

Densidad, susceptibilidad magnética y magnetización remanente de rocas del antifforme de Monesterio (zona de Ossa-Morena, SO de España)

J.L. García-Lobón⁽¹⁾, C. Rey-Moral⁽¹⁾, M. Arias-Llorente⁽¹⁾, L.A. Cueto-Pascual⁽¹⁾ y M. Gómez-Paccard⁽²⁾

(1) Instituto Geológico y Minero de España. Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid
E-mails: jl.garcia@igme.es - c.rey@igme.es

(2) Laboratorio de Paleomagnetismo, Facultad de CC. Físicas. Universidad Complutense de Madrid
E-mail: miriamgp@fis.ucm.es

RESUMEN

La interpretación geológica de una serie de trabajos de geofísica aeroportada, magnéticos y radiométricos, y de gravimetría terrestre disponibles en el antifforme de Monesterio, ha requerido una campaña de petrofísica en la que se han determinado 655 densidades y susceptibilidades magnéticas, y 126 magnetizaciones remanentes. Se han caracterizado así las rocas de alta densidad (espilitas, anfíbolitas, gabros y ultrabásicas), las de baja densidad (metasedimentarias, volcánicas ácidas y granitoides); los marcadores magnéticos de la región (espilitas, queratófidos, porfiróides, serpentinitas, algunos gabros y granitos albiticos), y las rocas paramagnéticas (metasedimentarias y graníticas). La inducción domina sobre la remanencia, en general viscosa, consecuencia de que el principal mineral ferromagnético es la magnetita multidominio. Algunas volcánicas, y los gabros con tendencias de exolución de ilmenita-magnetita, son las rocas de mayor magnetización remanente entre las estudiadas.

El reflejo de todas estas propiedades petrofísicas en los mapas magnético y gravimétrico hace que el sector central del antifforme de Monesterio se configure, desde el punto de vista estructural, como una región con tres características muy destacadas, a saber: 1) su perfecta delimitación por ejes mayores de anomalías de campo potencial, que delimitan la división en dominios estructurales de la zona centro-sur de Ossa-Morena, 2) sus depocentros precámbricos y cámbricos con características de densidad y susceptibilidad muy contrastadas, y, 3) sus abundantes y espectaculares anomalías de campo potencial (incluso claramente observables a escala peninsular), causadas por un ubicuo magmatismo de amplio espectro litológico.

Los resultados presentados en este trabajo constituyen un importante elemento de referencia para la optimización de la interpretación geológico-estructural, cualitativa y cuantitativa, de campañas de geofísica aeroportada de alta resolución y gravimetría terrestre en el antifforme de Monesterio. Debe destacarse la calidad del registro petrofísico de rocas ígneas, de manera que la modelización bi y tridimensional de campo potencial de complejos plutónicos constituye una aplicación inmediata de los datos de petrofísica presentados aquí.

Palabras clave: antifforme de Monesterio, densidad, magnetización remanente, petrofísica, susceptibilidad magnética

Density, magnetic susceptibility and remnant magnetization of rock samples from the Monesterio antiform (Ossa-Morena zone, SW Spain)

ABSTRACT

The geological interpretation of ground gravity and magnetic and radiometric airborne geophysical surveys, such as those available in the Monesterio antiform, requires petrophysical data of the rocks involved. In this work, 655 densities and magnetic susceptibilities, and 126 remnant magnetizations have been measured. We can distinguish heavy rocks (spilites, amphibolites, gabbroic and ultrabasic suites), light rocks (metasedimentary ones, acid volcanics and granitoids); the magnetic markers of the area (spilites, queratophyres, serpentinites, some gabbros and albitic granites), and finally, the paramagnetic set (metasedimentary and granitic rocks). Induction dominates remanence, which is only important in some volcanites and the gabbroic rocks. Multidomain magnetite is the main ferromagnetic mineral.

According to the measured petrophysical contrasts, the regional magnetic and gravimetric maps of the Monesterio antiform show three remarkable characteristics: 1) a set of very well defined potential field trends which delineate the main structural domains of the antiform, 2) the contrasting differences of densities and magnetic susceptibilities between the precambrian and the cambrian basins, and, 3) the great number of intense anomalies caused by a varied magmatism widely spread over the antiform. These anomalies are clearly displayed even at a peninsular scale.

The petrophysical data presented here will contribute to optimize any structural interpretation of the high-resolution surveys available in

the Monesterio Antiform. Of particular interest are the data concerning the igneous rocks; their potential field modelling is a straight application of the results provided here.

Key words: density, magnetic susceptibility, magnetization, Monesterio antiform, petrophysics

Introducción y objetivos

La interpretación geológica de campañas de geofísica aeroportada, magnéticas y radiométricas, y de gravimetría terrestre, requiere estudios petrofísicos y de petrología integrados en bases de datos apropiadas con información geológica y geoquímica (Clark, 1997, Dickson y Scott, 1997). Existen un cierto número de este tipo de trabajos en el Antiforme de Monesterio, que es una de las estructuras fundamentales de Zona de Ossa-Morena, ZOM: vuelos magnéticos y radiométricos a 120 m de altura en líneas separadas 1 km realizados por ENUSA entre 1981-82 en toda la ZOM para la prospección de minerales radiactivos (García Lobón y Granda Sanz, 1993); vuelo de alta resolución realizado por el IGME en 1997 para la prospección geológico-minera del borde SO de la ZOM (y de la Faja Piritica; Bates y García Lobón, 1998), con datos registrados a 100 m de altura en líneas separadas 250 m; gravimetrías regionales del IGN y ENRESA, gravimetría con una densidad de un punto por km², adquirida por el IGME durante el pasado año 2002.

Todos estos trabajos justifican sobradamente que se haya abordado el estudio petrofísico, de determinación de densidades y susceptibilidades magnéticas (acompañada con datos adicionales de remanencia) sobre muestras de roca, y medición in situ de radiación gamma natural con espectrómetro de mano, de las rocas del sector central del Antiforme de Monesterio, cuyos resultados se van a describir aquí. Estos resultados contribuirán a alcanzar el objetivo de la optimización de la interpretación geológico-estructural de campañas de geofísica aeroportada de alta resolución y gravimetría terrestre en el Antiforme citado.

En la descripción que sigue se va a trabajar con la síntesis geológica de unidades litoestratigráficas y cuerpos intrusivos que aparecen etiquetadas y en color de la Fig. 1, en la que se representa la cartografía Magna de la faja de sucesiones proterozoicas (Serie Negra) y flancos cámbricos (litosomas terrígenos y carbonatado) que constituyen la estructura del Antiforme. Esta síntesis se basa en la correlación de las unidades litoestratigráficas definidas en las hojas Magna involucradas (hojas nº 853, Muelas Peña *et al.*, 1975; nº 875, Coullault *et al.*, 1975; nº 876, Garrote Ruiz

et al., 1983; nº 896, Apalategui *et al.*, 1983; nº 897, Eguiluz *et al.*, 1983; nº 898, Apalategui *et al.*, 1990; nº 918 Apalategui *et al.*, 1980; y nº 919, García Monzón *et al.*, 1974), correlación para la que se ha tenido en cuenta las firmas magnéticas y radiométricas de las unidades estudiadas.

Obtención de datos

Durante los años 2000-2001 se efectuó un muestreo general de la zona de estudio, es decir, del ámbito del vuelo de 1997 en el Antiforme de Monesterio (en la figura 1 se indica su perímetro, que abarca las hojas 853, 875, 876, 896, 897, 898, 918 y 919), más algunas intrusiones como las de Olivenza y Táliga-Barcarrota, en las hojas 827 y 852, fuera del mismo, hasta un total de 655 ejemplares en un área aproximada de unos 3000 km² equivalentes a 6 hojas 1/50.000.

A partir de unos 5 kg de roca recogidos en campo, en el laboratorio se determina la densidad aparente según el principio de Arquímedes. Se obtiene polvo para la medición de la susceptibilidad (1 kg a 2 mm) y se corta un prisma de una pulgada para la medición de la magnetización remanente en roca no orientada. Susceptibilidades e imanaciones se miden en el laboratorio de paleomagnetismo de la Facultad de CC. Físicas de la Universidad Complutense de Madrid (UCM).

Una cuestión importante para la agrupación, presentación y análisis de resultados de un parámetro típicamente polimodal como la susceptibilidad mediante histogramas, mapas de posición y diagramas bivariantes, es la adopción de los límites del paramagnetismo y distintos umbrales de ferromagnetismo a los que referir los estadísticos generales. Aunque es posible utilizar distintos umbrales para rocas ligeras y pesadas, en este trabajo, en aras de simplificar categorías en un área con fuerte presencia de magnetita, las vamos a agrupar en los siguientes niveles: 1) $k < 250 \cdot 10^{-6}$ ucgs, fracción paramagnética (% $\text{Fe}_3\text{O}_4 < 0.1$); 2) $250 < k < 750 \cdot 10^{-6}$ ucgs, fracción débilmente ferromagnética ($0.1 < \% \text{Fe}_3\text{O}_4 < 0.3$); 3) $750 < k < 2500 \cdot 10^{-6}$ ucgs, fracción moderadamente ferromagnética ($0.3 < \% \text{Fe}_3\text{O}_4 < 1$); 4) $2500 < k < 7500 \cdot 10^{-6}$ ucgs, fracción ferromagnética ($1 < \% \text{Fe}_3\text{O}_4 < 3$); 5)

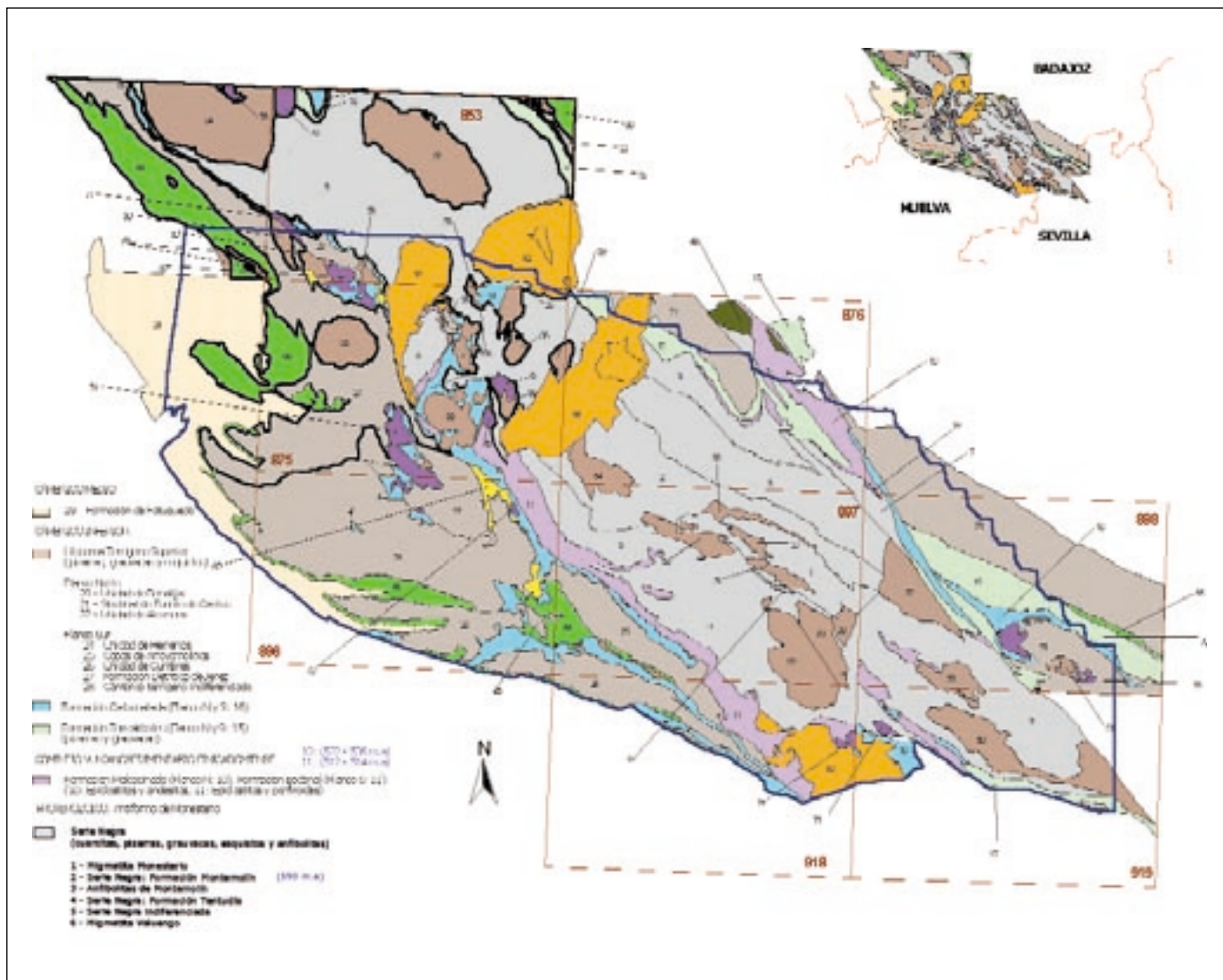


Fig. 1. Síntesis MAGNA del antifforme de Monesterio
 Fig. 1. Geological synthesis. Monesterio antiform

