

**REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”**

FACULTAD DE GEOLOGIA Y MINAS

Departamento de Geología

**TESIS EN OPCIÓN AL GRADO CIENTÍFICO DE
MASTER CIENCIA GEOLÓGICA**

**CONTRIBUCIÓN DE LOS MÉTODOS
GEOFÍSICOS AL CONOCIMIENTO DE LAS
CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES DE CUBA
NORORIENTAL Y SUS IMPLICACIONES EN LAS
INVESTIGACIONES MEDIOAMBIENTALES**

AUTOR: Ing. Eduardo Terrero Matos

TUTOR: Dr. José Alberto Batista Rodríguez

MOA-2003

INDICE

Pág

| | |
|--|-----|
| <u>DEDICATORIA</u> | 2 |
| <u>AGRADECIMIENTOS</u> | 3 |
| <u>RESUMEN</u> | 4 |
| <u>INTRODUCCIÓN</u> | 5 |
| | |
| <u>CAPÍTULO I. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DE LA REGIÓN DE ESTUDIO.</u> | 8 |
| <u>Características físico-geográficas.</u> | 8 |
| <u>Trabajos geológicos y geofísicos precedentes.</u> | 10 |
| <u>Contexto geológico</u> | 11 |
| | |
| <u>CAPÍTULO II. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN</u> | 25 |
| <u>Introducción.</u> | 25 |
| <u>Metodología de la investigación.</u> | 25 |
| <u>Caracterización petrofísica</u> | 31 |
| <u>Marco teórico de la investigación.</u> | 34 |
| | |
| <u>CAPÍTULO III. RESULTADOS DE LA REINTERPRETACIÓN DE LOS PRINCIPALES DATOS GEOFÍSICOS DE CUBA NORORIENTAL.</u> | 44 |
| <u>Introducción.</u> | 44 |
| <u>Reinterpretación de los datos aeromagnéticos 1:50 000 de la región nororiental de Cuba.</u> | 45 |
| <u>Reinterpretación de los datos magnéticos terrestres 1:50 000 del extremo SW del macizo ofiolítico Moa-Baracoa.</u> | 51 |
| <u>Reinterpretación de los levantamientos magnéticos y eléctricos de los sectores Majayara y Rancho Yagua (SW de Moa).</u> | 52 |
| <u>Reinterpretación de los levantamientos gravimétrico y magnético del sector Cayo Guam.</u> | 76 |
| <u>Significado de los resultados de las principales investigaciones geofísicas para las investigaciones geotécnicas y medioambientales en la región nororiental de Cuba.</u> | 90 |
| <u>Conclusiones.</u> | 91 |
| | |
| <u>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u> | 93 |
| <u>Conclusiones</u> | 93 |
| <u>Recomendaciones</u> | 94 |
| | |
| <u>BIBLIOGRAFÍA</u> | 95 |
| <u>RELACIÓN DE FIGURAS Y TABLAS</u> | 105 |

DEDICATORIA

Dedico este trabajo en especial a mi familia y a la revolución Cubana, quien me dio todas las posibilidades de ser útil a la sociedad.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. José Alberto Batista Rodríguez, tutor de este trabajo, quien desde su mismo inicio depositó toda su confianza en mi para su culminación feliz, además por su apoyo, orientación y oportunas sugerencias durante su desarrollo; quien dedicó todo el tiempo de su descanso así como su empeño de responsabilidad en la calidad del trabajo, quien me enseñó todos su conocimiento con transparencia , sin duda alguna puedo decir que sin lo expuesto al respecto no hubiese alcanzado el éxito.

Al la Dra. Alina Rodríguez Infante por su acertada corrección de estilo del trabajo.

Al colectivo de profesores de la Maestría que pusieron todo su empeño para el desarrollo exitoso de la misma en especial al coordinador Dr. Rafael Guardado Lacaba, a la compañera Secretaria Docente de la Facultad.

A mi familia en general por su consagrada comprensión para que este sueño se convirtiera en realidad, en especial a mi compañera Estela Coba Rosa.

A Vintilla Rodríguez y Esterlin Lamorú, por cubrir el espacio de mi responsabilidad en mi ausencia como jefe de transporte para poder asistir a los encuentros de la maestría.

RESUMEN

El presente trabajo titulado Contribución de los métodos geofísicos al conocimiento de las características estructurales de Cuba nororiental y sus implicaciones en las investigaciones medioambientales, tiene como objetivo **Aportar nuevos elementos sobre las características estructurales de la región nororiental de Cuba a partir de la reinterpretación de datos geofísicos, para enriquecer el conocimiento geológico de la región y con ello orientar y apoyar los futuros trabajos geotécnicos y medioambientales.**

En el trabajo toda la información geológica y geofísica disponible se llevó a formato digital y se crearon Sistemas de Información Geográfica, que apoyaron el procesamiento e interpretación de la información geológica y geofísica, para facilitar la interpretación de la misma y sus futuras aplicaciones.

A partir de la revisión y análisis de la información geofísica, se pudieron inferir las variaciones de los espesores de las rocas presentes en el área, así como del basamento de aquellas que afloran, y la extensión lateral de las rocas ultrabásicas serpentinizadas, y de los gabros subyacentes.

Se proponen nuevos esquemas de alineaciones según datos geofísicos que pueden constituir zonas de fallas. De esas alineaciones se señalan sus ubicaciones, direcciones, formas, extensión lateral y en profundidad, y su carácter somero o profundo. También se valoran los procesos que han tenido lugar en las zonas donde se producen esas alineaciones.

A partir del comportamiento del campo eléctrico en los sectores Majayara y Rancho Yagua es posible inferir al grado de heterogeneidad en las características geológicas superficiales, así como del grado de alteración de las rocas que afloran.

Con los resultados del presente trabajo se aportan nuevos elementos al conocimiento estructural de la región estudiada, los cuales permiten orientar y apoyar las investigaciones geotécnicas y medioambientales, sobre todos aquellos dirigidos a la planificación de la construcción de obras civiles e industriales, la caracterización de riesgos geológicos y a la valoración del impacto ambiental de la infraestructura existente.

INTRODUCCIÓN

En la región nororiental de Cuba se ubican los yacimientos de lateritas ferroniquelíferas más importantes de Cuba y de los más importantes del mundo, así como yacimientos de cromos, lo cual ha conllevado a la creación de una gran infraestructura minero-metalúrgica y social dirigida a la explotación de estos recursos minerales.

Las investigaciones geofísicas realizadas en esta región incluyen diferentes métodos geofísicos, tales como: magnetometría, gravimetría, geoelectricidad, radiometría, así como investigaciones geofísicas de pozos. Las investigaciones geofísicas mencionadas han tenido como finalidad la búsqueda de cromita y, en menor grado, de lateritas ferroniquelíferas, sin profundizar en las características geológicas y estructurales de la región, aspecto que denota el uso insuficiente de la información geofísica existente, a pesar de que esta región se caracteriza por una alta complejidad geológica, tectónica y sísmica, lo que ha motivado la realización de trabajos orientados a profundizar en las características de estas estructuras.

Por los motivos antes expuestos el **problema** de esta investigación radica **en la necesidad de profundizar en el conocimiento de las características geológico-estructurales de la región nororiental de Cuba a partir de la reinterpretación de la información geofísica existente, para orientar y apoyar las futuras investigaciones geotécnicas y medioambientales que permitan proyectar con mayor eficiencia las construcciones de obras civiles e industriales, así como la protección de las existentes.**

Teniendo en cuenta este problema y que los estudio geofísicos suministran una base para la interpretación de los modelos de emplazamientos y la historia geológica de las fajas ofiolíticas y rocas asociadas, el presente trabajo tiene como **objetivo** Aportar nuevos elementos sobre las características estructurales de la región nororiental de Cuba a partir de la reinterpretación de datos geofísicos, para enriquecer el conocimiento geológico de la región y con ello orientar y apoyar los futuros trabajos geotécnicos y medioambientales.

Para dar cumplimiento al objetivo planteado se realizó la revisión, análisis y reinterpretación de la información geofísica existente en el territorio, teniendo en cuenta la amplia utilización que tienen en la actualidad los métodos geofísicos en las investigaciones geotécnicas y medioambientales.

El **objeto** de estudio de esta investigación comprende las secuencias rocosas y las estructuras geológicas enmarcadas dentro de la región nororiental de Cuba, la cual ocupa un área aproximada de 3 754 Km², comprendida entre el municipio Cueto al oeste y el poblado de Cayo Güin al este, extendiéndose de norte a sur desde la costa hasta la coordenada 199 500. En la misma aflora la faja ofiolítica Mayarí-Moa-Baracoa, en la cual afloran fundamentalmente unidades oceánicas correspondientes a las ofiolitas septentrionales, y a los arcos de islas volcánicos del Cretácico y del Paleógeno.

Para lograr el objetivo propuesto se partió de la siguiente **hipótesis**:

Si el comportamiento de los datos geofísicos responde a las características geólogo-estructurales entonces es posible a partir de la reinterpretación de los datos geofísicos aportar nuevos elementos sobre las características geólogo-estructurales de la región nororiental de Cuba, para enriquecer el conocimiento geológico de la región.

La metodología seguida durante las investigaciones, en esencia no difiere de la que se lleva a cabo durante las investigaciones geológicas en general, desarrollada en tres etapas fundamentales. En la primera etapa se seleccionó el área de trabajo teniendo en cuenta la importancia económica que posee la región y la disponibilidad de la información, además se procedió a la revisión y recopilación de la información bibliográfica, culminando con un estudio petrofísico, particularmente de susceptibilidad magnética (κ) y la densidad (σ), en rocas ofiolíticas, sedimentarias y volcano-sedimentarias.

En la segunda etapa se preparó y procesó la información geofísica y geológica. En la primera parte de esta etapa toda la información disponible se llevó a formato digital y se prepararon diversas bases de Sistemas de Información Geográfica, luego se elaboró la información geofísica, según el siguiente orden:

Normalización y tratamiento estadístico descriptivo de las bases de datos de los levantamientos magnéticos y eléctricos de los sectores Majayara, Rancho Yagua y Cayo Guam.

Transformaciones del campo magnético, gravimétrico y eléctrico de los sectores investigados.

En función del objetivo de la investigación se realizaron diferentes transformaciones de los campos físicos: cálculo de gradientes horizontales y verticales y la continuación analítica ascendente, así como su representación en forma de mapas de relieve

sombreado, orientadas a resaltar las alineaciones que pueden estar relacionadas con zonas de contactos y estructuras disyuntivas, la ubicación de cuerpos geológicos a diferentes intervalos de profundidades, así como las variaciones de sus espesores.

En la tercera y última etapa se realizó la interpretación geólogo-geofísica, a partir de la cual se aportaron nuevos elementos sobre las características estructurales de la región nororiental de Cuba, entre las que se pueden citar: variaciones de los espesores de las rocas presentes en el área, así como del basamento de aquellas que afloran, y la extensión lateral de las rocas ultrabásicas serpentinizadas, y de los gabros subyacentes. Según el comportamiento de los datos geofísicos se proponen nuevos esquemas de alineaciones, que pueden constituir zonas de fallas. De los mismos se señalan sus ubicaciones, direcciones, formas, extensión lateral y en profundidad, y su carácter somero o profundo. También se muestran las variación de la heterogeneidad en las características geológicas superficiales, así como del grado de alteración de las rocas que afloran.

La aplicabilidad de esta investigación está dirigida hacia los estudios medioambientales desarrollados en esta región de Cuba.

La novedad científica de la investigación está dada por:

- La propuesta de nuevas características geólogo-estructurales de la región nororiental de Cuba para apoyar las futuras investigaciones medioambientales.

Aportes científico-técnicos y prácticos de la tesis:

- La propuesta de nuevas zonas de alineamientos y sus características según los datos geofísicos, las cuales deben ser estudiada en futuras investigaciones geológicas y geomorfológicas .

Durante el desarrollo de esta investigación se han confrontado diversas limitaciones dentro de las cuales se destacan por su influencia en la exactitud de los resultados obtenidos las siguientes:

- La ausencia de investigaciones geofísicas terrestres a escalas detalladas en grandes áreas dentro de la región investigada.
- La ausencia de perforaciones profundas que confirmen algunos de los resultados obtenidos.
- La falta de recursos materiales para la ejecución de mediciones geofísicas terrestre en algunas áreas que así lo requieran.

CAPÍTULO I. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA REGIÓN DE ESTUDIO

Características físico-geográficas.

Trabajos geológicos y geofísicos precedentes.

Contexto geológico.

Características físico-geográficas

Situación Geográfica

La región de estudio se encuentra enmarcada al noroeste de Cuba oriental (Figura 1), ocupando un área aproximada de 3 754 Km² y según el sistema de coordenada Lambert se localiza entre los puntos:

$$X= 586\ 500 - 737\ 500$$

$$Y= 199\ 500 - 230\ 000$$

Dentro de esta región se estudian en detalles otros sectores (Figura 1) cuyas coordenadas se exponen a continuación:

Sector del extremo SW del macizo ofiolítico Moa-Baracoa que abarca un área aproximada de 243 Km²

$$X= 675\ 170 - 700220$$

$$Y= 196\ 720 - 209950$$

Sector Majayara que ocupa un área aproximada de 0.22 Km²

$$X= 676\ 749 - 677\ 239$$

$$Y= 203\ 147 - 203\ 676$$

Sector Rancho Yagua que ocupa un área aproximada de 0.27 Km²

$$X= 679\ 711 - 680\ 283$$

$$Y= 202\ 664 - 203\ 228$$

Sector Punta Gorda que ocupa un área aproximada de 0.27 Km²

$$X= 706\ 747 - 707\ 155$$

$$Y= 212\ 964 - 213\ 763$$

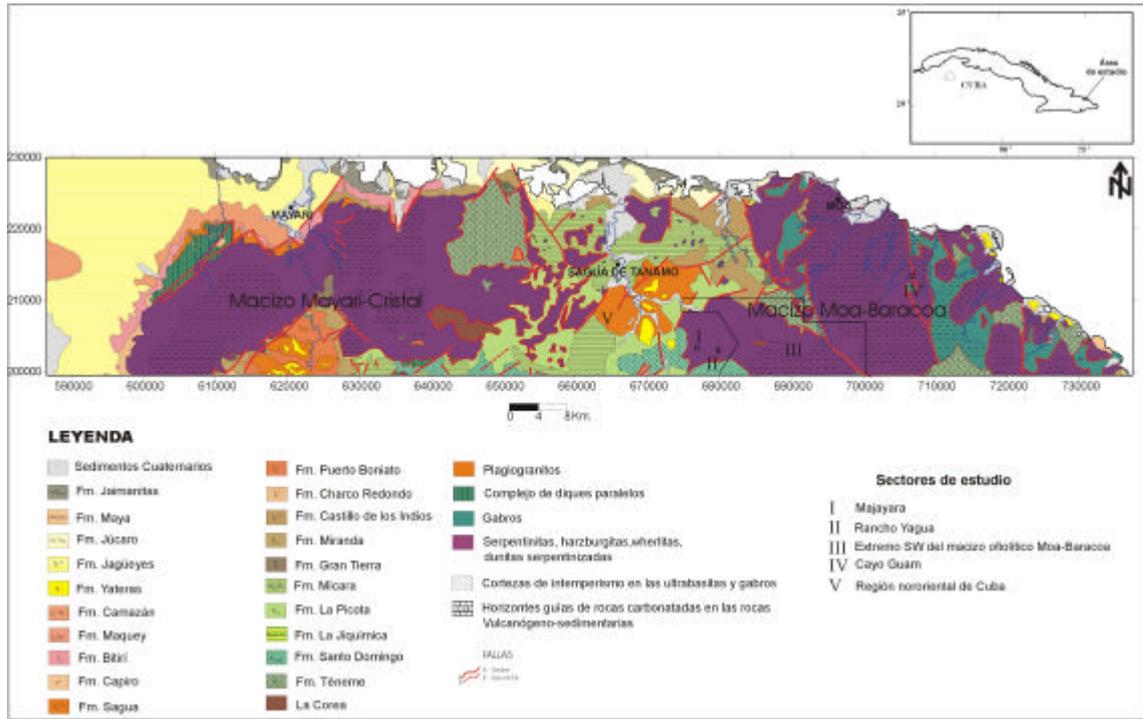


Figura 1. Esquema geológico de la región nororiental de Cuba (modificado de Albear y otros, 1988).

Características del relieve

El área de estudio presenta un relieve caracterizado por un sistema montañoso elevado, con valles intramontanos los cuales son atravesados por gran cantidad de ríos y arroyos.

Hidrografía

En el área de estudio la red hidrográfica se presenta bastante desarrollada. Entre las principales corrientes fluviales que drenan la zona, se encuentran los ríos: Guaro, Mayarí, La Ceiba, Sagua, Cananova, Moa, Cabaña, Calentura, Yagrumaje, Jiguaní, Punta Gorda, Yamanigüey, Quesigua, Taco y Nibujón.

Los arroyos que están presentes en la región son abundantes, generalmente poseen un régimen permanente y descargan sus aguas en los ríos principales.

Clima y vegetación

Según el Atlas Nacional de Cuba la temperatura media es de 24°.7 con extremos que oscilan entre los 23°.3 y 26°.0.

La suma de las precipitaciones anuales promedio es de 500 mm con extremos entre los 1 400 a 1 600 mm. El período lluvioso se extiende desde mayo hasta octubre, las precipitaciones oscilan entre 1 000 y 1 200 mm.

Según el Atlas Nacional de Cuba el clima de esta área es clasificado como tropical temporal y húmedo.

La vegetación es clasificada como de cultivos (plantaciones, siembras, pastos, etc.) con sectores de vegetación espontánea, arbórea y arbustos.

Vías de comunicación y características económicas de la región

La vía de comunicación principal es la carretera que comunica los municipios de Moa y Sagua de Tánamo; aunque también existen terraplenes que conducen hasta cada uno de los pequeños asentamiento poblacionales más intrincados.

La economía depende fundamentalmente de la agricultura siendo uno de los cultivos principales la caña de azúcar y el café predominantemente estatal y en menor grado algunos pequeños agricultores. Le siguen en orden de importancia la cría de ganado vacuno principalmente con fines lecheros pues una parte del área la ocupan potreros dedicados a estos fines, así como algunas áreas dedicadas a viandas y frutos menores.

Trabajos geológicos y geofísicos precedentes

Dentro de las principales investigaciones geofísica realizadas en la región nororiental de Cuba se encuentra la de M. E. Zamashikov y V. Tabachkov (1971), L.I. Liuby (1983), J.L. Chang y otros (1990 y 1991) y J. Batista (1998, 2002).

A continuación se describen los resultados más importantes de estas investigaciones relacionados con la caracterización tectónica y estructural del territorio.

El levantamiento gravimétrico y magnético a escala 1:50 000, realizado en el extremo SW del macizo ofiolítico Moa-Baracoa (Zamashikov y Tabachkov, 1971), se orientó a la búsqueda de cromitas en la parte suroeste del macizo Moa-Baracoa y de Asbestos crisotílico y cromitas en los yacimientos Majayara-Rancho Yagua, en un área de desarrollo laterítico de 200 Km². Con este trabajo se confeccionó un esquema geológico donde se delimitaron las áreas de desarrollo de las lateritas y de señalaron algunas zonas de debilidades tectónicas. Además se tomaron 548 muestras a las cuales se le midieron densidad y susceptibilidad magnética. En la reinterpretación de los datos magnéticos de

este levantamiento (Charchabal, 2003) se señalan alineaciones del campo magnético que no se relacionan con estructuras tectónicas reportadas, sugiriendo la presencia de nuevas estructuras.

En el informe realizado por Liuby (1983) sobre los resultados obtenidos durante el levantamiento aerogeofísico complejo realizado en la provincia Holguín y Guantánamo, en el cual se emplearon los métodos magnético, radiométrico y espectrométrico, se recogen nuevos elementos sobre la estructura tectónica del área y las posibles zonas perspectivas para la prospección de minerales.

En el levantamiento aerogeofísico complejo que abarcó la provincia de Guantánamo y Holguín, realizado a escala 1:50 000, conformado por datos aerogamma espectrométrico y aeromagnético (Chang y otros, 1990, 1991) se realizó la evaluación de pronóstico de las áreas perspectivas para el descubrimiento de manifestaciones y yacimientos minerales a escala 1:100 000. La interpretación cualitativa regional de los datos magnéticos permitió conformar la hipótesis más general sobre la estructura profunda del sector; definir la disposición y emplazamientos de los bloques magnéticos que la forman en conformidad con los elementos que aporta la interpretación cuantitativa. La reinterpretación posterior del levantamiento aerogeofísico complejo 1:50 000 de la región nororiental de Cuba (Chang y otros, 1990, 1991), por Batista (1998, 2002), pone de manifiesto nuevas características estructurales de esta región. Además el mapa del campo magnético al sur de Moa posee un comportamiento que señala la existencia de estructuras circulares reportadas por Barrios y Ávila (1983).

Contexto geológico

El área de estudio se enmarca dentro de la región oriental de Cuba, la cual desde el punto de vista geológico se caracteriza por la presencia de las secuencias del cinturón plegado cubano y las rocas del “neoautóctono” (Iturralde-Vinent, 1996a, 1996b, 1996c, 1998; Proenza, 1997; Proenza y otros, 1999a, 2000a, 2000b) (Figura 2). En los macizos rocosos de Mayarí y Sagua-Moa-Baracoa afloran fundamentalmente unidades oceánicas correspondientes a las ofiolitas septentrionales, y a los arcos de islas volcánicos del Cretácico y del Paleógeno (Cobiella, 1988, 1997, 2000; Quintas, 1989; Iturralde-Vinent, 1995, 1996a, 1996b, 1996c, 1998; Proenza, 1997, Proenza y otros, 1999c; 2000a).

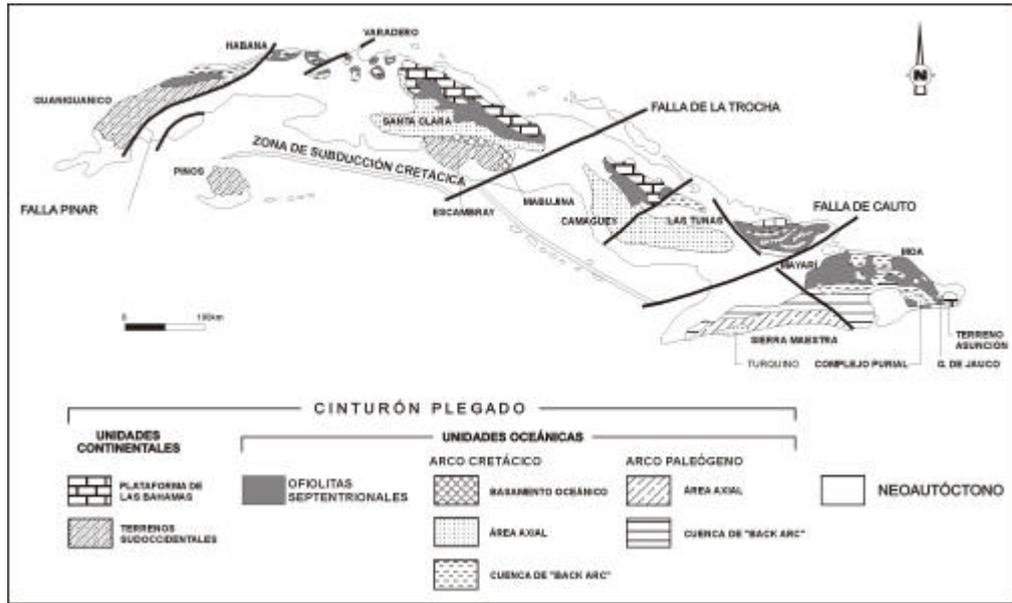


Figura 2. Mapa geológico esquemático de Cuba mostrando los afloramientos del cinturón plegado y del neoaútótono (adaptado de Iturralde-Vinent, 1996a).

Las ofiolitas septentrionales en la región de estudio están enmarcadas dentro de la llamada faja ofiolítica Mayarí-Baracoa (Iturralde-Vinent, 1994, 1996a, 1998). Sus principales afloramientos están representados por los Macizo Mayarí-Cristal y Moa-Baracoa (Proenza, 1997; Proenza y otros, 1999a) (Figura 1).

Esta faja ofiolítica constituye un cuerpo alóctono tabular con una longitud de 170 Km, geomorfológicamente dividido en diferentes partes por el valle del río Sagua de Tánamo y las montañas del Purial. La misma posee un espesor que en ocasiones sobrepasa los 1 000 m (Iturralde-Vinent, 1996a, 1998). Según Torres (1987), Fonseca y otros (1985, 1992), Iturralde-Vinent (1996a, 1998) y Proenza (1997), está constituida por diferentes términos litológicos representativos de una secuencia ofiolítica completa, aunque separados por contactos tectónicos. La secuencia de piso a techo estaría compuesta por peridotitas con texturas de tectonitas, “cumulados ultramáficos”, cumulados máficos, diques de diabasas y secuencias efusivas-sedimentarias.

Macizo Ofiolítico Mayarí-Cristal

El macizo ofiolítico Mayarí-Cristal se ubica en la parte occidental de la faja ofiolítica Mayarí-Baracoa, ocupando un área aproximada de 1 200 Km² (Figura 1). El mismo tiene una morfología tabular con un espesor de 1 a 1.5 Km según Fonseca y otros (1985). En este macizo se han descrito, principalmente, los complejos ultramáficos y

diques de diabasas; en cambio la existencia del complejo de gabros es polémica y el volcano-sedimentario no ha sido descrito (Iturralde-Vinent, 1996a, 1998; Proenza, 1997, Proenza y otros, 1999a, 2000a; Cobiella, 2000).

Las rocas ultramáficas están constituidas predominantemente por harzburgitas y dunitas, y raras veces lherzolitas y piroxenitas (Fonseca y otros, 1985; Nekrasov y otros, 1989; Navarrete y Rodríguez, 1991; Proenza y otros, 1999a). En el macizo también están presentes diques de piroxenitas, los cuales cortan las peridotitas y los cuerpos de cromititas (Iturralde, 1996a, 1998; Proenza, 1997; Proenza y otros, 1999a; 2000a; Cobiella, 2000).

El complejo de gabros no se encuentra bien expuesto y su presencia ha sido cuestionada (Knipper y Cabrera, 1974; Fonseca y otros, 1985; Nekrasov y otros, 1989; Navarrete y Rodríguez, 1991; Iturralde-Vinent, 1996a, 1998)

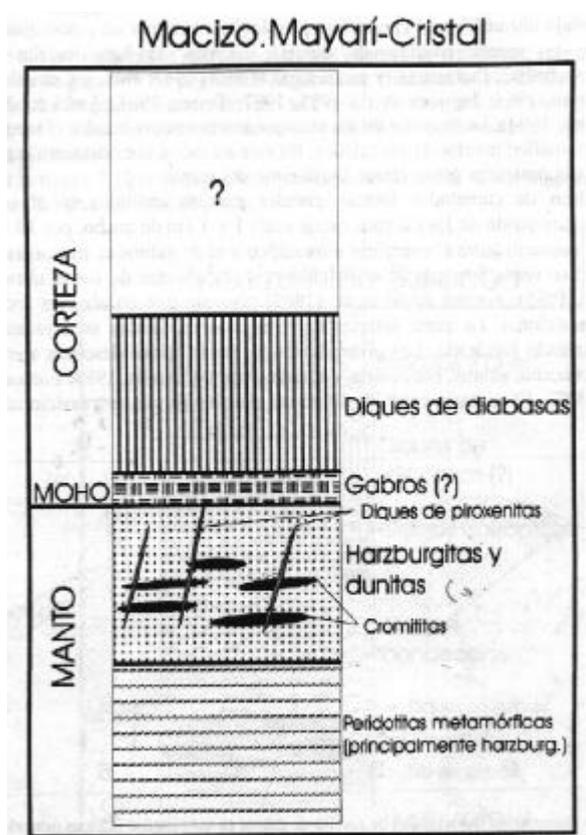


Figura 3. Columna sintética ideal del macizo Mayarí-Cristal, propuesta por Proenza (1997) y Proenza y otros (1998b), reconstruida a partir de datos del propio autor y bibliográficos (Thayer, 1942; Iturralde-Vinent, 1989, 1994, 1996a; Fonseca y otros, 1985, 1992; Nekrasov y otros, 1989; Murashko y Lavandero, 1989; Navarrete y Rodríguez, 1991). La dimensión vertical no está a escala.

En la columna sintética generalizada de este macizo (Figura 3) propuesta por Proenza (1997) y Proenza y otros (1998b), se señalan de piso a techo: a) una zona de harzburgitas con textura de tectonitas; b) una zona de alternancia de harzburgitas y dunitas con abundantes cuerpos de cromititas y diques de piroxenitas (websterita); c) una posible zona correspondiente a los cumulos máficos (gabros), la cual de existir, sería extremadamente pequeña; y d) la zona del complejo de diabasas.

Al sur del macizo se localiza la “melange La Corea” , un área de desarrollo de rocas metamórficas de unos 25 Km² (Adamovich y Chejovich, 1964; Millán, 1996). La misma está compuesta por bloques de rocas metamórficas separados por una matriz serpentinitica. Predominan las rocas metamórficas de alta presión, así como metabasitas de baja presión de origen ofiolítico (Millán, 1996). Las metamorfitas de alta presión son anfibolitas granatíferas y bloques aislados de esquistos glaucofánicos; además existen esquistos verdes, esquistos tremolíticos, actinolíticos, diques de pegmatitas y granitoides masivos (Irralde-Vinent, 1996c).

Macizo Ofiolítico Moa-Baracoa

El Macizo ofiolítico Moa-Baracoa se ubica en el extremo oriental de la faja Mayarí-Baracoa. El mismo ocupa un área aproximada de 1 500 Km² y presenta un desarrollo considerable de los complejos ultramáfico, de gabros y volcansedimentario (Proenza, 1997; Proenza y otros, 1999a, 1999b, 1999c, 2000a, 2000b) (Figura 1). Según Fonseca y otros (1985) el espesor aproximado del complejo ultramáfico es de 1 000 metros y el de gabros de 500 metros. Quintas (1989) estima un espesor de 1 200 metros para el complejo volcansedimentario.

El complejo ultramáfico desde el punto de vista petrológico se caracteriza por un predominio de harzburgitas, y en menor grado dunitas; también se han descrito dunitas plagioclásicas, wehrlitas, lherzolitas, y piroxenitas (García y Fonseca, 1994; Proenza y otros, 1999a, 1999b).

Los cumulos de gabros forman grandes cuerpos incluidos en el complejo ultramáfico. La dimensión de estos cuerpos oscila entre 1 y 3 Km de ancho, por 10 a 15 Km de longitud. El contacto entre los gabros y el complejo ultramáfico generalmente es tectónico. Muchas veces los gabros están cubiertos por mantos de rocas ultramáficas (Fonseca y otros, 1985), aunque Andó y otros (1989) plantean que en algunos sectores el contacto es transicional.

Los principales tipos petrológicos descritos son: gabros olivínicos, gabronorita, gabros, anortositas y noritas (Ríos y Cobiella, 1984; Fonseca y otros, 1985; Torres, 1987; Proenza, 1997; Proenza y otros, 1999a, 1999b; Rodríguez, 2000).

El complejo volcano-sedimentario contacta tectónicamente con los demás complejos del corte ofiolítico (Proenza, 1997; Proenza y otros, 1999a; 2000a, 2000b). Está representado por la Fm. Quiviján (Iturralde-Vinent, 1996a, 1998), la cual incluye basaltos amigdaloides y porfíricos (algunas veces con estructura de almohadilla), con intercalaciones de hialoclastitas, tobas, capas de *cherts* y calizas (Quintas, 1989). Datos de trazas (REE, LILE) de esta formación, publicados por Keer y otros (1999) demuestran su carácter de *Island-arc tholeiite* (IAT).

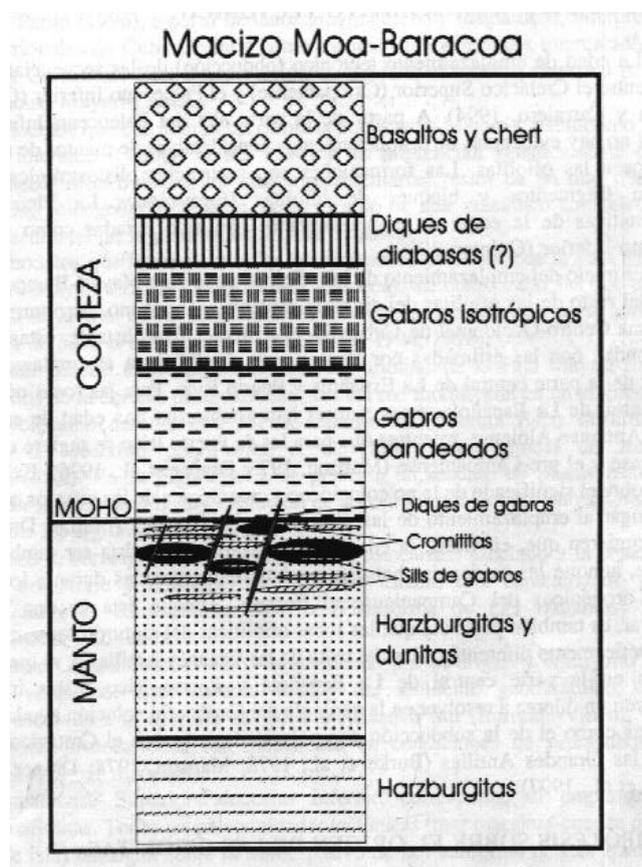


Figura 4. Columna sintética ideal del macizo ofiolítico Moa-Baracoa, propuesta por Proenza (1997) y Proenza y otros (1998b), reconstruida a partir de datos del propio autor y bibliográficos (Thayer, 1942; Guild, 1947; Ríos y Cobiella, 1984; Iturralde-Vinent, 1989, 1994, 1996a; Fonseca y otros, 1985, 1992; Torres, 1987). La dimensión vertical no está a escala.

Proenza (1997) y Proenza y otros (1998b, 1999c) proponen una columna sintética generalizada para este macizo (Figura 4), en la cual de piso a techo aparece: a) una zona de harzburgitas con texturas de tectonitas; b) una zona de harzburgitas que contienen

fundamentalmente cuerpos de dunitas, dunitas plagioclásicas, sills de gabros, diques de gabros y pegmatoides gabroicos; c) la zona de los cumulados máficos (gabros), los cuales presentan en la base gran desarrollo de gabros bandeados (gabros olivínicos, gabronoritas), transicionando hacia la parte alta a gabros isotrópicos; d) la zona del complejo de diques de diabasas ? y e) el complejo efusivo-sedimentario.

Las secuencias del arco de islas volcánico del Cretácico están representadas por las rocas de la Fm. Sierra del Purial, Téneme y Santo Domingo, así como del Complejo Cerrajón (Figuras 1). La Fm. Sierra del Purial (Aptiano-Turoniano) se compone de andesitas basálticas y basaltos, principalmente tobas y lavobrechas, areniscas polimícticas e intercalaciones y lentes de calizas metamorfizadas en condiciones de muy bajo grado y alta presión (Hernández, 1979, 1987; Cobiella 2000; Millán y otros, 1985; Campos y Hernández, 1987; Gyarmati y Leyé O’Conor, 1990; Millán, 1996). Estas rocas se encuentran imbricadas tectónicamente con las ofiolitas de la faja Mayarí-Baracoa. En ocasiones los contactos coinciden con zonas de mezcla de volcanitas del arco Cretácico y de ofiolitas (Iturralde-Vinent, 1996a, 1996c).

La Fm. Téneme (Cretácico Superior-Inferior), está integrada fundamentalmente de basaltos andesitas basálticas, tobas y brechas (Proenza y Carralero, 1994; Iturralde-Vinent, 1996c, 1998; Gyarmati y otros, 1997).

La Fm. Santo Domingo (Albiano-Turoniano) está compuesta por tobas y lavobrechas andesíticas, dacitas, tufitas, argilitas, lutitas volcanomícticas, lavas basálticas, liparitodacíticas, conglomerados y calizas. También aparecen pequeños cuerpos de pórfidos dioríticos, andesitas y diabasas (Iturralde-Vinent, 1976, 1996c, 1998; Proenza y Carralero, 1994; Gyarmati y otros, 1997), mientras que el complejo Cerrajón (Aptiano-Turoniano) está compuesto de diques subparalelos de diabasas y gabrodiabasas (Gyarmati y Leyé O’Conor, 1990; Gyarmati y otros, 1997).

Según Iturralde-Vinent (1994, 1996c), el basamento de este arco volcánico es una corteza oceánica de edad pre-Aptiano, la cual ha sido reconocida en Cuba oriental como anfíbolitas Güira de Jauco.

En la zona de contacto de estas rocas cretácicas con las ofiolitas, las mismas se encuentran deformadas, generalmente trituradas hasta brechas. En ocasiones los contactos coinciden con zonas muy fisuradas y foliadas, o con masas caóticas que contienen mezcla de bloques de ofiolitas y volcanitas cretácicas (Iturralde-Vinent, 1996c, 1998; Cobiella, 2000).

Las unidades estratigráficas representativas del Campaniano Tardío-Daniano son las formaciones Mícara, La Picota y Gran Tierra (Figura 1). Dentro de las mismas se encuentran secuencias típicamente olistostrómicas como es el caso de la Fm. La Picota (Maestrichtiano) y parte de la Fm. Mícara (Maestrichtiano-Paleoceno), las cuales están compuestas por fragmentos y bloques procedentes de la secuencia ofiolítica y de las rocas volcánicas cretácicas (Cobiella, 1978a, 1978b, 2000; Quintas, 1989, 1996; Gyarmati y Leyé O'Conor, 1990). Por otro lado, la Fm. Gran Tierra (Paleoceno) se compone de calizas brechosas, conglomerados volcanomícticos, brechas, margas, tobas, calizas organo-detriticas, areniscas volcanomícticas de cemento calcáreo, lutitas y tufitas (Iturralde-Vinent, 1976; Cobiella, 1978a, 1978b; Quintas, 1989). En algunas localidades los depósitos Maestrichtiano-Daniano de tipo olistostrómico-flyschoide (formaciones Mícara y La Picota) transicionan a la secuencia del Daniano-Eoceno Superior (formaciones Gran Tierra, Sabaneta, Charco Redondo y San Luis) (Iturralde-Vinent, 1996b, 1998; Cobiella, 2000).

Las secuencias del arco de islas volcánico del Paleógeno están representadas por la Formación Sabaneta (Daniano-Eoceno Medio) (Figura 1) (Iturralde-Vinent, 1976, 1995, 1996b, 1998; Cobiella, 1988, 1997; Proenza y Carralero, 1994; Quintas y otros, 1995). La cual yace sobre una secuencia de transición que contiene finas intercalaciones de tufitas (Fm. Gran Tierra) (Iturralde-Vinent, 1976) o descansa discordantemente sobre las formaciones Mícara y La Picota, y sobre las ofiolitas y volcanitas cretácicas (Nagy y otros, 1983). La misma está compuesta por tobas vitroclásticas, litovitroclásticas, cristalovitroclásticas con intercalaciones de tufitas calcáreas, areniscas tobaceas, calizas, conglomerados tobaceos, lutitas, margas, gravelitas, conglomerados volcanomícticos y algunos cuerpos de basaltos, andesitas, y andesitas-basálticas, los cuales alcanzan hasta 6 000 m de espesor. Otros autores como es el caso de Albear y otros (1988), dividen esta formación en Castillo de los Indios (Eoceno Inferior-Medio) y Miranda (Paleoceno-Eoceno), mientras que Gyarmati y Leyé O'Conor (1990) la divide en Sabaneta y Castillo de los Indios. Todas ellas con características similares.

Las rocas asociadas al arco de isla volcánico del Paleógeno yacen sobre los materiales deformados del arco Cretácico, las ofiolitas y las cuencas sedimentarias del ciclo Campaniano Tardío-Daniano (Proenza y Melgarejo, 1998).

Las secuencias estratigráficas del Eoceno Medio-Oligoceno están representadas por las formaciones Puerto Boniato, Charco Redondo, Sagua, Sierra de Capiro, Cilindro, Mucaral, y Maquey (Figura 1).

La Fm. Puerto Boniato (Eoceno Medio) se compone principalmente de calizas organo-detriticas, aporcelanadas, algaceas y margas (Nagy y otros, 1976), mientras que la Fm. Sagua está compuesta por margas y calizas (Albear y otros, 1988; Quintas, 1989, 1996).

La Fm. Charco Redondo (Eoceno Medio) está compuesta por calizas compactas organo-detriticas, fosilíferas, de color variable. En la parte inferior del corte son frecuente las brechas. En esta parte predomina la estratificación gruesa, mientras que en la superior la fina (Cobiella, 1978a, 1978b; Quintas, 1989,1996; Gyarmati y Leyé O’Conor, 1990).

