

Generalización de las propiedades físicas de densidad y susceptibilidad magnética en la región centro-oriental de la provincia de Pinar del Río

Generalization of density physical properties and magnetic susceptibility in central-eastern region Pinar del Río province



<http://opn.to/a/ntgTc>

Magaly Fuentes Rodríguez ^{1*}, Irelys Matos Oliva ¹, Walfrido Alfonso San Jorge ¹,
Juan Jesús Moya Rodríguez ¹

RESUMEN: Las mediciones de las propiedades físicas de las rocas en Cuba se han realizado en la mayoría de los trabajos geólogo-geofísicos ejecutados en la parte centro-oriental de la provincia de Pinar del Río, por su alto potencial para la prospección de minerales. Esta información obtenida ha quedado dispersa y, por consiguiente, poco atractiva y en muchos casos escasamente considerada para futuros estudios geólogo-geofísicos en la zona. Teniendo en cuenta esta situación y la creciente necesidad de tener información precisa que permita mejorar la diferenciación de las formaciones geológicas y que sirva de apoyo a la prospección de minerales, se constituyó el problema que dio origen a esta investigación. El principal objetivo a cumplir consistió en generalizar las propiedades físicas densidad y susceptibilidad magnética de las rocas, para caracterizar las formaciones geológicas de la región centro-oriental de la provincia de Pinar del Río, a través del comportamiento de esas propiedades físicas. Con la caracterización de las formaciones por sus litotipos en este territorio se podrá enriquecer el conocimiento de las propiedades físicas y podrá servir de complemento en posteriores trabajos de prospección. Los principales resultados alcanzados consistieron en el procesamiento estadístico de las propiedades físicas densidad y susceptibilidad magnética, que fue representado en forma de tablas mostrando el comportamiento de cada propiedad según su valor en las diferentes formaciones y litotipos identificados. Además, se confeccionaron variantes de mapas de densidad y susceptibilidad magnética para ser comparados con los campos físicos magnéticos y gravimétricos, así como con la geología del área investigada.

Palabras clave: densidad, generalización, susceptibilidad magnética, propiedades físicas.

ABSTRACT: The measurements of the rocks physical properties in Cuba have been carried out in most geological-geophysical works performed in the eastern central part of the Pinar Del Río province, due to their high potential for mineral prospecting. This information has been dispersed and therefore unattractive and in many cases just considered for future geologist-geophysical studies in the area. Taking into account this situation and the growing need for accurate information to improve the differentiation of geological formations that support mineral exploration, it was the problem that gave rise to this research. The main objective to be fulfilled was to generalize the rocks physical density and their magnetic susceptibility properties to characterize the geological formations of the eastern central region of the Pinar Del Río province through the behavior of the aforementioned physical properties. With the characterization of the formations by their litho-types in this territory, knowledge of physical properties can be enriched and can be used as a complement in subsequent prospecting works. The main results obtained consisted of the statistical processing of the physical properties density and magnetic susceptibility, which are represented in tables, which show the behavior of each property according to its value in the different formations and litho-types identified in addition variants. Maps were made of density and magnetic susceptibility, to be compared with the magnetic and gravimetric physical fields as well as with the geology of the investigated area.

Key words: density, generalization, magnetic susceptibility, physical properties.

Recibido: 15/11/2019

Aprobado en su forma original: 24/04/2020

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.

*Autor para correspondencia: Magaly Fuentes Rodríguez: E-mail: magaly@igp.minem.cu

INTRODUCCIÓN

Las propiedades físicas de las rocas constituyen la premisa fundamental de la utilización con éxito de los métodos geofísicos para las investigaciones geológicas de búsqueda y prospección de minerales, teniendo en cuenta que las anomalías geofísicas solo existen en caso que haya una diferencia de propiedades físicas entre el objeto a investigar y las rocas que lo rodean. Dentro de las propiedades físicas, las más estudiadas en el territorio nacional son la densidad y susceptibilidad magnética.

El estudio de las propiedades físicas de las rocas en la República de Cuba comenzó en las décadas del 60 y 70 relacionado con los trabajos geofísicos regionales; abarcó extensos territorios y se fue haciendo sistemático en el transcurso de los años, realizándose prácticamente para todos los trabajos de levantamiento geológico y de búsqueda a escala 1: 50 000 y 1:100 000. Estos trabajos tuvieron como base geológica enfoques diversos de la geología del territorio nacional, y los datos petrofísicos estaban cotejados con diferentes bases geológicas, lo cual dificultaba el uso de esos datos teniendo en cuenta la concepción actual de nuestra geología en el marco de la Tectónica de Placas. Además, en los sectores investigados realizaron trabajos petrofísicos a partir de toma de muestras, a veces de superficie y otras en profundidad, por litología o por formaciones. Esto ha traído como consecuencia que la información petrofísica esté dispersa, evaluada con criterios geológicos diferentes y de procedencia superficial o de pozos, lo que dificulta la utilización de los mismos para sustentar el empleo de los métodos geofísicos en la solución de tareas geológicas de búsqueda y prospección de minerales.

Desde el año 1994, el grupo de Geofísica del Instituto de Geología y Paleontología- Servicio Geológico de Cuba (IGP-SGC) ha estado completando un programa interno de revisión, sistematización y generalización de la información geofísica a escala regional de todo el país. Como parte de este programa se confeccionó un Proyecto Marco Petrofísico que consiste en generalizar las propiedades físicas de las rocas en las regiones Occidental, Central y Oriental. Este grupo confeccionó y ejecutó el

Proyecto I+D 613240 ([Pérez et al., 2012](#)) como primer Proyecto Marco Petrofísico, por lo que es necesario organizar esta información dispersa de forma tal que se pueda utilizar con fines cartográficos, prospección de minerales, de apoyo a los futuros proyectos de investigación del IGP-SGC y de las empresas geomineras territoriales, así como por instituciones docentes.

