

Caracterización petrofísica de los litotipos en la región de Bahía Honda, Cuba occidental

Petrophysical characterization of lithotypes of Bahía Honda region, western Cuba

Willy Roberto Rodríguez-Miranda^{1*}, Ellie Mesa-Hernández¹, Magaly Fuentes-Rodríguez¹

¹Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echevarría", Cuba

²Instituto de Geología y Paleontología, Cuba

*Autor para la correspondencia: wrodriguez1955@gmail.com

Resumen

Para generalizar el comportamiento petrofísico de la región de Bahía Honda con fines de prospección de minerales, esta investigación tuvo el propósito de caracterizar los litotipos presentes la región, a partir de los datos de levantamientos magnéticos, gravimétricos y radiométricos existentes, a escala 1:100 000, así como de los valores de densidad, susceptibilidad magnética e intensidad gamma medidos en un número importante de pozos. Para obtener la caracterización petrofísica de los principales litotipos en la región se llevó a cabo el procesamiento estadístico de las propiedades físicas antes mencionadas. La vinculación de las propiedades físicas con los levantamientos geofísicos existentes permitió obtener mapas del comportamiento espacial de dichas propiedades, no solo para los litotipos descritos, sino también en las formaciones geológicas presentes en el área, lo que constituye una herramienta importante para los trabajos de cartografía geológica y prospección minera que se realizan en la región.

Palabras clave: petrofísica; propiedades físicas; cartografía geológica; Bahía Honda.

Abstract

The purpose of this study is to contribute to the petrophysical generalization performance of Bahía Honda region for mineral exploration purposes. For

this purpose, the lithotypes present in the region were characterized, based on the existing magnetic, gravimetric and radiometric surveys, at a scale of 1: 100,000, as well as the values of density, magnetic susceptibility and gamma intensity measured in a significant number of pits. Statistical processing of aforementioned physical properties assisted the Petrophysical characterization. Linking physical properties with existing geophysical surveys allowed obtaining maps of spatial performance of these properties, not only for the lithotypes described, but also in the geological formations present in the area, which constitutes an important tool for mapping work, geological and mining prospecting carried out in the region.

Keywords: petrophysics; physical properties; geological mapping; Honda Bay.

1. INTRODUCCIÓN

Las propiedades físicas de las rocas aparecen como un reflejo de su composición, estructura, condiciones de formación e historia geológica. Pueden ser estudiadas a partir de los campos físicos medidos en la superficie terrestre, en el aire y en los pozos (Brendan *et. al.* 2016; De-Carvalho 2016), y por mediciones realizadas en el laboratorio a las muestras de rocas tomadas en afloramientos y pozos (Mesa-Hernández 2017).

En los últimos años, el desarrollo de los métodos geofísicos ha sido considerable, lo cual ha motivado que su utilización abarque una esfera mayor en la resolución de los problemas geológicos (Barbary-Ahmed 2018; Airo *et al.* 2015) y teniendo en cuenta que el grado de estudio de las propiedades físicas de las rocas cubanas es todavía insuficiente, se ha hecho imprescindible la sistematización de su estudio.

La presente investigación forma parte del proyecto "Generalización de las propiedades físicas en la República de Cuba" del Instituto de Geología y Paleontología (IGP) y se circunscribe a la región de Bahía Honda, que cuenta con levantamientos geofísicos a escala 1:100 000, y en determinados sectores existen pozos en los que se realizaron mediciones de algunas propiedades físicas (Mesa-Hernández 2017).

El escaso conocimiento del comportamiento de las propiedades físicas en la región de Bahía Honda no garantiza su generalización con fines de prospección de minerales, por lo que se hace necesario realizar la caracterización petrofísica de los principales litotipos de la región. Estos antecedentes llevaron a trazar el objetivo de caracterizar los principales litotipos de la región de Bahía Honda a partir del comportamiento de la

densidad, la susceptibilidad magnética y la intensidad de radiación gamma total.

En el ámbito internacional existen numerosas investigaciones relacionadas con las propiedades físicas que demuestran su estrecho vínculo con la cartografía geológica. Por ejemplo, Mesa-Hernández (2017) describe las siguientes:

- García-Lobón (2003) realiza una cartografía geofísica de complejos ígneos en España a partir de la interpretación integrada de datos aeromagnéticos, radiométricos y gravimétricos. En el 2007 hacen la cartografía geofísica en República Dominicana, utilizando datos de densidad, susceptibilidad magnética y magnetización remanente (García-Lobón y Ayala 2007).
- En Nigeria, Oniku y otros (2008) identifican comportamientos diferentes en el batolito granítico de Zaira, por análisis estadísticos a muestras de susceptibilidad magnética.
- Estudios de propiedades eléctricas y estadística univariada describieron el área más favorable para acumulaciones ferrosas en Malasia, según Berry y otros (2012).
- Shevko y demás colaboradores (2013), utilizando una combinación de propiedades físicas y registros geofísicos, caracterizan las rocas volcánicas en el volcán Ebeko, Islas Kuril.
- Florencia-Ahumada y otros investigadores (2017) confeccionan un modelo 1D de la corteza en San Juan, Argentina, combinando datos sísmicos y petrológicos para caracterizar litotipos utilizando propiedades físicas.
- Más recientemente, Barbary-Ahmed (2018) cartografía varios tipos de rocas en zonas desérticas de Egipto integrando geofísica aérea e imágenes satelitales.

