto de 8 experimentos a 450° C, utilizando campos de laboratorio entre 10 y 80  $\mu$ T, con incrementos de 10  $\mu$ T. En cinco coladas se observó una muy buena concordancia entre los resultados obtenidos con ambos métodos, pero en dos (LZ9 y TM1) se apreció una gran discrepancia.

**Palabras Clave:** Paleointensidad, Método tipo Thellier, Método multiespécimen, Magnetismo de rocas, Islas Canarias



## 1. Introducción

El estudio de la magnetización remanente de las rocas puede proporcionar información directa sobre la variación de la dirección del campo magnético terrestre (CMT) con el tiempo. El paralelismo entre ambos vectores hace olvidar con frecuencia que se trata de magnitudes físicas distintas y que la magnetización registrada en las rocas únicamente permite deducir la dirección del CMT en el momento de formación de las mismas. Por ello, la puesta en práctica de las determinaciones de la paleointensidad absoluta del CMT reviste una dificultad mucho mayor que la obtención de datos de su dirección (*e.g.*, Yu *et al.*, 2004). Los métodos de determinación de la paleointensidad que cuentan con un fundamento físico más riguroso son los basados en el método original de Thellier (Thellier, 1937; Thellier y Thellier, 1959), en los cuales la intensidad del campo magnético imanador original  $B_a$  se obtiene en el laboratorio a partir de experimentos de remagnetización térmica en un campo aplicado en el laboratorio.

Con frecuencia un amplio porcentaje de las muestras estudiadas no proporciona resultados fiables. Por añadidura, la dispersión de los resultados es muy superior a la que se observa en las determinaciones direccionales obtenidas en experimentos paleomagnéticos. En los últimos años han comenzado a aplicarse nuevas técnicas que tratan de soslayar o minimizar problemas relacionados con la ocurrencia de alteraciones durante los experimentos o la presencia de granos multidominio. Entre ellos, el método multiespécimen (Dekkers y Böhnell, 2006) presenta una estrategia útil para reducir el número de calentamientos al que se somete a las muestras. Según Dekkers y Böhnell (2006), el método puede proporcionar resultados correctos también en el caso de granos multidominio.

Para el presente estudio se diseñó un experimento de paleointensidad con dos objetivos: (i) La realización de un experimento metodológico que pretende comparar las determinaciones de la paleointensidad absoluta que se obtengan mediante la aplicación del método de multiespécimen (Dekkers y Böhnell, 2006) con las procedentes de la aplicación del método clásico de Coe (Coe, 1967) y (ii) La obtención de nuevos datos de paleointensidad absoluta correspondientes con una latitud baja (29°N). Por otra parte, la comparación de los resultados obtenidos permitiría reforzar la fiabilidad de aquellas determinaciones que habiendo sido realizadas con métodos diferentes ofrezcan resultados compatibles en las mismas muestras o unidades.

## 2. Contexto geológico y muestreo

Lanzarote es la isla más oriental de las Islas Canarias, un archipiélago de origen volcánico situado en el Atlántico central, entre 100 y 700 km al oeste de la costa africana (Fig. 1). Durante los últimos 20 Ma ha tenido lugar en la isla una actividad volcánica subaérea. En concreto, se han identificado dos ciclos diferenciados en relación con esta actividad (Coello *et al.*, 1992): un ciclo preferentemente mioceno, caracterizado por volcanes escudo y secuencias de lavas tabulares y un ciclo del Plioceno y Cuaternario, caracterizado por grupos dispersos de pequeños volcanes y campos de lavas asociados en toda la isla. En el presente trabajo, todas las coladas estudiadas excepto una (LZ11) pertenecen al segundo grupo.

Se tomaron muestras de 16 coladas de edad miocena, pleistocena e histórica (Fig. 1), empleando una taladradora portátil a gasolina. En cada colada se muestrearon entre 8 y 13 testigos, utilizándose para su orientación brújula magnética y brújula solar. De las 16 coladas muestreadas, 5 corresponden con erupciones históricas, que tuvieron lugar entre 1732 y 1736 y una corresponde con la erupción de 1824 (Tabla 1).

## 3. Método experimental

Con el fin de identificar los minerales portadores de la magnetización remanente en cada una de las coladas y obtener información acerca de su estabilidad térmica y su tamaño de grano, se diseñaron los siguientes experimentos de magnetismo de las rocas: medida de curvas termo-magnéticas (magnetización en función de la temperatura), determinación de los parámetros de la curva de histéresis y adquisición de magnetización remanente isotérmica (IRM). Estos experimentos preliminares se realizaron con una balanza de traslación



**Figura 1.** Lugares de muestreo en la isla de Lanzarote. Adaptado de *Google Earth*.

MMVTB en muestras representativas de las diferentes coladas de la secuencia. Todos los experimentos se llevaron a cabo con muestras pulverizadas y en aire.