La situación descrita hasta aquí permite plantear como objetivo general de la investigación: generalizar las propiedades físicas densidad y susceptibilidad magnética de las rocas de las formaciones de la parte centro-oriental de la provincia de Pinar del Río.

Los objetivos específicos derivados son:

1. Procesar los datos de las propiedades físicas de densidad y susceptibilidad magnética mediante tratamiento estadístico.
2. Explicar los resultados y vincularlos con la geología del área.
3. Explicar el comportamiento de los campos físicos de gravimetría y magnetometría de acuerdo con las propiedades físicas generalizadas.
4. Confeccionar mapas y tablas de propiedades físicas de densidad y susceptibilidad magnética de la región de investigación.

La región de investigación se encuentra en la parte centro-oriental de la provincia de Pinar del Río, corresponde con el área de los levantamientos geológicos CAME II y [Maximov \(1981\)](#). Abarca una extensión total de 4113,8 km². La [tabla 1](#) muestra las coordenadas del área de estudio.

El sector se caracteriza por una estructura geológica compleja donde están presentes las formaciones del Arco Volcánico del Cretácico (AVC), Margen Continental (MC), Secuencias Sinorogénicas (SS) y Cobertura Neoplatafórmica (CN) y van desde edad Jurásico hasta el Cuaternario ([Figura 1](#)).

MATERIALES Y MÉTODOS

En esta investigación se utilizaron los métodos gravimétricos y magnéticos, mientras que la información utilizada fue la correspondiente a los resultados de los mapas geofísicos regionales de gravimetría, magnetometría, intensidad y

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

Vértice	X	Y
1	205422.06	263035.26
2	205697.72	303371.42
3	215368.35	305085.57
4	215393.56	330000.00
5	243401.02	336610.62
6	243701.15	354396.36
7	294957.63	353630.87
8	294643.54	330630.36
9	284055.36	329592.02
10	284085.86	308820.54
11	270782.22	308312.31
12	270824.33	299726.90
13	236089.14	298000.51
14	235881.46	288564.41
15	221853.51	288068.39
16	221738.32	263551.67

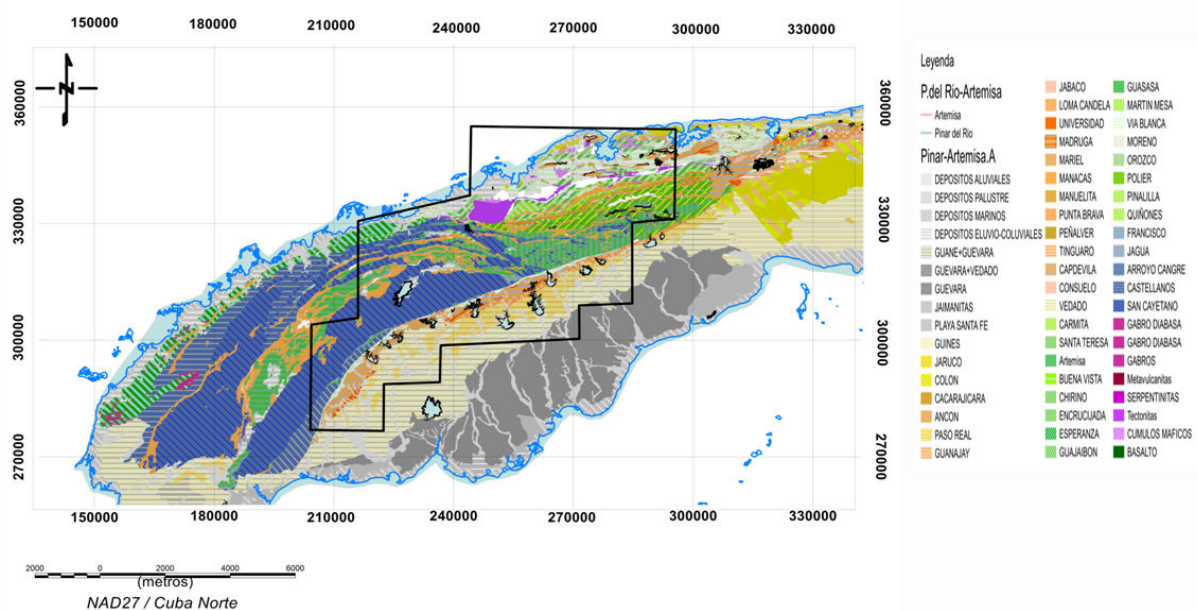


Figura 1. Mapa geológico del área de investigación a escala 1:100 000 (IGP, 2016) espectrometría gamma de la República de Cuba, a escalas 1: 2 000 000 hasta 1: 50 000.

Las técnicas utilizadas fueron: el sistema de procesamiento e interpretación de datos geofísicos Oasis Montaj, para la estadística descriptiva y la confección de histogramas se empleó las herramientas de Microsoft Excel y el programa estadístico Minitab.

Los materiales empleados en esta investigación fueron:

- Bases de datos de densidad (σ) y susceptibilidad magnética (k) generadas de los levantamientos geológicos CAME II y Maximov (1981).
- Mallas de datos del campo gravimétrico y aeromagnético a escala 1:100 000 del área de investigación.
- Mapa Geológico Digital del sector a escala 1:100 000 (IGP, 2016).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El fichero de densidad y susceptibilidad magnética para el procesamiento estadístico y la confección de los mapas es extraído de la base de datos correspondiente a los levantamientos geológicos [Maximov \(1981\)](#) y [Martínez \(1988\)](#), quedó conformado con la siguiente estructura: X, Y, Z₁, Z₂, y Z₃, donde X y Y corresponden con la ubicación espacial, Z₁ y Z₂ con los valores de densidad y susceptibilidad magnética, y Z₃ a la descripción litológica de la muestra. Posteriormente el fichero se importó al GIS QGIS, al estar georreferenciada y descritas las litologías en los pozos se pudo identificar las formaciones. Mediante procesos de filtrado se separaron las formaciones, posteriormente se realizó un nuevo filtrado para agrupar las litologías de cada una de ellas y se obtuvo para cada formación: los litotipos, propiedades físicas de densidad y susceptibilidad magnética con cantidad de muestras, valores máximos, mínimos

y promedios. Con el uso del Léxico Estratigráfico de Cuba ([IGP, 2013](#)) se puntualizó la edad de cada una de las formaciones y se actualizaron las que correspondían, con las descripciones actuales.

