


Contribución de los métodos geofísicos y la minería de datos a la cartografía geológica del sector Nueva Gerona, Isla de la Juventud



Contribution of geophysical methods and data mining to the geological mapping of the New Gerona sector, Isle of Youth

<https://eqrcode.co/a/ZSZzP5>

 Elizabeth Hechavarria Govin ^{1*}, Willy Roberto Rodríguez Miranda ²,
Marina B. Vega Carreño ²

RESUMEN: El empleo de métodos geofísicos en la cartografía geológica posibilita conocer la constitución geológica del terreno y proponer la geometría de las estructuras según el comportamiento de los campos físicos. Los levantamientos geofísicos con esta finalidad han sido numerosos en la Isla de la Juventud, aunque ha sido insuficiente la integración de la información geofísica para realizar una cartografía geológica a escala 1:50 000 del sector Nueva Gerona, razón por la cual esta investigación expone la contribución de los métodos geofísicos y la minería de datos a esta tarea geológica en dicha área. La interpretación de los campos potenciales posibilitó cartografiar los principales límites tectónicos, mientras que la espectrometría permitió delimitar las unidades geológicas, en particular, las relaciones espectrométricas y el mapa ternario apoyaron la interpretación reflejando los principales contactos litológicos. El campo aeromagnético y el canal integral (IGT) proporcionaron los mejores resultados, aunque la respuesta del campo gravimétrico sirvió para estudiar zonas donde la magnetometría no tuvo una clara respuesta como en la falla Juventud. Los datos espaciales sirvieron como apoyo para el análisis de la geología y diferenciar tipos de rocas, mientras que la información geomorfológica fue utilizada para el estudio de las estructuras tectónicas. A partir de la interpretación fue elaborada una tabla con los principales índices geofísicos para la cartografía geológica. Se confeccionaron mapas de interpretación integrada, uno a partir de los métodos geofísicos, y otros mediante el empleo de las técnicas de minería de datos en los cuales fueron cartografiadas las unidades con mayor información disponible.

Palabras claves: cartografía geológica, interpretación, métodos geofísicos, metamorfismo, rocas.

ABSTRACT: The use of geophysical methods in geological cartography makes it possible to know the geological constitution of the terrain and propose the geometry of the structures according to the behavior of the physical fields. The geophysical surveys for this purpose have been numerous in the Isle of Youth, although the integration of geophysical information to carry out a geological cartography at scale 1:50 000 of the Nueva Gerona sector has been insufficient, which is why this research exposes the contribution of geophysical methods and data mining to this geological task in that area. The interpretation of the potential fields made it possible to map the main tectonic limits, while the spectrometry allowed delineating the geological units; in particular, the spectrometric relationships and the ternary map supported the interpretation reflecting the main lithological contacts. The aeromagnetic field and the integral channel (IGT) provided the best results, although the gravimetric field response served to study areas where magnetometry did not have a clear response as in the Youth fault. Spatial data served as support for the analysis of geology and differentiate types of rocks, while geomorphological information was used for the study of tectonic structures. From the interpretation, a table with the main geophysical indexes for geological cartography was prepared. Integrated interpretation maps were made, one based on geophysical methods, and others through the use of data mining techniques in which the units with the most available information were mapped.

Key words: geological cartography, interpretation, geophysical methods, metamorphism, rocks.

Recibido: 10/11/2019

Aprobado en su forma original: 15/04/2020

¹Instituto de Geología y Paleontología, Vía Blanca 1002, entre Calzada de Güines y Línea del Ferrocarril, San Miguel del Padrón, CP 11 000, La Habana, Cuba.

²Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, Calle 114 # 11901 entre Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba.

*Autor para correspondencia: Elizabeth Hechavarria Govin. E-mail: elizabeth.e@igp.minem.cu

INTRODUCCIÓN

La cartografía geológica como técnica de representación de las características del terreno y su constitución geológica se basa en la confección de mapas geológicos para investigaciones vinculadas a la exploración y explotación de hidrocarburos, minerales metálicos y no metálicos, agua subterránea y en los estudios ingeniero-geológicos. Para realizar esta tarea se utilizan diversos métodos y técnicas entre los cuales se encuentran los métodos geofísicos que permiten el estudio de las propiedades físicas de los macizos rocosos y proponen su geometría basándose en el comportamiento de los campos físicos en la superficie terrestre, el aire o en pozos.

El empleo de métodos geofísicos en la cartografía geológica, a nivel mundial, se ha manifestado en numerosas investigaciones geológicas y geofísicas, la mayoría de ellas centradas en el análisis integrado de toda la información y en el uso de técnicas modernas de procesamiento. A partir de la segunda mitad del siglo pasado, el empleo de los estudios geofísicos en la cartografía tomó mayor auge, utilizando fundamentalmente las mediciones gamma-espectrométricas y los métodos de campos potenciales para conocer la constitución geológica del terreno, destacándose las investigaciones de [Mero \(1960\)](#), [Russell y Steinhoff \(1961\)](#), [Duval \(1983\)](#), [\(Shives et al., 2000\)](#), [\(Carrino et al., 2007\)](#) y [Sousa y Lacerda \(2009\)](#).

