

Cartografía geofísica de la República Dominicana: datos de densidad, susceptibilidad magnética y magnetización remanente

J. L. García-Lobón y C. Ayala.

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

RESUMEN

Para conocer la variación de las propiedades físicas de muestras de roca de la República Dominicana, y mejorar la interpretación geológica de los vuelos magnéticos y de las gravimetrías terrestres disponibles sobre ella, se han realizado en laboratorio 586 determinaciones de densidad y susceptibilidad magnética, y 104 de magnetización remanente. Se han caracterizado así las rocas de alta densidad (basaltos, anfíbolitas, gabros, ultrabásicas y eclogitas), las de baja densidad (metasedimentarias, volcánicas ácidas y granitoides), las litologías ferromagnéticas de la región (andesitas, basaltos, tonalitas, serpentinitas, y algunos gabros, rocas ultrabásicas y volcanitas ácidas), y las rocas paramagnéticas (metasedimentarias y graníticas). Se observa que la inducción domina sobre la remanencia, en general viscosa, consecuencia de que el principal mineral ferromagnético es la magnetita multidominio. Algunas volcanitas ácidas, y los gabros con tendencias de exsolución de ilmenita-magnetita, son las rocas de mayor magnetización remanente entre las estudiadas. Los contrastes de las propiedades petrofísicas medidas facilitan el análisis de las anomalías de los mapas magnético y gravimétrico de la República Dominicana, que se caracterizan por: 1) La perfecta delimitación de ejes mayores de anomalías de campo potencial, que ofrece un magnífico ejemplo de cartografía megaestructural (hecto-kilométrica) de los diversos terrenos de La Española, 2) Los excelentes ejemplos de cartografía geofísica a escala kilométrica que despliegan numerosas unidades ígneas y volcanosedimentarias de los terrenos anteriores, y, 3) Sus anomalías magnéticas de elevada intensidad causadas por un magmatismo de amplio espectro litológico. Desde el punto de vista de susceptibilidad magnética se observa que se trata de un magmatismo bimodal con zonas magnéticas y paramagnéticas sobre las intrusiones y ejes volcánicos principales de la isla. Con la caracterización petrofísica de los grupos rocosos estudiados se ha construido una base de datos, que se considera una buena referencia para cualquier estudio geofísico de estas rocas mediante campos potenciales. La determinación de los patrones de variación de las propiedades físicas de las rocas estudiadas constituye una aportación significativa para el apoyo geofísico, mediante métodos magnéticos y gravimétricos, a los nuevos proyectos cartográficos, investigaciones estructurales y prospecciones de recursos previstos en la República Dominicana.

Palabras clave: cartografía geofísica, densidad, magnetización remanente, República Dominicana, susceptibilidad magnética

Geophysical mapping of the Dominican Republic: density, magnetic susceptibility and remanent magnetization data

ABSTRACT

This paper analyses the variation of petrophysical properties measured in laboratory from surface rocks of the Dominican Republic. The aim is to improve the geological interpretation of available ground gravity and airborne magnetic surveys carried out over the Dominican Republic during last years. In this work, 586 density and magnetic susceptibility samples, and 104 remanent magnetization samples have been measured. Main petrophysical groups have been characterized: high density rocks (basalts, amphibolites, gabbroic, ultrabasic suites and eclogites), low density rocks (metasedimentary rocks, acid volcanics and granitoids), the magnetic markers of the area (andesites, basalts, tonalites, serpentinites, and some gabbros, ultrabasic rocks and acid volcanites), and finally, the paramagnetic set (metasedimentary and granitic rocks). Induction dominates over remanence, which is only important in some acid volcanites and the gabbroic rocks. Multidomain magnetite is the main ferromagnetic mineral. This fact makes easier the interpretation of total field magnetic survey results. Measured petrophysical properties simplify interpretation of Dominican Republic magnetic and gravity maps, whose main features are: 1) Clear NW-SE strike anomaly structures delineated by the geological terranes that constitute La Española island. Those terranes are limited by main magnetic accidents that coincide with major strike slip fault zones, 2) Excellent geophysical mapping examples of igneous and volcanosedimentary units, and 3) Gravity and magnetic field characterised by very remarkable anomalies due to a magmatism widely spread all over La Española island. Focusing on magnetic susceptibility, this magmatism is a bimodal one, with magnetic and paramagnetic areas in any of the plutonic bodies and volcanic axis in the island. The petrophysical measurements presented here illustrate some natural patterns exhibited by the analysed rocks. The petrophysical results are built in a database which constitutes a basic reference for petrological and geological interpretation of geophysical surveys. These results will contribute significantly to improve new geological mapping, structural interpretation and resource searching scheduled projects with the aid of the high-resolution airborne and ground surveys available in the Dominican Republic.

Key words: density, Dominican Republic, geophysical mapping, magnetic susceptibility, remanent magnetisation

Introducción

Se presenta en este trabajo un estudio petrofísico de rocas de la República Dominicana, llevado a cabo para contribuir a la optimización de la interpretación geológico-estructural de campañas aeromagnéticas de alta resolución y de gravimetría terrestre, a escala regional. Ello requiere la determinación del peso específico, la susceptibilidad magnética y la magnetización remanente de las rocas, que son las propiedades físicas que con sus contrastes naturales producen las anomalías registradas por los sensores magnéticos y gravimétricos. Conocidos estos parámetros, se dispondrá de una base firme para el análisis de la expresión geofísica de campo potencial de las distintas formaciones y unidades ígneas en las zonas de estudio, así como de los contextos a los que se asocian determinados tipos de recursos minerales en la isla.

La República Dominicana ocupa aproximadamente los dos tercios más orientales de la isla La Española, cuya superficie total es de unos 80.000 km². La isla de La Española (Fig. 1), situada en el margen septentrional de la Placa del Caribe, constituye un arco de islas multiepisódico creado durante el Cretácico Inferior-Eoceno (Mann *et al.*, 1991). El desplazamiento transcurrente siniestro, a lo largo del límite entre las placas Norteamericana y Caribeña, que tiene lugar desde el Eoceno, ha modificado de forma importante la geometría del arco de islas mesozoico. Las estructuras generadas durante este desplazamiento (SFZ, HFZ, BGFZ, SJRFZ, etc., Fig. 1) poseen una actividad tectónica muy reciente, controlando la fisiografía de la isla. Dicha fisiografía aparece dominada por valles y alineaciones montañosas de dirección NO-SE, denominadas, de norte a sur, Cordillera Septentrional (al norte de SFZ), Cordillera Central (entre HFZ y SJRFZ), Sierra de Neiba (entre SJRFZ y EPGFZ) y Sierra de Bahoruco (al sur de EPGFZ). Estas cuatro elevaciones se encuentran separadas por tres grandes valles, que enumerados en el mismo orden, se denominan Valle del Cibao, Valle de San Juan y Valle de Enriquillo.

Durante 2002-2004 se han realizado dos importantes proyectos de cartografía geológica a escala 1:50.000 denominados "K" (14 hojas) y "L" (20 hojas; perímetros indicados en la Fig. 2), a los que ha contribuido significativamente la interpretación de las imágenes geofísicas del vuelo magnético y radiométrico de la República Dominicana (García Lobón y Rey Moral, 2002 a, b). El vuelo se realizó en 1995-96 con una separación de líneas de 1 km y altura nominal de 120 m. Posteriormente, se efectuaron nuevos vuelos con 500 m de separación de líneas, funda-

mentalmente en la Cordillera Central y sus bordes suroccidental y oriental, que son las áreas volcánico-plutónicas del arco de islas (complejo Duarte y Fms. Tireo y Los Ranchos en Fig. 1). Además de los vuelos citados, en la República Dominicana se dispone de varias gravimetrías estructurales, con puntos irregularmente distribuidos. Estos trabajos geofísicos y cartográficos constituyen los antecedentes del estudio petrofísico cuyos resultados se presentan en esta publicación.

Petrofísica regional de rocas de la República dominicana

Metodología

Procedentes de los muestreos realizados en los proyectos de cartografía geológica de la República Dominicana recientemente finalizados, al Área de Geofísica del IGME se le han suministrado muestras de polvo y roca con las que se han efectuado las siguientes operaciones:

- Medición de la densidad aparente por pesada de la muestra al aire y sumergida
- Medición de la susceptibilidad magnética aparente en polvo y en roca (en un puente KLY3).
- Corte de un prisma de 1 pulgada para medición de la magnetización remanente (expresada mediante el parámetro de Koenigsberger) en roca no orientada (en un magnetómetro de spin).

Las mediciones se han llevado a cabo en los laboratorios del Instituto Geológico y Minero de España y el Centro de paleomagnetismo de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Complutense de Madrid, obteniéndose los siguientes parámetros: 1) 586 densidades y susceptibilidades; 2) 104 magnetizaciones remanentes. Las precisiones estimadas son de 0.02 g/cm³ para densidad (sensibilidad de 0.01 g/cm³), 2% para la susceptibilidad (sensibilidad de 2.5·10⁻⁷ ucgs), y 5-10% para la magnetización remanente (sensibilidad de 2.4·10⁻⁶ A/m). Detalles de la metodología empleada para el cálculo de estos parámetros se puede encontrar en García Lobón (2003).

Litologías muestreadas. Anomalías magnéticas y gravimétricas

La Tabla I contiene la lista de litologías, unos códigos para facilitar su identificación y localización en los mapas geológicos 1:50.000, el número de muestras de cada litología, y su distribución por unidad litoes-

tratigráfica/tectónica/ígneas según los nombres generalmente aceptados y usados por los autores de la cartografía de los proyectos K y L de la República Dominicana. En las Figs. 2 y 3 se representa la situación de las muestras sobre el mapa de anomalías magnéticas y de Bouguer, respectivamente, clasificadas según su susceptibilidad y densidad.

El muestreo regional (Tabla I) comprende zonas ampliamente distribuidas por toda la isla para caracterizar sus distintos ambientes geológicos y macizos rocosos, si bien quedan fuera del mismo casi todas las áreas no comprendidas en los proyectos K, L y C (este último, anterior los dos primeros, realizado entre 1996-97, Fig. 2).

Obsérvese que las determinaciones petrofísicas se han llevado a cabo, prácticamente en su totali-

dad, en litologías ígneas y metamórficas (Tabla I), como fuentes principales de las anomalías de campo potencial.

Diversos estudios regionales (Henkel, 1991, 1994; Plata *et al.*, 1996; Clark 1997, 1999; García Lobón, 2003) han puesto de manifiesto que las distribuciones de los valores de la susceptibilidad magnética de la mayoría de tipos rocosos, entre los que se encuentran los grupos ígneos más frecuentes, como granitos-riolitas, y gabros-basaltos/espilitas, muestran una polimodalidad característica, con rangos de variación de varios órdenes de magnitud (entre $10 \cdot 10^{-6}$ y $10.000 \cdot 10^{-6}$ ucgs).