$k > 7500 \cdot 10^{-6}$ ucgs, fracción muy ferromagnética (% $\text{Fe}_3\text{O}_4 > 3$). A estos rangos referiremos medias (que denominaremos kmp, kmf1, kmf2, kmf3 y kmf4) y número de datos (en las tablas 1 y 4 figuran éstos entre paréntesis), y serán usados en los códigos de color de los mapas de posición de muestras (Fig. 2). Estos niveles corresponden, groseramente, a los necesarios para producir anomalías magnéticas del orden de varias nT, pocas decenas de nT, muchas decenas de nT, algún centenar de nT, y muchos centenares, incluso millares de nT, anomalías todas ellas existentes en los mapas aeromagnéticos de la región que estamos estudiando. En densidades se han usado también 5 niveles para la figura de posición (Fig. 3).

Recogida de muestras. Unidades representadas

La nomenclatura de cada uno de los tipos de rocas se ajusta a la usada en la cartografía MAGNA 1/50.000, verificada por examen de visu, y estudio mediante lámina delgada (296 láminas, más 146 probetas pulidas entre las 296 anteriores).

De las unidades meta y volcano-sedimentarias se ha procurado obtener al menos una docena de muestras, aunque esto no ha sido siempre posible:

- Se considera suficientemente muestreado el núcleo proterozoico del antifforme de Monesterio en las hojas 876 y 897 (126 datos): rocas metasedimentarias de la Serie Negra 2 y 4, anfibolitas 3 (códigos según figura 1, y en tablas 2 y 4 en el caso

de rocas intrusivas), rocas de anatexis asociadas (migmatitas 1, leucogranitos 30 y granodioritas precámbricas de Monesterio 31 y Pallares 32), intrusiones como Hoya de Santa María 33, y Táliga 34; y quizás la Serie Negra Indiferenciada 5 en las hojas 875 y 876, pero no la Serie Negra de la hoja 898. De las serpentinitas de Calzadilla (40) se dispone de muestras suficientes como para afirmar su carácter petrofísico. En total, del núcleo proterozoico del antiforme de Monesterio se han adquirido 126 datos de rocas sedimentarias y metamórficas.

- También están bien representadas las extensas formaciones volcano-sedimentarias finicado-

mienses (Malcocinado 10, Bodonal 11; 56 muestras) y del Cámbrico Inferior, espilitas y queratófidos (66, 65; 70 muestras), que flanquean el Antiforme, y que son todas ellas marcadores magnéticos importantes a escala de toda la ZOM.

- Ocurre lo mismo con el litosoma carbonatado y terrígeno del Cámbrico Inferior en el flanco SO del antiforme, Fm. Carbonatada 16 y unidades 25, 26 y 27, especialmente estas dos últimas (Unidades de Cumbres y Detrítica de Jerez, Fig. 1, 36 y 54 muestras respectivamente), formaciones que son muy extensas (al menos del orden de 1/2 hoja 1:50.000 cada una) y que exhiben abundantes anomalías de campo potencial. En el flanco NE está

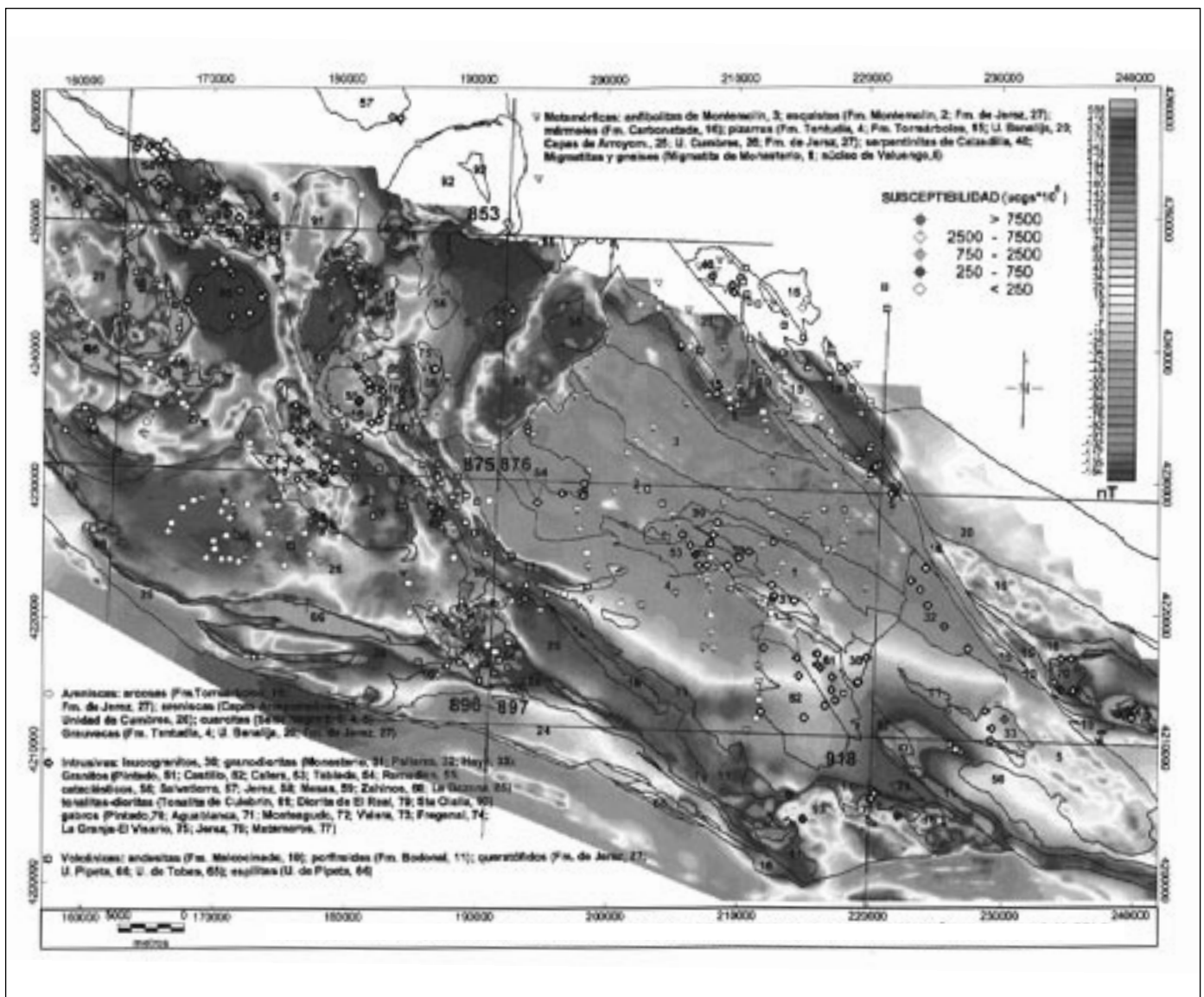


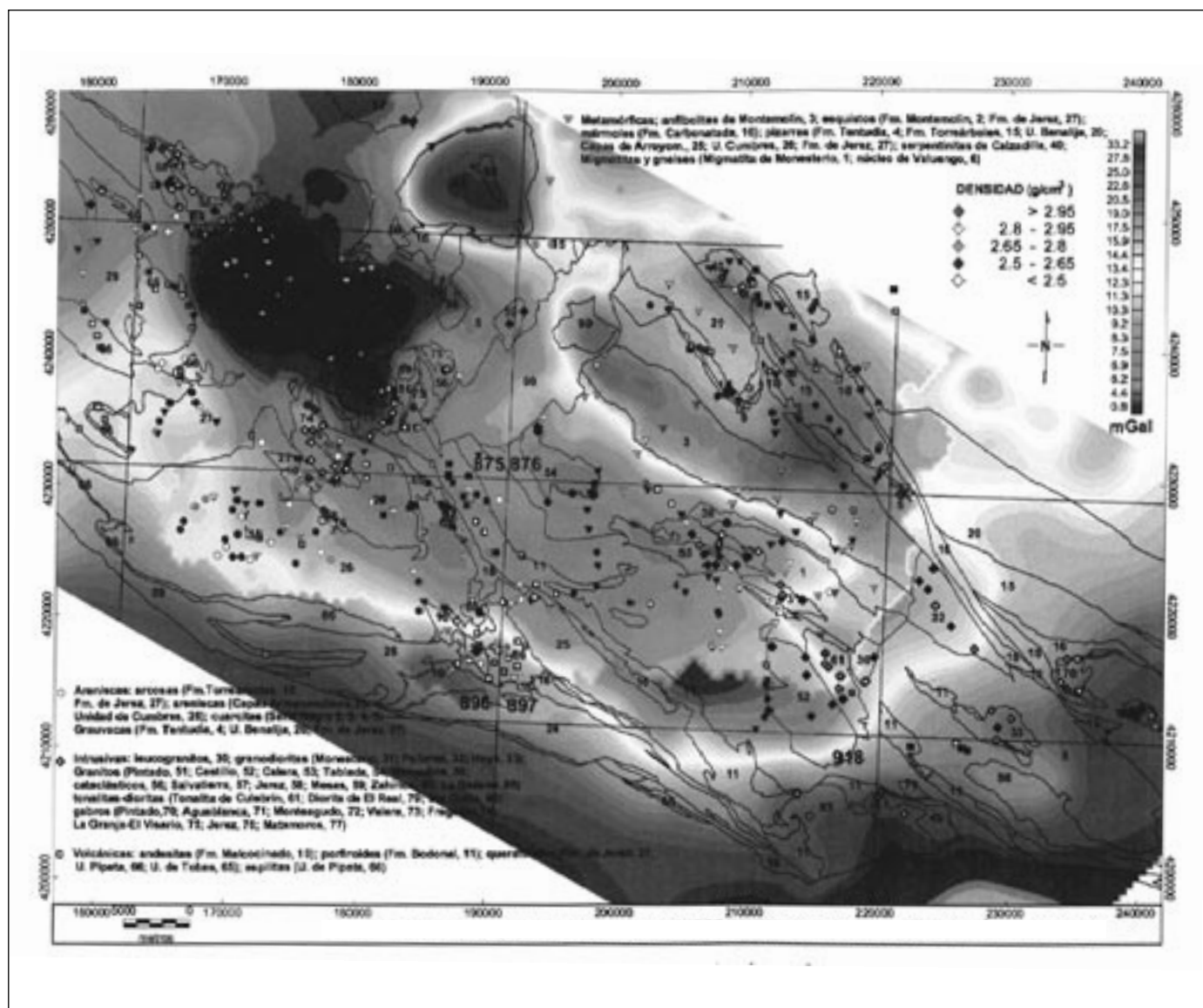
Fig. 2. Susceptibilidad de 655 muestras del antiforme de Monesterio sobre mapa magnético reducido al polo
 Fig. 2. Reduced to the pole magnetic map and susceptibility of 655 rock samples. Monesterio antiform

bien representada la Fm. Torreárboles (15, 27 muestras), pero no el resto del Cámbrico en el flanco citado (unidades 20 y 21), en el límite del vuelo de alta resolución. En total, al cámbrico inferior terrígeno y carbonatado corresponden 163 muestras.