Para los experimentos de paleomagnetismo la magnetización remanente se midió con un magnetómetro criogénico, la desmagnetización térmica se llevó a cabo con un horno Schonstedt TSD-1 y para la desmagnetización por campos alternos se empleó un sistema desmagnetizador incorporado al magnetómetro criogénico. Las direcciones de la magnetización remanente se determinaron en todos los casos mediante análisis de componentes principales (Kirschvink, 1980).

Los experimentos de paleointensidad se llevaron a cabo con dos métodos de determinación diferentes: El método de Coe (1967) y el método de multiespecímenes (Dekkers y Böhnell, 2006). Con el fin de poder comparar los resultados obtenidos con ambos métodos en exactamente las mismas muestras, éstas se dividieron en especímenes de menor tamaño, contándose de este modo con un espécimen para las determinaciones de paleointensidad de tipo Thellier, otro para el experimento de multiespecímenes y otro para nuevos experimentos de magnetismo de rocas. Se extrajo un cilindro de 0.9 cm de diámetro (1 a 2.5 cm de longitud) de una muestra estándar para las determinaciones mediante el método de Coe. El anillo de roca sobrante se destinó a las determinaciones multiespecímen. Un pequeño resto del material sirvió para experimentos de magnetismo de las rocas, de forma que se pudo contar con curvas termomagnéticas para todas las muestras sometidas a experimentos de determinación de la paleointensidad absoluta.

Para las determinaciones de la paleointensidad absoluta mediante el método de Coe (1967), el experimento se desarrolló en 12 etapas de temperatura entre temperatura ambiente y 581° C. Después de cada calentamiento, las muestras se dejaban enfriar naturalmente durante varias horas hasta llegar a temperatura ambiente. A partir de 215° C se realizaron controles de *pTRM* (*pTRM-checks*) en cada etapa de calentamiento. Todos los calentamientos se llevaron a cabo en atmósfera de argón. Para las determinaciones de la paleointensidad absoluta mediante el método de multiespecímenes (Dekkers y Böhnell, 2006), los mencionados anillos obtenidos de las muestras estándar volvieron a subdividirse en 8 sub-especímenes que se introdujeron mediante una prensa en pastillas de sal con forma de muestra estándar. Se llevaron a cabo 8 experimentos a 450° C en campos de laboratorio entre 10 a 80  $\mu\text{T}$ , con incrementos de 10  $\mu\text{T}$  y las muestras se orientaron de forma que la magnetización remanente natural (NRM) de cada una de ellas fuera paralela al campo aplicado (dirección axial de la cámara del horno).



**Tabla 1.** Resultados de paleointensidad obtenidos con el método de Coe (1967) y de multiespécimen (Dekkers y Böhnell, 2006). *N*: Número de especímenes empleados para las determinaciones. *D.F.*: Determinación fallida. La intensidad se expresa en microteslas

SITIO	TIPO THELLIER		MULTIESPÉCIMEN	
	N	INTENSIDAD	N	INTENSIDAD
LZ1	6	46.9 ±3.1	6	35.0
LZ3	6	46.6 ±5.4	6	45.2
LZ4	6	29.7 ±5.0	4	46.2
LZ5	1	23.5 ±0.5	6	24.2
LZ6		D.F.		D.F.
LZ7	3	26.4 ±1.3	5	32.5
LZ9	4	40.5 ±4.8	7	14.5
LZ10	4	28.3 ±3.4	7	22.4
LZ12	2	21.4 ±3.4	7	32.7
TM1	3	38.9 ±0.7	7	89.4
TM2	5	41.6 ±5.0	7	31.7
TM3	5	42.1 ±3.8	7	41.4
TM4	4	37.7 ±5.5	7	43.1

#### 4. Resultados

Los experimentos de magnetismo de las rocas llevados a cabo en muestras representativas de todas las coladas proporcionaron los resultados que se describen a continuación. El análisis de las curvas termomagnéticas permitió distinguir tres tipos de curvas: las más comunes, de carácter reversible se caracterizaban por la presencia de una única fase, titanomagnetita pobre en titanio. Se observaron también curvas reversibles o cuasi-reversibles, pero asociadas con la presencia de una única fase de temperatura de Curie baja o intermedia, principalmente en las lavas históricas. Sin embargo, otras coladas aparecen caracterizadas por curvas termomagnéticas irreversibles, con presencia de magnetita junto con otras fases de temperatura de Curie baja o intermedia. Las medidas de la IRM apuntan en todos los casos, a minerales de baja coercitividad como principales portadores de la remanencia. El análisis de los parámetros de la curva de histéresis muestra un predominio de granos con estructura pseudo- monodominio, lo que también puede ser interpretado en términos de mezcla de granos monodominio y multidominio (Dunlop, 2002), con una presencia relativa de estos últimos de aproximadamente el 50%.