Las investigaciones geofísicas con fines cartográficos en Cuba han tenido gran desarrollo desde el triunfo revolucionario. La mayoría de estas investigaciones se han basado en la integración de la información aportada por los métodos utilizados destacándose los estudios de [\(Pardo et al., 1989\)](#), [Pardo \(2014\)](#), [Serrano \(2015\)](#) y [Batista \(2017\)](#). La teledetección ha sido utilizada como apoyo en la cartografía geológica, demostrando la eficiencia del empleo de las imágenes satelitales para identificar elementos del relieve, así como diferentes estructuras geológicas con alto grado de precisión y confiabilidad. Las investigaciones de [Pérez \(2016\)](#) y [Leyva \(2017\)](#) muestran los resultados

efectivos que demuestran la aplicación de esta técnica en estudios geológicos.

En la Isla de la Juventud se han realizado diversos trabajos geológicos y geofísicos, desde antes del triunfo de la Revolución, cuyo objetivo fue la cartografía geológica regional. Los estudios geológicos y geofísicos realizados durante el siglo pasado en este territorio fueron ejecutados por especialistas cubanos y soviéticos llevando a cabo levantamientos magnéticos, radiométricos, gravimétricos y exploración eléctrica para precisar la constitución geológica de la zona. También se realizaron trabajos geofísicos para el estudio de yacimientos minerales y propiedades físicas de las rocas, fundamentalmente en el área del macizo metamórfico de la Isla de la Juventud.

Entre los años 1979 y 1993, como parte de un proyecto de investigación geológica se realizaron levantamientos aerogamma-espectrométricos y aeromagnéticos a escala 1:50 000 en la Isla de la Juventud; estos trabajos se vieron finalizados abruptamente como consecuencia de los cambios políticos ocurridos en la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS), por lo que no fue realizada una interpretación de esta información. Esta situación provoca que, actualmente, la integración de la información geofísica del sector Nueva Gerona sea insuficiente para desarrollar la cartografía geológica del área, tarea que forma parte del proyecto que ejecuta el Instituto de Geología y Paleontología (IGP) relacionado con el Mapa Geológico de Cuba a escala 1:50 000.

Por tal motivo se propone como objetivo general aplicar las técnicas de procesamiento e integración de los datos geofísicos y la minería de datos para la cartografía geológica del sector Nueva Gerona, Isla de la Juventud. Los objetivos específicos derivados son:

1. Obtener los mapas interpretativos de los métodos geofísicos empleados.
2. Cartografiar los alineamientos tectónicos presentes en el sector a partir del empleo de datos geofísicos y del modelo digital de elevación.
3. Obtener los mapas resultantes de la utilización de las técnicas de minería de datos.

4. Obtener el mapa resultante de la integración de los datos geofísicos utilizados.

El sector Nueva Gerona se ubica al noreste del territorio de la Isla de la Juventud, municipio especial de la República de Cuba, está representado en la hoja topográfica 3681, Nueva Gerona, a escala 1: 100 000. Limita al Norte con el Golfo de Batabanó, al Este con la plataforma insular del sur de Matanzas, al Sur con la Ciénaga de Lanier y al Oeste con la localidad La Demajagua. Abarca una extensión total de 1 907,8 km². La [tabla 1](#) muestra las coordenadas del área de estudio.

Tabla 1. Coordenadas del área de estudio. Proyección NAD 27, Cuba-Norte.

Vértices	X	Y
1	292987.14	242833.01
2	292991.20	205333.19
3	345102.14	205327.26
4	345108.09	242840.69

El sector pertenece al macizo metamórfico de Isla de la Juventud y se caracteriza por una estructura geológica compleja donde se desarrollan formaciones metamórficas