Un aspecto importante para la agrupación, presentación y análisis de resultados de un parámetro típicamente polimodal como la susceptibilidad mag-

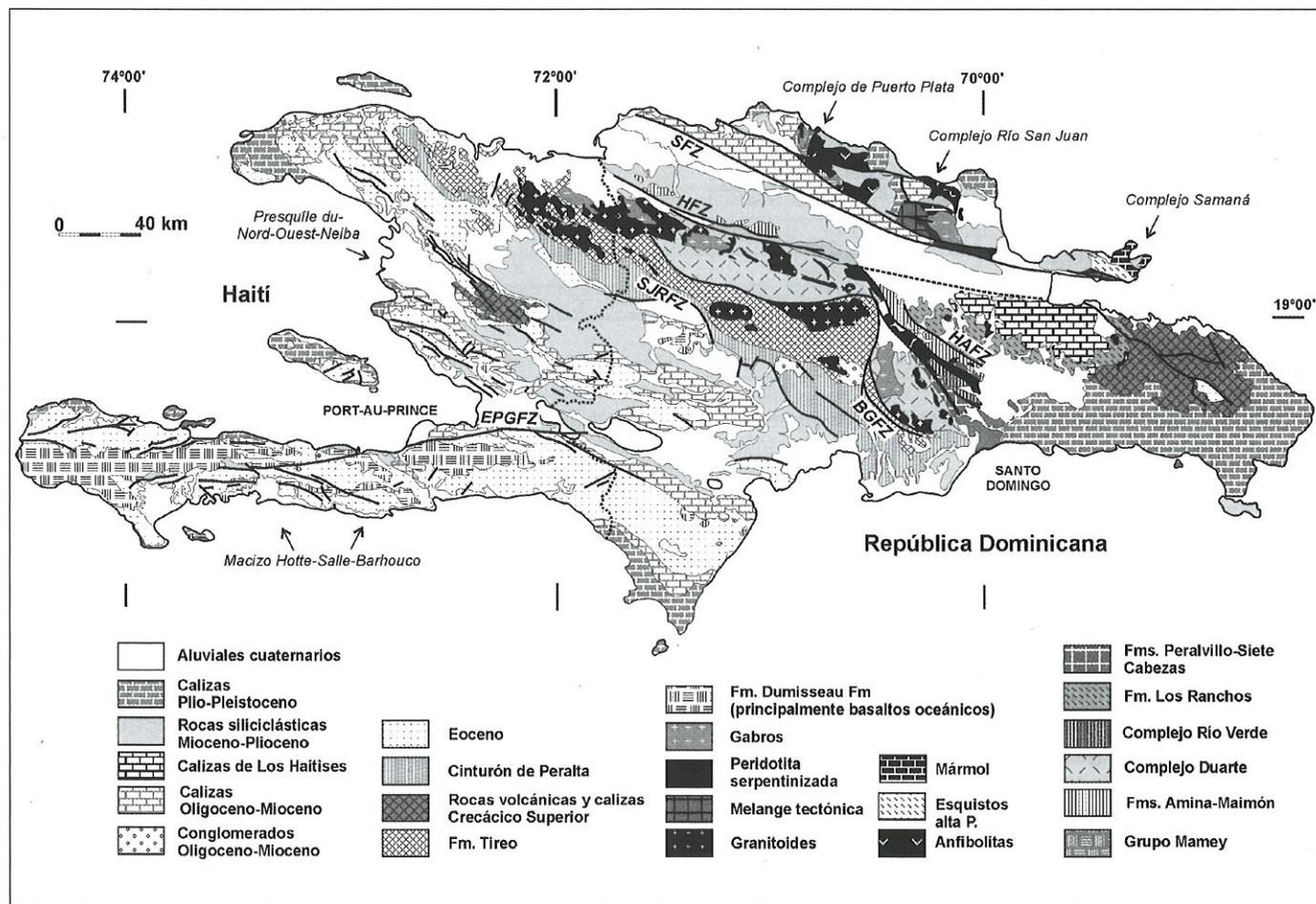


Figura 1. Mapa geológico de la isla de La Española (modificada de Lewis y Draper, 1990). SFZ: Zona de Falla Septentrional; HFZ: Zona de Falla de La Española; HAFZ: Zona de Falla El Hatillo. BGFZ: Zona de Falla Bonafo-La Guácara; SJRFZ: Zona de falla San José Restauración; EPGFZ: Zona de Falla Enriquillo-Plantain Garden

Figure 1. Geological map of Hispaniola Island (modified from Lewis and Draper, 1990). SFZ: Septentrional Fault Zone; HFZ: Hispaniola Fault Zone; HAFZ: El Hatillo Fault Zone. BGFZ: Bonafo-La Guácara Fault Zone; SJRFZ: San José Restauración Fault Zone; EPGFZ: Enriquillo-Plantain Garden Fault Zone

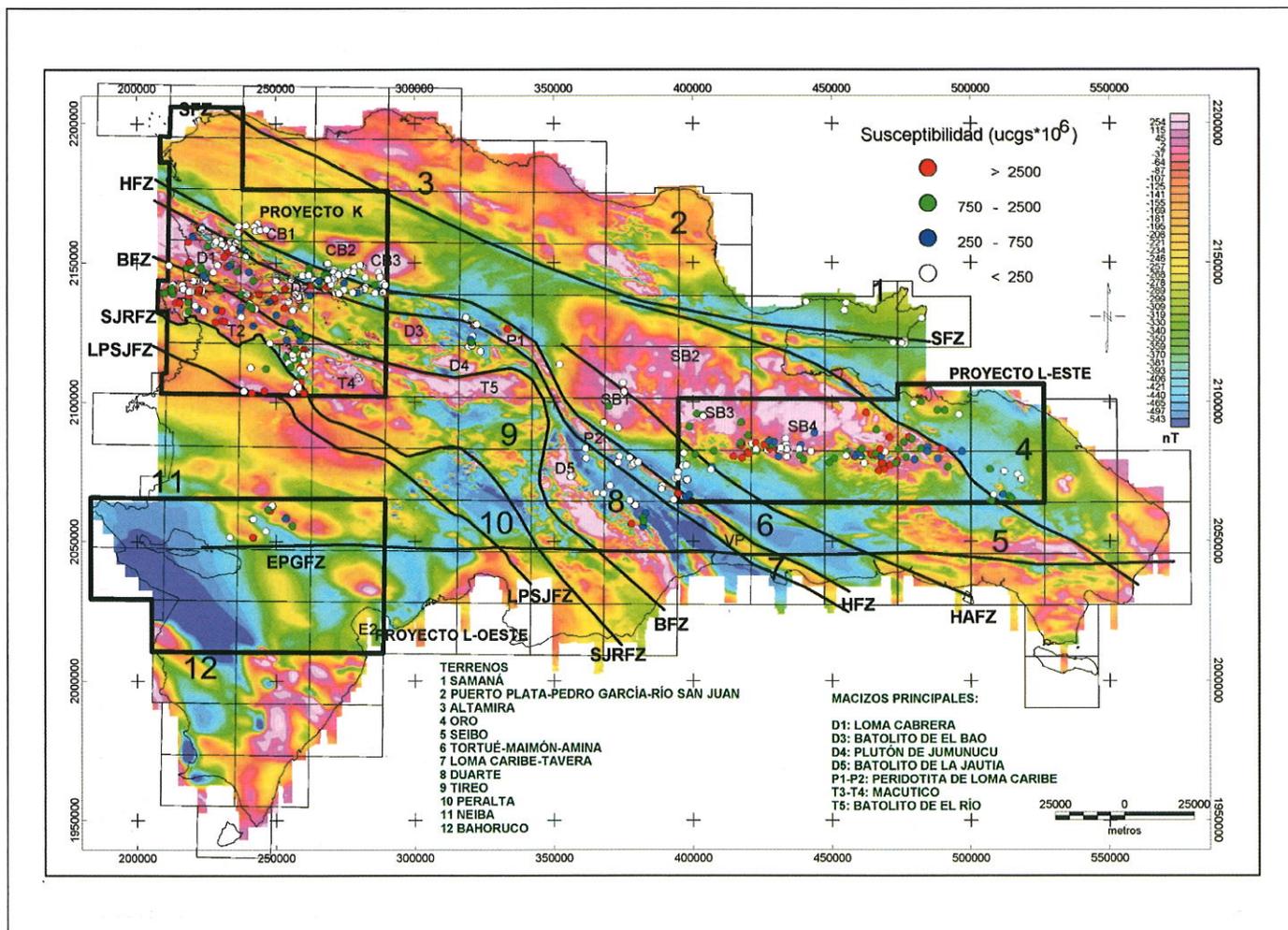


Figura 2. Susceptibilidad de 586 muestras sobre campo magnético total reducido al polo de la República Dominicana
 Figure 2. Reduced to pole total magnetic field of the Dominican Republic with 586 magnetic susceptibility samples on top

nética, es la adopción de los límites del paramagnetismo y distintos umbrales de ferromagnetismo a los que referir parámetros estadísticos generales. Aunque es posible utilizar distintos umbrales de susceptibilidad para rocas ligeras y pesadas (Henkel, 1994), en este trabajo, en aras a simplificar categorías en un área con fuerte presencia de magnetita, los valores de susceptibilidad se agrupan en cuatro niveles (kmp, kmf1, kmf2, y kmf3, Tabla II). A estos rangos referiremos medias y modas, y serán los usados en los códigos de color de los mapas de posición de muestras (Fig. 2). Para las densidades se han usado también cuatro rangos (Fig. 3).

Los dos rasgos esenciales del magnetismo de la República Dominicana (Fig. 2) son su espectacular estructuración en bandas NO-SE y las fuertes anomalías debidas al magmatismo presente en la isla.

Estructuración en bandas NO-SE

La división estructural de terrenos de la isla queda perfectamente delimitada en las imágenes magnéticas por medio de una serie de accidentes magnéticos mayores muy nítidos en esa dirección, según las cizallas que limitan dichos terrenos. Es preciso destacar que la imagen magnética de la República Dominicana permite el trazado y prolongación de la mayor parte de estas cizallas sin apenas ambigüedades. En disposición subparalela a la de los accidentes principales, existe un importante número de alineaciones magnéticas de menor entidad, perfectamente apreciable en la imagen de gradiente magnético vertical.

Las grandes discontinuidades magnéticas que compartimentan toda la isla son, de NE a SO: la zona de falla septentrional SFZ (Figs. 1, 2), ramificada en su

LITOLOGÍA	C	N	GRUPO / UNIDAD																					
			T	D	RV	SC	PV	LC	Ya	DJ	BJ	Lc	MA	AM	LR	AG	Ne	OR	SE	GJ	CD	PE	Cs	le
ARENISCAS	11	6					1					2	1	1								1		
ANDESITAS	21	31	12										1	9	5				2	2				
DIABASAS	22	12	6	3	1							1								1				
BASALTOS	23	106	12	22	3	7	1		1			10	1	29	7	3	1	5	2	2				
DACITAS	24	28	14	2									4	5	2					1				
RIOLITAS	25	41	10	5										22					3	1				
TOBAS ÁCIDAS	26	38	14									6	1	8	2			2	5					
TOBAS BÁSICAS	27	37	9	1					7			1		12	1	1	1	4						
VOLCÁNICAS		299																						
GRANITOS	31	8	2	1								4	1											
TONALITAS	33	52	9	3								23	3	3	2								9	
DIORITAS	34	24	5	1			1					12		1						1			3	
GABROS	35	25	2	4					7			11											1	
ULTRABÁSICAS	36	16	2	7					1			6												
PLUTÓNICAS		125																						
ANFIBOLITAS	41	32	2	19	9									2										
ESQUISTOS	42	64	5	10	2			1						24									22	
GNEISES	43	7							3					1									3	
PIZARRAS	44	21	5	6										7									3	
SERPENTINITAS	45	13		1				6			4							2						
MÁRMOLES	46	15	2	2																	4		7	
ECLOGITAS	47	10						1															9	
METÁMÓRFICAS		162																						
TOTAL		586	111	87	15	7	3	8	11	8	4	56	24	46	88	17	4	2	13	12	8	5	44	13

Tabla I. Litologías y distribución de las 586 muestras de petrofísica de la República Dominicana. (C: código litológico. N: nº de muestras por litología. Unidades: T-Tireo, D-Duarte, RV-Río Verde, SC-Siete Cabezas, PV-Peralvillo, LC-Loma Caribe, Ya-Batolito Yautía, DJ-Don Juan, BJ-Bejucal, Lc-Batolito Loma Cabrera, Ma-Fm. Magua, AM-Amina-Maimón, LR-Los Ranchos, AG-Complejo VS El Aguacate, Ne-Neiba, OR-Oro, SE-Seibo, GJ-Guayabas, CD Dajabón, PE-Peralta, Cs. Samaná, le-Intrusivas zona L-Este. Ver Figura 2)

Table I. Lithologies and distribution of the 586 samples from the Dominican Republic. (C: lithological code. N: num. of samples of each lithology. Units: T-Tireo, D-Duarte, RV-Río Verde, SC-Siete Cabezas, PV-Peralvillo, LC-Loma Caribe, Ya-Batolito Yautía, DJ-Don Juan, BJ-Bejucal, Lc-Batolito Loma Cabrera, Ma-Fm. Magua, AM-Amina-Maimón, LR-Los Ranchos, AG-Complejo VS El Aguacate, Ne-Neiba, OR-Oro, SE-Seibo, GJ-Guayabas, CD. Dajabón, PE-Peralta, Cs. Samaná, le-Intrusivas L-Este zone. See Figure 2)