La Fm. Sierra de Capiro (Eoceno Superior) se compone de lutitas y margas con intercalaciones de lutitas y conglomerados con fragmentos de calizas arrecifales, serpentinitas y rocas volcánicas (Cobiella, 1978a, 1978b; Quintas, 1989; Gyarmati y Leyé O’Conor , 1990).

La Fm. Cilindro (Eoceno Medio-Superior) se conforma de conglomerados polimicticos con estratificación lenticular y a veces cruzadas, débilmente cementada con lentes de areniscas que contienen lignito. La matriz es arenítica polimictica, conteniendo carbonato (Quintas, 1989; Gyarmati y Leyé O’Conor, 1990).

La Fm. Mucaral (Eoceno Medio-Oligoceno Inferior) está compuesta por margas con intercalaciones de calizas arcillosas, areniscas polimicticas, conglomerados polimicticos, lutitas y tobas (Quintas, 1989; Gyarmati y Leyé O’Conor, 1990).

La Fm. Maquey (Oligoceno-Mioceno Inferior) está conformada fundamentalmente por alternancia de lutitas, areniscas, arcillas calcáreas y espesor variable de calizas biodetriticas (Cobiella, 1978a, 1978b; Quintas, 1989).

Las rocas del “neoaútctono” constituyen una secuencia terrígeno-carbonatada poco deformada, que aflora en las cercanías de las costas formando una franja que cubre discordantemente los complejos más antiguos y que estructuralmente se caracterizan por su yacencia monoclinal suave u horizontal (Quintas, 1989; Iturralde-Vinent, 1994, 1996b; Rodríguez, 1998a, 1998b). Son representativas de esta secuencia las formaciones Bitirí, Camazán, Cabacú, Yateras, Jagüeyes, Júcaro, Río Maya, Jaimanitas, Cauto y Río Macío (Figura 1).

La Fm. Bitirí (Oligoceno) está representada por calizas algáceas de matriz fina, duras, compactas, calcificadas, que a veces contienen fragmentos de corales y grandes Lepidocyclina (Iturralde-Vinent, 1972; Albear y otros, 1988).

La Fm. Camazán (Oligoceno-Mioceno Inferior) está compuesta por calizas coralino-algáceas (biolíticas), calizas biodetríticas a veces arcillosas, calcarenitas, calciruditas calcáreas con intercalaciones de margas y arcillas, ocasionalmente yesíferas (Nagy y otros, 1976; Albear y otros, 1988).

La Fm. Cabacú (Oligoceno Medio-Mioceno Inferior) está compuesta por gravelitas, areniscas y lutitas polimícticas (proveniente principalmente de ultramafitas y volcanitas), de cemento débilmente arcilloso-calcáreo y a veces algunos lentes de margas arcillosas en la parte inferior (Nagy y otros, 1976; Quintas, 1989; Gyarmati y Leyé O’Conor, 1990).

La Fm. Yateras (Mioceno Inferior) se compone de alternancia de calizas biodetríticas y detríticas, y calizas biógenas de granos finos a gruesos, duras, de porosidad variable y a veces aporcelanadas (Iturralde-Vinent, 1976; Nagy y otros, 1976; Cobiella, 1978a, 1978b; Gyarmati y Leyé O’Conor, 1990).

La Fm. Jagüeyes (Mioceno Medio Temprano) se compone de lutitas, areniscas, gravelitas polimícticas de matriz arenácea y arcillosa, con escaso cemento carbonático y margas arcillosas y arenáceas. Esta formación se caracteriza por ser fosilífera, en la cual alternan calizas biodetríticas, biohémicas, calcarenitas, y arcillas. Las arcillas y lutitas pueden ser yesíferas (Nagy y otros, 1976; Albear y otros, 1988).

La Fm. Júcaro (Mioceno Superior-Plioceno) está compuesta por calizas generalmente arcillosas, calcarenitas, margas, lutitas, a veces con gravas polimícticas y arcillas yesíferas (Nagy y otros, 1976; Gyarmati y Leyé O’Conor, 1990).

La Fm. Río Maya (Plioceno Superior-Pleistoceno Inferior) se conforma de calizas biohémicas algáceas y coralinas muy duras, de matriz micrítica, frecuentemente aporcelanadas, conteniendo corales en posición de crecimiento, así como subordinadamente moldes y valvas de moluscos, todas muy recristalizadas. Las calizas frecuentemente están dolomitizadas. El contenido de arcillas es muy variable (Nagy y otros, 1976; Gyarmati y Leyé O’Conor, 1990).

La Fm. Jaimanitas (Pleistoceno Medio-Superior) se compone de calizas biodetríticas masivas, generalmente carsificadas, muy fosilíferas. Contiene conchas bien preservadas

y corales de especies actuales y ocasionalmente biohermas (Gyarmati y Leyé O'Conor, 1990).

La Fm. Cauto (Pleistoceno Medio-Superior) se conforma de arcillas, limos, arenas, gravas y conglomerados polimícticos, con estratificación horizontal y cruzada (Nagy y otros, 1976), mientras que la Fm. Río Macío (Holoceno) está compuesta por cantos rodados, gravas, arenas, lutitas y arcillas (Adamovich y Chejovich, 1964).

Características tectónicas

La tectónica del bloque oriental cubano, comprendido desde la falla Cauto-Nipe hasta el extremo oriental de la isla, se va a caracterizar por la alta complejidad, dado por la ocurrencia de eventos de diferentes índoles que se han superpuesto en el tiempo y que han generado estructuras que se manifiestan con variada intensidad e indicios en la superficie (Rodríguez, 1998a, 1998b). Este bloque se caracteriza por el amplio desarrollo de la tectónica de cabalgamiento que afecta las secuencias más antiguas (Campo, 1983).

Localmente esta complejidad en la región de estudio se pone de manifiesto a través de estructuras fundamentalmente de tipo disyuntivas con dirección NE y NW, que se cortan y desplazan entre sí, formando un enrejado de bloques y microbloques con movimientos verticales diferenciales, que se desplazan también en la componente horizontal y en ocasiones llegan a rotar por acción de las fuerzas tangenciales que los afecta como resultado de la compresión (Campo, 1983, Rodríguez, 1998a, 1998b). También se observan dislocaciones de plegamientos complejos, sobre todo en la cercanía de los contactos tectónicos (Campo, 1983).

En las secuencias más antiguas (rocas metamórficas y volcánicas) existen tres direcciones fundamentales de plegamientos: NE-SW; NW-SE; N-S; esta última, característica para las vulcanitas de la parte central del área. Las deformaciones más complejas se observan en las rocas metamórficas, en la cual en algunas zonas aparecen fases superpuestas de plegamientos (Campo, 1983).

En las rocas paleogénicas y eocénicas la dirección de plegamiento es E-W, mientras que las secuencias del Neógeno poseen yacencia monoclinal u horizontal (Campo, 1983).

El bloque Mayarí y el de Moa se separan por sistemas de fallas transcurrentes de dirección norte-noreste subparalelas al rumbo de la falla principal Cauto, que limita al bloque oriental en su conjunto. El bloque Mayarí se acuña tectónicamente hacia el este

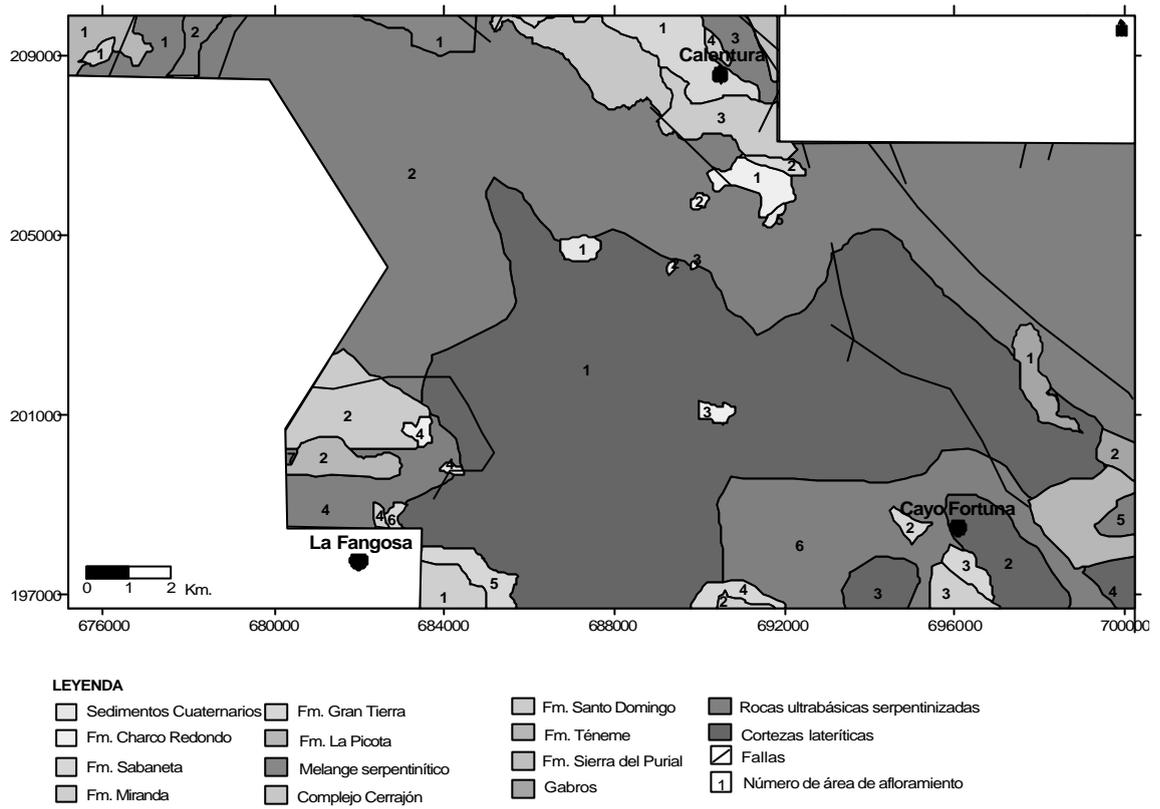


Figura 6. Mapa geológico del extremo SW de Moa (modificado de Albear y otros, 1988; Gyarmati y Leyé O'Connor, 1990).

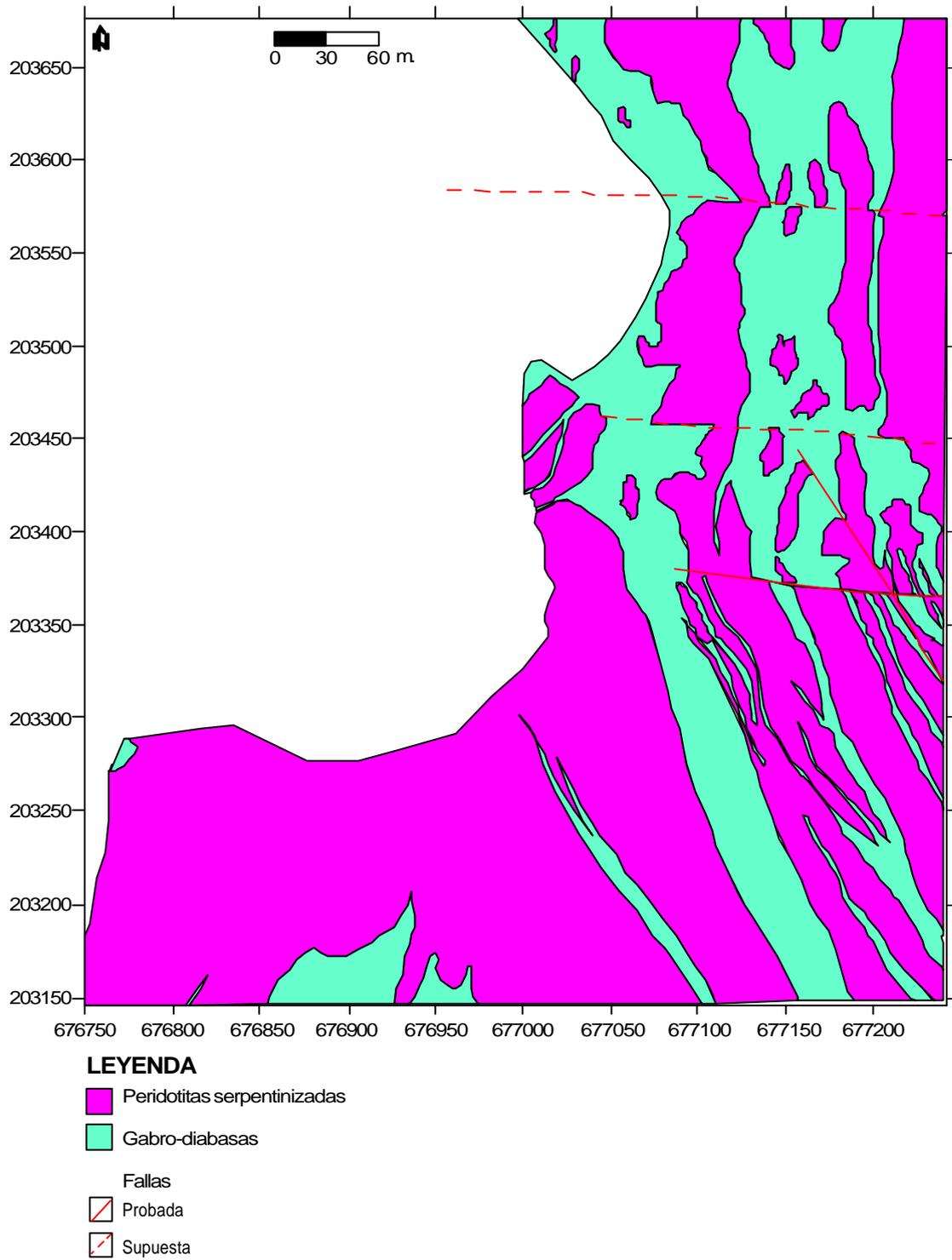


Figura 7. Mapa geológico de Majayara (modificado de Bronnikov y Budnitsky, 1969).

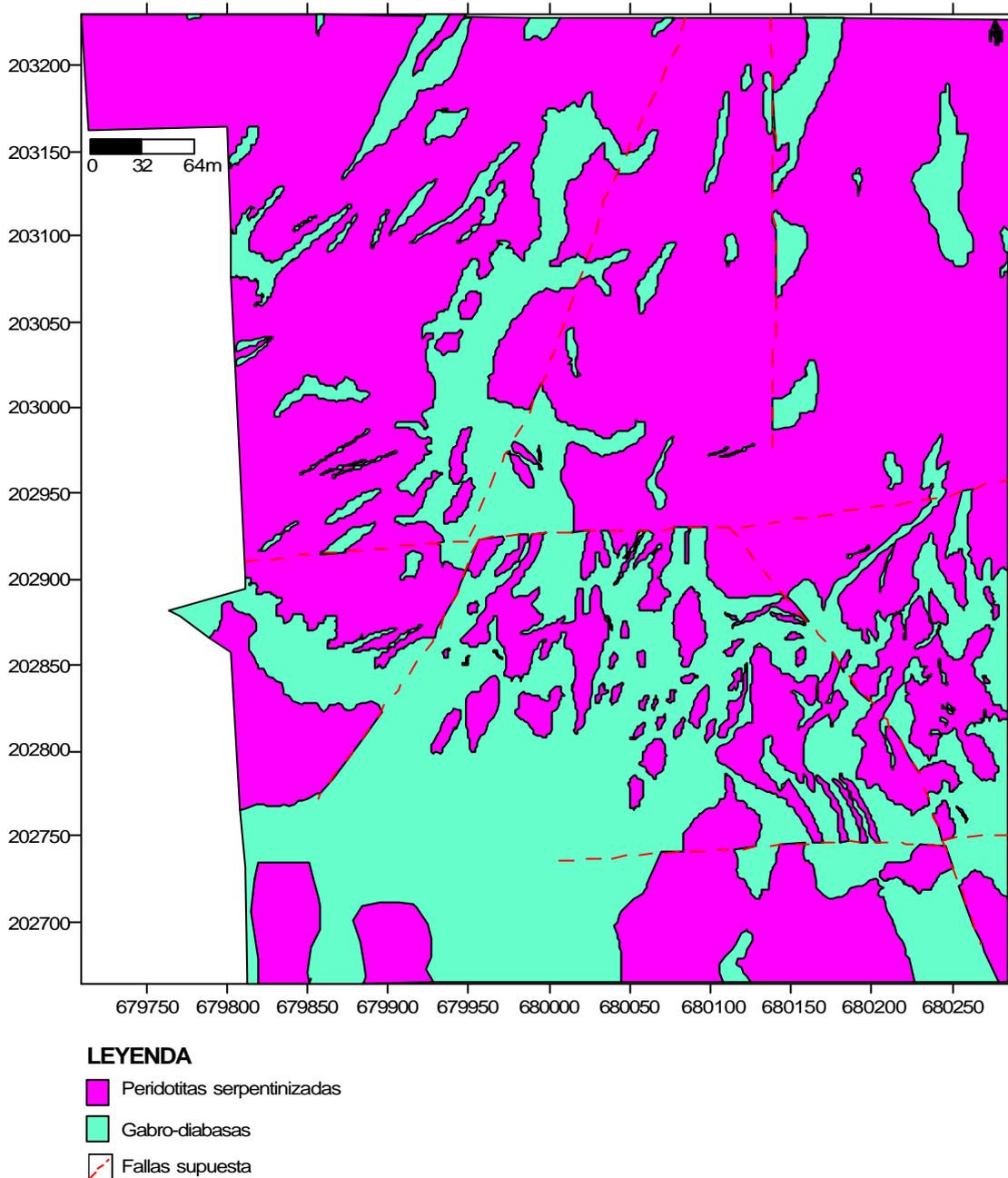


Figura 8. Mapa geológico del sector Rancho Yagua (modificado de Bronnikov y Budnitsky, 1969).

Particularmente en el sector de estudio del extremo SW del macizo ofiolítico de Moa-Baracoa predominan ofiolitas, fundamentalmente rocas ultrabásicas serpentinizadas y pequeños cuerpos de gabros en el extremo este (Figura 6). En menor grado afloran rocas sedimentarias y volcano-sedimentarias en la parte septentrional y SW. En los sectores Majayara y Rancho Yagua (Figura 7 y 8) aparecen fundamentalmente peridotitas serpentinizadas y gabro-diabasas en forma de diques (Bronnikov y Budnitsky, 1969;

Larduet, 1991). En este último sector mencionado se realizaron dos pozos de perforación y cuatro criollos (Tabla 1, 2, 3, 4 y 5). En el sector Cayo Guam (Figura 1) prevalecen las rocas peridotíticas serpentinizadas (Prolov y otros, 1980).

Tabla 1. Pozo No. 1 del sector Rancho Yagua (Tomado de Bronnikov y Budnitsky, 1969).

Coordenadas: X: 679904, Y: 202905

| Litologías | Intervalo de muestreo (m) | Descripción |
|-------------------|----------------------------------|--|
| Diluvio | 0-5.30 | Diluvio con fragmentos redondeados y angulares de serpentinita algo alterado de distintos tamaños, cementados por una matriz areno-arcillosa de color amarillento. |
| Gabro-diabasas | 5.30-8.35 | Dique de gabro-diabasa de color gris, de granos finos, muy destruido y agrietados. |
| Serpentinitas | 8.35-11.45 | Serpentina bandeada de color verde algo agrietada. Las grietas están llenas de un material que parece serpofito. También se observan trazas de la mineralización |
| Harzburgitas | 11.45-13.20 | Harzburgitas de color verde oscuro, de estructura masiva, textura equigranular de granos finos algo agrietada. |
| Asbesto crisotilo | 13.20-14.90 | Crisolito-Asbesto del tipo de vetas longitudinalmente, paralelas |
| Asbesto crisotilo | 14.90-15.05 | Crisolito-Asbesto del tipo de vetas longitudinalmente, paralelas |
| Gabro-diabasas | 15.05-18.54 | Dique de gabro-diabasa de color gris oscuro, estructura masiva, textura equigranular de granos medios, algo destruido y agrietado, con algunas vestillas de SiO ₂ |
| | 18.54-19.18 | No hubo recuperación |
| Serpentinitas | 19.18-20.00 | Serpentina bandeada de color verde-amarillento muy destruido y agrietada. |
| Harzburgitas | 20.00-20.90 | Harzburgitas de color verde oscuro muy agrietada con trazas de mineralización |
| Asbesto Crisotilo | 20.90-22.05 | Crisolito-Asbesto del tipo de vetas longitudinalmente paralelas. |
| Harzburgitas | 22.05-24.31 | Harzburgita color verde oscuro, estructura masiva y textura equigranular de granos finos, poco agrietada con trazas de la mineralización. |
| Asbesto Crisotilo | 24.31-25.26 | Crisotilo-Asbesto del tipo de vetas longitudinalmente paralelas. |
| Harzburgitas | 25.26-26.10 | Harzburgitas de color verde oscuro, estructura, poco agrietada con trazas de mineralización |
| Gabro-diabasas | 26.16-30.01 | Dique de gabro-diabasa de color gris oscuro, estructura masiva, textura equigranular de granos medios algo agrietada con vetillas de CaCO ₃ . |
| | 30.01-30.30 | No hubo recuperación |
| Serpentinita | 30.30-31.12 | Serpentinita bandeada, muy destruida y agrietada, con trazas de mineralización |

Tabla 2. Pozo No. 2 del sector Rancho Yagua (tomado de Bronnikov y Budnitsky, 1969).

Coordenadas: X: 680219, Y: 202905

| Litologías | Intervalo de muestreo (m) | Descripción |
|-------------------|----------------------------------|---|
| Gabro-diabasa | 0.00-2.00 | Gabro-diabasa algo agrietada con carbonato en las grietas |
| Serpentinita | 2.00-3.80 | Serpentinita bandeada muy destruida con mineralización |
| Gabro-diabasa | 3.80-5.15 | Gabro-diabasa con iguales características que al comienzo. Serpentinita muy destruida con trazas de crisotilo |
| Serpentinita | 5.15-20.70 | Serpentinita bandeada muy destruida con mineralización. El tipo de mineralización no se puede apreciar debido al alto grado de destrucción que presenta la roca |
| Gabro-diabasa | 20.70-22.70 | Gabro-diabasa bastante compacta con carbonato en las grietas. |
| Gabro-diabasa | 22.70-27.77 | |
| Gabro-diabasa | 27.77-40.10 | Gabro-diabasa de color gris oscuro, textura de granos finos. Presenta carbonatización en algunas de las grietas. |
| Serpentinita | 40.10-50.85 | Serpentinita bandeada de color gris oscuro muy alterada y fracturada, con escasas trazas de Crisotilo. Hay carbonatización en las grietas formando vetillas de 0.003 m de potencia. |
| Gabro-diabasa | 50.85-54.80 | Gabro-diabasa de color gris claro y carbonatización en sus grietas. |
| Serpentinita | 54.80-62.51 | Serpentinita bandeada de color gris, verde-oscuro, con trazas de crisotilo y algunos cristales de pirita por las grietas. |
| Gabro-diabasa | 62.51-67.73 | Gabro-diabasa con carbonatos por las grietas. |
| Serpentinita | 67.73-88.50 | Serpentinita bandeada de color gris verde (oscuro) muy alterada y destruida, presente carbonatización por las grietas y se observa bastante bobinita. |
| Serpentinita | 88.50-88.97 | Serpentinita bandeada de color gris verdoso con relictos de harzburgita, presenta grandes cristales de piroxenos, presenta tramos casi blancos producto de la intensa carbonatización. Desde 90 hasta 93 metros. Hay un alto contenido de bobinitas y antigorita. |
| Serpentinita | 88.77-111.15 | |
| Gabro-diabasa | 111.15-112.95 | Gabro-diabasa de color gris claro con grietas rellenas de calcita. |
| Serpentinita | 112.85-113.84 | Serpentinita bandeada muy fracturada con cristales de pirita por las grietas. |
| Gabro- | 113.84- | Gabro-diabasa muy fracturada con calcita por las |

| Litologías | Intervalo de muestreo (m) | Descripción |
|---|----------------------------------|---|
| diabasa | 115.46 | grietas. |
| Serpentinita | 115.46-137.85 | Serpentinita bandeada de color gris oscuro, en parte casi negra con matices verdosos, está bastante fracturada y presenta carbonatización y nemolita por las grietas. En algunos sitios se observan restos de harzburgita. Se observan cristales de pirita por las grietas. |
| Gabro-diabasa | 137.85-155.00 | Gabro-diabasa de color gris oscuro y textura de granos muy finos, constituido próximamente por un 70% de piroxenos y el resto de blagioclasas, hay carbonatización por las grietas. |
| Serpentinita | 155.00-160.60 | Harzburgita serpentinizadas de textura equigranular de granos muy finos, muy fracturada con carbonatización por las grietas. |
| Gabro-diabasa | 160.60-163.45 | Gabro-diabasa color gris oscuro de granos muy finos con grietas rellenas de cuarzo y carbonatos. |
| Harzburgita serpentinizadas; Gabro-diabasa | 163.45-168.85 | Harzburgita serpentinizadas de color gris negro muy fracturada y con carbonato en las grietas. Gabro-diabasa de color gris oscuro, carbonata y cuarcificada en sus grietas. |
| Harzburgita serpentinizada; Gabro-diabasa | 168.85-170.03 | Harzburgita serpentinizada de color oscuro casi negro, textura de granos finos, con cristales grandes de piroxenos, muy fracturada con carbonatización por las grietas, gabro-diabasa de color gris oscuro carbonatada y cuarcificada por las grietas. |
| Gabro-diabasa | 170.03-180.35 | Gabros-diabasa de color gris oscuro, textura de granos muy finos, bastante compacta con cuarcificación y carbonatización por las grietas. |
| Harzburgita serpentinizada | 180.35-189.70 | Harzburgita serpentinizada de color en parte casi negro con matices verdosos, está muy fracturada y se observan espejos de fallas, hay carbonatización por las grietas. |
| Gabro-diabasa | 189.40-196.37 | Gabros-diabasa de color gris oscuro, tiene muchas grietas en su mayor parte rellenos de carbonatos (magnesita) |
| Harzburgita serpentinizada | 196.37-197.15 | Harzburgita serpentinizada de color gris oscuro muy fracturada y con carbonatos por las grietas |
| Gabro-diabasa | 197.15-285 | Gabros-diabasa de color gris claro, textura que va de granos finos a medio, muy agrietada y con carbonatos por las grietas. |

Tabla 3. Pozo criollo No. 1 del sector Rancho Yagua (Tomado de Bronnikov y Budnitsky, 1969).

Coordenadas: X: 680242, Y: 202825

| Litologías | Intervalo de muestreo (m) | Descripción |
|-------------------|----------------------------------|---|
| Serpentinita | 0.0-4.00 | Hay corteza de interperismo de serpentinita en la que se notan huellas de fuertes presiones tectónicas, se presentan trazas de crisotilo-asbesto en forma esporádica. |
| Serpentinita | 4.0-8.50 | La roca sigue presentando las mismas características que al comienzo, y se observan muchos espejos de deslizamiento. |
| Gabro-diabasa | 8.50-14.00 | Dique de Gabro-diabasa muy fracturado con fuerte oxidación de hierro por las grietas. |
| Serpentinita | 14.0-18.50 | Serpentina bandeada muy fracturada y destruida, se observan trazas de crisotilo-asbesto y muchos espejos de deslizamiento. |

Tabla 4. Pozo criollo No. 2 del sector Rancho Yagua (Tomado de Bronnikov y Budnitsky, 1969).

Coordenadas: X: 680226, Y: 202870

| Litologías | Intervalo de muestreo (m) | Descripción |
|-------------------|----------------------------------|--|
| Serpentinita | 0.0-5.00 | Serpentinita bandeada muy alterada e intensamente fracturada, con espejos de fallas cuyos elementos no es posible medir, hay suave oxidación de hierro por las grietas, hay mineralización en forma de trazas. |
| | 5.0-9.00 | Hay bastante grietas con dirección promedio de 212^0 pero con distintos ángulos, se mantiene la mineralización en forma de trazas, hay nidos de antigoritización en algunos sitios. |
| Gabro-diabasa | 9.0- 14.0 | Dique de Gabro-diabasa, bastante fracturada con venitas de cuarzo con potencia máxima de 0.002 m. |
| Serpentinita | 14-18 | La serpentinita y la mineralización se mantiene igual que al comienzo. |

Tabla 5. Pozo criollo No. 3 del sector Rancho Yagua (tomado de Bronnikov y Budnitsky, 1969).

Coordenadas: X: 680228, Y: 202764

| Litologías | Intervalo de muestreo (m) | Descripción |
|---------------|-----------------------------|---|
| Gabro-diabasa | 0.00-2.00 | Gabro-diabasa algo agrietada con carbonato en las grietas |
| Serpentinita | 2.00-3.80 | Serpentinita bandeada muy destruida con mineralización |
| Gabro-diabasa | 3.80-5.15 | Gabro-diabasa con iguales características que al comienzo serpentinita muy destruida con trazas de crisotilo |
| Serpentinita | 5.15-20.70 | Serpentinita bandeada muy destruida con mineralización. El tipo de mineralización no se puede apreciar debido al alto grado de destrucción que presenta la roca |
| Gabro-diabasa | 20.70-22.70 22.70-27.77 | Gabro-diabasa bastante compacta con carbonato en las grietas. |
| Gabro-diabasa | 27.77-40.10 | Gabro-diabasa de color gris oscuro, textura de granos finos. Presenta carbonatación por algunas de las grietas. |
| Serpentinita | 40.10-50.85 | Serpentinita bandeada de color gris oscuro muy alterada y fracturada, con escasas trazas de Crisotilo. Hay carbonatación por las grietas formando vetillas de 0.003 m de potencia |
| Serpentinita | 50.85-54.80 | Serpentinita bandeada de color gris verde-oscuro, con trazas de crisotilo y algunos cristales de pirita por las grietas. |
| Gabro-diabasa | 62.51-67.73 | Gabro-diabasa con carbonatos por las grietas |
| Serpentinita | 67.73-88.50 | Serpentinita bandeada de color gris verde (oscuro) muy alterada y destruida, presente carbonatación por las grietas y se observa bastante bobinita. |
| Serpentinita | 88.50-88.97 88.77-111.15 | Serpentinita bandeada de color gris verdoso con relictos de harzburgita, presenta grandes cristales de piroxenos, presenta tramos casi blancos producto de la intensa carbonatación. Desde 90 hasta 93 metros. Hay un alto contenido de bobinitas y antigorita. |
| Gabro-diabasa | 111.15-112.95 | Gabro-diabasa de color gris claro con grietas rellenas de calcita. |
| Serpentinita | 112.85-113.84 | Serpentinita bandeada muy fracturada con cristales de pirita por las grietas |
| Gabro-diabasa | 113.84-115.46 | Gabro-diabasa muy fracturada con calcita por las grietas |
| Serpentinita | 115.46-137.85 | Serpentinita bandeada de color gris oscuro, en parte casi negra con matices verdosos, está bastante fracturada y presenta carbonatación y nemolita por las grietas. En algunos sitios se observan restos de harzburgita. Se |

| Litologías | Intervalo de muestreo (m) | Descripción |
|---|----------------------------------|--|
| | | observan cristales de pirita por las grietas. |
| Gabro-diabasa | 137.85-155.00 | Gabro-diabasa de color gris oscuro y textura de granos muy finos, constituido próximamente por un 70% de piroxenos y el resto de blagioclasas, hay carbonatación por las grietas. |
| Serpentinita | 155.00-160.60 | Serpentinita harzburgita de textura equigranular de granos muy finos, muy fracturada con carbonatación por las grietas. |
| Gabro-diabasa | 160.60-163.45 | Gabro-diabasa color gris oscuro de granos muy finos con grietas rellenas de cuarzo y carbonatos. |
| Serpentinita-harzburgita; Gabros-diabasa | 163.45-168.85 -170.03 | Serpentinita-harzburgita de color oscuro casi negro, textura de granos finos, con cristales grandes de piroxenos, muy fracturada con carbonatación por las grietas, gabro diabasa de color gris oscuro carbonatada y cuarcificada por las grietas. |
| Gabros-diabasa | 170.03-180.35 | Gabros-diabasa de color gris oscuro, textura de granos muy finos, bastante compacta con cuarcificación y carbonatación por las grietas. |
| Serpentinita-harzburgitas | 180.35-189.70 | Serpentina-harzburgita color en parte casi negro con matices verdosos, está muy fracturada y se observan espejos de fallas, hay carbonatación por las grietas. |
| Gabros-diabasa | 189.40-196.37 | Gabros-diabasa de color gris oscuro, tiene muchas grietas en su mayor parte rellenos de carbonatos (magnesita) |
| Serpentinita-harzburgita | 196.37-197.15 | Serpentinita-harzburgita de color gris oscuro muy fracturada y con carbonatos por las grietas |
| Gabros-diabasa | 197.15 | Gabros-diabasa de color gris claro, textura que va de granos finos a medio, muy agrietada y con carbonatos por las grietas. |

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Introducción.

Metodología de la investigación.

Caracterización petrofísica.

Marco teórico de la investigación

Introducción

Durante la interpretación geólogo-geofísica de una región determinada se debe seleccionar correctamente la metodología a seguir durante la misma, que estará en función de las características geológicas del área investigada y de las tareas que en la misma se desean resolver. Esta metodología garantizará la efectividad de la investigación y permitirá planificar los trabajos a realizar. Un aspecto imprescindible en las investigaciones geofísicas es el conocimiento de las propiedades físicas de las rocas y menas que integran el territorio a investigar. En la medida que se conozcan mejor esas propiedades se incrementará la efectividad de los métodos geofísicos aplicados. Una de las principales líneas de aplicación de los métodos geofísicos, está encaminada hacia las investigaciones medioambientales, lo cual ha adquirido mucha importancia en los últimos tiempos. Por este motivo se ha dedicado este capítulo a exponer la metodología seguida durante el desarrollo de esta investigación, la caracterización petrofísica del territorio investigado, así como los principales métodos geofísicos que se utilizan durante las investigaciones medioambientales, y los aspectos fundamentales de los métodos geofísicos utilizados en esta investigación.

Metodología de la investigación

La metodología seguida durante la investigación se desarrolló en tres etapas, las cuales se describen a continuación.

Primera etapa: Preliminar. En esta etapa se estableció el área de trabajo, en función de la disponibilidad de información geológica y geofísica, y garantizando que la misma quedara incluida dentro de la región nororiental de Cuba, donde se localizan los principales yacimientos ferroniquelíferos de Cuba Oriental, y por lo tanto, se ha

desarrollado una gran infraestructura minero-metalúrgica y social. Partiendo del objetivo propuesto en la investigación se asumió el área comprendida entre el municipio Cueto al oeste y el poblado de Cayo Güin al este, extendiéndose de norte a sur desde la costa hasta la coordenada 199 500, abarcando un área aproximada de 3 754 Km², dentro de la región Mayarí-Sagua-Moa (Figura 1).

Luego se procedió a la revisión y recopilación de la información geológica y geofísica comprendida en el extremo noroeste de Cuba oriental, a partir de lo cuál se escogieron cuatro sectores: SW del macizo ofiolítico Moa-Baracoa, Majayara, Rancho Yagua y Cayo Guam, en los cuales se realizaron levantamientos geofísicos terrestres.

En esta etapa además se realizó una revisión bibliográfica, durante la cual se consultaron diferentes trabajos geológicos y geofísicos relacionados con la temática de investigación llevados a cabo en otras regiones del mundo. Producto de esta revisión en la tesis se recoge un total de 131 referencias bibliográficas, de las cuales 47 se enmarcan en los últimos cinco años para un 35.8 % del total, 60 en los últimos 8 años para un 45.8 % del total, 66 en los últimos 10 años para un 50.3 del total, denotando el grado de actualización de la bibliografía consultada.

Para dar cumplimiento al objetivo propuesto en esta investigación, de la información geofísica revisada se seleccionaron los siguientes datos geofísicos:

- Datos aeromagnéticos de Cuba nororiental pertenecientes al levantamiento aerogeofísico complejo de Cuba oriental (Chang y otros, 1990, 1991). Este levantamiento se realizó a escala 1:50 000, a lo largo de líneas de vuelo de dirección norte-sur, separadas cada 500 m y una altura media de vuelo de 70 m. El mismo contiene información proveniente de los canales de K (%), eU (ppm), eTh (ppm), intensidad total ($\mu\text{R/h}$) y $\Delta T(\text{nT})$. La precisión en la medición de los datos aeromagnéticos es de $\pm 10 \text{ nT}$.
- Levantamiento magnético terrestre del extremo SW del macizo ofiolítico Moa-Baracoa, realizado a escala 1:50 000 (Zamashikov y Tabachkov, 1971).
- Levantamiento magnético y de perfilaje eléctrico del sector Majayara, realizado a escala 1: 2 000 (Bronnikov y Budnitsky, 1969).
- Levantamiento magnético y de perfilaje eléctrico del sector Rancho Yagua, realizado a escala 1: 1 000 (Bronnikov y Budnitsky, 1969).

- Levantamiento gravimétrico y magnético del sector Cayo Guam, realizado a escala 1: 1 000 (Prolov y otros, 1980).

Información geológica y otros materiales utilizados en esta investigación:

- Mapa geológico de la región nororiental de Cuba, 1:250 000 (Albear y otros, 1988).
- Mapa geológico del extremo SW del macizo ofiolítico Moa-Baracoa, 1: 100 000 (modificado de Albear y otros, 1988; Gyarmati y Leyé O'Conor, 1990).
- Mapa geológico del sector Majayara, 1: 2 000 (Bronnikov y Budnitsky, 1969).
- Mapa geológico del sector Rancho Yagua, 1: 1 000 (Bronnikov y Budnitsky, 1969).
- Pozos de perforación y criollos del sector Rancho Yagua (Bronnikov y Budnitsky, 1969).
- Mapas topográficos, 1:50 000.
- Bases de datos de trabajos geoquímicos, petrológicos, petrofísicos y otros.

Esta etapa culmina con un estudio petrofísico, particularmente de densidad y susceptibilidad magnética.

Segunda etapa: Experimental. Consistió en la preparación y procesamiento de la información geofísica y geológica.

En la primera parte de esta etapa toda la información disponible se llevó a formato digital (Rodríguez-Miranda, 1998; Batista, 1998, 2000c, 2002) siguiendo la siguiente secuencia:

1. Preparación de la información: en cada uno de los mapas y materiales a escanear se definieron bien los trazos o puntos y se fijaron los puntos de control. En esta misma fase se crearon ficheros con la información numérica.
2. Escaneado de los mapas geofísicos, geológicos y topográficos.
3. Georeferenciación y digitalización de los mapas y materiales con ayuda del Sistema de Información Geográfica (SIG) MAPINFO v. 6.5 (*MapInfo Corporation, 1985-2001*).
4. Se creó un SIG para la gestión de la información geológica y geofísica en los sectores Majayara y Rancho Yagua, y se recuperaron los SIG ya existentes de la región nororiental de Cuba y el extremo SW del macizo ofiolítico Moa-Baracoa.

5. Se exportaron los ficheros en los formatos TXT y DXF, para su posterior comparación con la información aerogeofísica, en el software SURFER v. 8.0 (*Golden Software, Inc., 2002*).

En la segunda parte de esta etapa se llevó a cabo la elaboración de la información aerogeofísica, según el siguiente orden:

1. Normalización y tratamiento estadístico descriptivo de las bases de datos de los levantamientos magnéticos y eléctricos de los sectores Majayara, Rancho Yagua y Cayo Guam.
2. Transformaciones del campo magnético, gravimétrico y eléctrico de los sectores investigados.

Durante el tratamiento estadístico descriptivo se calculó el rango de variación y la media de los datos geofísicos.

En función del objetivo de la investigación se realizaron diferentes transformaciones del campo magnético, gravimétrico y eléctrico, con ayuda de diferentes *software*:

- Cálculo de gradientes horizontales y verticales de los datos magnético (Z), gravimétrico (Δg) y de perfilaje eléctrico (ρ_a) de los sectores Majayara, Rancho Yagua y Cayo Guam, con ayuda del *software* GRAD-3D v. 1.1 (Dpto. Geociencia, CUJAE, 1996).
- Cálculo de la Continuación Analítica Ascendente (CAA) del campo magnético y gravimétrico en los sectores Majayara, Rancho Yagua y Cayo Guam, con ayuda del *software* IMAG-PC v. 1.2 (Lab. inteligencia artificial y procesamiento de imágenes, COPEXTEL, 1993).

Estas transformaciones de los campos físicos están orientadas a resaltar las alineaciones que pueden estar relacionadas con zonas de contactos y estructuras disyuntivas, la ubicación de cuerpos geológicos a diferentes intervalos de profundidades, así como las variaciones de sus espesores (Blakely and Simpson, 1986; Grauch and Cordell, 1987; Bassay y otros, 2001; Fabian y Fonseca, 2003).