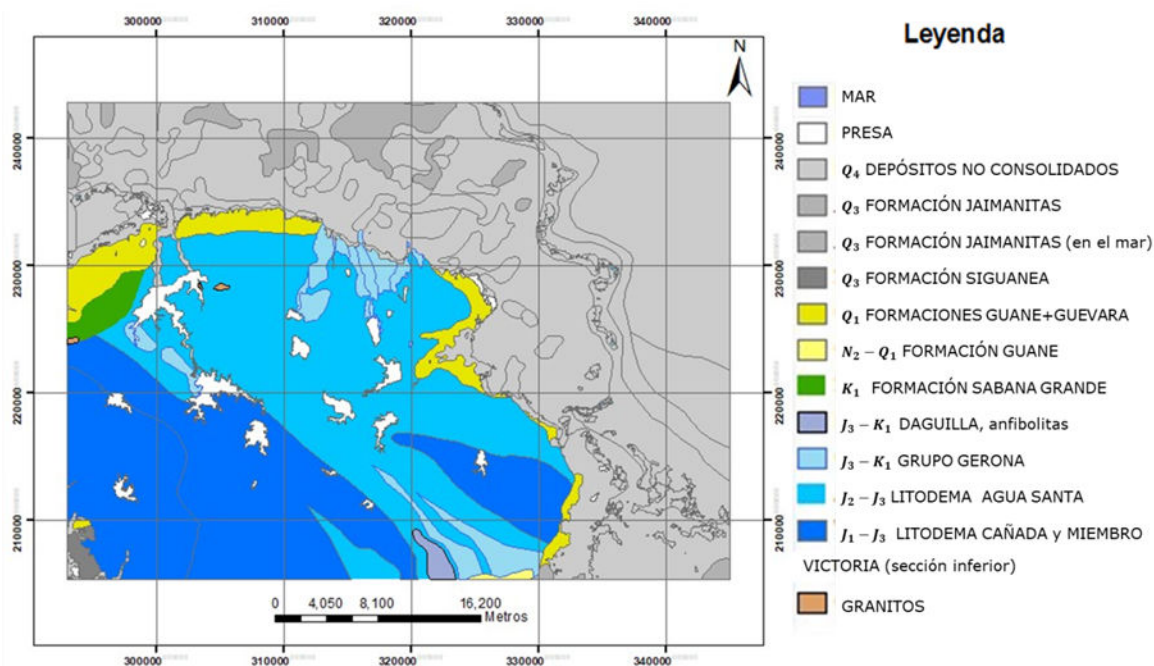
complejamente dislocadas ([Figura 1](#)). Las rocas están cortadas por numerosas dislocaciones disyuntivas de tipo fallas y sobrecorrimientos, e intrusiones de composición básica, media y ácida. Las cortezas de meteorización y los sedimentos de las terrazas marinas del Cuaternario están ampliamente desarrollados.

El sector está integrado por un complejo litológico terrígeno-carbonático de edad Jurásico-Cretácico, que fue depositado en condiciones restringidas, metamorfozido y multiplegado. Se establecen las unidades litoestratigráficas Cañada, Agua Santa, Grupo Gerona, miembro Victoria, Dagulla, Sabana Grande, Guane, Guevara, Jaimanitas, Sigüanea y depósitos no consolidados. Las unidades metamorfozadas son denominadas litodemas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los métodos utilizados en esta investigación fueron los métodos gravimétricos, magnéticos y radiométricos en las variantes integral y espectral para el análisis integrado de los datos provenientes de la información geofísica.

Las técnicas utilizadas para el procesamiento fueron: el sistema de procesamiento e interpretación de datos geofísico-geológicos (Oasis Montaj), y los sistemas informáticos



(IGP, 2011)

Figura 1. Mapa geológico de sector Nueva Gerona a escala 1:100 000

Global Mapper, Surfer y ArcGis. También se realizó la estadística descriptiva y la confección de histogramas empleando los programas Microsoft Excel y Statística. La minería de datos fue desarrollada en el programa WEKA que posee una gran colección de algoritmos y herramientas para análisis de datos y modelado predictivo.

Los materiales empleados en esta investigación fueron:

- Mallas de datos del campo gravimétrico, aeromagnético y aerogamma-espectrométrico (canales: IGT, U, Th y K) a escala 1:50 000 del sector Nueva Gerona, Isla de la Juventud.
- Imágenes satelitales del Landsat 5 (TM) del territorio.
- Datos del Modelo Digital de Elevación (MDE)
- Mapa Geológico Digital del sector a escala 1:100 000

Los datos fueron facilitados por el Instituto de Geología y Paleontología/Servicio Geológico de Cuba (IGP/SGC), adquiridos durante los levantamientos aerogamma-espectrométricos, gravimétricos y aeromagnéticos a escala 1:50 000 realizados a finales del siglo pasado en Isla de la Juventud.

La imagen del Modelo Digital de Elevación (MDE) cuenta con una matriz de elevación, con valores verticales espaciados a intervalos horizontales regulares, todos ellos medidos en unidades de longitud y latitud geográficas, posibilitando una resolución de 30 m.

Los datos espaciales corresponden a las imágenes satelitales del Landsat 5 (TM) que abarcan la órbita 17 y las filas 44 y 45. Estas imágenes poseen 7 bandas multiespectrales que van desde el visible hasta el infrarrojo medio, con resolución espacial de 30 metros.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir del análisis estadístico de los datos geofísicos a escala 1:50 000 se obtuvieron los principales estadígrafos para el estudio de su comportamiento en el sector determinándose que la mayor variabilidad está dada por los datos de concentración de torio (Th) mientras que los datos gravimétricos son menos variables. La confección de los histogramas ([Figura 2](#))

posibilitó conocer la distribución de los datos en el territorio. Los histogramas de los datos radiométricos indicaron niveles relativamente bajos de los canales espectrométricos, destacándose los canales de torio e intensidad gamma total con mayor variabilidad. En los histogramas de los canales espectrométricos se observa que presentan una asimetría hacia la derecha por lo que predominan los valores bajos de radiactividad y una distribución polimodal. Los histogramas correspondientes a los métodos de campos potenciales muestran que los datos magnéticos presentan mayor variabilidad con respecto a los datos gravimétricos.