MODA	FRACCIÓN	ANOMALÍA	% Fe ₃ O ₄
kmp: k<250·10 ⁶ ucgs	Fracción paramagnética.	Hasta 1 nT	(% Fe ₃ O ₄ <0.1),
kmf1: 250<k<750·10 ⁶ ucgs	Fracción débilmente ferromagnética.	Hasta 10 nT	(0.1<% Fe ₃ O ₄ <0.3),
kmf2: 750<k<2500·10 ⁶ ucgs	Fracción moderadamente ferromagnética.	Hasta 100 nT	(0.3<% Fe ₃ O ₄ <1),
kmf3: k>2500·10 ⁶ ucgs	Fracción ferromagnética.	Hasta 500 nT	(1<% Fe ₃ O ₄ <4.0)*

Tabla II. Límites de susceptibilidad, contenidos en magnetita y orden de magnitud de las anomalías magnéticas producidas. (*El máximo de susceptibilidad de los datos registrados en este trabajo ha sido de unas 10.000 ·10⁶ ucgs, correspondiente a alrededor de un 4% de Fe₃O₄)

Table II. Susceptibility limits, magnetite contents and magnitude order of the derived magnetic anomalies. (*Maximum value of susceptibility from the data analysed in this work is about 10.000 ·10⁶ ucgs, which corresponds to about 4% de Fe₃O₄)

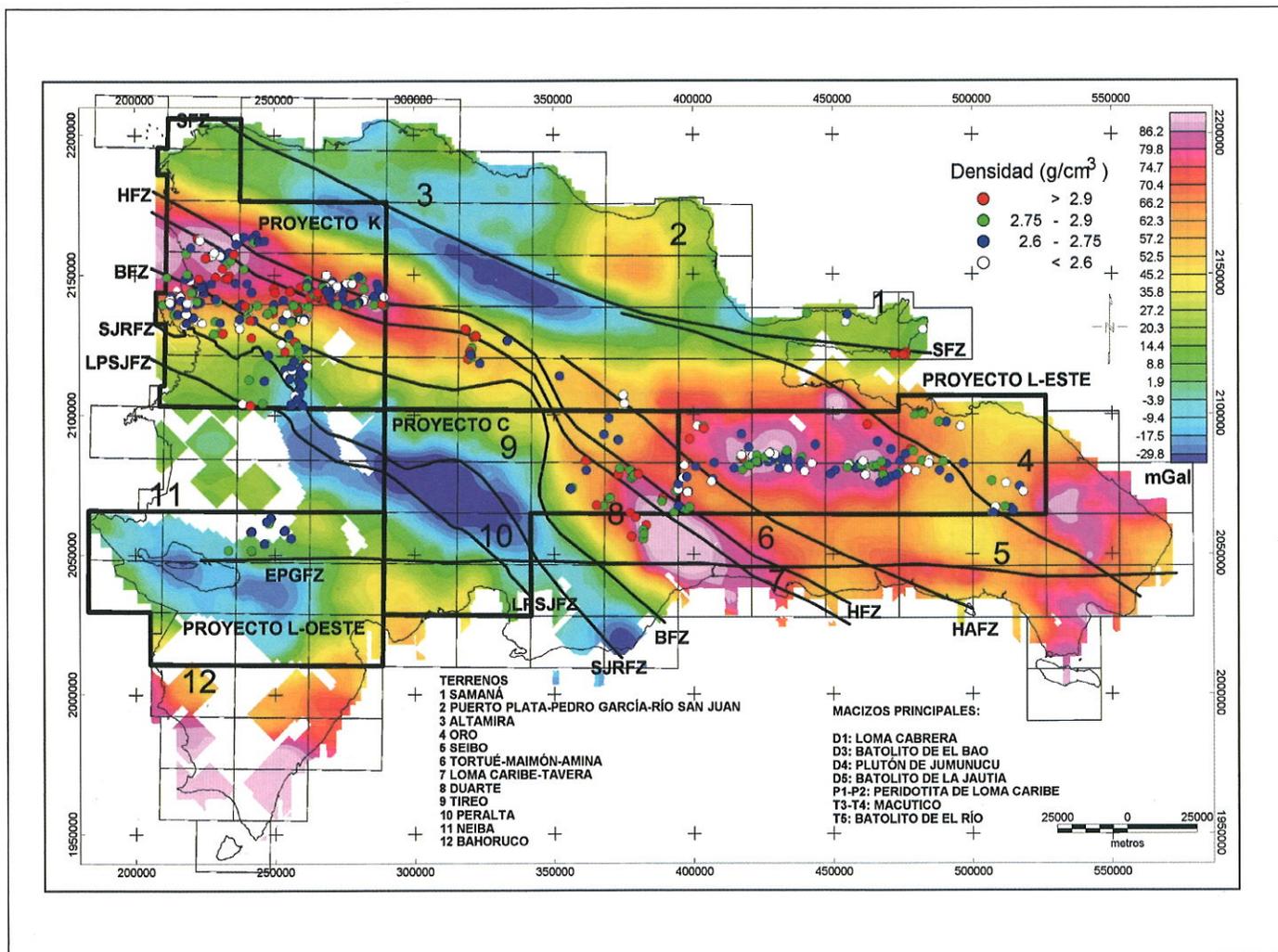


Figura 3. Densidad de 586 muestras sobre la anomalía de Bouguer de la República Dominicana
 Figure 3. Bouguer anomaly of the Dominican Republic with 586 density samples on top

extremo SE; la zona de falla del Hatillo, HAFZ; la zona de falla de La Española, HFZ; la zona de falla de Bonao-La Guácara, BGFZ; la zona de falla de San José-Restauración, SJRFZ; y la zona de falla de San Juan-Los Pozos, SJLPFZ. Entre estos accidentes son especialmente importantes SFZ y sus ramificaciones, que delimita el prisma de acreción y fragmentos de cuencas oceánicas (Altamira y complejos metamórficos de Puerto Plata, Río San Juan y Samaná; Fig. 1) adosados al arco, así como HFZ y SJRFZ, que delimitan la zona volcánico-plutónica del arco de islas (terrenos Duarte y Tiroo), y la cuenca de tras-arco, respectivamente. La expresión magnética de la Cordillera Central queda claramente enmarcada entre HFZ y SJRFZ (por ejemplo, detalle de la Fig. 4). Estas zonas de falla, más o menos amplias, están o bien

demagnetizadas (SFZ, HFZ, SJRFZ), o muestran materiales magnéticos en su interior (BFZ).

El campo magnético de la isla proporciona excelentes ejemplos de cartografía magnética de unidades geológicas discretas. Por ejemplo, en toda la banda al NE de HFZ existen dos zonas de diferente textura magnética: al norte, en el Cibao, las anomalías (CB1-CB3) son debidas a fuentes cuya profundidad puede llegar a ser kilométrica, mientras que al sureste, en los terrenos del Seibo (SB1-SB4) y Oro, son mucho más someras. Las direcciones magnéticas sobre las formaciones volcanodetríticas de estos dos últimos terrenos del extremo oriental de la isla son muy claras (Fig. 2, y detalle de la Fig. 5; P3 a P12 son estructuras de plegamiento), por lo que el magnetismo es fundamental para la correcta cartografía geológica de

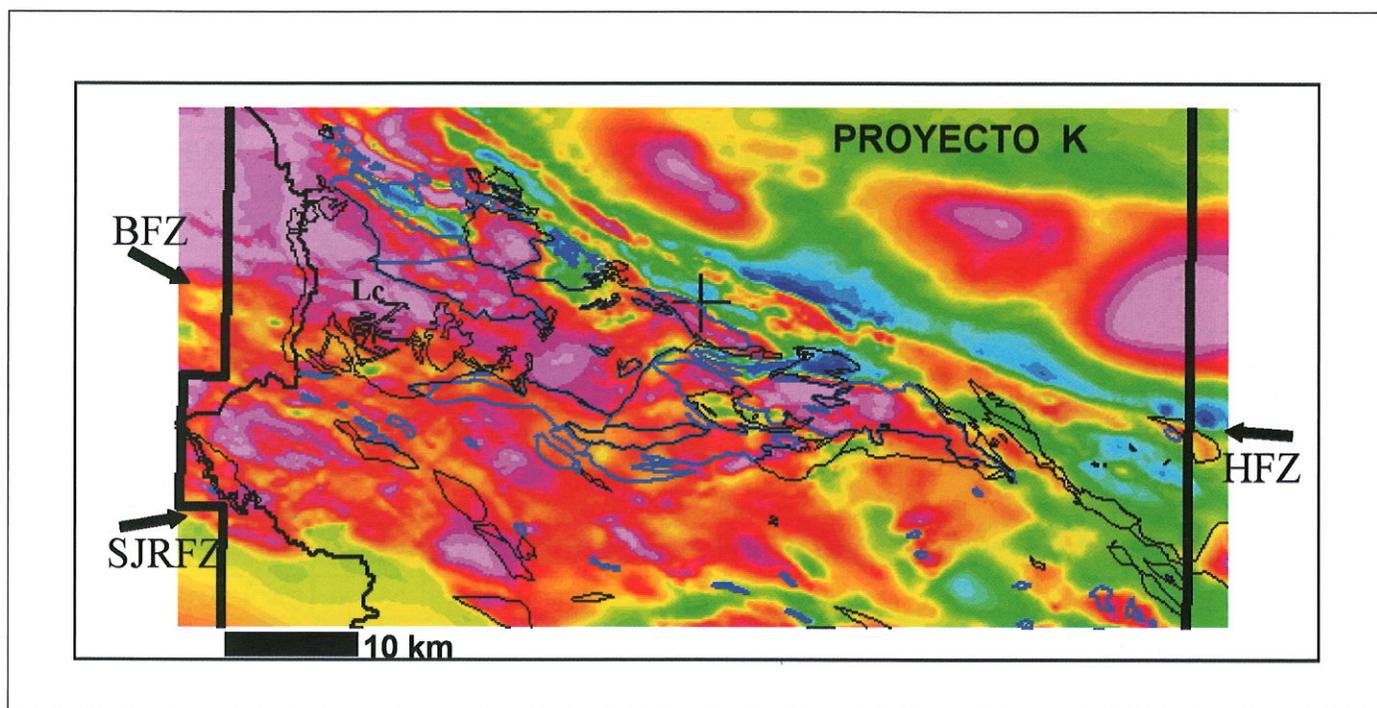


Figura 4. Detalle del mapa de campo magnético reducido al polo en la Cordillera Central. HFZ: Zona de Falla de La Española; BFZ: Zona de Falla de Bonafo; SJRFZ: Zona de Falla de San José-Restauración. Negro: tonalitas-dioritas (Lc: complejo plutónico de Loma-Cabrera). Azul: gabros. Misma escala de colores que en la Figura 2

Figure 4. Detail of the reduced to pole magnetic field map at the Cordillera Central. HFZ: La Española Fault Zone; BFZ: Bonafo Fault Zone; SJRFZ: San José-Restauración Fault Zone. Bold: tonalites-diorites (Lc: Loma-Cabrera plutonic complex). Blue: gabbros. Same colour scale as in Figure 2

toda esta parte de la isla (y en particular, en buena parte del bloque "L-este").

Fuertes anomalías debidas a un magmatismo ubicuo en toda la isla.

Las intensidades y gradientes magnéticos son máximos no sólo en las zonas donde este magmatismo es aflorante, sino también en áreas cubiertas por sedimentos fluvio-marinos, lo que indica su proximidad a la superficie. Los valores de susceptibilidad magnética indican que se trata de un magmatismo bimodal, con zonas magnéticas y paramagnéticas en las intrusiones mayores (Loma Cabrera, Macutico, etc.) y ejes volcánicos principales de la isla. Si en la Fig. 4 se hubieran representado los valores de susceptibilidad de un (hipotético) muestreo de detalle, se observaría un amplio rango de susceptibilidades sobre cualquier anomalía.

En general, las profundidades de emplazamiento de las fuentes que producen las anomalías magnéticas son someras (hectométricas) en las áreas mag-

máticas de la isla y más profundas (kilométricas) en áreas de relleno, como las cuencas de El Cibao, Azua, y Enriquillo.

