

Cartografía geólogo-estructural y litológica a partir de datos geofísicos del área de Rodas-Fomento (Cuba central)

Karla Serrano-Céspedes^{1*}, Manuel E. Pardo-Echarte², Marina B. Vega-Carreño¹

DOI: <http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v41n2-2019005>

Forma de citar: Serrano-Céspedes, K., Pardo-Echarte, M.E., y Vega-Carreño, M.B. (2019). Cartografía geólogo-estructural y litológica a partir de datos geofísicos del área de Rodas-Fomento (Cuba central). *Boletín de Geología*, 41(2), 89-102. DOI: 10.18273/revbol.v41n2-2019005.

RESUMEN

Disímiles han sido los trabajos geológicos que se han realizado en la región de Rodas-Fomento enfocado hacia la prospección de minerales, sin embargo, no se ha realizado la cartografía estructuro-tectónica y litológica a partir del uso de datos geofísicos, a fin de fundamentar los trabajos de reconocimiento propuestos para los sectores más favorables de localizar mineralización. Por tales razones los objetivos de la presente investigación fueron la realización de la cartografía estructuro-tectónica-litológica y geológica de la región a partir de la interpretación integrada de datos geofísicos (gravimétrico, aeromagnético, y de espectrometría gamma aérea). La interpretación de los diferentes canales de espectrometría gamma aérea permitió concluir que: los mayores valores de uranio se observan en formaciones geológicas con altos contenidos de grafito (materia orgánica); todas las rocas metamórficas poseen valores elevados de torio y; los valores mayores de potasio se vinculan a las granodioritas, las brechas magmáticas, así como a las rocas ácidas de la Formación La Bruja correspondiente al Cretácico superior cenomaniense. A partir de la interpretación del mapa ternario y las combinaciones de los radioelementos, se identificaron con mayor precisión las principales unidades litológicas y su naturaleza en el área. Como resultado final, se confeccionó un mapa con la interpretación integrada de todos los datos geofísicos que permitirá realizar la etapa de exploración en los sectores más favorables de localizar mineralización sulfurada de metales base y preciosos (Cu - Pb - Zn ± Au, Ag).

Palabras clave: Cartografía estructuro-tectónica; cartografía litológica; campos potenciales; espectrometría gamma aérea; interpretación integrada.

Geological-structural and lithological cartography from geophysical data of the Rodas-Fomento area in central Cuba

ABSTRACT

The geological works that have been carried out in the Rhodes-Fomento region focused on mineral prospecting have been different, however, the structural-tectonic and lithological cartography has not been realized from the use of geophysical data, in order to substantiate the reconnaissance works proposed for the most favorable sectors to locate mineralization. For these reasons, the objectives of the present investigation were the realization of the structural-tectonic-lithological and geological cartography of the region based on the integrated interpretation of geophysical data (gravimetric, aeromagnetic, and aerial gamma spectrometry). The interpretation of the different channels of aerial gamma spectrometry allowed to conclude that: the highest values of uranium are observed in geological formations with high contents of graphite (organic matter); all metamorphic rocks have high values of thorium and; the highest values of potassium are linked to the granodiorites, the magmatic breaches, as well as to the acid rocks of the La Bruja Formation corresponding to the Cenomanian Upper Cretaceous. From the interpretation of the ternary map and the combinations of radioelements, the main lithological units and their nature in the area were identified with greater precision. As a final result, a map was prepared with the integrated interpretation of all the geophysical data that will make it possible to carry out the exploration stage in the most favorable sectors of locating sulphide mineralization of base and precious metals (Cu - Pb - Zn ± Au, Ag).

Keywords: Structure-tectonic mapping; lithological mapping; potential fields; airborne gamma spectrometry; integrated interpretation.

¹ Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría”, La Habana, Cuba. (*) karlasc@civil.cujae.edu.cu, mvega@civil.cujae.edu.cu

² Centro de Investigaciones del Petróleo, La Habana, Cuba. pardo@ceinpet.cupet.cu

INTRODUCCIÓN

El Arco Volcánico Cretácico (AVC) de la región central de Cuba abarca un área aproximada de 3.515 km² (FIGURA 1). Las secuencias que lo integran constituyen un complejo vulcanógeno y vulcanógeno-sedimentario extendido desde el oeste de Cienfuegos hasta el este de Sancti Spíritus, con edades que van desde el Cretácico inferior haueriviano hasta el Cretácico superior campaniano, según Díaz (1997). Estas secuencias son atravesadas por varios macizos de granitoides que constituyen el eje magmático principal del mencionado arco volcánico. En esta región las principales zonas de mineralización comprenden los depósitos de sulfuros masivos como San Fernando, Antonio, El Sol, Independencia, Boca Toro y dentro de los depósitos de tipo Kuroko prevalece Los Cerros, así como el de Cu-Mo porfídico Arimao. Dentro de los trabajos geofísicos regionales ejecutados en ésta región se destaca el Levantamiento Aerogeofísico Complejo (LAGC) sobre Cuba central realizado por Martinova (1985), el cual cubrió el territorio con levantamientos aeromagnético (campo total) y espectrometría gamma aérea (canales de potasio (K), uranio (U), torio (Th) e integral), todos a escala 1:50 000. Como principales resultados de éstos trabajos regionales se confeccionaron los mapas geológicos y geofísicos correspondientes y se identificaron un conjunto de zonas con grandes perspectivas de presencia de minerales polimetálicos, por lo que se necesita realizar verificación y prospección de estas zonas. Vázquez *et al.* (1993) caracteriza esta área de investigación como zona favorable de prospección de minerales, pero aún son imprecisas las características estructuro-tectónicas y litológicas obtenidas a partir del empleo de los métodos geofísicos, como una herramienta fundamental de la cartografía, para luego de ser confeccionada la misma, realizar los trabajos de reconocimiento en las zonas de posible mineralización sulfurosa de metales base y preciosos (Cu - Pb - Zn ± Au, Ag). Así, se trazaron como objetivos de esta investigación la cartografía estructuro-tectónica-litológica y geológica de la región a partir de la interpretación integrada de datos geofísicos y geológicos.

MATERIALES Y MÉTODOS

En la ejecución de la investigación se utilizaron como principales fuentes de información: los informes geológicos y geofísicos de levantamiento regional, obtenidos en la Oficina Nacional de Recursos Minerales (ONRM); los informes temáticos de investigación, obtenidos en el Instituto de Geología y Paleontología (IGP); las mallas del campo

gravimétrico, aeromagnético y espectrometría gamma aérea (canales: IGT, U, Th y K) a escala 1:50 000, realizado por Mondelo y Sánchez (2011a) y el Mapa Geológico Digital de la República de Cuba a escala 1:100 000 (Colectivo de autores, 2010).

Para la realización del procesamiento e interpretación de datos geofísico-geológicos se utilizó el software de Oasis Montaj (versión 7.0.1), en donde se:

- Creó un proyecto integrador con toda la información geólogo-geofísica del área.
- Sistematizaron y generalizaron, las propiedades físicas de las rocas en el territorio de Cuba Central.
- Procesaron e interpretación de datos geofísicos, en dos escenarios: gravimétrico-aeromagnético y de espectrometría gamma aérea.
- Establecieron criterios e índices geofísicos de cartografía geológica a partir de la interpretación integrada de los datos geólogo-geofísicos.

Método gravimétrico

Según Dobrin y Savit (1988), el método gravimétrico permite identificar con mayor precisión la geología regional, dando mejores resultados en los cinturones plegados, lo que permite realizar la regionalización tectónica, caracterizando grandes elementos estructurales y la búsqueda de grandes estructuras en la cubierta sedimentaria. Los estudios regionales que hacen uso de los levantamientos gravimétricos permiten detallar los principales rasgos tectónicos tales como fallas en donde es probable que se encuentren acumulaciones de minerales.

