

Contribución de los métodos geofísicos a la cartografía geológica 1:50,000 del noroeste de Pinar del Río, Cuba

Contribution of geophysical methods to the geological mapping 1:50,000 of the northwest of Pinar del Río, Cuba

Claudia Guerra Errasti¹, Willy Roberto Rodríguez Miranda², Ramón Guillermo Pérez Vázquez³

¹Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría Calle 114 No 11901 e/ Rotonda y Ciclo Vía, Marianao, La Habana, Cuba, CP 19390, Email: claudiage@civil.cujae.edu.cu

²Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría Calle 114 No 11901 e/ Rotonda y Ciclo Vía, Marianao, La Habana, Cuba, CP 19390, Email: willy@civil.cujae.edu.cu, wrodriguezml955@gmail.com

³Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría Calle 114 No 11901 e/ Rotonda y Ciclo Vía, Marianao, La Habana, Cuba, CP 19390, Email: ramonpv@civil.cujae.edu.cu

*Autor de correspondencia: willy@civil.cujae.edu.cu [wrodriguezml955@gmail.com]

Resumen

La confección del mapa geológico a escala 1:50,000 en la República de Cuba constituye un paso superior en la elevación del conocimiento geológico del país, que sigue a los mapas ya terminados (1:500,000, 1: 250,000 y 1:100,000). En esta ocasión se muestra una contribución de los métodos geofísicos gravimetría, magnetometría y espectrometría gamma durante la cartografía geológica en la hoja 3483-IV del territorio nacional. Se toma como base la respuesta geofísica de las formaciones geológicas existentes en el área, según el Mapa Geológico 1:100,000 suministrado por el Instituto de Geología y Paleontología – Servicio Geológico de Cuba (IGP), lográndose su caracterización a escala 1:50,000. Finalmente, mediante el procesamiento e interpretación integrada de la información geofísica y el modelo digital de elevación se realiza la cartografía geológica preliminar del área a escala 1:50,000 donde se identifican los principales lineamientos y las principales formaciones geológicas. Los resultados obtenidos confirman las posibilidades de los métodos geofísicos durante la cartografía geológica en el territorio nacional.

Palabras clave: Mapa geológico, cartografía geológica, gravimetría, magnetometría, espectrometría gamma.

Abstract

The creation of the 1:50,000 scale geological map of the Republic of Cuba represents a major step forward in the advancement of geological knowledge of the country, following the already completed maps (1:500,000, 1:250,000, and 1:100,000). This work demonstrates the contribution of the geophysical methods gravimetry, magnetometry, and gamma spectrometry during geological mapping on sheet 3483-IV of the national territory. The geophysical response of the existing geological formations in the area is based on the 1:100,000 Geological Map provided by the Institute of Geology and Paleontology – Geological Service of Cuba (IGP), and its characterization is achieved at a scale of 1:50,000. Finally, through the integrated processing and interpretation of the geophysical information and the digital elevation model, a preliminary geological mapping of the area was completed at a scale of 1:50,000, identifying the main lineaments and geological

formations. The results obtained confirm the potential of geophysical methods for geological mapping in the national territory.

Keywords: Geological mapping, geological cartography, gravimetry, magnetometry, gamma spectrometry.

1. Introducción

1.1- Fundamentación

Desde sus inicios la geofísica ha tenido entre sus principales aplicaciones la cartografía geológica. Estos trabajos brindan la información necesaria para la confección, como producto final, de un mapa geológico del área que haya sido objeto de estudio, constituyendo un instrumento de investigación donde se plasman los datos obtenidos sobre la litología y estructura con el fin de retener la información relativa a la edad y evolución de las rocas [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9].

El conocimiento geológico de un país es la base que permite el óptimo aprovechamiento de su territorio. El mapa geológico provee la información básica, que garantiza el buen desarrollo de actividades esenciales como la minería y extracción de combustibles fósiles; la correcta explotación de las aguas superficiales y subterráneas; la construcción de obras civiles; la preservación del medio ambiente; la prevención de catástrofes naturales relacionadas con los peligros geológicos y los efectos del cambio climático; la agricultura; la planificación física y el ordenamiento territorial, entre otras. En la actualidad, el grado de conocimiento geológico de un país es considerado como uno de los índices fundamentales de su progreso y desarrollo, toda vez que facilita la planificación y atrae las inversiones de capitales en actividades productivas vitales para la economía.

La confección del mapa geológico a escala 1:50,000 constituye un paso superior en la elevación del conocimiento geológico del país, que sigue a los mapas ya existentes (1:500,000, 1: 250,000 y 1:100,000).

En la provincia de Pinar del Río se han realizado gran cantidad de estudios, por ello esta zona puede considerarse dentro de las mejor estudiadas en el país. Muchos han sido los trabajos realizados con el objetivo de determinar las características de los yacimientos minerales que la conforman, los cuales han arrojado diversos elementos sobre la geología de la zona. También se han realizado estudios geofísicos a diferentes escalas desde la década del 70 del pasado siglo que incluyen la adquisición, procesamiento e interpretación de métodos magnéticos, gravimétricos, electromagnéticos y aero-gamma-espectrométrico [10 y 11]. A pesar del gran cumulo de información existente en el área, está aún no ha sido integrada e interpretada para confeccionar el mapa geológico a escala 1:50,000. En esta oportunidad se presentan los resultados del empleo de los métodos geofísicos como apoyo a la cartografía geológica en la hoja 3483-IV en el noroeste de Pinar del Río, Cuba (Figura 1).