La interpretación del mapa de campo gravimétrico y sus transformaciones posibilitó conformar un mapa con los alineamientos cartografiados, comparados con las fallas conocidas en el mapa tectónico ([Figura 3](#)). En este mapa se muestran los contactos tectónicos determinados por la gravimetría. Al centro del mapa se observa la falla que atraviesa el sector en dirección NO-SE identificada por las transformaciones. Hacia el noreste se define la cuña de mármoles del Grupo Gerona, mientras que en el sur algunos de los contactos coinciden con las fallas.

La interpretación de los datos magnéticos posibilitó confeccionar un mapa de alineamientos cartografiados comparado con las fallas conocidas del mapa tectónico ([Figura 4](#)), en el cual se identificaron contactos tectónicos y litológicos. Se cartografían los contactos de la zona sur y central. Los contactos litológicos que delimitan el Grupo Gerona y la formación Sabana Grande se muestra hacia el noreste y noroeste, respectivamente.

Fueron cartografiadas unidades espectrométricas ([Figura 5](#)) a partir de la interpretación de los mapas espectrométricos analizados, en las cuales se delimitan los contactos litológicos. Las vulcanitas y las arenas fueron identificadas a partir de los mapas de concentración de torio y uranio. Los esquistos se cartografiaron mediante el canal integral y están delimitados en tres unidades debido a que difieren en su comportamiento en los mapas de los diferentes canales.

El mapa de la red de drenaje obtenido a partir del MDE permitió resaltar fallas mediante las

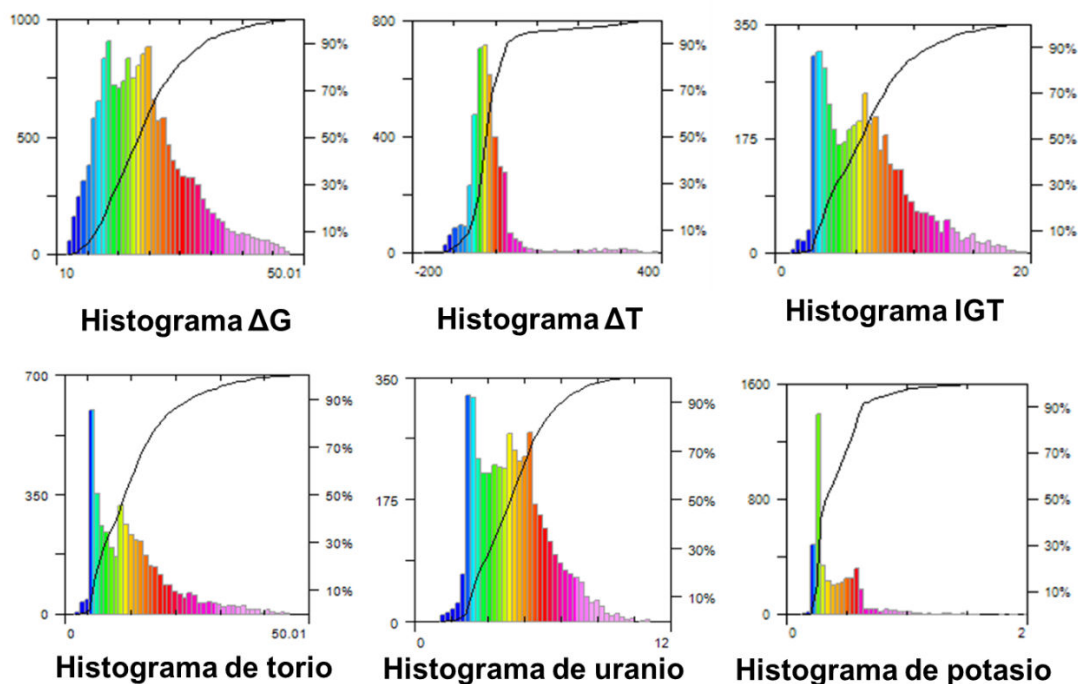


Figura 2. Histogramas de los datos geofísicos.