Método aeromagnético

El levantamiento aeromagnético es útil para la cartografía de extensas regiones, donde las características estructurales pueden ser reveladas a partir de la existencia de horizontes magnéticos, como areniscas ferruginosas y lutitas, tobos y flujos de lava presentes dentro de secuencia sedimentaria (Dobrin y Savit, 1988). En ausencia de sedimentos magnéticos, sus datos pueden proporcionar información sobre la naturaleza y la forma del basamento cristalino. En la magnetometría aérea la capacidad de cartografiar rasgos geológicos se refuerza por la posibilidad de revelar anomalías de poca amplitud. Los cuerpos intrusivos se distinguen directamente sobre la base de las observaciones magnéticas.

Método de espectrometría gamma aérea

Según Hoover *et al.* (1995), la espectrometría de rayos gamma (EG) ofrece una medición directa de la distribución en forma natural de los radioelementos (K, U y Th) que ocurren en la superficie. El K es un constituyente principal de la mayoría de las rocas, mientras que el U y el Th están presentes en cantidades traza, como elementos móviles e inmóviles, respectivamente. Como la concentración de estos radioelementos varía entre los diferentes tipos de rocas, su distribución puede ser utilizada para asignar y distinguir diferentes litologías. El método muestra potencialidad para cartografiar y subdividir rocas ígneas, ácidas y metamórficas. Este método destaca las rocas que poseen cantidades inusuales, o proporciones muy bajas de radioelementos, tales como los complejos ultrabásicos. Sin embargo la EG presenta algunas limitaciones para cartografiar unidades litológicas entre ellos se encuentra:

1. Los contrastes de contenido de radioelementos entre unidades litológicas, permiten determinar los contactos entre las diferentes formaciones geológicas del área de estudio.
2. El grado de exposición del lecho rocoso y la cobertura del suelo. La EG es un método muy superficial, su mejor resolución está asociada a los elementos geológicos en los primeros centímetros del suelo.
3. La distribución relativa de los suelos transportados e *in-situ*. Los tipos de suelos por su granulometría y composición presentan diferente radioactividad en dependencia de su génesis.
4. Tipo de meteorización. Este aspecto está muy ligado al punto anterior, es importante tenerlo en cuenta debido a que en dependencia de la meteorización se modifica la granulometría y la composición química de los suelos.
5. El contenido de humedad del suelo. La humedad del suelo es una de las fuentes de error durante la adquisición. Un aumento en la humedad del suelo del 10% disminuirá el índice de flujo medido por una cantidad casi igual, por lo que deben realizar correcciones.
6. Vegetación. En zonas de mayor vegetación existirá una mayor absorción de la radioactividad proveniente de rocas y suelos por lo que la radiación medida será menor.

Sin embargo, la espectrometría gamma muestra ventajas en comparación con otras técnicas de teledetección, debido a que es una técnica que mide

la radiación electromagnética en la distancia, pero que, a diferencia del procesamiento de las imágenes de satélite, se consigue disminuir el efecto de la vegetación estudiando con mayor detalle los suelos o afloramientos de rocas que constituyen los principales objetos de estudio, en este tipo de investigación.

PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

Conjunto de datos

Los datos gravimétricos, aeromagnéticos, de espectrometría gamma aérea y los parámetros físicos, fueron suministrados por el Instituto de Geología y Paleontología (IGP) y forman parte del sistema de información de la geología (SIGEOL), y formaron parte del proyecto "Estandarización de la información geofísica, SIGEOL" (Castellanos, 2014).

Datos gravimétricos

El mapa gravimétrico a escala 1:50 000 utilizado fue confeccionado sobre la base de los estándares del sistema SIGEOL (IGP), del programa GEODATO (IGP) y de las normas cubanas de representación cartográfica. Las características y propiedades que conforman al mapa son:

- Solo el 7% de todo el universo de datos en el mapa se corresponde a datos digitalizados (mapas de isolinéas georreferenciados desde bases duras). El por ciento restante, equivalente a un 93%, se corresponde con áreas que se sustentan sobre datos en archivos *.XYZ. Dentro del último se incluye un 17% del área con datos georreferenciados y en ficheros XYZ.
- El error medio cuadrático es de $\pm 0,22$ y de $\pm 0,35$ (mGal) para las anomalías de Bouguer.
- Los mapas incluyen los cálculos de las Anomalías de Aire Libre y Bouguer para las densidades de $2,3 \text{ t/m}^3$.
- Todos los datos utilizados están referidos a las redes básicas de 1^{er} y 2^{do} orden (GEOCUBA).
- Los equipos de medición utilizados para la red ordinaria fueron: Sharp, Sharp-CG-2, WORDEN, Lacoste&Romberg y SODIN.
- Datos digitales mallados 250 m x 250 m en escala 1: 50 000.
- La interpolación de los datos para la confección de las mallas se realizó con el procedimiento desarrollado por Briggs (1974) mediante el método de Mínima Curvatura (Rangrid Oasis Montaj).

Transformaciones a los datos gravimétricos

Los datos gravimétricos y magnéticos fueron procesados utilizando la transformada rápida de Fourier para convertirlos al dominio de las frecuencias y así poder aplicar diferentes filtros como el de Butterworth, pasa baja, y transformaciones como la Continuación Analítica Ascendente (CAA) y Descendente (CAD). Para la realización de este procedimiento fue utilizado el menú 1D-FFT del Oasis Montaj de Geosoft.

Se aplicó, además, a modo de comparación con la CAA, el filtro regional/residual gaussiano. El filtro gaussiano es un filtro frecuentemente utilizado en aplicaciones de frecuencias pasa bajas y pasa altas con el objetivo de obtener la componente regional y la residual del campo gravimétrico medido y tiene la expresión matemática siguiente:

$$L(k) = 1 - e^{-\frac{k^2}{2k_0^2}} \quad (1)$$

Donde k_0 es la desviación estándar de la función gaussiana en ciclos/unidades de terreno, 0/1 se elige 0 o 1 para residual o regional, respectivamente.

Datos magnetométricos

Los datos magnéticos utilizados pertenecen al GRID correspondiente a la base de datos BD MAG-IGP/2011 del parámetro ΔT a escala 1:50 000, resultado de la compilación y sistematización, del trabajo realizado por Mondelo y Sánchez (2011a).

- Todas las mallas de la información magnética fueron generadas con Oasis Montaj de GeoSoftMappingSystem. La interpolación de los datos para la confección de las mallas se realizó con el método de Mínima Curvatura (RANGRID).
- El 43,9% de todo el universo de datos en el mapa magnético se corresponde a datos digitalizados (mapas de isolíneas georreferenciados desde bases duras). El por ciento de áreas en las cuáles solo se poseen datos de las mallas es equivalente a un 56,1%, y se corresponde con áreas que se sustentan sobre mallas en archivos magnéticos XYZ.
- La distribución del tipo de datos utilizados en la confección de los mapas de ΔT de toda Cuba se comporta, de forma tal que permite afirmar que el 90,3% del territorio emergido total y que el 92,8% del territorio sin la cayería, que están sustentados por puntos de la malla de la matriz magnética del LAGEM 1: 50 000 de Cuba (250 m x 250 m) y por

puntos de mediciones directas sobre las líneas de vuelo (con $P \approx 33$ m).