La anomalía de Bouguer (Fig. 3) de la República Dominicana procede de una compilación realizada por el NGA (National Geospatial-Intelligence Agency, USA). La base de datos del NGA contiene información de diversas campañas realizadas por distintas entidades entre 1939 y 1991. Entre dichas entidades se encuentran IFREMER, Royal Astronomical Society, Cambridge University, Lamont-Doherty Geological Observatory y Woods Hole Oceanographic Institution. Los datos proceden de 3012 estaciones con una resolución de unos dos mGal y densidad de reducción de 2.67 g/cm³. La densidad media de estaciones es una cada 20 km². Aunque la capacidad resolutoria del mapa de Bouguer es muy inferior a la del mapa magnético (10-20 lecturas/ km²), en el primero quedan también reflejadas las principales cizallas que compartimentan la isla. Igualmente, son fácilmente apreciables las intensas anomalías de gravedad procedentes de los batolitos y complejos ígneos de las cordilleras central y oriental, por ejemplo, en las anomalías D1-D3, SB3-

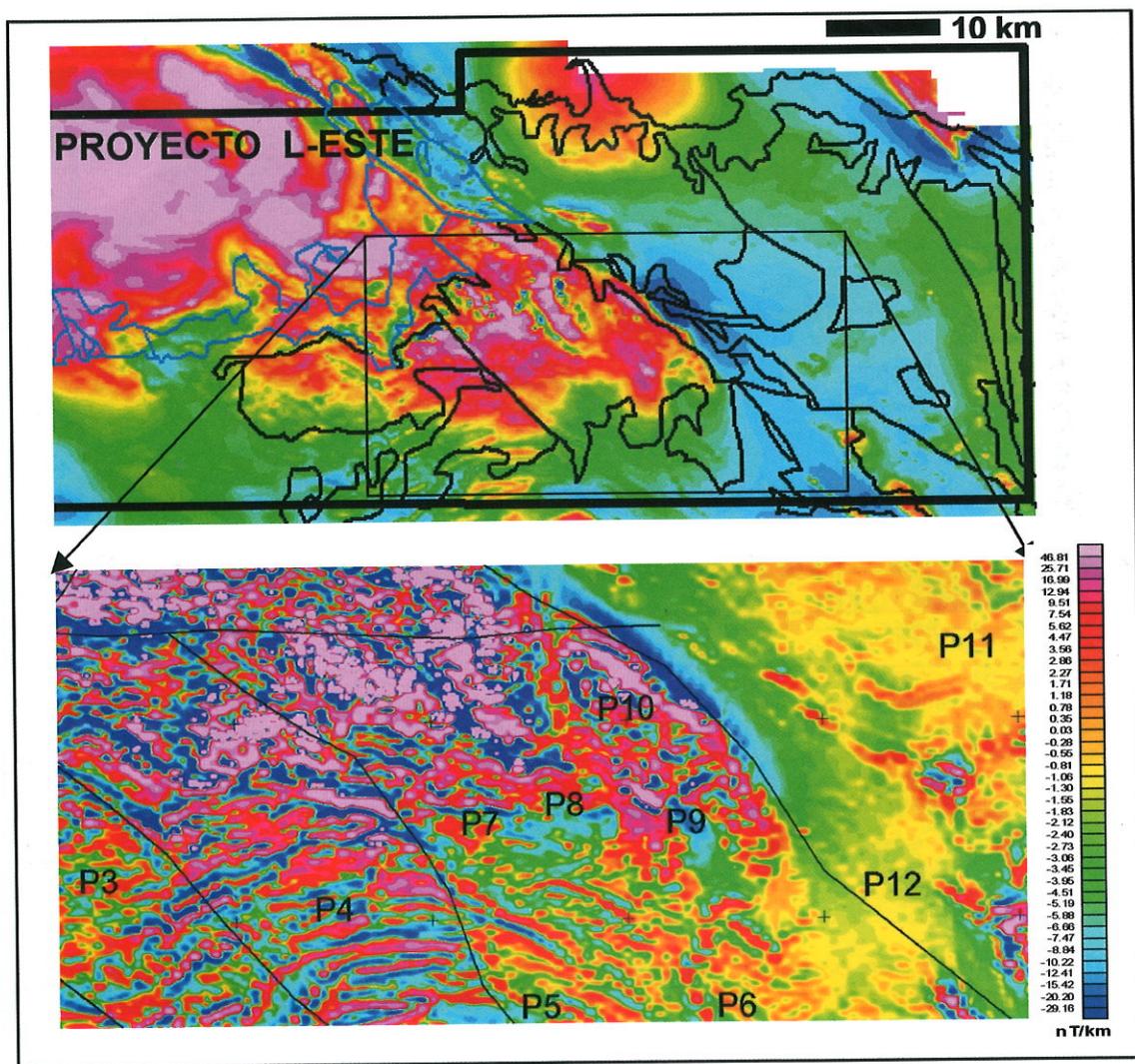


Figura 5. Arriba: mapa de campo magnético reducido al polo en Seibo y Oro. Negro: Fm. Las Guayabas. Azul: Fm. Los Ranchos. Misma escala de colores que Figura 2. Abajo: detalle del gradiente magnético vertical
 Figure 5. Upper panel: reduced to pole magnetic field in Seibo and Oro. Black: Las Guayabas Fm. Blue: Los Ranchos FM. Same colour scale as in Figure 2. Lower panel: detailed image of the vertical magnetic gradient

SB4, Fig. 3; obsérvese que la baja resolución tanto instrumental como espacial del mapa de Bouguer origina ciertas inconsistencias en la coincidencia de parte de los valores más altos de densidad del muestreo y las anomalías de Bouguer.

Densidad y susceptibilidad por grupos de rocas

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla III y la Fig. 6.

Rocas volcánicas

Andesitas

La densidad de las 31 muestras que se han recogido se encuentra bien agrupada en torno a la media de 2.76 g/cm³, con valores muy típicos para esta litología (Tabla III). Se trata de rocas de densidad intermedia, capaces de producir anomalías gravimétricas si los volúmenes implicados son apreciables.

En cuanto a resultados de susceptibilidad magné-

LITOLOGÍA	N	kmi	kmx	kmp	kmf1	kmf2	kmf3	dmi	dmx	dm	dmd	Q _{nm}
ANDESITAS	31	26	448	114 (10)	461 (2)	1928 (7)	3465 (12)	2.64	2.86	2.76	2.72	-
BASALTOS	106	10	8251	118 (36)	443 (8)	1603 (25)	4060 (37)	2.66	3.06	2.84	2.82	0.56 (29)
DIABASAS	12	53	4053	137 (4)	431 (5)	-	3191 (3)	2.74	2.99	2.90	2.93	-
DACITAS	28	24	4079	101 (13)	500 (7)	1779 (5)	3306 (3)	2.56	2.79	2.66	2.65	
RIOLITAS	41	11	4467	84 (22)	621 (5)	1292 (12)	3720 (2)	2.41	2.66	2.57	2.56	0.31-2.28
TOBAS ÁCIDAS	38	2	2874	46 (23)	477 (5)	1503 (9)	-	2.29	2.67	2.53	2.54	
TOBAS BÁSICAS	37	11	4463	98 (14)	468 (7)	1297 (13)	3514 (3)	2.55	2.86	2.68	2.70	-
GRANITOS	8	25	215	65 (8)	-	-	-	2.51	2.62	2.57	2.57	-
TONALITAS	52	53	5523	124 (13)	516 (5)	1591 (22)	3746(12)	2.57	2.86	2.71	2.70	0.58 (17)
DIORITAS	24	43	4364	146 (12)	442 (4)	1501 (2)	3588 (6)	2.71	2.97	2.85	2.88	-
GABROS	25	66	5769	103 (9)	634 (3)	1447 (5)	3810 (10)	2.83	3.10	2.95	2.97	0.74 (13)
ULTRABÁSICAS	16	57	8735	134 (4)	-	1742 (4)	4852 (5)	2.90	3.16	3.00	2.99	-
ANFIBOLITAS	32	39	6008	115 (31)	-	-	-	2.69	3.08	2.90	2.86	0.05 (12)
ESQUISTOS	64	13	2107	64 (61)	-	-	-	2.49	2.88	2.69	2.68	0.12 (9)
GNEISES	7	33	897	62 (6)	-	-	-	2.59	2.82	2.72	-	-
PIZARRAS	21	22	104	47 (21)	-	-	-	2.31	2.70	2.52	2.53	-
SERPENTINITAS	13	417	5170	-	558 (3)	1324 (4)	3913 (6)	2.59	2.86	2.70	2.61	0.31 (5)
MÁRMOLAS	15	10	176	41 (15)	-	-	-	2.51	2.89	2.68	2.68	-
ECLOGITAS	10	46	197	90 (10)	-	-	-	2.97	3.18	3.04	3.06	-

Tabla III. Densidad y susceptibilidad de 586 muestras de petrofísica de la República Dominicana.

(N: n° de muestras. kmi, kmx: mínimo y máximo de susceptibilidad. Los rangos a los que se refieren los promedios de susceptibilidad del número de muestras indicado entre paréntesis son: $kmp < 250 \cdot 10^6$ ucgs; $250 < kmf1 < 750 \cdot 10^6$ ucgs; $750 < kmf2 < 2500 \cdot 10^6$ ucgs; $kmf3 > 2500 \cdot 10^6$ ucgs (ver Tabla II para descripción de estos parámetros). Negrita: promedio principal. dmi, dmx, dm, dmd: mínimo, máximo, media y moda de densidad en g/cm^3 . Q: mediana del parámetro de Koenigsberger; el valor de la mediana se refiere al n° de muestras indicado entre paréntesis)

Table III. Density and susceptibility of 586 petrophysical samples from the Dominican Republic

(N: num of samples. kmi, kmx: susceptibility minimum and maximum. Ranges for the average susceptibility of the number of samples indicated between brackets are: $kmp < 250 \cdot 10^6$ ucgs; $250 < kmf1 < 750 \cdot 10^6$ ucgs; $750 < kmf2 < 2500 \cdot 10^6$ ucgs; $kmf3 > 2500 \cdot 10^6$ ucgs (see Table II for description of these parameters). Bold: main average. dmi, dmx, dm, dmd: minimum, maximum, mean and mode of density in g/cm^3 . Q: median of Koenigsberger parameter; median value is referred to the number of samples indicated in brackets)

tica, las fracciones para y ferromagnética aparecen bien diferenciadas en la Fig. 6. Son mayoría las muestras ferromagnéticas, con una media $kmf3(12) = 3465 \cdot 10^6$ ucgs (media de 12 datos con $k > 2500 \cdot 10^6$ ucgs), lo que representa contenidos de magnetita del orden del 1.5%. Por tanto, son rocas que deben producir anomalías magnéticas generalizadas en los mapas de la República Dominicana, ya que las muestras ferromagnéticas se distribuyen en casi todas las unidades muestreadas, como en las Fms. Los Ranchos y Las Guayabas, en Tireo, y en el complejo volcanosedimentario del Aguacate.