Las investigaciones sobre propiedades físicas de las rocas en Cuba fundamentalmente se concentran en el período posterior a 1959. Algunas de las más importantes son expuestas por Mesa-Hernández (2017):

- En 1987, Humpierre desarrolla una generalización preliminar de la densidad y susceptibilidad magnética en Cuba Oriental y Diez y Figueroa (1987) proponen un modelo petrofísico del yacimiento "El Cobre" utilizando densidad y susceptibilidad magnética.

- Peña y Hernández (1988), mediante un estudio petrofísico que incluyó densidad, susceptibilidad magnética, resistividad eléctrica, polarización inducida y magnetización remanente esclarecen el comportamiento de las propiedades físicas en el área Moa-Baracoa.
- Heredia (1989), mediante un adecuado análisis estadístico en el yacimiento Antonio, diferencia los principales litotipos y logra contornear los cuerpos meníferos utilizando gravimetría.
- Pérez y Aguilar (1990), empleando datos de densidad, susceptibilidad magnética, gravimetría y su análisis estadístico, junto a la información geológica disponible, confeccionan mapas de petrodensidad y petromagnético para caracterizar algunas formaciones geológicas presentes en el área de estudio.
- Salas (1990) confecciona un mapa de grado de estudio de las propiedades físicas de las rocas de Cuba Centro-Oriental.
- Almenares y Hernández (1992) presentan los mapas de petrodensidad y petromagnético, a escala 1:1 000 000, para el territorio nacional cubano.
- Fernández y otros (1996) desarrollan, en la porción noroeste de la provincia Pinar del Río, investigaciones de las propiedades físicas que arrojaron resultados satisfactorios y facilitaron posteriores trabajos de prospección.
- Más recientemente, y como parte del mismo proyecto en que se desarrolló este trabajo, Pérez-Vigaud (2016), lleva a cabo una generalización de propiedades físicas en el municipio especial Isla de la Juventud, a partir de valores de susceptibilidad magnética y densidad.
- Hernández-Ramsay y Escartin-Sauleda (2017) utilizan métodos eléctricos para caracterizar cortezas de intemperismo en varias localidades.
- Álvarez-Ortiz y demás colaboradores (2019) ofrecen nueva información sobre las asociaciones minerales, particularidades de los procesos hidrotermales de formación y tipos de alteración en los yacimientos Júcaro y Yagruma.

1.1. Grado de estudio de la región Bahía Honda

Los primeros estudios de la región de Bahía Honda fueron realizados fundamentalmente por compañías extranjeras, se remontan al período 1899-1958, resultando estudios poco sistemáticos, con información incompleta y sin unidades de criterios. Estos estudios fueron resumidos y en algunos casos reinterpretados, a partir de 1960. Se construyeron mapas resúmenes gravimétricos y magnéticos, a escala 1:500 000, para todo el territorio de Cuba y se hizo la interpretación cualitativa en un perfil que atraviesa el área de estudio con la asistencia técnica de especialistas de la entonces Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas (Hernández-Ramsay y Escartín-Sauleda 2017).

A partir de 1963 se realizan trabajos de búsqueda más detallados con un mayor empleo de la geofísica, aunque muchos adolecían de falta de información geológica y no se utilizaron complejos de métodos. Se pueden destacar en este período los siguientes, recogidos por Mesa-Hernández (2017):

- Búsqueda y revisión en el yacimiento Buenavista entre 1963-1965 donde se establecieron reservas minerales.
- Trabajos de búsqueda a escala 1:10 000 al oeste de Bahía Honda, entre 1965-1966 descubren los yacimientos Júcaro y Cacarajícara.
- Entre 1973-1975 trabajos de radiometría, polarización inducida, cuerpo cargado y metalometría se realizan en los flancos del yacimiento Júcaro.
- Entre 1975-1981 con el levantamiento geológico de búsqueda, a escala 1:50 000, se establece un mapa de minerales útiles y un mapa pronóstico con áreas perspectivas.
- Entre 1984-1987 se realizan trabajos de prospección preliminar, a escala 1:10 000, al sur de Bahía Honda.
- Entre 1990-1991 tiene lugar la exploración de los yacimientos Yagruma y Cacarajícara, y se calculan reservas en categorías C₁ y C₂.
- En el 2003, ejecutada por un grupo de especialistas del Centro de Investigaciones del Petróleo (CEINPET) y del IGP, se hace la generalización y actualización geológica en la provincia de Pinar del Río, a escala 1:100 000, con fines petroleros.