Transformaciones a los datos magnéticos

Reducción al polo (RP)

A los datos del mapa aeromagnético representado por el campo observado y corregido por variaciones, menos el campo normal (DT) se le aplicó la transformación de reducción al polo, consiste en transformar los datos magnéticos para recalcular la intensidad del campo total, como si el campo magnético inductor tuviese una inclinación de 90 grados. La aplicación de este procedimiento transforma las anomalías magnéticas dipolares en anomalías monopolares centradas encima de los cuerpos anómalos por lo que el objetivo de su aplicación es simplificar la interpretación de los datos. La reducción al polo asume que todas las rocas en el área investigada han sido magnetizadas por el campo magnético actuante, esto solo es posible en el caso de rocas que no tengan magnetización remanente, es decir que posean sólo una magnetización inducida según Ramos *et al.* (2014).

Datos de espectrometría gamma aérea

Los datos espectrométricos son muy utilizados para la cartografía geológica, por ser la radiometría un método cuya profundidad de estudio es muy superficial.

Los datos utilizados fueron los mapas de isolíneas digitalizados de la intensidad total de radiación gamma (canal integral, IGT) a escala 1:50 000 y de las concentraciones de U, Th y K respectivamente, producto del levantamiento gamma aéreo y magnético (LAGEM) que fueron compilados y sistematizados por Mondelo y Sánchez (2011a).

Las características de estos levantamientos son los mismos de los datos magnéticos. Los perfiles de vuelo fueron de dirección norte-sur generalmente, espaciados 500 m, solo el 26% de los primeros puntos tuvieron un espaciamiento de 250 m sobre sectores de gran detalle a escala 1:25 000. La calidad correspondiente al error medio cuadrático fue: $U(Ra) = \pm 0,4$ ppm, $Th = \pm 1,0$ ppm y $K = \pm 0,15\%$.

A partir de las adquisiciones de los elementos radiactivos (ERA) U, Th y K fue calculado el mapa del canal integral o de la actividad gamma total según la fórmula:

$$I_{\text{Gamma}} \left(\frac{\mu\text{r}}{\text{h}} \right) = 1,505 \times K (\%) + 0,653 \times U (\text{Ra})(\text{ppm}) + 0,287 \times Th(\text{ppm}) \quad (2)$$

Transformaciones a los datos de espectrometría gamma aérea

En esta investigación se calcularon las relaciones K/U, K/Th, Th/U, Th/K, U/Th, U/K, los índices complejos espectrométricos se utilizan según Carrino *et al.* (2007) para el procesamiento de los datos radiométricos, estos son calculados a partir de la relación de los distintos canales con respecto a los restantes. Krzywiec *et al.* (2005) y Dent *et al.* (2013) comprueban la alta utilidad de los índices complejos para la cartografía geológica.

CARACTERÍSTICAS GEÓLOGO-GEOFÍSICAS DEL ÁREA

El área de estudio se encuentra ubicada en la región central de Cuba, y abarca territorios de las provincias Cienfuegos, Villa Clara y Sancti Spíritus. La misma se extiende de oeste a este a lo largo de 75 km (TABLA 1), con un ancho de 31 km, a través de un área de 2.325 km² (FIGURA 1).

TABLA 1. Coordenadas del área de estudio. Proyecciones NAD 27, Cuba-Norte.

Vértice	Coord. X	Coord. Y
1	570000	272000
2	645000	272000
3	645000	241000
4	570000	241000

Dentro de la región se evidencia un corte vulcanógeno y vulcanógeno sedimentario de edad Cretácico Inferior (Hauteriviano) hasta el Cretácico Superior (Campaniano) cubierto por sedimentos sinorogénicos de edad Cretácico Superior (Campaniano-Maastrichtiano) (FIGURA 2). Se evidencia un corte vulcanógeno y vulcanógeno sedimentario cubierto por sedimentos sinorogénicos. En la base se ha propuesto Millán (1997) la presencia del Complejo Anfibolítico Mabujina, compuesto por anfibolitas de aspecto metaporfirítico, anfibolitas esquistosas bandeadas de grano fino y gabro-anfibolitas.

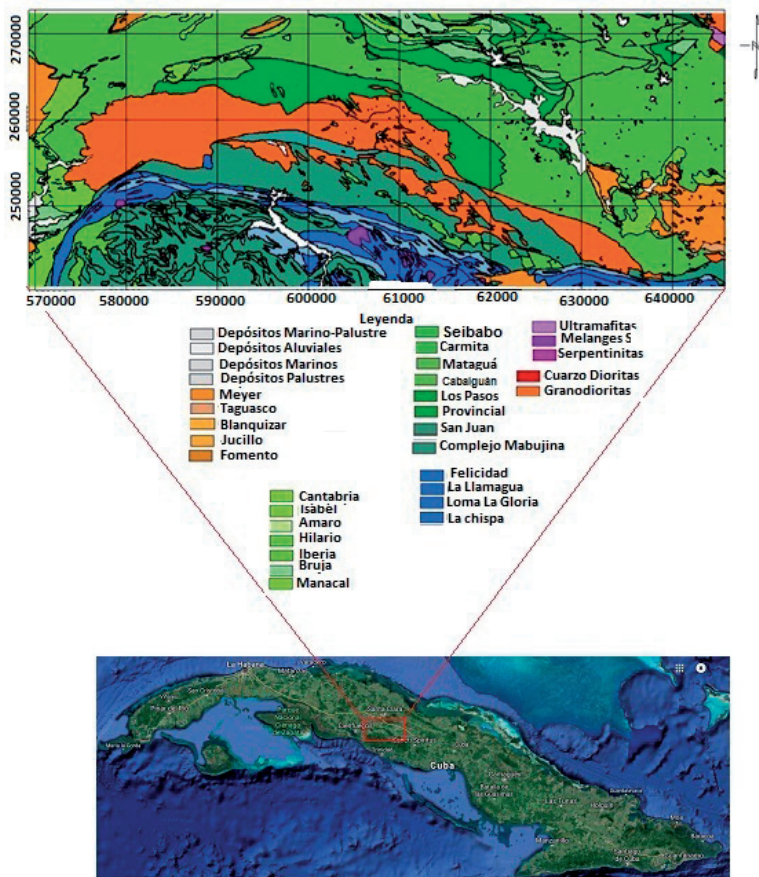


FIGURA 1. Mapa de ubicación geográfica 1:100 000 del área de estudio (tomado de Google Maps) y mapa geológico del área escala 1:100 000 (García, 2000).

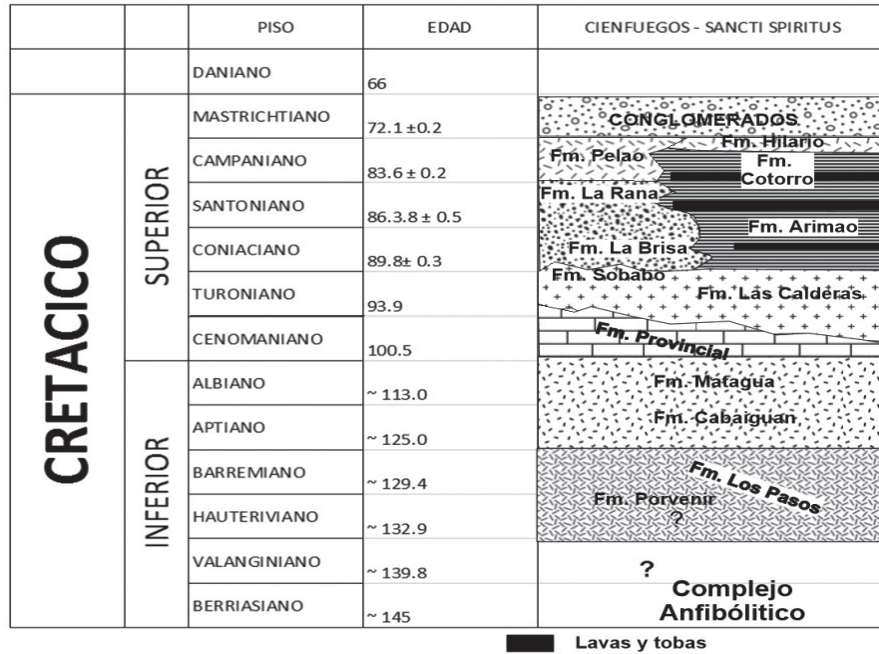


FIGURA 2. Columna estratigráfica, modificada de Iturralde-Vinent y García-Casco (2007).