La base de datos quedó constituida por 324 muestras de pozos y brinda información hasta una profundidad máxima de 15 m para su posible correlación con la geología y los campos físicos de gravimetría y magnetometría.

Se hace un análisis estadístico por formaciones y litologías y se describe el comportamiento general de las propiedades físicas de las formaciones y las litologías presentes. Los resultados se muestran en el [Anexo 1](#).

La [Tabla 2](#) muestra los estadígrafos de la densidad y la susceptibilidad magnética del área investigada, mientras que en la [Figura 2](#) se observan los histogramas con su curva de frecuencia.

Tabla 2. Estadística descriptiva de σ y k

Estadígrafos	Densidad (t/m ³)	k (x10 ⁻³ SI)
Media	2.547274143	1.119235988
Error típico	0.011843771	0.254888256
Mediana	2.63	0.0628
Moda	2.69	0
Desviación Estándar	0.212198609	4.580902906
Varianza	0.04502825	20.98467143
Curtosis	2.680101968	42.84116245
Coefficiente de variación	-0.855243571	6.106388962
Rango	1.73	45.844
Mínimo	1.79	0
Máximo	3.52	45.844
Nivel de confianza (95%)	0.023301495	361.513224

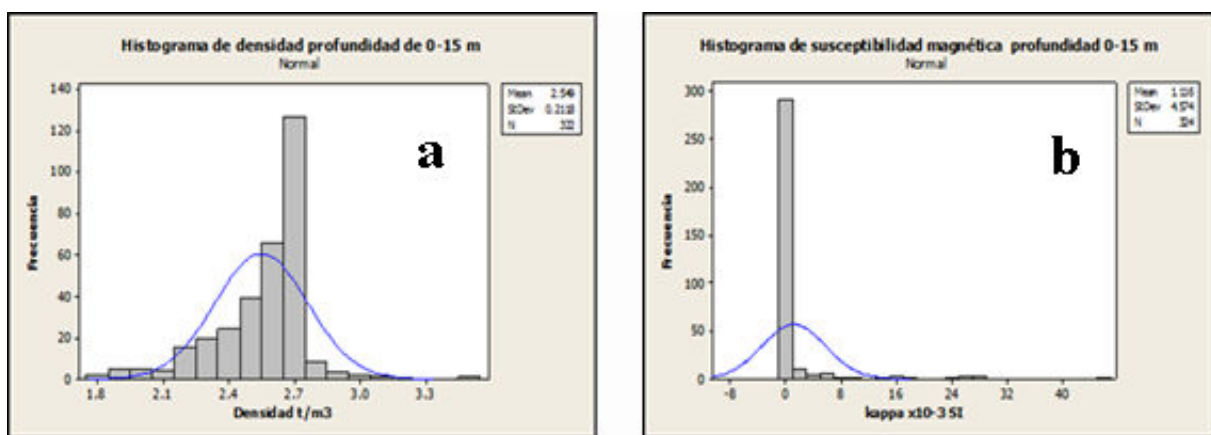


Figura 2. Histogramas de σ (a) y k (b).

En el análisis de la forma de los histogramas de σ y k para este intervalo (Figura 2), en ambos casos se observa la no normalidad de los datos. A partir del análisis de la media ($\bar{X}$), la mediana (Md) y la moda (Mo) existe asimetría a la derecha para la σ , y a la izquierda para k .

La estadística realizada Tabla 2 permitió determinar que la σ media de este intervalo es 2.55 t/m^3 con un valor mínimo de 1.79 t/m^3 que corresponde al pozo PM-420 de la Fm. Paso Real, con una profundidad de 10 m y litología representada por calizas organógenas blanca-amarillento, muy carbonatadas. El valor máximo es 3.52 t/m^3 en el pozo PM -233 de la Fm. Manacas, a una profundidad de 8 m y litología representada por aleuroarenisca amarilla muy oxidada. Para el caso de k el valor promedio resultó ser $1.12 \times 10^{-3} \text{ SI}$, con mínimo de 0, que aparece en la gran mayoría de las litologías presentes en el área, sin embargo, en la literatura consultada no existe ningún tipo de material con este valor, podría ser que los equipos utilizados

para la medición de las muestras por su alta sensibilidad asumieron el valor de 0 por estar muy cerca de este. Un máximo de $45.84 \times 10^{-3} \text{ SI}$ fue identificado en el Pozo PB-70, en las ofiolitas a la profundidad de 4 m con presencia de serpentinitas. La litología con mayor cantidad de muestras son las calizas, en su mayoría pertenecientes a la Fm. San Cayetano, con una densidad media de 2.62 t/m^3 y una k promedio de $0.05 \times 10^{-3} \text{ SI}$. Los resultados se muestran en la Tabla 3 y la Figura 3.

Para la confección de los mapas clasificados el fichero resultante de densidad y susceptibilidad magnética fue preparado en Excel, para ser importados al programa Oasis Montaj, que tiene en el módulo de Herramienta de Mapas, la variante de clasificación de puntos proporcionales.