- Respecto de las numerosas rocas ígneas de la región, el muestreo es algo irregular, pero correcto en las intrusiones más importantes: gabros como los del Pintado (70), Jerez (76), Fregenal (74), Sirgada (77) y Barcarrota (78), granitos como Monesterio (30), Táliga, (34), Pintado (51), Castillo (52), Calera (53), Tablada (54), Remedios (55), Salvatierra (57), Jerez (58) y Bazana (85), granodioritas como Monesterio (31), Pallares (32) y Hoya de Santa María (33), y tonalita de Culebrín (61).

Puede concluirse que el muestreo, cuya media es de una muestra cada 5 km², es suficiente para el estudio de las anomalías gravimétricas y aeroportadas en los límites del vuelo de alta resolución de 1997 en las hojas 853, 875, 876, 896, 897 y 898: debe destacarse el registro petrofísico de rocas ígneas en el que, además de los 126 datos de volcanitas, se han muestreado 32 intrusiones, con un total de 224 ejemplares de rocas plutónicas (14 granitos, 3 granodioritas, 3 tonalitas, 1 diorita, 10 gabros y un macizo ultrabásico). Mención aparte merecen los Complejos Ígneos Hercínicos Zonados del núcleo proterozoico, a caballo entre las

Fig. 3. Densidad de 655 muestras del antiforme de Monesterio sobre mapa de Anomalías de Bouguer
 Fig. 3. Gravity map and density of 655 rock samples. Monesterio antiform



Litología	DENSIDAD (g/cm ³)			SUSCEPTIBILIDAD (ucgs x 10 ⁶)					Parámetro Q
	N	Rango	Media	Mediana	kmf1	kmf2	kmf3	kmf4	Mediana
Areniscas	114	2.25-2.77	2.56	48	345 (5)	1235 (4)	-	-	0.27 (3)
Arcosas	32	2.25-2.68	2.56	58	360 (3)	997 (1)	-	-	-
Areniscas	33	2.35-2.73	2.56	34	-	1169 (1)	-	-	-
Cuarcitas	15	2.41-2.75	2.59	114	290 (1)	-	-	-	-
Grauvacas	34	2.31-2.77	2.54	37	357 (1)	1388 (2)	-	-	-
Volcanitas	134	2.34-3.00	2.70	828	591 (7)	1512 (22)	5109 (34)	13166 (13)	-
Andesitas	36	2.54-2.85	2.66	79	365 (1)	-	5361 (7)	8131 (1)	0.68 (7)
Diabasas	8	2.71-2.98	2.89	119	-	1323 (3)	-	-	-
Espilitas	39	2.67-2.96	2.82	4083	660 (4)	1384 (3)	5501 (16)	12248 (8)	0.41 (14)
Porfiroides	20	2.41-2.70	2.56	84	-	1592 (6)	4778 (3)	-	1.03 (6)
Queratófidos	31	2.34-3.00	2.64	1802	566 (2)	1560 (10)	4227 (8)	16262 (4)	0.32 (9)
Intrusivas	224	2.33-3.14	2.74	104	477 (22)	1635 (29)	4223 (24)	10394 (4)	-
Granitos	98	2.33-2.77	2.56	53	432 (7)	1461 (3)	4774 (10)	11534 (2)	0.59 (5)
Granodioritas	15	2.59-2.71	2.65	66	-	-	-	-	-
Tonalitas	13	2.62-2.77	2.71	731	528 (2)	1395 (4)	2580 (1)	-	-
Dioritas	7	2.77-2.92	2.87	588	588 (1)	1177 (2)	4387 (1)	-	-
Gabros	86	2.76-3.14	2.93	279	486 (12)	1737 (19)	3935 (12)	9254 (2)	2.41 (13)
Ultrabásicas	5	2.92-3.12	3.06	175	-	2446 (1)	-	-	-
Metamórficas	183	2.25-3.02	2.64	67	405 (9)	1291 (14)	4300 (11)	8655 (2)	-
Anfibolitas	18	2.66-3.02	2.89	115	-	-	-	-	-
Esquistos	55	2.34-2.85	2.61	65	535 (3)	1332 (6)	-	-	0.39 (5)
Mármoles	18	2.59-2.95	2.74	78	306 (1)	-	-	-	-
Migmatitas	14	2.45-2.83	2.63	80	523 (1)	1195 (3)	-	-	-
Pizarras	53	2.25-2.76	2.53	39	302 (4)	1016 (2)	3992 (1)	-	0.28 (5)
Serpentinitas	10	2.49-2.70	2.58	3754	-	2328 (1)	4576 (8)	-	1.28 (6)
Calizas	9	2.58-2.82	2.70	23	-	-	-	-	-
Corneanas	6	2.77-2.89	2.81	3727	-	1068 (2)	3352 (2)	8655 (2)	-

Tabla 1. Densidad y susceptibilidad de 655 muestras del antifforme de Monesterio.

Entre paréntesis se da el número de muestras comprendidas en los rangos a los que se refieren los promedios de susceptibilidad: 250<kmf1<750*10⁶ ucgs, fracción débilmente ferromagnética (0.1<% Fe₃O₄<0.3); 750<kmf2<2500*10⁶ ucgs, fracción moderadamente ferromagnética (0.3<% Fe₃O₄<1); 2500<kmf3<7500*10⁶ ucgs, fracción ferromagnética (1<% Fe₃O₄<3); kmf4>7500*10⁶ ucgs, fracción muy ferromagnética (% Fe₃O₄>3). Q: parámetro de Koenigsberger; la mediana se refiere al número de muestras indicado entre paréntesis, y los datos de gabros corresponden al de Fregenal

Table 1. Density and susceptibility of 655 rock samples from Monesterio antifform. Susceptibility ranges: 250<kmf1<750*10⁶ ucgs, slightly ferromagnetic fraction (0.1<% Fe₃O₄<0.3); 750<kmf2<2500*10⁶ ucgs, ferromagnetic fraction (0.3<% Fe₃O₄<1); 2500<kmf3<7500*10⁶ ucgs, ferromagnetic fraction (1<% Fe₃O₄<3); kmf4>7500*10⁶ ucgs, highly ferromagnetic fraction (% Fe₃O₄>3). The number of data that fall within each interval is shown between parenthesis. Q: Koenigsberger ratio; median of the number of samples indicated between parenthesis, with the gabbroic median referring to the Fregenal gabbro

hojas 875, 876 y 853 (códigos 90, 91, 92, Fig. 1), que están siendo objeto de un muestreo detallado (1 muestra/km²). A fecha de preparación de esta publicación no se dispone de la totalidad de los resultados correspondientes a estos complejos, por lo que no se van a presentar aquí.

Densidad y susceptibilidad de rocas del antifforme de Monesterio

En los histogramas y diagrama bivalente de la Fig. 4, así como en la tabla 1, se reúnen todos los datos de

petrofísica disponibles de las 655 muestras de roca del antifforme de Monesterio. Por grupos litológicos se puede señalar lo siguiente:

- Areniscas: son rocas de densidad baja, que tienden a ocupar mínimos o mínimos relativos en el mapa de anomalías de Bouguer, con un promedio global para todos los tipos (114 muestras) de 2.56 g/cm³ (tabla 1), y moda de 2.56 g/cm³ (Fig. 4). No existen diferencias de densidad entre formaciones precámbricas y cámbricas, salvo con la de Jerez, que engloba grauvacas y arcosas más ligeras. En efecto, esta Formación suele ocupar mínimos acusados en el mapa de anomalías de Bouguer (Fig. 3).

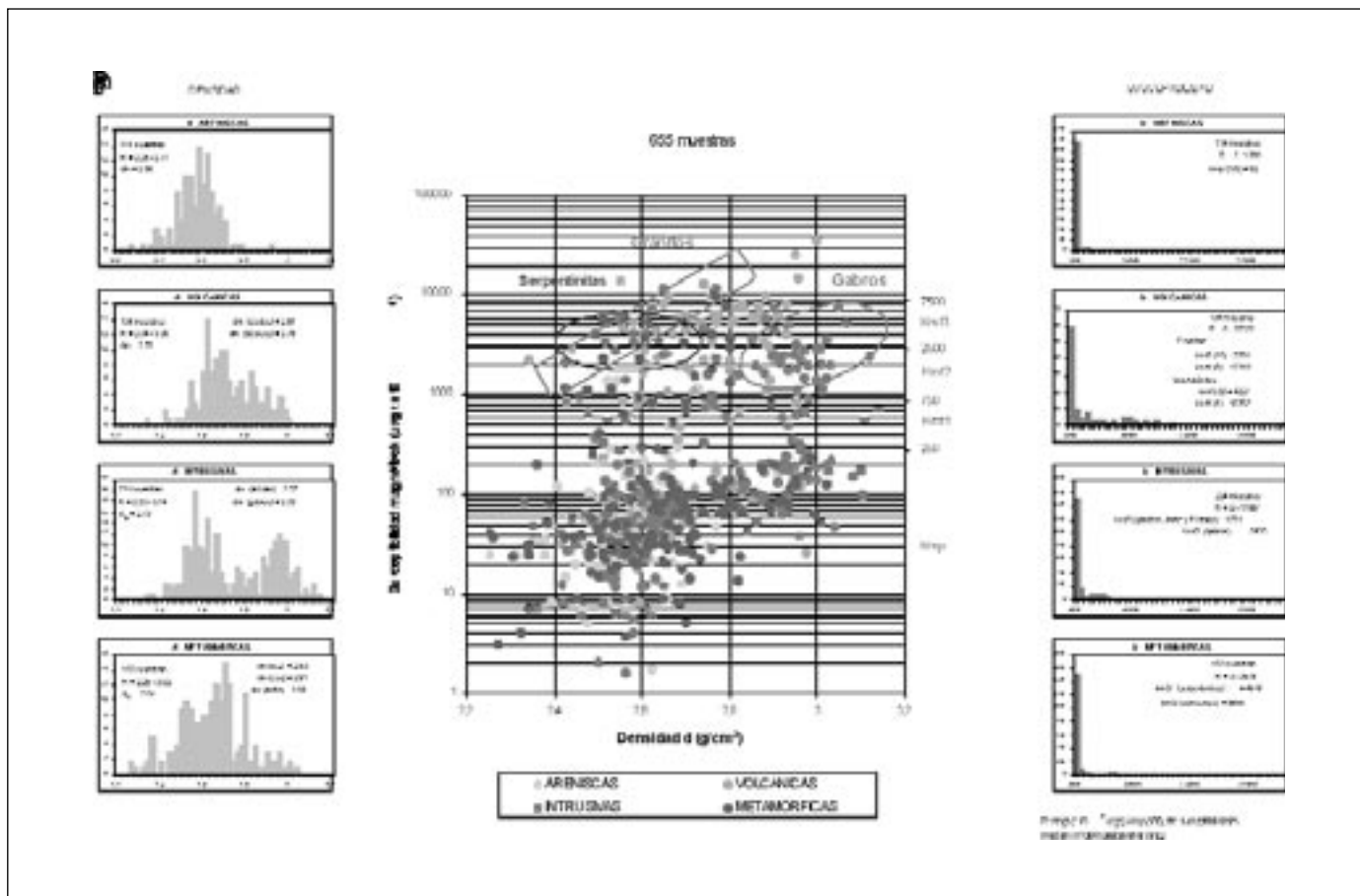


Fig. 4. Histogramas de densidad, susceptibilidad y diagrama d-k de las rocas del antiforame de Monesterio
 Fig. 4. Density and susceptibility histograms and crossplot. Monesterio antiform rock samples