1.2- La geofísica en la cartografía geológica

El reconocimiento de la geología con fines cartográficos no es una novedad en la geofísica, incluso los libros clásicos dedican al menos un epígrafe a este tema debido a que es una de la principales tareas que resuelven los métodos geofísicos integrados. En la actualidad los mayores esfuerzos en el uso de la geofísica para la cartografía geológica están centrados en el análisis integrado de la información y en el uso de novedosas técnicas de procesamiento. Por ejemplo:

- [12] muestran los resultados del empleo de la estadística multivariada durante estudios ingeniero-geológicos utilizando información geofísica de pozos.
- [13] propone una metodología para la interpretación de datos geofísicos durante la cartografía geológica y muestra ejemplos de su efectividad.
- [14] utilizan un complejo de métodos geofísicos de superficie durante la cartografía geológica en Uruguay y proponen una actualización al mapa geológico de ese país.
- Múltiples ejemplos del uso de la espectrometría gamma han sido utilizados para la caracterización geológica en todo el mundo [15, 16, 17, 18 y 19].

- [20] utilizan una combinación de métodos geofísicos y minería de datos durante la cartografía geológica en el sector Nueva Gerona de la Isla de la Juventud, Cuba con resultados satisfactorios.

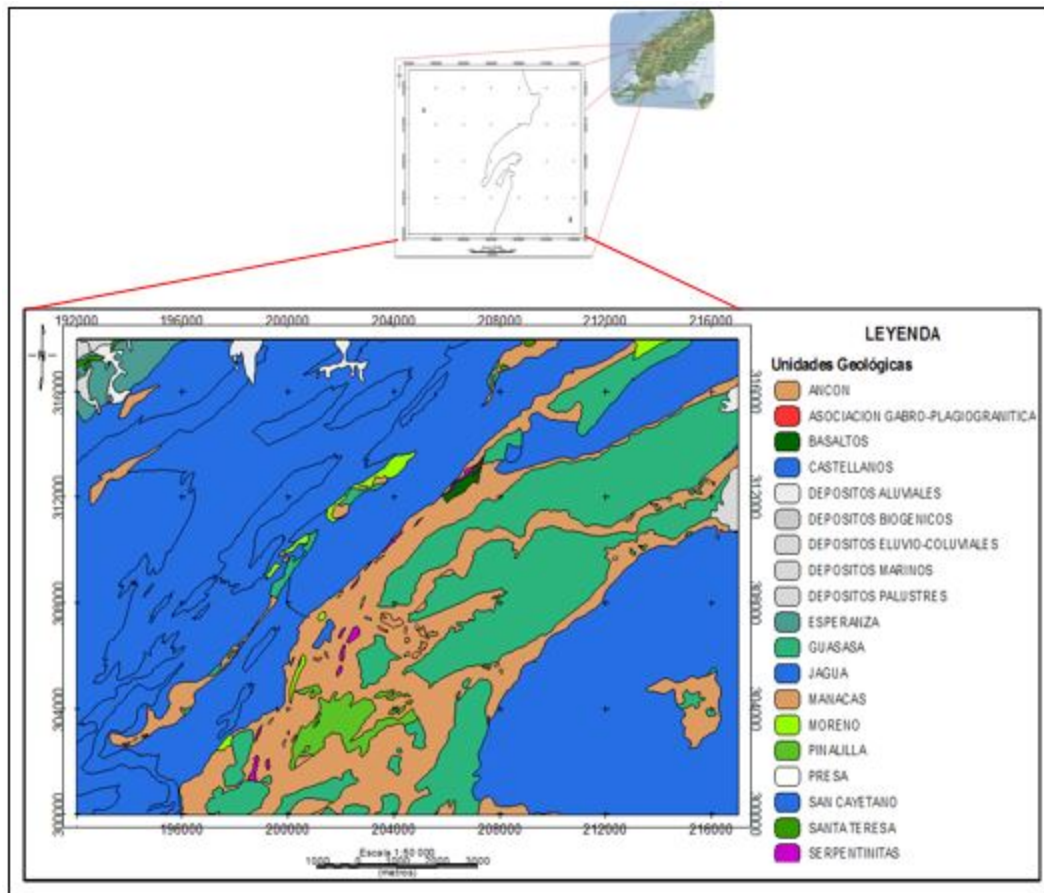


Figura 1. Ubicación del área de estudio y mapa geológico 1:100,000 representado en escala 1:50,000.

- [21] emplean una combinación de métodos geofísicos y sensores remotos durante la cartografía de índices indirectos de hidrocarburos en el Golfo de Guacanayabo, Cuba que permiten identificar un grupo de estructuras de interés en el área.
- [22] realizan la caracterización del sistema acuífero Salto-Arapey permitiendo diferenciar los colectores en rocas basálticas mediante una combinación de métodos geofísicos y el uso de herramientas estadísticas durante el procesamiento de los datos.