Basaltos

Son las rocas más muestreadas: 12 en Tireo, 22 en el Complejo Duarte, 10 en la Fm. Magua, 7 en la Fm. S. Cabezas, 29 en Los Ranchos, 7 en el Aguacate, etc., hasta un total de 106 muestras. Los promedios de densidad por formación están comprendidos entre $2.80 g/cm^3$ (Tireo) y $2.96 g/cm^3$ (S. Cabezas). Excluidos dos valores anómalos de 2.50 y $3.12 g/cm^3$, el rango global es bastante amplio ($2.66-3.06 g/cm^3$), y el promedio de $2.84 g/cm^3$, ambos usuales en este tipo de rocas. La dispersión de densidades es debida a lo

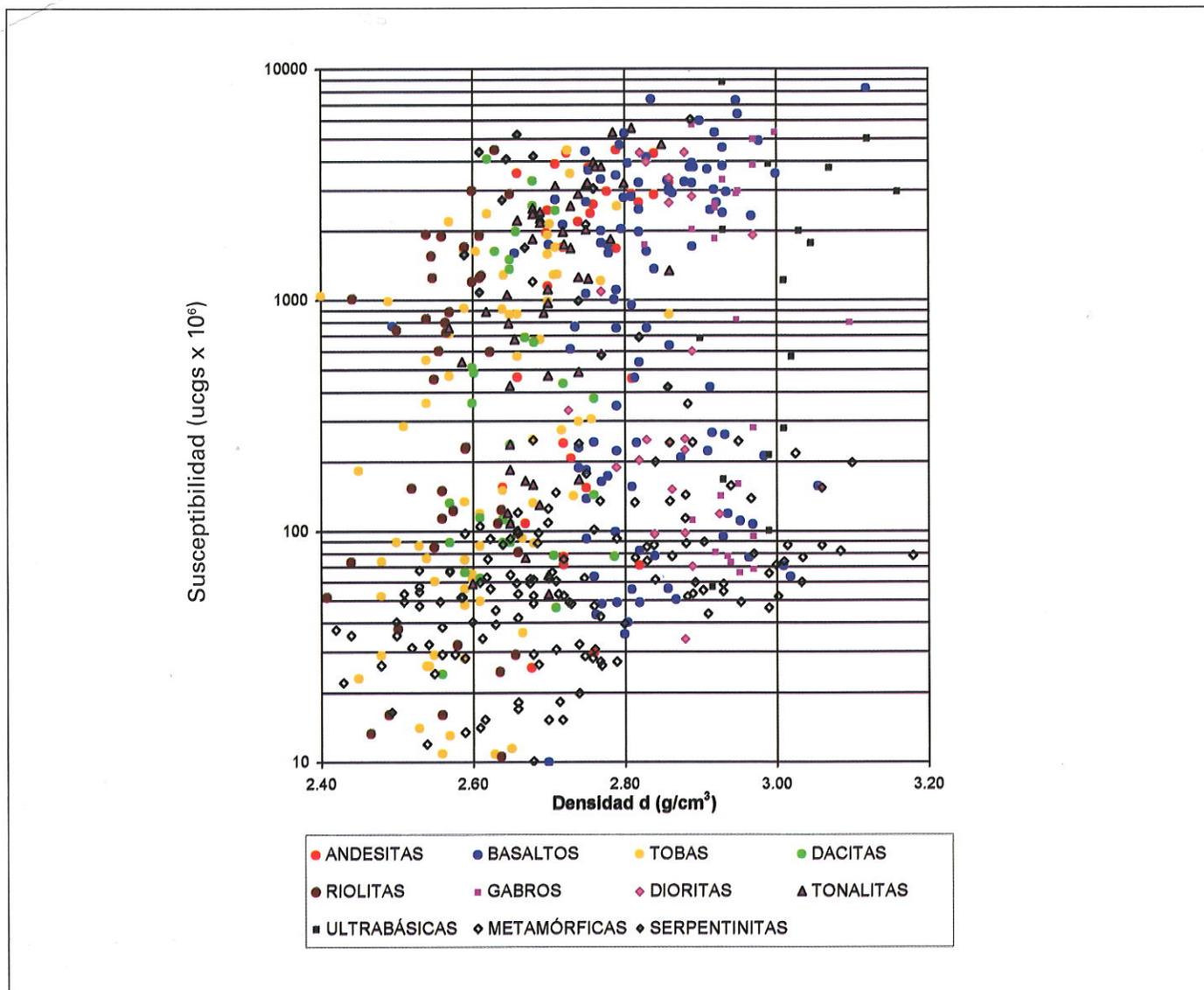


Figura 6. Diagrama densidad-susceptibilidad de rocas volcánicas, plutónicas y metamórficas (561 muestras de la República Dominicana)
 Figure 6. Density-susceptibility crossplot of volcanic, plutonic and metamorphic rocks (561 samples from the Dominican Republic)

genérico de la denominación "basalto", que suele englobar a un conjunto de litologías heterogéneas que además de basaltos puede incluir términos más ácidos o más básicos, y con diferente estructura (lava/brecha/toba). Lógicamente, los basaltos producirán anomalías gravimétricas positivas, tanto más notables cuanto menos denso sea su encajante meta-sedimentario, de modo que los basaltos suelen ofrecer cartografías gravimétricas bastante precisas respecto al mismo.

En el conjunto de susceptibilidades magnéticas se observa claramente la existencia de varios grupos, uno con valores muy bajos o bajos (<250·10⁻⁶ ucgs, 36

ejemplares) con un promedio paramagnético $k_{mp}=118 \cdot 10^{-6}$ ucgs, y otro, que presenta varias modas ferromagnéticas (agrupaciones representadas en la Fig. 6):

- 8 muestras con resultados entre 250 y 750·10⁻⁶ ucgs ($k_{mf1}(8)=443 \cdot 10^{-6}$ ucgs),
- 25 datos entre 750-2500·10⁻⁶ ucgs ($k_{mf2}(25)=1603 \cdot 10^{-6}$ ucgs), y
- 37 valores superiores a 2500·10⁻⁶ ucgs (media k_{mf3} igual a 4060·10⁻⁶ ucgs)

Las modas ferromagnéticas más importantes parecen próximas a 1700 y 3700·10⁻⁶ ucgs, correspondientes, respectivamente a un 0.7 y 1.5% modales de Fe₃O₄.

Por formaciones, los basaltos de Tireo y las Fms. Magua, S. Cabezas, El Aguacate, Neiba, Los Ranchos, Las Guayabas y El Seibo son mayoritariamente ferromagnéticos. En Duarte y Río Verde dominarían los basaltos paramagnéticos. Este comportamiento magnético polimodal se corresponde bien con las fuertes anomalías y áreas de tranquilidad magnética existentes sobre los basaltos en toda la zona de estudio. Estas rocas se configuran como uno de los marcadores magnéticos principales de la República Dominicana. Los basaltos espilitizados se caracterizan por presentar albita procedente de una plagioclasa más cálcica y en gran parte seritizada por procesos supergénicos, clorita procedente de antiguos ferromagnesianos, epidota y leucoxeno. Suelen contener, además, apreciables proporciones de magnetita (en buena parte deutérica), la cual presenta una gran variabilidad en su tamaño de grano, desde los superiores a 0.50 mm, a otros comprendidos entre 0.010 y 0.020 mm.

Diabasas

Son rocas algo más densas que los basaltos (Tabla III), con una dispersión de densidades menor, como corresponde a rocas intrusivo-subvolcánicas más homogéneas. La susceptibilidad magnética exhibe la tendencia típica a la agrupación bimodal, con dos grupos de valores: uno paramagnético (4 datos, $kmp(4)=137 \cdot 10^{-6}$ ucgs), y otro ferromagnético ($kmf1(5)=431 \cdot 10^{-6}$ ucgs, $kmf3(3)=3191 \cdot 10^{-6}$ ucgs). Aunque la muestra no es muy grande (comprende sólo 12 ejemplares, de las que seis corresponden a Tireo y tres a Duarte), estas rocas se configuran también como un marcador magnético de la República Dominicana, probablemente no tan importante como los basaltos, porque suelen predominar en ellas las fracciones paramagnética-débilmente ferromagnéticas ($k < 250$, $250 < k < 750 \cdot 10^{-6}$ ucgs, respectivamente).

Dacitas

La densidad oscila en un rango de 0.23 g/cm^3 en torno a una media de 2.66 g/cm^3 . Se trata de rocas de densidad intermedia-baja, pero capaces de producir anomalías gravimétricas, en un entorno de rocas metasedimentarias menos densas, si los volúmenes implicados son apreciables. Las dacitas son rocas de susceptibilidad polimodal ($kmp(13)=101 \cdot 10^{-6}$ ucgs), $kmf1(7)=500 \cdot 10^{-6}$ ucgs, $kmf2(5)=1779 \cdot 10^{-6}$ ucgs, $kmf3(3)=3306 \cdot 10^{-6}$ ucgs). La fracción paramagnética

(13 datos) es característica de Amina-Maimón y Duarte, mientras que las muestras ferromagnéticas (15 datos, bien separados de los anteriores, Fig. 6) corresponden a Tireo, Los Ranchos y El Aguacate. En los mapas de campo magnético reducido al polo, las series dacíticas suelen albergar algunas anomalías importantes, normalmente debidas a diabasas y basaltos con las que se encuentren mezcladas, pero en el caso de la República Dominicana las mismas dacitas (en las Formaciones citadas) deben producir anomalías magnéticas notorias.

Riolitas

Se han recogido fundamentalmente en Tireo (10), Duarte (5), y Los Ranchos (22). Las riolitas son rocas de densidad baja (media de 2.57 g/cm^3 y moda de 2.56 g/cm^3), que se asociarán a anomalías de gravedad negativas. Exhiben tendencia a la bimodalidad de susceptibilidades (Fig. 6), con 22 muestras paramagnéticas ($kmp=84 \cdot 10^{-6}$ ucgs), y otras 12 moderadamente ferromagnéticas ($kmf2=1292 \cdot 10^{-6}$ ucgs), correspondientes a un 0.3-0.6% de Fe_3O_4 . Existen dos muestras con susceptibilidad del orden de $3000-4000 \cdot 10^{-6}$ ucgs (1.2-1.6% de Fe_3O_4). Por tanto, se trata de rocas en las que domina el paramagnetismo, pero que pueden producir anomalías magnéticas discernibles (en Tireo y Los Ranchos). En la muestra, las riolitas de Duarte presentan un claro carácter paramagnético (susceptibilidad entre 16 y $113 \cdot 10^{-6}$ ucgs en sus 5 muestras). En el mapa regional de campo magnético reducido al polo se pueden asociar fuertes anomalías a afloramientos occidentales de estas rocas en Tireo, cartografiándolos con bastante precisión, por lo que deben existir modas elevadas de susceptibilidad aquí (suele ocurrir que, en detalle, la cartografía magnética de rocas ferromagnéticas ácidas sea más segura que la de rocas ferromagnéticas básicas).

Tobas

El grupo de tobas ácidas (muestreadas sobre todo en Tireo, Los Ranchos, Magua y Las Guayabas, con 14, 8, 6 y 5 muestras, respectivamente) es de densidad y susceptibilidad similares a las de las riolitas. La densidad está comprendida en un amplio rango de 0.38 g/cm^3 (Tabla III), con un histograma de densidades muy desagrupado que exhibe una media de 2.53 g/cm^3 . Igual que las riolitas, se trata de rocas de densidad baja, que se asociarán a anomalías gravimétri-

cas negativas. Son rocas en las que domina el paramagnetismo, existiendo 23 muestras con $\%Fe_3O_4 < 0.1$ ($kmp = 46 \cdot 10^{-6}$ ucgs). Cinco datos son ligeramente ferromagnéticos, con $kmf1 = 477 \cdot 10^{-6}$ ucgs, correspondiente a un 0.2% de Fe_3O_4 , y nueve presentan contenidos en magnetita algo mayores ($\cong 0.6\%$, $kmf2 = 1503 \cdot 10^{-6}$ ucgs), localizadas en Tireo. Por tanto, se trata de rocas que deben producir anomalías magnéticas moderadas. En el mapa regional de campo reducido al polo las tobas se encuentran tanto en zonas de relieve magnético bajo como alto; en este último caso lo probable es que la fuente principal de la anomalía magnética sea una litología más ferromagnética, ya sea ácida o básica.

Por lo que respecta al grupo de tobas intermedio-básicas (37 muestras; 9 de Tireo, 7 de D. Juan, 12 de Los Ranchos y 4 del Seibo), es de densidad y susceptibilidad similares a las de las dacitas (Tabla III). Las susceptibilidades son polimodales ($kmp(14) = 98 \cdot 10^{-6}$ ucgs, $kmf1(7) = 468 \cdot 10^{-6}$ ucgs, $kmf2(13) = 1297 \cdot 10^{-6}$ ucgs, y $kmf3(3) = 3514 \cdot 10^{-6}$ ucgs). En los mapas de campo magnético reducido al polo de la República Dominicana las series epiclásticas pueden albergar anomalías magnéticas importantes, con una contribución significativa de tobas básicas (Tireo, Los Ranchos, El Seibo).

Rocas plutónicas

Tonalitas

Disponemos de 12 muestras de tonalitas procedentes de plutones de Tireo y Duarte y 23 del batolito de Loma-Cabrera, todos de la Cordillera Central, y de 11 que provienen de diversos intrusivos de Los Ranchos y de la Cordillera Oriental.