- En 2004, especialistas del IGP elaboran el mapa metalogénico del potencial de recursos de oro, plata y polimetálicos asociados a secuencias ricas en materia orgánica, en Pinar del Río.
- En el 2018 Ruíz y demás colaboradores (citado por Mesa-Hernández 2017) utilizan georradar, susceptibilidad magnética y análisis mineralógico para caracterizar el depósito mineral Cajálbana.
- En ese mismo año, Pérez y otros investigadores (citado por Mesa-Hernández 2017) realizan la caracterización paleoambiental de la formación Cacarajícara.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales

Para la caracterización petrofísica se tomó la información de 64 pozos con una profundidad máxima de 300 m, donde se describen los siguientes litotipos asociados a un grupo de formaciones geológicas de la región de Bahía Honda (Figura 1):

- Litotipos presentes en el área: aleurolitas, areniscas, andesitas, argilitas, basalto, brechas, calizas, conglomerados, deluvios, gabroides, gabro, gravelitas, gravas, milonitas, porfiritas, serpentinitas, tobas, tufo (IGP 2013).
- Formaciones geológicas presentes en el área: depósitos aluviales y eluvio-coluviales; Capdevila, Cojímar, Encrucijada, Jaimanitas, Madruga, Manacas, Polier, Orozco, Vía Blanca y rocas de la asociación ofiolítica (IGP 2016).

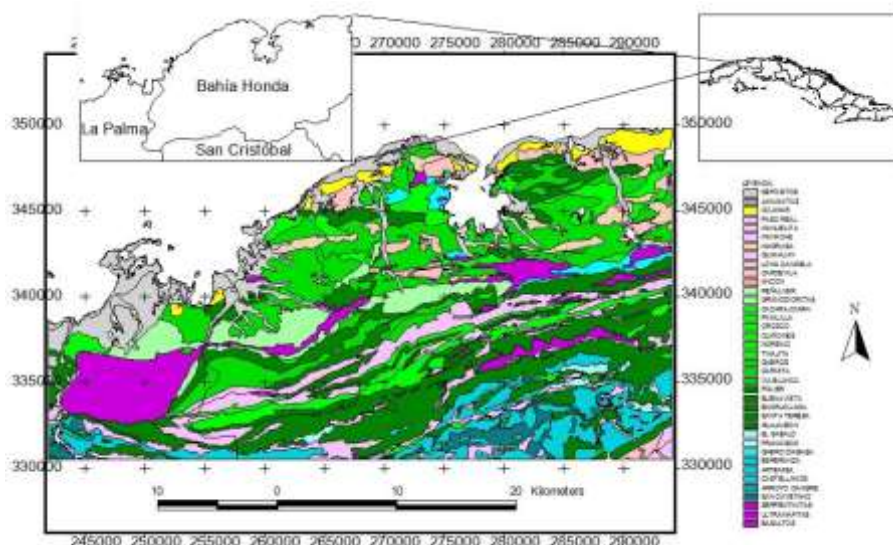


Figura 1. Ubicación y geología del área (modificado de IGP 2016).

Se dispuso también de la información, a escala 1:100 000, de estudios geofísicos de gravimetría, magnetometría y espectrometría gamma.

2.2. Métodos

Se realizó el análisis estadístico univariado de la información para caracterizar las propiedades físicas. Se estudió el comportamiento de las propiedades físicas medidas en los pozos, tomando cada litotipo como una única población muestral y, posteriormente, verificando pruebas de homogeneidad de medias.

Conociendo que los campos potenciales responden a la influencia de cuerpos ubicados a diferentes profundidades, se realizaron transformaciones que limitaran su acción a aproximadamente 300 m, ya que esta es la máxima profundidad que alcanzan los pozos en la región. Para obtener la respuesta residual se procedió a restar del campo observado, el resultado de la Continuación Analítica Ascendente (CAA) a 300 m, 500 m y 1 000 m, respectivamente (Mesa-Hernández 2017).

En el caso de la espectrometría gamma se emplearon relaciones entre las variables espectrométricas, ya que las mismas pueden ser más expresivas que los valores de las componentes originales (Mesa-Hernández 2017).

Se empleó también la estadística multivariada con la finalidad de encontrar posibles relaciones entre las propiedades físicas y los campos físicos (García-Gutiérrez y Sacasas-León 2016; García-Pereira, Moreira y Lemos-Camarero 2017; Florencia-Ahumada *et al.* 2017), a fin de obtener mapas del comportamiento de la densidad, susceptibilidad magnética e intensidad de radiación gamma en la región de estudio (Mesa-Hernández 2017).