La densidad se clasificó teniendo en cuenta el espectro de valores y quedaron establecidos 6 rangos:

Tabla 3. Estadística descriptiva de las calizas

Estadígrafos	Densidad (t/m^3)	$k \times 10^{-3} \text{ SI}$
Media	2,617210145	0,054836232
Error típico	0,014662447	0,018605192
Mediana	2,67	0
Moda	2.69	0
Desviación Estándar	0,172244753	0,218561518
Varianza	0,029668255	0,047769137
Curtosis	7,312287757	97,25942787
Coefficiente de variación	-2,271259259	9,3996219
Rango	1,34	2,3864
Mínimo	1,79	0
Máximo	3,13	2,3864
Nivel de confianza (95%)	0,02899398	0,036790487

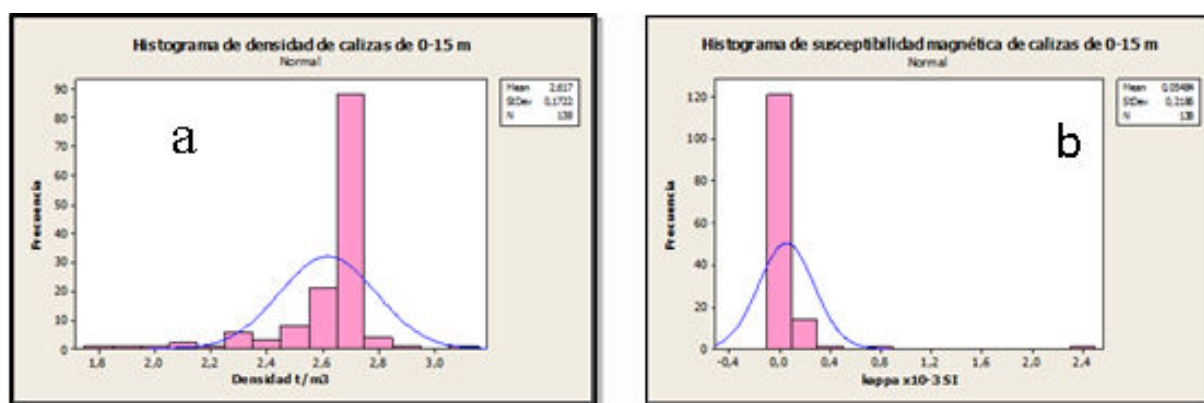


Figura 3. Histogramas de σ (a) y k (b) de las calizas.

- Menores que 2 t/m³
- Mayores que 2 t/m³ y menores que 2.5 t/m³
- Mayores que 2.5 t/m³ y menores que 2.50 t/m³
- Mayores que 2.50 t/m³ y menores que 2.75 t/m³
- Mayores que 2.75 t/m³ y menores que 3.0 t/m³
- Mayores que 3 t/m³

Para la susceptibilidad magnética los rangos de variación son los establecidos por L.D. Bersudskin en (Alonso, 2008). Se realizó la conversión de estos rangos de CGSM a Sistema Internacional (SI).

- Rango de 0 hasta 30 X 10⁻⁶ CGSM: No magnéticas
- Rango de 30 hasta 100 X 10⁻⁶ CGSM: Prácticamente no magnéticas
- Rango de 100 hasta 1000 X 10⁻⁶ CGSM: Débilmente magnéticas
- Rango de 1000 hasta 5000 X 10⁻⁶ CGSM: Magnéticas
- Rango >5000 X 10⁻⁶ CGSM: Fuertemente magnéticas.

A cada uno de los rangos se le asignó un color que corresponde con la escala de intensidad de colores establecidos para la confección de los mapas de los campos físicos gravimétricos y magnéticos.

Se confeccionaron los mapas de puntos clasificados de σ y k (Figura 4), una variante de mapa que fue seleccionada para visualizar mediante puntos coloreados los rangos de valores de las propiedades físicas estudiadas, y con el

objetivo de ser comparados, posteriormente, con los mapas de los campos físicos gravimétrico (ΔG) y magnético (ΔT), y el mapa geológico.

Como se puede observar en la región que abarca los levantamientos geológicos CAME II-[Maximov \(1981\)](#), aunque la densidad de puntos por km² es suficiente para la confección de los mapas de densidad y susceptibilidad magnética a escala 1: 100 000, su distribución no es homogénea, lo que provocaría la aparición de falsas anomalías en el mapa interpolado. En el análisis de la [Figura 4](#) a se observa que en la parte noreste del área existe alternancia de valores de densidad en el rango de 2.25 a 2.75 t/m³. Esta variación de la densidad se supone que sea producto de los cambios litológicos en esa zona, donde existe un desarrollo de las ofiolitas y del Arco Volcánico del Cretácico (AVC).

En la parte centro-oeste predominan los valores de densidad en el rango de 2.50 a 2.75 t/m³ correspondientes a las secuencias carbonatadas y silicoclásticas de la Sierra del Rosario. (Margen Continental). En la parte sur puede notarse la presencia de una cadena de puntos con valores moderadamente altos de densidad que establecen un límite orientado en dirección OSO a ENE, el cual puede estar cartografiando la falla Pinar.

Al sur del mencionado límite predominan los valores bajos de densidad de 2.50-2.25 t/m³ los que están relacionados con las cuencas sinorogénicas y la cobertura sedimentaria neógeno-cuaternaria.

De igual forma, aunque no con una tendencia tan precisa como en el caso de la densidad, dado el carácter más ruidoso de la distribución de la