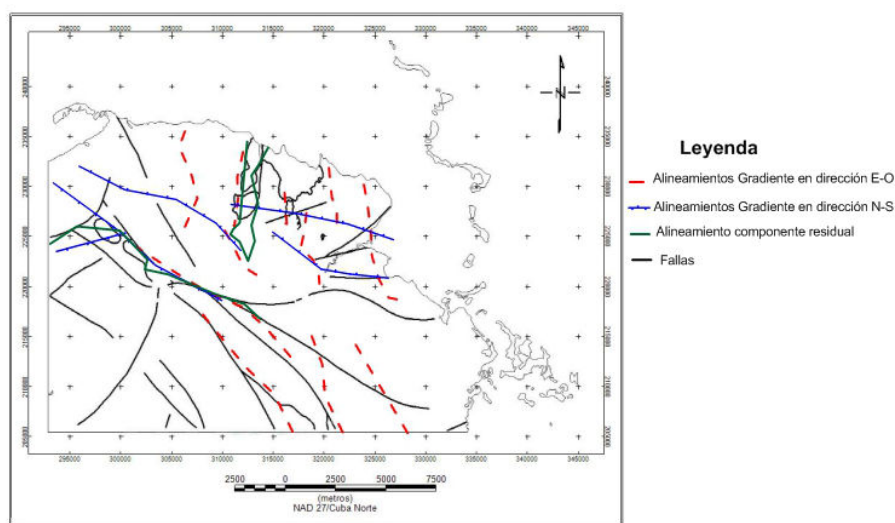


Figura 3. Mapa de alineamientos con interpretación de transformaciones de datos gravimétricos.

alineaciones superficiales de drenaje y descifrar el plano morfotectónico mediante el establecimiento de la red de morfoalineamientos con direcciones NE-SO y NO-SE. Los morfoalineamientos tienen forma alargada, están delimitados por divisorias y pudieran tener un origen tectónico.

Para determinar si las características del terreno responden a los mapas detallados anteriormente se utilizaron combinaciones de bandas hechas a partir de las imágenes satelitales del Landsat 5, entre ellas la imagen obtenida de

la combinación RGB 731 (Figura 6) que muestra la vegetación de color verde oscuro, y las áreas urbanas en color plateado, mientras que el mar presenta diferentes tonalidades de azul según la profundidad. Hacia el noreste se observan diferencias de colores lo que indica un cambio de litología, de los esquistos de Agua Santa a los mármoles de Grupo Gerona. Al suroeste se muestra el cambio de litología entre los esquistos del miembro Victoria y las rocas de la formación Sigüanea. Hacia el sur se observa un área dentro de la litodema Cañada con coloración diferente al

resto de la zona lo que indica una variación litológica dentro de esta litodema que no se aprecia en el mapa geológico original.

A partir de la respuesta de los métodos fueron establecidos los principales índices geofísicos de las unidades cartografiadas. Se pudieron identificar unidades geológicas que fueron representadas en un mapa resultado de la interpretación integrada (Figura 7a). Este mapa fue comparado al mapa geológico digital del sector (Figura 7b) para manifestar la efectividad de los métodos para cartografiar unidades geológicas.

El mapa de interpretación integrada muestra como la litodema Cañada se subdivide en dos unidades con comportamiento geofísico diferente mientras que en el mapa geológico digital se muestra una sola unidad. También el miembro Victoria, que constituye la sección inferior de esa litodema, se representa como otra unidad diferente teniendo en cuenta su respuesta ante los métodos geofísicos. Las unidades pequeñas como los granitos, las formaciones Guane y Jaimanitas que se observan en el mapa geológico no fueron identificadas en la interpretación integrada debido a que no daban buena respuesta a los

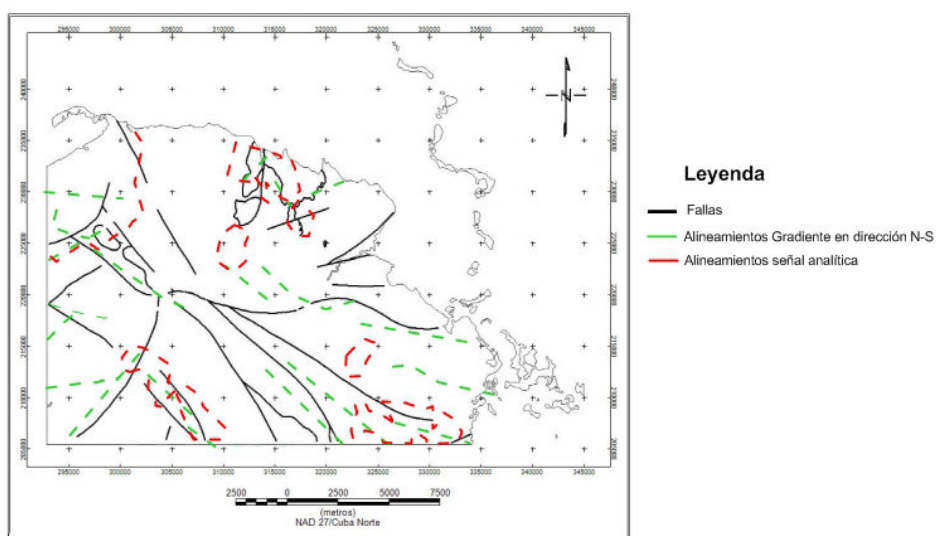


Figura 4. Mapa de alineamientos con interpretación de transformaciones de datos magnéticos.