Tercera etapa: Representación e interpretación. En esta etapa inicialmente se procedió a la representación de la información. Para ello los datos obtenidos en cada

levantamiento se representaron en forma de mapas de isolineas, de colores y de relieve sombreado, con el *software* SURFER v. 8.0 (*Golden Software, Inc., 2002*), por la utilidad que tienen estas representaciones durante el mapeo geológico, la prospección de yacimientos minerales, los estudios medioambientales (Linden y Akerblom, 1976; Duval y otros, 1977; Duval, 1983; Cordell L y Knepper, 1987; Broome, 1990; Givler y Wells, 2001). Para su representación cada matriz de datos se regularizó utilizando como método de interpolación el *Kriging*, con una distancia entre puntos y perfiles de medición de 20, 10 y 10 m, para los sectores Majayara, Rancho Yagua y Cayo Guam, respectivamente, en correspondencia con las características del levantamiento (Billings y FitzGerald, 2001). El método de interpolación se estableció teniendo en cuenta resultados de trabajos anteriores (Batista, 1998, 2002; Batista y Rodríguez, 2000).

En la última parte de esta etapa se procedió a la interpretación final con el SIG creado en cada área de trabajo, con ayuda de los *software* MAPINFO v. 6.5. (*MapInfo Corporation, 1985-2001*) y SURFER v. 8.0 (*Golden Software, Inc., 2002*). Esta interpretación se realizó a través de los pasos siguientes:

- Análisis y reinterpretación de la información aeromagnética y de los datos magnéticos terrestres de la región nororiental de Cuba y el extremo SW del macizo ofiolítico Moa-Baracoa, respectivamente.
- Descripción e interpretación general de los mapas magnéticos y eléctricos, así como sus productos derivados, en los sectores Majayara y Rancho Yagua, además de los mapas magnético y gravimétrico, y sus productos derivados en el sector Cayo Guam.
- Análisis combinado de la información geofísica en los sectores analizados.

Durante la reinterpretación de los datos geofísicos en la región nororiental de Cuba y el extremo SW del macizo ofiolítico Moa-Baracoa se valoró la existencia de nuevas alineaciones en el comportamiento del campo magnético, así como el comportamiento en la profundidad a partir de la CAA, de todas las alineaciones señaladas, aspecto completamente nuevo en estas investigaciones.

Durante el cálculo de la CAA en el sector Majayara se utilizó la altura de recálculo de 20 y 40 m., mientras que en el sector Rancho Yagua se recalculó con alturas de 10, 20 y 30 m. Por último en Cayo Guam se utilizaron las alturas de recálculo de 10, 20, 30 y 40 m.

La interpretación de los datos magnéticos y eléctricos en los sectores Majayara y Rancho Yagua, así como de los datos magnéticos y gravimétricos en el sector Cayo Guam, se realizó de forma cualitativa. Durante esta interpretación se describieron cada uno de los mapas geofísicos y se compararon con la información geológica disponible, con el objetivo de aclarar la naturaleza geológica de las anomalías observadas en los mismos.

De forma general el proceso de interpretación cualitativa se realizó según la siguiente secuencia:

1. Interpretación cualitativa de los mapas de ΔZ , Δg y ρ_a , que incluye:
 - Caracterización magnética, gravimétrica o eléctrica del sector.
 - Comparación de la información geológica superpuesta con los datos geofísicos.
 - Descripción de los mapas de relieve sombreados y su comparación con la información tectónica del geológico.
2. Interpretación de los mapas de gradientes horizontales y verticales según los siguientes pasos:
 - Descripción de las características de los gradientes.
 - Comparación entre estos mapas y la información tectónica a través de la superposición de este último a los primeros.
 - Descripción de los mapas de relieve sombreados.
3. Interpretación de los mapas de Continuación Analítica Ascendente (CAA) según los siguientes pasos:
 - Selección de los mapas de CAA realizados preliminarmente, que permitieron caracterizar magnética o gravimétricamente la región investigada.
 - Interpretación de los mapas de CAA.
4. Interpretación combinada de la información geofísica en cada sector.

Una vez concluido el trabajo de interpretación se realizan generalizaciones y se establecen las conclusiones.

Esta etapa culmina con la redacción de la memoria escrita y la confección de las tablas y figuras que conforman la presente investigación.

Caracterización petrofísica

El estudio de las propiedades físicas de las rocas y minerales es importante durante el desarrollo de las investigaciones geológicas y geofísicas, ya que permite valorar el complejo de métodos geofísicos a utilizar, además aportan elementos en el procesamiento e interpretación de los datos geofísicos y permiten establecer y caracterizar determinadas regularidades geológicas presentes en la región de estudio.

La región de estudio está conformada fundamentalmente por rocas ofiolíticas, y en menor grado rocas volcano-sedimentarias y sedimentarias (Cobiella, 1988; Quintas, 1989; Iturralde-Vinent, 1995, 1996a, 1996b, 1996c, 1998; Proenza, 1997, Proenza y otros, 1999c; 2000a, 200b). En la misma los levantamientos geofísicos se han realizados en la mayoría de los casos con el método aeromagnético, aerogamma espectrométrico, magnético, eléctrico y gravimétrico. Además los estudios petrofísicos han estado restringidos al estudio de la susceptibilidad magnética (κ) y la densidad (σ). Teniendo en cuenta estos elementos, en esta investigación, la caracterización petrofísica se limita a estas dos propiedades físicas de las rocas presentes en la región de estudio.

La susceptibilidad magnética (κ) se define como la capacidad que tienen los materiales para magnetizarse bajo la acción de un campo magnético. En la medida que sea mayor κ , mayor será la magnetización inducida y por ende la anomalía producida por tales rocas (Logachev y Zajarov, 1986; Nash, 1998, Hernández, 1978). Esta propiedad depende del contenido de minerales ferromagnéticos de las rocas, de sus condiciones de cristalización e historia geológica a la cual han estado sometidas (Ellwood y otros, 2000, 2001; García, 1999).

La densidad (σ) en las rocas ígneas y metamórficas depende fundamentalmente de los principales minerales formadores de la roca, mientras que en las rocas sedimentarias la porosidad es el parámetro fundamental que determina el comportamiento de esta propiedad física. En todos los casos, también depende de los procesos posteriores que hayan actuado sobre las rocas una vez formadas (Hernández, 1978).

Entre los trabajos petrofísicos más significativos se encuentran los de Zamashikov y Tobachkov (1971) en el macizo Moa-Baracoa, Chang y otros (1990, 1991) en la región Mayarí-Sagua-Moa, Castillo (1980), Rodríguez (1982) y Batista (2002) en las rocas ultrabásicas, volcano-sedimentarias de Cuba nororiental.

En esta investigación no se tiene en cuenta la magnetización remanente medida en los trabajos mencionados, debido a su poca representatividad en cuanto a la cantidad de muestras y su ubicación, así como a los valores obtenidos (Castillo, 1980; Rodríguez, 1982).

Las propiedades físicas de las rocas varían de un tipo litológico a otro, e incluso dentro de un mismo tipo litológico, en dependencia del grado de mineralización y alteración (Logachev y Zajarov, 1986).

La región de estudio se encuentra ocupada en su mayor parte por rocas ofiolíticas y en menor grado por rocas volcano-sedimentarias, sedimentarias y metamórficas (Quintas, 1989; Gyarmati y Leyé O'Conor, 1990; Iturralde-Vinent, 1996a). En este mismo orden disminuyen los valores de susceptibilidad magnética (K) de las rocas sin considerar su grado de alteración y mineralización (Clark, 1997). Dentro de las ofiolitas, las rocas ultrabásicas se caracterizan por las mayores variaciones de K , desde débil hasta fuertemente magnéticas, en correspondencia con el grado de serpentinización, porque durante este proceso ocurre la transformación del olivino o piroxeno en serpentina, quedando libre parte del hierro que se transforma en magnetita, por lo que los mayores valores de K se registran en las rocas más serpentinizadas. Las transformaciones posteriores de estas rocas por carbonatización y listvenitización disminuyen nuevamente la susceptibilidad magnética, al igual que las alteraciones hidrotermales por seritización y cuarcificación ya que con las mismas se produce la alteración de la magnetita y un enriquecimiento en sílices (Logachev y Zajarov, 1986; Ishihara, 1990, Alva-Valdivia y otros, 1997; Gunn y otros, 1998; García, 1999).

Los gabros se caracterizan por ser débil o fuertemente magnéticos. Dentro de ellos las variedades de gabro-noritas y anortositas poseen los valores más bajos de K . Los mayores valores se registran en aquellos que se encuentran enriquecidos en magnetitas o pirrotina. Los procesos posteriores en los mismos, tales como la anfibolitización, provocan una disminución en su K (Logachev y Zajarov, 1986).

Por otro lado, la transformación de las rocas ultrabásicas por el denominado proceso de serpentinización, provoca una reducción de su densidad (σ), o sea, durante este proceso el olivino se transforma en serpentina, mineral con menores valores de densidad (Hernández, 1978).

En las rocas sedimentarias los valores de densidad sufren variaciones debido a la influencia de diferentes factores geológicos, bajo los cuales ha estado sometida la roca n todo su período de existencia (Hernández, 1978):

- La presión geostática provoca la disminución de la porosidad y por ende de un aumento de la densidad de las rocas que han sido afectadas Buenos
- El plegamiento también provoca la disminución de la porosidad y el aumento de la densidad.
- Los movimientos oscilatorios dan origen al agrietamiento intenso de las rocas sedimentarias, lo cual provoca una disminución de su densidad.
- La transformación de las rocas sedimentarias en las cortezas de intemperismo, se caracteriza generalmente por la disminución de la densidad.

Tabla 6. Susceptibilidad magnética ($K \times 10^{-6}/4\pi SI$) de los principales tipos de rocas que conforman la región Mayarí-Sagua-Moa (Zamashikov y Tobachkov, 1971; Castillo, 1980; Rodríguez, 1982; Chang y otros, 1990, 1991; Batista, 2002).

| Tipos de rocas | Intervalo | Media |
|------------------------------|------------------|--------------|
| Sedimentarias | 0 – 600 | 50 |
| Volcano-sedimentarias | 0 – 890 | 100 |
| Diabasas | 4 – 5 025 | 2 400 |
| Gabros | 10 - 900 | 107 |
| Dunitas | 500 – 3 200 | 1 000 |
| Dunitas serpentinizadas | 20 - 7200 | 1440 |
| Harzburgitas | 500 – 3 900 | 1 179 |
| Harzburgitas serpentinizadas | 10 – 9 150 | 1423 |
| Piroxenitas | 390 – 4 630 | 2 410 |
| Lateritas | 60 000 – 180 000 | 143 000 |

Tabla 7. Densidad ($S \times 10^3 Kg/m^3$) de los principales tipos de rocas que conforman el macizo Moa-Baracoa (Zamashikov y Tobachkov, 1971).

| Tipos de rocas | Intervalo |
|------------------------------|------------------|
| Calizas | 2.6 – 2.7 |
| Margas | 2.4 – 2.6 |
| Arcillas tobáceas | 2.2 – 2.3 |
| Tobas argilíticas | 2.0 |
| Dunitas | 2.4 – 2.7 |
| Harzburgitas | 2.5 – 2.7 |
| Dunitas serpentinizadas | 2.3 – 2.6 |
| Harzburgitas serpentinizadas | 2.4 – 2.7 |
| Piroxenitas | 2.5 – 2.6 |
| Serpentinitas intemperizadas | 1.8 – 2.7 |

| Tipos de rocas | Intervalo |
|--|------------------|
| Gabros | 2.8 – 3.0 |
| Porfiritas dioríticas, gabropegmatitas, plagioclasitas | 2.8 – 2.9 |
| Cromitas masivas | 3.3 – 3.8 |

A partir de los valores de K mostrados en la tabla 6, se manifiesta que las rocas ígneas poseen los valores más altos de K , en orden le siguen las rocas volcano-sedimentarias y sedimentarias, lo cual permite inferir que las mayores intensidades positivas del campo magnético deben estar relacionadas con las características geológicas y estructurales de las rocas ultrabásicas serpentinizadas, teniendo en cuenta que ocupan la mayor parte del territorio. En áreas muy restringidas pueden estar provocadas por piroxenitas y diabasas. Según se observa en la Tabla 7, dentro de las rocas sedimentarias y volcano-sedimentarias, se establecen algunas divisiones entre algunas variedades. Dentro de ellas las rocas más densas son las calizas y las menos densas las tobas argilíticas. En las rocas ultrabásicas, las dunitas, son las más densas, igual que las harzburgitas y harzburgitas serpentinizadas. Por otro lado, las serpentinitas intemperizadas poseen los menores valores de densidad. Los gabros son las rocas más densas en toda el área. De estas características de la densidad en esta región se infiere que las mayores intensidades del campo gravitatorio deben estar relacionadas con las áreas de desarrollo de gabros y en menor grado de dunitas, harzburgitas, harzburgitas serpentinizadas o calizas. Por lo tanto, las mayores intensidades del campo gravitatorio deben estar relacionadas con las zonas de predominio de los gabros.

Marco teórico de la investigación

Métodos geofísicos aplicados durante las investigaciones medioambientales

El empleo de métodos geofísicos durante las investigaciones medioambientales, posee una gran importancia, ya que permite lograr una gran economía de tiempo y medios en estas investigaciones, siendo suficientemente alta la precisión de los resultados obtenidos. Sin embargo, dichos métodos no siempre permiten resolver los problemas de una sola acepción, ya que los datos obtenidos se pueden interpretar de modo distinto (Kolomenski, 1984).

El objetivo principal de los trabajos geofísicos durante las investigaciones medioambientales, es medir las propiedades de los materiales, y localizar rasgos

estructurales y geológicos. Normalmente se utiliza más de un método geofísico para esto trabajos. La razón es que si un método geofísico no puede trabajar en un sitio debido a condiciones del suelo, topográficas o climáticas, otro método geofísico se adaptaría satisfactoriamente a cualquiera de esas condiciones. También, los métodos múltiples proporcionarán la confirmación y convicción de calidad de resultados (Hegmann , 2001; Castillo-García , 2004).

Los métodos geofísicos más usados incluyen:

- Sísmica de Refracción (superficie y pozo) .
- Electromagnético.
- Ground Penetrating Radar GPR (superficie y pozo).
- Tomografía Eléctrica – Resistividad.
- Potencial espontáneo.
- Magnetometría.

Los métodos geofísicos pueden dar resultados positivos sólo al estudiar cuerpos heterogéneos, es decir, sólo en el caso de que los índices de las propiedades de las rocas en el corte (por ejemplo la resistividad eléctrica aparente), se diferencian mucho unos de otros. Los resultados más claros se obtienen cuando la diferencia de las propiedades de las rocas ocurre de un modo brusco, por ejemplo, al marcar las cavidades cársticas, las zonas de brechamiento, etc. Si el cambio de las propiedades de las rocas ocurre gradualmente (amortiguamiento gradual del agrietamiento, variación de la composición litológica, humedad, etc.), es difícil o hasta imposible establecer los límites exactos de las zonas de brechamiento, del agrietamiento, etc. (Kolomenski , 1984).

La aplicabilidad de uno u otro método geofísico también se determina por las dimensiones de los objetos de estudio, la profundidad de su yacimiento, composición de las rocas y complejidad del corte geológico, etc. Al elegir el método más eficaz de las investigaciones geofísicas, se debe tomar en consideración la tarea planteada, condiciones ingeniero-geológicas concretas; también se necesita recordar que es bastante difícil interpretar los datos obtenidos, se exige que en la interpretación tome parte o dé consultas un especialista geofísico experimentado. A continuación se examinan en breve las posibilidades y condiciones de aplicación de los métodos geofísicos en el proceso de las investigaciones ingeniero-geológicas (Kolomenski, 1984).

Exploración eléctrica

Los métodos principales de la exploración eléctrica que se emplea durante los estudios ingeniero-geológicos son los siguientes: el sondeo eléctrico vertical (SEV) y el perfilaje eléctrico. Otros métodos eléctricos se emplean con mucha menor frecuencia.

Es posible aplicar con éxito la investigación eléctrica en las condiciones siguientes:

- Si es continua y permanente la diferencia de las resistencias eléctricas entre los objetos de estudio y su medio circundante.
- Si las dimensiones del objeto de estudio, profundidad de los estratos y de los cuerpos geológicos que lo rodean, son conmensurables.

La determinación de la profundidad de los estratos y el relieve de las rocas firmes es posible siendo muy diferentes las correlaciones entre la resistencia eléctrica de las rocas firmes y los depósitos cuaternarios que las cubren, pero sólo si las resistencias eléctricas de las rocas firmes son bastante diferentes una de otras. En estos casos se recomienda ubicar los puntos del SEV según una red.

La revelación y delimitación de los valles fluviales muy profundos se efectúa con el SEV y el perfilaje eléctrico. Al realizar el sondeo, junto a los pozos perforados se trazan los perfiles del SEV a través de todo el valle actual del río. Para el mayor detalle del área del valle profundo se realizan los perfiles inmediatamente en dicha área. Para delimitar el valle profundo con mayor precisión, entre el diámetro del SEV, se efectúan los perfiles eléctricos.

La diferenciación de capas de rocas de distinta composición litológica se realiza de diferentes modos en dependencia del ángulo de buzamiento de las capas. Siendo la estratificación de las capas poco inclinada (de 0 a 20⁰), se emplea el método del SEV, las distancias entre los sondeos las marcan según el rumbo de las rocas. Siendo la estratificación de las capas inclinadas (con un ángulo mayor de 20⁰), se emplea el perfilaje eléctrico junto con el SEV.

La determinación y el trazado de las dislocaciones tectónicas se realizan mediante el perfilaje eléctrico. Se ubican los perfiles eléctricos aproximadamente perpendiculares a la dirección supuesta de las dislocaciones tectónicas. Se eligen las distancias basándose en los datos del SEV, obtenidos en 5-10 puntos (dependiendo de las dimensiones del área).

La determinación de la profundidad de los estratos, del espesor y la forma de los cuerpos intrusivos se basan en las resistencias eléctricas de estos cuerpos mucho

mayores comparándolos con los depósitos sedimentarios contiguos. La elección del método de investigación eléctrica depende de la forma y dimensiones de los intrusivos. Se ubican los perfiles con los puntos del SEV tanto según la dirección como transversales a los cuerpos intrusivos. Se realizan los perfiles perpendiculares al contacto. Se determinan las distancias entre los puntos del SEV y los perfiles por las dimensiones del área de estudio, los cuerpos intrusivos y las construcciones.

Es posible determinar la profundidad de la zona carsificada y la zona muy agrietada siendo la profundidad de los estratos de éstas no menor de 30-40 m y la anchura de dichas zonas no menor de 80-100 m, a condición de que las rocas carsificadas se encuentren más bajo que el nivel de las aguas subterráneas. Se consigue determinar y delimitar en el plano las cavidades cársticas aisladas sólo si sus dimensiones son comparables con el espesor de los depósitos que yacen sobre ellas

El método gravimétrico se ha utilizado en estas investigaciones, para caracterizar zonas cársticas donde se detectan anomalías gravimétricas negativas (Paz, 1984).

El método magnético se utiliza en lugares donde existan contactos entre rocas sedimentarias, que tienen valores bajos de susceptibilidad magnética, y las rocas ígneas, con altos valores de esta propiedad física (Paz, 1984).

La utilización de métodos geofísicos en las investigaciones medioambientales ofrecen muchas ventajas con respecto a otros métodos de investigación (Bremer, 2004). A continuación se enumeran algunas de ellas:

- Las decisiones sobre la seguridad de las instalaciones (fosas/rellenos, tuberías, etc.) basadas en trabajos científicos siempre son mejores.
- Permiten la caracterización previa del sitio y su subsiguiente monitoreo.
- Son métodos No Destructivos y No Invasivos, permitiendo realizar trabajos en ambientes urbanos, industriales, sin ruidos ni destrucción.
- Conocimiento de la ubicación exacta y caracterización de anomalías ocultas y las estructuras enterradas.
- Efectividad en rapidez y costos, proporcionando gran cantidad de información.
- La geofísica no impacta el ambiente y permite la evaluación de un sitio sin afectarlo y la planificación de cualquier tipo de intervención.
- Disminuyen la cantidad de perforaciones a realizar, disminuyendo por lo tanto los riesgos de esta actividad. Aumenta la efectividad de la ubicación de las mismas,

disminuyendo el tiempo y costo del proyecto, y el riesgo de poner en contacto zonas contaminada y acuíferos.

Tareas que se resuelven con los métodos geofísicos durante las investigaciones medioambientales

Existen diversos ambientes donde los métodos geofísicos son útiles para el inventario, auditoria, caracterización, monitoreo y planificación ambiental en zonas de desarrollos urbanos y industriales, campos petrolíferos y zonas militares. A continuación se mencionan algunas de las tareas que se pueden con ayuda de estos métodos:

- Caracterización de zonas para potencial instalaciones de fosas y rellenos.
- Evaluación de materiales de base de la fosa/relleno (impermeabilidad, etc.) y caracterización del entorno geológico e hidrológicos.
- Evaluación a priori de las propiedades físicas del entorno para el establecimiento de un procedimiento de monitoreo en el tiempo de la fosa/relleno.
- Definición trazados de tubería, utilidades y líneas eléctricas.
- Caracterización de riesgos geológicos (fallas, deslizamientos, etc.).
- Evaluación de la existencia de filtraciones en fosas, rellenos sanitarios y en proximidad de tanques de hidrocarburos. Monitoreo temporal.
- Contaminación de suelos.
- Evaluación de riesgo de interferencia de posibles zonas contaminadas con acuíferos, caracterización de substrato para localizar posibles trampas geológicas para contaminantes.
- Optimización en ubicación de pozos en áreas contaminadas alrededor de fosas, tanques y pozos petrolíferos.
- Identificación de estructuras civiles, tubería, tanques, viejos pozos, barriles, materiales químicos y bélicos enterrados.
- Localización de cavidades, deslaves y zonas de hundimiento.
- Caracterización y monitoreo de intrusiones salinas en zonas costeras e interacción de fluidos de salmueras, perforados en zonas petroleras, con acuíferos.
- Localización, evaluación y monitoreo de riesgos geológicos.

- Evaluación integridad de diques y “liners” (base impermeable) en fosas y rellenos sanitarios.

Métodos geofísicos y sus transformaciones utilizadas durante el desarrollo de la presente investigación

Los métodos geofísicos utilizados en la presente investigación abarcan la magnetometría, gravimetría y geoelectricidad. Tales métodos constituyen un conjunto de métodos geofísicos que se utilizan durante el estudio de nuestro planeta, sobre todo de aquella parte de la corteza terrestre accesible por la actividad humana, con el objetivo de resolver tareas relacionadas con la prospección de yacimientos minerales, la ingeniería geológica, el medio ambiente y la arqueología, entre otras.

Método magnético

El método magnético se basa en el estudio del campo magnético generado por la heterogeneidades en las propiedades magnéticas (susceptibilidad magnética y magnetización) del medio geológico. Las mayores intensidades del campo magnético positivo se relacionan con rocas de alto grado de magnetización, como es el caso de las rocas básicas y ultrabásicas (Logachev y Zajarov, 1978; ; Griem y Griem-Klee, 2004).

Método gravimétrico

El método gravimétrico se basa en el estudio del campo gravitatorio generado por la heterogeneidades en las densidades del medio geológico. Las mayores anomalías gravimétricas se localizan en las zonas con exceso de masa, es decir, donde se encuentran rocas muy densas, generalmente relacionadas con estructuras geológicas como es el caso de los anticlinales o con la presencia de cuerpo altamente densos (Mironov, 1977; Griem y Griem-Klee, 2004).

Método de perfilaje eléctrico

El método de perfilaje eléctrico se basa en el estudio del campo eléctrico generado por la heterogeneidades en las resistividades eléctricas del medio geológico. Este método detecta los contactos laterales o sub-verticales, así como las zonas de fallas, debido a cambios en los valores de resistividad eléctrica (Orellana, 1972; ; Griem y Griem-Klee, 2004).

Transformaciones de los métodos geofísicos y técnicas de representación

Mapas de relieve sombreados:

El procesamiento digital de imágenes con ayuda de computadoras ha alcanzado gran popularidad como un medio para llevar a cabo la interpretación estructural que se puede realizar a un mapa de contorno de datos geofísicos, en particular de datos gravimétricos y aeromagnéticos (Kowalik y Glenn, 1987; Seigel, 1989). Las técnicas de procesamiento de imágenes más empleadas incluyen la presentación de imágenes en pequeñas escalas de niveles de grises, el mejoramiento de contraste local, la iluminación artificial - mapa de relieve sombreado - y el filtrado direccional. Con estas técnicas es posible revelar la presencia de fallas y pliegues no reconocibles en los mapas de contornos estándar. Cuando existen alineaciones en los datos se pueden resaltar mediante filtrados direccionales y la iluminación artificial.

El método de iluminación artificial - mapa de relieve sombreado - es útil para mejorar los picos de anomalías de altas longitudes de ondas (Horn and Bachman, 1978). Las imágenes de relieve sombreados de los datos magnéticos se generan calculando y cuantificando la reflectancia aparente de una superficie imaginaria definida por la intensidad magnética (Broome, 1990). La reflectancia aparente es una medida de la porción de luz reflejada desde la superficie y depende de la relación angular entre la dirección de iluminación y la tangente a la superficie. La máxima reflectancia ocurre cuando la dirección de iluminación y la tangente a la superficie son perpendiculares. A pesar de que existen un gran número de algoritmos para calcular la reflectancia, el coseno del ángulo entre la dirección de iluminación y la normal a la superficie es la aproximación más adecuada de la reflectancia para los datos aeromagnéticos. La normal a la superficie de cada celda se define como la normal al plano definido por esa celda y dos de las celdas adyacentes. Los valores de reflectancia son calculados para toda la red y luego se cuantifican y se muestran en tonos de grises.

Los mapas generados constituyen mapas raster basados en un fichero GRD o DEM que usan diferentes colores para indicar el ángulo y dirección de inclinación de la superficie, con relación a la dirección de la fuente de luz definida por el usuario. El software SURFER v. 8.0 (Golden Software, Inc., 2002) determina la orientación de cada celda de la red sobre la superficie y asigna un color único a cada una. Como los colores son asignados a cada una de las celdas de la red sobre un mapa de relieve sombreado, debe

disponerse de una red altamente densificada que garantice un mapa con la calidad requerida.

Estos mapas son representados en tonos de grises donde el contraste depende del gradiente entre cada punto de la red, lo que produce un efecto 3D análogo a la iluminación del sol sobre la superficie de los mapas, produciendo sombras debido a los picos en los datos las cuales pueden ser modificadas interactivamente en tiempo real. La inclinación y declinación del sol se pueden alterar instantáneamente, por lo que las características lineales pueden ser resaltadas o escondidas cambiando la posición del sol. Esta presentación es muy poderosa para resaltar tendencias alineadas en los datos. Geológicamente esas tendencias pueden representar características estructurales, ya que esta técnica tiene la particularidad de destacar las alineaciones que se manifiestan en los datos, que pueden o no indicar la presencia de estructuras tectónicas, pero constituyen siempre un elemento más para caracterizar estructuralmente el área investigada. Estas alineaciones se ponen de manifiesto en direcciones no paralelas a la dirección de iluminación, siendo las direcciones perpendiculares a la dirección de iluminación las que mejor se destacan (Batista, 1998, 2004).

El sistema visual humano está mejor preparado para interpretar imágenes (mapas de colores) que mapas de contornos, por ese motivo la mayoría de los mapas geofísicos se muestran en forma de imágenes a partir de las cuales se puede revelar información escondida en los mapas de contornos (Cordell and Knepper, 1987).

Cálculo de gradientes de ΔT .

En la aplicación del método magnético en ocasiones es más útil emplear la magnitud del gradiente, que la intensidad del campo, alcanzando su mayor importancia en casos de anomalías complejas, cuando los campos magnéticos de cuerpos grandes y pequeños que se encuentran a diversas profundidades, se superponen entre sí. Cuanto mayor sea el orden de la magnitud de la derivada del campo potencial, más rápidamente disminuye el campo al alejarse del cuerpo geológico (Gunn y otros, 1998).

La información aportada por estos mapas se caracteriza por su validez y fidelidad, partiendo del hecho de que la presencia de zonas de altos gradientes siempre indicará un contacto litológico brusco o la presencia de una estructura tectónica.

Las ventajas de los gradientes magnéticos sobre el campo total o cualquier otra componente son cada vez más evidentes (Hood y otros, 1979). Ellas incluyen la

eliminación de pequeñas variaciones diurnas y el mejoramiento de señales debido a fuentes poco profundas (Marcotte y otros, 1992).

Marcotte y otros (1990) muestran que las mediciones directas de los gradientes horizontales pueden ser usadas para condicionar el interpolador interlineal en la regularización del campo magnético total, lo que trae como resultado un mejoramiento de dicha red.

Artículos publicados por Nabighian (1984), Moon y otros (1988) y Pederson (1989) destacan la importancia de los gradientes durante el análisis de campos potenciales.

Durante la exploración minera la medición o cálculo del gradiente vertical es muy importante ya que este responde principalmente a los cambios en la magnetización o densidad de las rocas en la parte superior de la corteza terrestre (Hood and Teskey, 1989).

En el proceso de interpretación cualitativa el mapa de gradiente y el de ΔT o Δg se pueden interpretar en conjunto. Es muy común apoyar el mapeo geológico con la interpretación cualitativa de los mapas de gradiente vertical ya que en él se resalta el efecto de las heterogeneidades geológicas más superficiales dando una idea más acertada sobre los cuerpos que producen las distintas anomalías presentes en el campo magnético o gravitatorio, sobre todo aquellas producidas por cuerpos pequeños y someros. El mismo posee la particularidad de separar el efecto de dos o más cuerpos geológicos que se encuentren muy cercanos y a una misma profundidad (Henderson, 1992; Best y otros, 1998; Chernicoff y Zapata, 1998; Gunn y otros, 1998; Nash, 1998).

A pesar de ello, debe tenerse en cuenta que durante el proceso de obtención de los gradientes del campo se generan anomalías que no tienen una naturaleza geológica comprobable, además de que en algunos casos se amplifican los ruidos y errores del levantamiento.

Continuación Analítica Ascendente (CAA)

La CAA es utilizada para resaltar las anomalías producidas por los objetos geológicos más profundos y para obtener mapas residuales que destaquen el efecto de objetos magnéticos pequeños cercanos a la superficie (Chang y otros, 1990, 1991; Pearson, 1996; Best y otros, 1998; Hassan y otros, 1998; Zaigham y Mallick, 2000; Batista y otros, 2002; Oguchi y Ishida, 2002).

Los mapas de CAA destacan la componente regional del campo magnético y por lo tanto resaltan anomalías producidas por objetos extensos y profundos, es decir que atenúan las altas frecuencias de los ruidos no deseables debido a fuentes pequeñas y poco profundas. En la medida que sea mayor el nivel de recalcado del campo mayores serán las profundidades de estudios resaltadas en esos mapas (Zaigham y Mallick, 2000; Batista y otros, 2002).

CAPÍTULO III. RESULTADOS DE LA REINTERPRETACIÓN DE LOS PRINCIPALES DATOS GEOFÍSICOS DE CUBA NORORIENTAL

Introducción.

Reinterpretación de los datos aeromagnéticos 1:50 000 de la región nororiental de Cuba.

Reinterpretación de los datos magnéticos terrestres 1:50 000 del extremo SW del macizo ofiolítico Moa-Baracoa.

Reinterpretación de los levantamientos magnéticos y eléctricos de los sectores Majayara y Rancho Yagua (SW de Moa).

Reinterpretación de los levantamientos gravimétrico y magnético del sector Cayo Guam.

Significado de los resultados de las principales investigaciones geofísicas para las investigaciones medioambientales en la región nororiental de Cuba.

Conclusiones.

Introducción

En la región nororiental de Cuba se han realizado diversas investigaciones geofísicas orientadas a la prospección de yacimientos minerales, cartografía geológica y a la profundización del conocimiento geológico del área (Zamashikov y Tabachkov, 1971; Chang y otros, 1990, 1991; Batista, 1998, 2002). En algunos de ellos no se profundiza en las características estructurales del área de estudio, aspecto necesario para apoyar y orientar en mayor medida los futuros trabajos medioambientales.

Por estos motivos en este trabajo se realiza una revisión y reinterpretación de los datos geofísicos más importantes de la región nororiental de Cuba con el fin de profundizar en las características geólogo-estructurales de esta región, lo cual permite apoyar y orientar las investigaciones medioambientales.

Reinterpretación de los datos aeromagnéticos 1:50 000 de la región nororiental de Cuba

Reinterpretación del mapa de DT reducido al polo (DTrp) y sus gradientes

Según Batista (2002), a partir de la reinterpretación del mapa de ΔTrp se pone de manifiesto que en la región de estudio es posible inferir las variaciones en los espesores de las litologías, así como el grado de serpentización de las peridotitas, a partir del comportamiento del campo magnético, teniendo en cuenta su ubicación espacial y la susceptibilidad magnética que las caracterizan. Dentro de las rocas ofiolíticas también se establecen las variaciones en los espesores de los niveles fundamentales del corte ofiolítico presente en la región de estudio (cumulativo y de tectonitas) (Iturralde, 1996a; Proenza, 1997; Proenza y otros, 1999a, 1999b, 1999c; 2000a, 2000b). Valores positivos del campo magnético en las zonas donde afloran peridotitas serpentizadas o gabros evidencian gran espesor del complejo de tectonitas con respecto al cumulativo, mientras que valores negativos en afloramientos de gabros indican mayor espesor del complejo cumulativo o la combinación de este con otras rocas infrayacentes de bajas magnetización. Como se mencionó anteriormente estos valores negativos en las rocas serpentizadas evidencian su poco espesor y la existencia en la profundidad de rocas del complejo cumulativo, volcano-sedimentarias o ambas. En las rocas volcano-sedimentarias cretácicas aflorantes los valores negativos indican su gran espesor y con ello la ausencia en la profundidad de rocas serpentíticas, mientras que en las rocas volcano-sedimentarias paleogénicas y en las sedimentarias señalan gran espesor de ellas, de su basamento volcánico cretácico o de ambos conjuntos rocosos. Por otro lado valores positivos del campo en afloramientos de rocas volcano-sedimentarias cretácicas indican pequeños espesores yacentes sobre rocas ultrabásicas, evidenciando el carácter alóctono de las mismas.

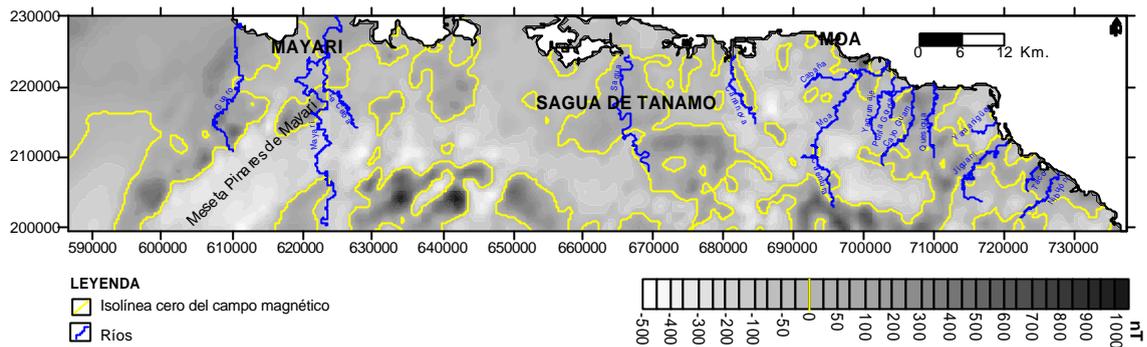


Figura 9. Mapa de ΔT reducido al polo de la región nororiental de Cuba (Modificado de Batista, 2002).

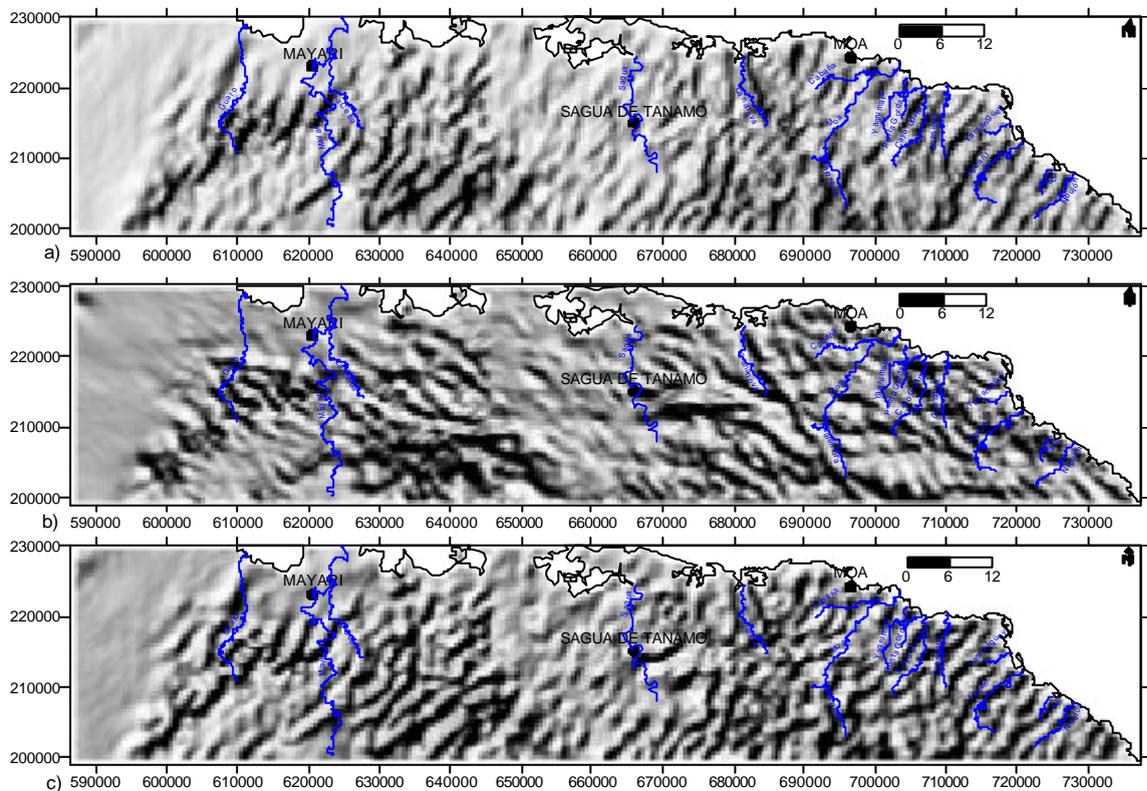


Figura 10. Mapas de gradientes de ΔT reducido al polo de la región nororiental de Cuba (Modificado de Batista, 2002).

- a) Gradiente horizontal en la dirección X; b) Gradiente horizontal en la dirección de Y
- c) Gradiente vertical.

Del análisis de la variación del campo magnético total reducido al polo y sus gradientes (Figura 9 y 10), representados en mapas de relieve sombreados se denota la presencia de numerosas alineaciones, algunas de las cuales se encuentran relacionadas con estructuras reportadas en trabajos anteriores (Adamovich y Chejovich, 1964; Albear y otros, 1988; Linares y otros, 1988; Gyarmati y Leyé O'Connor, 1990; Rodríguez, 1998a, 1999b), mientras que la mayoría de ellas no se relacionan con tales estructuras, descritas

anteriormente, lo que nos permite sugerir la existencia de nuevas estructuras según resultados de investigaciones en otras regiones del mundo (Ussami y otros, 1991; Pereira y otros, 1996; Bassay y otros, 2001; Gibert y otros, 2002; Grauch, 2002; Ruiz y otros, 2002; Smith y otros, 2002; Fabian y Fonseca, 2003). La mayor parte de las alineaciones del campo magnético poseen dirección NE-SW y NW-SE, coincidiendo con las direcciones de los sistemas de fallas más importantes de la región, exceptuando la dirección E-W que poseen algunas de estas alineaciones. Algunas de las alineaciones antes señaladas constituyen la posible continuación de estructuras reportadas, permitiendo de esta manera caracterizar con mayor detalle la tectónica disyuntiva del área. La presencia de todas estas alineaciones en el mapa de gradiente vertical de ΔT_{rp} (Figura 10c), indica que todas esas zonas de fallas propuestas pueden reflejarse en la superficie del terreno o próximo a ella, y por lo tanto es necesario tenerla en cuenta en las investigaciones medioambientales que se realicen ya que pueden afectar considerablemente las construcciones de obras civiles, industriales o militares que se ubiquen en las zonas que afectan tales estructuras. En este mismo mapa de gradiente vertical, la mayor parte de las anomalías se observan en las áreas de desarrollo de peridotitas serpentinizadas, en las cuales también se aparecen anomalías no alineadas vinculadas con áreas de intercepciones de fallas. Todos los elementos mencionados indican que todas estas anomalías que se reflejan en este mapa se deben a un incremento de la serpentinización de las rocas en esas zonas, lo que provoca el aumento de la magnetización (Chang y otros, 1990, 1991; Logachev y Zajarov, 1986), lo cual se describe en trabajos realizados en otras regiones del mundo (Nash, 1998). Esto permite confirmar la existencia de algunas de estas estructuras disyuntivas que aparecen reportadas como supuestas. En la figura 11 se recogen los resultados del análisis realizado.