Las susceptibilidades son bajas (105 muestras paramagnéticas, $kmp=62 \cdot 10^6$ ucgs), ligeramente más altas en las cuarcitas. Valores mencionables se han obtenido en (tabla 1): 1) Las arcosas de la Fm. Torreárboles ($kmf1= 360 \cdot 10^6$ ucgs y probable media ferromagnética $kmf2$ próxima a las $1000 \cdot 10^6$ ucgs); 2) Las areniscas de la Unidad de Cumbres, donde es verosímil una moda alta entre 1000 y $2000 \cdot 10^6$ ucgs que puede justificar sus anomalías magnéticas menos acusadas; y 3) Las grauvacas de la Unidad detrítica de Jerez, con dos ejemplares con contenidos superiores al 0.5% de Fe_3O_4 (media de $1388 \cdot 10^6$ ucgs).

La fracción ferromagnética de las areniscas de Torreárboles y Fm. detrítica de Jerez alcanza contenidos en magnetita del 1-1.5%, pero se encuentra martitizada en general, de modo que constituyen un buen ejemplo de cómo la martitización afecta a la susceptibilidad.

Cabe deducir por tanto que si excluimos los efectos de la martitización supergénica de la magneti-

ta, las susceptibilidades de todo el conjunto meta-sedimentario y metamórfico de los litosomas terrígenos del Cámbrico Inferior (Fms. Torreárboles, Unidades de Arroyomolinos, Cumbres y Jerez) muestran una moda alta entre 1000 y $3000 \cdot 10^6$ ucgs, que es la responsable de los tonos intermedio-altos del campo magnético en estas unidades (las anomalías más intensas serían debidas a volcánicas, de las que se han recogido 18 en las tres unidades citadas en último lugar).

- Volcanitas: exhiben una amplia gama de densidades entre términos básicos y ácidos, y polimodalidad magnética en todos los grupos, si bien con dominio de las rocas ferromagnéticas (diagrama bivalente de la Fig. 4, tabla 1).

Respecto a las volcánicas finicadomienses, en la Fm. Malcocinado las densidades muestran valores intermedios (2.66 g/cm³) y las susceptibilidades son bajas en el grupo mayoritario de tobas retrabajadas y epiclastitas andesíticas, pero no en las andesitas masivas (algo más densas que las ante-

rios, con $k_{mf3}=5361 \cdot 10^6$ ucgs, aunque sus afloramientos son minoritarios). En la Fm. Bodonal, las cineritas y los porfiroides riolíticos son más ligeros (media de 2.56 g/cm^3), y en general paramagnéticos, salvo en el caso de los porfiroides milonitizados (hasta el 2% de magnetita, aunque irregularmente distribuida). Todo ello explica las anomalías magnéticas de intensidad moderada-alta y consistentes con la cartografía de estas rocas en las formaciones correspondientes, Malcocinado y Bodonal; estas anomalías circunscriben claramente el núcleo cadomiense paramagnético del Antiforme de Monesterio (Fig. 2).

En el volcanismo cámbrico inferior, las espilitas son pesadas y los queratófidos, en general, ligeros, pero con notables excepciones; la característica esencial de estas últimas rocas es su heterogeneidad petrofísica (cfr. rangos de la tabla 1). Ambas litologías son abundantes y se encuentran íntimamente relacionadas; ambas son polimodales con claras modas ferromagnéticas (tabla citada, estas rocas alcanzan porcentajes de magnetita superiores al 10%). La diferencia radica en que en los queratófidos estas modas son locales, exhibiendo los valores más altos de susceptibilidad entre todos los muestreados y produciendo anomalías muy intensas en zonas que normalmente comprenden mineralizaciones de hierro, mientras

que en las espilitas las modas altas ocurren consistentemente a nivel regional. Ambos, espilitas y queratófidos, se manifiestan como los principales marcadores magnéticos de la zona de estudio, si bien las espilitas producen anomalías más continuas y de mejor correspondencia con la cartografía geológica. En cuanto magnetizaciones remanentes ambas litologías son conspicuas representantes del dominio de la magnetita MD (ver apartado siguiente). Además, las espilitas, o las rocas intrusivas de las que derivan, producen claras anomalías en el mapa de Bouguer de la región.

- **Ígneas intrusivas:** los granitos presentan un amplio rango de densidades con media de 2.55 g/cm^3 y moda alrededor de 2.56 g/cm^3 (tabla 1), marcando claros mínimos gravimétricos según el eje central del Antiforme de Monesterio (leucogranitos de Monesterio, granitos de Calera, Tablada, Remedios, Bazana, Salvatierra). Existen dos grupos de susceptibilidad contrastada (tabla 2): 1) Uno de granitos paramagnéticos (leucogranitos de Monesterio, granitos del Castillo, Calera, Tablada, Salvatierra, las Mesas, Olivenza y la Bazana). Todos ellos exhiben mínimos magnéticos muy claros (Fig. 2); 2) Otro de granitos ferromagnéticos: los mejores ejemplos los constituyen el granito de Jerez, que es bimodal y encierra anomalías mag-

INTRUSIÓN	DENSIDAD (g/cm^3)			SUSCEPTIBILIDAD ($\text{ucgs} \times 10^6$)						
	N	Rango	Media	Rango	Mediana	kmp	k _{mf1}	k _{mf2}	k _{mf3}	k _{mf4}
30 Leucogranitos	9	2.33-2.60	2.51	8-97	51	58 (9)	-	-	-	-
34 Taliga	16	2.51-2.66	2.59	2-535	27	30 (14)	414 (2)	-	-	-
51 Pintado	8	2.54-2.66	2.61	80-11567	4133	80 (1)	-	-	4646 (6)	11567 (1)
52 Castillo	7	2.54-2.61	2.57	4-96	23	37 (7)	-	-	-	-
53 Calera	4	2.52-2.66	2.59	62-273	116	81 (3)	273 (1)	-	-	-
54 Tablada	7	2.51-2.59	2.55	8-54	26	29 (7)	-	-	-	-
55 Los Remedios	15	2.45-2.64	2.51	6-563	53	58 (12)	425 (3)	-	-	-
56 Cataclásticos	1	-	2.65	-	12	-	-	-	-	-
57 Salvatierra	4	2.62-2.65	2.63	6-70	63	47 (2)	-	-	-	-
58 Jerez	12	2.41-2.77	2.55	40-11500	2105	74 (4)	-	1461 (3)	4968 (4)	11500 (1)
59 Mesas	2	2.54-2.56	2.55	9-197	-	103 (2)	-	-	-	-
60 Zahínos	2	2.48-2.51	2.49	37-649	-	37 (1)	649 (1)	-	-	-
62 Olivenza	2	2.52-2.62	2.57	55-62	-	58 (2)	-	-	-	-
85 La Bazana	9	2.36-2.63	2.52	2-57	15	21 (9)	-	-	-	-
TOTAL	98	2.33-2.77	2.56	2-11567	53	46 (76)	432 (7)	1461 (3)	4774 (10)	11534 (2)

Tabla 2. Densidad y susceptibilidad de los granitos. antiforme de Monesterio. Entre paréntesis se da el número de muestras comprendidas en los rangos a los que se refieren los promedios de susceptibilidad: $k_{mp} < 250 \cdot 10^6$ ucgs; $250 < k_{mf1} < 750 \cdot 10^6$ ucgs; $750 < k_{mf2} < 2500 \cdot 10^6$ ucgs; $2500 < k_{mf3} < 7500 \cdot 10^6$ ucgs; $k_{mf4} > 7500 \cdot 10^6$ ucgs

Table 2. Density and susceptibility of granite samples. Monesterio antiform. Susceptibility ranges: $k_{mp} < 250 \cdot 10^6$ ucgs; $250 < k_{mf1} < 750 \cdot 10^6$ ucgs; $750 < k_{mf2} < 2500 \cdot 10^6$ ucgs; $2500 < k_{mf3} < 7500 \cdot 10^6$ ucgs; $k_{mf4} > 7500 \cdot 10^6$ ucgs

néticas importantes del orden de centenas de nT (kmf3(4)=4.968 *10⁶ ucgs, con probables modas más altas), y el granito del Pintado, que es incluso más ferrromagnético que éste (kmf3(6)=4646 *10⁶ ucgs, con un dato de 11.567*10⁶ ucgs).

Las granodioritas son un grupo parecido al de los granitos paramagnéticos, salvo por su densidad superior (tabla 3, media de 2.65 g/cm³).

Dejando aparte las tonalitas de Culebrín y Santa Olalla, ambas de densidad media y con una moda ferromagnética baja (tabla 3), las tonalitas y dioritas son importantes marcadores en los complejos ígneos como el de Barcarrota, y los hercínicos zonados (90, 91 y 92, Fig. 1), que no tratamos aquí. Las tonalitas de Valencia del Ventoso son las principales responsables de sus acusadas anomalías magnéticas. Algo similar ocurre con las dioritas de Burguillos del Cerro, si bien en este caso son los gabros los que además de contribuir a su expresión magnética causan su gran anomalía gravimétrica (Fig. 3).

Los gabros cámbricos son los intrusivos más pesados, aunque muestran también un amplio rango de densidades (tabla 4). Son polimodales, con una moda ferromagnética alta segura en los de Fregenal, Jerez y Barcarrota; moda que es verosímil en la zona de la Sirgada (Matamoros) y Olivenza (en total, kmf3(12)=3935 *10⁶ ucgs). En

contraste, el gabro del Pintado es paramagnético; como es probable que lo sean Monteagudo y Aguablanca (cuando no está mineralizado).

Es decir, aunque no es tan seguro como en el caso de los granitos, parece que existen dos familias de gabros, una ferromagnética (olivínica y piroxénica) y otra polimodal (piroxénica), con predominio del paramagnetismo cuanto más al SE se ubican en la zona de estudio. Las facies olivínicas son siempre ferromagnéticas (de moda intermedia: 1% de Fe₃O₄) y algo más pesadas que las piroxénicas. Las facies piroxénicas tienden a ser mayoritariamente paramagnéticas, no obstante lo cual, los valores más elevados de susceptibilidad se han encontrado en esta facies. Las magnetizaciones remanentes de los gabros son las mayores de entre todas las medidas (tabla 1).