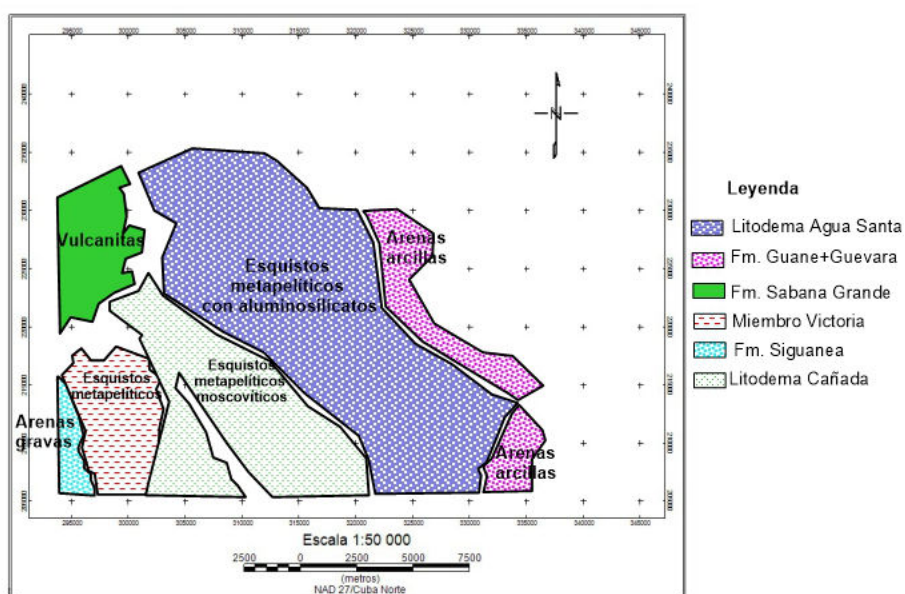


Figura 5. Mapa de las unidades espectrométricas identificadas en el sector.



— Contactos litológicos

Figura 6. Combinación RGB 731 de imagen Landsat 5 (TM).

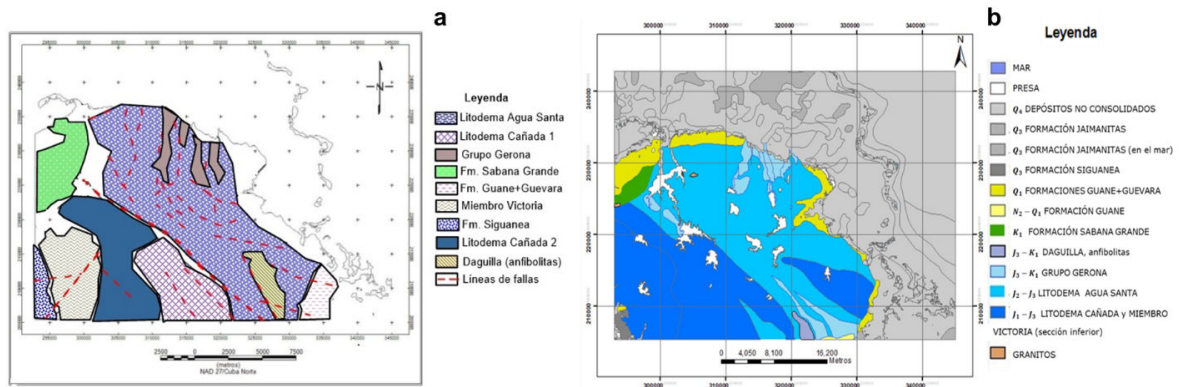


Figura 7. Mapas de interpretación integrada (a) y geológico digital (b) del sector Nueva Gerona.

métodos. En el mapa geológico se muestra la zona noroeste abarcada por las formaciones Sabana Grande y Guane+Guevara mientras que la interpretación indica el mismo comportamiento en toda esa área lo que puede deberse a que sea solo una formación. El grupo Gerona, la litodema Agua Santa y las anfíbolitas de la unidad Daguiilla fueron cartografiadas en el mapa de interpretación.

Con las técnicas de minería de datos se obtuvo un mapa resultado del modelado predictivo de la geología a partir del análisis de la base de datos de entrenamiento (1 000 m) comparándose con el mapa geológico verdadero (Figura 8). Se delimitaron algunos de los contactos litológicos, sin embargo, los contactos tectónicos no fueron cartografiados. Las unidades geológicas de mayor distribución fueron cartografiadas mejor que las de menor extensión.

También se obtuvo un mapa resultado del modelado predictivo de la geología realizado a partir de la base de datos de espaciamiento 500 m y las coordenadas del sector. El mapa (Figura 9) está constituido por píxeles de colores diferentes que representan las diferentes unidades, algunas de las cuales pudieron ser cartografiadas mientras que otras no contaban con suficiente información para ser identificadas. En comparación con el modelado de la base de datos de entrenamiento son cartografiadas las unidades de mayor extensión, el contacto tectónico que separa las litodemas Agua Santa y Cañada se identifica un poco mejor, las intercalaciones de anfíbolitas ubicadas al sureste se encuentran delimitadas al igual que los sedimentos de la formación Siguanea.