1.3- Grado de estudio geofísico del Noroeste de Pinar del Río

Durante las primeras seis décadas del siglo XX los trabajos fueron realizados mayoritariamente por compañías norteamericanas e inglesas. A partir del triunfo de la Revolución, al nacionalizarse todas las compañías mineras y petroleras, se realizaron diversos trabajos geólogo–geofísicos por parte de Cuba y de países del Consejo de Ayuda Mutua Económica (CAME) para aumentar el grado de conocimiento geológico del país.

La mayoría de los trabajos realizados tenían como principal objetivo determinar las características de los yacimientos minerales existentes en ella, pero todos brindaron información geológica de la región.

- [23] realiza una propuesta metodológica donde se vinculan campos potenciales y resultados espectrométricos para la cartografía geológica. Aquí se vinculan transformaciones tradicionales de los campos potenciales con el uso de otras técnicas poco utilizadas como las funciones de

covarianza, el coeficiente de heterogeneidad, las componentes principales, el gradiente total normalizado y técnicas de procesamiento digital de imágenes.

- [24] utilizaron un complejo de métodos geofísicos que permitió realizar la cartografía geológica en la región de Bahía Honda y donde además se logró establecer una grupo de relaciones entre las propiedades físicas de densidad, susceptibilidad magnética e intensidad gamma con los resultados de los levantamientos geofísicos ejecutados en el área.
- [25] a partir del análisis de la migración del uranio en los terrenos de Guaniguanico utilizando la información aerospectrométrica disponible identifican las áreas de acumulación de este elemento y su relación con los tipos litológicos presentes.
- [26] utilizan técnicas de reconocimiento de patrones durante la identificación litológica a partir de resultados de métodos geofísicos de pozos.

2. Materiales y Métodos

2.1- Materiales disponibles

En esta oportunidad se pudo disponer de los siguientes materiales:

- Mapa de Anomalía de Bouger a escala 1:50,000.
- Mapa del Campo Magnético Anómalo a escala 1:50,000.
- Mapa Gamma–Espectrométrico a escala 1:50,000 (canales de uranio (U), torio (Th), potasio (K) e intensidad gamma total (IGT)).
- Mapa Geológico Digital a escala 1:100,000.
- Modelo Digital de Elevaciones con una resolución de 25 m.

2.2- Métodos empleados

Se realizó el análisis estadístico de la información disponible para conocer el comportamiento general de los métodos geofísicos en el área de investigación. Esto facilitó la interpretación y mostró cuales serían los más resolutivos. Para el análisis se tomaron los valores correspondientes a la distribución espacial atribuida, por el mapa geológico a escala 1:100,000, a cada formación geológica del área lo que permitió definir los límites entre las formaciones presentes en el área.

Para los datos magnéticos y gravimétricos se realizaron las transformaciones de señal analítica, primera y segunda derivada horizontal y vertical, así como las componentes residuales.

Los mapas de los radioelementos fueron normalizados, con la finalidad de disminuir la influencia de la vegetación y la humedad, utilizándose la normalización sumaria según la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA, 2003). Se calcularon los índices complejos que son muy utilizados en estos datos para mejorar su efectividad.

3. Resultados y Discusión

3.1- Resultado del análisis estadístico

El análisis estadístico de los campos potenciales en toda el área reveló que estos tienen un comportamiento polimodal, reflejando la presencia de más de una población en la muestra suministrada.

El análisis estadístico de los datos radiométricos para las formaciones Manacas y Guasasa determinó que estos tienen un carácter bimodal, reflejando la presencia de más de una población muestral en los mismos.

La matriz de correlación entre los datos de campos potenciales y los espectrométricos estableció que las relaciones de dependencia entre estos conjuntos de datos son débiles.

La matriz de correlación entre los datos de campos potenciales, su componente residual, el canal de IGT, los canales de Kn, Thn, Un y los índices complejos determinó que los datos que menor cantidad de información redundante ofrecen a la interpretación son: los campos potenciales y sus

componentes residuales, concentración de torio y uranio normalizados, contenido de potasio y la relación K/U .

Las formaciones más distribuidas en el área de investigación son: Fm. San Cayetano y su Mbro. Castellanos, Fm. Guasasa y Fm. Manacas; a estas se les realizó un análisis estadístico con el fin de determinar cómo respondían los datos geofísicos ante ellas. De ese análisis se confeccionó un resumen (Tabla 1) que muestra la caracterización de cada una de estas formaciones por los métodos geofísicos disponibles.

Tabla 1. Caracterización estadística de las formaciones con mayor distribución del área.