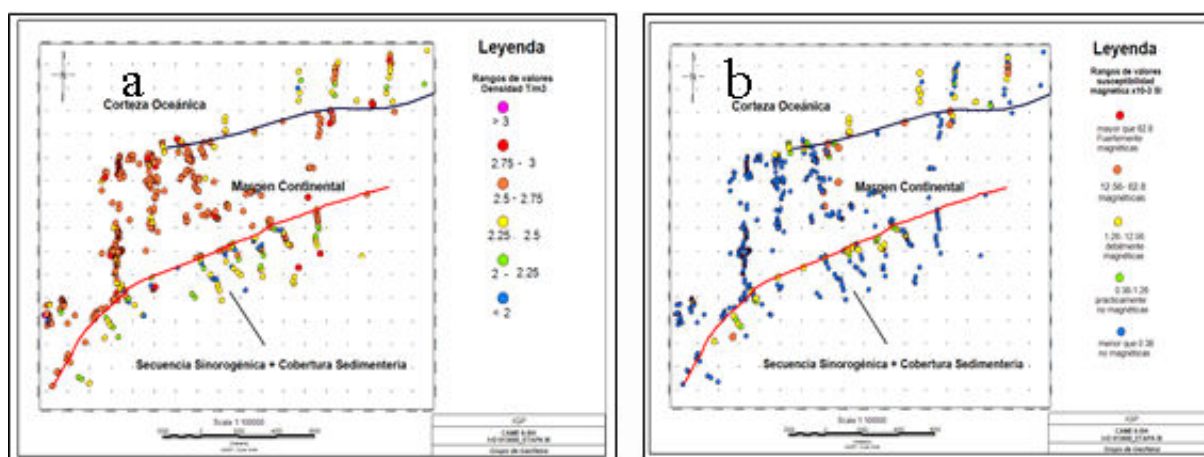


Figura 4. Mapa de puntos clasificados de σ (a) y k (b).

susceptibilidad magnética (Figura 4b), también aquí es observable la misma respuesta regional mostrada en la Figura 4a.

En la parte noreste del área hay una variación de la susceptibilidad magnética desde el rango de poco magnéticas a magnéticas, evidenciando los cambios litológicos asociados a las ofiolitas y a las rocas del AVC.

En la parte centro-oeste predominan las rocas poco magnéticas que están asociadas a las secuencias del Margen Continental.

El límite que puede estar asociado a la presencia de la falla Pinar se encuentra dentro del rango de valores débilmente magnéticos.

Al sur de este límite prevalecen las rocas dentro del rango de valores no magnéticos que están relacionados con las cuencas sinorogénicas y la cobertura neógeno-cuaternaria.

A diferencia de los valores medidos de las propiedades físicas, de carácter puntual y solo con la influencia de la propia muestra, los campos físicos de ΔG y ΔT contienen influencia de las variaciones laterales y verticales de la distribución de la propiedad física a la que ellos responden, por lo que no es posible esperar una correspondencia exacta entre ambos tipos de mapas. Sin embargo, esa propia falta de correspondencia permite un mejor análisis y comprensión del comportamiento de los campos físicos observados, al hacer posible una mejor explicación de su comportamiento a través de la comparación entre campo observado y la distribución espacial a escala regional de la propiedad física generadora de éste a una determinada profundidad.

En consecuencia, se confeccionaron los mapas de ΔG y ΔT de la región que abarcan los levantamientos geológicos CAME II-Maximov (1981). La superposición de mapas clasificados de densidad y susceptibilidad magnética sobre los mapas de campos físicos de ΔG y ΔT se muestra en la Figura 5. En la Figura 5a se observa una tendencia general del aumento de densidad en la dirección sur a norte y se confirma la existencia de los tres límites definidos en los mapas clasificados de densidad y susceptibilidad magnética (Figura 4).

- Corteza Oceánica (ofiolitas y AVC).

El campo ΔG responde con valores máximos, revelando la existencia de rocas de densidad elevada y muy bien marcado el contorno de las ofiolitas.

- Margen Continental (Sierra de Los Órganos).

Caracterizados por valores medios y mínimos relativos del ΔG .

- Secuencia sinorogénica más Cuenca Sedimentaria.

Separada del Margen Continental por la falla Pinar (la cual está presente en todos los mapas de campos físicos por su contraste de propiedades físicas). Al sur de ella predominan las rocas de baja densidad manifestándose con zona de mínimos de ΔG .

En la zona correspondiente a la corteza oceánica el campo ΔT se manifiesta con contrastes de valores máximos y mínimos moderados (Figura 5b). La presencia de rocas no magnéticas en el Margen Continental se refleja

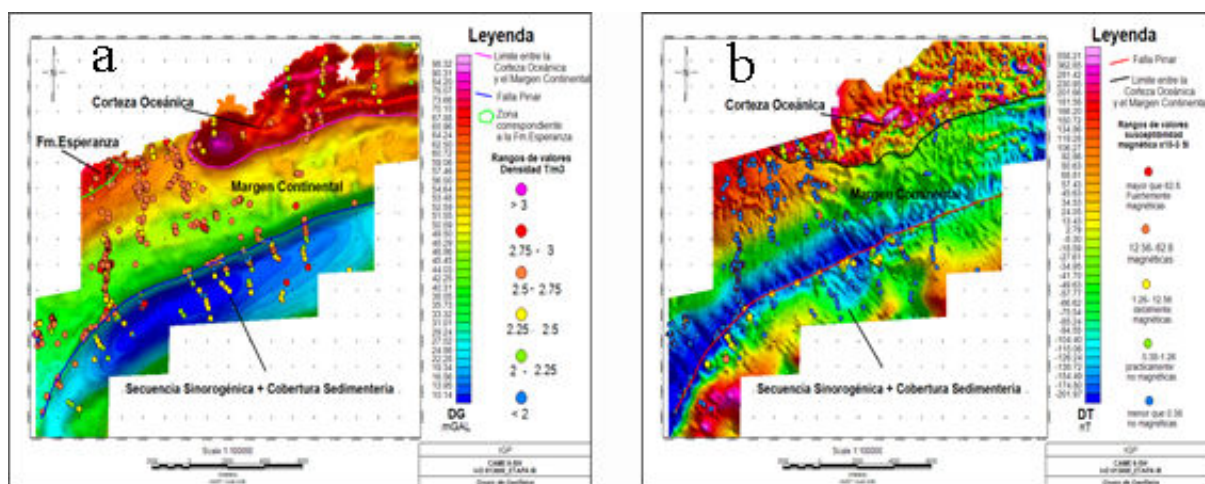


Figura 5. Mapa clasificado de σ y k superpuesto a los campos físicos ΔG (a) y ΔT (b)

en la existencia de valores intermedios del campo ΔT .