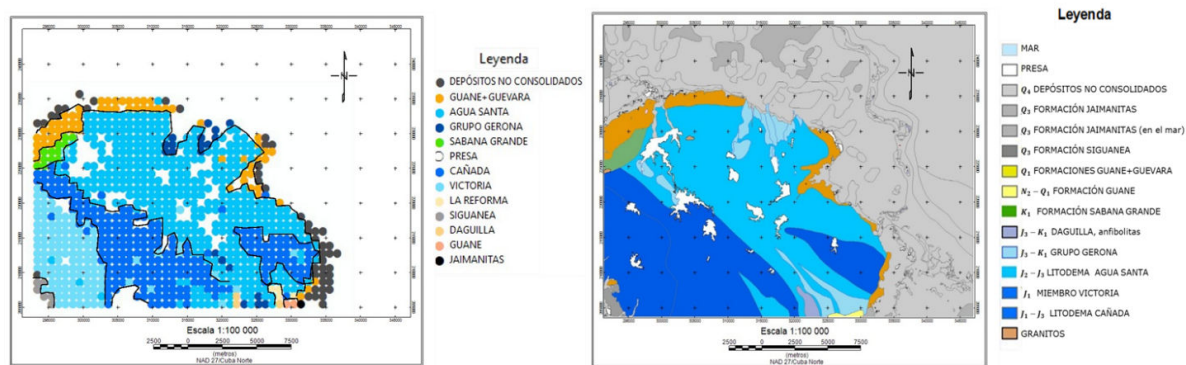


Figura 8. Mapa resultado del modelado predictivo de la geología con espaciamiento 1 000 m y mapa geológico a escala 1:100 000

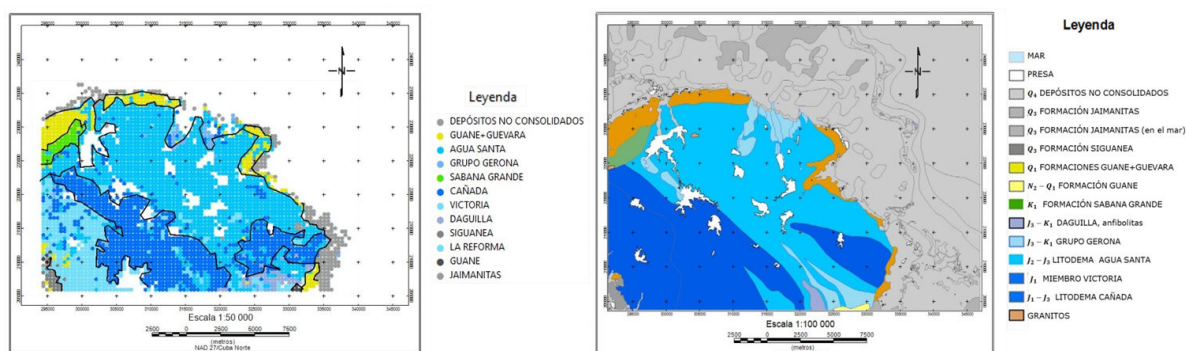


Figura 9. Mapa resultado del modelado predictivo de la geología con espaciamiento 500 m y mapa geológico a escala 1:100 000

CONCLUSIONES

1. Se obtuvieron los mapas de los métodos de campos potenciales que permitieron cartografiar las vulcanitas de la formación Sabana Grande, las intercalaciones de anfibolitas en los mármoles de la litodema Sierra de Caballos y la falla Juventud.
2. El mapa de las unidades espectrométricas obtenido es el que mejor representa los contactos litológicos entre las diferentes litodemas y formaciones presentes en la región investigada.
3. Los alineamientos tectónicos fueron delimitados a partir de la red de drenaje y los gradientes horizontales de los campos potenciales, coincidiendo algunas fallas presentes en el mapa tectónico en dirección NO-SE.
4. Los mapas obtenidos por el modelado predictivo de la geología a partir de las técnicas de minería de datos permitieron cartografiar las unidades geológicas de mayor

distribución y los contactos litológicos del sector.

5. Se establecieron índices geofísicos para caracterizar las unidades geológicas cartografiadas que permitieron obtener el mapa resultante de la integración de los datos geofísicos, en el cual se cartografiaron algunas de las unidades presentes en el mapa geológico 1:100 000 a excepción de la litodema Cañada que aparece subdividida.

BIBLIOGRAFÍA

- Babushkin, V., Tssimkh, E., Akilvekov, S. & Zverev, V. 1990. Informe sobre los trabajos de levantamientos geólogos-geofísicos a escala 1:50000 y búsquedas acompañantes en el municipio especial Isla de la Juventud en colaboración con el CAME, No. 3880, La Habana: Instituto de Geología 1664p.
- Bao, X.H. & Zhao, F. 2012. "Applying Data Mining to the Geosciences Data". SciVerse ScienceDirect., Vol. 33: 685 - 689.