Unidad	Litología	Comportamiento geofísico		
Fm. San Cayetano	Areniscas , lutitas y limolitas arcillosas	IGT ($\mu r/h$)	DG(mGal)	DT(nT)
		Media:5,98	Media: 51,2	Media: 169
		Mín:1,65	Mín: 37,2	Mín: 30,6
		Máx:9,83	Máx: 66,8	Máx: 242
Mbro. Castellanos	Limolitas y argilitas calcáreas, esquistos arcillosos, calizas, areniscas cuarzosas, limolitas cuarzosas	IGT($\mu r/h$)	DG(mGal)	DT(nT)
		Media:6,46	Media: 57,2	Media: 179
		Mín:2,99	Mín: 42,8	Mín: 97,5
		Máx:7,53	Máx: 68,6	Máx: 238
Fm. Guasasa	Calizas micríticas, calcarenitas, lentes de pedernales	IGT($\mu r/h$)	DG(mGal)	DT(nT)
		Media:2,03	Media: 57	Media: 226
		Mín:1,64	Mín: 55,6	Mín: 216
		Máx:4,72	Máx: 58,1	Máx: 236
Fm. Manacas	Areniscas polimícticas, limolitas, argilitas, calcarenitas, pedernales, calizas	IGT($\mu r/h$)	DG(mGal)	DT(nT)
		Media:4,38	Media: 46,7	Media: 169
		Mín:1,65	Mín: 37,8	Mín: 100
		Máx:9,83	Máx: 68	Máx: 242

3.2- Resultados de las transformaciones realizadas a los campos potenciales y los datos radiométricos.

Las transformaciones realizadas a los datos de campos potenciales y la combinación de los resultados obtenidos de las mismas permitieron identificar los principales alineamientos existentes en el área.

La componente residual del campo gravitatorio tiene un comportamiento que permite dividir el mapa en 3 zonas de dirección NO–NE. Al NO se evidencian cadenas de máximos relativos intercaladas con cadenas de mínimos, las cuales responden a lineamientos que se han llamado de segundo orden porque no tienen una gran extensión y no son muy marcados. Al N se observa un gran contraste entre la zona anteriormente descrita con otra donde existen dos grandes cadenas de mínimos entre las cuales se encuentra un gran máximo hacia el este y un pequeño máximo al centro. Las grandes cadenas de máximos han sido clasificadas como lineamientos de primer orden. Al SE existe nuevamente una zona que intercala máximos y mínimos relativos, determinando lineamientos de segundo orden.

Una vez analizados los mapas de lineamientos obtenidos de las transformaciones realizadas a los campos potenciales en combinación con lo obtenido a través de la red de drenaje; se confeccionó un mapa con los principales lineamientos detectados en la zona (Figura 2).

Analizando estos resultados con el mapa tectónico existente se determinó que los lineamientos de segundo orden corresponden a fallas, mientras que lineamientos de primer orden están asociados al contacto litológico entre las formaciones Manacas y San Cayetano.

Los métodos radiométricos fueron capaces de cartografiar las formaciones San Cayetano, Esperanza, Guasasa, Manacas, Santa Teresa, el Mbro. Castellanos y los depósitos eluviales. Estas formaciones presentan litologías que responde de manera diferente ante este método, por lo que se pudo diferenciar cada una de ellas, siendo las más representativas las areniscas de las formaciones San Cayetano y Manacas, así como las calizas de la Fm. Guasasa.

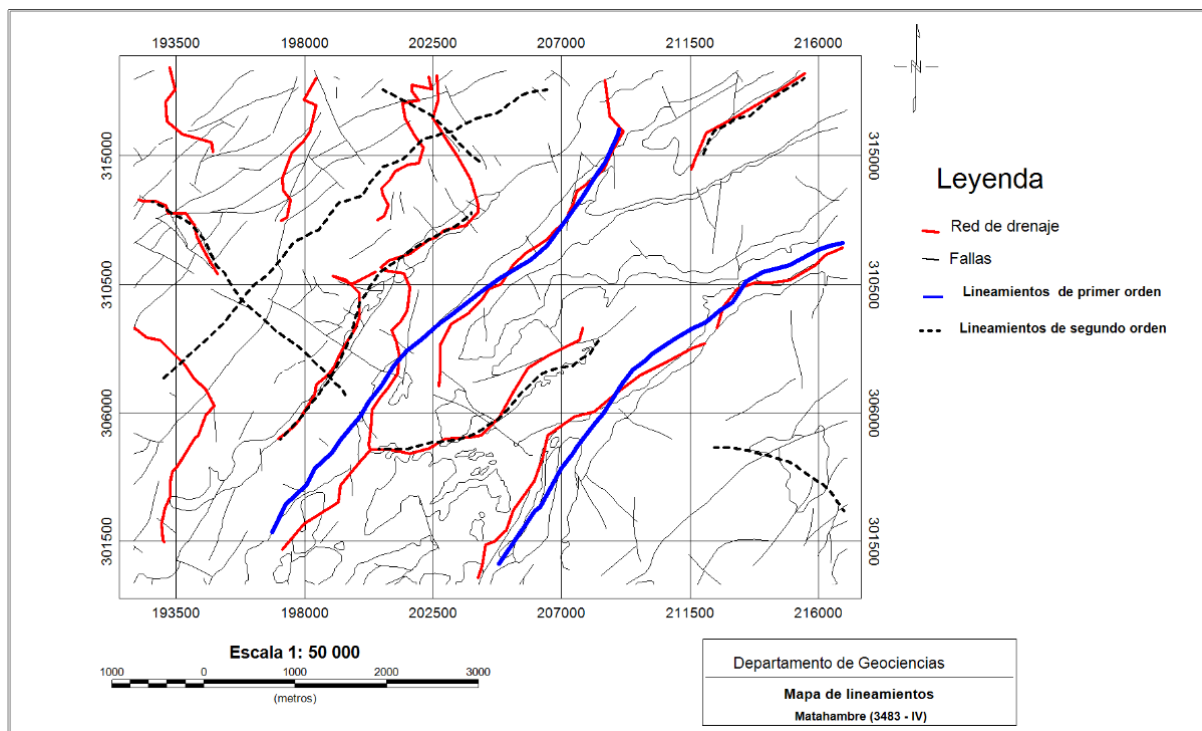


Figura 2. Mapa de los principales lineamientos en el área.