En general, incluso los gabros ferromagnéticos exhiben una moda baja importante (las facies están mezcladas) que hace su cartografía magnética incierta, incluso su entorno (volcanitas, granitos ferromagnéticos) suele ser más magnético que los gabros mismos (Fig. 2). Por todo lo descrito, los gabros no producen tantas anomalías magnéticas destacables como se pudiera esperar. Lo realmente llamativo es la relativamente débil respuesta gravífica que producen cuerpos de elevado peso específico (v.g., Fregenal, con unos 20 km² de

	DENSIDAD (g/cm ³)			SUSCEPTIBILIDAD (ucgs x 10 ⁶)						
	N	Rango	Media	Rango	Mediana	kmp	kmf1	kmf2	kmf3	kmf4
Granodioritas										
31 Gd. Monesterio	5	2.64-2.69	2.66	55-148	84	89 (5)	-	-	-	-
32 Gd. Pallares	6	2.59-2.69	2.64	14-98	69	53 (6)	-	-	-	-
33 Gd. Hoya S. María	4	2.65-2.71	2.67	39-75	65	58 (4)	-	-	-	-
Tonalitas										
61 Ton. Culebrín	5	2.68-2.76	2.72	68-860	731	83 (2)	731 (1)	843 (2)	-	-
78 Ton. Barcarrota	5	2.62-2.77	2.71	59-2580	1589	59 (1)	324 (1)	1947 (2)	2580 (1)	-
93 Ton. Sta. Olalla	3	2.66-2.74	2.70	267-698	314	-	426 (3)	-	-	-
Diorita										
78 Diorita Barcarrota	7	2.77-2.92	2.87	61-4387	588	122(3)	-	1177 (3)	4387 (1)	-

Tabla 3. Densidad y susceptibilidad de las granodioritas, tonalitas y dioritas. Entre paréntesis se da el número de muestras comprendidas en los rangos a los que se refieren los promedios de susceptibilidad: kmp<250*10⁶ ucgs; 250<kmf1<750*10⁶ ucgs; 750<kmf2<2500*10⁶ ucgs; 2500<kmf3<7500*10⁶ ucgs; kmf4>7500*10⁶ ucgs

Tabla 3. Density and susceptibility of granodiorite, tonalite and diorite samples. Monesterio antiform. Susceptibility ranges: kmp<250*10⁶ ucgs; 250<kmf1<750*10⁶ ucgs; 750<kmf2<2500*10⁶ ucgs; 2500<kmf3<7500*10⁶ ucgs; kmf4>7500*10⁶ ucgs

INTRUSIÓN	DENSIDAD (g/cm ³)			SUSCEPTIBILIDAD (ucgs x 10 ⁶)						
	N	Rango	Media	Rango	Mediana	kmp	kmf1	kmf2	kmf3	kmf4
70 Pintado	12	2.76-2.96	2.87	71-315	150	147 (11)	315 (1)	-	-	-
71 Aguablanca	6	2.91-2.98	2.94	65-264	197	155 (5)	264 (1)	-	-	-
72 Monteagudo	3	2.76-2.96	2.85	28-106	38	57 (3)	-	-	-	-
73 Valera	3	2.76-2.92	2.86	989-2550	2221	-	-	1605 (2)	2505 (1)	-
74 Fregenal	19	2.77-3.05	2.95	199-10841	1855	212 (3)	455 (2)	1843 (10)	2992 (2)	9254 (2)
75 La Granja	3	2.77-3.03	2.89	54-174	105	111 (3)	-	-	-	-
76 Jerez	13	2.79-3.11	2.96	48-7325	252	127 (6)	435 (3)	1469 (1)	6050 (3)	-
77 Sirgada	7	2.85-3.02	2.92	85-3456	193	138 (4)	-	1925 (1)	3127 (2)	-
78 Barcarrota	16	2.79-3.14	2.96	76-3240	711	110 (5)	585 (4)	1760 (4)	3023 (3)	-
80 Olivenza	4	2.96-3.07	2.99	149-5217	-	149 (1)	706 (1)	927 (1)	5217 (1)	-
TOTAL	86	2.76-3.14	2.93	28-10841	279	135 (41)	486 (12)	1737 (19)	3935 (12)	9254 (2)

Tabla 4. Densidad y susceptibilidad de los gabros. antiforme de Monesterio. Entre paréntesis se da el número de muestras comprendidas en los rangos a los que se refieren los promedios de susceptibilidad: kmp<250*10⁶ ucgs; 250<kmf1<750*10⁶ ucgs; 750<kmf2<2500*10⁶ ucgs; 2500<kmf3<7500*10⁶ ucgs; kmf4>7500*10⁶ ucgs. Se destacan en negrita los gabros más importantes cubiertos por el vuelo de alta resolución de 1997

Table 4. Density and susceptibility of garbbo samples. Monesterio antiform. Susceptibility ranges: kmp<250*10⁶ ucgs; 250<kmf1<750*10⁶ ucgs; 750<kmf2<2500*10⁶ ucgs; 2500<kmf3<7500*10⁶ ucgs; kmf4>7500*10⁶ ucgs

superficie en la cartografía Magna), respuesta que es a veces incluso casi nula (v.g., Jerez, Fig. 2), lo que indica su escaso volumen.

- Rocas metamórficas: se trata de un grupo de muy elevada heterogeneidad, por lo que en estas rocas se hace imprescindible discriminar la formación o unidad a la que corresponden.

En el extremo denso se ubican las anfibolitas (tabla 1, media de 2.89 g/cm³; su cartografía gravimétrica es muy notable en la figura 3), que muestran en cambio un magnetismo muy débil, más aún si consideramos la contribución paramagnética teórica de minerales como los anfíboles (en las probetas el opaco principal es la ilmenita, la cual se presenta en gránulos orientados en bandas, diseminados irregularmente o incluidos en algunos cristales de anfíbol). En el extremo ligero, encontramos a las pizarras, paramagnéticas las de la Serie Negra y con algunos valores de susceptibilidad más elevados en el Cámbrico (con contenidos de hasta un 1% de magnetita, usualmente martitizada). Obsérvese que las pizarras son poli-modales en densidad (tabla 1), con la típica moda alta que causa tantos problemas en prospección. Los mármoles de la Fm. Carbonatada muestran tendencias bimodales en densidad, no así en susceptibilidad, siendo paramagnéticos salvo en zonas mineralizadas (tratándose ya de corneanas). Los esquistos son claramente bimodales en densidad (muchos de los denominados esquistos de la

Fm. detrítica de Jerez son metagrauvascas esquistosadas de densidad intermedia-baja, con moda próxima a 2.55 g/cm³, mientras que existe una moda alta próxima a 2.70 g/cm³ debida a esquistos biotíticos de la Fm. Montemolín, que son paramagnéticos). Existe una moda magnética baja y otra algo más alta en los de Jerez (tabla 1; hasta un 1% de magnetita, también usualmente martitizada), unidad con claras manifestaciones de contener niveles volcánicos bimodales (descripción Magna, firmas magnética y radiométrica, datos petrofísicos). Como ocurría con las areniscas, las susceptibilidades de pizarras y esquistos cámbricos podrían ser mayores sino fuera por los procesos de martitización generales que afectan a la magnetita de estas rocas.

Las serpentinitas son ligeras (promedio de 2.58 g/cm³) y francamente ferromagnéticas (la magnetita, escasamente martitizada, se distribuye en proporciones que varían entre 1 al 3% y con dos poblaciones que pueden separarse por su tamaño de grano), disponiéndose en un ámbito geográfico que parece extenderse varios km hacia el SE bajo la Fm. Malcocinado si tenemos en cuenta la prolongación de las anomalías magnéticas en esa dirección. Asociadas a las serpentinitas de Calzadilla se han muestreado rocas ultrabásicas no serpentinizadas, lo que se manifiesta por su alta densidad (en cinco muestras el promedio es de 3.06 g/cm³) y baja susceptibilidad, rocas a las

que hay que adjudicar los máximos gravimétricos más importantes de toda la estructura de Cabeza Gorda (Fig. 3).

Por tanto, haciendo una valoración global de los datos obtenidos, tanto las densidades como las susceptibilidades medidas de los macizos rocosos estudiados concuerdan bastante bien con los registros de anomalías gravimétricas y de campo magnético total del vuelo de alta resolución en el Antiforme de Monesterio. En algún caso las susceptibilidades medidas son algo bajas, ya sea respecto a las correspondientes a los contenidos porcentuales de magnetita en probeta, ya con referencia a la escala de las anomalías magnéticas producidas, lo que se explica por la meteorización de la muestra (martitización), que puede reducir la susceptibilidad entre un 40 y un 100% (v.g. Sturkell y Ormu, 1998, Henkel y Guzmán, 1977). En otros casos, como en el de las serpentinitas, también parece existir un cierto déficit de susceptibilidades, pero hemos de tener en cuenta los datos de remanencia. La remanencia viscosa puede aumentar la susceptibilidad efectiva respecto a la medida en laboratorio en valores del orden del 50-100% en ciertos casos de rocas granudas (Clark, 1997).

No parece que existan anomalías debidas al basamento, salvo la posible causada por el cabalgamiento de Monesterio y la que existe a lo largo del flanco SO de la zona de estudio, al Sur de las espilitas (que no obstante deberían estudiarse también a escala más pequeña con los datos del vuelo de la JEN o del IGN). En cambio, sí son muy notorios los marcadores magnéticos superficiales relacionados con los distintos episodios volcánicos de la zona de estudio, que dan lugar a anomalías someras de diferente intensidad y geometría (estructuración):

- Marcadores de intensidad moderada (decenas de nT), lineales, asociados con el ciclo precámbrico-cámbrico basal de las Fms. Malcocinado y Bodonal. Subyaciendo a la primera, las serpentinitas de Calzadilla (bastante más extensas en profundidad de lo que la cartografía indica) producen fuertes anomalías. Circunscrita por estas formaciones se ubica la Serie Negra (hojas 876 y 897, unidades 1-4 en Fig. 1), casi siempre paramagnética, pero con anomalías que merecen ser analizadas en detalle (v.g., en cuarcitas negras o indicios mineros). Todas estas formaciones se componen en general de rocas ligeras (salvo anfíbolitas).
- Marcadores volcánicos que dan lugar a anomalías de intensidad moderada-alta (centenas de nT) del Cámbrico Inferior-Medio: se trataría de un volcanismo bimodal (basalto alcalino/toleítico; riolita-traquita) que incluiría por un lado a las volcanitas de las tobas queratofídicas (en las que se relacio-

nan numerosos yacimientos de hierro con anomalías magnéticas destacables, como v.g. por mencionar sólo dos, la Valera en la hoja 896, y la Bilbaína en la 875), y por otro lado a las espilitas. Ambos, queratofidos y espilitas, estarían ampliamente distribuidos en las formaciones volcano-sedimentarias del Cámbrico de las hojas 875 y 896, mucho más de lo que las memorias y mapas Magna insinúan, no sólo en la Unidad de Pipeta, sino en las formaciones de los grupos de Arroyomolinos, detrítico de Jerez y Cumbres, todas con anomalías gravimétricas y, sobre todo magnéticas, abundantes (Figs. 2 y 3), que corroboran la existencia de volcanitas en los grupos citados.

Posibles objetivos de estudio regional mediante los datos de campo potencial (v.g., modelizaciones) serían: 1) La estructura de accidentes cadomienses y hercínicos (v.g., división en dominios de la ZOM, Cabalgamiento de Monesterio, etc). En principio, existen contrastes suficientes (tabla 1) de densidad y susceptibilidad entre la cobertera y el basamento precámbrico superior (Fms. Tentudía y Montemolín, respectivamente); 2) La estructura de los depocentros cámbricos de las hojas 875 y 896: estos depocentros pueden alcanzar profundidades a nivel del límite de la corteza superior. En una estructura de pliegues isoclinales tumbados, con marcadores superpuestos por pliegues y fallas, las profundidades son difíciles de discriminar (por las interferencias de anomalías). Bajo estos depocentros, además de un magmatismo cámbrico, ¿existe un basamento cadomiense ígneo/metamórfico con contrastes discernibles? 3) La estructura de los macizos intrusivos. La modelización bi y tridimensional de estos cuerpos constituye una aplicación inmediata de los datos de petrofísica presentados aquí.