Los análisis paleomagnéticos mediante desmagnetización térmica y por campos alternos permitieron reconocer que en 11 de las 16 coladas estudiadas solo se aprecia una componente paleomagnética, acompañada en algunos casos de una débil componente viscosa. En otras cuatro coladas se observa una segunda componente de más importancia, aunque solamente en dos de ellas, ambas componentes se superponen parcialmente. La colada LZ11, de edad miocena, no proporcionó resultados coherentes. Se pudo aislar una componente característica en 15 de las 16 coladas, siendo ésta en todos los casos de polaridad normal.

Para las determinaciones de paleointensidad se utilizó el programa ThellierTool 4.0 (Leonhardt *et al.*, 2004). En un primer análisis se aceptaron todas las determinaciones que satisficieran los requisitos relacionados a



continuación: (i) el número de puntos alineados en el diagrama normalizado NRM-TRM (diagrama de Arai) debía ser igual o mayor que 4; (ii) los parámetros de fracción  $f$  y de calidad  $q$  (Coe *et al.*, 1978) debían ser mayores que 0.35 y 2, respectivamente; (iii) el parámetro DRAT, propuesto por Selkin y Tauxe (2000) para cuantificar los controles de pTRM debía ser  $\leq 7^\circ$ ; (iv) no se debían tener en cuenta las determinaciones de paleointensidad obtenidas de diagramas NRM-TRM claramente cóncavos; (v) las direcciones de la NRM en cada etapa debían trazar una línea recta hacia el origen en el intervalo de temperaturas elegido para la determinación de la paleointensidad, con  $MAD < 7^\circ$ . En 46 de las 83 muestras analizadas se cumplieron estos criterios. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 1. En la mayor parte de los casos los resultados fallidos se debieron a la presencia de granos multidominio, puesta de manifiesto por la forma cóncava de los diagramas de Arai. Los experimentos de paleointensidad mediante el método de multiespecímenes se llevaron a cabo en 71 muestras pertenecientes a 11 coladas. Para las determinaciones se calcularon las diferencias relativas entre las pTRM (adquiridas en el laboratorio) y las NRM de los especímenes y se representaron los resultados correspondientes para las diferentes coladas. Se llevó a cabo un ajuste por mínimos cuadrados con los datos obtenidos para cada colada y se calcularon los valores de la paleointensidad absoluta a partir de la intersección de la recta de ajuste con la horizontal correspondiente a una diferencia relativa nula entre NRM destruida y pTRM adquirida. Se obtuvieron determinaciones satisfactorias en 10 coladas.

La Tabla 1 muestra los resultados obtenidos con ambos métodos. Se observa una muy buena coincidencia en cinco coladas, pero una discrepancia extrema en otras dos (LZ9 y TM1). Los trabajos de interpretación y explicación de estos resultados aún se hallan en curso. Se intentará relacionar las propiedades magnéticas de los minerales portadores de la remanencia con la respuesta de las muestras a ambas técnicas de determinación.

### Agradecimientos

Este trabajo se financió con el proyecto CGL2012-32149 (*Ministerio de Economía y Competitividad, España*) y el *Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER)*.

### Referencias

- Coe, R. S., 1967. Paleointensities of the Earth's magnetic field determined from Tertiary and Quaternary rocks. *J. Geophys. Res.*, 72, 3247-3262.
- Coe, R., Grommé, S., Mankinen, E. A., 1978. Geomagnetic paleointensities from radiocarbon-dated lava flows on Hawaii and the question of the Pacific non dipole low. *J. Geophys. Res.*, 83, 1740-1756.
- Coello, J., Cantagrel, J. M., Hernan, F., Fuster, J. M., Ibarrola, E., Ancochea, E., Casquet, C., Jamond, C., Díaz de Tern, J. R., Cendrero, A., 1992. Evolution of the Eastern volcanic ridge of Canary Islands based on new K-Ar data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 53, 251-274
- Dunlop, D., 2002. Theory and application of the Day plot (Mrs/Ms versus Hcr/Hc). Theoretical curves and tests using titanomagnetite data. *J. Geophys. Res.*, Vol. 107, No.B3, doi: 10.1029/2001JB000486.
- Dekkers, M. J., Böhnell, H. N. (2006). Reliable absolute palaeointensities independent of magnetic domain state. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 284, 508-517.
- Kirschvink, J. L., 1980. The least-square line and plane and the analysis of paleomagnetic data. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 62, 699-718.
- Leonhardt, R., Heunemann, C., Krasa, D., 2004. Analyzing absolute paleointensity determinations: Acceptance criteria and the software ThellierTool4.0., *Geochem., Geophys., Geosyst.*, 5, Q12016, doi: 10.1029/2004GC000807
- Thellier, E., 1937. Aimantation des terres cuites; application à la recherche de l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 204, 184-186.
- Thellier, E., Thellier, O., 1959. Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique. *Ann. Geophys.*, 15, 285-376.
- Yu, Y. J., Tauxe, L., Genevey, A., 2004. Toward an optimal geomagnetic field intensity determination technique. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 5, Art. No. Q02H07 Feb 26.