La zona correspondiente a la secuencia sinorogénica más cobertura sedimentaria, el campo ΔT se presenta con valores de intermedios a máximos a pesar de que los resultados de propiedades físicas reflejan la existencia de rocas no magnéticas. Esta situación se explica por la influencia de rocas magnetizadas situadas en la profundidad.

Los mapas clasificados de σ y k sobre el mapa geológico mostrados en la [Figura 6](#) justifican la existencia de las tres zonas descritas, en la [Figura 4](#). Con ambas propiedades físicas se puede observar en la parte noreste que la alternancia de valores mínimos, máximos e intermedios responde a los cambios litológicos en esa zona que caracterizan las ofiolitas y rocas del AVC.

Los valores de densidad en el rango de 2.5-2.75 t/m³ y los de susceptibilidad magnética en el rango de no magnéticas y prácticamente no magnéticas, evidencian el comportamiento de las rocas del Margen Continental; mientras que los valores de densidad en el rango de 2-2.50 t/m³ y los de susceptibilidad magnética en el rango mínimo de clasificación, ubicados al sur de la falla Pinar, responden a la presencia de las secuencias sinorogénicas mas cobertura sedimentaria. La falla Pinar en el mapa clasificado de densidad se identifica por la presencia de una cadena de puntos con valores moderadamente altos de densidad en el rango de 2,5 a 2,75 t/m³ orientado en dirección OSO a ENE.

Esta situación también se observa en el mapa clasificado de susceptibilidad magnética por la presencia de una cadena de puntos con valores en

el rango de débilmente magnéticos y orientado en la misma dirección. Tales límites están muy bien definidos en el mapa geológico.

CONCLUSIONES

1. El análisis estadístico permitió definir el comportamiento de la densidad y susceptibilidad magnética según sus estadígrafos.
2. La densidad se mantiene con poca variación en toda el área de investigación y tiende a aumentar con la profundidad.
3. Los cambios en la susceptibilidad magnética están condicionados a la presencia de materiales ferromagnéticos, polimícticos y volcanomícticos.
4. Los valores de k reportados como 0 en varias litologías de las rocas de la región indican bajo contenido de materiales magnéticos.
5. Con los mapas clasificados se pudo identificar los diferentes elementos paleotectónicos existentes en el área de investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- A.B.A, Julio; R.I., Agustín; F.L. Sandra; S.H., Elieser; N.M., Héctor; G.C. Haydee & P.R. Diabelys. 2016. Digitalización de la información geológica primaria sobre los resultados de los trabajos complejos geólogos geofísicos a escala 1: 50 000 en la zona de Bahía Honda. Geominera Pinar del Río.
- Astajov, K.; Solianik, V.; Vasiliev, V.; Martínez, D.; Fernández, R. & Oubiña, J. 1981. Informe sobre los trabajos de levantamiento geológico a escala 1: .50 000 en la parte noroeste de Pinar del Río. La Habana, Cuba: Instituto de

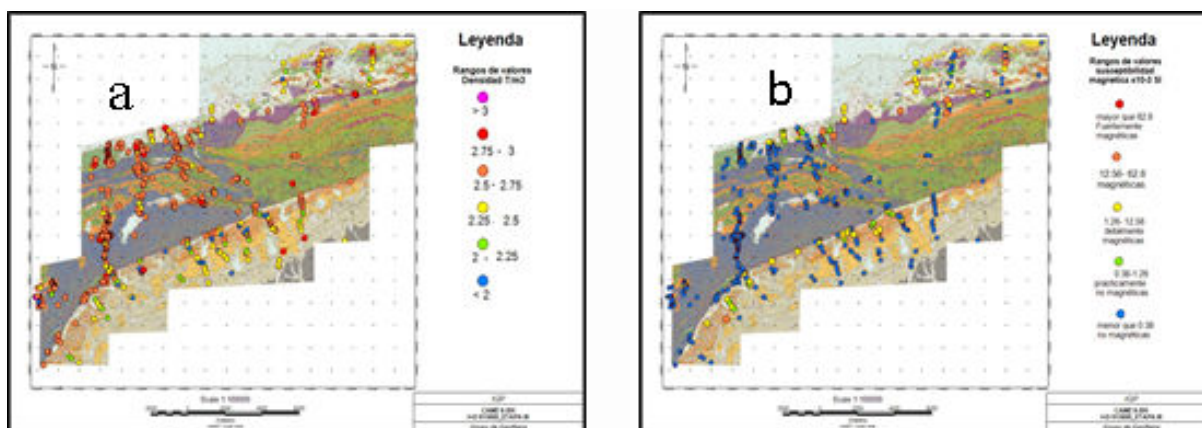


Figura 6. Mapa clasificado de σ y k superpuesto al mapa geológico.