La reinterpretación de estos mapas en este trabajo, arrojó como resultados nuevas alineaciones no descritas en los trabajos anteriores (Figura 12), las cuales se deben comprobar en futuros trabajos geológicos, ya que pueden constituir el reflejo de zonas de fallas.

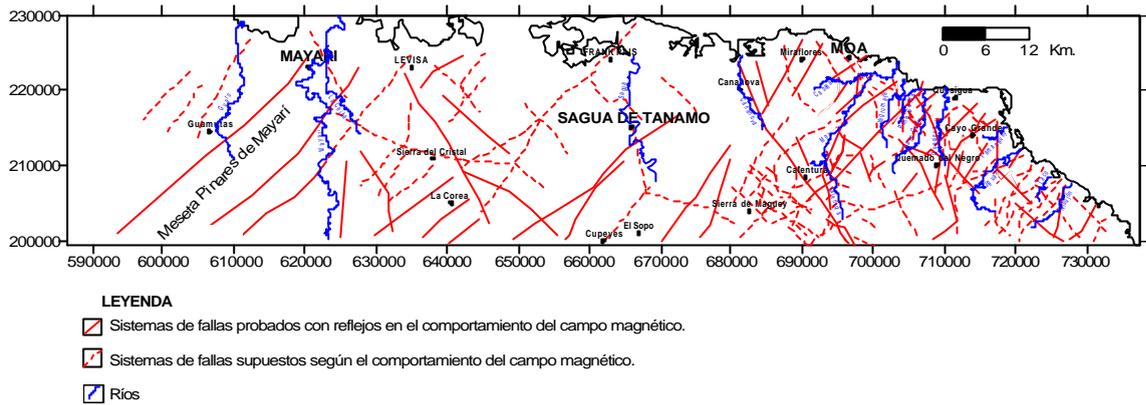


Figura 11. Sistemas de fallas de la región nororiental de Cuba según el comportamiento del campo magnético (tomado de Batista, 1998; Batista, 2002; Charchabal, 2003).

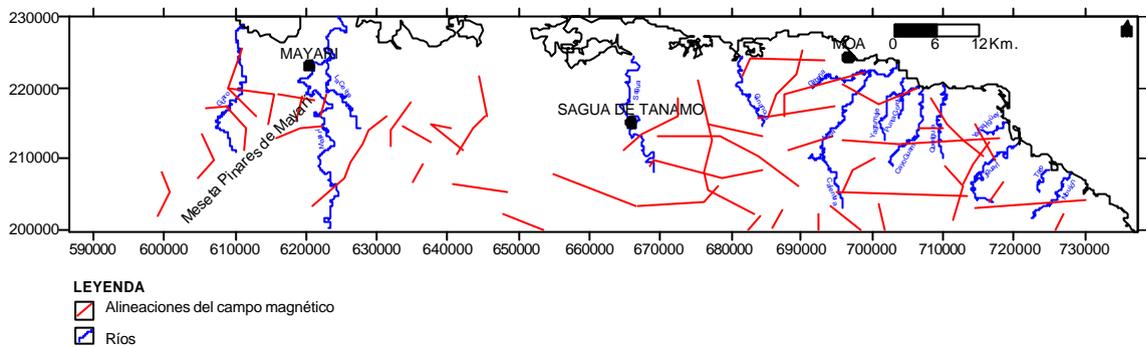


Figura 12. Esquema de nuevas alineaciones del campo aeromagnético de la región nororiental de Cuba.

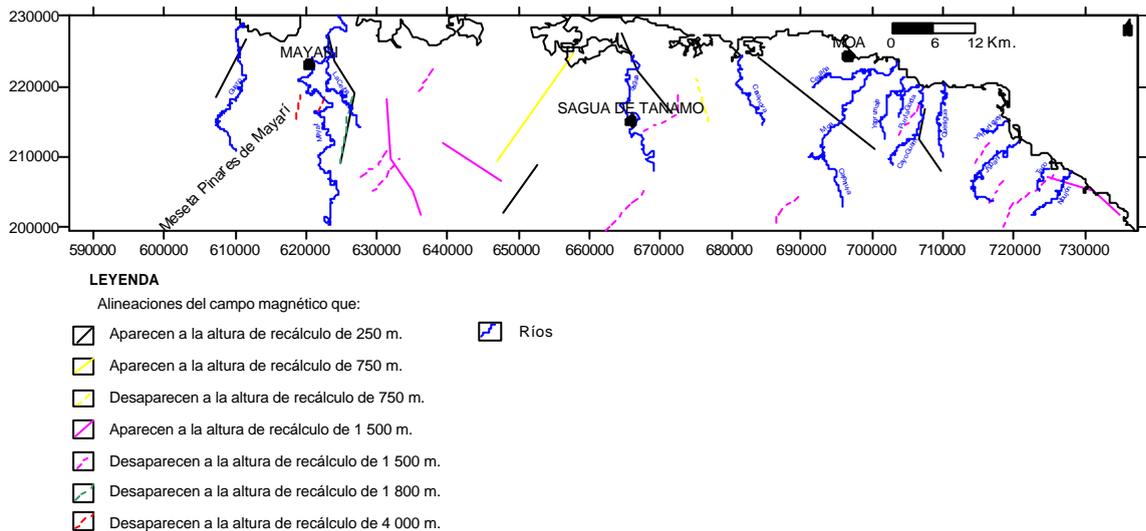


Figura 13. Comportamiento en la profundidad de las alineaciones del campo aeromagnético.

Interpretación de los gradientes horizontales de la Continuación Analítica Ascendente (CAA)

Según Batista (1998, 2002) a partir del análisis de la CAA es posible inferir la distribución en la profundidad de las diferentes litologías que conforman esta región. De este análisis se evidencia que en esta región existe un predominio en superficie y profundidad de las rocas ultrabásicas serpentinizadas.

A partir de las alturas propuesta por Batista (1998, 2002) para realizar CAA en este trabajo, se calcularon los gradientes horizontales para resaltar la presencia de alineaciones en diferentes intervalos de profundidad (Fabian y Fonseca, 2003). De los mapas de relieve sombreados de estos parámetros, iluminados desde la dirección NW y SW, se observan varias alineaciones con las siguientes características (Figura 13):

h= 250m: Se resaltan alineaciones con dirección NW-SE y NE-SW, la mayoría señaladas en el mapa de ΔT y otras manifestadas por primera vez a esta altura de recálculo. La mayor parte de estas últimas se relacionan con afloramientos de rocas sedimentarias y volcano-sedimentarias, las cuales deben estar infrayacidas por rocas ultrabásicas serpentinizadas (Batista, 2002), indicando la posible presencia de zonas de fallas vinculadas con estas rocas altamente magnéticas, las cuales no poseen un reflejo en superficie.

h= 500 y 750 m: Continúan manifestándose las alineaciones señaladas en el mapa de CAA a los 250 m, tanto las corroboradas como las nuevas, aunque en el mapa de CAA a los 750 m no se manifiesta la parte septentrional de una alineación con dirección N-S en Sagua de Tánamo y aparece una nueva alineación NE-SW al oeste de esta localidad, indicando la presencia en la profundidad de las rocas serpentinizadas, responsables de su reflejo. La desaparición de la alineación señalada corrobora los resultados del esquema de interpretación de Batista (2002), donde se señalan pocos espesores para las rocas serpentinizadas aflorantes, en las cuales debe manifestarse esta posible zona de falla.

h= 1500 m: Se definen mejor alineaciones en la dirección N-S en la zona de Mayarí y Sagua de Tánamo, desaparecen alineaciones con dirección NE-SW y aparecen otras con dirección NW-SE. La desaparición y aparición de estas alineaciones sugieren que algunas zonas señaladas como de poco y grandes espesores de las rocas serpentinizadas (Batista, 2002) con las cuales se relacionan, poseen profundidades alrededor de los 1

500 m. En algunos afloramientos de rocas sedimentarias su presencia indica que hasta alrededor de 1 500 m deben existir rocas serpentinizadas.

h= 1800 m A esta altura no se manifiesta una de las alineaciones con dirección N-S ubicada al NE de la Meseta Pinares de Mayarí, que se resaltaba hasta la altura de 1 500 m, indicando que las rocas serpentinizadas que afloran en esta zona poseen profundidades que oscilan entre 1 500 y 1 800 m, corroborando su poco espesor relativo señalado anteriormente (Batista, 2002).

h= 2200 m: No existen cambios significativos con respecto a la altura de 1 800 m.

h= 4000 m: Desaparecen algunas alineaciones señaladas en los mapas anteriores, ubicadas entre Mayarí y la Meseta Pinares de Mayarí, las cuales coinciden con zonas de grandes espesores de las rocas serpentinizadas y de alto grado de serpentización (Batista, 2002).

De las características anteriormente expuestas se evidencia que la mayoría de las alineaciones del campo magnético se manifiestan desde la superficie hasta aproximadamente 4 Km. de profundidad según la CAA, afectando los diferentes tipos de rocas reportados en la región. Algunas de ellas dejan de reflejarse en los mapas de CAA a los 750, 1 500, 1 800 y 4 000 m, destacando los supuestos intervalos de profundidades hasta los cuales pueden manifestarse las posibles estructuras alineadas que denotan. Es importante señalar que alrededor de los 2 200 m no existen cambios significativos en el comportamiento de tales alineaciones, indicando por tanto, pocas variaciones de la tectónica en ese intervalo de profundidad.

A partir de la altura de 250 m y hasta los 1 500 m aparecen nuevas alineaciones no señaladas en el mapa de ΔT , algunas de las cuales se relacionan con estructuras disyuntivas reportadas anteriormente, corroborando su existencia. Las que no se relacionan con estas estructuras sugieren la existencia de posibles estructuras sin reflejos en superficie, lo cual no permite su identificación en los trabajos geomorfológicos.

De la reinterpretación de los datos aeromagnéticos de la región nororiental de Cuba se concluye que con los mismos es posible inferir las variaciones de los espesores de las rocas presentes en el área, así como del basamento de aquellas que afloran. También con ayuda de este campo físico se proponen nuevas zonas de fallas y se justifican la existencia de algunas declaradas como supuestas en trabajos geológicos anteriores. Con

ayuda del análisis de la CAA se evidencia que la mayoría de las alineaciones del campo magnético se manifiestan desde la superficie hasta aproximadamente 4 Km. de profundidad, afectando los diferentes tipos de rocas reportados en la región. También se muestran nuevas alineaciones que sugieren la existencia de posibles estructuras sin reflejos en superficie, lo cual no permite su identificación en los trabajos geológicos y geomorfológicos.

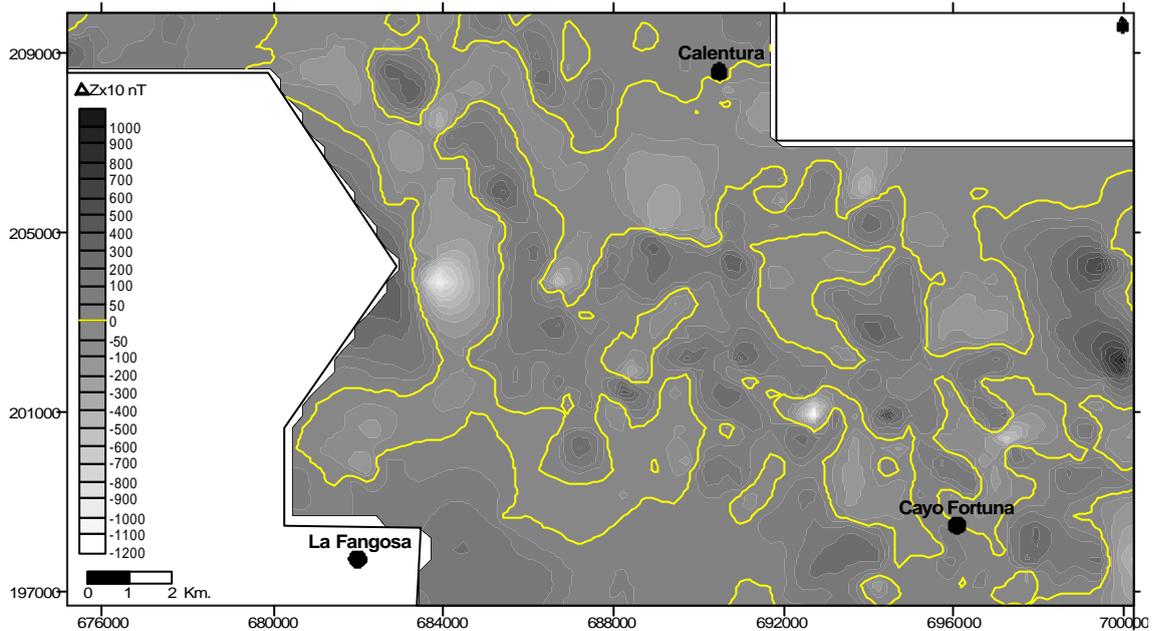


Figura 14. Mapa de isodínamas ΔZ del extremo suroeste del macizo ofiolítico Moa-Baracoa.

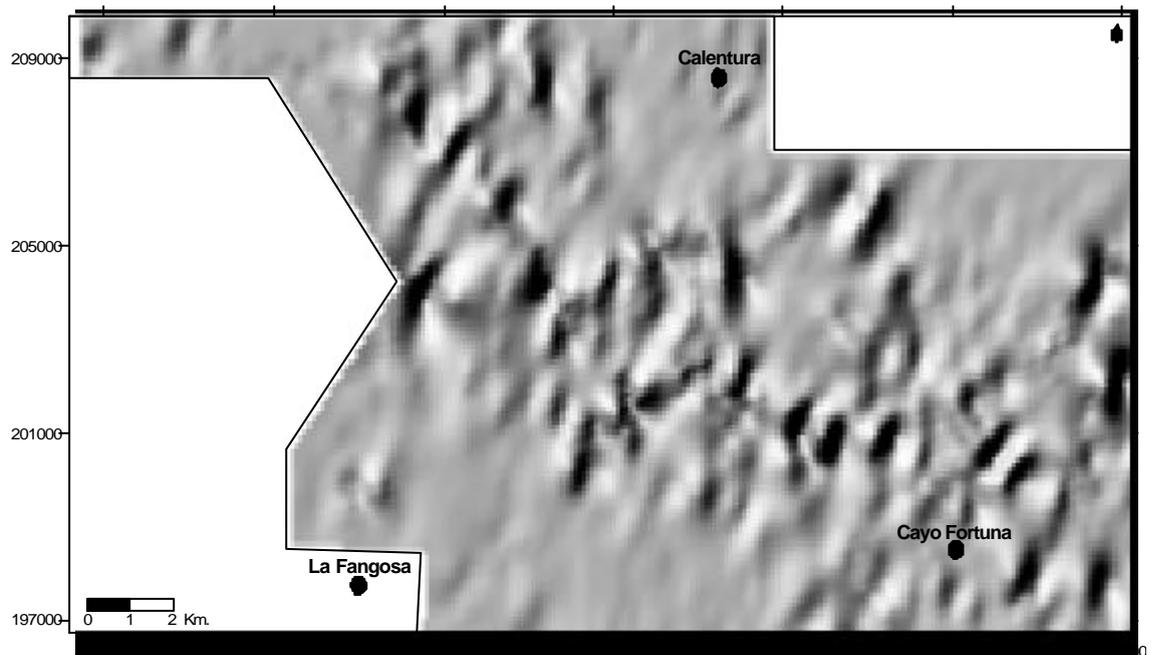


Figura 15a. Mapa de gradiente horizontal de ΔZ en la dirección de X del extremo suroeste del macizo ofiolítico Moa-Baracoa.

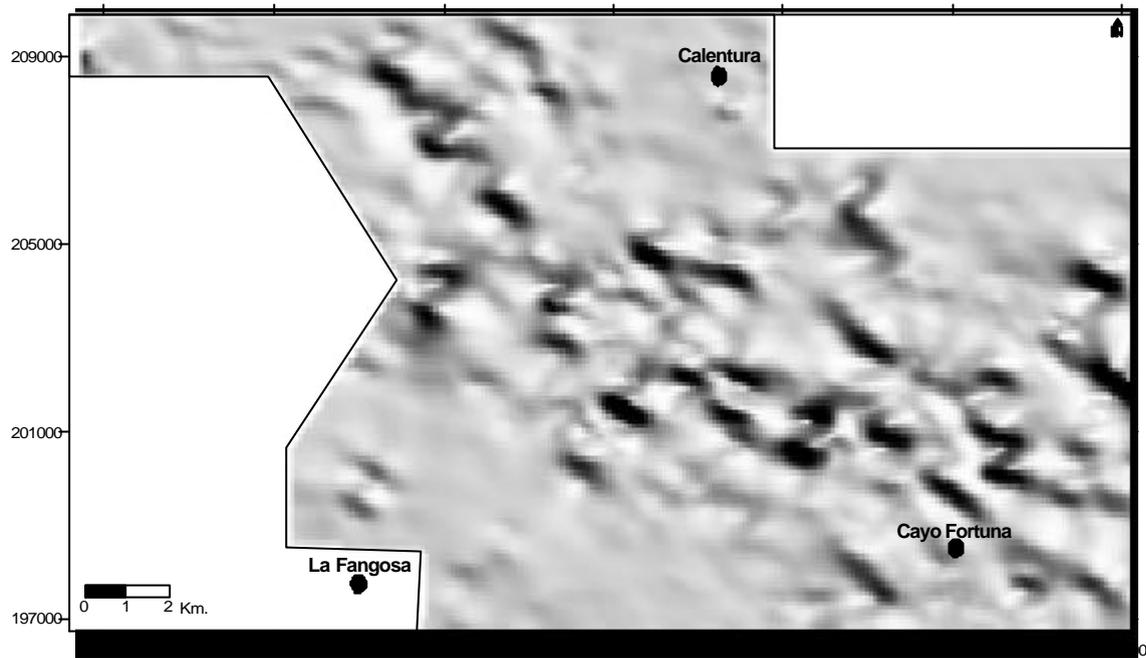


Figura 15b. Mapa de gradiente horizontal de ΔZ en la dirección de Y del extremo suroeste del macizo ofiolítico Moa-Baracoa.

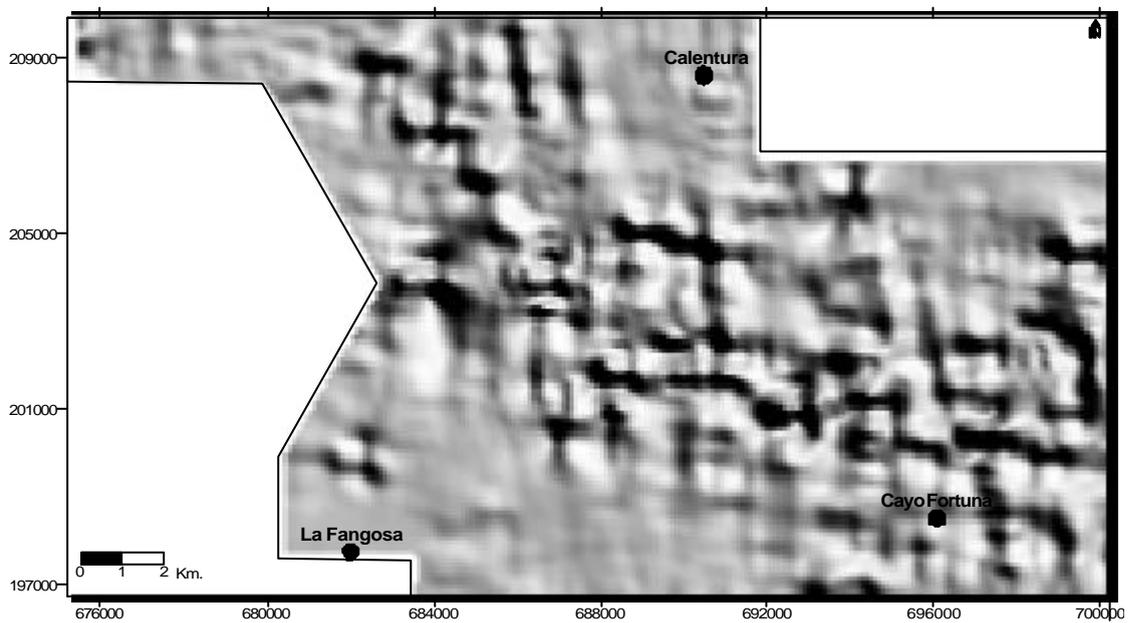


Figura 15c. Mapa de gradiente vertical de ΔZ del extremo suroeste del macizo ofiolítico Moa-Baracoa.

Reinterpretación de los datos magnéticos terrestres 1:50 000 del extremo SW del macizo ofiolítico Moa-Baracoa

En el mapa de ΔZ del extremo noroeste del macizo ofiolítico Moa-Baracoa (Figura 14), así como en sus respectivos gradientes (Figura 15a, b y c), representados en forma de mapas de relieve sombreados, se muestran zonas alineadas del campo magnético, según la dirección de los sistemas de fallas principales de la región, por lo cual se proponen como nuevos sistemas de fallas según el comportamiento del campo magnético (Charchabal, 2003), mostrados en la figura 16. Esos sistemas de fallas propuestos continúan manifestándose a las alturas de recálculos de 250, 500, 750, 1 000 y 1 250 m de la CAA (Figura 17), indicando que las mismas alcanzan grandes profundidades. Todas estas alineaciones se relacionan con afloramientos de rocas ultrabásicas serpentinizadas, corroborando la gran profundidad de estas rocas, las cuales según investigaciones anteriores (Batista, 2002), pueden alcanzar hasta 4 Km. de profundidad.

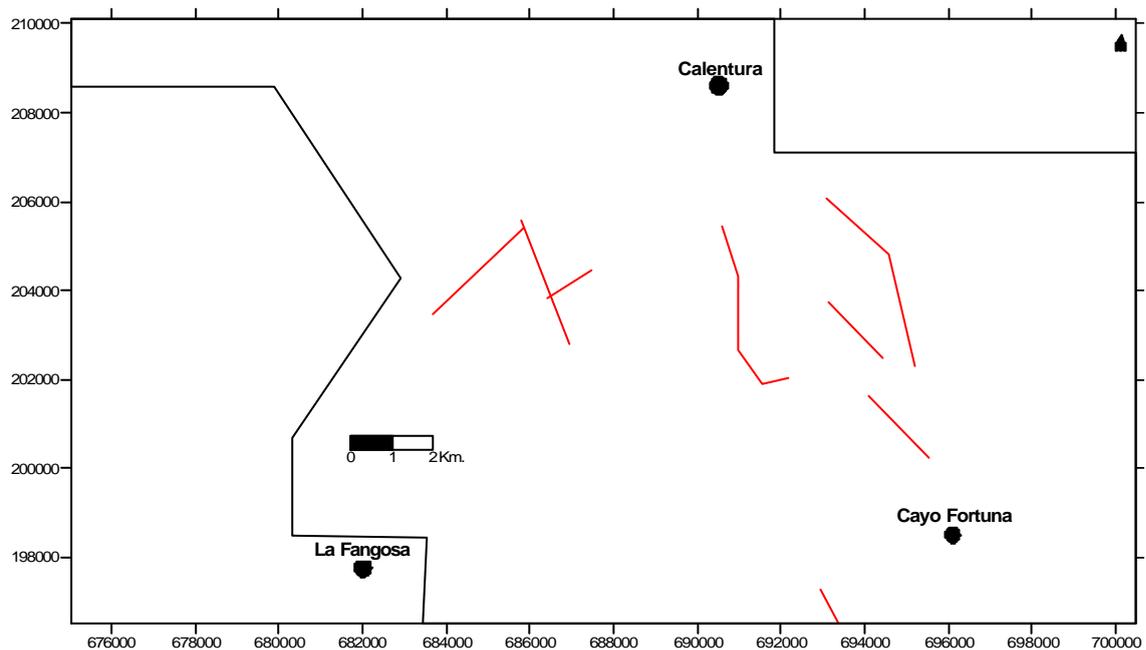


Figura 16. Esquema de alineaciones del campo magnético del extremo suroeste del macizo ofiolítico Moa-Baracoa.

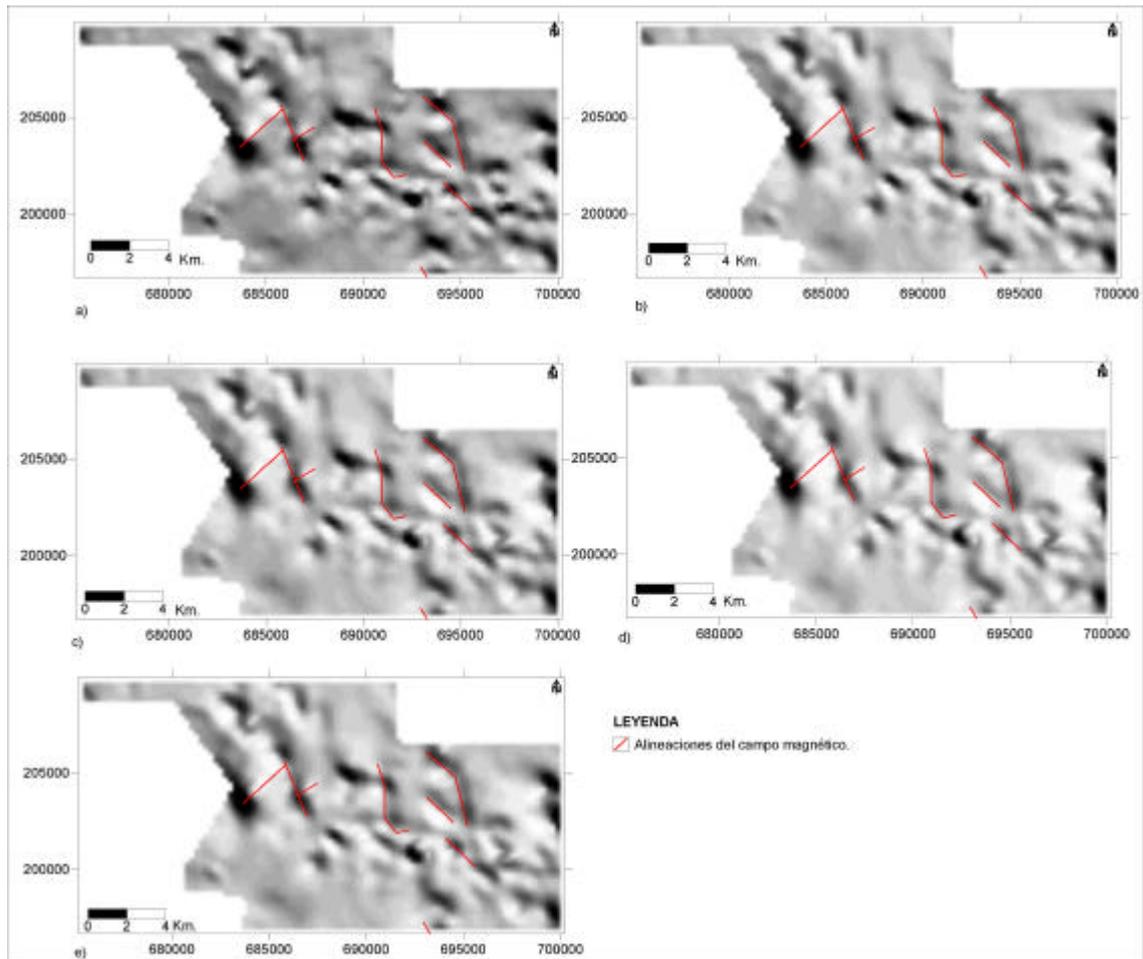


Figura 17. Comportamiento en la profundidad de las alineaciones del campo magnético. a) $h = 250$ m.; b) $h = 500$ m.; c) $h = 750$ m.; d) $h = 1\ 000$ m.; e) $h = 1\ 250$ m.

Reinterpretación de los levantamientos magnéticos y eléctricos de los sectores Majayara y Rancho Yagua (SW de Moa)

En el extremo SW de Moa, específicamente en los sectores conocidos como Majayara y Rancho Yagua, se realizaron levantamientos magnéticos y eléctricos (Bronnikov y Budnitsky, 1969), con el objetivo de apoyar los trabajos de búsqueda de asbesto crisotílico. En estos trabajos no se utilizó la información geofísica para profundizar en las características estructurales de ambos sectores, por lo cuál en esta investigación se realiza la reinterpretación de estos datos con el objetivo de profundizar en las características estructurales de los dos sectores.

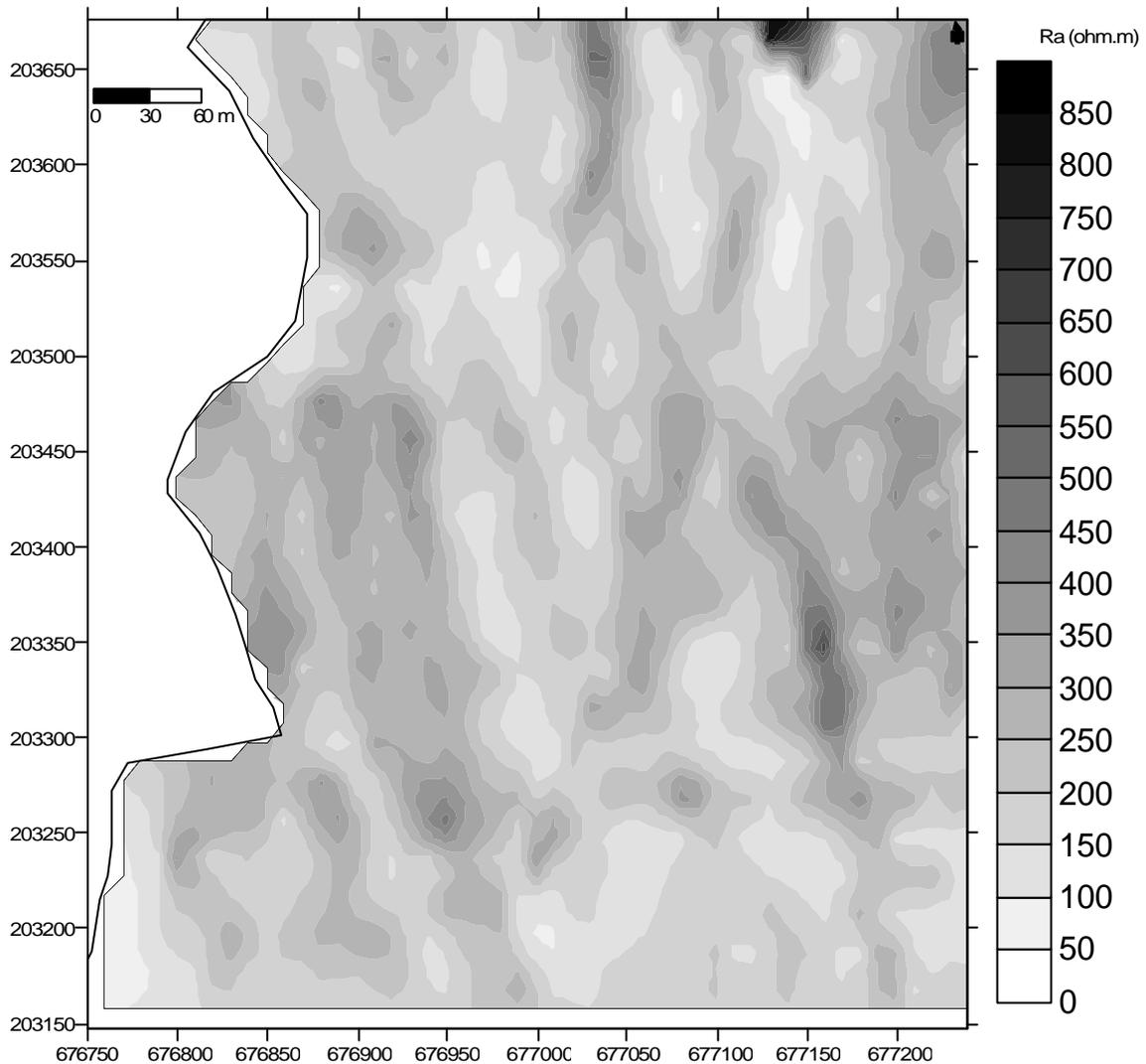


Figura 18. Mapa de isohoma del sector Majayara.

Sector Majayara

Interpretación del mapa de isohomas (ra)

A partir del análisis del mapa de isohoma del sector Majayara (Figura 18) se determina que las rocas que afloran poseen ρ_a que varían desde 33 a 980 ohm.metros, con una media de 226.7 ohm.metros. En gran parte del sector se observan zonas anómalas caracterizadas por ρ_a por encima de la media señalada, dentro de las cuales las zonas con mayores valores del campo eléctrico, superior a los 350 ohm.metros, se distribuyen al norte y en los extremos de la parte central del sector. Las áreas con menores valores de ρ_a , inferiores a 50 ohm.metros, se localizan al norte y en menor grado al sur.

Se observa un comportamiento del campo eléctrico caracterizado por un gradiente bastante heterogéneo en el área, aunque se observa una franja con dirección NW-SE, con gradientes más suaves, que atraviesa todo el sector, indicando menor grado de heterogeneidad en las características geológicas superficiales.

En este sector también se observan varias zonas alineadas con dirección preferentemente NE-SW y NW-SE, que pudieran estar relacionadas con sistemas de fallas descritos o no en trabajos anteriores (Mamani y otros, 2004).

De la comparación del mapa de isohoma de este sector con la información geológica y tectónica se conoce que las alineaciones antes mencionados no se relacionan con ninguno de los sistemas de fallas señalados en el mapa geológico. Teniendo en cuenta que los principales sistemas de fallas reportados en la región nororiental de Cuba poseen las mismas direcciones que las alineaciones mencionadas del campo eléctrico, y que estas se deben a variaciones bruscas en la ρ_a , tales alineaciones pueden constituir el reflejo de zonas de fallas.

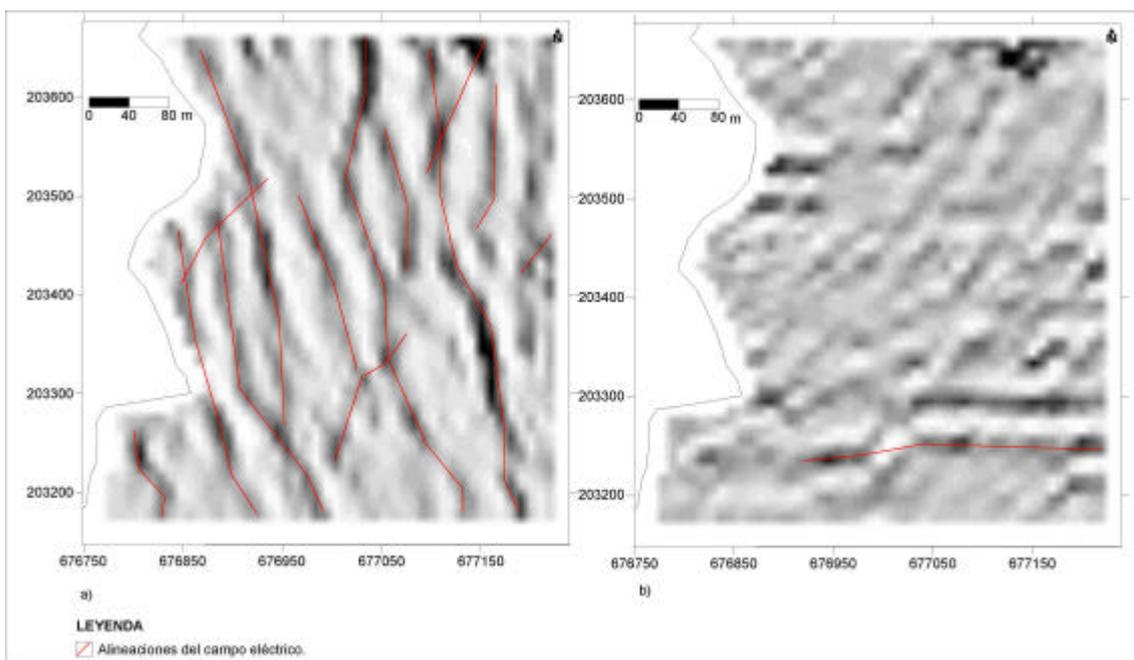


Figura 19. Mapa de gradientes horizontales del campo eléctrico del sector Majayara. a) gradiente horizontal en la dirección de X; b) gradiente horizontal en la dirección de Y.

El análisis de los mapas de gradientes horizontales del campo eléctrico (Figura 19) permiten señalar con mayor exactitud las alineaciones antes señaladas, y otras con dirección E-W.

Valores de altas y bajas resistividades se observan tanto en las zonas de desarrollo de gabro-dibasas como en las de rocas ultrabásicas serpentinizadas, aunque en las primeras rocas mencionadas predominan las bajas resistividades, localizándose las zonas de menores ρ_a . En la zona de mayores valores de ρ_a ubicada al norte del área afloran rocas serpentinizadas, mientras que en la ubicada al sur afloran gabro-dibasas, indicando en ambos casos el poco grado de alteración y con ello la ausencia de corteza de meteorización.

De este análisis se concluye que con ayuda del campo eléctrico es posible inferir al grado de heterogeneidad en las características geológicas superficiales, así como del grado de alteración de las rocas que afloran. También se señalan nuevas alineaciones en este campo físico, las cuales es posible que constituyan el reflejo de sistemas de fallas que se manifiestan en la superficie.

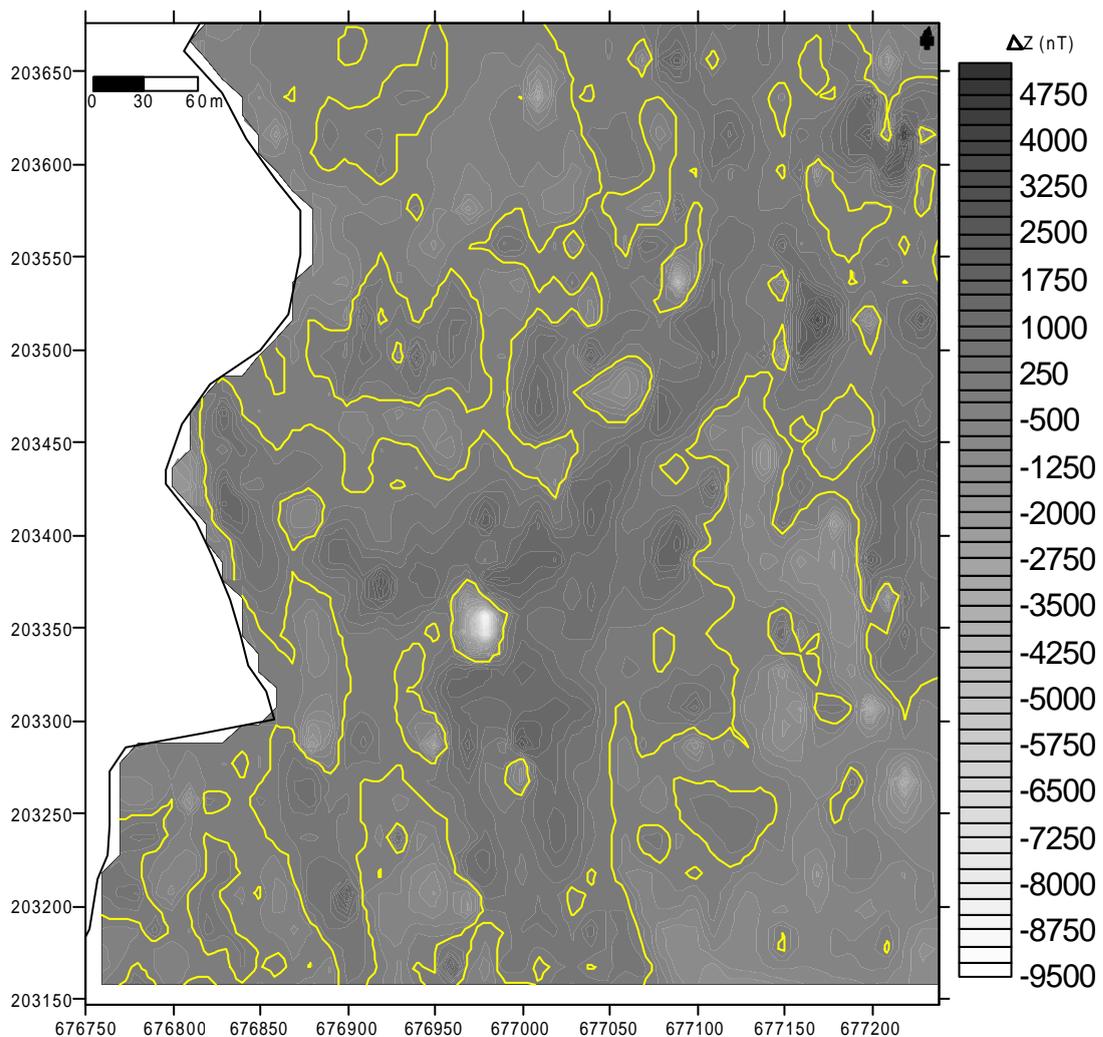


Figura 20. Mapa de ΔZ del sector Majayara.