Tectónica

Dentro de los principales rasgos tectónicos se destacan las fallas presentes en el área como la falla Norte Escambray-Collantes (FIGURA 3), Manicaragua y Báez-Fomento. Otras fallas de interés para esta

investigación son las relacionadas con el contacto tectónico de la Formación Los Pasos con la Formación Matagua aunque se describen otros sistemas más pequeños hacia el interior de la Cúpula Trinidad.

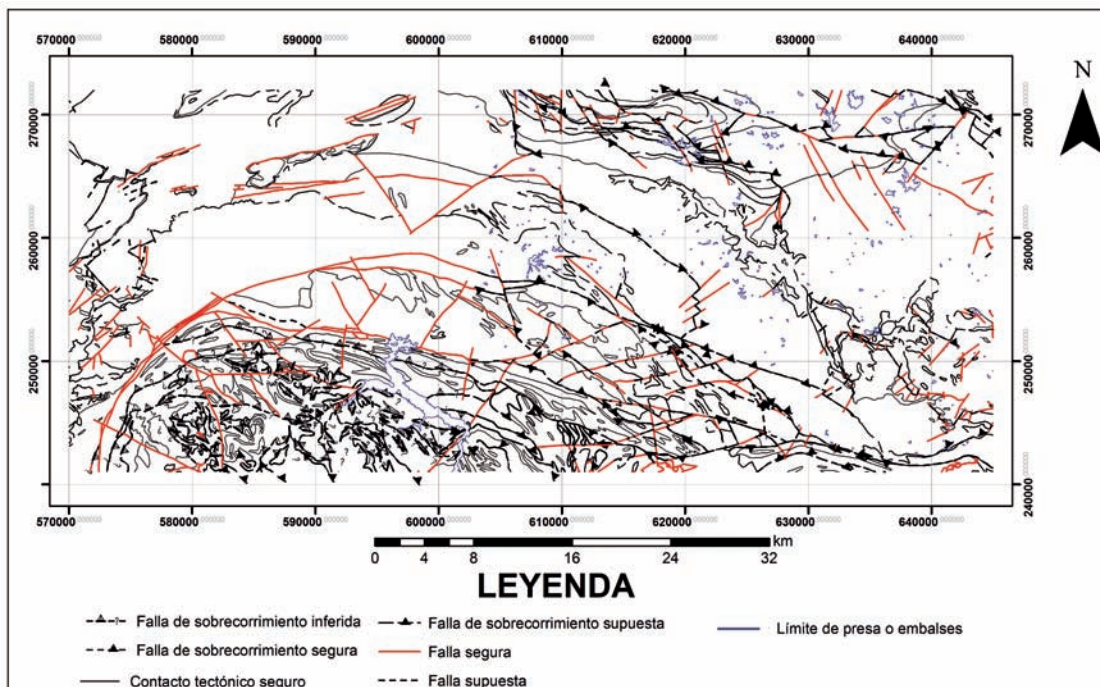


FIGURA 3. Mapa tectónico del área de estudio (IGP, 2014).

Relieve

Guamuhaya es el principal sistema montañoso en la región. Se caracteriza por la presencia de montañas, formando sistemas de bloques y *horst* en mantos de sobrecorrimiento y alturas con las características descritas por Díaz (1997):

- Montañas tectónico - erosivas, de cúpulas con bloques, diseccionadas y ligeramente diseccionadas.
- Montañas bajas tectónico litológicas, carstificadas y diseccionadas.
- Alturas tectónico - erosivas de *horst* diseccionadas.
- Alturas litológico - estructurales y petrogénicas con presencia de cerros monoclinales.

La altitud máxima del sistema montañoso es de 1.156 m, con superficies de cimas con niveles equilibrados entre 600 y 1.000 m. La disección vertical oscila entre 400 y 1.000 m. Otro rasgo muy típico de las alturas que bordean al sistema, es que el límite de la parte montañosa en la mayoría de los casos es brusco y coincide con la falla marginal de dicha zona. En algunas partes meridionales, la falla marginal está cubierta por sedimentos por lo que significa que el primer cambio brusco del relieve se encuentra dentro de la zona de Trinidad. La morfología erosiva en Trinidad está influenciada desde el punto de vista petrogénico por la diversidad de rocas con diferentes propiedades. Debido a la erosión selectiva aparecen expresadas las principales estructuras geológicas. Por la gran extensión de los mármoles en la zona de Trinidad se desarrolló ampliamente el carso, el mayor desarrollo de este se localiza en la sierra de San Juan. El

complejo Anfibolítico forma las premontañas del macizo Guamuhaya. Estas elevaciones petrogénicamente están formadas por anfibolitas masivas y expresan los principales rasgos estructurales de dicha zona.

En el cinturón de granitoides se forman principalmente depresiones erosivas y parcialmente de carácter tectónico. Entre las zonas de Villa Clara y Manicaragua aparecen elevaciones con formas más alargadas, y en Manicaragua las elevaciones más relevantes son las formadas por conglomerados perteneciente a la Formación Jusillo y rocas resistentes pertenecientes a la Formación Tobas.

Propiedades físicas

Las rocas de origen sedimentario y metasedentario representan los valores de menor densidad en el área de investigación, siendo las rocas ígneas intrusivas la de mayor valor densidad (TABLA 2). En cuanto a la susceptibilidad magnética, las rocas que presentaron el mayor valor corresponden a las del Arco Volcánico del Cretácico: Formaciones Las Calderas (basaltos olivínicos, andesito-basalto, diabasas, algunas, tobas básicas y dacítica) y Mataguá (lavas, lava-brechas, tobas de composición andesítica y andesito-basáltica), así como los granitoides que también poseen altos valores de susceptibilidad. Las rocas de menor valor de susceptibilidad magnética con un valor medio de $0,13 \times 10^{-3}$ son las de origen metasedentario como es la metasomatita. Las propiedades físicas analizadas en el trabajo de Vázquez *et al.* (1993) fueron verificadas con las obtenidas por Lilavatti (2000).

TABLA 2. Propiedades físicas (valores medios de la densidad y la susceptibilidad magnética) de las principales unidades geológicas de la región, confeccionada, en base a los trabajos pretéritos (Vázquez *et al.*, 1993).