La formaciones Manacas y San Cayetano fueron muy bien cartografiadas por los canales IGT, Th, U y K, así como por el mapa ternario y el índice complejo K/U . La Fm. Guasasa pudo identificarse en los canales IGT, Th, K, en el índice complejo K/U y en el mapa ternario. La Fm. Santa Teresa solo se manifestó en los canales de IGT y K; mientras que la Fm. Esperanza solo lo hizo en el índice complejo K/U y en el mapa ternario.

Las rocas carbonatadas se presentaron como zonas de valores medios en el mapa de IGT, como una zona de mínimos en el mapa de Kn y de la relación K/U , dadas las características geológicas del área se asume que estas rocas pertenecen a la Fm. Esperanza. Las areniscas cuarzosas y las areniscas se presentaron como una zona de máximos relativos en todos los canales y transformaciones analizadas. Estas rocas se asociaron a la Fm. San Cayetano, su Mbro. Castellanos y la Fm. Manacas.

Las arcillas se presentaron como un máximo bien marcado en el canal de IGT y Thn, mientras que en canal del Kn respondieron con valores mínimos. Estas rocas fueron asociadas a la Fm. Santa Teresa. Por ultimo las calizas fueron asociadas a la Fm. Guasasa. Estas rocas respondieron como zonas de mínimos en el canal de IGT, mientras que en los canales Thn y Kn se reflejaron como zonas de mínimos (Figura 3).

4.- DISCUSIÓN

Los métodos geofísicos empleados en la investigación revelaron con precisión las principales unidades geológicas y sus contactos. Los datos de campo gravitatorio, IGT y la red de drenaje fueron los que mejores resultados ofrecieron, no desechando los aportes realizados por los datos magnéticos que ayudaron a esclarecer la ubicación y extensión de algunas fallas y contactos litológicos.