3. RESULTADOS

3.1. Resultados del análisis estadístico univariado

El análisis estadístico para densidad (σ), susceptibilidad magnética (χ) e intensidad gamma total (I_γ) de todos los datos de la región arrojó los resultados que se muestran en la Tabla 1.

Una vez caracterizadas las propiedades físicas correspondientes a cada uno de los litotipos presentes en la región de Bahía Honda, se obtuvieron los resultados que se muestran en las Tablas 2, 3 y 4.

Al realizar las pruebas de hipótesis correspondientes al comportamiento de cada una de las propiedades físicas estudiadas en los diferentes litotipos presentes en la región se observó que la mayoría de estos litotipos poseen un comportamiento heterogéneo y, por esta razón, muestran variaciones

importantes que no permiten considerarlas como una única población estadística en la región. Tres litotipos: basalto, deluvio y grava no pudieron caracterizarse debido a la escasa cantidad de muestras.

Tabla 1. Resumen del análisis estadístico, para las propiedades físicas estudiadas, con todos los datos de la región de Bahía Honda

Estadísticos	σ: [g/cm³]	χ: [*10⁻⁵SI]	$I\gamma$: [μR/h]
No. de muestras	1951	1951	1935
Media	2,56	408	38,5
Mínimo	1,06	0	0,25
Máximo	3,40	17593	120,2
Moda	2,70	583	0,5
Mediana	2,61	36	34,6
Dispersión	0,25	1200,39	26,88
Coef. variación	0,10	2,94	0,70

Se identifica como una única población a los siguientes litotipos:

- Gabro: $\sigma=2.63$ g/cm³; $\chi=590E-05$ SI; $I\gamma=5.03$ μR/h
- Milonita: $\sigma=2.71$ g/cm³; $\chi=746E-05$ SI; $I\gamma=5.17$ μR/h
- Serpentinita: $\sigma=2.57$ g/cm³; $\chi=4703E-05$ SI; $I\gamma=3.36$ μR/h

Tabla 2. Resultado del análisis estadístico por litotipos para σ [g/cm³]

Litotipo	N	Mín	Máx	Media	Moda	Mediana	Disp	CV
Aleurolita	119	1,53	2,89	2,26	2,48	2,47	0,299	0,132
Andesita	155	2,21	2,91	2,63	2,55	2,63	0,138	0,052
Arenisca	301	1,06	2,99	2,36	2,44	2,39	0,246	0,104
Argilita	53	2,22	3,06	2,68	2,71	2,705	0,236	0,088
Basalto	1	2,97	2,97	...	...	...	...	...
Brecha	134	1,92	3,06	2,52	2,39	2,51	0,229	0,091
Caliza	362	2,22	2,91	2,68	2,7	2,69	0,065	0,024
Conglomerado	6	1,76	2,61	2,25	...	2,27	0,349	0,155
Deluvio	2	2,62	2,63	...	...	...	...	...
Gabroide	6	2,68	2,9	2,8	...	2,83	0,094	0,034
Gabro	52	2,22	2,98	2,63	2,75	2,67	0,211	0,080
Gravelita	138	1,95	3,4	2,35	2,3	2,31	0,187	0,080

Grava	1	2,26	2,26	...	...	...	...	...
Milonita	24	1,88	3,01	2,71	2,72	2,81	0,279	0,103
Porfirita	401	2	3,18	2,7	2,9	271	0,194	0,072
Serpentinita	69	2,06	2,68	2,57	2,61	2,6	0,087	0,034
Tobas de porfirita	32	2,66	2,95	2,82	2,89	2,81	0,078	0,028
Tufo gravelita	14	2,37	2,55	2,44	2,52	2,43	0,056	0,023
Zonas de trituración	82	2,08	3	2,49	2,3	2,51	0,225	0,090

Tabla 3. Resultado del análisis estadístico por litotipos para χ [$*10^{-5}$ SI]

Litotipo	N	Mín	Máx	Media	Moda	Mediana	Disp	CV
Aleurolita	119	0	2450	126	126	126	547,85	4,348
Andesita	155	4	345	174	40	40	345,37	1,985
Arenisca	301	0	2262	193	0	89	305,19	1,581
Argilita	53	5	779	146	31	38	119,97	0,822
Basalto	1	40	40	...	...	...	...	...
Brecha	134	4	1055	496	30	44	1054,87	2,127
Caliza	362	0	1257	25	0	0	120,07	4,801
Conglomerado	6	2	1093	242	...	66	425	1,756
Deluvio	2	1	3	...	...	...	...	...
Gabroide	6	33	1667	403	...	44,5	657,65	1,632
Gabro	52	5	5781	590	38	73	1172,95	1,986
Gravelita	138	2	291	206	251	100	291,30	1,414
Grava	1	201	201	201	...	...	...	...
Milonita	24	4	1640	746	50	49	1640,41	2,199
Porfirita	401	0	17593	304	38	35	1218,32	4,008
Serpentinita	69	38	8294	4703	6283	5404	2316,21	0,492
Tobas de porfirita	32	20	3267	950	2513	503	1034,25	1,089
Tufo gravelita	14	50	729	250	...	131	232,81	0,931
Zonas trituración	82	2	805	249	31	28	804,69	3,232