Roca	Densidad media (t/m ³)	Susceptibilidad media (10 ⁻³) SI
Diques de rocas medias	2,64	0,18
Andesita	2,65	0,15
Lava-andesítica	2,66	1,61
Microdacitas	2,7	0,35
Dacita	2,79	0,18
Metasomatita sin mineralización.	2,8	0,13
Diabasas	2,82	0,14
Basalto	2,9	-
Menas sulfurosas masivas	4,48	0,48
Calizas	2,05	0,243
Tobas	2,13	4,61
Arcilla	2,25	1,3
Granodioritas	2,69	4,19
Gabros	2,81	4,00
Anfibolitas	2,93	2,07
Esquistos grafito-micáceos	2,54	0,61
Esquistos verdes	2,69	0,63
Mármol	2,64	0,71
Cuarcita	2,55	0,43
Serpentinitas	2,00	2,3
Serpentinitas alteradas	2,62	4,81
Serpentinitas masivas	2,65	0,21
Esquistos	2,87	0,47

RESULTADOS

El mapa de anomalías residuales de Bouguer para la CAA de 500 m (FIGURA 4), no guarda una relación estrecha con la geología superficial, sino con las estructuras profundas del área. Cualitativamente se identifica un gran máximo sudeste (Máximo de Fomento) que no está respondiendo a las rocas de las cuencas superpuestas de la Formación Zaza que allí afloran, sino que están reflejando los grandes espesores

de las rocas del arco volcánico que las subyacen. Los valores altos de anomalías de Bouguer (DgB) en el centro sur del área se cartografían las anfibolitas presentes en esta zona. Al noroeste se puede observar otro máximo, vinculado, con importantes espesores de rocas volcánicas, y en el norte un gran mínimo, que está asociado a las rocas del margen continental, que yacen en profundidad (Cinturón de Cabalgamientos Norte Cubano - CCNC). Al Sur, aparece el mínimo asociado a las metamorfitas de la Cúpula de Trinidad.

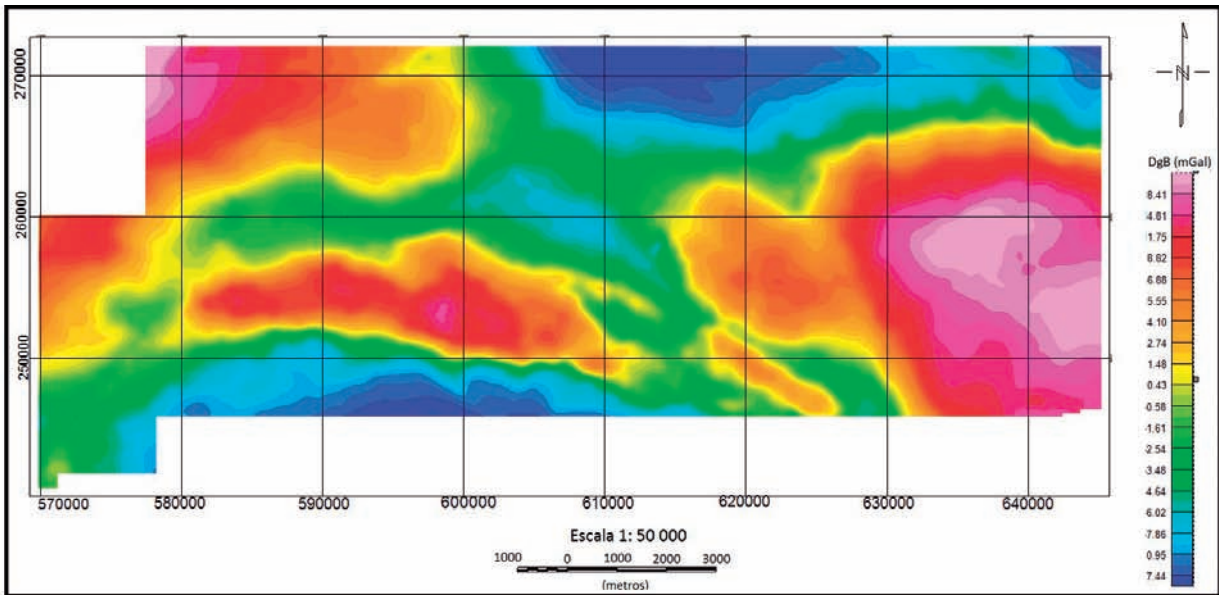


FIGURA 4. Mapa de anomalías residuales de DgB a 5.000 m (Serrano, 2015).

El mapa de la derivada vertical de DgB a 5.000 m (FIGURA 5), desde el punto de vista de la tectónica, el límite este del máximo de Fomento (zona A) se caracteriza por una zona de gradiente de dirección noroeste-sudeste que está relacionada con la falla Báez-Fomento. Se observa, también, que tanto las fallas norte Escambray, Manicaragua como la falla Báez-Fomento se pueden cartografiar fácilmente, permitiendo las dos primeras, determinar el contacto entre los granitoides de Manicaragua y las anfibolitas, así como determinar el contacto de los granitoides y la Cúpula de Trinidad. Se reafirma así el hecho de que los máximos al norte de la Cúpula Trinidad representan las anfibolitas (zona B), permitiendo determinar su extensión e inferir su posible yacencia (al Sur). Los máximos de dirección noroeste-sudeste al norte de la zona están asociados a los basaltos de la Formación Mataguá y Los Pasos (zona D). En la zona C, al noroeste, se observan importantes espesores de la Formación Mataguá.

En el mapa aeromagnético (DT) reducido al polo (FIGURA 6), se aprecia hacia el Norte, una sucesión de máximos y mínimos relacionada con la Formación Bruja, la cual está constituida por tobas, dacitas y andesitas. Hacia el noreste se divisa una secuencia de máximos relacionados con la Formación Cabaiguán, la cual está constituida por tobas y, en algunas ocasiones, por intercalaciones de tufitas, andesitas y dacitas. En el centro con dirección preferencial hacia el norte se encuentra una cadena de mínimos, correspondientes con las rocas de la Formación Provincial constituido por calizas y margas con baja susceptibilidad magnética. Se observa claramente, también, el límite entre las Formaciones Provincial y Mataguá, esta última caracterizada por máximos magnéticos. La aeromagnetometría brinda una indicación precisa del límite norte entre las Formaciones Los Pasos con Mataguá. En sentido general este límite cartografía una falla de sobrecorrimiento en esa posición descrita en el mapa tectónico (IGP, 2014) y en el informe de Mondelo

y Sánchez (2011b) (FIGURAS 3 y 4). Se observa en el centro oeste una cadena de máximos relacionados con los granitoides de Manicaragua. Hacia el centro sur se observan valores disminuidos del campo, correspondientes con las rocas del Complejo Mabujina, caracterizadas por valores medios de la susceptibilidad magnética, por lo que se diferencia claramente el límite entre los granitoides y las anfibolitas. Se observa entre los granitoides y las anfibolitas dos fallas, comprobadas por los recorridos geológicos y por métodos sísmicos, e igual respuesta cartográfica tuvo el sistema de fallas, Norte Escambray-Collantes.

En la zona sur se distinguen los valores negativos de DT correspondiente a las rocas de la Formación Loma la Gloria (esquistos cuarzo grafiticos) y las restantes rocas metasedimentarias de la Cúpula de Trinidad. En esta zona se observa una interrupción del campo con un cambio abrupto de valores negativos a medios y máximos, dado por la intervención de una falla y, del otro lado, la Formación Chispa, constituida por esquistos verdes vulcanogénicos, lo cual explica los valores medios y máximos que se observan del lado este del contacto.