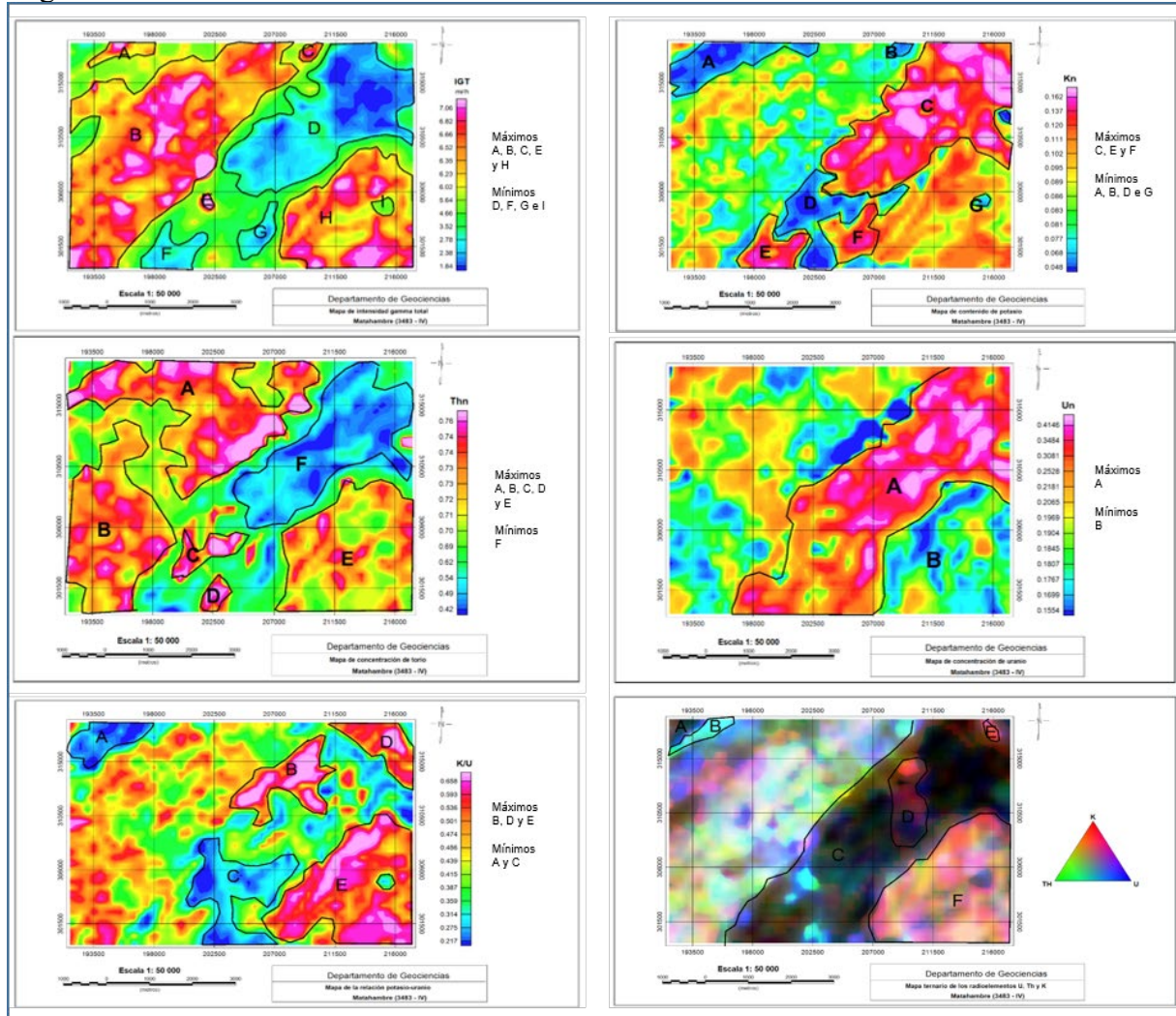


Figura 3. Resultados espectrométricos en el área.

Hacia el sureste se encuentra la Fm. San Cayetano, la cual estuvo representada por valores máximos absolutos o relativos durante el proceso de interpretación, sobre esta subyace una pequeña porción de la Fm. Guasasa, quedando demostrado así la existencia de las dos poblaciones que se reflejaban en el análisis estadístico realizado a los datos correspondientes a la Fm. San Cayetano. Por el oeste se encuentran las manifestaciones de la Fm. San Cayetano y su Mb. Castellanos; aunque son dos complejos litológicos diferentes poseen características que reaccionan de forma similar ante el levantamiento aero-gamma-espectrométrico, lo cual hace muy complejo el poder diferenciar uno de otro cuando se encuentran en tan estrecha relación como en esta área. Hacia el noroeste se encuentran las rocas carbonatadas de la Fm. Esperanza. De norte a sur quedó bien cartografiada la Fm. Manacas (Figura 4).

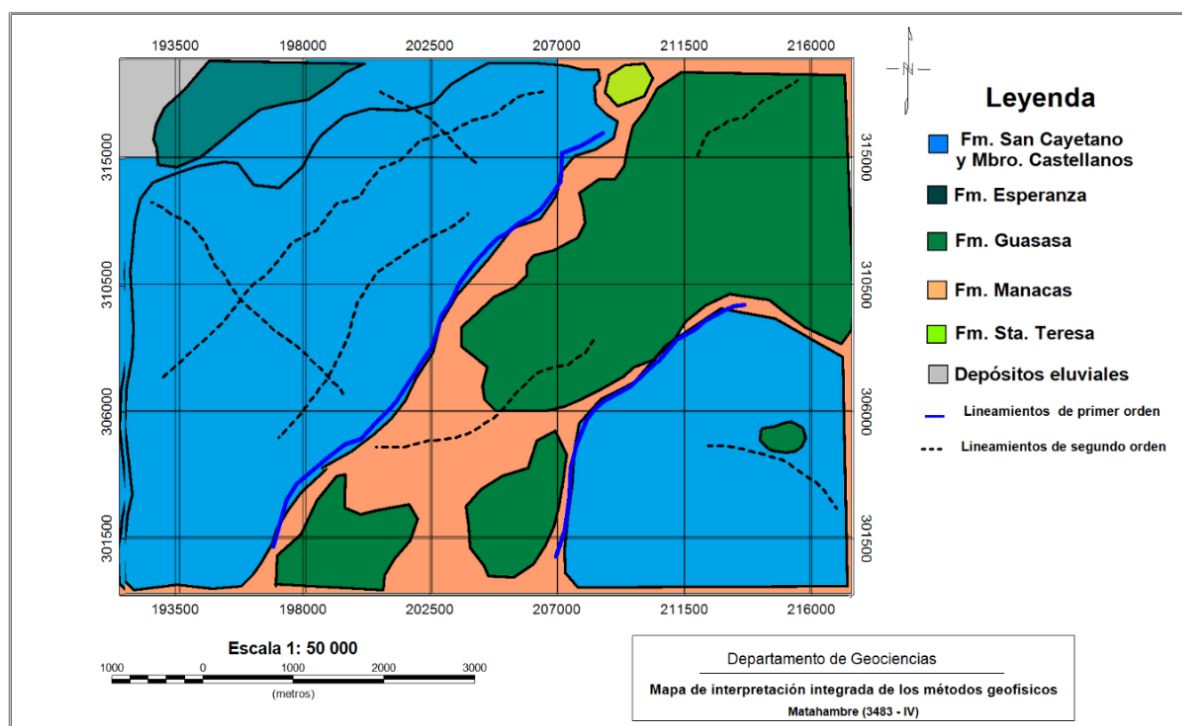


Figura 4. Mapa de interpretación integrada de los métodos geofísicos.