Tabla 4. Resultado del análisis estadístico por litotipos para I_γ [$\mu\text{R/h}$]

Litotipo	N	Mínn	Máx	Media	Moda	Mediana	Disp	CV
Aleurolita	51	4	17	9,21	8,5	8,5	3,71	0,4061
Andesita	152	2	17	5,59	4	4,5	3,35	0,592
Arenisca	184	2,5	13,5	5,19	4,5	4,5	2,00	0,385
Argilita	198	1,5	11,5	3,44	3	3	1,65	0,479
Brecha	166	2	14	6,16	2,5	5,25	3,18	0,516
Caliza	179	2	17	3,52	3	3,5	1,32	0,375
Conglomerado	4	6,5	15,5	9	6,5	7	4,36	0,484
Gabro	110	2,5	10,5	5,03	4	4	2,09	0,415
Gabroide	15	3	5,5	3,97	4	4	0,72	0,181
Gravelita	96	2	13	8,08	10,5	8	2,90	0,359
Milonita	55	2,5	12	5,17	4	4	2,56	0,495
Porfirita	267	1,5	11,5	4,58	4	4	1,93	0,421
Serpentinita	113	1,5	7	3,36	2,5	3	1,07	0,318
Zonas trituration	263	1,5	10	4,78	5	5	1,71	0,358

En el resto de los litotipos fueron encontradas diferencias significativas en el comportamiento de los valores de σ , χ e I_γ al verificar la homogeneidad de poblaciones según la prueba de Kolmogorov-Smirnov para un nivel de significación del 5 %. Utilizando los litotipos presentes en la región fue posible caracterizar el comportamiento general de las formaciones geológicas (Tabla 5).

3.2. Resultados del análisis estadístico multivariado

Este análisis permitió estimar las posibles dependencias funcionales entre los valores de las propiedades físicas y los campos físicos existentes. Las variables utilizadas para encontrar las mejores relaciones fueron:

- Valor mínimo, máximo, media y mediana de cada propiedad física.
- Valor mínimo, máximo, media y mediana de cada campo físico y las transformaciones utilizadas (residuales e índices complejos).

El análisis de correlación permitió seleccionar los siguientes pares de variables para la confección de los mapas de propiedades físicas:

- σ y valor mínimo de la residual del campo gravimétrico [$r=0,30$].

- χ y valor de la mediana del campo magnético [$r=0,57$].
- $I\gamma$ en pozos y valor máximo de la $I\gamma$ del levantamiento aeroespectrométrico [$r=-0,42$].

Las Figuras 2, 3 y 4 muestran los mapas de σ , χ e $I\gamma$ para la región.

Tabla 5. Resumen de las propiedades físicas para formaciones del área

Grupos geológicos	σ:[g/cm³]	χ:[*10⁻⁵SI]	$I\gamma$:[μR/h]
Artemisa	2,8 - 3,1	<= 800	...
Cacarajícara	2,6 - 3,1	<= 800	3 - 5
Capdevila	2,7 - 2,9	<= 130	...
Cojimar	2,2 - 2,4	10 - 30	...
Encrucijada	2,6 - 2,8	<= 300	7 - 12
Grupo diabasa	2,8 - 2,9	<= 300	7 - 10
Gabros	2,7 - 2,9	<= 298	5 - 7
Granodiorita	2,6 - 2,8	<= 2800	5 - 7
Guanajay	2,8 - 2,9	127 - 298	...
Madruga	2,5 - 2,7	<= 130	...
Manacas	2,7 - 2,9	<= 500	3 - 7
Orozco	2,8 - 3,1	<= 130	5 - 10
Polier	2,8 - 3,1	<= 800	...
Serpentinitas	2,7 - 2,8	<= 1220	7 - 12
Vía Blanca	2,5 - 2,8	500 - 1220	12 - 18

4. DISCUSIÓN

Los litotipos menos identificados fueron basalto, grava y deluvios; los más identificados, las porfiritas y las calizas. Según la Tabla 2, los menores valores de σ promedio son para los conglomerados, aleurolitas y gravas; los mayores, para gabroides y tobas de porfirita. La presencia de impurezas, descritas en las muestras, pudiera ser la causa de la gran variabilidad de la σ en aleurolitas, areniscas y gravelitas.