- Geología y Paleontología, Servicio Geológico de Cuba.
- Atkinson, H. 1994. *Classification and Physical Properties of Rocks and Minerals*. Holanda.
- Babushkin, V.; Tseimakh, E. & Orlov, N. 1990. Informe de los trabajos de levantamiento geológico geofísicos a escala 1: 50 000 y búsqueda acompañantes en el municipio especial Isla de la Juventud en colaboración con la URSS (CAME). La Habana, Cuba: Oficina Nacional de Recursos Minerales.
- Ballote, J. 2017. Confección de los modelos físicos-geológicos a partir del análisis petrofísico de la región de Viñales- La Palma. Provincia de Pinar del Río. Tesis en opción al grado de Ingeniero Geofísico (inédita), La Habana, Cuba: CUJAE.
- Barbón, R., Hernández, D.; Sánchez, A L.; Pupo, Z.; Salinas, A.; Álvarez, P.; Rodríguez, E. & Pérez, J. 1991. Tarea Técnico Productiva: Pronóstico de Cobre, Júcaro-Buena Vista. Santa Lucía.
- Bersudsudskin, L.D. en Alonso, H. 2008. Petrofísica. La Habana, Cuba.
- Burov, V.; Martínez, D.; Jusaivov, Y. & Fernández, R. 1981. Informe sobre los trabajos de levantamiento geológico a escala 1: 50 000 realizados en la parte occidental de la provincia de Pinar del Río. Empresa de Geología, Pinar del Río,
- Caraballo, R.G. & Granda, M.F. 2015. Láminas del curso: Métodos Magnéticos.
- Cazaña, X, Zafra, J.L.T.; Copa, W.L.; C.-R. JL, Marrero, C.R.C.; Acosta, V.G.; Kramer, J.M.L.; Patterson, F.B.; Castro, A.I.L.; Castellanos, D.G.; Araujo, Y.R.; Rodríguez, Y.O; Torres, R.Y.; Vento, G.P.; Rosa, M.T.L. & Guanche, D.F. 2017. Memoria explicativa del Mapa Metalogénico de la República de Cuba a escala 1: 250 000. Cuba:
- Cobiella-Reguera, J. 2008 “Reconstrucción palinspática del paleomargen mesozoico de América del Norte en Cuba occidental y el sudeste del golfo de México. Implicaciones para la evolución del SE del Golfo de México”. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*.
- Díaz-Duque, J.A. 2013. Metodología de la Investigación Geofísica. La Habana: Editorial Félix Varela
- Dobrin, M.B. & SAVIT, C.H. 1988. Introduction to geophysical prospecting.
- Garapko, I.; Yurov, L. Chulga, A.; Sorokin, O. & Equipo, O. 1974. Informe sobre el levantamiento geológico y las búsquedas a escala 1: 100 000 realizados en los años 1971-1974. La Habana, Cuba: Instituto de Geología y Paleontología, Servicio Geológico de Cuba.
- García, D.; Delgado, R.; Rojas, Y; Millan, G.; Peñalver, L.M.; Cabrera Díaz, I.; Padilla, C., Torres A. & G. Furrzola. 2001. Generalización y actualización geológica a escala 1: 100 000 de la región Habana - Matanzas IGP, Cuba.
- García, D., GIL, S.; Delgado, R.; Millan, G.; Peñalver, L. M.; Cabrera, Denis R.; Chang, J.L.; Fuentes, M.; Díaz, C. & Suarez, V. 2003. Generalización y actualización geológica de la provincia de Pinar del Río. IGP-SGC,
- García, J.L. 2003. Petrofísica e interpretación integrada de datos aeromagnéticos, radiométricos y gravimétricos. Aplicaciones a los complejos ígneos del área de Monasterio. Escuela técnica Superior de Ingenieros de Minas, Departamento de ingeniería geológica, España.
- García, J.L. & Ayala, C. 2007. Cartografía Geofísica de la República Dominicana: datos de densidad, susceptibilidad magnética y magnetización remanente.
- Humpierre, A.V.A. 1987. Generalización preliminar de algunas propiedades físicas de Cuba Oriental. Tesis en opción al grado de Ingeniero Geofísico (inédita), La Habana, Cuba: ISPJAE.
- Instituto de Geología y Paleontología, Servicio Geológico de Cuba. 2016. Mapa Geológico de Cuba.
- Instituto de Geología y Paleontología, Servicio Geológico de Cuba. 2019. Sistema de clasificación de rocas cubanas.

- Instituto de Geología y Paleontología, Servicio Geológico de Cuba. 2013. *Léxico Estratigráfico de Cuba*. La Habana, Cuba:
- Ipatenko, S.P. 1985. Informe sobre los trabajos temáticos de la ENG en el año 1984 por el tema Generalización y reinterpretación compleja de los materiales geofísicos en los años 1980-1985. La Habana, Cuba: Instituto de Geología y Paleontología, Servicio Geológico de Cuba.
- Iturralde Vinent, M.A. 2012. *Compendio de Geología de Cuba y el Caribe*. La Habana, Cuba.
- Martínez, D.; Fernández, R.; Peláez, R.; Vázquez, M. & Barrios, E. 1991. Informe sobre los resultados del levantamiento y prospección preliminar a escala 1: 50 000 Pinar-Habana. La Habana, Cuba: Instituto de Geología y Paleontología, Servicio Geológico de Cuba.
- Martínez, D.; Fernández, R.; Reinoso, R.; Chang, J.C.; Fernández, O.; Valido, A.; Peláez, R.; Núñez, R.; Hernández, J.; Rodríguez, P.; Shalva, S.; Vázquez, M.; Yunttsky, V.; Precado, S.; Touchenko, V.; Shirueg, V. & Cofiño, C. 1988. Informe sobre los resultados del levantamiento geológico y búsqueda a escala 1: 50 000 en la parte central de la provincia de Pinar del Río. La Habana, Cuba: Instituto de Geología y Paleontología, Servicio Geológico de Cuba.
- Maximov, A.; Mechiakov, J.; Riabenko, S.; Bello, V.; Hevia, L.; Gómez, R. & Park, G. 1981. Informe sobre los resultados de los trabajos de levantamiento geológico a escala 1: 50 000 en la zona de Bahía Honda (Planchetas 3584-I, 3584-III parte norte) y 3584-IV. La Habana, Cuba: Instituto de Geología y Paleontología, Servicio Geológico de Cuba.
- Mesa, E. 2017. Caracterización Petrofísica de los principales litotipos presentes en la región de Bahía, Cuba Occidental como apoyo a la cartografía geológica y la prospección de minerales sólidos. Tesis en opción al grado de Ingeniero Geofísico (inédita). La Habana, Cuba: Instituto de Geología y Paleontología, Servicio Geológico de Cuba.
- Mondelo, F.; Sánchez, R.; Pardo, M.; Prieto, F.; Alfonso, W.; Petrus, N.; Escobar, E.M.; Moya, J.; Pérez, P.H.; Fuentes M.; Kessell, E.; & Aragón, R.V. 2011. Mapas geofísicos regionales de gravimetría, magnetometría, intensidad y espectrometría gamma de la república de Cuba a escalas 1: 2 000 000 hasta 1:50 000. La Habana, Cuba: Instituto de Geología y Paleontología, Servicio Geológico de Cuba.
- Mormil, S.; Norman, A.; Varvarov, A.; Skosiriev, V.; Linares, E. & Vergara, F. 1980. Geología y metalogenia de la provincia de Pinar del Río. La Habana, Cuba: Instituto de Geología y Paleontología, Servicio Geológico de Cuba.
- Mustelier, E.; Stout, R.; Puñales, J.A. & Valdés, R. 1990. Prospección preliminar y detallada: Bentonita, Bahía Honda, escala 1: 100 000. Pinar del Río.
- Padrón, C.; Fernández, R. & Suárez J. 1996. Informe sobre la generalización de las propiedades físicas en el noroeste de la provincia de Pinar del Río. Empresa de Geología Pinar del Río.
- 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 (inédita), La Habana, Cuba: CUJAE.
- Pérez, P., Pacheco, M.; Domínguez, E.; Fuentes, M. & P, Ingrid. 1996. Informe T.T.P. Generalización de los datos gravimétricos del occidente de Cuba, provincias Pinar del Río, La Habana, Matanzas e Isla de La Juventud. La Habana, Cuba: Instituto de Geología y Paleontología, Servicio Geológico de Cuba.
- Pérez, P.H.; Rodríguez, M.F.; Rodríguez J.J.M. & W.A.S. Jorge. 2012. Compilación y sistematización de las propiedades físicas de las rocas de la región occidental de Cuba. IGP.SGC, La Habana, Cuba.
- P.L. José, & F.G. Manuel, 2017. Notas de Petrofísica para geofísicos y geólogos.
- Ozzo, F.E.C. 2012. Mineralogía y propiedades magnéticas del Complejo Ofiolítico Tortuga, Tierra del Fuego. Tesis en opción al grado de