La densidad se agrupa bien alrededor de la media y la moda (casi coincidentes, Tabla III) ambas típicas de esta litología, capaz de producir anomalías gravimétricas de intensidad intermedia. Las susceptibilidades son predominantemente ferromagnéticas (Tabla III, Fig. 6). Además de 13 muestras paramagnéticas ($kmp = 124 \cdot 10^{-6}$ ucgs), las modas ferromagnéticas son $kmf2(22) = 1591 \cdot 10^{-6}$ ucgs, y $kmf3(12) = 3746 \cdot 10^{-6}$ ucgs (0.6-1.4% de Fe_3O_4). Dado que las tonalitas ferromagnéticas son mayoritarias en los intrusivos de las cordilleras de la República Dominicana, se configuran como una litología claramente responsable de buena parte de las anomalías magnéticas que caracterizan las citadas cordilleras. En los complejos ígneos zonados, las rocas intermedias (tonalitas y monzodioritas) suelen ser notoriamente ferromagnéticas, con la magnetita normalmente asociada al anfíbol. Las anomalías mag-

néticas de estos batolitos suelen estar constituidas por aportaciones de todas las litologías intermedio-básicas, pero la cartografía magnética suele ser más fiable en las rocas intermedias que en las básicas, al ser las primeras más consistentemente ferromagnéticas que las segundas.

Dioritas

Se han muestreado en plutones de Tireo y Duarte (6), en el batolito de Loma-Cabrera (12), y en intrusivos de la Cordillera Oriental (3). Estas rocas son más densas que las tonalitas (media de densidad de 2.85 g/cm³, frente a 2.71 g/cm³, Tabla III). La susceptibilidad magnética es bimodal, siendo la moda dominante paramagnética ($kmp(12) = 146 \cdot 10^{-6}$ ucgs, $kmf3(6) = 3588 \cdot 10^{-6}$ ucgs). De acuerdo con los valores registrados, en los intrusivos de Tireo la bimodalidad es equilibrada, en el batolito de Loma-Cabrera domina netamente el paramagnetismo (10 de los 12 datos), mientras que en la Cordillera Oriental lo hace el ferromagnetismo. Podría ocurrir que los macizos dioríticos aislados fueran más ferromagnéticos que las dioritas de los complejos ígneos zonados. En todo caso, suele ser habitual en complejos ígneos zonados que estas rocas sean de cartografía magnética imprecisa.

Gabros

Disponemos de muestras de gabros procedentes de la Cordillera Central: 6 de plutones de Tireo y Duarte, 7 del macizo de Yautía y 11 del batolito de Loma-Cabrera.

Son rocas pesadas. Su elevada densidad, comprendida entre 2.83 g/cm³ y 3.10 g/cm³, con media de 2.95 g/cm³ y moda de 2.97 g/cm³, originará fuertes anomalías de gravedad sobre los intrusivos extensos de La Española. El rango de susceptibilidad magnética es $66-5769 \cdot 10^{-6}$ ucgs, con equilibrio de los valores para y ferromagnéticos ($kmp(10) = 103 \cdot 10^{-6}$ ucgs, $kmf2(5) = 1447 \cdot 10^{-6}$ ucgs, $kmf3(9) = 3810 \cdot 10^{-6}$ ucgs). Este comportamiento bimodal (gabros sin magnetita, gabros con un 1-2% de magnetita) va a dar lugar a zonas con anomalías intensas y otras sin anomalías en el mismo cuerpo o masa de gabros. Por ejemplo, en los gabros del batolito de Loma-Cabrera domina el paramagnetismo (7 de los 11 datos), menos acusado que en el caso de las dioritas. Normalmente, las facies olivínicas y anfibólicas suelen ser más consistentemente ferromagnéticas que las piroxénicas. En el caso de la muestra de la

República Dominicana ocurre así, siendo los gabros hornbléndicos claramente más ferromagnéticos que los piroxénicos.

Ultrabásicas

Se han muestreado en los terrenos Tireo y Duarte (9), y en el batolito de Loma-Cabrera (6). Estas rocas son las más densas entre las litologías ígneas muestreadas. La densidad oscila entre 2.90 g/cm³ y 3.16 g/cm³, con media de 3.00 g/cm³. Se trata de rocas que deben producir intensas anomalías de gravedad en los mapas de Bouguer de la Cordillera Central, anomalías que suelen cartografiarlas de manera precisa. La susceptibilidad magnética exhibe tendencia a la polimodalidad, siendo dominante el ferromagnetismo (kmp(4)=134·10⁻⁶ ucgs, kmf2(4)=1742·10⁻⁶ ucgs, kmf3(5)= 4852·10⁻⁶ ucgs). En el complejo de Loma-Cabrera domina netamente el ferromagnetismo (5 de las 6 muestras), por lo que los cumulados ultrabásicos se pueden cartografiar con precisión mediante los mapas de campo potencial.

Rocas metamórficas

Anfibolitas

Disponemos de muestras de Duarte (19) y de Río Verde (9). Las anfibolitas muestran densidades típicamente elevadas (media de 2.90 g/cm³), y valores de susceptibilidad paramagnéticos (kmp(31)= 115·10⁻⁶ ucgs; sólo existe una muestra ferromagnética, con susceptibilidad igual a 6008·10⁻⁶ ucgs), por lo que producirán anomalías positivas de gravedad en entornos de campo magnético de gradientes bajos. La pérdida de magnetización suele ser habitual en rocas provenientes del metamorfismo de lavas básicas, sean oceánicas o continentales.

Esquistos

Las muestras provienen de Amina-Maimón (24), los Complejos de Samaná (22) y Río Verde (2), y Duarte (10) y Tireo (5). El rango de densidades de estas rocas es muy amplio, extendiéndose desde 2.49 g/cm³ a 2.88 g/cm³. El histograma de densidades es polimodal, por lo que se sugiere la existencia de varios grupos litológicos. Los esquistos de Duarte y Río Verde son pesados (la media de 12 muestras es de 2.79 g/cm³), lo que indica un protolito básico. Casi en su totalidad son paramagnéticos (además de un dato

igual a 354·10⁻⁶ ucgs, la susceptibilidad máxima es 2107·10⁻⁶ ucgs), con valores tan habituales en esta litología como en las anfibolitas. En Amina-Maimón (24 muestras) se trata mayoritariamente de esquistos cuarzo-albíticos con una densidad media igual a 2.68 g/cm³, de carácter totalmente paramagnético (kmp(24)=56·10⁻⁶ ucgs). En las 22 muestras del Complejo Samaná, la densidad media de los esquistos es de 2.66 g/cm³, siendo igualmente paramagnéticos (kmp(22)=55·10⁻⁶ ucgs). La densidad media de los esquistos de Tireo (5) es también de 2.66 g/cm³, pero existen un par de muestras ligeramente ferromagnéticas.

Gneises

Se dispone de una pequeña muestra de 7 gneises, con tres gneises tonalíticos del macizo de La Yautía (densidad media de 2.76 g/cm³), y tres gneises cuarzo-feldespáticos del Complejo Samaná (densidad media de 2.66 g/cm³). Seis de las siete muestras son paramagnéticas.

Pizarras

Se han muestreado en los terrenos Tireo (5), Duarte (6), Amina-Maimón (7) y Samaná (3). La densidad de estas rocas oscila entre 2.31 y 2.70 g/cm³, sin que se puedan apreciar diferencias entre los datos de los diferentes terrenos. Son las rocas menos densas entre las muestreadas, ocupando, en general, zonas de mínimo en los mapas de anomalías gravimétricas de la República Dominicana. Todas las muestras son paramagnéticas (rango 22-104·10⁻⁶ ucgs, kmp(21)= 47·10⁻⁶ ucgs), y por tanto no producen anomalías magnéticas registrables en los vuelos de la República Dominicana.

Serpentinitas

Se han muestreado 13 serpentinitas, 6 de ellas procedentes de la Peridotita de Loma Caribe. Son algo más densas de lo que suele ser habitual en esta litología (lo que sugiere que la serpentización podría ser incipiente en algún caso). El rango de densidades es 2.59-2.86 g/cm³, con media de 2.70 g/cm³. Todas las serpentinitas son ferromagnéticas, con susceptibilidad comprendida entre 417-5170·10⁻⁶ ucgs. La moda principal es de unas 4000·10⁻⁶ ucgs (equivalente a 1.6% de magnetita), definida por muestras de Loma Caribe.

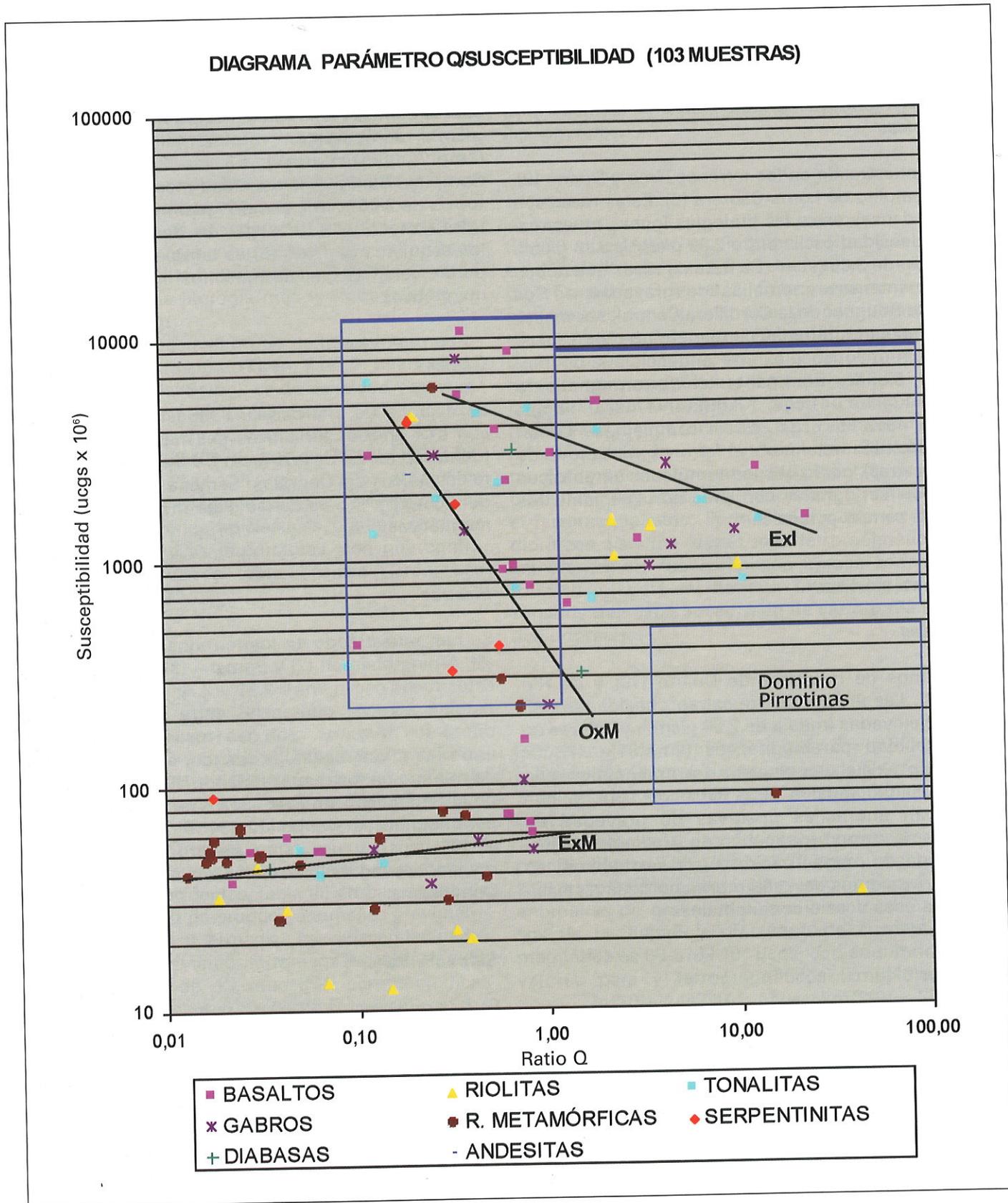


Figura 7. Magnetización remanente de rocas volcánicas, plutónicas y metamórficas de la República Dominicana
 Figure 7. Remanent magnetisation of volcanic, plutonic and metamorphic rocks from the Dominican Republic

Mármoles

Disponemos de 15 muestras de mármoles (rocas metacarbonatadas en general). Las densidades están comprendidas entre 2.51 y 2.89, con media de 2.68 g/cm³, típica de estas rocas. Son rocas totalmente paramagnéticas ($kmp(15)=41 \cdot 10^{-6}$ ucgs), por lo que no producirán anomalías magnéticas, ocupando regiones de campo de gradientes bajos. Los mármoles se han muestreado básicamente en los terrenos Tireo, Peralta y Samaná.