Interpretación del mapa de isodinamas (ΔZ)

El campo magnético (ΔZ) en el sector Majayara (Figura 20) se caracteriza por alternancias de valores positivos y negativos, predominando los valores negativos en los extremos NW y SE del sector. De forma general ΔZ varía desde -15 900 a 7 910 nT, con una media de 80.88 nT. La media para valores negativos es de -561 nT, mientras que para los valores positivos es de 627 nT. Con ayuda de estos valores se establecen varias zonas anómalas de valores positivos y negativos ubicadas sobre todo en la parte central y NE de dicho sector.

Los menores valores negativos del campo magnético, es decir, las zonas con las rocas que poseen menores grados de magnetización, se alcanzan en la parte central del área, y en menor medida en algunas zonas ubicadas más al norte y en el extremo SE. Al NE del sector se localizan los mayores valores positivos del campo magnético, caracterizando las zonas donde se localizan las rocas con mayores grados de magnetización.

Se observan zonas alineadas del campo magnético según la dirección de los principales sistemas de fallas de la región, es decir, NW-SE y NE-SW, y también E-W.

De la comparación del comportamiento del campo magnético con la información geológica y tectónica se conoce que algunas de los sistemas de fallas propuestos como supuestos en el mapa geológico están relacionados con zonas alineadas de dirección E-W, evidenciando la posible existencia de zonas de fallas donde se señalan tales alineaciones (Ussami y otros, 1991; Bassay y otros, 2001; Gibert y otros, 2002; Grauch, 2002; Ruiz y otros, 2002; Smith y otros, 2002).

Las zonas de menores y mayores valores del campo magnético, se relacionan con afloramientos de rocas gabro-diabásicas y ultrabásicas serpentinizadas, respectivamente, coincidiendo con resultados reportados anteriormente (Chang, 1990, 1991; Batista, 2002), según los cuales en esas zonas tales rocas deben alcanzar sus mayores profundidades.

Las zonas anómalas positivas se relacionan fundamentalmente con afloramientos de rocas ultrabásicas serpentinizadas, aunque en ocasiones están presentes en afloramientos de gabro-diabásas evidenciando que las rocas serpentinizadas infrayacen a las mismas (Burns y Winkler, 1994; Hegmann, 2001; Ghidella, y otros, 2002; Castillo-García, 2004), lo cual pone de manifiesto el poco espesor del complejo cumulativo en esas zonas (Bassay y otros, 2001; Batista, 2002). Las zonas de valores negativos se relacionan fundamentalmente con afloramientos de gabro-diabásas, y en algunas

pequeñas zonas con rocas ultrabásicas serpentinizadas, destacando grandes espesores de los gabro-diabasas y muy poco espesores de las rocas serpentinizadas.

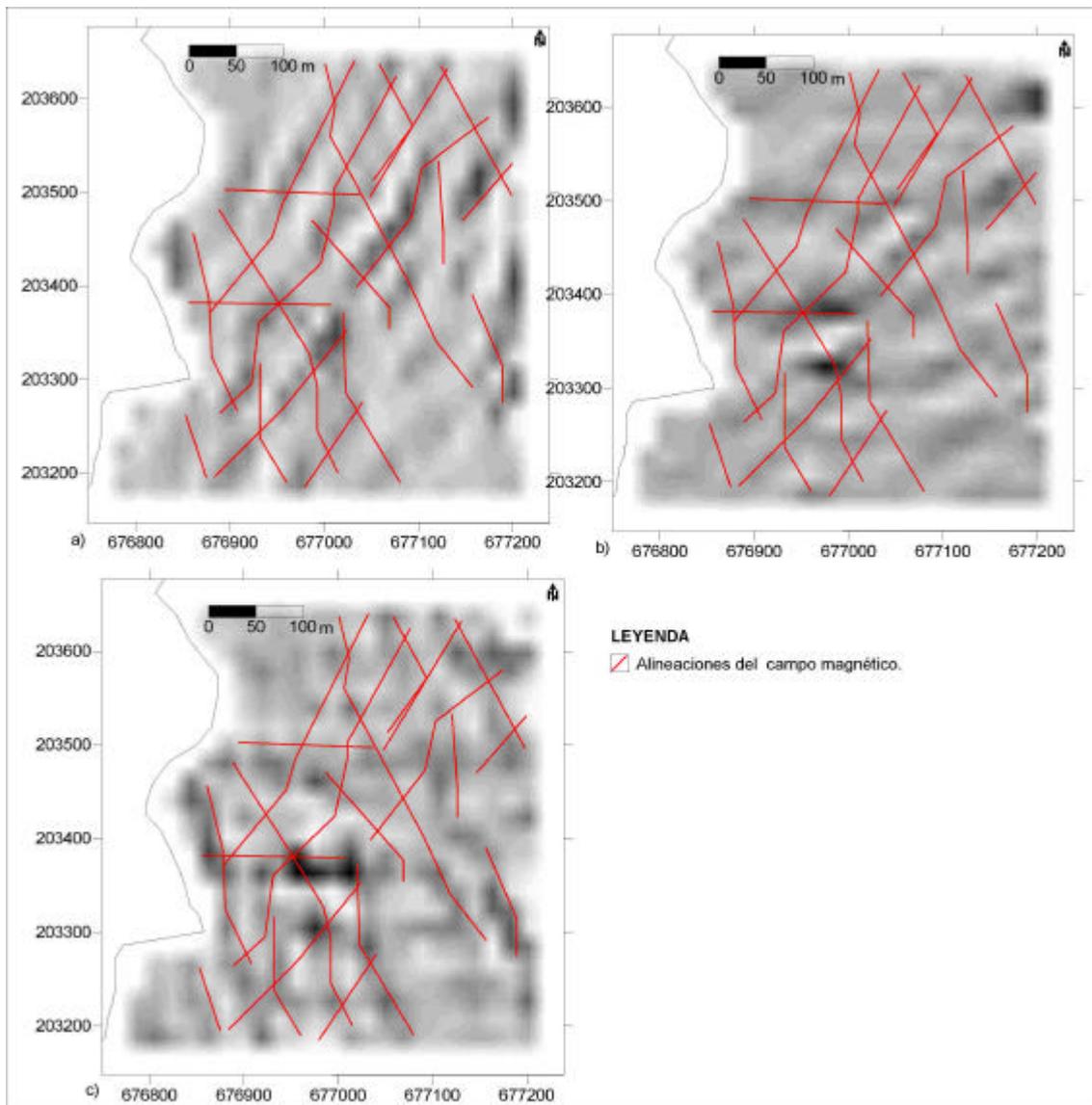


Figura 21. Mapa de gradientes de relieve sombreados de ΔZ del sector Majayara. a) gradiente horizontal en la dirección de X; b) gradiente horizontal en la dirección de Y; c) gradiente vertical.

A partir del análisis de los mapas de relieve sombreados de los gradientes horizontales y verticales (Figura 21a, b y c) se definen varias zonas alineadas del campo magnético con direcciones NW-SE, NE-SW, y en menor grado E-W, algunas de las cuáles se relacionan con sistemas de fallas reportados como supuestos, aportando un nuevo elemento a favor de la existencia de esas zonas de fallas.

En el mapa de gradiente vertical (Figura 21c) se evidencia un mayor número de anomalías representativas del grado de heterogeneidad litológica que se observa en la superficie.

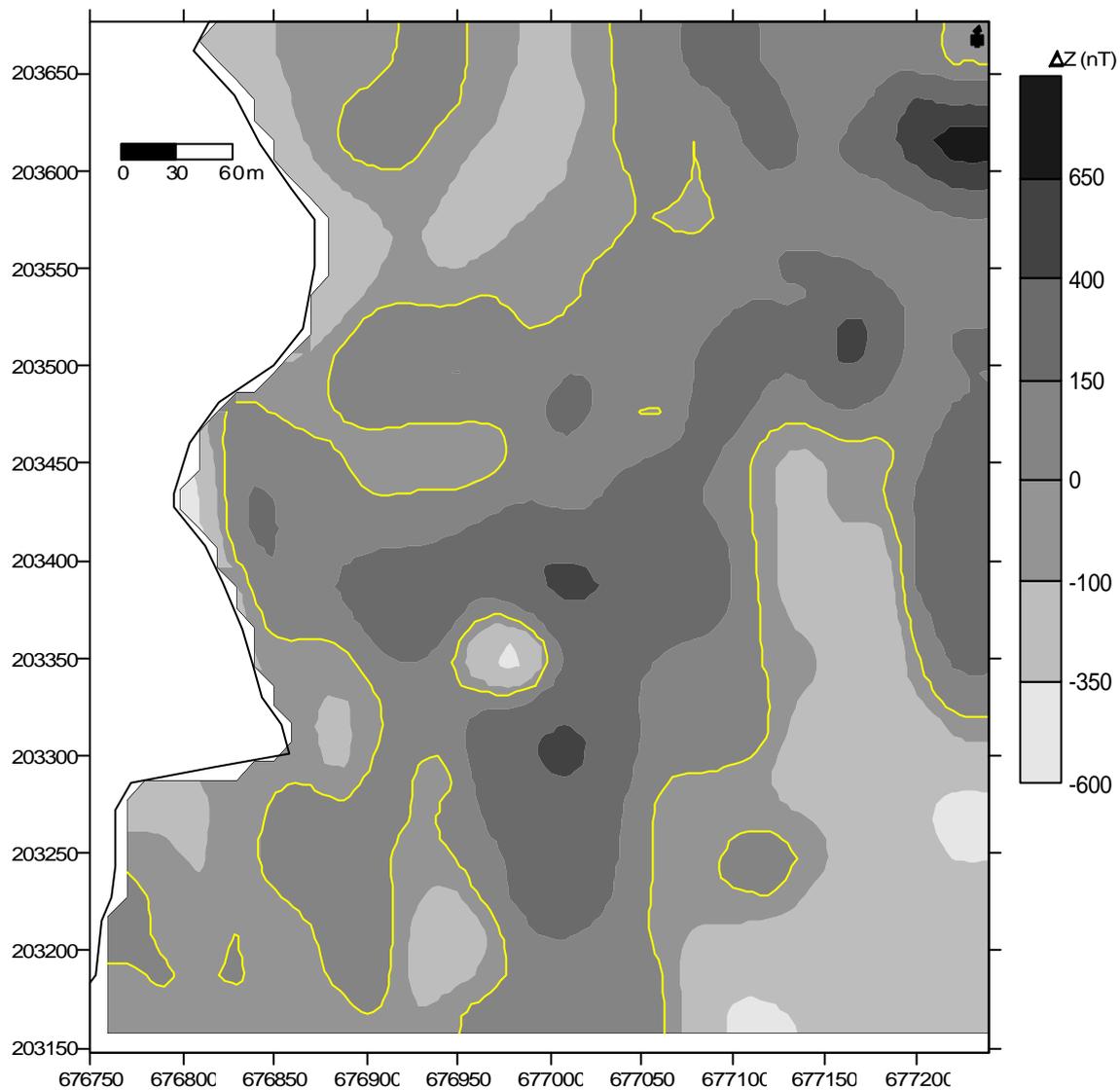


Figura 22a. Continuación Analítica Ascendente a los 20 m de ΔZ del sector Majayara.

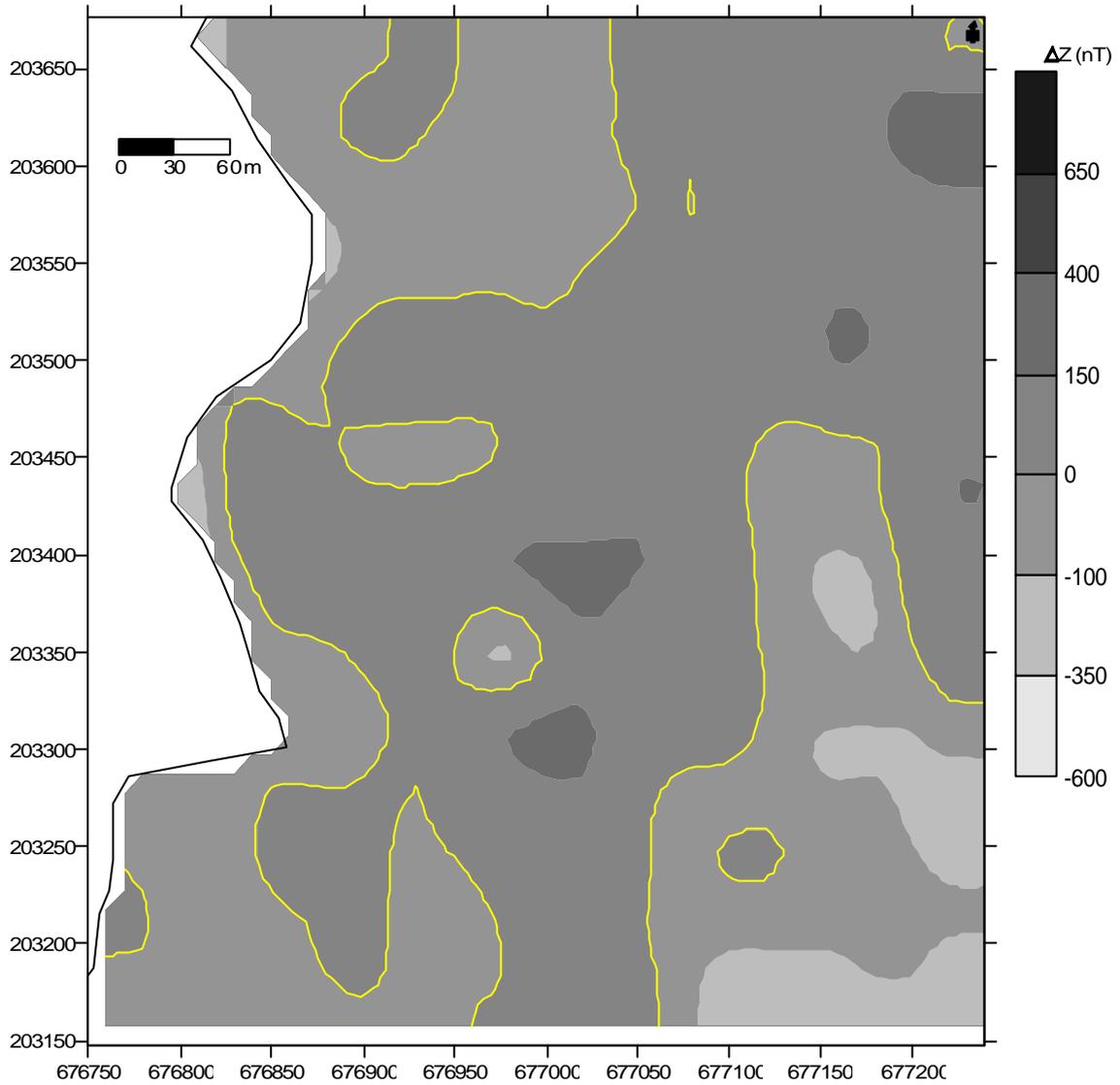


Figura 22b. Continuación Analítica Ascendente a los 40 m de ΔZ del sector Majayara.

De la interpretación de los mapas de CAA se denota que a la altura de recálculo de 20 m (Figura 22a) han desaparecido prácticamente todas las anomalías observadas en el mapa de ΔZ , observándose un campo magnético muy tranquilo, suave y con un predominio de los valores positivos, sobre todo en la parte central y NE. Esto indica la presencia a más de 20 m de profundidad de las rocas ultrabásicas serpentinizadas responsables de los altos valores positivos del campo magnético, debido a su alto grado de magnetización. Las zonas de valores negativos observadas en los extremos NW, SE y SW, así como en algunas pequeñas áreas dentro de la gran zona positiva mencionada, señalando la presencia alrededor de los 20 m de las rocas con menor grado de magnetización, es decir los gabro-diabasas.

En el mapa de CAA a los 40 m (Figura 22b) se observa un comportamiento similar al de los 20 m, con la particularidad que algunas pequeñas zonas negativas dentro de las positivas y viceversa, han desaparecido, indicando el predominio de un solo tipo litológico en esas zonas, es decir, en las zonas positivas las rocas serpentinizadas y en las negativas las rocas gabro-diabásicas.

A partir de los 40 m de recálculo el campo magnético no se aprecian cambios significativos en lo observado a los 20 m, evidenciando que a profundidades mayores de 40 m, las características geológicas no influyen significativamente en el comportamiento del campo magnético observado. Esto pone de manifiesto la continuación a profundidades superiores a los 40 m de las rocas antes mencionadas.

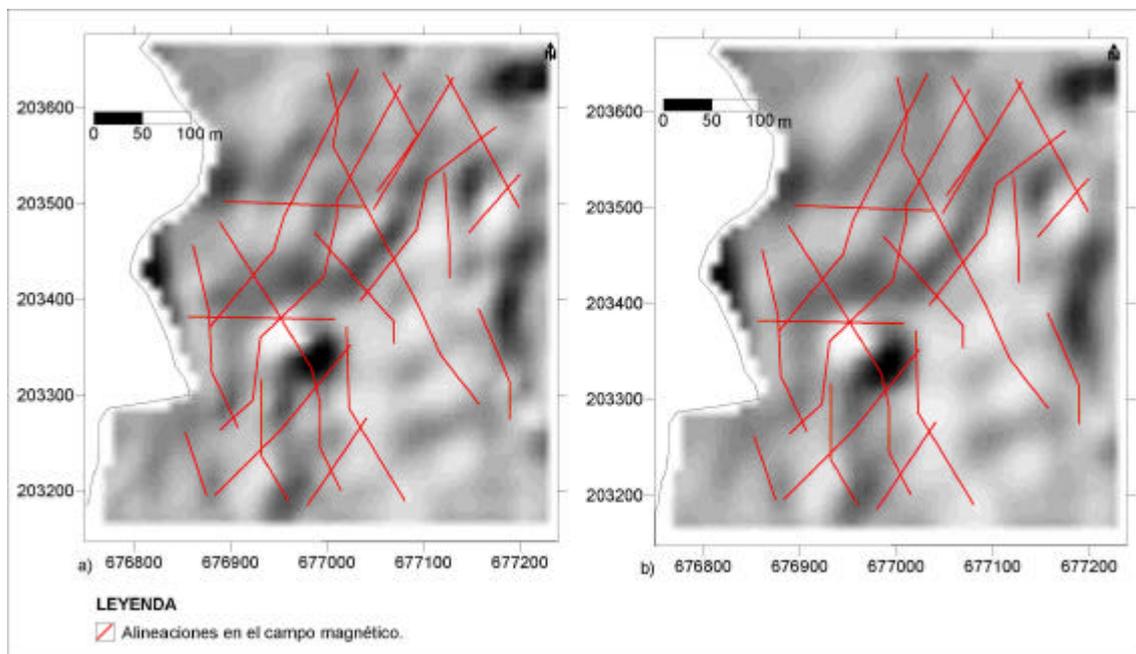


Figura 23. Mapas de relieve de CAA del sector Majayara.

a) h= 20 m; b) h= 40 m.

En los mapas de relieve sombreados de CAA a los 20 y 40 m (Figura 23) la mayoría de las alineaciones propuestas durante la interpretación de ΔZ continúan reflejándose, indicando que las posibles estructuras disyuntivas que denotan las mismas se extienden a profundidades superiores a los 40 m. (Fabian y Fonseca, 2003).

A partir del análisis realizado a los datos magnéticos se concluye que la tectónica disyuntiva del área se refleja en el comportamiento del campo magnético, a través de alineaciones en el mismo, lo cual permite proponer nuevas zonas de fallas donde se

observan alineaciones que no se relacionan con estructuras disyuntivas reportadas. El campo magnético alcanza sus mayores valores positivos donde predominan las rocas ultrabásicas serpentinizadas en superficie, coincidiendo con los resultados esperados a partir del análisis petrofísico realizado en el área investigada. También estos valores positivos se alcanzan en afloramientos de las rocas gabro-diabásicas, a partir de lo cual se infiere la existencia de rocas muy magnéticas por debajo de estas rocas menos magnéticas (Burns y Winkler, 1994; Hegmann, 2001), permitiendo inferir la extensión lateral de las rocas serpentinizadas. Los mayores valores negativos se observan en zonas donde predominan afloramientos de rocas gabro-diabásicas, las cuales deben alcanzar grandes espesores. La presencia de estos valores negativos en algunos afloramientos de rocas serpentinizadas sugieren que las mismas poseen muy poco espesor en comparación con las rocas poco magnéticas que están por debajo de ellas (Burns y Winkler, 1994; Castillo-García, 2004). La interpretación de los mapas CAA arrojó elementos a considerar en el comportamiento estructural del sector, tales como profundidades de cuerpos geológicos, de las alineaciones y formas de los cuerpos. De su análisis se infiere que todas las alineaciones, que pueden constituir el reflejo de sistemas de fallas, poseen profundidades superiores a los 40 m. Con ayuda de estos mapas también es posible obtener una visión de la distribución en la profundidad de las diferentes litologías.

Análisis combinado del levantamiento magnético y eléctrico

El análisis combinado de la información magnética y eléctrica arrojó como resultados que algunas de las alineaciones propuestas se definen en ambos campos físicos y otras no, debido a variaciones en las propiedades magnéticas y eléctricas en esas zonas alineadas, en el primer caso y no así en el segundo. Por ejemplo, en los casos donde coinciden alineaciones de ambos campos físicos, puede estar motivado porque en esas zonas existe un aumento en el grado de serpentización de las rocas, que origina un aumento en su grado de magnetización con respecto al medio que la rodea. Por otro lado, el intenso agrietamiento de las rocas en esas zonas, provoca un aumento de su porosidad secundaria, la cual permite que dicha roca posea una alta humedad, responsable de una mayor conductividad de la corriente eléctrica a través de este medio rocoso.

En los casos donde el comportamiento de estos dos campos físicos es diferente, o sea, no coinciden las alineaciones reportadas por uno u otro método, pudieran ocurrir por ejemplo uno de los dos procesos mencionados, en dependencia del campo físico que muestre la alineación. También la presencia de alineaciones en el campo magnético y no en el eléctrico, es un indicador probablemente de fallas que no poseen un reflejo en la superficie. para fortalecer esta idea es necesario realizar otras investigaciones geológicas y geofísicas.

En la figura 24 se recogen los principales resultados de la interpretación geólogo-geofísica del sector Majayara.

Del análisis combinado de los datos geofísicos en el sector Majayara se refuerza la idea de posibles nuevas zonas de fallas mediante la coincidencia de alineaciones en el campo magnético y eléctrico. También se supone que existen estructuras que no se reflejan en la superficie y se infieren aquellos procesos que han ocurrido en las zonas alineadas de estos campo físicos.

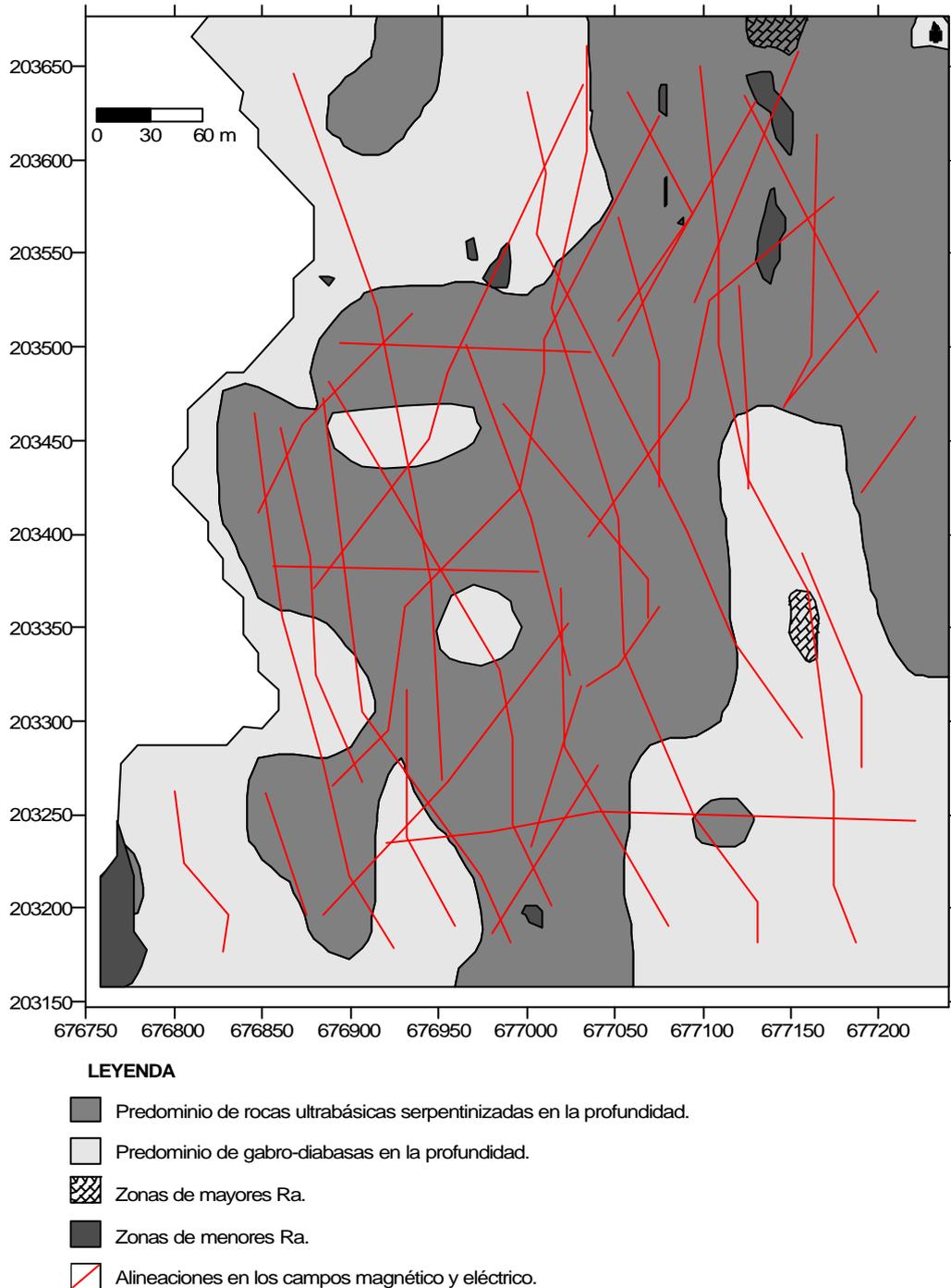


Figura 24. Esquema de interpretación geólogo-geofísico del sector Majayara.

Sector Rancho Yagua

Interpretación del mapa de isohomas (ra)

Del análisis mapa de isohomas del sector Rancho Yagua (Figura 25) se evidencia que las pa de las rocas que conforman el mismo varían desde 24 hasta 788 ohm.metros, con una media de 124 ohm.metros.

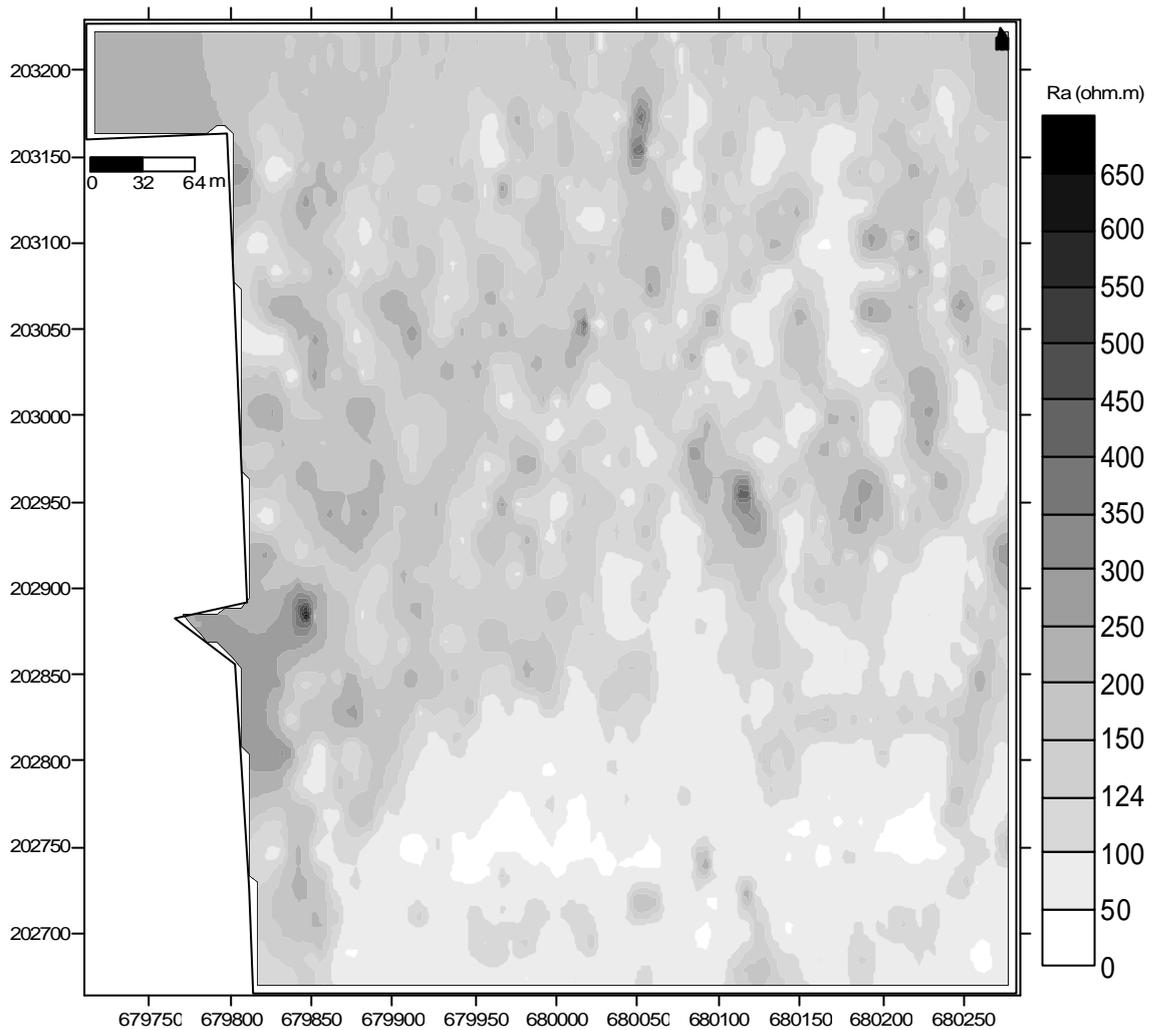


Figura 25. Mapa de isohomas del sector Rancho Yagua

Hacia la parte sur y en algunas pequeñas áreas al norte se ubican las zonas con bajos valores de ρ_a , por debajo de 126 ohm.metros, destacándose algunas zonas de muy bajos valores. Por otras parte las rocas con mayores ρ_a se ubican al oeste, al norte y en la parte central del sector.

En la parte sur además de registrarse las menores ρ_a el campo eléctrico se caracteriza por bajos gradientes, mostrando menor grado de homogeneidad en las características geológicas, con respecto a la parte central y norte, donde deben predominar diferentes variedades litológicas con características geológicas diferenciadas.

Se observan alineaciones en el comportamiento del campo eléctrico en varias direcciones, las cuales pudieran estar relacionadas con sistemas de fallas que afecten a esta región (Mamani y otros, 2004).

Comparando la información geológica con el mapa de isohomas se conoce que en las zonas de más bajos valores de ρ_a ubicada al sur y de hecho las de menores gradientes del campo eléctrico, afloran fundamentalmente gabro-diabasas, mientras que en las zonas con mayores ρ_a se desarrollan rocas ultrabásicas serpentinizadas. En las áreas de mayores gradientes, es decir hacia las partes septentrional y central, afloran mayoritariamente roca ultrabásicas serpentinizadas. De este análisis se infiere que las rocas gabro-diabásicas y ultrabásicas serpentinizadas se caracterizan por poseer bajas y altas ρ_a , respectivamente.

Todas las zonas de fallas reportadas como supuestas en el mapa geológico tomado como base se relacionan con alineaciones en el campo eléctrico, esto permite inferir que algunas de estas alineaciones pueden representar zonas de fallas no declaradas en las investigaciones anteriores (Mamani y otros, 2004)., aportando un elemento más a considerar para la existencia de las fallas reportadas como supuestas.

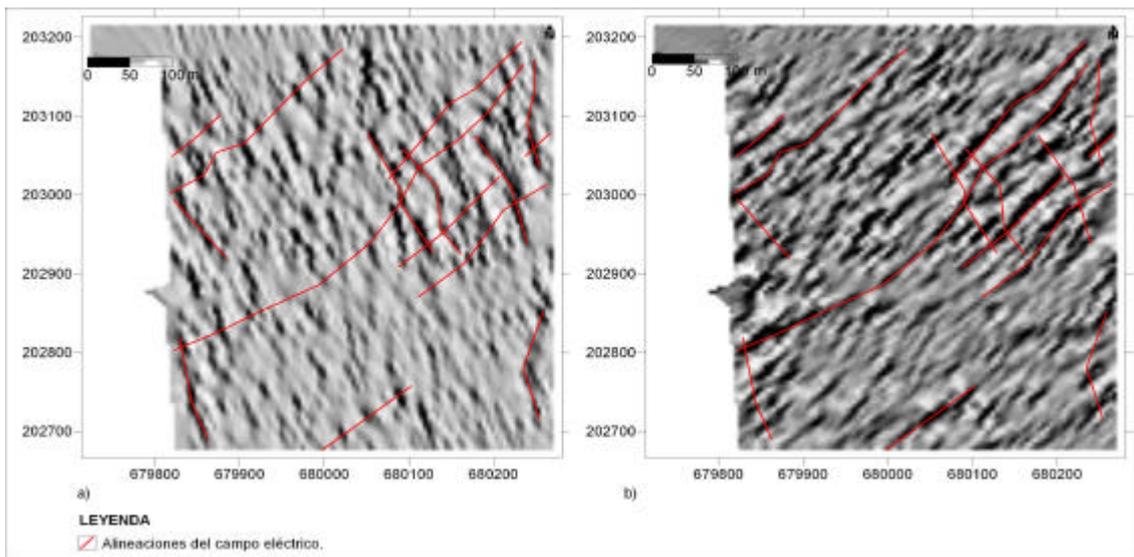


Figura 26. Mapa de gradientes horizontales del campo eléctrico del sector Rancho Yagua.

a) gradiente horizontal en la dirección de X; b) gradiente horizontal en la dirección de Y.

En los mapas de gradientes del campo eléctrico (Figura 26) se reflejan varias alineaciones de dirección NW-SE y NE-SW, algunas de las cuales se relacionan con sistemas reportados anteriormente como supuestos. Esto permite proponer a partir de esta interpretación un esquema con alineaciones del campo que pueden constituir el reflejo de supuesta zonas de fallas.

Del análisis realizados a los datos del levantamiento eléctrico se concluye que con los mismos es posible establecer el grado de heterogeneidad de las características geológicas observadas en superficie a través de las variaciones en la ρ_a de las litologías que afloran. De forma general las rocas gabro-diabásicas y ultrabásicas serpentinizadas se caracterizan por poseer bajas y altas ρ_a , respectivamente. A partir de esas ρ_a se infieren características de las rocas, así como procesos geológicos que en ellas han tenido lugar. Las zonas de fallas reportadas como supuestas en este sector, se relacionan con alineaciones en el comportamiento del campo eléctrico, aportando un elemento más a considerar durante el análisis de su verdadera existencia. Esto permitió proponer otras posibles zonas de fallas a partir de otras alineaciones.

Interpretación del mapa de isodinamas (ΔZ)

El campo magnético (ΔZ) en el sector Rancho Yagua (Figura 27) se caracteriza por alternancias de valores positivos y negativos, predominando los valores negativos en la parte septentrional y los positivos en la parte meridional del sector y extremo NW. De forma general ΔZ varía desde $-9\ 440$ a $19\ 330$ nT, con una media de 76.07 nT. La media para valores negativos es de -508.6 nT, mientras que para los valores positivos es de 575.3 nT.

Los mayores valores positivos del campo magnético se distribuyen en el extremo NW y algunas pequeñas áreas hacia el sur, mientras que los valores más bajos del campo se observan en la parte centro-meridional y pequeñas áreas de esta parte meridional.

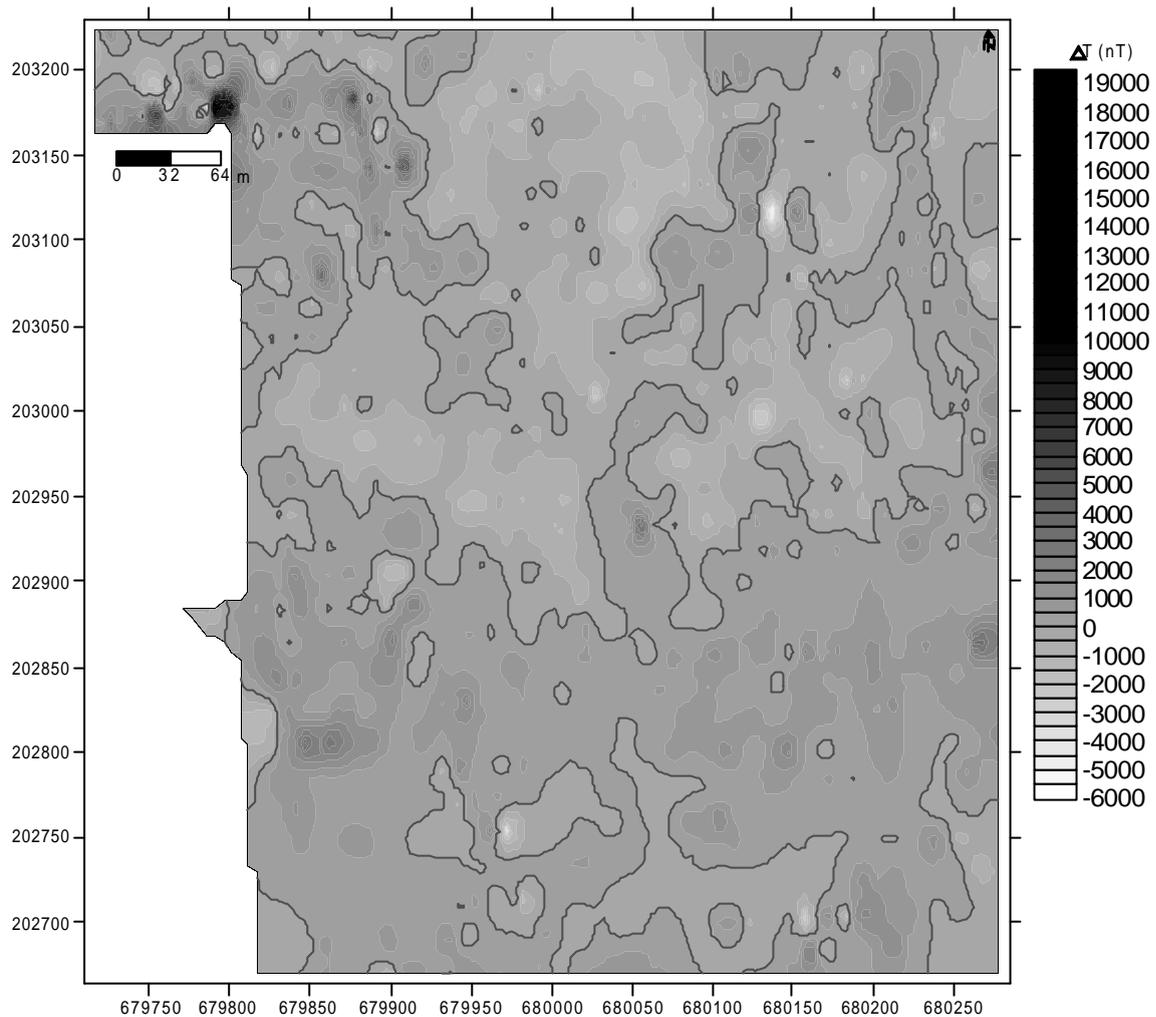


Figura 27. Mapa de Δz del sector Rancho Yagua.