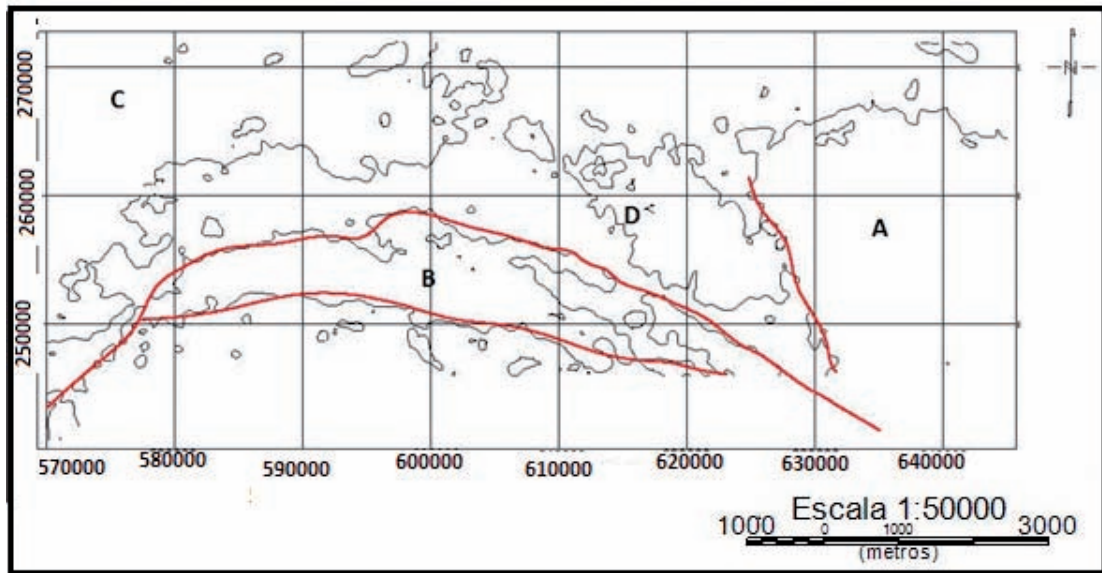


FIGURA 5. Mapa de la derivada vertical de DgB. Las líneas en rojo identifican los contactos tectónicos (Serrano, 2015).

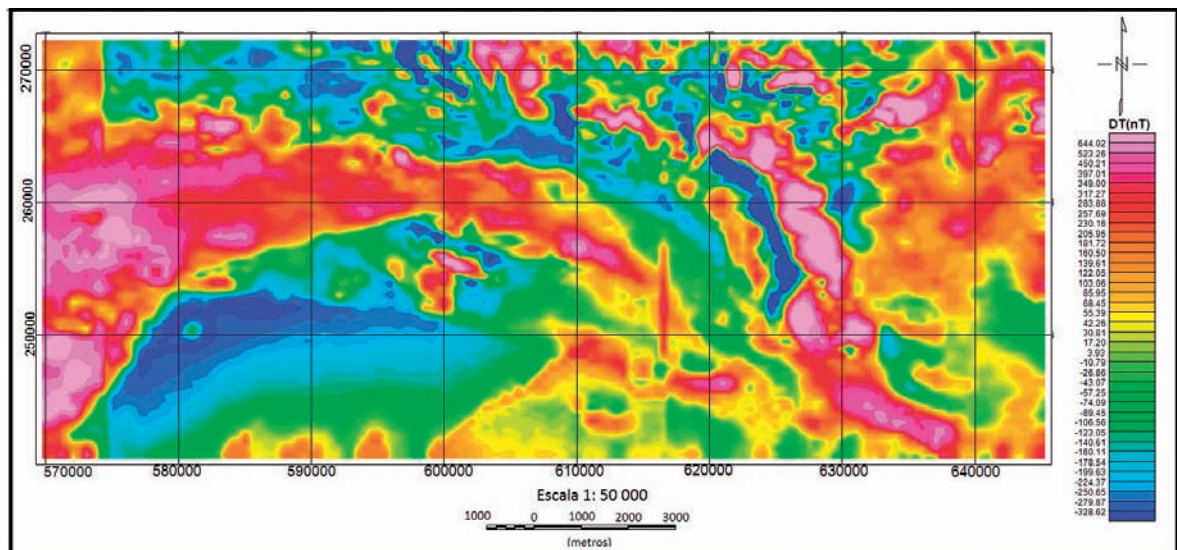


FIGURA 6. Mapa de la reducción al polo del campo aeromagnético DT-rp (Serrano, 2015).

Interpretación integrada de los campos potenciales

Los ejes de las cadenas de anomalías magnéticas y gravimétricas (FIGURA 7) derivadas del procesamiento fueron interpretados como posibles dislocaciones tectónicas. En la misma se marcan varias cadenas de mínimos (azul) y máximos (rojos). Esta interpretación se realizó, fundamentalmente con el apoyo de los mapas de la derivada vertical de los respectivos campos potenciales. Para la magnetometría se marcaron un total de 6 cadenas de mínimos y 11 cadenas de máximos. En cuanto a la gravimetría fueron marcadas 3 cadenas de mínimos y 2 de máximos, lo cual evidencia

una mayor contribución del campo magnético con relación al gravimétrico en la interpretación. Luego se confrontaron estos ejes de cadenas de anomalías con los límites obtenidos derivados de la interpretación del Levantamiento Gamma Aéreo (LAGE), comprobando en muchos casos su correspondencia.

La magnetometría señala un lineamiento de mínimos (azul grueso) muy significativo hacia el centro norte del mapa el cual se verifica con la tectónica, ya que está vinculado con una falla comprobada Norte Escambray-Collantes. Otra importante cadena de mínimos magnéticos se observa en el sur-oeste del mapa, relacionado con el límite tectónico occidental de la Cúpula de Trinidad.

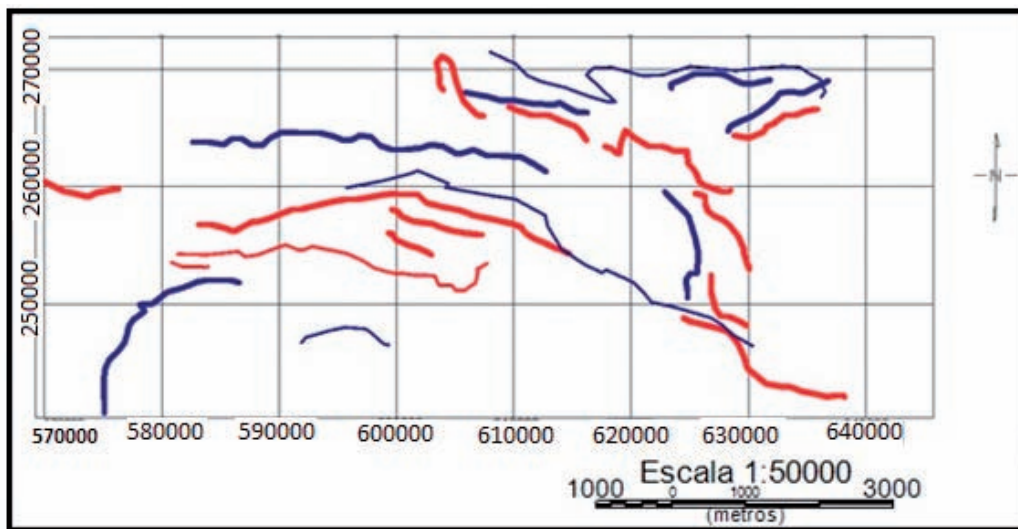


FIGURA 7. Interpretación integrada de campos potenciales. En color rojo, ejes de cadenas de máximos de DT y DgB (grosso y fino, respectivamente). En azul, ejes de cadenas de mínimos de DT y DgB (grosso y fino, respectivamente) (Serrano, 2015).