Eclogitas

Estas rocas se caracterizan por su elevada densidad, la más alta de las muestreadas (media de 3.04 g/cm³, rango 2.97-3.18 g/cm³), y su paramagnetismo típico ($kmp(10)=90 \cdot 10^{-6}$ ucgs). Se han muestreado en *melanges* de Loma-Caribe y la Cordillera Septentrional.

Magnetización remanente

Se han medido 104 magnetizaciones remanentes naturales J_{nrm} en muestras de roca no orientada en ejemplares del muestreo general. Por razones de coste y tiempo, se realizó una selección de los sitios muestreados para densidad y susceptibilidad magnética, centrada en las litologías volcánicas e intrusivas (con 48 y 30 mediciones, respectivamente) como causantes de las principales anomalías magnéticas de la zona estudiada.

Desde el punto de vista de interpretación de anomalías aeromagnéticas, la variable a analizar es el parámetro de Koenigsberger Q , razón magnetización remanente/magnetización inducida, J_{nrm}/J_i , en representación bivariante frente a la susceptibilidad k (Fig. 7). Cuando la magnetita es MD (multidominio), bien cristalizada, casi pura, su remanencia suele ser viscosa (adquirida por una larga exposición a un campo magnético débil), subparalela al campo terrestre actual H_t . Esto ocurre con frecuencia en rocas ígneas intrusivas, de modo que la susceptibilidad se ve incrementada en el ratio 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 contraste de magnetización que produce la anomalía magnética se puede escribir como $J_i + J_{nrm} = k \cdot H_t + (J_{nrm} \cdot J_i / J_i) = \Delta k (1+Q) \cdot H_t$; a $\Delta k \cdot (1+Q)$ (donde J y H son vectores) se le denomina susceptibilidad efectiva. El diagrama $k-Q$

permite reconocer, en primera aproximación, la fase ferromagnética presente y ciertos procesos a los que eventualmente se ha podido ver sometida (Henkel, 1991, 1994). Los campos de variación aproximados son (Fig. 7): en rocas con magnetita $100 < k < 10.000$, $0.01 < Q < 1$; con titanomagnetita $k > 1000$, $0.1 < Q < 10$; con pirrotina $k > 100$, $Q > 2$; con hematites $k < 100$, $1 < Q < 100$. Estos campos muestran en qué rocas domina la inducción J_i y en qué rocas lo hace la remanencia J_{nrm} .

Rocas ígneas

Dentro del conjunto volcánico básico se han medido 29 basaltos ($0.01 < Q < 23.2$; la mediana es $Q_{mn}=0.56$). Se dispone también de 3 andesitas y 3 diabasas (Fig. 7). Entre las volcanitas ácidas se han medido 13 riolitas y tobas ($0.02 < Q < 41.82$, $Q_{mn}=0.31$; en la fracción ferromagnética $Q_{mn}=2.28$, la distribución del parámetro Q es bimodal). Las volcanitas aparecen bien diferenciadas en el diagrama de la Fig. 7, en los dos grupos generales de rocas para y ferromagnéticas, y dentro de estas últimas entre muestras ubicadas en el dominio de las magnetitas o de las titanomagnetitas.

En los basaltos espilitizados es mayoritaria la fracción ferromagnética: son numerosas las rocas típicas del dominio de la magnetita multidominio (MD) con valores de Q típicamente viscosos ($0.2 < Q < 0.80$). La magnetita MD corresponde a tamaños superiores a 20 mm, con rangos $k-Q$ de $500 \cdot 10^{-6} < k < 10.000 \cdot 10^{-6}$ ucgs, y $Q < 1$, respectivamente; este rectángulo aproximado aparece representado en la parte izquierda de la Fig. 7. En algunas muestras de basaltos se puede hablar de una ligera tendencia a la oxidación de la magnetita (OxM en Fig. 7). Es típica de rocas afectadas por fuerte fracturación y/o procesos de erosión (Henkel, 1991). Con una oxidación completa, toda la magnetita pasa a hematites, lo que hace decrecer la susceptibilidad de la roca drásticamente (v.g. desde unas $4000 \cdot 10^{-6}$ ucgs a valores inferiores a $200 \cdot 10^{-6}$ ucgs). Los procesos de martitización observados en probeta son importantes en algunas pocas muestras. Adicionalmente, un grupo de muestras de basaltos podría delinear una directriz de exsolución de ilmenita (ExI en Fig. 7). 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 exsuelta. Esto favorece que el valor de Q se incremente gradualmente (Henkel 1991, 1994; Fig. 7).

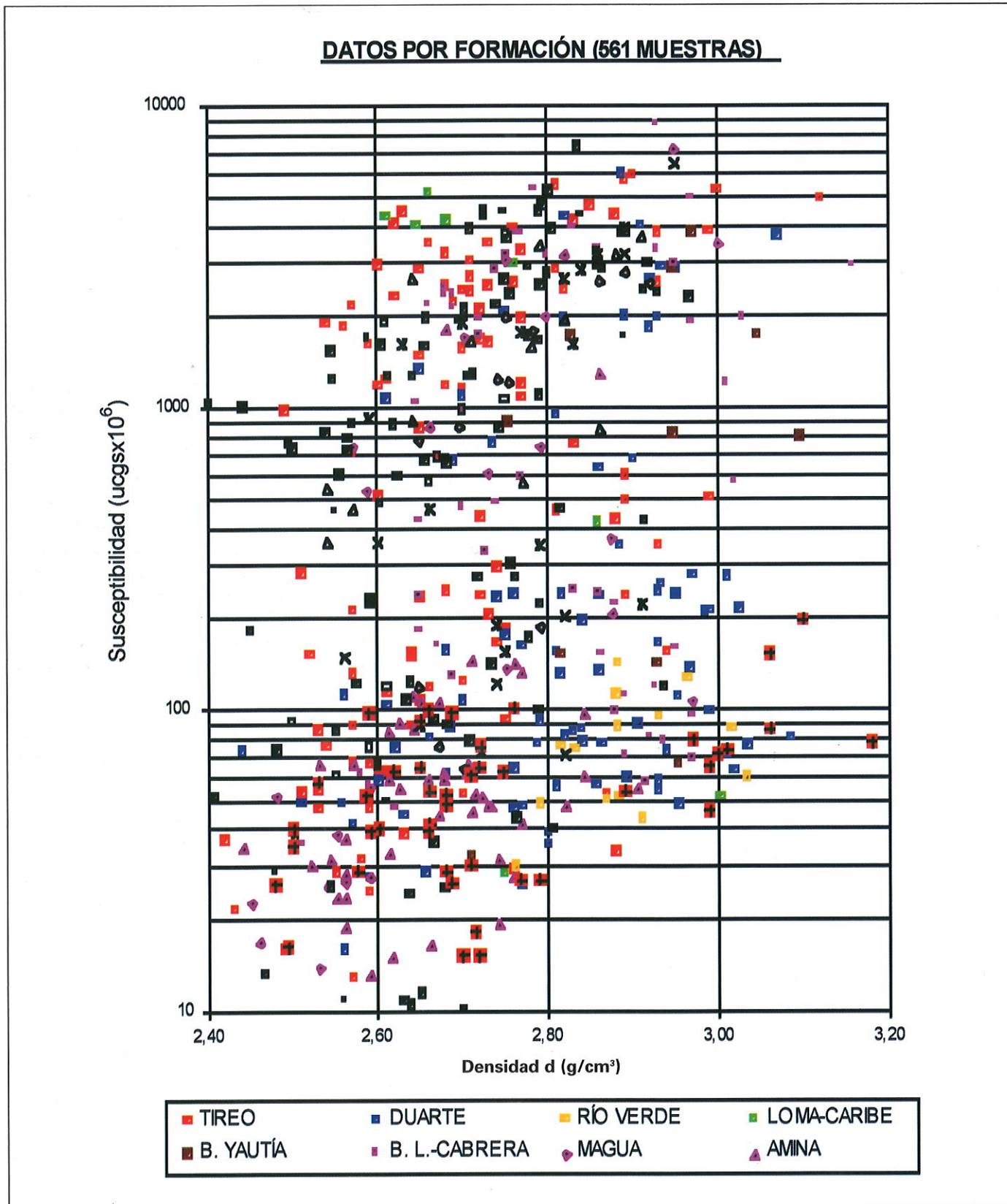


Figura 8. Diagrama densidad-susceptibilidad por Unidad/Formación de rocas de la República Dominicana (561 muestras)
 Figure 8. Density-susceptibility crossplot of rocks from the Dominican Republic grouped per Unit/Formation (561 samples)

Por tanto, en los basaltos (y muy probablemente, también en las andesitas y diabasas) domina la inducción magnética sobre la remanencia. Esto facilita la cartografía magnética aérea de los mismos, lo que es importante ya que son uno de los principales marcadores magnéticos del área de estudio. Este resultado era predecible a partir del mapa aeromagnético reducido al polo. Si existiera una cierta deficiencia de susceptibilidad para justificar la intensidad de las anomalías magnéticas producidas por estas rocas, una moderada remanencia de orientación normal puede jugar un cierto papel en el magnetismo de las mismas, aumentando su susceptibilidad efectiva.

Las riolitas muestran una clara distribución bimodal del parámetro Q . En las muestras paramagnéticas los ratio Q son bajos, mientras que la remanencia del grupo de riolitas ferromagnéticas (que es la que hay que considerar desde el punto de vista de interpretación de anomalías aeromagnéticas) es elevada, con $Q_{mn}=2.28$ (rectángulo superior derecho de la parte derecha de la Fig. 7). Por ello, pueden existir en el mapa aeromagnético anomalías dominadas por la remanencia. Estas rocas deben contener una población de magnetita fina (magnetita SD, *single-domain*) que contribuye al aumento no sólo de la susceptibilidad, sino en mayor grado de la razón Q . En todo caso, queda claro que la orientación de la J_{nm} de estas rocas es un factor adicional para comprender las anomalías producidas por macizos riolíticos, pudiendo existir anomalías magnéticas de orientación inversa.

Las tonalitas (17 muestras, $0.05 < Q < 13.28$; $Q_{mn}=0.58$) presentan un carácter magnético similar al de los basaltos. Son mayoritariamente ferromagnéticas con predominio de valores de Q viscosos, si bien con tendencia a delinear una directriz de exsolución de ilmenita (la oxidación de la magnetita es inferior a la de los basaltos). En los gabros (13 muestras, $0.12 < Q < 9.92$; $Q_{mn}=0.74$) predomina el ferromagnetismo (en menor grado que en las tonalitas), pero existe equilibrio entre el número de muestras pertenecientes al dominio de las magnetitas y las del dominio de las titanomagnetitas. Se trata de un comportamiento típico de gabros, lo que supone una significativa contribución de la remanencia en la construcción de las anomalías magnéticas causadas por ellos.

Rocas metamórficas

Se han realizado un total de 26 mediciones de magnetización remanente en estas rocas, 12 en anfibolitas ($0.01 < Q < 0.71$; $Q_{mn}=0.05$) y 9 en esquistos ($0.01 < Q < 15.39$; $Q_{mn}=0.12$), de las que sólo son ferro-

magnéticas ($k > 250 \cdot 10^{-6}$ ucgs) dos anfibolitas y las cinco serpentinitas de la muestra.