4. Conclusiones

Las conclusiones deben ser redactadas a párrafo único y solo deben limitarse a las conclusiones fundamentales que resultaron del trabajo acorde a los objetivos planteados. No deben incluirse en este acápite ni discusión de resultados ni referencias bibliográficas.

A partir del análisis estadístico de la información geofísica disponible fue posible realizar una caracterización de las principales formaciones geológicas descritas en el área estudiada. La combinación de los métodos de campos potenciales con la red de drenaje permitió la construcción de un mapa que muestra los principales lineamientos del área estudiada. A partir de la interpretación de los métodos aero-espectrométricos fue posible proponer un mapa donde se reconocen las principales unidades geológicas presentes en el área. La interpretación integrada de los métodos geofísicos a escala 1:50,000, permitió cartografiar las formaciones San Cayetano, Manacas, Guasasa, Santa Teresa, Esperanza y el Mbros. Castellanos que son descritas en la zona y poseen una extensión superficial que permite su estudio con la información disponible.

Referencias

1. Mero, J.L., *Uses of the gamma-ray spectrometer in mineral exploration*. Geophysics, 1960. 25(5): p. 1054-1076. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1438787>
2. Russell, W.L. y Steinhoff, R.O., *Radioactivity of volcanic sediments in Brazos County, Texas*. Geophysics, 1961. 26(5): p. 618-625. DOI: <https://dx.doi.org/10.1190/1.1438923>
3. Duval, J.S., *Composite color images of aerial gamma-ray spectrometric data*. Geophysics, 1983. 48: p. 722-735. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1441502>
4. Fanton, G., Martínez, P., Giménez, M., *Procesamiento y análisis cualitativo der datos aeromagnéticos con vistas a la exploración de yacimientos hidrotermales tipo lode gold – Provincia de La Rioja, Argentina*. GEOACTA, 2014. 39(1): p. 30-50. Recuperado a partir de <https://www.researchgate.net/publication/262567103>
5. Lyatsky, H., *Magnetic and Gravity Methods in Mineral Exploration: the Value of Well-Rounded Geophysical Skills*. Geoscience Research & Consulting Ltd., 2010. 02: CSEG

- RECORDER Calgary, Alberta, Canada. 35(8). Recuperado a partir de <https://csegrecorder.com/articles/view/magnetic-and-gravity-methods-in-mineral-exploration>
6. Carrino, T.A., A. Moreira, A. A. Cardoso y Botelho, A.F., *Sensoriamento remoto orbital, aerogeofísica e dados geológicos integrados para pesquisa mineral da região noroeste da Província Mineral do Tapajós*. En: Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2009. 2(228360516): p. 3205-3212. Recuperado a partir de <https://www.researchgate.net/publication/228360516>
7. Ruy, A. C., Moreira-Silva, A., Benfica, C. L. y Souza-Filho, C.R., *Uso de dados aerogeofísicos de alta densidade para mapeamento geológico em terrenos altamente intemperizados: o estudo de caso da região de Cláudio, porção sul do cráton São Francisco*. Revista Brasileira de Geofísica, 2006. 24(4): p. 535-546. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2006000400007>
8. Salomao, M.S., Menezes, P.T.L., Tupinambá, M., Mane, M.A., *Mapeamento geológico moderno: uso da aerogeofísica no suporte a cartografia de macicos graníticos da Faixa Ribeira na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro*. En: XI International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Salvador, Brazil, 2009. Agosto: p. 24-28. Recuperado a partir de <https://www.researchgate.net/publication/280560076>
9. De Tarso, P., Meneze, L., Roig, H.L., Silva, G.B. y Mane, M.A., *Prospección mineral no grupo paranoa. Reprocessamento de dados aerogama-espectrométricos e interpretação integrada a Imagens TM-Landsat*. Revista Brasileira de Geofísica, 2006. 24(3): p. 343-355. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2006000300004>
10. Rodríguez-Miranda, W.R. y Valcarce-Ortega, R.M., *Aplicación del análisis discriminante en la confección de un mapa pronóstico*. Minería y Geología, 1985. 3(3): p. 23-29. Recuperado a partir de <https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/548>
11. Rodríguez-Miranda, W.R., *Modelación de cortes geológicos a partir de información gravimétrica utilizando microcomputadoras*. Minería y Geología, 1996. 13(1): p. 53-58. Recuperado a partir de https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/art9_1_96
12. Valcarce-Ortega, R.M. y Rodríguez-Miranda, W.R., *Análisis estadístico multivariado aplicado a la ingeniería geológica*. Minería y Geología, 1985. 3(1): p. 61-67. Recuperado a partir de <https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/1657>
13. Rodríguez-Miranda, W.R., *Nueva metodología para la interpretación de campos potenciales y aerogama-espectrometría durante la cartografía geológica*. Tesis de Doctorado, 1998. Departamento de Geofísica. Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría". 120 p.
14. Ramos, J. A.; Rodríguez Miranda, W.R.; Gamazo. P., *Evaluación hidrogeológica en Melo, Uruguay con el empleo de métodos geofísicos y técnicas geomáticas*. Revista Cubana de Ingeniería, 2016. 7(3): p. 45-53. Recuperado a partir de <https://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/view/536>
15. Beamish, D., *Enhancing the resolution of airborne gamma-ray data using horizontal gradients*. Journal of Applied Geophysics, 2016. 132: p. 75-86. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.appgeo.2016.07.006>
16. Abdrabboh, A.M., *Ground gamma-ray spectrometric studies of El-Sahu area, southwestern Sinai, Egypt*. Journal of Astronomy and Geophysics, 2017. 6: p. 361-367. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nrjag.2017.06.001>
17. Elkhadragy, A.A., Ismail, A.A., Eltarras, M.M., Azzay, A.A., *Utilization of airborne gamma ray spectrometric data for radioactive mineral exploration of G. Abu Had-G. Umm Qaraf area, South Eastern Desert, Egypt*. Journal of Astronomy and Geophysics, 2017. 6: p. 148-161. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nrjag.2016.12001>
18. Mohamed, A.S.Y., Mohamed-Eldasek, M.S., Abdelaziz, L.A., Masoud, A.A., Salah, A.M., *Uranium migration and favourable sites of potential radioelements concentrations in Gabal Umm Hammad area, Central Eastern Desert, Egypt*. Journal of Astronomy and Geophysics, 2017. 6: p. 368-378. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2017.10.004>