Con ayuda de los valores medios se delimitan zonas anómalas de valores negativos y positivos. Las primeras se distribuyen en la parte septentrional, y las segundas en el extremo NW, parte meridional y pequeñas áreas al NE.

La comparación del mapa de ΔZ con la información geológica permitió definir que en la parte septentrional donde predominan los valores negativos del campo magnético afloran mayoritariamente rocas ultrabásicas serpentinizadas, mientras que en la parte meridional donde predominan los valores positivos, afloran rocas gabro-diabásicas, aunque también se observan afloramientos de rocas serpentinizadas. En el extremo NW donde se registran los más altos valores positivos del campo afloran rocas ultrabásicas serpentinizadas. De este análisis se infiere que en la parte septentrional las rocas serpentinizadas que afloran poseen pocos espesores comparados con los gabro-diabasas que deben encontrarse debajo, los cuales por su bajo grado de magnetización deben ser

los responsables de ese comportamiento del campo magnético (Karlsen y Olesen, 1996; Batista, 1998, 2002; Batista y Rodríguez, 2000; Ghidella, y otros, 1998, 2002; Castillo-García, 2004). Con estos elementos se establece la extensión lateral en la profundidad de las rocas menos magnéticas en el área. Estos espesores deben ser aún menores, en las áreas particulares donde se registran los menores valores negativos del campo magnético, aunque no se descarta la posibilidad de que afloren rocas de muy bajo grado de magnetización, no reportadas en el mapa geológico tomado como base. En la parte meridional se observa un cuadro inverso al descrito, es decir, las rocas gabro-diabásicas están infrayacidas en mayor medida por rocas ultrabásicas serpentinizadas de espesores mayores que las primeras según se muestra en los pozos criollos y de perforación que allí se ubican, algunos de los cuales se perforó hasta 200 m. (Tabla 1, 2, 3, 4 y 5). La alta magnetización y los mayores espesores de estas rocas serpentinizadas provocan la aparición de un campo magnético positivo en esta zona. Por lo tanto, se infiere la extensión lateral de las rocas serpentinizadas por debajo de otras menos magnéticas (Burns y Winkler, 1994; Hegmann, 2001). En este mismo extremo y al NW donde afloran rocas serpentinizadas, los valores positivos evidencian el predominio tanto en la superficie como en la profundidad de estas rocas.

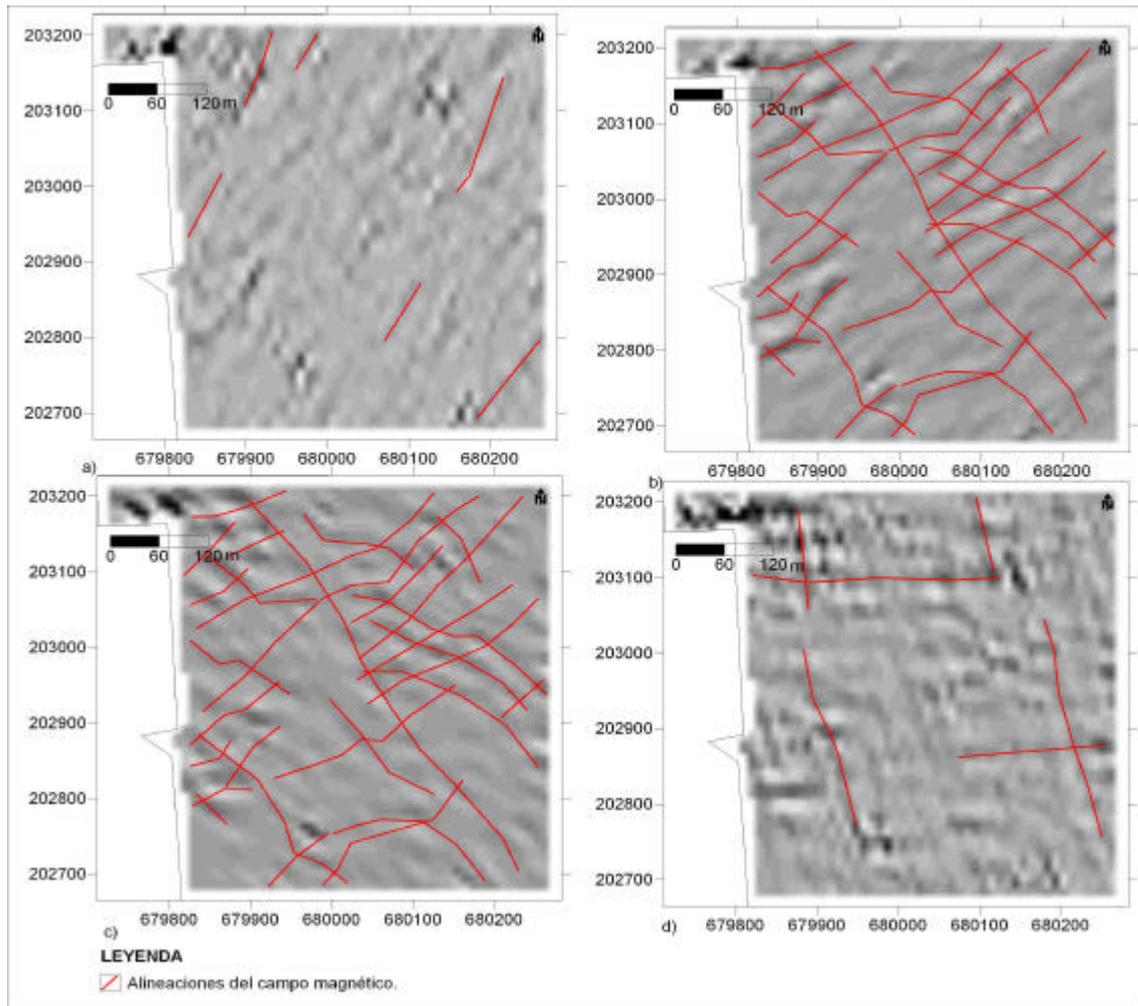


Figura 28. Mapa de relieve sombreados de los gradientes de ΔZ del sector Rancho Yagua.

a) gradiente horizontal en la dirección de X; b) gradiente horizontal en la dirección de Y; c) gradiente horizontal en la dirección de Y; d) gradiente vertical

En los mapas de gradientes horizontales y verticales del campo magnético (Figura 28a, b, c, d) se observan varias alineaciones, con direcciones NW-SE y NE-SW, algunas de las cuales se relacionan con los sistemas de fallas reportados en esta dirección, en el mapa geológico tomado como base. Por lo tanto, este resultado constituye un elemento más a considerar sobre el verdadero carácter de esas zonas de fallas, es decir, sobre el esclarecimiento de su carácter supuesto o probado.

Este análisis permite proponer un nuevo esquema de alineaciones del campo magnético, las cuales es posibles que constituyan zonas de fallas, luego de la realización de otros trabajos geológicos (Ussami y otros, 1991; Bassay y otros, 2001; Gibert y otros, 2002; Grauch, 2002; Ruiz y otros, 2002; Smith y otros, 2002; Fabian y Fonseca, 2003). La

delimitación de esas posibles zonas de fallas serviría de base a futuras investigaciones de riesgos geológicos que se realicen en la región.

Del análisis de los mapas de CAA del sector Rancho Yagua (Figura 29a, b, c) calculados a las alturas de 10, 20 y 30 m, se obtiene una valoración sobre la distribución de las diferentes litologías en la profundidad, así como de las principales alineaciones del campo magnético.

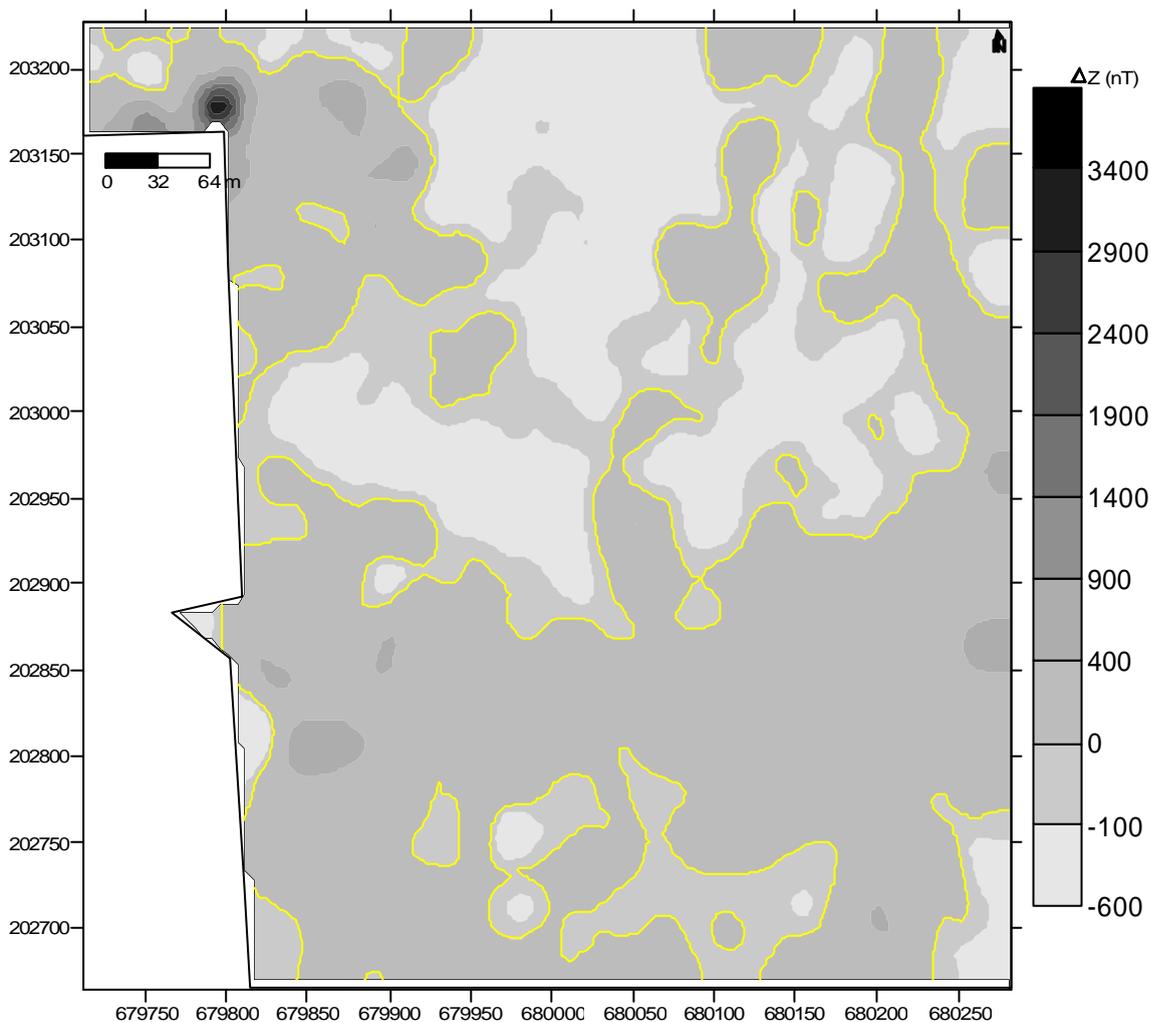


Figura 29a. Continuidad Analítica Ascendente a los 10 m de ΔZ del sector Rancho Yagua.

En el mapa obtenido a los 10 m de altura se observa que han desaparecido la mayoría de las pequeñas anomalías dentro de las zonas de predominio de valores negativos y positivos, en la parte septentrional y meridional, respectivamente. Estos resultados ponen de manifiesto la poca profundidad de los cuerpos geológicos responsables de esas anomalías, la cual no debe sobrepasar 10 m de profundidad (García y otros, 2004). Algunas anomalías pequeñas de valores positivos y negativos continúan

manifestándose, indicando que los cuerpos que la producen se extienden a profundidades mayores que la señalada. Las zonas de mayores valores positivos del campo magnético continúan observándose en este mapa, indicando que las mismas se deben a espesores relativamente grandes de los cuerpos que la producen.

En los mapas de CAA a los 20 y 30 m (Figura 29b,c), han desaparecido la mayoría de las zonas de mayores valores positivos, excepto la ubicada en el extremo NW, indicando que los cuerpos que producen a las primeras poseen profundidades que pueden alcanzar hasta los 20 y 30 m. Sin embargo, en el extremo NW las rocas ultrabásicas serpentinizadas alcanzan sus mayores profundidades (Blakely and Simpson, 1986; Grauch and Cordell, 1987).

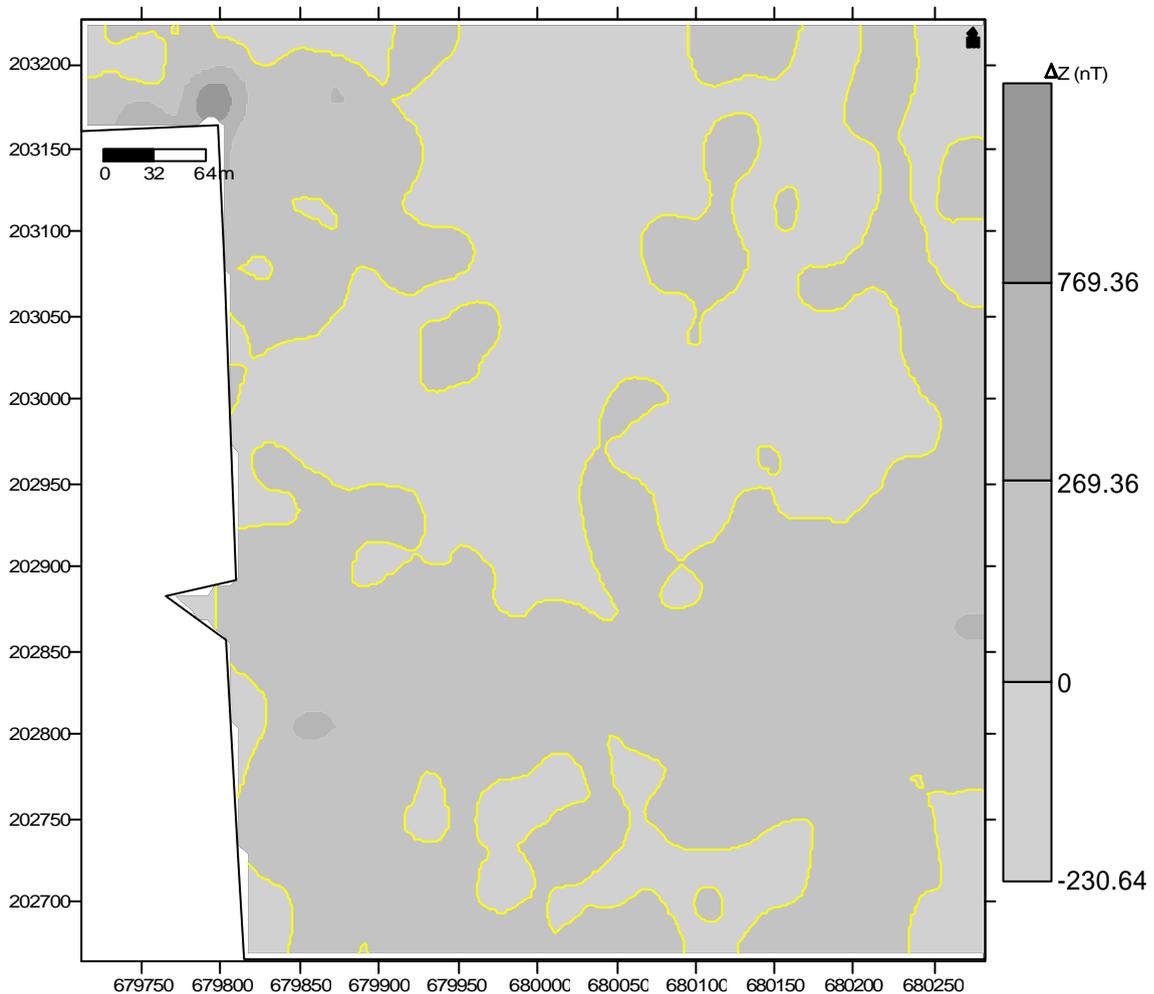


Figura 29b. Continución Analítica Ascendente a los 20 m de ΔZ del sector Rancho Yagua.

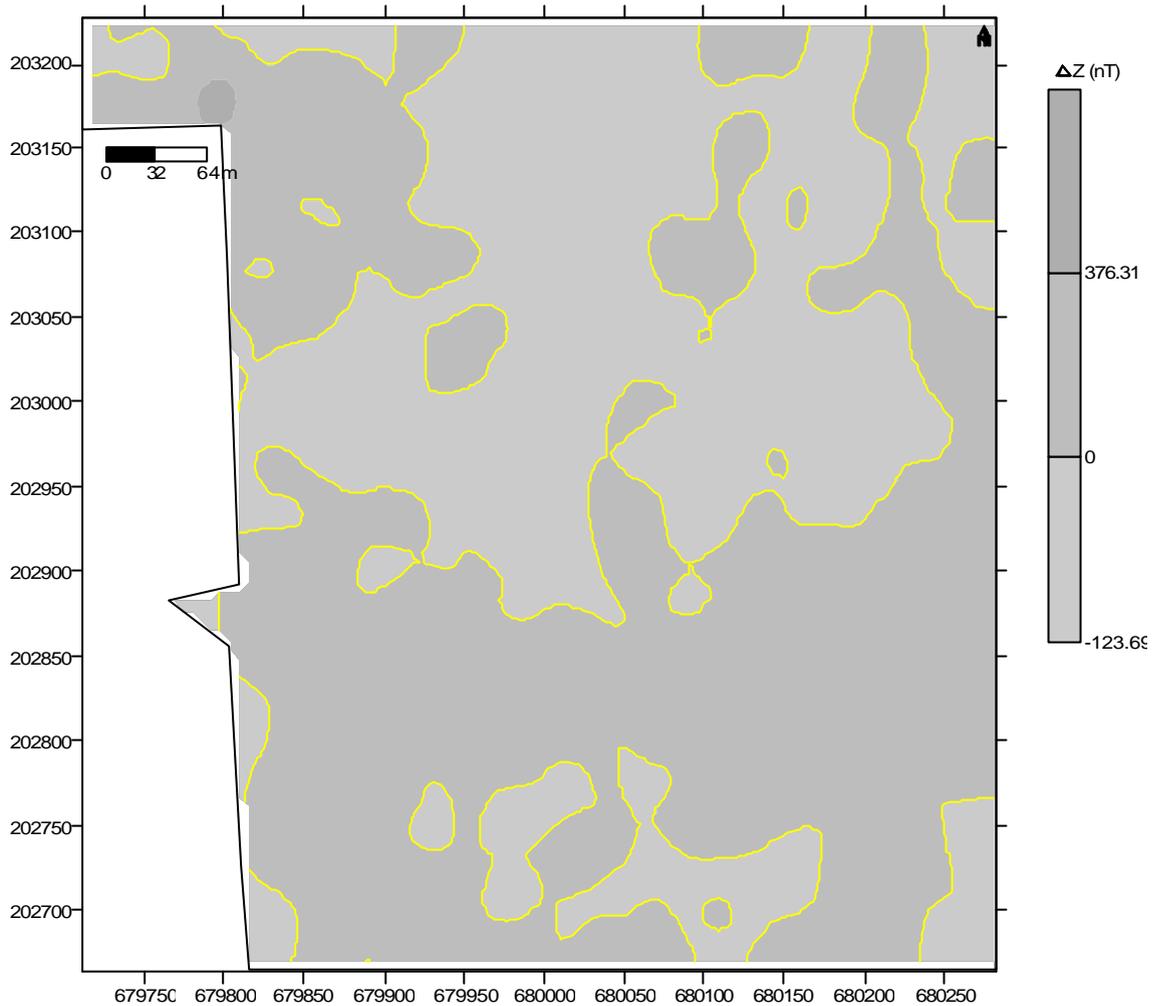


Figura 29c. Continuación Analítica Ascendente a los 30 m de ΔZ del sector Rancho Yagua.

En estos mapas de CAA se observa con mayor claridad la distribución en la profundidad de las rocas ultrabásicas serpentinizadas y gabro-diabásicas en los diferentes intervalos de profundidad, lo cual se verifica con las descripciones de los pozos criollos y de perforación ubicados en este sector (Tabla 1, 2, 3, 4 y 5). A partir de la altura de recálculo de 10 m el comportamiento del campo magnético es similar en cuanto a la distribución de valores positivos y negativos, indicando que no hay cambio en la distribución de la litología entre los 10 y 30 m de profundidad. Según el comportamiento del campo magnético en los mapas analizados y la descripción del pozo de perforación No. 2 que alcanzó los 200 m de profundidad (Tabla 2), las rocas ultrabásicas serpentinizadas prevalecen a profundidades mayores de 30 m., en el extremo SE, sin embargo la descripción de pozo No.1 (Tabla 1) apoya los resultados

mostrado de la CAA a los 30 m., donde los valores negativos se deben a un predominio en la profundidad de las rocas gabro-diabásicas.

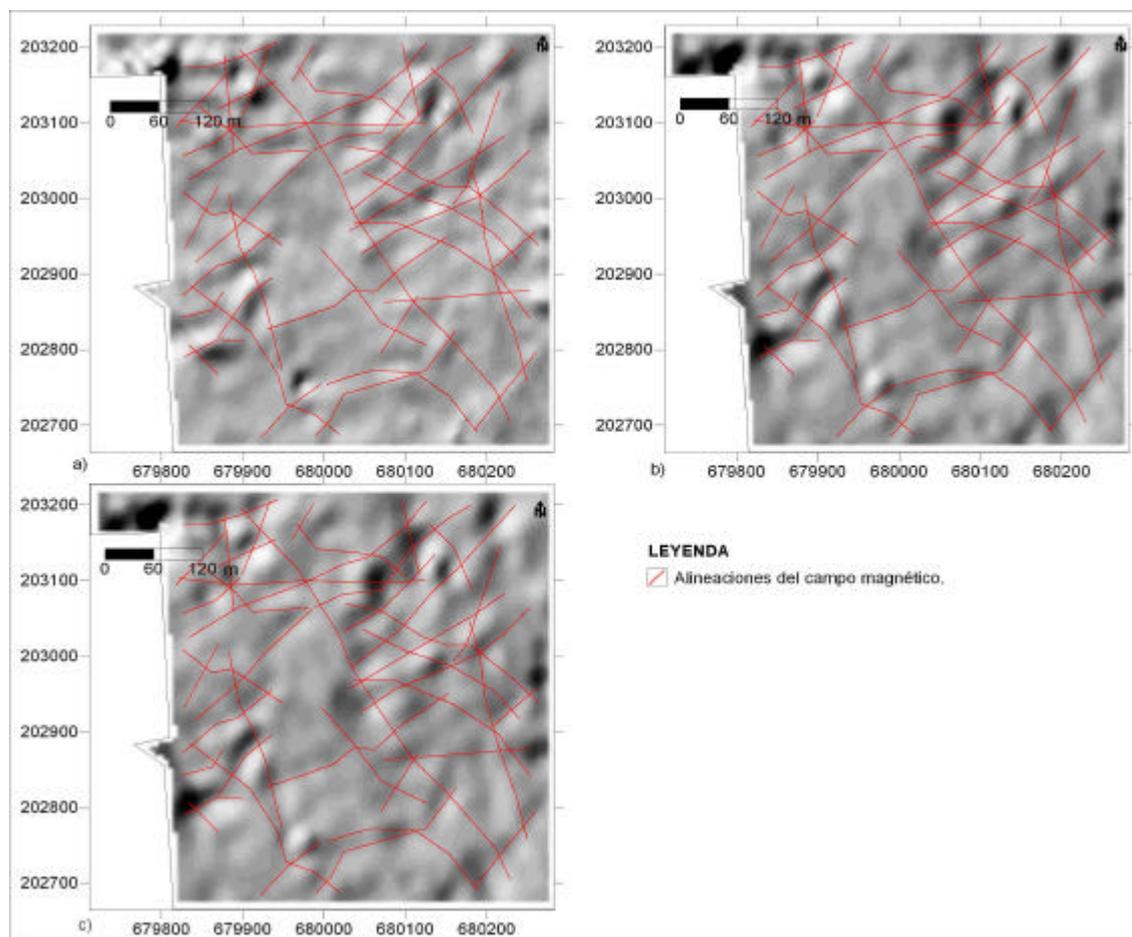


Figura 30. Mapa de relieve de la Continuación Analítica Ascendente del sector Rancho Yagua.

a) $h= 10$ m; b) $h= 20$ m; c) $h= 30$ m.

Con los mapas de relieve sombreados de la CAA (Figura 30a, b, c) se conocen los intervalos de profundidades hasta los cuales se extienden las alineaciones, que probablemente constituyan el reflejo de sistemas de fallas (Fabian y Fonseca, 2003). De forma general en estos mapas de CAA se observan la mayoría de las alineaciones trazadas durante la interpretación de ΔZ , denotando que tales posibles estructuras se extienden a profundidades superiores a los 30 m.

Con el análisis realizado se concluye que con los datos magnéticos se obtiene la distribución en superficie y profundidad de las litologías presentes, así como las variaciones de sus espesores. Los mayores espesores de las rocas ultrabásicas serpentinizadas comparadas con las otras litologías se observan en el extremo meridional y NW del sector, mientras que en la parte septentrional estas rocas poseen

pocos espesores, alcanzado incluso sus mínimos valores. En la parte meridional las rocas serpentinizadas infrayacen a las rocas que afloran y hacia el extremo septentrional se observa un cuadro inverso, definiéndose de esta manera la extensión lateral de estas litologías por debajo de las cubiertas que afloran. En los mapas de gradientes horizontales y verticales del campo magnético se observan alineaciones en las direcciones fundamentales de los sistemas de fallas reportados en la región oriental de Cuba, es decir, en las direcciones NW-SE y NE-SW. Los sistemas de fallas del sector, reportados como supuestos, en esas direcciones, se relacionan con estas alineaciones, aportando elementos desde el punto de vista geofísico sobre el verdadero carácter de esas estructuras. También se proponen nuevas posibles estructuras disyuntivas, según las alineaciones de los campos físicos, con lo cual se aportan nuevos elementos a considerar durante el conocimiento estructural de la región, y por lo tanto se apoyaría significativamente los futuros trabajos de riesgos geológicos. Del análisis de los mapas de CAA se obtiene una distribución litológica y estructural en diferentes intervalos de profundidades, corroborando el predominio en la profundidad de rocas serpentinizadas y gabro-diabásicas, en el extremo septentrional y meridional, respectivamente. La mayoría de los cuerpos que producen las principales anomalías magnéticas positivas no sobrepasan los 30 m de profundidad, con la excepción del ubicado en el extremo NW (Blakely and Simpson, 1986; Grauch and Cordell, 1987).

Análisis combinado del levantamiento magnético y eléctrico

La combinación de la información magnética y eléctrica durante el proceso de interpretación permitió definir que la inmensa mayoría de las alineaciones señaladas en el comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos no se relacionan indicando que en esas zonas los procesos que dan lugar a tal comportamiento de estos campos físicos no coinciden espacialmente, es decir, en algunos casos ocurren procesos que provocan un incremento o disminución de la magnetización y no así de la resistividad eléctrica o viceversa. Por otra parte la mayoría de las alineaciones presentes en el campo magnético sin relación alguna con las alineaciones observadas en el campo eléctrico, pueden constituir posibles zonas de fallas sin un comportamiento apreciable en la superficie. Por lo tanto, con ambos conjuntos de alineaciones se proponen posibles sistemas de estructuras disyuntivas desde diferentes punto de vista, con carácter somero y relativamente profundos.

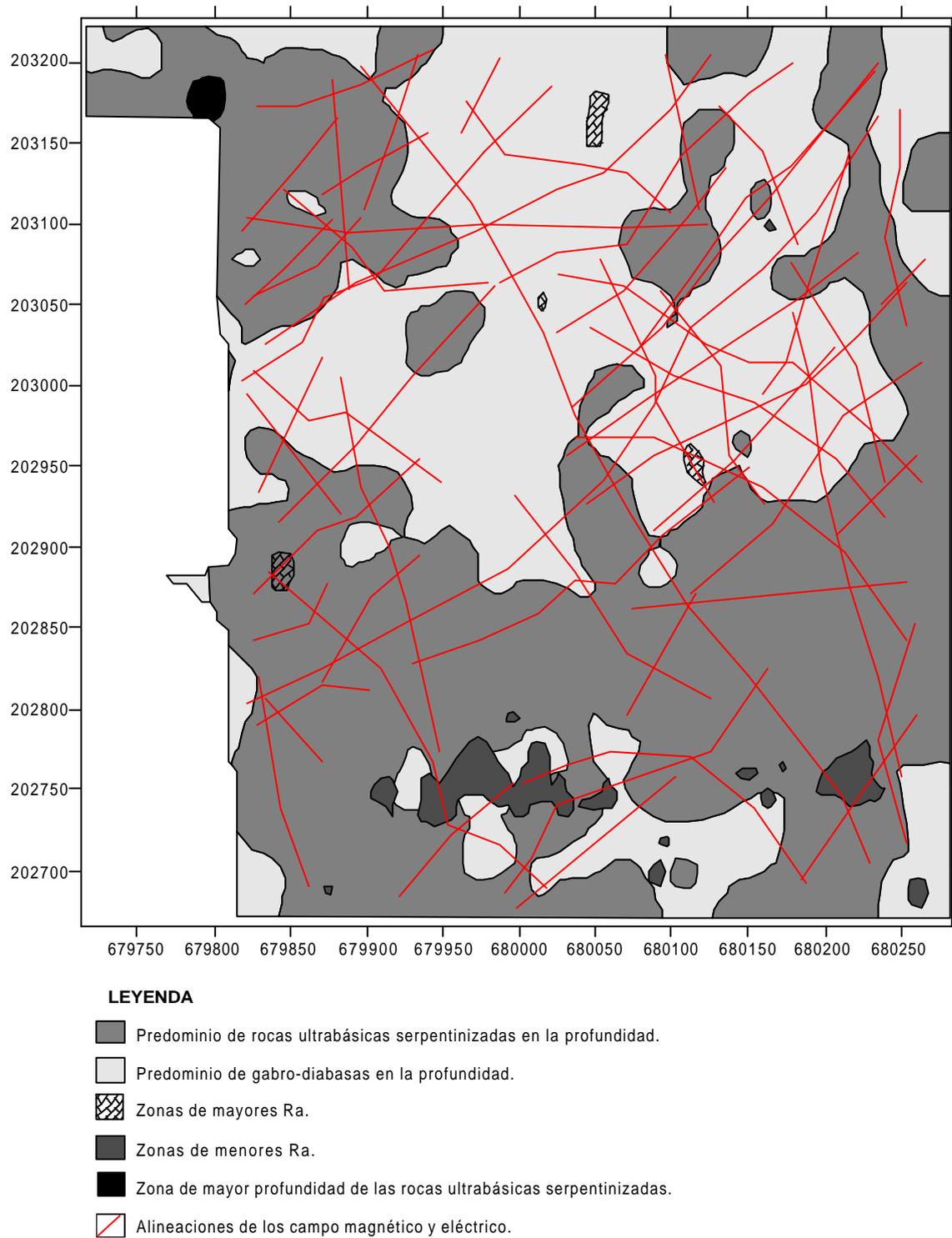


Figura 31. Esquema de interpretación geólogo-geofísico del sector Rancho Yagua.

En la figura 31 se recogen los principales resultados de la interpretación geólogo-geofísica del sector Rancho Yagua.

Del análisis combinado de la información geológica en el sector se concluye que la mayoría de las alineaciones mostradas en los campos físicos eléctricos y magnéticos

tienen diferentes orígenes, en dependencia del campo físico donde se muestren, y por lo tanto permiten evaluar las características estructurales de este sector, tanto somera como profunda, desde diferente punto de vista geofísicos, aspecto muy importante a considerar en futuras investigaciones en el territorio.

Reinterpretación de los levantamientos gravimétrico y magnético del sector Cayo Guam

Interpretación del levantamiento gravimétrico (Δg)

El campo gravitatorio en el sector Cayo Guam (Figura 32) se caracteriza por un aumento de los valores de norte a sur, es decir, hacia la parte meridional se localizan los máximos valores de Δg . Este campo varía entre 78.06 a 82.33 mGal, con una media de 80.51 mGal. Al comparar este mapa con la información geológica (Figura 1) se conoce que este comportamiento del gravimétrico se pone de manifiesto en un área donde afloran rocas ultrabásicas serpentinizadas, por lo tanto las variaciones en los valores de Δg responden a las variaciones en las formas y espesores de estas rocas ultrabásicas (Castillo-García, 2004), de lo cual se infiere que hacia la parte meridional se localizan los mayores espesores de estas rocas.

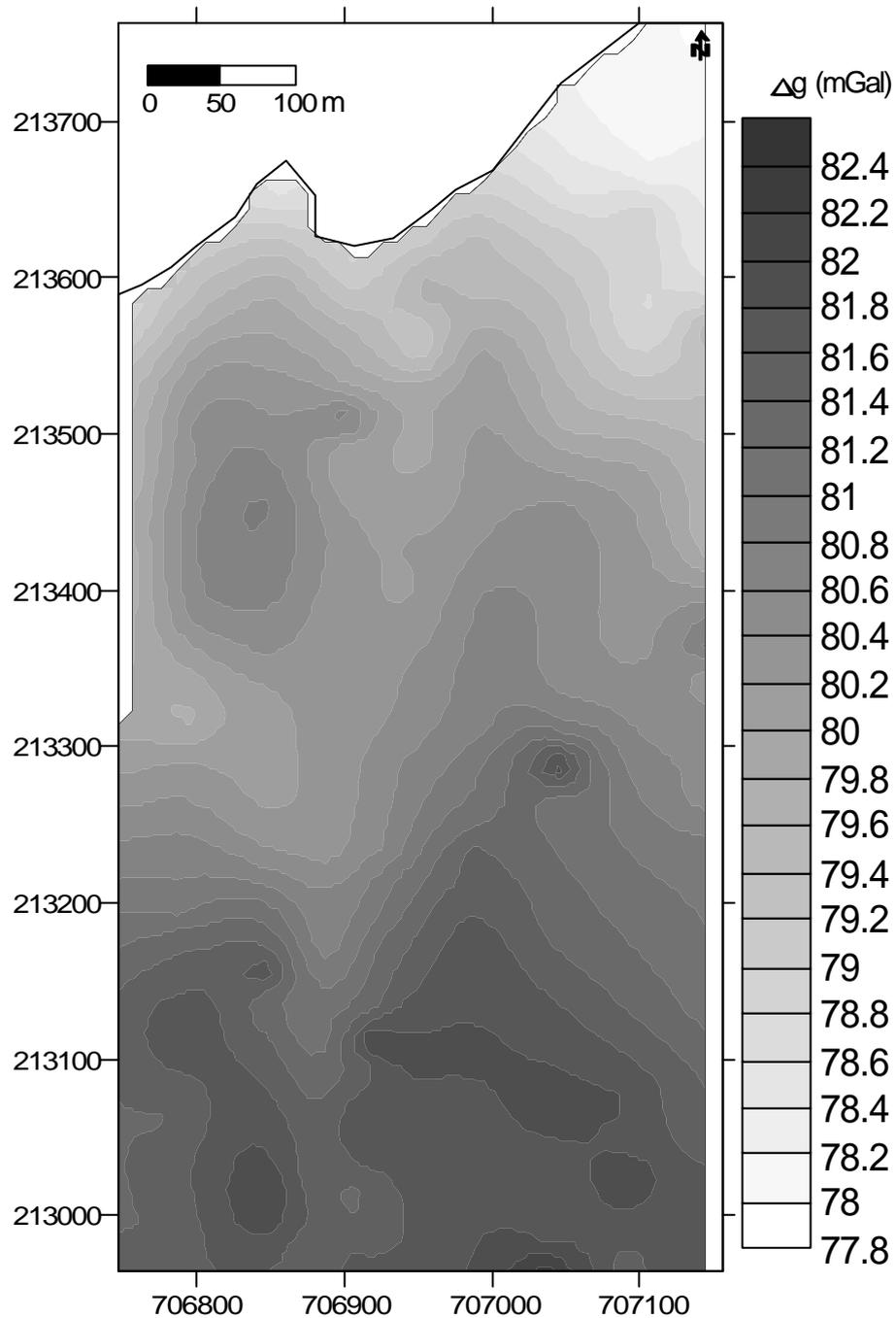


Figura 32. Mapa de Δg del sector Cayo Guam.

En los mapas de relieve de los gradientes horizontales y verticales (Figura 33a, b, c), se destacan varias zonas alineadas con dirección NW-SE y NE-SW fundamentalmente, y en menor grado N-S. Tales zonas pudieran estar relacionadas con sistemas de fallas, corroborando la importancia de estas investigaciones geofísicas durante la identificación y caracterización de zonas de fallas (Hegmann, 2001; Gumiel y Campos, 2004). Con

ayuda de esta interpretación no solo se ubican esos posibles sistemas de fallas, si no que se conocen sus direcciones, longitudes y formas.