La remanencia del extenso grupo paramagnético integrado por las rocas metamórficas es de menor interés respecto al grupo ígneo, por lo que respecta a la interpretación aeromagnética. Anfibolitas y esquistos muestran susceptibilidades e imanaciones bajas, con datos que se distribuyen erráticamente ($k < 250$, $Q < 1$; salvo tres excepciones, entre ellas, una muestra con valores k - Q correspondientes al dominio de las pirrotinas). En buena parte de los datos de remanencia de anfibolitas y esquistos no se observa tendencia alguna, correspondiendo a situaciones próximas al límite de la resolución instrumental ($k < 70$, $Q < 0.1$; Fig. 7). Existen valores de Q algo más elevados ($Q > 0.1$) que podrían delinear una tendencia de exsolución de la magnetita, ExM en Fig. 7. En litologías anfibólicas esta tendencia refleja la presencia creciente del dominio de la magnetita fina o muy fina (el dominio único, magnetita SD, se presenta en tamaños submicrométricos entre 0.05 y 1 mm) con el incremento del anfíbol, lo que se traduce en parámetros Q que van de bajos (sobre 0.3) hasta valores del orden de 10, mientras que la susceptibilidad permanece paramagnética. Este comportamiento es típico de rocas máficas metavolcánicas (como andesitas y basaltos) y de algunos gabros. Exsoluciones similares se dan en todos los minerales máficos paramagnéticos excepto biotita (en piroxenos y olivinos así como en anfíboles).

Los datos de serpentinitas (5 muestras, $0.02 < Q < 0.55$; $Q_{mn}=0.31$), corresponden a muestras ferromagnéticas del dominio de las magnetitas con tendencia a la oxidación de la magnetita. La muestra es muy pequeña, de manera que no se puede descartar la posible existencia de valores correspondientes al dominio de las titanomagnetitas, que elevarían la magnitud de la remanencia de estas rocas, pudiendo alcanzar susceptibilidades efectivas muy elevadas (lo que puede ocurrir con frecuencia).

Síntesis de resultados

El análisis realizado en este trabajo se ha centrado en las litologías volcánicas, intrusivas y metamórficas como causantes de las principales anomalías de campo potencial de la zona estudiada.

Las rocas volcánicas presentan una amplia gama de densidades entre términos básicos y ácidos, y polimodalidad magnética en todos los grupos (Fig. 6, Tabla III). En las andesitas y los basaltos dominan las modas ferromagnéticas, de modo que se manifiestan como los marcadores magnéticos volcánicos más

importantes de la zona de estudio, si bien los basaltos producen anomalías más continuas y de mejor correspondencia con la cartografía geológica. En las diabasas, dacitas, riolitas y tobas ácidas predominan las modas paramagnéticas. No obstante todas estas rocas pueden producir anomalías magnéticas locales. La diferenciación de todo el grupo de litologías volcánicas en el diagrama d-k (Fig. 6) se produce tanto en la gama alta de susceptibilidades, con las modas ferromagnéticas de andesitas y basaltos, como en la baja, donde tobas, riolitas, dacitas y diabasas quedan separadas por densidades. Los basaltos son rocas características de la región de la magnetita multidominio ($500 < k < 10.000 \cdot 10^{-6}$ ucgs, $Q \cong 0.5$), mientras que las riolitas muestreadas presentan magnetizaciones remanentes bimodales (Tabla III, Fig. 7). Las muestras de riolitas ferromagnéticas se encuentran en el dominio de las titanomagnetitas, mostrando remanencias significativas, con incrementos importantes de la susceptibilidad efectiva. La orientación de la J_{nrm} es un factor adicional para comprender las anomalías producidas por macizos riolíticos, pudiendo existir anomalías magnéticas de orientación inversa. Globalmente, la heterogeneidad petrofísica del conjunto volcánico es evidente, sobretodo por lo que se refiere a propiedades magnéticas.

Entre las rocas intrusivas, tonalitas, gabros y rocas ultrabásicas muestran modas ferromagnéticas principales crecientes en el orden citado (Tabla III). Dado que las tonalitas y los gabros ferromagnéticos son ubicuos en los intrusivos de las cordilleras de la República Dominicana, se configuran como litologías claramente responsables de la mayoría de las anomalías magnéticas que caracterizan las citadas cordilleras. En los complejos ígneos zonados, las rocas intermedias (tonalitas y monzodioritas) son fundamentalmente ferromagnéticas, con la magnetita normalmente asociada al anfíbol. Asimismo, los gabros hornbléndicos son más ferromagnéticos que los piroxénicos. Obsérvese que incluso los gabros ferromagnéticos presentan una moda baja importante (debido, posiblemente, a una mezcla de facies), que hace que su cartografía magnética sea más incierta que la de su entorno (tonalitas y volcanitas pueden ser más consistentemente magnéticas que los gabros mismos). Los complejos zonados suelen producir, además de fuertes señales magnéticas, intensas anomalías de gravedad por la abundancia de rocas densas en los mismos. Como los basaltos, las tonalitas son rocas características de la región de la magnetita MD ($Q \cong 0.5$), mientras que los gabros pueden desplegar anomalías magnéticas dominadas por la remanencia (Tabla III, Fig. 7). Es decir, los gabros presentan un comportamiento magnético complejo, compartiendo caracte-

rísticas con basaltos y tonalitas por un lado, y con riolitas, por otro.

Por lo que se refiere a las rocas metamórficas, se trata de un grupo de elevada heterogeneidad, como corresponde a la variedad de litologías y condiciones de metamorfismo existentes, 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, mientras que en el extremo ligero encontramos las pizarras, unas y otras, en general, paramagnéticas. Los esquistos son también paramagnéticos. Las serpentinitas son claramente ferromagnéticas, con un ámbito geográfico de ocurrencia bastante extenso, por lo que constituyen otra fuente importante de anomalías magnéticas de la República Dominicana. En el diagrama densidad-susceptibilidad de la Fig. 6, el nivel de superposición entre todas estas litologías es importante, aunque se diferencian las serpentinitas por sus mayores susceptibilidades y las anfibolitas y eclogitas por sus mayores densidades.

Los resultados por Formación/Grupo/Unidad se presentan en la Fig. 8. Se pueden distinguir:

- a) Unidades mayoritariamente ferromagnéticas: en Tiroe las rocas densas, ígneas básicas e intermedias, son ferromagnéticas (volcanitas y tonalitas), mientras que entre las rocas menos densas, las volcanitas son bimodales, y las rocas meta-sedimentarias, paramagnéticas. Los complejos volcanosedimentarios como Los Ranchos, El Aguacate y Las Guayabas son netamente ferromagnéticos, independientemente de que se trate de rocas básicas, densas, o ácidas, menos densas. En el complejo ígneo de Loma Cabrera domina el ferromagnetismo (32 de 56 muestras), sobretodo en las tonalitas centrales y las ultrabásicas periféricas, mientras que en los gabros la fracción paramagnética es la más importante. Es probable que este tipo de comportamiento magnético sea general en las litologías de los complejos de la Cordillera Central. Los gabros de Yautía son ferromagnéticos, igual que las serpentinitas de Loma-Caribe. Los intrusivos tonalítico-dioríticos de La zona L-Este son también netamente ferromagnéticos. Todo ello concuerda claramente con la cartografía magnética de todas estas unidades.
- b) Unidades mayoritariamente paramagnéticas: unidades metasedimentarias y metamórficas como Duarte, Magua, Dajabón y Amina-Maimón (citadas por orden de paramagnetismo creciente), con la excepción de algunos basaltos y tonalitas que las intruyen. Algo similar puede decirse de las Fms. D. Juan, Siete Cabezas y Bejucal. Los

complejos Río Verde y Samaná son totalmente paramagnéticos.

Conclusiones

1) Basaltos, andesitas, tonalitas y serpentinitas, junto con las rocas gabroideas, rocas características de la región de la magnetita multidominio, son los principales marcadores magnéticos de la República Dominicana. Las rocas metasedimentarias y metamórficas de la muestra son, en general, paramagnéticas. La bimodalidad de la susceptibilidad magnética es una característica general de las litologías ígneas muestreadas, de modo que por ejemplo, las volcánitas ácidas también pueden originar anomalías magnéticas, como ocurre en los complejos volcanosedimentarios estudiados, casi todos netamente ferromagnéticos. Los intrusivos de las cordilleras de la República Dominicana y los grupos volcanosedimentarios de la misma son, en conjunto, bastante ferromagnéticos, con importantes anomalías de campo potencial asociadas a los complejos ígneos zonados existentes. Como era de esperar, las densidades altas corresponden a basaltos, anfíbolitas, gabros, rocas ultrabásicas, y eclogitas. El resto de las rocas metamórficas, las volcánitas ácidas y los granitoides exhiben densidades bajas.

La inducción domina sobre la remanencia, en general viscosa, consecuencia de que el principal mineral ferromagnético es la magnetita multidominio (tonalitas, basaltos y serpentinitas). Algunas volcánitas ácidas, y los gabros con tendencias de exsolución de ilmenita-magnetita, son las rocas estudiadas de mayor magnetización remanente. Fracciones importantes de las riolitas y los gabros se encuentran en el dominio de las titanomagnetitas, mostrando remanencias significativas, con incrementos importantes de la susceptibilidad efectiva. Los datos de remanencia confirman los de susceptibilidad, así como la interpretación magnética realizada en los trabajos de apoyo a los proyectos de cartografía geológica de la República Dominicana (García Lobón y Rey Moral, 2002a,b).

2) El trabajo petrofísico presentado aquí, con rocas procedentes del muestreo realizado durante la ejecución de los proyectos cartográficos "K" y "L" de la República Dominicana, servirá para complementar los estudios petrológicos y mejorar la interpretación geológico-estructural, de superficie y subsuelo, de campañas aeromagnéticas de alta resolución y de gravimetría terrestre, a escala regional.

Los resultados petrofísicos sirven para mejorar la interpretación del mapa aeromagnético de la

República Dominicana realizada durante la ejecución de los proyectos K y L. Dicho mapa constituye un magnífico ejemplo tanto de delimitación megaestructural de un área magnética activa, como de cartografía geológico-estructural a escala kilométrica de las formaciones volcano-sedimentarias de La Española.

Además, la base de datos petrofísicos elaborada a partir de este trabajo será de gran utilidad para cualquier estudio geológico y geofísico que se realice en la República Dominicana. Por ejemplo, la modelización bi y tridimensional magnética y gravimétrica de cuencas sedimentarias, complejos plutónicos (debe destacarse la calidad del registro petrofísico de rocas ígneas) y grandes accidentes estructurales, es una aplicación inmediata de los datos de petrofísica presentados aquí. En buena medida el estudio se configura como un trabajo de Infraestructura de Conocimiento, de valor permanente a medida que se incrementa el número de campañas geofísicas disponibles en la República Dominicana.

Agradecimientos

Expresamos nuestro agradecimiento a Manel Fernández y Alex Marcuello, revisores del manuscrito, por sus detalladas observaciones al mismo. Por la misma razón, el agradecimiento lo hacemos extensivo a Juliana Martín-León.

Referencias

- 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.
- Clark, D. A. 1999. Magnetic petrology of igneous intrusions: implications for exploration and magnetic interpretation. *Exploration Geophysics*, 30, 5-26.
- García Lobón, J. L. 2003. *Petrofísica e interpretación integrada de datos aeromagnéticos, radiométricos y gravimétricos. Aplicaciones a los complejos ígneos del área de Monesterio*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S. Ingenieros de Minas. Madrid. 522 pp.
- García Lobón, J. L., y Rey Moral, C. 2002 a, *Proyecto "K" de cartografía geotemática de la República Dominicana: informe de interpretación de la geofísica aeroportada*, 47 pp. Fondo documental del IGME, informe n° 62512.
- García Lobón, J. L., y Rey Moral, C. 2002 b, *Proyecto "L" de cartografía geotemática de la República Dominicana: informe de interpretación de la geofísica aeroportada*, 57 pp. Fondo documental del IGME, informe n° 62513.
- Henkel, H. 1991. Petrophysical properties (density and mag-

- netization) 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.
- Lewis, J.F., Draper, G. 1990. Geological and tectonic evolution of the northern Caribbean margin. En: Dengo, G., Case, J.E. (Eds.). *The Geology of North America, Vol. H The Caribbean region*. Geological Society of America, 77-140.
- Mann, P., Draper, G. y Lewis, J.F. (Eds.), 1991. Geologic and tectonic development of the North America-Caribbean plate boundary in Hispaniola. *Geological Society of America Special Paper*, 262, 401 pp.
- Plata, J. L., García, J. L., Rubio, F. M. y Navas, J. J. 1996. *Proyecto integrado de estudio geológico y metalogénico de la Faja Pirítica. Informes de Geofísica de 1995 y 1996*. Fondo documental del IGME, informe n° 40445.

Recibido: diciembre 2005

Aceptado: febrero 2007