Por último, con referencia a las mineralizaciones, en el mapa magnético son obvias las anomalías asociadas con las minas de hierro más conocidas (Bóveda, Bilbaína, S. Guillermo, Bismarck, etc.). El carácter paramagnético de la mayoría de los granitos indica un potencial minero menos importante, frente a las posibilidades de los ferromagnéticos. Respecto de los gabros, si se muestrean más a fondo, se podría correlacionar su metalogenia conocida con sus rasgos petrofísicos y firmas geofísicas. Es notable el caso de Aguablanca, objeto del interés minero más reciente, que no destaca por sus anomalías magnéticas (con el registro de un vuelo de 250 m de separación entre líneas), a pesar de alcanzar susceptibilidades del orden de unas $10.000 \cdot 10^{-6}$ ucgs cuando se encuentra mineralizado (los porcentajes de pirrotina llegan a superar el 10%). En la Serie Negra la cone-

ción indicios-anomalías magnéticas parece escasa, en un análisis muy preliminar, existiendo anomalías puntuales en la imagen magnética reducida al polo, algunas relacionadas con indicios. Sí puede decirse que los indicios son más abundantes en las zonas magnéticas más activas.

Magnetización de rocas del antiforme de Monesterio

Se han medido 126 magnetizaciones remanentes naturales (J_{nrm}) en muestras de roca no orientada (un paralelepípedo de 1"). Desde el punto de vista de interpretación de anomalías aeromagnéticas el parámetro a analizar es la razón de Koenigsberger Q , cociente magnetización remanente/magnetización inducida (J_{nrm}/J_i), en representación bivalente frente a la susceptibilidad. Este tipo de gráfico k - Q permite reconocer, en primera aproximación, la fase ferromagnética presente y ciertos procesos a los que eventualmente se ha podido ver sometida la roca.

Recordemos que la anomalía magnética es el producto de un factor geométrico (volumen y distancia a la fuente) por un contraste de magnetización expresable por $J_i + J_{nrm} = \Delta k \cdot H_t + J_{nrm}$, que en el caso usual de tratarse de una magnetización remanente viscosa paralela al campo terrestre H_t ($Q < 1$) se escribe $\Delta k \cdot H_t + (J_{nrm} \cdot J_i / J_i) = \Delta k (1 + Q) \cdot H_t$; a $\Delta k (1 + Q)$ se le denomina susceptibilidad efectiva. Cuando la magnetita es multidominio (MD), bien cristalizada, casi pura, su remanencia suele ser viscosa, subparalela al campo actual. Esto ocurre con frecuencia en rocas ígneas intrusivas, de modo que la susceptibilidad se ve incrementada en la razón Q ($Q = 0.2-0.7$ en muchas de ellas, Clark, 1997). Así las anomalías pueden interpretarse en términos de inducción, si bien alcanzan valores mayores que los esperados según las susceptibilidades medidas en laboratorio.

El diagrama k - Q es una buena representación de la magnetización de las rocas cuando se trata de analizar anomalías de campo total. Las tendencias en los datos permiten la identificación grosera del mineral ferromagnético dominante (los campos de variación aproximados son en rocas con magnetita $200 < k < 10.000 \cdot 10^{-6}$ ucgs, $0.01 < Q < 1$; con titanomagnetita $k > 1000 \cdot 10^{-6}$ ucgs, $0.1 < Q < 10$; con pirrotina $k > 100 \cdot 10^{-6}$ ucgs, $Q > 2$; con hematites $k < 100 \cdot 10^{-6}$ ucgs, $1 < Q < 100$; Henkel, 1994) y muestran en qué rocas domina la inducción J_i y en qué rocas lo hace la remanencia J_{nrm} . En estas últimas, la interpretación magnética de detalle requerirá la determinación de la dirección de la magnetización J_{nrm} mediante medidas en muestras orientadas. Las tendencias en un diagrama k - Q dependen de la cantidad y, sobre todo,

del tamaño de grano de los minerales ferromagnéticos. En el caso de titanomagnetitas para tamaños inferiores al multidominio (granos menores que 0.01-0.020 mm) la susceptibilidad decrece y la remanencia aumenta. Por ello, los cambios de fase y fenómenos asociados de exolución-oxidación-precipitación son los principales causantes de las tendencias observables en un diagrama k - Q . A pesar de la complejidad de los fenómenos implicados, Henkel (1991) ha explicado algunas tendencias naturales delineadas por los datos petrofísicos k - Q del escudo escandinavo (9000 muestras de rocas plutónicas), a las que nos vamos a referir en la descripción de los resultados obtenidos en el Antiforme de Monesterio (figura 5).

Rocas metasedimentarias y metamórficas

Se dispone de un total de 30 mediciones en estas rocas, de las que 14 son ferromagnéticas ($k > 250 \cdot 10^{-6}$ ucgs) y 16 paramagnéticas ($k < 250 \cdot 10^{-6}$ ucgs).

Dentro del grupo de muestras ferromagnéticas existen 3 areniscas (1 de Cumbres, 2 de Torreárboles; $0.09 < Q < 0.62$, con mediana $Q_{mn} = 0.27$), 5 esquistos de Jerez ($0.26 < Q < 1.20$, $Q_{mn} = 0.39$) y 4 pizarras (de Arroyomolinos, Cumbres y Jerez; $0.25 < Q < 4.60$, $Q_{mn} = 0.61$). La tendencia que marcan estos datos es una de oxidación de la magnetita (OxM en figura 5), que es típica (Henkel, 1991) de rocas afectadas por fuerte fracturación y/o procesos de erosión. Con una oxidación completa, toda la magnetita pasa a hematites, lo que hace decrecer la susceptibilidad de la roca drásticamente (vg. desde unas $2000 \cdot 10^{-6}$ ucgs a valores inferiores a $100 \cdot 10^{-6}$ ucgs). Los procesos de martitización observados en probeta son ubicuos en las muestras del cámbrico metasedimentario del Antiforme (apartado anterior). Según Henkel (1991), la remanencia decrece simultáneamente desde unos niveles previos de viscosidad a los valores más bajos de una nueva remanencia química, con lo que el ratio Q variará desde 0.3 (J_{nrm} viscosa) hasta cerca de 0.8.

El grupo paramagnético de las rocas metasedimentarias y metamórficas comprende una miscelánea (11 datos) de areniscas, pizarras, anfíbolitas, y mármoles, más 5 datos de esquistos biotíticos de Montemolín. En estos cinco últimos ($0.02 < Q < 0.95$, $Q_{mn} = 0.26$) no se observa la tendencia por variación del contenido de biotita en la muestra ("línea de la biotita"). El aumento del contenido en biotita hace que la susceptibilidad aumente, aunque manteniéndose en los límites del paramagnetismo, mientras que la razón Q permanece baja, viéndose poco afectada por estos cambios (Henkel, 1991). Se trata por tanto de una correlación negativa que es causada por un incremento gradual en el contenido de minerales

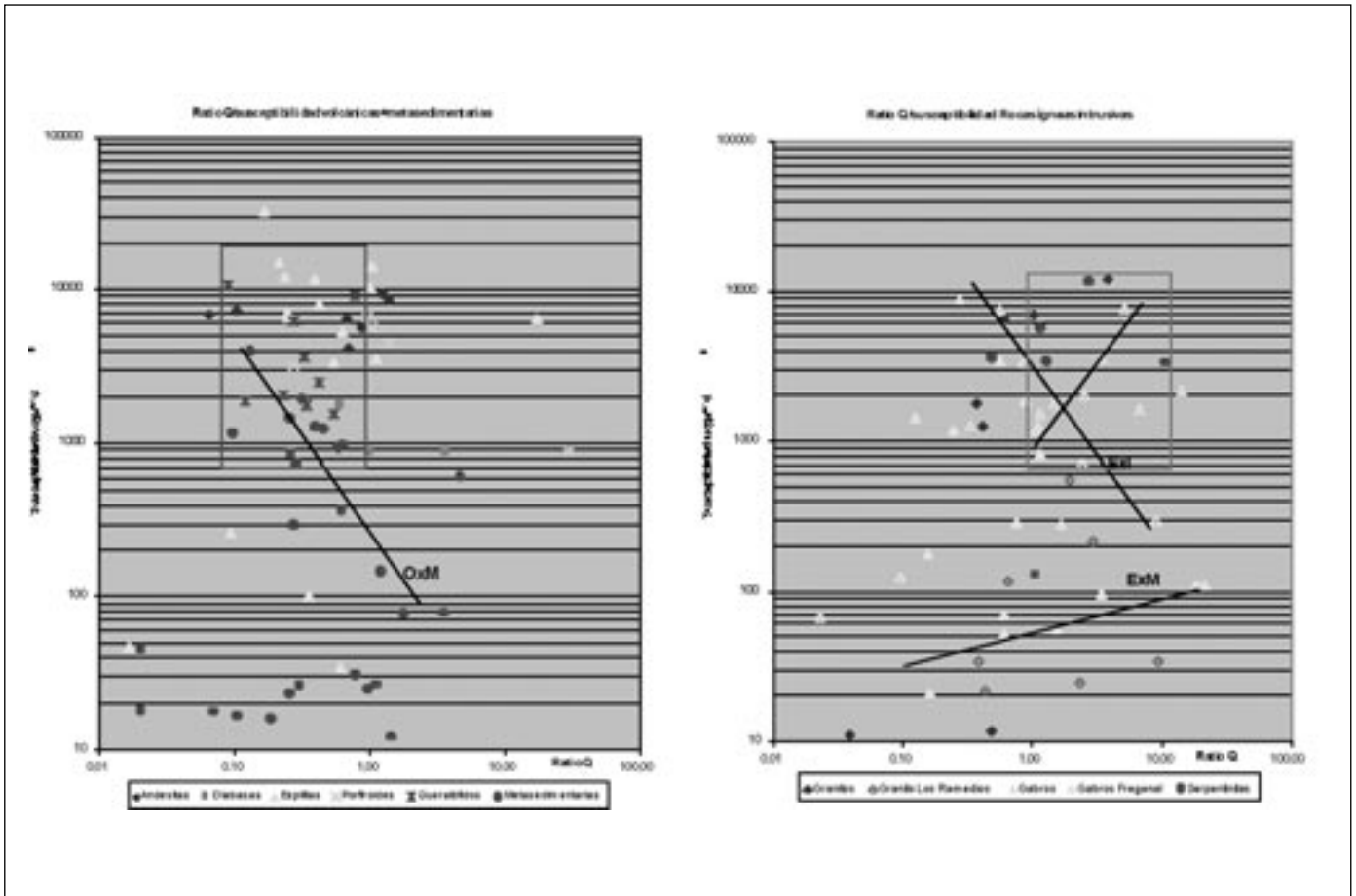


Fig. 5. Diagramas susceptibilidad-magnetización de 126 muestras del antiforame de Monesterio
 Fig. 5. Susceptibility-magnetization crossplots. Monesterio antiform: 126 samples

paramagnéticos (principalmente biotita), mientras la remanencia permanece en el límite de resolución instrumental. La tendencia es típica de rocas como filitas, esquistos y gneises, y es la continuación de tendencias similares características de rocas como cuarcitas, calizas y dolomías. En la figura 5, las susceptibilidades e imanaciones son muy bajas y los datos se distribuyen erráticamente.

En resumen, se trata de rocas dominadas por la inducción magnética ($Q < 1$), en las que muestras con $k > 1000 \cdot 10^{-6}$ ucgs, que son las que en general debemos considerar para la interpretación magnética en un área como el Antiforme de Monesterio, muestran un valor de Q entre 0.09 y 0.54 (7 datos), con un promedio de 0.27 típico viscoso.