19. Ahmed, A.N., Mohamed, A.S.Y., Fatema, M.A., *Airborne gamma-ray spectrometric data as guide for probable hydrocarbon accumulations at Al-Laqitah area, Central Eastern Desert of Egypt*. Applied Radiation and Isotopes, 2018. 132: p. 38-46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2017.10.053>
20. Hechavarría Govin, E.; Rodríguez Miranda, W.R.; Vega Carreño, M.B. *Contribución de los métodos geofísicos y la minería de datos a la cartografía geológica del sector Nueva Gerona, Isla de la Juventud*. Revista Infomin, 2020. 12: enero-diciembre. Recuperado a partir de <https://www.infomin.co.cu/index.php/i/article/view/147>
21. Álvarez Ortiz, M.; Leyva Ramos, E.; Rodríguez Miranda, W.R. *Cartografía de índices indirectos de manifestaciones de hidrocarburos en el Golfo de Guacanayabo, Cuba*. Boletín de Geología, 2021. 43(2): p. 79-93. DOI: <https://doi.org/10.18273/revbol.v43n2-2021005>
22. Ramos, J.; Blanco, G.; Carraz Hernández, O.; Corbo Camargo, F.; Rodríguez Miranda, W.; Saracho, A.; Borrero, A.; Bessone, L.; Alvaredo, E.; Gamazo, P. *Geophysical study of the Salto-Arapey Aquifer System in Salto, Uruguay*. Journal of South American Earth Sciences, 2024. 146: DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.105071>
23. Rodríguez-Miranda, W., *Regional generalization in support of geologic cartography*. Journal of Environmental Hydrology, 2000. 8(5): p. 1-10. Recuperado a partir de <http://hydroweb.com/journal-hydrology-2000.html>
24. Rodríguez Miranda, W.R.; Mesa Hernández, E.; Fuentes Rodríguez, M., *Caracterización petrofísica de los litotipos en la región de Bahía Honda, Cuba occidental*. Revista Minería y Geología, 2020. 36(3), p. 284-299. Recuperado a partir de https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/art3_No3_2020
25. Fuentes Rodríguez, M.; Cobas Torres, R.Y.; Rodríguez Miranda, W.R. *Migración del uranio en la parte central del Terreno Guaniguanico*. Revista Infomin, 2020. 12: Recuperado a partir de <https://www.infomin.co.cu/index.php/i/article/view/154>
26. Valcarce-Ortega, R.M. y Rodríguez-Miranda, W.R., *Reconocimiento de patrones aplicado a la identificación litológica del corte geológico*. Revista Cubana de Ciencias Informáticas, 2018. 12(3): p. 93-103. Recuperado a partir de <https://rcci.uci.cu/?journal=rcci&page=article&op=view&path%5B%5D=1761>
27. AEIA, *Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometric data*. IAEA-TECDOC-1363, 2003, Vienna, Austria, 179 p. [ISBN:92-0-108303-3; ISSN:1011-4289]

Agradecimientos

Agradecemos al Instituto de Geología y Paleontología – Servicio Geológico de Cuba (IGP-SGC) la posibilidad de realizar esta investigación al suministrar la información geológica y geofísica necesaria para su desarrollo, así como por los intercambios obtenidos con sus especialistas durante su ejecución.

Conflicto de Intereses

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses relacionado con la investigación que se presenta.

Contribución de los autores

Claudia Guerra Errasti. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6676-8010>

Participó en el diseño de la investigación, el procedimiento para realizar la cartografía geológica a partir de la información geofísica disponible y la obtención de los resultados. Participó en la redacción y edición del manuscrito.

 Claudia Guerra Errasti et al.

Willy Roberto Rodríguez Miranda. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2938-6472>

Participó en el diseño de la investigación, la revisión y evaluación de los resultados obtenidos.
Participó en la redacción y edición del manuscrito.

Ramón Guillermo Pérez Vázquez. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8559-5271>

Participó en la revisión y evaluación de los resultados, así como en la edición del manuscrito.