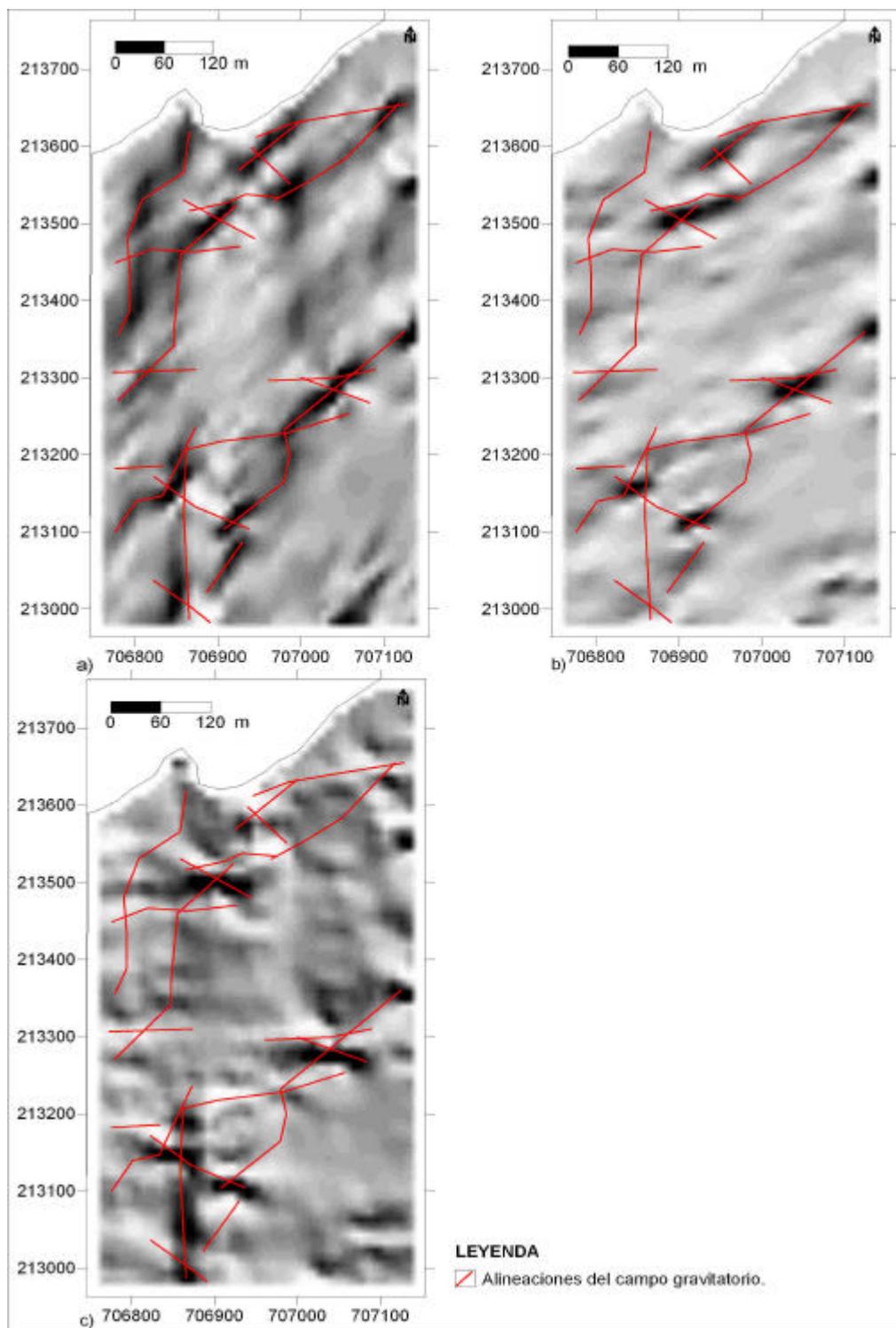


Figura 33. Mapa de relieve sombreados de los gradientes de Δg del sector Cayo Guam. a) gradiente horizontal en la dirección de X; b) gradiente horizontal en la dirección de Y; c) gradiente vertical

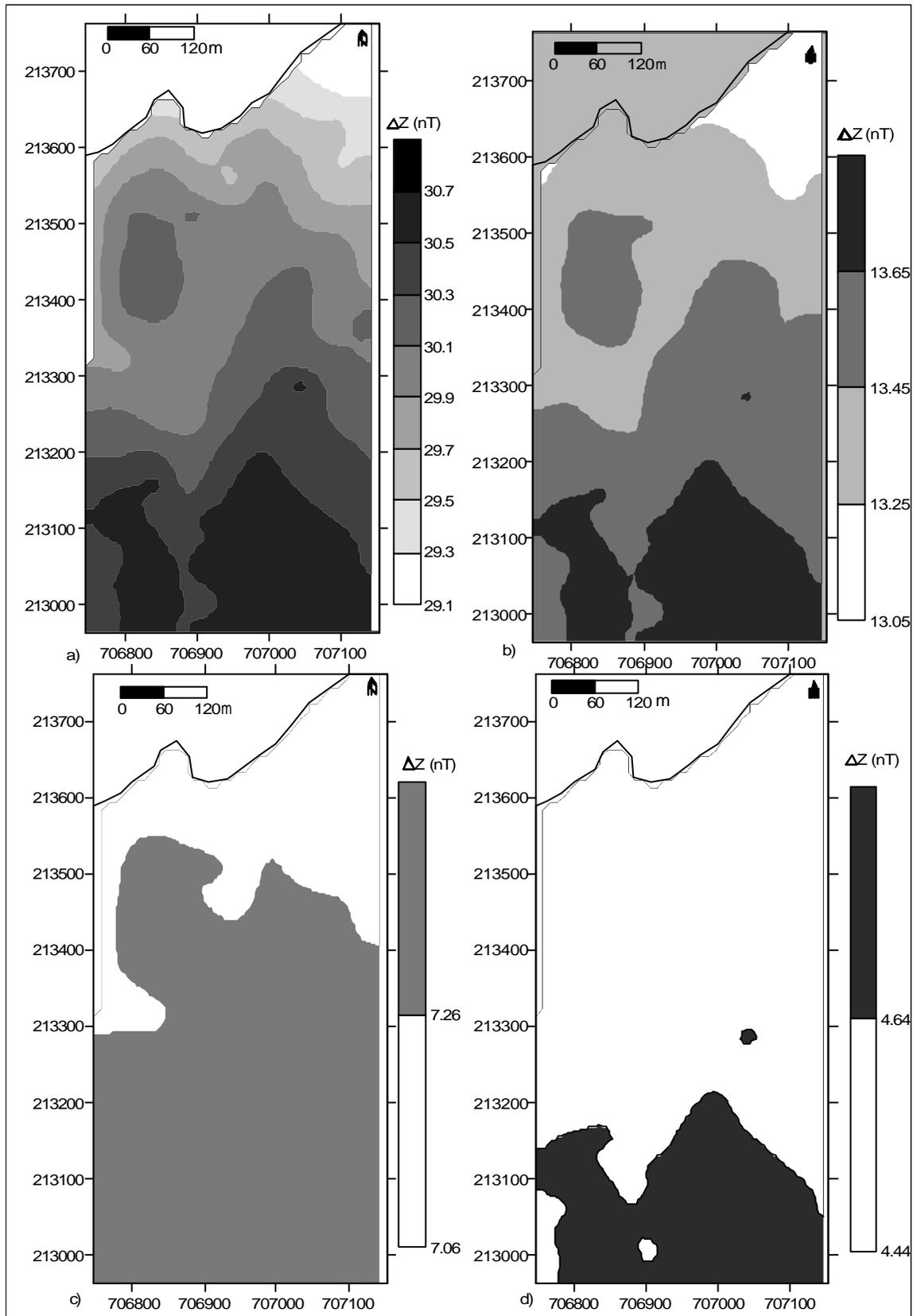


Figura 34. CAA del mapa de Δg del sector Cayo Guam.
a) $h=10$ m; b) $h=20$ m, c) $h=30$ m; d) $h=40$ m.

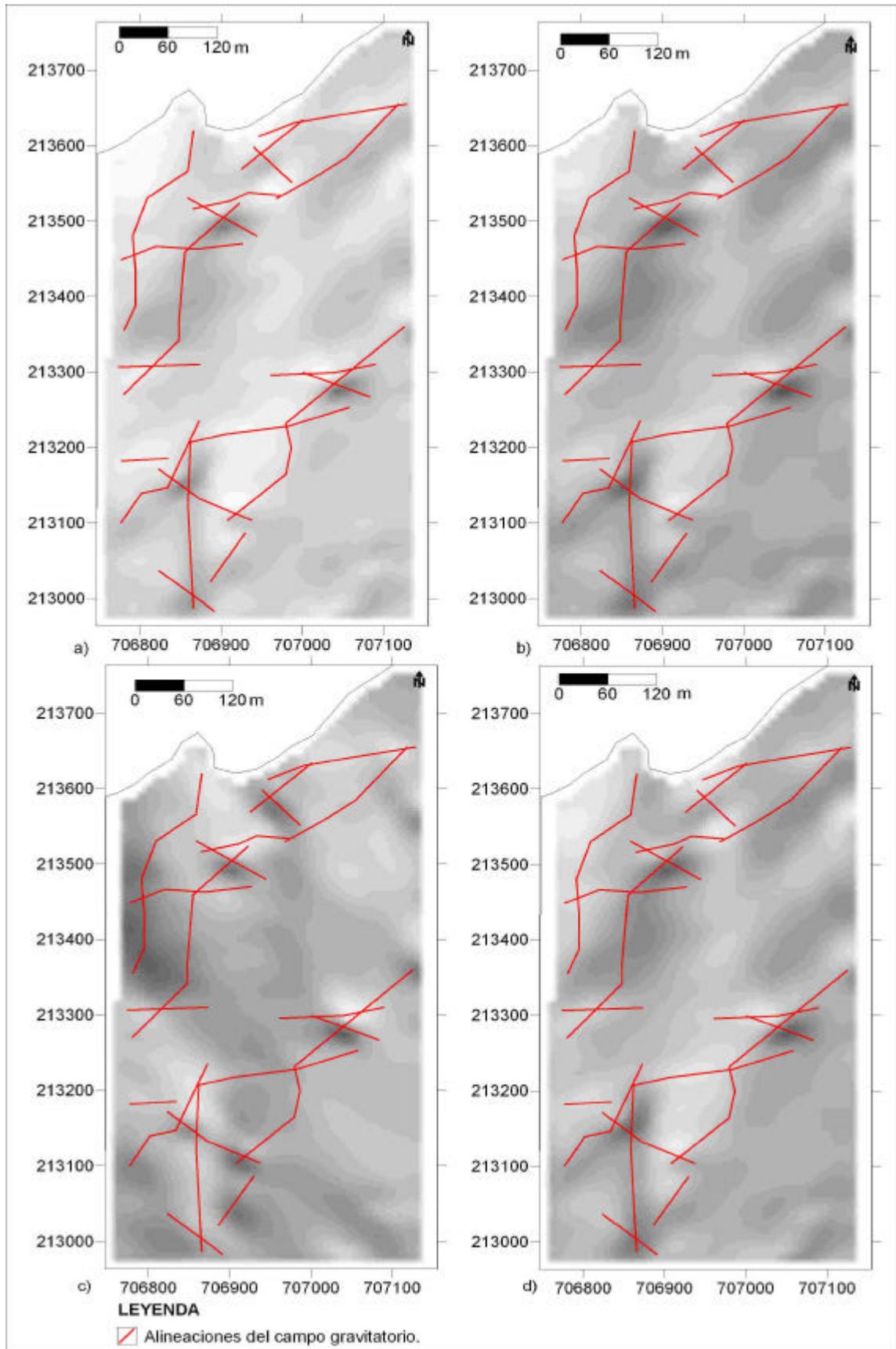


Figura 35. Mapa de relieve de la CAA de Δg del sector cayo Guam.
 a) $h= 10$ m; b) $h= 20$ m; c) $h= 30$ m; d) $h= 40$ m.

Del análisis de los mapas de CAA a las alturas de recalculo de 10, 20, 30 y 40 m. (Figura 34a, b, c y d), se conoce la variación en la profundidad de las rocas serpentinizadas. A los 10 m de recalculo han desaparecido la mayoría de las pequeñas anomalías observadas en el mapa de Δg , las cuales desaparecen totalmente a los 20 m, indicando el carácter somero de los cuerpos geológicos que la producen (Oguchi y Ishida, 2002). A partir de los 20 m y hasta los 30 m, la morfología del campo gravitatorio muy similar, la cual cambia a los 40 m, sugiriendo cambios en las formas de los cuerpos geológicos más grandes que producen las zonas anómalas extendida, la cual ya a los 40 m solo se restringe a un área más pequeña al sur, en la cuál se localizan las mayores profundidades de las rocas serpentinizadas en el sector o de los gabros que pueden encontrarse por debajo, teniendo en cuenta que estas son las rocas más densas del territorio.

En los mapas de relieve de la CAA a los diferentes niveles de recálculo (Figura 35a, b, c, d), se reflejan la mayoría de las alineaciones señaladas en los mapas de gradientes de Δg , de lo cuál se infiere que esa posibles estructuras disyuntivas se extienden a profundidades superiores a los 40 m., aspecto muy importante a considerar en futuras investigaciones medioambientales que se realicen en este sector investigado.

De la interpretación del levantamiento gravimétrico se concluye que las mayores profundidades de las rocas serpentinizadas o de los gabros que no afloran, se localizan en la parte meridional del sector. Según el comportamiento de los mapas de gradientes se señalan nuevas alineaciones que pueden estar relacionadas con nuevas zonas de fallas, de las cuales no solo se ofrecen sus ubicaciones sino también su forma, extensión lateral y en la profundidad y dirección, lo cual adquiere gran importancia en futuras investigaciones medioambientales. A esto se le suma que la mayoría de estas estructuras propuestas se extienden a profundidades superiores a los 40 m. Además con la CAA se ofrece un cuadro estructural en la profundidad.

Interpretación del levantamiento magnético

El campo magnético (ΔZ) en el sector Cayo Guam (Figura 36) se caracteriza por un predominio fundamentalmente de valores positivos, con pequeñas áreas de valores negativos distribuidas de manera dispersa en el sector. De forma general ΔZ varía desde $-4\ 100$ a $2\ 900$ nT, con una media de 257.75 nT. La media en para valores negativos es de -422.2 nT, mientras que para los valores positivos es de 430.62 nT. A partir de estos

valores se definen las zonas anómalas dentro del sector, las cuales abarcan gran parte del mismo. Las zonas de valores negativos indican las zonas donde estas rocas ultrabásicas serpentinizadas poseen sus menores espesores, es decir, donde hay un mayor acercamiento a la superficie del tope inferior de estas rocas (Karlsen y Olesen, 1996; Batista, 1998, 2002; Batista y Rodríguez, 2000; Ghidella, y otros, 1998, 2002; Castillo-García, 2004). Por lo tanto, con ayuda este mapa se tiene idea del relieve inferior de las rocas altamente magnéticas que producen estas anomalías. No se descarta la posibilidad de que algunas de esas pequeñas zonas se deban al afloramiento de cuerpos de gabros, que se reportan en la zona (Prolov y otros, 1980), caracterizados por bajos valores de magnetización con respecto a las rocas serpentinizadas (Zamashikov y Tobachkov, 1971; Castillo, 1980; Rodríguez, 1982; Chang y otros, 1990, 1991; Batista, 2002).

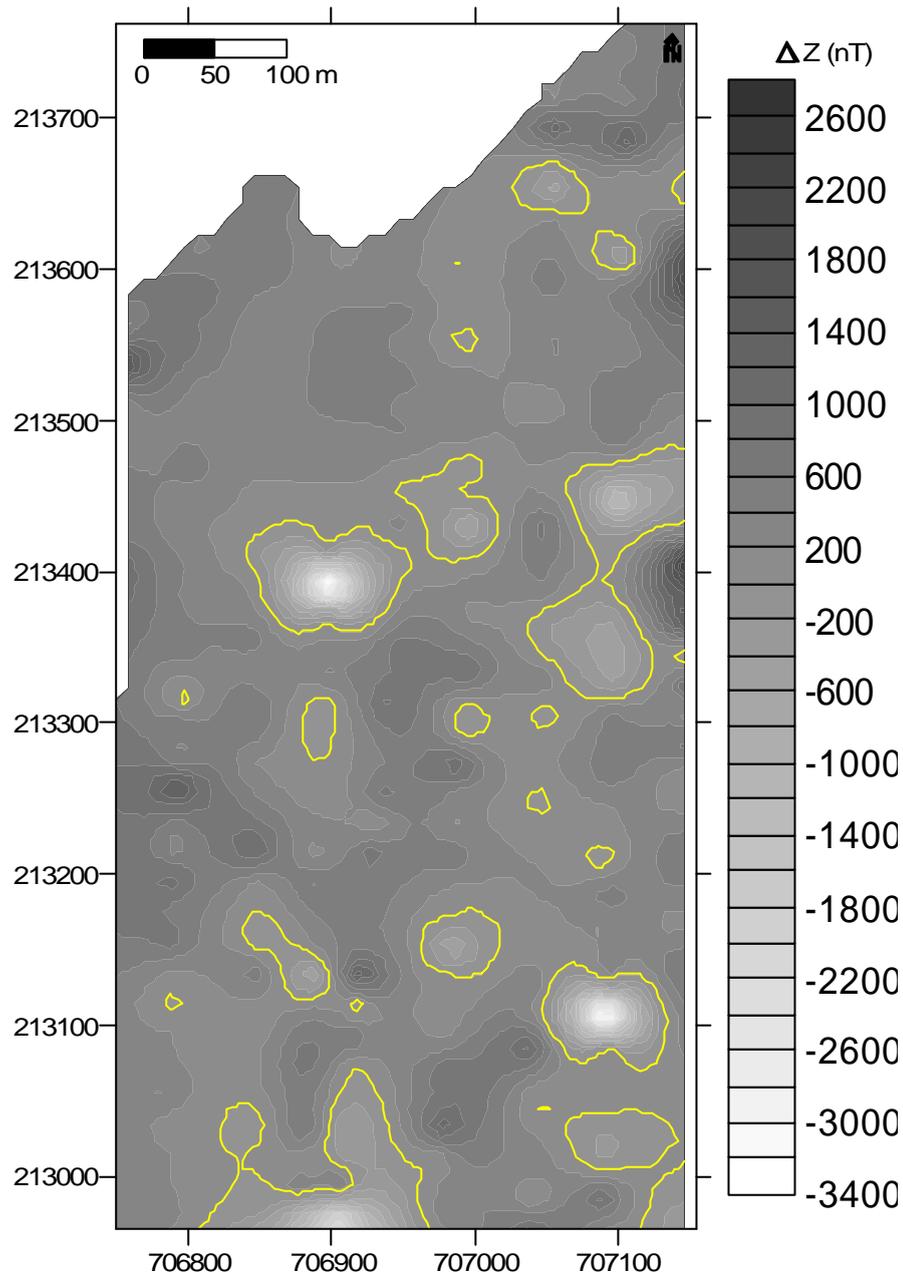


Figura 36. Mapa de ΔZ del sector Cayo Guam.

En los mapas de relieve de los gradientes horizontales y verticales (Figura 37a, b, c), se aprecian varias alineaciones con dirección NW-SE y NE-SW, algunas de las cuales pueden estar relacionadas con zonas de fallas (Ussami y otros, 1991; Bassay y otros, 2001; Gibert y otros, 2002; Grauch, 2002; Ruiz y otros, 2002; Smith y otros, 2002), con lo cual se aportan nuevos elementos sobre las características estructurales de este sector, aspectos imprescindibles en las futuras investigaciones medioambientales que se hagan en el mismo.

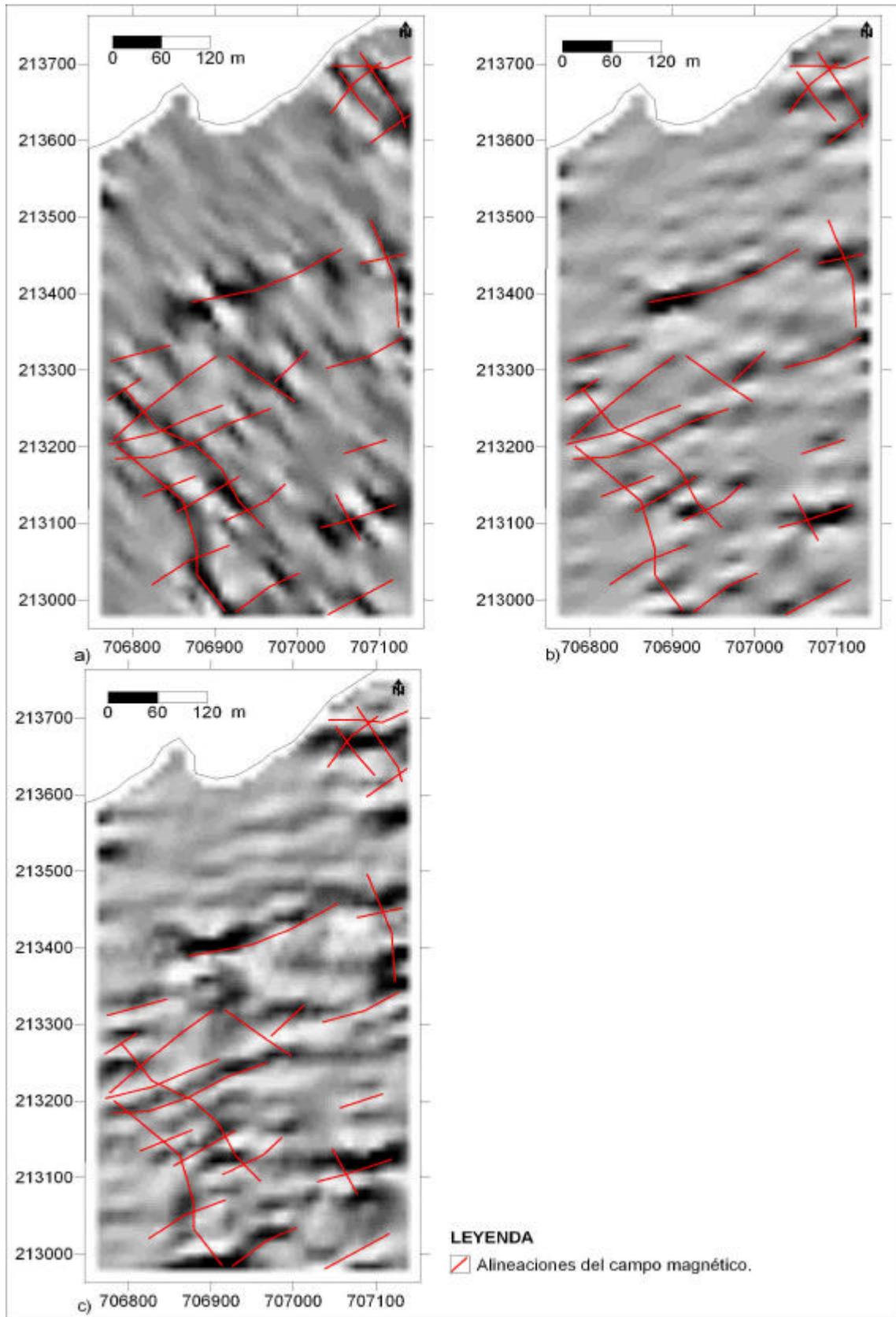


Figura 37. Mapa de relieve sombreados de los gradientes de ΔZ del sector Cayo Guam. a) gradiente horizontal en la dirección de X; b) gradiente horizontal en la dirección de Y; c) gradiente vertical.

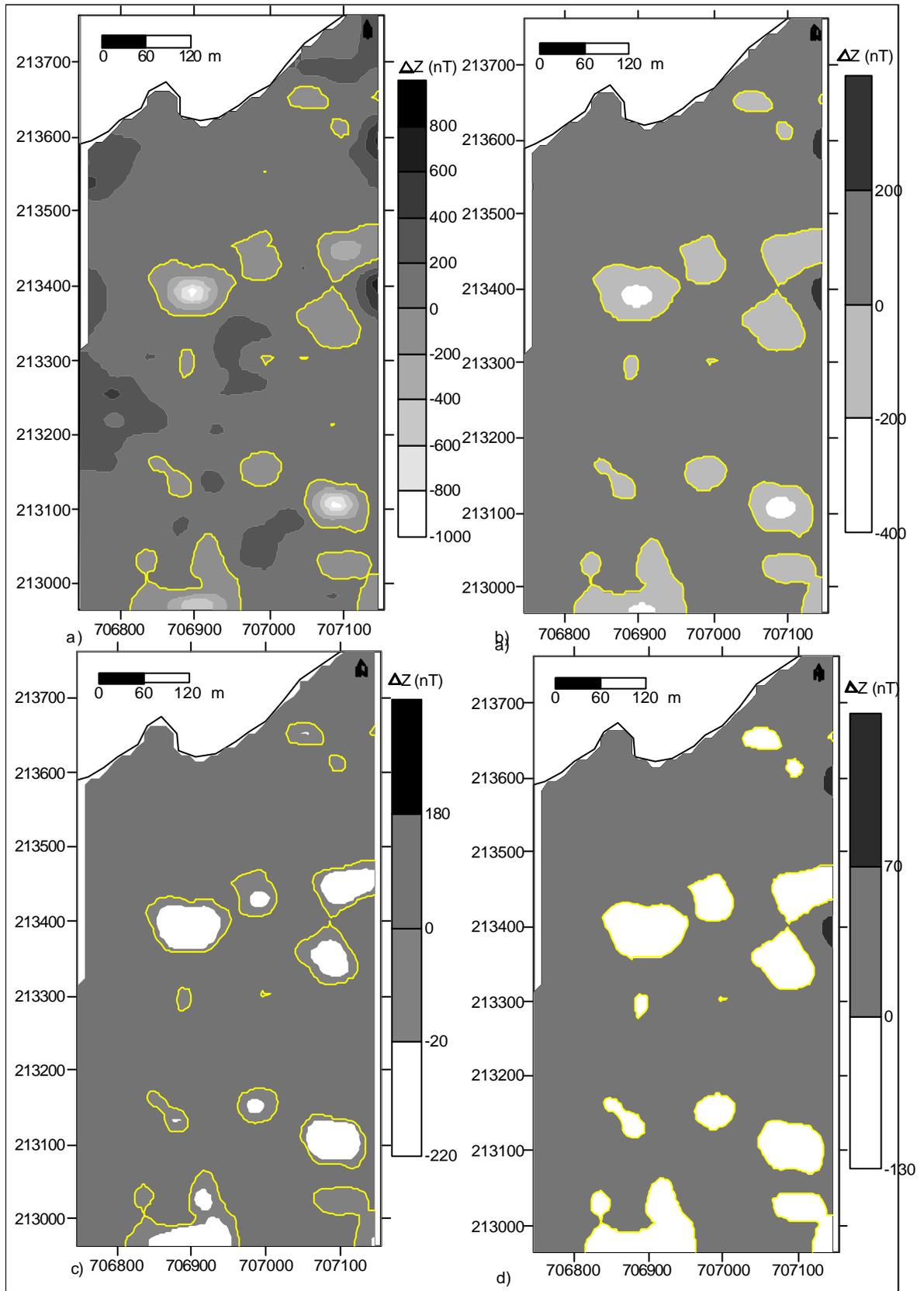


Figura 38. CAA del mapa de ΔZ del sector Cayo Guam.
 a) $h= 10$ m; b) $h= 20$ m; c) $h= 30$ m; d) $h= 40$ m.

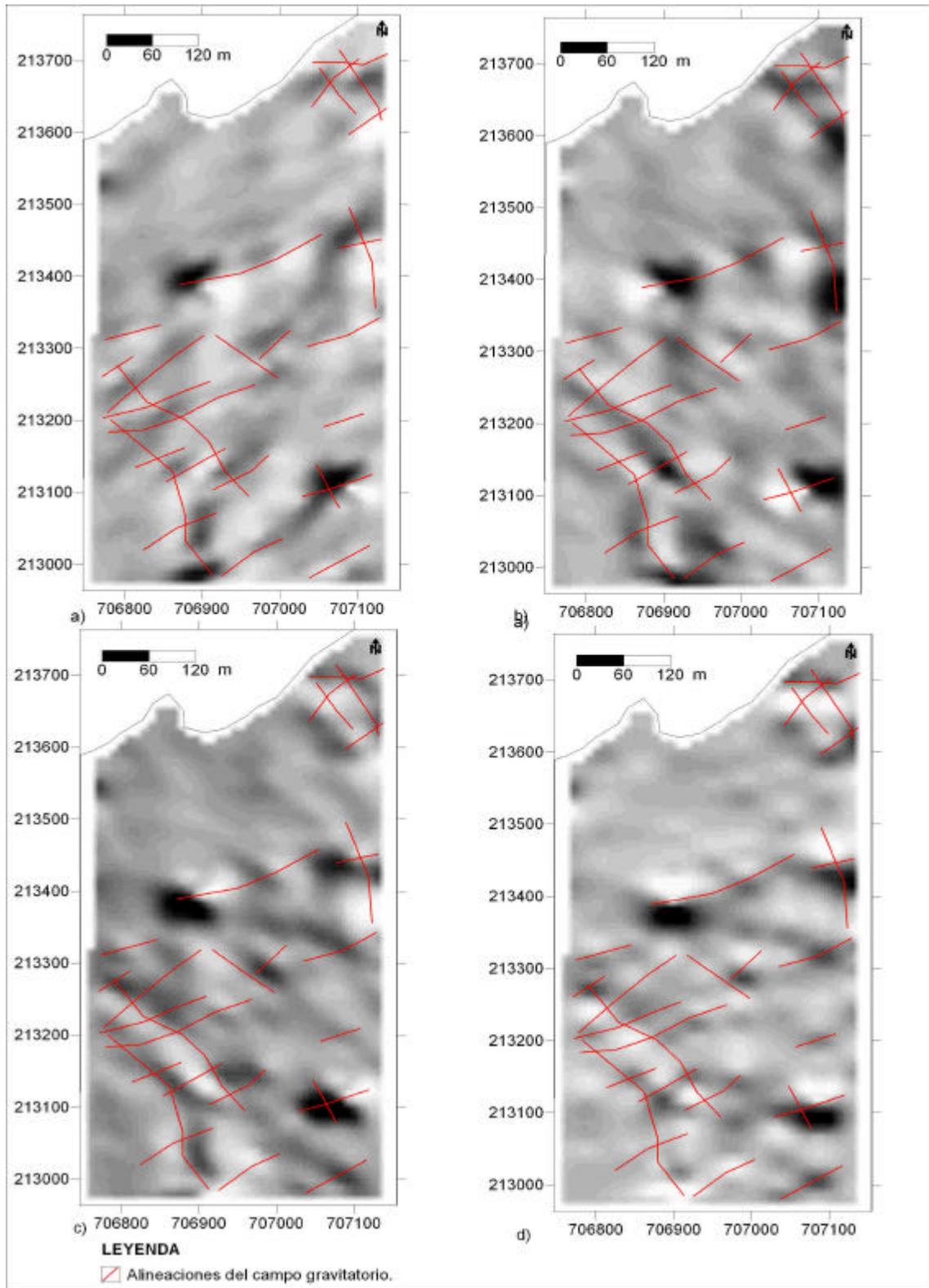


Figura 39. Mapa de relieve de la CAA de ΔZ del sector Cayo Guam.
 a) $h= 10$ m; b) $h= 20$ m; c) $h= 30$ m; d) $h= 40$ m.

Del análisis de los mapas de CAA calculados a los 10, 20, 30 y 40 m (Figura 38), se observa el comportamiento en la profundidad de las rocas que se desarrollan en este

sector. A los 10 m de recalculo algunas de las pequeñas anomalías negativas han desaparecido, y prácticamente todas las positivas, quedando solamente la tendencia general del campo, con la excepción de dos áreas muy limitadas al este, donde deben localizarse las mayores profundidades de las rocas ultrabásicas serpentinizadas (Batista, 2002). Esto se hace más evidente en la CAA a los 20 m. La mayoría de las zonas anómalas negativas continúan manifestándose a los 40 m de recálculo, indicando que las rocas con bajo grado de magnetización, causantes de este comportamiento, se extienden a profundidades superiores a los 40 m.

Una parte de las alineaciones señaladas en los mapas de gradientes, que pueden constituir el reflejo de zonas de fallas, continúan observándose en los mapas de CAA (Figura 39), indicando su carácter relativamente profundo. Por otro lado, el resto de las posibles fallas que no se relacionan con alineaciones en los mapas de CAA, ponen de manifiesto su carácter somero.

Estos aspectos señalados poseen una gran importancia durante las investigaciones medioambientales, por el hecho de conocer la distribución bajo el subsuelo las características estructurales, es decir, forma de los cuerpos, extensión lateral y en profundidad, así como la presencia y caracterización en superficie y profundidad de las zonas de fallas.

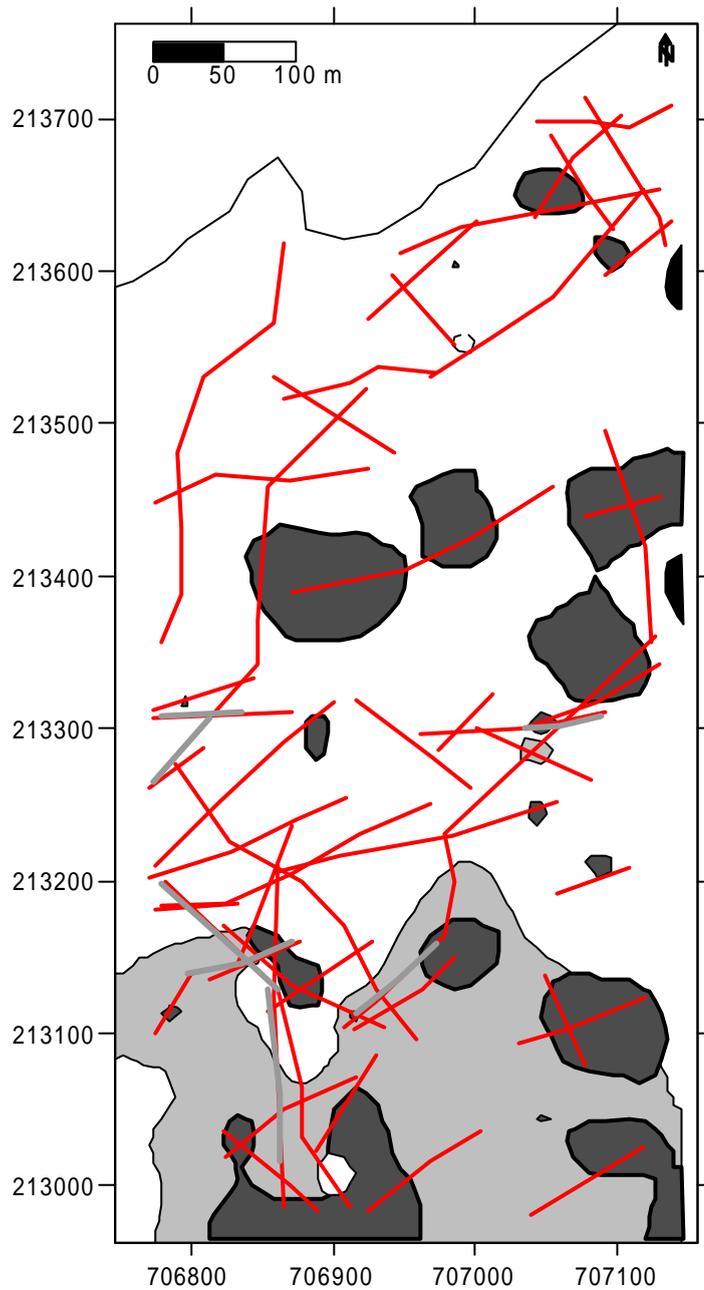
De la interpretación del levantamiento magnético se concluye que con ayuda del comportamiento del campo magnético se infiere la distribución tanto en la superficie como en la profundidad de las rocas que conforman el sector. Se proponen nuevas zonas donde deben predominar tanto en la superficie como en la profundidad, rocas de bajo grado de magnetización, o las zonas donde las rocas serpentinizadas que afloran presentan un adelgazamiento de sus espesores. Además se ubican las zonas de mayores profundidades de las rocas serpentinizadas. También se proponen posibles nuevas zonas de fallas y aportando elementos sobre su ubicación, forma, dirección, extensión lateral y en la profundidad, así como de su carácter somero o profundo, aspectos imprescindibles en las investigaciones medioambientales.

Análisis combinado del levantamiento gravimétrico y magnético

Del análisis combinado de los levantamientos magnético y gravimétrico se conoce que solo algunas de las posibles zonas de fallas propuestas por ambos métodos están relacionadas, denotando que los procesos que dan lugar a la aparición de la mayoría de

estas zonas de fallas, solo se reflejan en uno de estos campos físicos y no en los dos a la vez. Solo en aquellas zonas donde se observan coincidencia en ambos campos físicos, se puede plantear la existencia de procesos de serpentinización durante el cual ocurre una disminución de la densidad y un aumento de la susceptibilidad magnética (Logachev y Zajarov, 1986).

Ambos métodos muestran diferentes zonas donde las rocas se extienden a mayores profundidades, evidenciando que a la misma profundidad es posible que se diferencien por su grado de metamorfismo (serpentinización), lo cual provoca que en las zonas señaladas como de mayores profundidades de las rocas serpentinizadas según ΔZ , se caractericen por poseer en profundidad mayor grado de serpentinización, el cual provoca un aumento considerable del campo magnético y una disminución del gravitatorio, según se aprecia en los mapas de ambos campos físicos (Figura 32 y 36). Hacia el sur, donde aumentan los valores de Δg el campo magnético presenta solo algunas zonas anómalas indicando un menor grado de serpentinización, lo que conlleva a mayores densidades en estas rocas (Logachev y Zajarov, 1986). Este comportamiento de ambos campos físicos también apoya la idea de la extensión a grandes profundidades de cuerpos de gabros que no afloran, ya que este tipo de rocas poseen las mayores densidades dentro del territorio investigado.



LEYENDA

-  Zonas de mayor profundidad según Δg .
-  Zonas de mayor profundidad según ΔZ .
-  Afloramientos de rocas pocos magnéticas.
-  Zonas de mayor profundidad de las rocas poco magnéticas
-  Alineaciones de Δg y ΔZ .
-  Zonas de gran desarrollo de serpentinización.

Figura 40. Esquema de interpretación geólogo-geofísico del sector Cayo Guam.

En la figura 40 se recogen los principales aspectos señalados durante la interpretación de ambos levantamientos geofísicos.

Del análisis combinado se concluye que solo en algunas de las posibles zonas de fallas propuestas se desarrollan procesos que se reflejan en los dos campos físicos, como es el caso de la serpentización. Esto permite proponer diferentes estructuras disyuntivas desde dos puntos de vista distintos. Al comparar los mapas de CAA de ambos levantamientos se tiene idea sobre la distribución en la profundidad de las rocas con diferentes grados de serpentización.

Significado de los resultados de las principales investigaciones geofísicas para las investigaciones medioambientales en la región nororiental de Cuba

El hecho de ubicar y caracterizar posibles estructuras tectónicas disyuntivas, con los métodos geofísicos utilizados en diversas investigaciones llevadas a cabo en la región nororiental de Cuba, adquiere gran importancia durante la realización de trabajos de ingeniería geológica con el fin de realizar construcciones, incluyendo además la evaluación del impacto ambiental de las obras civiles y de infraestructura que existan. También posee gran importancia durante la caracterización y prevención de toda clase de riesgos geológicos (sismos, erosión, deslizamiento, avalanchas, fallamientos, etc.), que permiten predecir posibles desastres que puedan ocurrir en zonas con gran infraestructura civil e industrial.

El mayor aporte de estos métodos geofísicos está en la ubicación de muchas zonas de fallas que afectan las rocas que se encuentran por debajo de la cubierta sedimentaria o de otros tipos de rocas, lo cual impide que tales estructuras sean detectadas durante los trabajos de levantamiento geológicos. A esto se le suma que es posible inferir su forma y las profundidades desde donde comienzan a manifestarse y hasta donde terminan. También a diferencia de otras investigaciones geológicas, la geofísica permite obtener una visión areal de la distribución de las zonas de debilidades tectónicas, de las rocas duras, alteradas y combinado con esto sus espesores y distribución en la profundidad. Estos elementos permiten planificar las investigaciones medioambientales, con la cual se decide donde se deben ubicar las construcciones y con qué características deben

realizarse desde el punto de vista técnico, para evitar la destrucción de las mismas por acción del medio geológico.

Conclusiones

De la reinterpretación de los datos aeromagnéticos y magnéticos terrestres de la región nororiental de Cuba, se aportan nuevos elementos al conocimiento estructural de la región, apoyando significativamente los futuros trabajos medioambientales, ya que con el comportamiento de este campo físico es posible inferir las variaciones de los espesores de las rocas presentes en el área, así como del basamento de aquellas que afloran, y la extensión lateral de las rocas ultrabásicas serpentinizadas, y en ocasiones de los gabros, por debajo de las cubiertas que afloran. También en este campo físico se refleja la tectónica de la región, se proponen nuevas zonas de fallas, y se justifican la existencia de algunas declaradas como supuestas en trabajos geológicos anteriores. Con ayuda del análisis de la CAA se evidencia que la mayoría de las alineaciones del campo magnético se manifiestan desde la superficie hasta aproximadamente 4 Km. de profundidad, afectando los diferentes tipos de rocas reportados en la región. También se muestran nuevas alineaciones que sugieren la existencia de posibles estructuras sin reflejos en superficie, lo cual no permite su identificación en los trabajos geológicos y geomorfológicos.

A partir del comportamiento del campo eléctrico en los sectores Majayara y Rancho Yagua es posible inferir al grado de heterogeneidad en las características geológicas superficiales, así como del grado de alteración de las rocas que afloran.

De la interpretación de los datos gravimétricos, magnéticos y eléctricos en los sectores analizados se proponen nuevas posibles zonas de fallas y aportando elementos sobre su ubicación, forma, dirección, extensión lateral y en la profundidad, así como de su carácter somero o profundo, aspectos imprescindibles en las investigaciones medioambientales. Tales posibles zonas de fallas, requieren otras investigaciones geológicas y medioambientales, que corroboren su existencia.

De la combinación de los campos eléctricos y magnéticos se valoran los procesos que han dado lugar al comportamiento de estos campos físicos en las posibles zonas de fallas. También se establece el carácter somero o profundo de esas supuestas estructuras disyuntivas, aspecto muy importante en futuras investigaciones en el territorio.

Del análisis combinado de los datos gravimétricos y magnéticos se concluye que solo en algunas de las posibles zonas de fallas propuestas se desarrollan procesos que se reflejan en los dos campos físicos, como es el caso de la serpentinización. Esto permite proponer diferentes estructuras disyuntivas desde dos puntos de vista distinto. Al comparar los mapas de CAA de ambos levantamientos se tiene idea sobre la distribución en la profundidad de las rocas con diferentes grado de serpentinización.

La profundización el conocimiento estructural de esta región permite apoyar y planificar con mayor eficiencia los trabajos medioambientales que se realicen en este territorio, sobre todos aquellos dirigidos a la planificación de la construcción de obras civiles e industriales, la caracterización de riesgos geológicos y a la valoración del impacto ambiental de la infraestructura existente.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Con la revisión, análisis y reinterpretación de las principales investigaciones geofísicas realizadas en la región nororiental de Cuba se concluye que:

1. Los métodos geofísicos aéreos y terrestres contribuyen significativamente al conocimiento estructural de esta región, aportando nuevos elementos sobre las características geológicas y estructurales en los diferentes sectores analizados, lo cual permite orientar y apoyar las futuras investigaciones medioambientales que se realicen en el territorio.
2. Con los datos magnéticos y gravimétricos se infieren las variaciones de los espesores de las rocas presentes en el área, así como del basamento de aquellas que afloran, y la extensión lateral de las rocas ultrabásicas serpentinizadas, y en ocasiones de los gabros, por debajo de las cubiertas que afloran.
3. Se señalan alineaciones en los campos físicos, que constituir el reflejo de nuevas zonas de fallas, así como sus ubicaciones, direcciones, formas, extensión lateral y en profundidad, y su carácter somero o profundo, aspectos imprescindibles en las investigaciones geotécnicas y medioambientales. También se valoran los procesos que han tenido lugar en las zonas de fallas.
4. A partir del comportamiento del campo eléctrico se establecen las variaciones en las heterogeneidades geológicas superficiales, así como del grado de alteración de las rocas que afloran.
5. Los Sistemas de Información Geográfica creados con los datos geológicos y geofísicos utilizados en este trabajo sirven de base a futuras investigaciones que se desarrollan en la región nororiental de Cuba.