Volcanitas

Aparecen bien diferenciadas en el diagrama de la figura 5, habiéndose muestreado en general rocas

ferromagnéticas (salvo 4 espilitas). Disponemos de 7 andesitas ($0.06 < Q < 1.33$, $Q_{mn} = 0.68$), 14 espilitas ($0.02 < Q < 16.5$, $Q_{mn} = 0.41$), 6 porfíroides ($0.26 < Q < 29.39$, $Q_{mn} = 1.03$), y 9 queratofidos ($0.09 < Q < 0.78$, $Q_{mn} = 0.32$, $Q_{media} = 0.35$), tabla 1.

Si la interpretación de las imanaciones de rocas metasedimentarias debe tomarse con precauciones, dada la escasez de datos en el marco de la heterogeneidad de las propiedades magnéticas de las rocas, en el caso de las volcanitas las conclusiones son más firmes: se trata de rocas características del dominio de la magnetita MD ($1.000 < k < 20.000 \cdot 10^{-6}$ ucgs, $Q < 0.5$), lo que es especialmente cierto en el caso de espilitas y queratofidos, con valores de Q típicamente viscosos ($Q_{mn} = 0.41$ y $Q_{mn} = 0.32$, respectivamente). Esto es importante pues son los dos principales marcadores magnéticos del área, y además era anticipable por lo bien que se sigue su cartografía en el mapa reducido al polo (figura 2). Las andesitas (de afloramiento local) exhiben valores de Q algo más altos (existe algo de martitización y un tamaño de grano de la

magnetita muy variable desde 0.06 mm, dentro de la matriz fluidal, tamaño casi MD, a 0.50 mm). Las mayores magnetizaciones remanentes se han encontrado en los porfiroides (Fig. 5). Precisamente estos últimos muestran cierta deficiencia de susceptibilidad para la intensidad de sus anomalías magnéticas (en la banda milonitizada), por lo que una remanencia de orientación normal puede jugar un papel en el magnetismo de estas rocas.

Ígneas intrusivas

Los datos se refieren casi en su totalidad a gabros (sobre todo al de Fregenal) y granitos sódicos, que son los intrusivos ferromagnéticos del Antiforme, dejando aparte los complejos zonados, Valencia del Ventoso, Brovales y Burguillos del Cerro que no van a ser tratados aquí por lo ya antes citado en el apartado 3.

Del gabro de Fregenal disponemos de 15 datos, 13 de ellos ferromagnéticos. El parámetro Q varía en estos últimos entre 0.32 y 14.18, con mediana $Q_{mn}=2.41$ y promedio igual a 3.71. Lo más interesante de este gabro es que las muestras ferromagnéticas con susceptibilidad del orden al menos de las $1.000 \cdot 10^{-6}$ ucgs ocurren a caballo entre el dominio de las magnetitas y las titanomagnetitas, por lo que pueden existir en el mapa aeromagnético anomalías dominadas por la remanencia (rectángulo de la parte derecha de la Fig. 5). Tanto los gabros olivínicos como los piroxénicos pueden mostrar magnetizaciones remanentes elevadas.

Existen dos tendencias en los datos de Fregenal: una delinea una directriz de exolución de ilmenita (ExI en Fig. 5). Es típica de rocas que contienen titanomagnetita como doleritas y gabros. Un incremento en el contenido de Ti puede afectar ligeramente a la susceptibilidad, disminuyéndola en todo caso, mientras que la remanencia aumenta puesto que el tamaño de grano de la magnetita se reduce por la partición causada por la ilmenita exuelta. Esto favorece que el valor de Q se incremente gradualmente (Henkel 1991, 1994). La otra tendencia es la del aumento de k y Q, algo menos frecuente que la anterior, que ocurre cuando las muestras son fuertemente ferromagnéticas (% $Fe_3O_4 > 2-3$), pero contienen además una población de magnetita fina importante que contribuye al aumento no sólo de la susceptibilidad, sino aún en mayor medida de la razón Q. En todo caso queda claro que la orientación de la J_{nrm} de este gabro es un factor adicional para comprender las anomalías producidas por este cuerpo.

Del resto de los gabros disponemos de menos datos: 1) tres muestras paramagnéticas del Pintado

($0.16 < Q < 18.1$, $Q_{mn}=0.60$), y otras 4 también paramagnéticas del gabro de Aguablanca ($0.15 < Q < 3.36$, $Q_{mn}=1.64$), que podrían delinear una tendencia de exolución de la magnetita (ExM en figura 5). En litologías anfibólicas, esta tendencia refleja la presencia creciente de la magnetita con el incremento del anfíbol, lo que origina desde parámetros Q bajos (alrededor de 0.3) hasta valores del orden de 10, mientras la susceptibilidad permanece paramagnética. Esta tendencia es típica de rocas máficas metavolcánicas y de algunos gabros. Exoluciones similares se dan en todos los minerales máficos paramagnéticos excepto en la biotita (p.e. en piroxenos y olivinos, así como en anfíboles); 2) tres muestras (1 paramagnética) del gabro de Valera ($0.87 < Q < 21.02$, $Q_{mn}=1.09$) y cuatro de Jerez ($0.27 < Q < 1.13$, $Q_{mn}=0.75$). Estos dos últimos gabros, en conjunto, delinear una directriz de exolución de ilmenita; y por último, 3) dos datos de Barcarrota de baja imanación (0.12 y 0.24).

Entre los granitos, los datos del de Jerez (5 ferromagnéticos, $0.41 < Q < 3.72$, $Q_{mn}=0.59$) se ubican en el dominio de la magnetita (figura 5), con tendencia al aumento de la razón Q en las muestras más ferromagnéticas. Los ejemplares que presentan un parámetro Q más elevado corresponden al granito de Los Remedios (8 valores) con tendencias crecientes de susceptibilidad y razón Q que son difíciles de interpretar en los tres datos de mayor susceptibilidad (119 a $563 \cdot 10^{-6}$ ucgs, $Q_{medio}=1.80$). Por tanto, en esta intrusión la remanencia puede explicar alguna zonación magnética difícil de justificar con sólo los valores de susceptibilidad. El resto de datos de granitos corresponde al límite de resolución instrumental.

Adicionalmente, en las serpentinitas de Calzadilla se han realizado 6 determinaciones de la magnetización remanente, resultando $0.48 < Q < 10.68$ con $Q_{mn}=1.28$ (y 5 datos con $Q > 1$).

En las serpentinitas la magnetita suele ser gruesa, MD, bien cristalizada, de forma que su magnetización suele ser típica del dominio de la magnetita ($0.1 < Q < 1$), por lo que estos valores resultan algo elevados para ellas. No obstante, como ya se ha mencionado, en probeta pulida se observa que la magnetita (escasamente martitizada) se distribuye en proporciones que varían entre 1 al 3% en dos poblaciones que pueden separarse por su tamaño de grano. La más abundante con tamaños entre 0,010 y 0,020 mm se presenta a lo largo de los cruceros, bordes y fracturas de antiguos olivinos y piroxenos que han sido totalmente serpentinizados; la segunda con tamaño entre 0,16 y 0,70 mm, está distribuida en cristales esparcidos irregularmente dentro de la masa serpentinizada. Por tanto podría existir una población de magnetita fina (pseudo-dominio-único o simple, PSD) que puede originar la relativamente alta mag-

netización de estas muestras.

En conclusión, a pesar de lo reducido del muestreo, se puede indicar lo siguiente:

- La fracción ferromagnética, minoritaria, de las rocas metasedimentarias y metamórficas se encuentra dominada por la inducción magnética en la zona de susceptibilidad intermedio-baja ($k < 2.000 \cdot 10^{-6}$ ucgs) del dominio de la magnetita MD ($Q < 1$), desde donde describe una tendencia de oxidación de la magnetita (martitización). Los esquistos de Jerez, y las areniscas y pizarras en general, muestran magnetizaciones típicamente viscosas ($Q_{mn} \approx 0.2-0.4$). Las muestras con $k > 1.000 \cdot 10^{-6}$ ucgs, que son las que en general debemos considerar para la interpretación magnética en un área como el Antiforme de Monesterio, alcanzan valores de Q entre 0.09 y 0.54 (7 datos), con un promedio de 0.27.
- Espilitas y queratófidos, principales marcadores magnéticos del área, son rocas típicas de la región de la magnetita MD ($1.000 < k < 20.000 \cdot 10^{-6}$ ucgs, $Q < 0.5$), con predominio destacable de la inducción sobre la remanencia. La cartografía magnética de ambos concuerda muy bien con la geológica.
- Las andesitas y los porfiroides exhiben valores de magnetización algo más altos ($Q_{mn} \approx 0.7-1.0$), pero creemos que sólo pueden tener alguna relevancia en estos últimos (remanencia de orientación normal), que originan ejes magnéticos acusados.
- Respecto a las rocas intrusivas, los gabros, a caballo entre el dominio de las magnetitas y las titanomagnetitas y con tendencias de exolución de ilmenita y magnetita, son las rocas de mayor imanación entre las muestreadas. La intensidad y orientación de la J_{nrm} es un factor adicional para comprender las anomalías producidas por estos cuerpos. Los granitos ferromagnéticos sódicos y las serpentinitas, que son los otros dos marcadores magnéticos importantes de la región, se ubican en el dominio de la magnetita, si bien con tendencia al aumento del ratio Q en las muestras más ferromagnéticas.

Por tanto, en general puede decirse que la inducción domina sobre la remanencia (cfr. mapa reducido al polo), en muchos casos viscosa, consecuencia de que el mineral ferromagnético principal debe ser la magnetita MD.

Conclusiones

Respecto a pesos específicos, en el núcleo precámbrico superior del Antiforme de Monesterio y flanco SO cámbrico dominan las rocas de baja densidad (modas en general inferiores a 2.60 g/cm^3), metasedi-

mentarias (areniscas, promedio de 2.56 g/cm^3), metamórficas (pizarras, esquistos, con promedio de 2.53 g/cm^3 y 2.61 g/cm^3 respectivamente; aunque obsérvese que ambas litologías son polimodales, con modas altas a tener en cuenta), ígneas intrusivas ácidas (granitoides precámbricos y prehercínicos; promedio global de granitos 2.56 g/cm^3 , de granodioritas 2.65 g/cm^3), y volcanitas ácidas cámbricas (porfiroides de 2.56 g/cm^3 y queratófidos de 2.64 g/cm^3 , ambos en promedio). Por todo ello, el mapa anomalías de Bouguer muestra una gran área de mínimos en toda la parte central de la zona de estudio (figura 3), en la que notoriamente los gabros de Fregenal sólo producen tonalidades gravíficas intermedias, y pasan desapercibidos los gabros de Jerez. Las modas altas ($> 2.75 \text{ g/cm}^3$) son debidas a rocas básicas intrusivas, dioritas y gabros, con densidades medias de 2.87 y 2.93 g/cm^3 respectivamente, volcánicas básicas (espilitas, 2.82 g/cm^3) y anfibolitas (2.89 g/cm^3), y producen dos flancos de máximos gravimétricos alrededor del mínimo citado:

- El situado al NE del antiforme. Desde el NO existe una gran zona de máximos que arranca del complejo diorítico-gabroideo de Burguillos del Cerro, siguiendo por la parte Norte, diorítica, de Valencia del Ventoso, y anfibolitas de Montemolín-ultrabásicas de Cabeza Gorda. La expresión gravimétrica de éstas termina contra una gran discontinuidad gravimétrica NE-SO que cierra el mínimo precámbrico por el SE.
- El situado al SO del antiforme. Corre según toda la amplia banda de espilitas y sus intrusiones básicas asociadas; la presencia de espilitas en el depocentro Cámbrico de la hoja 896 queda reflejada en el mapa de anomalías de Bouguer.