De la Tabla 3 se observa que los menores valores de χ se registran en calizas. Los mayores valores promedio son para las serpentinitas y tobas de porfirita. Los valores máximos en rocas sedimentarias como areniscas, aleurolitas, calizas y brechas pueden estar asociados a variaciones del contenido de los lito-clastos (de rocas ígneas básicas) dentro de esta roca o a variaciones del

contenido del material ferromagnético dentro del componente sedimentario, según las descripciones existentes. El coeficiente de variación ratifica la alta variabilidad de la χ , así como la heterogeneidad de las calizas y la homogeneidad de las serpentinitas en el área.

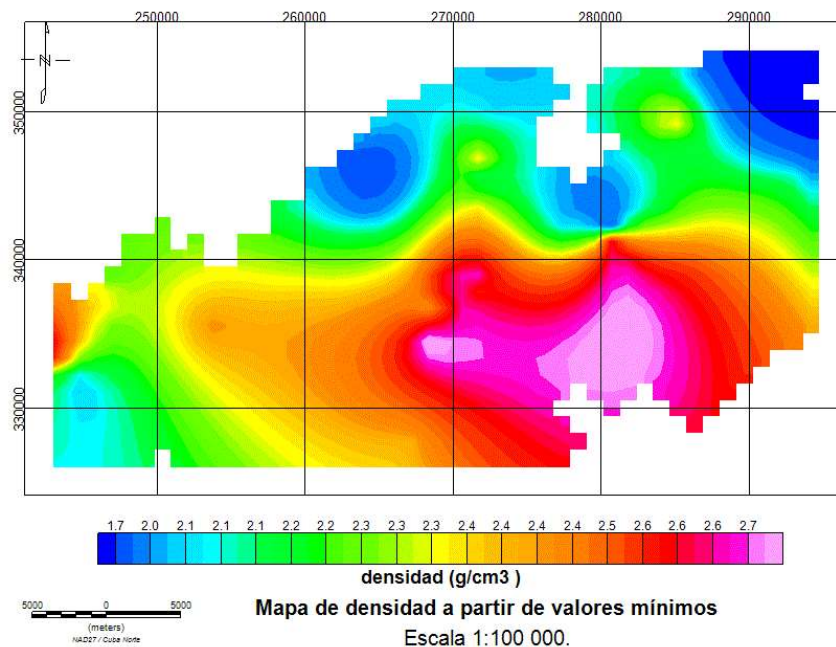


Figura 2. Mapa de σ para la zona centro-norte de Bahía Honda.

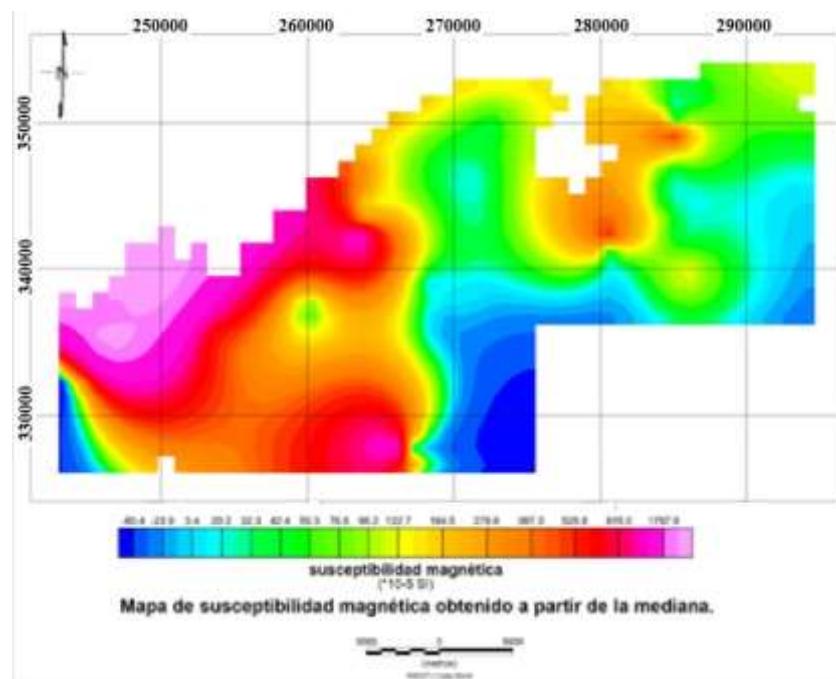


Figura 3. Mapa de χ para la zona centro-norte de Bahía Honda.