- Batista, J.C. 2017. Interpretación geofísica integrada para identificar el control estructural metalogénico de la zona favorable aurífera La Unión-La Botija, provincias Camagüey-Las Tunas, Cuba, Tesis en opción al grado de Ingeniero, La Habana: Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, 78 p.
- Carrino, T.A.; Filho C.S. & Leite E.P. 2007. “Avaliação do uso de dados aerogeofísicos para mapeamento geológico e prospecção mineral em terrenos intemperizados: o exemplo de Serra Leste, provincia mineral de Carajás”. *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol. 25 (3): 307-320.
- Colectivo de autores. 2013. *Léxico estratigráfico de Cuba*. Instituto de Geología y Paleontología, La Habana, 459 p., ISBN: 978-959-7117-58-2.
- Duval, J.S. 1983. “Composite color images of aerial gamma-ray spectrometric data”. *Geophysics*, Vol. 48: 722-735.
- Leyva, E. 2017. Cartografía de estructuras geológicas que evidencien índices de manifestaciones de hidrocarburos en el Golfo de Guacanayabo. Tesis en opción al grado de Ingeniero Geofísico, La Habana: Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, 75 p.
- Melián, D. 2015. Nuevas zonas perspectivas para la localización de depósitos auríferos en el área Jacinto, Camagüey, Cuba. Trabajo presentado en opción al título de Ingeniero Geofísico, La Habana: Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”, 78 p.
- Mero, J.L. 1960. “Uses of the Gamma-Ray Spectrometer in Mineral Exploration”. *Geophysics*, Vol. XXV (5): 1054-1076.
- Mondelo, F. & Sánchez R. 2011. Mapas geofísicos regionales de gravimetría, magnetometría, intensidad y espectrometría gamma de la República de Cuba, 1: 2 000 000 hasta 1: 50 000. Resultados del trabajo temático productivo (TTP 617965), Instituto de Geología y Paleontología, La Habana.
- Pardo, M.E. 1986. La constitución geológica y la metalogenia endógena del macizo de la Isla de la Juventud. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Técnicas, La Habana: Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”.
- Pardo, M. E.; Bello V.; Amador H.; Taba S.; Sousin O.; Matamoros I. & De Moya I. 1989. Interpretación de los datos geofísicos con fines de la cartografía geólogo-estructural de la República de Cuba. Instituto de Geología y Paleontología, La Habana.
- Pardo, M.E. 2014. “Aplicación de la gravimagnetometría para la cartografía estructuro-magmática del macizo metamórfico de la Isla de la Juventud”. *Boletín Ciencias de la Tierra*, Vol. 38: 75-89.
- Pérez, J.M. 2016. Generalización de las propiedades físicas del macizo metamórfico de la Isla de la Juventud para cartografía geológica y prospección de minerales metálicos. Tesis en opción al grado de Ingeniero Geofísico, La Habana: Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”, 75 p.
- Pokrajac, D. K.; Patel H.; Brooks J.; Cenat N.; Marcus K. & Darden S. 2003. “Data Mining in Geosciences”. *TELSIKS*, Vol. 3: 1-3.
- Ramos, J. A. & Rodríguez W.R. 2016. “Métodos geofísicos para la cartografía geológica en un sector de Melo, Uruguay”. 18 Convención Científica de ingeniería y Arquitectura, La Habana, Cuba.
- Rodríguez, W. R. 1998. Nueva metodología para la interpretación de campos potencial y aerospectrométrico durante la cartografía geológica. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Técnicas, La Habana: Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”.
- Rodríguez, B.; Velandia F. & Cárdenas R. 2008 “Teledetección y SIG aplicados a la exploración geológico-geofísica en el Altiplano Nariñense-Colombia”. *Geología Colombiana*, No. 33: 79-9
- Russell, W.L. & Steinhoff R.O. 1961. “Radioactivity of Volcanic Sediments in Brazos County, Texas”. *Geophysics*. Vol. XXVI (5): 618-625.
- Ruy, A. C.; Silva A. M.; Benfica C. L. & Filho C. S. 2006. “Uso de dados aerogeofísicos de

- alta densidade para mapeamento geológico en Terrenos altamente intemperizados: o estudio de caso da região de Cláudio, porção sul do cráton São Francisco”. *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol. 24 (4): 535-546.
- Serrano, K. 2015. *Cartografía geólogo-estructural del área de Rodas-Fomento en Cuba Central a partir de datos geofísicos*. Tesis en opción al grado de Ingeniero Geofísico, La Habana: Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”, 62 p.
- Shives, R.B.K.; Charbonneau B.W. & Ford K.L. 2000. “The detection of potassic alteration by gamma-ray spectrometry. Recognition of alteration related to mineralization”. *Geophysics*, Vol. 65 (6): 2001-2011.
- Sousa, C. & Lacerda M. 2009. “A importância da aerogeofísica de alta resolução no mapeamento geológico: exemplo Domínio Erepecuru-Trombetas noroeste do estado do Pará”. 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF 2009, Salvador de Bahía, Brasil.

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)