Respecto a la susceptibilidad magnética, los resultados son algo más heterogéneos (los rangos a los que se refieren los promedios de susceptibilidad se especifican en el apartado 2):

- Se configura como paramagnético todo el núcleo proterozoico del antiforme de Monesterio (figura 2) con migmatitas ($k_{mp} = 61 \cdot 10^{-6}$ ucgs), pizarras ($k_{mp} = 47 \cdot 10^{-6}$ ucgs), cuarcitas ($k_{mp} = 107 \cdot 10^{-6}$ ucgs), esquistos ($k_{mp} = 62 \cdot 10^{-6}$ ucgs), anfibolitas ($k_{mp} = 117 \cdot 10^{-6}$ ucgs), granitos ($k_{mp} = 46 \cdot 10^{-6}$ ucgs) y granodioritas ($k_{mp} = 66 \cdot 10^{-6}$ ucgs).
- Flanqueando el núcleo proterozoico del Antiforme se han obtenido valores más altos en las serpentinitas ($k_{mf3} = 4576 \cdot 10^{-6}$ ucgs), en las volcanitas finicadomienses (Fms. Malcocinado, $k_{mf3} = 5361 \cdot 10^{-6}$ ucgs, y Bodonal, $k_{mf3} = 4778 \cdot 10^{-6}$ ucgs, ambas bimodales), y sobre todo, en las espilitas y los queratófidos cámbricos (k_{mf4} de estas dos últimas de 12248 y $16262 \cdot 10^{-6}$ unidades, respectivamente).

- Se registran valores bajos de susceptibilidad en casi todo el resto de litologías, como en:

- 1) las areniscas metasedimentarias y rocas metamórficas cámbricas, con la salvedad de que si excluimos los efectos de la martitización supergénica de la magnetita, las susceptibilidades de todo el conjunto del litosoma terrígeno del cámbrico inferior (Fms. Torreárboles, Unidades de Arroyomolinos, Cumbres y Jerez) muestran una moda alta entre 1000 y $3000 \cdot 10^{-6}$ ucgs, que es la responsable de los tonos intermedios del campo magnético en estas unidades; y,
- 2) las rocas ígneas intrusivas, salvo en los gabros (y rocas de complejos zonados). Los granitos y granodioritas precámbricas y prehercínicas son paramagnéticos (salvo alguna zonación menor en casos como Los Remedios, Zahínos y Táliga), con la excepción, que hay que diferenciar claramente, de los granitos sódicos ferromagnéticos, como Jerez, con $k_{mf3}=4968 \cdot 10^{-6}$, y Pintado, con $k_{mf3}=4646 \cdot 10^{-6}$. En general los gabros son ferromagnéticos (Valera, Jerez, Fregenal, Sirgada: $k_{mf3}=3935 \cdot 10^{-6}$ ucgs, los gabros olivínicos lo son casi siempre), pero con una moda paramagnética importante, típica de los gabros piroxeno-anfibólicos (esta moda es prácticamente exclusiva en el Pintado, Aguablanca, y La Granja-El Visario). Como se ha resaltado, incluso el entorno de los gabros (volcanitas, granitos ferromagnéticos) suele ser más magnético que los gabros mismos. De todo ello resulta que la cartografía magnética de los gabros sea insegura, lo contrario que ocurre con la de los granitos ferromagnéticos.

Haciendo una revisión global de los datos obtenidos, tanto la situación de las densidades como las de las susceptibilidades medidas concuerdan bastante bien (en términos absolutos) con los valores de las anomalías gravimétricas y de campo magnético total del vuelo de alta resolución. Son muy notorios los marcadores magnéticos superficiales relacionados con los varios episodios volcánicos de la zona de estudio, que dan lugar a anomalías someras de diferente intensidad y geometría (estructuración):

- Marcadores de intensidad moderada (decenas de nT), lineales, asociados con el ciclo precámbrico-cámbrico (finicadomiense) de las Fms. Malcocinado y Bodonal. Entre estos marcadores se sitúa la Serie Negra precámbrica (hojas 876 y 897), paramagnética, pero con anomalías discernibles (debidas a cuarcitas negras, e indicios mineros).
- Marcadores volcánicos de intensidad moderada-alta (centenas de nT) del Cámbrico Inferior-Medio:

se trataría de un volcanismo bimodal (basalto alcalino/toleítico; riolita-traquita) que incluiría por un lado a las volcanitas de tobas queratofídicas (con las que se relacionan numerosos yacimientos de hierro que producen anomalías magnéticas muy destacables); y por el otro a las espillitas. Ambas volcanitas, queratofidos y espillitas, flanquearían el Cámbrico basal del SO del Antiforme (en situación recíproca respecto del eje proterozoico del antiforme y flancos volcánicos finicadomienses), y a la vez, estarían ampliamente distribuidas en las formaciones que lo constituyen, lo que confiere un carácter ferromagnético a este depocentro cámbrico, en contraste con el depocentro precámbrico, paramagnético.

Todo ello resulta en que el sector central del antiforme de Monesterio se configure, desde el punto de vista estructural, como una región con tres características muy destacadas, a saber: 1) Su perfecta delimitación por ejes mayores de anomalías de campo potencial (dos gravimétricos y tres magnéticos), que delinean la división en dominios estructurales de la zona centro-sur de Ossa-Morena, 2) Sus depocentros precámbricos y cámbricos con características de densidad y susceptibilidad muy contrastadas, y 3) Sus abundantes y espectaculares anomalías de campo potencial (incluso claramente observables a escala peninsular), causadas por un ubicuo magmatismo de amplio espectro litológico.

Respecto a las magnetizaciones remanentes naturales (Jnrm) medidas en muestras de roca no orientada, en general puede decirse que la inducción domina sobre la remanencia (cfr. mapa reducido al polo), en muchos casos viscosa, consecuencia de que el mineral ferromagnético principal debe ser la magnetita MD. Los esquistos de Jerez, y las areniscas y pizarras, muestran magnetizaciones viscosas ($Q_{mn} \approx 0.2-0.4$), exhibiendo tendencias de oxidación de la magnetita (martitización). Las espillitas y los queratofidos, principales marcadores magnéticos del área, son rocas típicas de la región de la magnetita MD ($1.000 < k < 20.000 \cdot 10^{-6}$ ucgs, $Q < 0.5$), con predominio destacable de la inducción sobre la remanencia. La cartografía magnética de ambos concuerda muy bien con la geológica. Las andesitas y los porfiroides exhiben valores de magnetización algo más altos ($Q_{mn} \approx 0.7-1.0$), pero creemos que sólo pueden tener alguna relevancia en estos últimos (remanencia de orientación normal), que originan ejes magnéticos acusados. Los gabros, con tendencias de exolución de ilmenita y magnetita, son las rocas de mayor imanación entre las muestreadas. La intensidad y orientación de la Jnrm es un factor adicional para comprender las anomalías producidas por estos cuerpos. Los

granitos ferromagnéticos sódicos y las serpentinitas, que son los otros dos marcadores magnéticos importantes de la región, se ubican en el dominio de la magnetita, si bien con tendencia al aumento del ratio Q en las muestras más ferromagnéticas.

Los resultados presentados en este trabajo configuran un importante elemento de referencia en relación con la consecución del objetivo de la optimización de la interpretación geológico-estructural de campañas de geofísica aeroportada de alta resolución y gravimetría terrestre en el antiforme de Monesterio. Esta optimización se deriva del fuerte apoyo que para dicha interpretación supone la determinación de ciertas propiedades físicas de las rocas, justamente aquellas que con sus contrastes naturales producen las anomalías registradas por los sensores gravimétricos y magnéticos. Debe destacarse el registro petrofísico de rocas ígneas en el que, además de los 126 datos de volcanitas, se han muestreado 32 intrusiones, con un total de 224 ejemplares de rocas plutónicas, de manera que la modelización bi y tridimensional de campo potencial de complejos plutónicos constituye una aplicación inmediata de los datos de petrofísica presentados aquí.

Referencias

- Apalategui, O., Contreras, F. y Eguiluz, L. 1980. *Mapa y memoria explicativa de la Hoja nº 918 (Santa Olalla del Cala)*. Mapa geológico nacional 1:50.000 (serie MAGNA). Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Madrid.
- Apalategui, O., Babiano, F., Fernández Carrasco, J., Coullault, J. L., Ruiz, J. y Soler, M. 1983. *Mapa y memoria explicativa de la Hoja nº 896 (Higuera la Real)*. Mapa geológico nacional 1:50.000 (serie MAGNA). Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Madrid.
- Apalategui, O., Contreras Vázquez, F., Matas González, J., Carvajal Menéndez, A. 1990. *Mapa y memoria explicativa de la Hoja nº 898 (Puebla del Maestre)*. Mapa geológico nacional 1:50.000 (serie MAGNA). Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Madrid.
- Bates, M. y García Lobón, J. L. 1998. *Exploración aeromagnética y radiométrica de la Faja Pirítica y zonas limítrofes*. Fondo documental del IGME, Informe 40464. Madrid.
- Clark, D. A. 1997. Magnetic petrophysics and magnetic petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys. *Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17: 83-103.
- Coullault, J. L., Fernández Carrasco, J. y Aguilar Tomás, M. J. 1981. *Mapa y memoria explicativa de la Hoja nº 875 (Jerez de los Caballeros)*. Mapa geológico nacional 1:50.000 (serie MAGNA). Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Madrid.
- Dickson, B. L., and Scott, K. M. 1997. Interpretation of aerial gamma ray surveys: adding the geochemical factors. *Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17: 187-200
- Eguiluz, L., Fernández Carrasco, J., Coullault, J. L. y Garrote, A. 1983. *Mapa y memoria explicativa de la Hoja nº 897 (Monesterio)*. Mapa geológico nacional 1:50.000 (serie MAGNA). Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Madrid.
- García Lobón, J. L., y Granda Sanz, A. 1993. Reprocesado e interpretación de varias campañas de Geofísica aeroportada en el Macizo Hespérico. *Boletín Geológico y Minero*, 104-2: 177-191.
- García Monzón, G., Jerez Mir, F., Argüelles, A. y Cueto Pascual, A. 1974. *Mapa y memoria explicativa de la Hoja nº 919 (Almadén de la Plata)*. Mapa geológico nacional 1:50.000 (serie MAGNA). Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Madrid.
- Garrote Ruiz, A., Arriola Garrido, A., H., Eguiluz Alarcón, L., Sánchez-Carretero, R., Portero, J. M. 1983. *Mapa y memoria explicativa de la Hoja nº 876 (Fuente de Cantos)*. Mapa geológico nacional 1:50.000 (serie MAGNA). Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Madrid.
- Henkel, H. 1991. Petrophysical properties (density and magnetization) of rocks from the northern part of the Baltic shield. *Tectonophysics*, 192: 1-19.
- Henkel, H. 1994. Standard diagrams of magnetic properties and density: a tool for understanding magnetic petrology. *Journal of Applied Geophysics*, 32: 43-53.
- Henkel, H. and Guzmán, M. 1977. Magnetic features of fracture zones. *Geoexploration*, 15: 173-81.
- Muelas Peña, A., Soubrier, J., Hernández Enrile, J. L., Solar, J. B. 1975. *Mapa y memoria explicativa de la Hoja nº 853 (Burguillos del Cerro)*. Mapa geológico de España 1:50.000 (serie MAGNA). Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Madrid.
- Sturkell, E. F. F., and Ormo, J. 1998. The magnetic pattern of the Lockne area. *Journal of Applied Geophysics*, 38: 195-207.

Recibido: Junio 2002

Aceptado: Diciembre 2002