Interpretación de los datos Aerogammaespectrometría (AGE)

Los principales límites litológicos en el área se observan en el mapa ternario (FIGURA 8), donde se muestra la distribución de los radioelementos. Se aprecia como en la zona sur hay presencia del predominio de contenidos de U están relacionado con las rocas metamórficas con alto contenido de grafito presentes en la Cúpula de Trinidad (Formación San Juan). También se observa, en color blanco, las zonas donde los tres radioelementos se encuentran presentes en proporciones altas, como es en el caso de la Formación Loma la Gloria. En el centro, con

una dirección preferencial Oeste-Este, encontramos los granitoides reflejados por altos contenidos de K (color rosado). En el Norte, se observan los valores deprimidos de los tres canales (color gris oscuro) relacionados con las rocas básico y básico-medias de las Formaciones Los Pasos y Mataguá. En general, se observa como en el área hay menor contenido de Th y más influencia de los contenidos de U y de K. Se debe aclarar que, la cartografía a partir de los radioelementos se comparó con los mapas de las relaciones de estos (FIGURAS 9, 10, 11), los cuales no están afectados por la vegetación y la humedad del suelo.

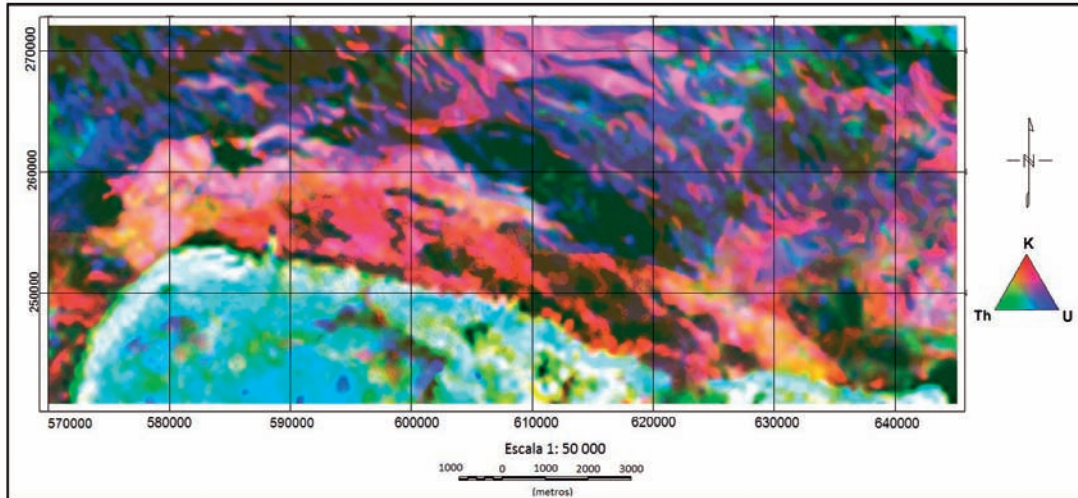


FIGURA 8. Mapa ternario (K, Th, U) (Serrano, 2015).

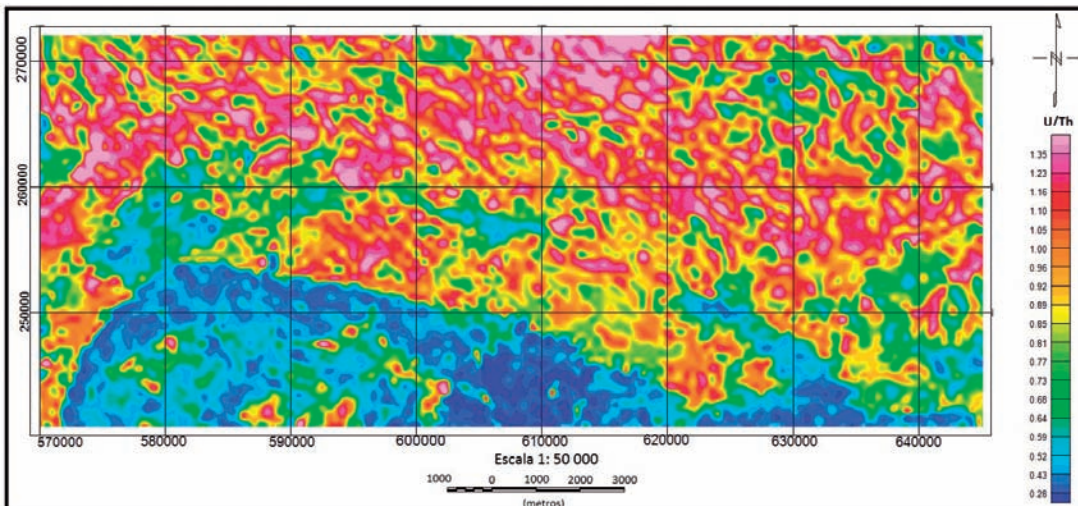


FIGURA 9. Mapa de relaciones de los radioelementos (U vs Th) (Serrano, 2015).

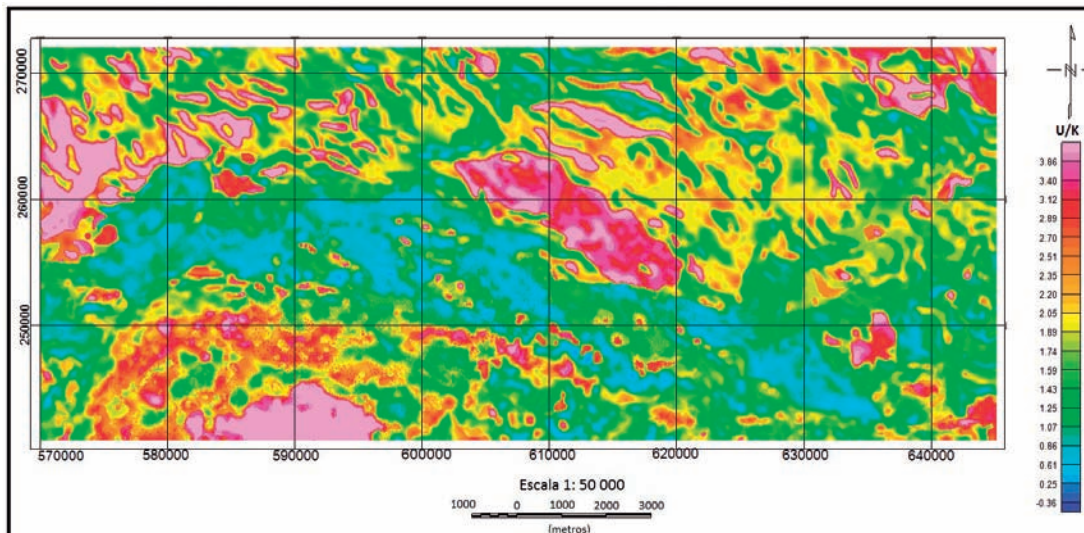


FIGURA 10. Mapa de relaciones de los radioelementos (U vs K) (Serrano, 2015).

En el Norte (FIGURA 12), se destaca la Formación Bruja cartografiada por magnetometría y, fundamentalmente, por la AGE. El límite entre las Formaciones Bruja y Provincial quedó delimitado por anomalías de campos potenciales y AGE. Hacia el Este, la Formación Cabaiguán tuvo la peculiaridad que fue cartografiada por anomalías de mínimos de IGT, pero no en su totalidad, ya que esta formación está constituida por una variedad de rocas básicas y medias, lo que dificultó su delimitación. Con magnetometría se logró establecer los límites de esta formación debido a que la misma está compuesta por rocas de valores altos de susceptibilidad magnética. Otra de las formaciones cartografiadas fue Isabel, constituida por calizas, brechas y areniscas calcáreas, predominando los componentes carbonatados, dando valores mínimos de IGT; pero no se observó ninguna respuesta de los campos potenciales sobre la misma. En el Norte, extendiéndose de noroeste hasta el sureste y formando un arco, se cartografió la Formación Mataguá por campos potenciales; la AGE no brindó una respuesta confiable en esta formación debido a su composición básico-media. El cinturón de granitoides se observan muy bien por los campos potenciales y por la IGT al igual que el Complejo Mabujina. La Formación Loma La Gloria se cartografió por magnetometría e IGT. Toda esta información permitió confeccionar el mapa final de cartografía geológica a partir de datos geofísicos en la región de interés (FIGURA 12).