RECOMENDACIONES

Después de concluida la investigación se recomienda:

1. Utilizar los resultados de esta investigación en futuros trabajos medioambientales que se realicen en el territorio.
2. Aplicar otros métodos geofísicos en la región que corroboren los resultados obtenidos y aporten nuevos elementos a considerar desde el punto de vista geológico.
3. Realizar trabajos geológicos de campo que corroboren los resultados obtenidos.

Extender este tipo de trabajo, capaz de aportar nuevos elementos geológicos y estructurales a otras regiones del país.

BIBLIOGRAFÍA

- Adamovich A.; Chejovich, V.D. 1964. Principales características de la geología y de los minerales útiles de la región nordeste de la provincia de Oriente. *Revista Tecnológica*, Vol. 2, p. 14-20.
- Albear, J.; Boyanov, I.; Brezsnianszky, K.; Cabrera, R.; Chejovich, V.; Echevarría, B.; Flores, R.; Formell, F.; Franco, G.; Haydutov, I.; Iturralde-Vinent, M.; Kantchev, I.; Kartashov, I.; Kostadinov, V.; Millán, G.; Myczynski, R.; Nagy, E.; Oro, J.; Peñalver, L.; Piotrowska, K.; Pszczolkowski, A.; Radoczj, J.; Rudnicki, J.; Somin, M.L. 1988. Mapa geológico de Cuba. Escala 1:250 000.
- Alva-Valdivia, J.M.; Dunlop, D.J.; Urrutia-Fucugauchi, J. 1997. Rock magnetic properties of iron ores and host rocks from the Peña Colorada mining district, western Mexico. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 37, No. 2, p. 55-66.
- Andó, J.; Kozák, M.; Ríos, Y. 1989. Caracterización general de la asociación ofiolítica de la zona Holguín-Moa y el papel de las ofiolitas en el desarrollo estructural de Cuba. *Minería y Geología*, Vol. 1, p. 15-33.
- Barrios, F.; Avila, A. 1983. Características geológicas y mineralógicas de las geoestructuras circulares de Cuba oriental. Trabajo de diploma. *Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa*, 136 p.
- Batista, J. 1998. Características geológicas y estructurales de la región de Moa a partir de la interpretación del levantamiento aeromagnético 1:50 000. Tesis de Maestría (No publicada). *Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa*, 79 p.
- Batista, J. 2002. Nuevas regularidades geológicas de la región Mayarí-Sagua-Moa a partir de la reinterpretación del levantamiento aerogeofísico 1:50 000. Tesis doctoral (No publicada). *Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa*, 115 p.
- Batista, J. 2000c. Metodología para la recuperación de la matriz digital de las observaciones de un levantamiento geofísico. *Minería y Geología*, Vol. 17, No. 2, p. 23-26.
- Batista, J.; Rodríguez, A. 2000. Particularidades geológicas del complejo ofiolítico de Moa a partir de los datos aeromagnéticos 1:50 000. *Minería y Geología*, Vol. 17, No. 1, p. 17-25.
- Bassay, M.; Moreira, A.; Jost, H.; Roberto, P.; Adolfo, R.; Affonso, J.; De Amorin, A.; Cardoso, A.; Durante, A.L.; Rodríguez, M.V.; Mota, M.; Macedo, P.; Moreira, B.E.; De Oliveira, M. 2001. Aplicação de dados aerogeofísicos no mapeamento geológico

- do limite entre os terrenos arqueanos e proterozóicos da região de crixás-cedrolina, goiás. *Revista Brasileira de Geociencias*, Vol. 31, No. 3, p. 279-286.
- Best, M.E.; Abercrombie, H.J.; Peirce, J.W. 1998. Faulting patterns in the Athabasca area of Alberta using high-resolution aeromagnetic data. *Canadian. Journal of Exploration Geophysics*, Vol. 34, No. 1&2.
- Billings, S y D. FitzGerald. An Integrated Framework for Interpolating Airborne Geophysical Data with Special Reference to Radiometrics. <http://www.aseg.org.au/conference/Hobart1998/Default.htm>. 10-5-2001.
- Blakely, R. J., and Simpson, R. W. 1986. Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies: *Geophysics*, Vol. 51, p. 1494-1498.
- Blanco, J.L. 1999. Profundización en el estudio geológico y tectónico de Moa. Tesis de maestría (No publicada). *Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa*, 72 p.
- Bremer, M.H. El Papel de los Métodos Geofísicos en Evaluaciones Ambientales de Sitios Contaminados. <http://uninet.mty.itesm.mx/investigacion/geofisica/geof1.htm>. 23-01-2004.
- Broome, H.J. 1990. Generation and interpretation of geophysical images with examples from the Rae Province, northwestern Canada Shield. *Geophysics*, Vol. 55, No. 8, p. 977-997.
- Bronnikov, A.; Budnitsky, V. 1969. Informe sobre trabajos de búsqueda y exploración orientativa para Asbestos-Crisotilo en la región del yacimiento Majayara y Rancho Yagua (no publicado). *Oficina Nacional de Recursos Minerales*.
- Burns, I.E.; Winkler, G.R. 1994. Interpretation of the aeromagnetic map of the Anchorage quadrangle, Alaska. *Report of Investigations 94-5, Department of natural resources division of geological & geophysical surveys*, 25 p.
- Campos, M. 1983. Rasgos principales de la tectónica de la porción oriental de Holguín y Guantánamo. *Minería y Geología*, Vol. 2, p. 51-76.
- Campos, M.; Hernández, M. 1987. Acerca de la posible correlación de las metavulcanitas de la Sierra del Purial con las rocas de la asociación ofiolítica. *Minería y Geología*, Vol. 5, No. 2, p. 23-30.
- Castillo-García, L. Estudios sociales, tecnológicos y científicos noviembre de 1991. Sumario de los resultados. http://www.hemerodigital.unam.mx/ANUIES/ipn/estudios_sociales/proyecto1/c_tierra/sec_5.html. 23-01-2004.

- Castillo, L.R. 1980. Algunas particularidades petrofísicas de Cuna oriental. Tesis de diploma. *Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa*, 81 p.
- Chang, J.L.; Corbea, L.; Prieto, F.; Hernández, J.; Brito, G. 1991. Informe sobre los resultados del levantamiento aerogeofísico complejo en el territorio de las provincias Guantánamo y Holguín, Sector Guantánamo sur (No publicado). *Oficina Nacional de Recursos Minerales*. 260 p.
- Chang, J.L.; Gribnirov, G.; Brodoboï, A. 1990. Informe sobre resultados del levantamiento aerogeofísico complejo en el territorio de las provincias de Santiago de Cuba, Holguín, Granma y Guantánamo, Sector Pinares de Mayarí (No publicado). *Oficina Nacional de Recursos Minerales*. 314 p.
- Charchabal, R. 2003. Reinterpretación de los datos geofísicos del extremo suroeste del macizo ofiolítico Moa-Baracoa. *Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa*, 62 p.
- Chernicoff, C.J.; Zapata, M.C. 1998. Estudio preliminar de interpretación geológica del levantamiento aeromagnético del área Las Petas, república de Bolivia. En: *X Congreso Latinoamericano de Geología y VI Congreso Nacional de geología económica. Simposio: Geofísica aérea y geoquímica en la prospección geológica-minera*, p. 81-85.
- Clark, D.A. 1997. Magnetic petrophysics and magnetic petrology: aids geological interpretation of magnetic surveys. *AGSO J. Aust. Geol. Geophys.*, Vol. 17, No. 2, p. 83-104.
- Cobiella, J.L. 1978a. Estratigrafía y paleogeografía del Paleógeno de Cuba oriental. Tesis doctoral (No publicada). Centro de Información. *Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa*, 210 p.
- Cobiella, J.L. 1978b. Un melange en Cuba oriental. *La Minería en Cuba*, Vol. 4, No. 4, p. 4-51.
- Cobiella, J.L. 1988. El vulcanismo paleogénico cubano. Apuntes para un nuevo enfoque. *Revista Tecnológica*, Vol. 18, No. 4, p. 25-32.
- Cobiella, J.L. 1997. Zonación estructuro facial del corte Paleoceno Eoceno Medio de Cuba. *Minería y Geología*, Vol. 14, No. 1, p. 3-12.
- Cobiella, J.L. 2000. Jurassic and Cretaceous geological history of Cuba. *International Geology Review*, Vol. 42, p. 594-616.
- Cordell, L.; Knepper, D.H. 1987. Aeromagnetic images: Fresh insight to the buried basement, Rolla quadrangle, southeast Missouri. *Geophysics*, Vol. 52, p. 218-231.

- Duval, J.S. 1977. High sensitivity gamma-ray spectrometric - state of the art and trial application of factor analysis. *Geophysics*, Vol. 42, No. 3, p. 549-559.
- Ellwood, B.B.; Crick, R.E.; El Hassani, A.; Benoist, S.L.; Young, R.H. 2000. The magnetosusceptibility event and cyclostratigraphy (MSEC) method applied to marine rocks: Detrital input versus carbonate productivity. *Geology*, Vol. 28, p. 1135-1138.
- Ellwood, B.B.; Crick, R.E.; Fernandez, J.L.; Soto, F.M.; Truyóls-Massoni, M.; El Hassani, A.; Kovas, E.J. 2001. Global correlation using magnetic susceptibility data from Lower Devonian rocks. *Geology*, Vol. 29, No. 7, p. 583-586.
- Fabian, B.; Fonseca, F.J. 2003. Condicionamento estrutural-magnético do embasamento da Bacia Bauru no noroeste do estado do Paraná: implicações hidrogeológicas. En: *Eighth International Congress of The Brazilian Geophysical Society*, p. 1-6.
- Fonseca, E.; Zelepugin, V.N.; Heredia, M. 1985. Structure of the ophiolite association of Cuba. *Geotectonic*, Vol. 19, p. 321-329.
- Fonseca, E.; Sladkevich, V.; Santa-Cruz, M.; Morales, A.; Rodríguez, R.; Capote, C.; Navarrete, M.; García, I. 1992. Geología de los yacimientos cromíticos con evaluación pronóstico. *Informe final tema 401-12*. Unidad Minera Punta Gorda, Moa, Cuba.
- García, J.L. 1999. Interpretación del vuelo magnético y radiométrico de la faja pirítica en las hojas A E. 1/25 000, No. 959-I Villanueva de las Cruces y 960-II Berrocal. *Boletín Geológico y Minero*, Vol. 10, No. 3, p. 31-47.
- García, I.; Fonseca, E. 1994. La mineralización cromítica y su relación con las cloritas en el yacimiento Amores. *Minería y Geología*, Vol. 11, p. 50-54.
- García, A.; Blanco, I.; Torta, J.M.; Socías, I. High-resolution aeromagnetic survey of the Teide volcano (Canary Islands): a preliminary analysis. <http://io.ingrm.it/amminist/annali/torta402.htm>. 23-04-2004.
- Ghidella, M.E.; Köhn, J.; Gianibelli, J.C.; Kostadinoff, J.; Chernikoff, C.J. 2002. Compilación digital de datos magnéticos en argentina. En: *XXI Reunión Científica AAGG Rosario (Argentina)*, p. 231-235.
- Ghidella, M.E.; LaBrecque, J.L.; Rodríguez, G.A. 1998. Los movimientos de la península Antártica en el mesozoico. En: *X Congreso Latinoamericano de Geología y VI Congreso Nacional de geología económica. Simposio: Geofísica aérea y geoquímica en la prospección geológica-minera*, p. 59-79.

- Gibert, R.O.; Herero, N.; Gimenez, M.E.; Martínez, P.; Casas, A. 2002. Caracterización geofísica del valle de matagusanos. San Juan. Argentina. En: XXI Reunión Científica AAGG Rosario (Argentina), 241-246. <http://fiselect2.fceia.unr.edu.ar/geodesia/CD/GRAVIMETRIA/GR01-O.pdf>.
- Givler, R.W. y R.E. Wells. Shaded-Relief and Color Shaded-Relief Maps of the Willamette Valley, Oregon. <http://geopubs.wr.usgs.gov/open-file/of01-294>. 26-11-2001.
- Grauch, V.J.S. 2002. High-Resolution Aeromagnetic Survey to Image Shallow Faults, Dixie Valley Geothermal Field, Nevada. *Open-File Report 02-384. U.S. Geological Survey, MS 964, Federal Center, Denver CO 80225*, 13 p.
- Grauch, V.J.S.; Cordell, L. 1987. Limitations of determining density or magnetic boundaries from the horizontal gradient of gravity or pseudogravity data: *Geophysics*, Vol. 52, p. 118-21.
- Griem, W.; Griem-Klee, S. Métodos geofísicos II. [http://plata.uda.cl/minas/apuntes/Geologia/geologiageneral/ggcap01e.htm# Gravimetria](http://plata.uda.cl/minas/apuntes/Geologia/geologiageneral/ggcap01e.htm#Gravimetria) . 23-04-2004..
- Guild, P.W. 1947. Petrology and structure of the Moa Chromite Distric, Oriente province, Cuba. *Amer. Geophys. Union*, Vol. 28: p. 218-246.
- Gumiel, P.; Campos. R. Transpresión en el segmento norte de la Zona de Cizalla de Badajoz-Córdoba y su influencia en la localización de las estructuras con mineralizaciones de oro del área de La Codosera. <http://www.agex.org/agex80102.html>. 23-01-2004.
- Gunn, P.J.; Mackey, T.; Meixner, T.J. 1998. Magnetic, radiometric and gravity signatures of localities of epithermal gold deposits in Fiji. En: *X Congreso Latinoamericano de Geología y VI Congreso Nacional de geología económica. Simposio: Geofísica aérea y geoquímica en la prospección geológica-minera*, p. 43-51.
- Gyarmati, P.; Leyé O'Conor, J. 1990. Informe final sobre los trabajos de levantamiento geológico en escala 1:50 000 y búsqueda acompañante en el polígono CAME V, Guantánamo. *Oficina Nacional de Recursos Minerales*. 360 p.
- Gyarmati, P.; Méndez, I; Lay, M. 1997. Caracterización de las rocas del arco de islas Cretácico en la Zona Estructuro-Facial Nipe-Cristal-Baracoa. En: G. F. Furrázola, K.

- E. Núñez-Cambra (eds.). *Estudios sobre Geología de Cuba, Ciudad de la Habana, Instituto de Geología y Paleontología*, p. 357-364.
- Hassan, H.H.; Peirce, J.W.; Pearson, W.C.; Pearson, J.M. 1998. Cultural editing of HRAM data comparison of techniques. *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, Vol. 34, No. 1&2, p. 16-22.
- Hegmann, M. Gravity and Magnetic Surveys Over the Santa Rita Fault System, Southeastern Arizona. U.S. Geological Survey. Open-File Report 01-503. <http://geopubs.wr.usgs.gov/open-file/of01-503/>. 06-11-01. 107 p.
- Hernández, M. 1979. Datos preliminares sobre las características petrográficas de las rocas del macizo Sierra del Purial. *La Minería en Cuba*, Vol. 5, No. 2, p. 2-6.
- Hernández, M. 1987. Algunas particularidades petroquímicas de las metavulcanitas del complejo metamórfico de la Sierra del Purial. *Minería y Geología*, Vol. 5, No. 2, p. 31-47.
- Hernández, H.A. 1978. Petrofísica. Editorial Pueblo y Educación. 333 p.
- Hood, P. J.; Holroyd, M. T.; McGrath, P. H. 1979. Magnetic methods applied to base metal exploration. in Hood, P. J., Ed., *Geophysics and geochemistry in the search for metallic ores: Geol. Surv. Can. Econ. Geol. Rep.*, Vol. 31, p. 527-544.
- Hood, P.J.; Teskey, D.J. 1989. Aeromagnetic gradiometer program of the Geological survey of Canada. *Geophysics*, No. 54, p. 1012-1022.
- Horn, B. K. P.; Bachman, B. L. 1978. Using synthetic images to register real images with surface models. *Comm. of the ACM*, Vol. 21, p. 914-924.
- Ishihara, S. 1990. The inner zone batholith vs. the outer zone batholith of Japan: evaluation from their magnetic susceptibilities. In: *University Museum Tokyo, nature and culture*. Vol. 2, p. 21-34.
- Iturralde-Vinent, M.A. 1972. Principales características de la estratigrafía del Oligoceno y mioceno inferior de Cuba. *Revista Tecnológica*, Vol. 10, No. 3-4, p. 24-36.
- Iturralde-Vinent, M.A. 1976. Estratigrafía de la zona Calabazas-Achotal, Mayarí Arriba. Oriente. *La Minería en Cuba*, Vol. 5, p. 9-23.
- Iturralde-Vinent, M.A. 1989. Role of ophiolites in the geological constitution of Cuba. *Geotectonics*, Vol. 4, p. 63-74.
- Iturralde-Vinent, M.A. 1994. Cuba Geology: a new plate-tectonic synthesis. *Journal of Petroleum Geology*, Vol. 17, p. 39-70.

- Iturralde-Vinent, M.A. 1995. El segmento cubano del arco volcánico paleoceno-eoceno medio del Caribe. *In Transaction of the 3rd Geological Conference of the Geological Society of T&T* (Ali, A.; y Young, P.V.; Editor), p. 343-362.
- Iturralde-Vinent, M.A. 1996a. Geología de las ofiolitas de Cuba. *In Ofiolitas y arcos volcánicos de Cuba. IGCP project 364. Special contribution*(Iturralde-Vinent, M. ; Editor). No. 1, p. 83-120.
- Iturralde-Vinent, M.A. 1996b. Introduction to Cuban Geology and Tectonics. *In Ofiolitas y arcos volcánicos de Cuba. IGCP project 364. Special contribution* (Iturralde-Vinent, M., Editor). No. 1, p. 3-35.
- Iturralde-Vinent, M.A. 1996c. Cuba: el arco de islas volcánicas del Cretácico. *In Ofiolitas y arcos volcánicos de Cuba. IGCP project 364. Special contribution* (Iturralde-Vinent, M., Editor). No. 1, p. 179-189.
- Iturralde-Vinent, M.A. 1998. Sinopsis de la constitución geológica de Cuba. *Acta Geológica Hispana*, Vol. 33, Nos. 1-4, p. 9-56.
- Karlsen, T.A.; Olesen, O. 1996. Airborne geophysical prospecting for ultramafite associated talc, Altermark, northern Norway. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 35, No. 4, p. 215-236.
- Keer, A.C.; Iturralde-Vinent, M.; Saunders, A.D.; Babbs, T.L.; Tarney, J. 1999. A new plate tectonic model of the Caribbean: implications from a geochemical reconnaissance of Cuba Mesozoic volcanic rocks. *GSA Bulletin*, Vol. 111, p. 1581-1599.
- Knipper, A.; Cabrera, R. 1974. Tectónica y geología histórica de la zona de articulación entre el mio y el eugeosinclinal de Cuba y del cinturón hiperbasáltico de Cuba. En: *Contribución a la geología de Cuba, Academia de Ciencias de Cuba*, p. 15-77.
- Kolomenski, N.V. 1984. Metodología general de investigaciones ingeniero –geológicas. Editorial Pueblo y Educación. Cuba. 412 p.
- Kowalik, W.S.; Glenn, W.E. 1987. Image processing of aeromagnetic data and integration with Lansat images for improved structural interpretation. *Geophysics*, Vol. 52, p. 875-884.

- Larduet, Y. 1991. Reevaluación del cálculo de reservas de Asbestos-Crisotilo en el Yacimiento Majayara. Tesis de diploma (no publicada). *Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa*, 53 p.
- Linares, E.; Osadchiy, P.G.; Dovbnia, A.V.; Gil, S.; García, D.; García, L.; Zuazo, A.; González, R.; Bello, V.; Brito, A.; Bush, W.A.; Cabrera, M.; Capote, M.; Cobiella, J.L.; Díaz de Villalvilla, L.; Eguipko, O.I.; Evdokimov, V.B.; Fonseca, E.; Furrázola, G.; Hernández, J.; Judoley, C.M.; Kordakov, J.A.; Markovsky, B.A.; Norman, A.; Pérez, M.; Peñalver, L.; Tijomirov, I.N.; Trofimov, V.A.; Vtulochkin, A.L.; Vergara, F.; Zagoskin, A.M.; Zelepuguin, V.N. 1988. Mapa geológico de la República de Cuba. Escala 1:500 000.
- Linden, A.H.; Akerblom, G. 1976. Method of detecting small or indistinct radiometric sources by airborne gamma-ray spectrometry, In: *Jones, M.J. ed. Geology, Mining and Extractive Processing of Uranium. London, Inst. of Mining and Metallurgy*, p. 113-120.
- Liuby, L.I. 1983. Informe sobre los resultados del levantamiento aerogeofísico complejo realizado en el territorio de las provincias de Holguín y Guantánamo. *Oficina Nacional de Recursos Minerales*.
- Logachev, A.A.; Zajarov, V.P. 1978. Exploración Magnética. Editorial Reverté, S.A. Barcelona. 346 p.
- Mamani, M.; Castiglione, B.; Buk, E.; Degiuseppe, O. Determinación del espesor sedimentario en la cuenca al este de la ciudad de la Rioja. <http://www.copa.org.ar/geodecaAplicada.htm#12> . 23-01-2004.
- Marcotte, D.L.; Hardwick, C.D; Lemeux, J.; O'Connell, M.; Reford , M. 1990. Aeromagnetic gradiometry methods: A study using real data: 60th Ann. Internat. Mtg., *Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstract* , p. 584-586.
- Marcotte, D.L.; Hardwick, C.D.; Nelson J.B. 1992. Automated interpretation of horizontal magnetic gradient profile data. *Geophysics*, Vo. 57, p. 288-295.
- Millán, G. 1996. Metamorfitas de la Asociación Ofiolítica de Cuba. In *Ofiolitas y arcos volcánicos de Cuba. IGCP Project 364. Special Contribution* (Iturralde-Vinent, M.A.; Editor), No. 1, p. 131-153.

- Millán, G.; Somin, M.L.; Díaz, C. 1985. Nuevos datos sobre la geología del macizo Sierra del Purial, de Cuba Oriental. *Memorias Acad. Cienc. URSS.*, Vol. 283, No. 6, p. 1442-1446.
- Mironov, V.S. 1977. Curso de Prospección Gravimétrica. Editorial Reverté, S.A. Barcelona. 525 p.
- Murashko, V.I.; Lavandero, R.M. 1989. Chromite in the hyperbasite belt of Cuba. *International Geology Review*, Vol. 31, p. 90-99.
- Nagy, E.; Brezsnyszky, K.; Brito, A.; Coutin, D.P.; Formell, F.; Franco, G.L.; Gyarmati, P.; Jakus, P.; Radocz, G.Y. 1976. Texto explicativo del mapa geológico de la provincia de Oriente a escala 1:250 000. *Academia de Ciencias de Cuba*.
- Nagy, E.; Brezsnyszky, K.; Brito, A.; Coutin, D.P.; Formell, F.; Franco, G.L.; Gyarmati, P.; Jakus, P.; Radocz, G.Y. 1983. Contribución a la geología de Cuba oriental. La Habana, Editorial Científico Técnica, 273 p.
- Nash, C.R. 1998. Lithostructural interpretation of imaged shallow-source aeromagnetic data. En: X Congreso Latinoamericano de Geología y VI Congreso Nacional de geología económica. Simposio: Geofísica aérea y geoquímica en la prospección geológica-minera, p. 87-111.
- Navarrete, M.; Rodríguez, R. 1991. Generalización petrológica del corte ofiolítico de los yacimientos de Pinares de Mayarí, Canadá y Luz Norte, Macizo Mayarí-Nícaro. *Minería y Geología*, Vol. 8: p. 3-10.
- Nabighian, M.N. 1984. Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transform -Fundamental relations. *Geophysics*, Vol. 49, p. 780-786.
- Nekrasov, G.YE.; Oro, J.; Sokolov, S.D.; Flores, R.; Shavyrina, M.V. 1989. Ophiolites of Eastern Cuba. *Geotectonic*, Vol. 23, p. 60-71.
- Oguchi, T.N.; Ishida, R.N. 2002. Determination of Subsurface Structure of Tottori Plain Using Microtremors and Gravity Anomaly. *Journal of Natural Disaster Science*, Vol. 24, No. 1, p. 1-13.
- Orellana, E. 1972. Prospección Geoeléctrica en corriente continua. Tomo I. Editorial Parainfo. Barcelona. 523 p.
- Paz, S. 1984. Geología para ingenieros. Tomo II. Editorial Pueblo y educación. Cuba. 637 p.

- Pearson, A.W.C. 1996. Removing culture from southern Texas – a magnetic cleanup and image revolution. *Expanded Abstracts with Biographies, SEG International Exposition and 66th Ann. Mtg., Denver*, p. 1407-1410.
- Pederson, L.B. 1989. Relations between horizontal and vertical gradients of potential fields. *Geophysics*, No. 54, p. 662-663.
- Pereira, L.A.; Gonzalez, M.; Luis, V. 1996. O gráben de cananéia. *Revista Brasileira de Geociencias*, Vol. 26, No. 3, p. 139-150.
- Proenza F.J. 1997. Mineralización de cromita en la faja ofiolítica Mayarí-Baracoa (Cuba): Ejemplo del yacimiento Mercedita. Tesis Doctoral. (No publicada). *Universidad de Barcelona*, 227 p.
- Proenza, J. ; Carralero, N.M. 1994. Un nuevo enfoque sobre la geología de la parte sur de la cuenca de Sagua de Tánamo. *Minería y Geología*, Vol. 11, p. 3-10.
- Proenza, J.; Melgarejo, J.C. 1998. Una introducción a la metalogenia de Cuba bajo la perspectiva de la tectónica de placas. *Acta Geológica Hispánica*, Vol. 33, No. 1-4, p. 89-131.
- Proenza, J.A.; Melgarejo, J.C.; Gervilla, F.; Lavaut, W.; Revé, D.; Rodríguez, G. 1998b. Cromititas podiformes en la Faja Ofiolítica Mayarí-Baracoa (Cuba). *In Geología y Metalogenia de Cuba: Una Introducción* (Melgarejo, J.C.; Proenza, J.A.; Editors). *Acta Geológica Hispánica*, Vol. 33, Nos. 1-4, p. 153-177.
- Proenza, J.; Gervilla, F.; Melgarejo, J.C.; Bodinier, J.L. 1999a. Al- and Cr-rich chromitites from the Mayarí-Baracoa ophiolitic belt (Eastern Cuba): Consequence of interaction between volatile-rich melts and peridotites in suprasubduction mantle. *Economic Geology*, Vol. 94, p. 547-566.
- Proenza, J.; Gervilla, F.; Melgarejo, J.C. 1999b. La Moho Transition Zone en el Macizo Ofiolítico Moa-Baracoa: un ejemplo de interacción magma/peridotita. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, Vol. 12, Nos. 3-4, p. 309-327.
- Proenza, J.; Melgarejo, J.C.; Gervilla, F.; Solé, J. 1999c. Los niveles de gabros bandeados en el macizo ofiolítico Moa-Baracoa (Cuba). Gabros característicos de cumulos de ofiolitas de zonas de suprasubducción. *Minería y Geología*, Vol. 16, No. 2, p. 5-12.
- Proenza, J., Gervilla, F., Melgarejo, J.C. 2000a. Los depósitos de cromita de la faja ofiolítica Mayarí-Baracoa (Cuba oriental): un resultado de procesos de zona de suprasubducción. Implicaciones en la prospección de cromititas. En: *Tercera*

conferencia internacional sobre geología de Cuba, el Golfo de México y el Caribe Noroccidental.

- Proenza, J., Melgarejo, J.C., Gervilla, F. 2000b. La faja ofiolítica Mayarí-Baracoa (Cuba oriental): una litosfera oceánica modificada en una zona de suprasubducción cretácica. En: *Tercera Conferencia Internacional sobre Geología de Cuba, el Golfo de México y el Caribe Noroccidental.*
- Prolov, V.; Glikov, V.; Rebolido, J.; Shedroliubov, S. 1980. Proyecto para la realización de búsqueda de cromitas Cayo Guan. (No publicado). *Oficina Nacional de Recursos Minerales.* 199 p.
- Quintas, F. 1989. Análisis estratigráfico y paleogeografía del Cretácico Superior y del Paleógeno de la provincia Guantánamo y áreas cercanas. Tesis doctoral (No publicada). *Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa,* 161 p.
- Quintas, F. 1996. Bioestratigrafía del corte Meso-Cenozoico del extremo oriental de Cuba. *Minería y Geología,* Vol. 13, No. 1, p. 3-8.
- Quintas, F.; Proenza, J.; Castillo, J.L. 1995. Análisis tectono-sedimentario de la paleocuena Sabaneta. *Minería y Geología,* Vol. 12, p. 3-8.
- Ríos, Y.I.; Cobiella, J.L. 1984. Estudio preliminar del macizo de gabroides Quesigua de las ofiolitas del este de la provincia de Holguín. *Minería y Geología,* Vol. 2, p. 109-132.
- Rodríguez, A. 1998a. Estudio morfotectónico de Moa y áreas adyacentes para la evaluación de riesgo de génesis tectónica. Tesis doctoral (No publicada). *Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa,* 124 p.
- Rodríguez, A. 1998b. Estilo tectónico y geodinámico de la región de Moa. *Minería y Geología,* Vol. 15, No. 2, p. 37-41.
- Rodríguez, R. 2000. Estudio petrológico de las rocas de afinidad ofiolítica portadoras de ilmenita en la zona de Cayo Grande en el macizo Moa-Baracoa. Tesis de Maestría. (No publicada). *Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.* 69 p.
- Rodríguez, J. 1982. Estructura geológica profunda de Cuba oriental en base a datos geofísicos. Tesis doctoral (No publicada). *Instituto de Minas de Leningrado.* 246 p.
- Rodríguez-Miranda, W.R. 1998. Nueva metodología para la interpretación de campos potenciales y aerospectrométricos durante la cartografía geológica. Tesis Doctoral. (No publicada). *Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.* 110 p.

- Ruiz, F.; Introcaso, A.; Uliarte, E. 2002. Evidencias gravi-magnetométricas de rocas máficas en el oeste de nevados del famatina. En: *XXI Reunión Científica AAGG Rosario (Argentina)*, p. 191-195.
- Seigel, H. 1989. New Horizons in Mining Geophysics. *Proceedings of Exploration '87, Ontario Geological Survey, Special. Vol 3*, p. 93-104.
- Smith, R. P.; Grauch, V.J.S.; Blackwell, D.D. 2002. Preliminary Results of a High-Resolution Aeromagnetic Survey to Identify Buried Faults at Dixie Valley, Nevada. *Geothermal Resources Council Transactions*, v. 26, p. 543-546.
- Torres, M. 1987. Característica de la asociación ofiolítica de la región norte de Moa-Baracoa y su relación con el arco volcánico Cretácico. Trabajo de Diploma. *Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa*, 161 p.
- Thayer, T.P. 1942. Chrome resources of Cuba. *U.S. Geological Survey Bulletin*, 93-A: p. 1-74.
- Ussami, N.; Kolisnyk, A.; Raposo, M.; Ferreira, F.J.F.; Molina, E.C.; Ernesto, M. 1991. detectabilidade magnética de diques do arco de ponta grossa: um estudo integrado de magnetometria terrestre/aérea e magnetismo de rocha. *Revista Brasileira de Geociencias*, Vol. 21, No. 4, p. 317-327.
- Zaigham, N.A.; Mallick, K.A. 1992. Upward continuation filtering of Uthal gravity data: *Acta Mineralogica Pakistanica, Balochistan University Journal*, No. 6, p.149-158.
- Zaigham, N.A.; Mallick, K.A. 1994. Subsurface continuation of the ophiolites in the Bela Plain of Balochistan, Pakistan: *Ofioliti*, Vol. 19, p. 269-278.
- Zaigham, N.A.; Mallick, K.A. 2000. Bela ophiolite zone of southern Pakistan: Tectonic setting and associated mineral deposits. *GSA Bulletin*, Vol. 112, No. 3, p. 478-489.
- Zamashikov, M.E.; Tobachkov, V. 1971. Informe sobre los resultados de los trabajos de búsqueda a escala 1:50 000 en la parte suroeste del macizo hiperbasítico Moa - Baracoa. *Oficina Nacional de Recursos Minerales*. 243 p.

RELACIÓN DE FIGURAS Y TABLAS

Figuras

Figura 1. Esquema geológico de la región nororiental de Cuba (modificado de Albear y otros, 1988).

Figura 2. Mapa geológico esquemático de Cuba mostrando los afloramientos del cinturón plegado y del neoaútctono (adaptado de Iturralde-Vinent, 1996).

Figura 3. Columna sintética ideal del macizo Mayarí-Cristal, propuesta por Proenza (1997) y Proenza y otros (1998b), reconstruida a partir de datos del propio autor y bibliográficos (Thayer, 1942; Iturralde-Vinent, 1989, 1994, 1996; Fonseca y otros, 1985, 1992; Nekrasov y otros, 1989; Murashko y Lavandero, 1989; Navarrete y Rodríguez, 1991). La dimensión vertical no está a escala.

Figura 4. Columna sintética ideal del macizo ofiolítico Moa-Baracoa, propuesta por Proenza (1997) y Proenza y otros (1998b), reconstruida a partir de datos del propio autor y bibliográficos (Thayer, 1942; Guild, 1947; Ríos y Cobiella, 1984; Iturralde-Vinent, 1989, 1994, 1996; Fonseca y otros, 1985, 1992; Torres, 1987). La dimensión vertical no está a escala.

Figura 5. Esquema tectónico generalizado de la región Mayarí-Sagua-Moa (modificado de Adamovich y Chejovich, 1963; Albear y otros, 1988; Linares y otros, 1988; Gyarmati y Leyé O'Conor, 1990; Rodríguez, 1998a, 1999b).

Figura 6. Mapa geológico del extremo suroeste del macizo ofiolítico de Moa (modificado de Albear y otros, 1988; Gyarmati y Leyé O'Conor, 1990).

Figura 7. Mapa geológico del sector Majayara (modificado de Bronnikov y Budnitsky, 1969).

Figura 8. Mapa geológico del sector Rancho Yagua (modificado de Bronnikov y Budnitsky, 1969).

Figura 9. Mapa de ΔT reducido al polo de la región nororiental de Cuba (Modificado de Batista, 2002).

Figura 10. Mapas de gradientes de ΔT reducido al polo de la región nororiental de Cuba (Modificado de Batista, 2002).

a) Gradiente horizontal en la dirección X; b) Gradiente horizontal en la dirección de Y

c) Gradiente vertical.

Figura 11. Sistemas de fallas de la región nororiental de Cuba según el comportamiento del campo magnético (tomado de Batista, 1998; Batista, 2002; Charchabal, 2003).

Figura 12. Esquema de nuevas alineaciones del campo aeromagnético de la región nororiental de Cuba.

Figura 13. Comportamiento en la profundidad de las alineaciones del campo aeromagnético.

Figura 14. Mapa de isodínamas ΔZ del extremo suroeste del macizo ofiolítico Moa-Baracoa.

Figura 15a. Mapa de gradiente horizontal de ΔZ en la dirección de X del extremo suroeste del macizo ofiolítico Moa-Baracoa.

Figura 15b. Mapa de gradiente horizontal de ΔZ en la dirección de Y del extremo suroeste del macizo ofiolítico Moa-Baracoa.

Figura 15c. Mapa de gradiente vertical de ΔZ del extremo suroeste del macizo ofiolítico Moa-Baracoa.

Figura 16. Esquema de alineaciones del campo magnético del extremo suroeste del macizo ofiolítico Moa-Baracoa.

Figura 17. Comportamiento en profundidad de las alineaciones del campo magnético.

a) $h= 250$ m; b) $h= 500$ m.; c) $h= 750$ m.; d) $h= 1\ 000$ m.; e) $h= 1\ 250$ m.

Figura 18. Mapa de isohoma del sector Majayara.

Figura 19. Mapa de gradientes horizontales del campo eléctrico del sector Majayara.

a) gradiente horizontal en la dirección de X; b) gradiente horizontal en la dirección de Y.

Figura 20. Mapa de ΔZ del sector Majayara.

Figura 21. Mapa de gradientes de relieve sombreados de ΔZ del sector Majayara.

a) gradiente horizontal en la dirección de X; b) gradiente horizontal en la dirección de Y; c) gradiente vertical.

Figura 22a. Continuación Analítica Ascendente a los 20 m de ΔZ del sector Majayara.

Figura 22b. Continuación Analítica Ascendente a los 40 m de ΔZ del sector Majayara.

Figura 23. Mapas de relieve de CAA del sector Majayara.

a) $h= 20$ m; b) $h= 40$ m.

Figura 24. Esquema de interpretación geólogo-geofísico del sector Majayara.

Figura 25. Mapa de isohomas del sector Rancho Yagua

Figura 26. Mapa de gradientes horizontales del campo eléctrico del sector Rancho Yagua.

a) gradiente horizontal en la dirección de X; b) gradiente horizontal en la dirección de Y.

Figura 27. Mapa de Δz del sector Rancho Yagua.

Figura 28. Mapa de relieve sombreados de los gradientes de ΔZ del sector Rancho Yagua.

a) gradiente horizontal en la dirección de X; b) gradiente horizontal en la dirección de Y; c) gradiente horizontal en la dirección de Y; d) gradiente vertical.

Figura 29a. Continuación Analítica Ascendente a los 10 m de ΔZ del sector Rancho Yagua.

Figura 29b. Continuación Analítica Ascendente a los 20 m de ΔZ del sector Rancho Yagua.

Figura 29c. Continuación Analítica Ascendente a los 30 m de ΔZ del sector Rancho Yagua.

Figura 30. Mapa de relieve de la Continuación Analítica Ascendente del sector Rancho Yagua.

a) h= 10 m; b) h= 20 m; c) h= 30 m.

Figura 31. Esquema de interpretación geólogo-geofísico del sector Rancho Yagua.

Figura 32. Mapa de Δg del sector Cayo Guam.

Figura 33. Mapa de relieve sombreados de los gradientes de Δg del sector Cayo Guam.

a) gradiente horizontal en la dirección de X; b) gradiente horizontal en la dirección de Y; c) gradiente vertical.

Figura 34. CAA del mapa de Δg del sector Cayo Guam.

a) h= 10 m; b) h= 20 m; c) h= 30 m; d) h= 40 m.

Figura 35. Mapa de relieve de la CAA de Δg del sector Cayo Guam.

a) h= 10 m; b) h= 20 m; c) h= 30 m; d) h= 40 m.

Figura 36. Mapa de ΔZ del sector Cayo Guam.

Figura 37. Mapa de relieve sombreados de los gradientes de ΔZ del sector Cayo Guam.

a) gradiente horizontal en la dirección de X; b) gradiente horizontal en la dirección de Y.

c) gradiente vertical.

Figura 38. CAA del mapa de ΔZ del sector Cayo Guam.

a) $h= 10$ m; b) $h= 20$ m; $h= 30$ m; $h= 40$ m.

Figura 39. Mapa de relieve de la CAA de ΔZ del sector Cayo Guam.

a) $h= 10$ m; b) $h= 20$ m; $h= 30$ m; $h= 40$ m.

Figura 40. Esquema de interpretación geólogo-geofísico del sector Cayo Guam.

Tablas

Tabla 1. Pozo No. 1 del sector Rancho Yagua (tomado de Bronnikov y Budnitsky, 1969).

Tabla 2. Pozo No. 2 del sector Rancho Yagua (tomado de Bronnikov y Budnitsky, 1969).

Tabla 3. Pozo criollo No. 1 del sector Rancho Yagua (tomado de Bronnikov y Budnitsky, 1969).

Tabla 4. Pozo criollo No. 2 del sector Rancho Yagua (tomado de Bronnikov y Budnitsky, 1969).

Tabla 5. Pozo criollo No. 3 del sector Rancho Yagua (tomado de Bronnikov y Budnitsky, 1969).

Tabla 6. Susceptibilidad magnética ($\mathbf{K} \times 10^{-6}/4\pi \mathbf{SI}$) de los principales tipos de rocas que conforman la región Mayarí-Sagua-Moa (Zamashikov y Tobachkov, 1971; Dzuena y otros, 1974; Castillo, 1980; Rodríguez, 1982; Chang y otros, 1990, 1991; Batista, 2002).

Tabla 7. Densidad ($\mathbf{s} \times 10^3 \mathbf{Kg/m}^3$) de los principales tipos de rocas que conforman el macizo Moa-Baracoa (Zamashikov y Tobachkov, 1971).