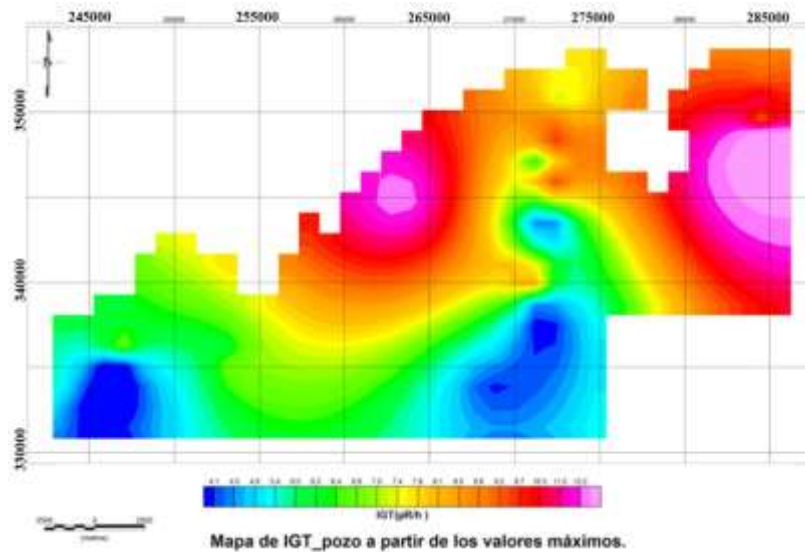


Figura 4. Mapa de I_γ para la zona centro-norte de Bahía Honda.

A partir de los datos de la Tabla 4 se puede asegurar que las aleurolitas y los conglomerados son los que mayores valores de I_γ presentan, mientras que las calizas, argilitas y serpentinitas muestran los menores valores. Se destaca la andesita como la de mayor heterogeneidad.

Las pruebas de homogeneidad de poblaciones permitieron confirmar la alta heterogeneidad geológica existente en la región de Bahía Honda, pero no fue posible identificar las causas que la provocan, aunque se conoce que deben estar relacionadas con la profundidad, grado de meteorización, mineralización o formación geológica sobre la cual fueron tomadas las muestras.

La caracterización de las propiedades físicas permitió la construcción de mapas de propiedades físicas preliminares al norte del área, sin embargo, la poca densidad de puntos con los cuales fueron confeccionados dificultó su validación con los mapas de campos físicos, aunque se perciben tendencias favorables entre sus respectivos comportamientos. Además, la baja correlación entre propiedades físicas, campos físicos y las transformaciones realizadas impidió extrapolar los resultados hacia aquellas áreas donde no se dispone de muestras estudiadas.

Sobre la base del comportamiento de los diferentes litotipos presentes fue posible establecer su vínculo con las formaciones geológicas y, de esta manera, proponer una primera aproximación a su comportamiento petrofísico en la región, como se muestra en la Tabla 5.

Los mapas de propiedades físicas confeccionados permiten establecer variaciones generales de su comportamiento en la región de Bahía Honda, así

como disponer de una herramienta para su perfeccionamiento si se aumentara la información de partida.

El mapa de σ muestra un aumento hacia al sur, lo que es de esperarse porque hacia la costa se identifican depósitos cuaternarios. Hacia el centro del área se observa una zona de valores máximos asociados a la presencia de cuerpos de granodioritas, gabros y serpentinitas y a las formaciones Encrucijada y Manacas. Hacia el oeste, los máximos que se identifican pueden estar respondiendo a los cuerpos de serpentinitas.

El mapa de χ muestra que la mayor parte de las rocas al este del área son débilmente magnéticas, sin embargo, al oeste, pueden llegar a ser magnéticas, que en el mapa geológico representan depósitos eluvio-coluviales, lo cual es poco probable ya que estos están compuestos por depósitos marinos y arcillas en su mayoría. Estos máximos deben ser provocados por los cuerpos serpentiniticos en sus cercanías.

El mapa de $I\gamma$ muestra que los máximos se registran sobre las formaciones Vía Blanca y Encrucijada, y en menor medida, Fm. Orozco. Los mínimos se registran en el límite sur sobre las formaciones Cacarajícara y Manacas. En general, son más comunes en el área los valores de 5-10 $\mu\text{R/h}$, típicos de litotipos sedimentarios.

5. CONCLUSIONES

- La generalización de las propiedades físicas en la región de Bahía Honda permite la caracterización de los litotipos presentes según el comportamiento de su σ , χ e $I\gamma$.
- El análisis estadístico de las poblaciones muestrales disponibles posibilita comprobar el alto grado de heterogenidad geológica existente en la región de Bahía Honda y la necesidad de incrementar el muestreo con vistas a una mejor caracterización petrofísica.
- La vinculación de las propiedades físicas con los levantamientos geofísicos existentes permite obtener mapas del comportamiento espacial de dichas propiedades, no solo para los litotipos descritos, sino también en las formaciones geológicas presentes lo que representa, sin dudas, una herramienta importante para los trabajos de cartografía geológica y prospección minera que se realizan en la región.