CONCLUSIONES

A partir de la interpretación de datos geológico-geofísicos, fue posible cartografiar los límites de Cúpula de Trinidad, cinturón anfíbolítico, cinturón de granitoides, secuencias volcánicas y vulcanógeno-sedimentarias del arco volcánico Cretácico, principales estructuras y elementos paleotectónicos de la zona investigada, así como las fallas Báez-Fomento y Norte Escambray-Collantes.

Se pudo diferenciar los límites de las Formaciones Los Pasos, Porvenir, Mataguá, Cabaiguán, Las Calderas, Seibabo, La Bruja; los granitoides y el Complejo Mabujina y los principales complejos litológicos de la zona.

La contribución de los datos geofísicos a la cartografía geológica en la región de estudio satisface la regularidad ya establecida, de que los campos potenciales ayudan, fundamentalmente, al desciframiento estructuro-tectónico del territorio y, en menor medida a la

cartografía litológica de las diferentes unidades presentes; siendo a la inversa la contribución de los datos de espectrometría gamma aérea.

El empleo de los métodos de campos potenciales permitió el desciframiento estructuro-tectónico del territorio, mientras que los datos de espectrometría gamma aérea contribuyeron a la cartografía litológica de las diferentes unidades presentes. El mapa ternario y las relaciones espectrométricas sirvieron de apoyo para la interpretación, mostrando los principales contactos litológicos de la región.

A partir de la interpretación de los campos potenciales se realizó la cartografía estructuro-tectónica del territorio permitiendo cartografiar los principales límites tectónicos (Cúpula de Trinidad, cinturón anfíbolítico, cinturón de granitoides, secuencias volcánicas y vulcanógeno-sedimentarias), así como las fallas Báez-Fomento y Norte Escambray-Collantes.

Predominan en la zona los valores elevados de Th de 7,8 ppm, K con un valor de 2,30% y en menor medida el U con valores 3,01 ppm. Particularmente las rocas metamórficas de la Cúpula de Trinidad se caracterizan por valores de Torio de 7,6 ppm, caracterizándose como una zona de elevado contenido de ese radioelemento.

AGRADECIMIENTOS

A los Dres. Héctor Manuel Fernández Núñez, Ramón González Caraballo profesores del departamento de Geociencias de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica de la Habana (CUJAE). A la Ingeniera Teresa Correa del IGP y a la Ingeniera Claudia Blanco Concepción de CUJAE.

REFERENCIAS

- Briggs, I. (1974). Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*, 39(1), 39-48.
- Carrino, T., De Souza, C., and Leite, E. (2007). Avaliação do uso de dados aerogeofísicos para mapeamento geológico e prospecção mineral em terrenos intemperizados: o exemplo de Serra Leste, província mineral de Carajás. *Revista Brasileira de Geofísica*, 25(3), 307-320. doi: 10.1590/S0102-261X2007000300007.
- Castellanos, E. (2014). Estandarización de la información geofísica. SIGEOL.

- Colectivo de autores. (2010). Mapa geológico digital de la República de Cuba a escala 1:100 000. Informe del Instituto de Geología y Paleontología.
- Dent, D., MacMillan, R.A., Mayr, T.L., Chapman, W.K., and Berch, S.M. (2013). Use of airborne gamma radiometrics to infer soil properties for a forested area in British Columbia, Canada. *Journal of Ecosystems & Management*, 14(1), 1-12.
- Díaz, L. (1997). Caracterización geológica de las formaciones volcánicas y volcano-sedimentarias en Cuba Central, provincias Cienfuegos, Villa Clara y Sancti Spiritus. En: G. Furrázola, K.E. Núñez (eds.). *Estudios sobre geología de Cuba* (pp. 326-335). La Habana: Instituto de Geología y Paleontología.
- Dobrin, A., and Savit, M. (1988). *Introduction to geophysical prospecting*. McGraw-Hill International Editions 4ta ed.
- García, C. (2000). Generalización del mapa geológico de Cuba Central (provincia Cienfuegos, Villa Clara y Sancti Spiritus) a escala 1:100 000. Informe del Instituto de Geología y Paleontología.
- Hoover, D.B., Klain, D.P., and Campbell, D.C. (1995). Geophysical methods in exploration and mineral environmental investigations Consultado el 15 de marzo de 2016. <https://pubs.usgs.gov/of/1995/ofr-95-0831/CHAP3.pdf>.
- IGP. (2014). Mapa tectónico del área de estudio. Informe del Instituto de Geología y Paleontología, pág. 27.
- Iturralde-Vinent, M.A., and García-Casco, A. (2007). Caribeana, a possible solution to a long standing puzzle: the Caribbean latest Cretaceous tectonic events. *Segunda Convención Cubana de Ciencias de la Tierra*. La Habana, Cuba.
- Krzywiec, P., Nawrocki, J., Polechońska, O., and Wróblewska, M. (2005). Geophysical cartography in Poland - An overview. *Przegląd Geologiczny*, 53, 967-972.
- Lilavatti, I. (2000). Estudio de las secuencias magmáticas cretácicas de Cuba Central y su vinculación con la mineralización de oro (Cu, Zn, Pb, Au y Ag). Instituto de Geología y Paleontología, # 2000.
- Martinova, K. (1985). Levantamiento Aerogeofísico Complejo (LAGC) sobre Cuba central. Informe del Instituto de Geología y Paleontología.
- Millán, G. (1997). Geología del macizo metamórfico del Escambray. Informe del Instituto del Instituto de Geología y Paleontología.
- Mondelo, M., y Sánchez, R. (2011a). Mallas del campo gravimétrico, aeromagnético y espectrometría gamma aérea (canales: IGT, U, Th y K) a escala 1:50 000. Informe del Instituto de Geología y Paleontología.
- Mondelo, M., y Sánchez, C. (2011b). Mapas geofísicos regionales de gravimetría, magnetometría, intensidad y espectrometría gamma de la República de Cuba, escalas 1: 2 000 000 hasta 1: 50 000. Instituto de Geología y Paleontología. Nro. TTP 617965.
- Ramos, L.N., Pires, A.C., and Toledo, C. (2014). Airborne gamma-ray spectrometric and magnetic signatures of fazenda nova region, east portion of arenópolis magmatic arc, Goiás. *Revista Brasileira de Geofísica*, 32(1), 123-140. doi: 10.22564/rbgf.v32i1.401.
- Serrano, K. (2015). Cartografía geólogo estructural en la Formación Los Pasos, Cuba, Central. Tesis, Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría”, Cuba.
- Vázquez, B., Prieto, R., y Millán, G. (1993). Levantamiento geológico 1:50 000 y búsqueda Norte Las Villas III. Informe del Instituto de Geología y Paleontología.

Karla Serrano-Céspedes
ORCID: 0000-0002-2960-5287

Manuel E. Pardo-Echarte
ORCID: 0000-0003-0669-4413

Marina B. Vega-Carreño
ORCID: 0000-0001-6745-5382

Trabajo recibido: junio 01 de 2017
Trabajo aceptado: marzo 12 de 2019