6. REFERENCIAS

Álvarez-Ortiz, I.; Cruz-Gómez, E. M.; Lastra-Rivero, J. F. y Velazco-Tapia, F. 2019: Alteraciones relacionadas con la mineralización sulfurosa de los

- yacimientos Júcaro y Yagruma, occidente de Cuba. *Minería y Geología*, 35(3): 270-288.
- Airo, M. L.; Hyvonen, E.; Lerssi, J.; Levaniemi, H. and Ruotsalainen, A. 2015: Tips and tools for the application of GTK's airborne geophysical data. *Technical Report*, diciembre. Consulta: 15/04/2020. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/274008539>
- Barbary-Ahmed, S. 2018: Integration of airborne geophysical and satellite imagery data to delineate the radioactive zones at west Safaga Area, Eastern Desert, Egypt. *Journal of Astronomy and Geophysics*, 7(2): 297-308
- Brendan, P. Malone; Sanjeev K. Jha; Budiman Minasny y Alex B. McBratney. 2016: Comparing regression-based digital soil mapping and multiple-point geostatistics for the spatial extrapolation of soil data. *Geoderma*, 262: 243-253.
- De Carvalho Junio, Waldir; Braz Calderano Filho; César da Silva Chagas et al; Silvio Barge Bhering; Nilson Rendeiro Pereira y Helena Saraiva Koenow Pinheiro. 2016: Regressão linear múltipla e modelo Random Forest para estimar a densidade do solo em áreas montanhosas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 51(9): 1428-1437.
- Florencia-Ahumada, M.; Castro-de-Machuca, B.; Alvarado, P.; Ammirati, J. B. y Gimena-López, M. 2017: Modelo petrofísico del borde oriental de las sierras de Valle Fértil-La Huerta, Argentina, a partir de datos sísmicos y petrológicos. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 34(1): 1-11.
- García-Gutiérrez, J. A. y Sacasas-León, C. 2016: Mapas regionales de resistividad eléctrica en un sector al sur de Cuba occidental. *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, 17(1): 71-80.
- García-Pereira, H.; Moreira, C. A. y Lemos-Camarero, P. 2017: Correlação de dados geofísicos em pesquisa mineral de ocorrência de cobre em Caçapava Dosul (RS). *Geociências*, 36(4): 717-729.
- Hernández-Ramsay, A. J. y Escartin-Sauleda, E. R. 2017: Caracterización geoeléctrica de cortezas lateríticas a partir de sondeos eléctricos verticales de polarización inducida (SEV-PI). *Minería y Geología*, 33(4): 415-428.
- Instituto de Geología y Paleontología (IGP) 2013: *Léxico Estratigráfico de la República de Cuba*. La Habana: Servicio Geológico de Cuba. 458 p.
- Instituto de Geología y Paleontología (IGP) 2016: *Mapa Geológico de la República de Cuba*. La Habana: Servicio Geológico de Cuba.
- Mesa-Hernández, E. 2017: *Caracterización petrofísica de los principales litotipos presentes en la región de Bahía Honda, Cuba Occidental como apoyo a la cartografía y la prospección de minerales sólidos*. Willy

Rodríguez Miranda (Tutor). Trabajo de diploma. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría. 104 p.

Pérez-Gil, W.; Cobiella-Reguera, J. L. y Rodríguez-Cárdenas, H. 2018: Interpretación paleoambiental de depósitos del límite Cretácico/Paleógeno (K/Pg) en Sierra del Rosario, Cuba occidental. *Minería y Geología*, 34(3): 236-250.

Pérez-Vigaud, 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*. Willy Rodríguez Miranda (Tutor). Trabajo de diploma. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. 75 p.

Ruiz-Quintana, J.; Pons-Herrera, J. A.; Otaño-Noguel, J. A.; Hernández-Díaz, R.; Cardoso-Velázquez, L. y Hernández-Ramsay, A. J. 2018: Caracterización preliminar del depósito mineral Cajálbana para fines metalúrgicos. *Minería y Geología*, 34(3): 318-330.

Información adicional

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

WRRM: diseño de la investigación, asesoría del procesamiento de los datos, redacción del manuscrito y revisión final. EMH: diseño de la investigación, procesamiento, análisis e interpretación de los datos y preparación del manuscrito original. MFR: suministro de la información utilizada, procesamiento de los datos y revisión final del original

ORCID

WRRM, <https://orcid.org/0000-0003-2938-6472>

EMH, <https://orcid.org/0000-0002-5229-6160>

MFR, <https://orcid.org/0000-0002-8442-3734>

Recibido: 07/05/2020

Aceptado: 09/06/2020