- Ingeniero Geólogo (inédita), Chile:
Universidad de Chile.
- Ramón, G. y Manuel, F. 2016. Láminas del curso: Métodos magnéticos.
- Rodríguez Basante, B. 1999. Interpretation of geophysical dataset for geological and structural mapping in Western of Cuba. Tesis en opción al grado de Master (inédita), International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciencies, Neederlands., Delft. Holanda.
- Spiegel, M. 1971. Teoría y problemas de estadística. Instituto Cubano del Libro.
- Tabares, C.V. & J.M. Alfaro. 2011. Características estructurales del límite entre las subzonas Sierra del Rosario y Bahía Honda en el sector San Juan de Sagua - Rancho Canelo. Tesis en opción al grado de Ingeniero Geofísico (inédita), Universidad de Pinar del Río
- Torres Zafra, J.L., Moreira J., Lavandero R.M. & M, Justo. 2004. Reevaluación metalogénica del potencial de los recursos minerales de oro, plata y polimetálicos asociados en secuencias ricas en materia orgánica Pinar del Río.
- Valle R, Denis.; S.H, Eliecer; F.D.L René.; F.L. Sandra, V. Odalis & D. Olimpia. 2016. BD Levantamiento 1:50 000 Pinar del Río central. EGP.

Anexo 1. Información estadística de σ y k por formaciones geológicas hasta la profundidad de 15m

Formación Geológica (0-15 m)	N. Muestras	Propiedades físicas											
		Densidad (t/m ³)						Suscept. magnét. x10 ⁻³ SI					
		Min.	Max.	Media	Mediana	Moda	Desv. Estánd.	Min.	Max.	Media	Mediana	Moda	Desv. Estánd.
Depositos Cuaternarios	20	2.22	2.76	2.58	2.65	2.67	0.141	0	5.34	0.73	0.05	0.00	1.54
Guane	1			2.71				0	2.51	1.20			
Paso Real	13	1.79	2.57	2.24	2.27		0.221	0	3.77	0.31	0.04	0.01	1.03
Capdevila	12	1.88	2.69	2.3	2.35	2.66	0.305	0	6.53	1.67	0.38	0.00	2.37
Loma Candela	4	2.44	2.67	2.53	2.51		0.102	0	0.09	0.02	0.00	0.00	0.04
Universidad, grupo	2	2.14	2.74	2.44	2.44		0.424	0.1	6.91	4.54	4.29		3.70
Manacas	37	2.17	3.52	2.61	2.66	2.69	0.220	0	10.4	0.33	0.03	0.00	1.71
Peñalver	1			2.21					0.19				
Maríel, grupo	6	1.84	2.62	2.17	2.16		0.273	0	4.65	1.88	1.62		1.94
Santa Teresa	2	2.56	2.61	2.53	2.64		0.106	0	0.14	0.07	0.07		0.10
Guajabón	1			2.71					0.01				
Encrucijada	14	1.89	2.76	2.53	2.55	2.45	0.208	0	28.89	7.22	0.38		11.07
Quinones	2	2.56	2.80	2.68	2.68		0.169	0.3	15.07	7.69	7.69		10.44
Orozo	4	2.17	2.67	2.42	2.44		0.224	0.1	25.1	6.41	0.20		12.41
Via Blanca	20	2.15	2.92	2.49	2.58	2.29	0.218	0	18.8	1.67	0.19	0.00	4.26
Artemisa	22	2.49	2.77	2.66	2.68	2.69	0.067	0	0.06	0.02	0.01	0.00	0.01
Guasasa	12	2.54	3.13	2.69	2.67	2.69	0.145	0	0.12	0.03	0.01	0.00	0.01
Esperanza	27	2.23	2.86	2.65	2.68	2.71	0.124	0	0.25	0.04	0.03	0.00	0.06
Jagua	7	2.27	2.70	2.54	2.65		0.171	0	0.15	0.04	0.04	0.00	0.06
Francisco	1			2.69					0.00				
San Cayetano y Mbro Castellanos	72(74)	1.89	2.73	2.52	2.57	2.68	0.174	0	3.20	0.23	0.09	0.00	0.37
Arroyo Cangre	20	2.40	2.77	2.61	2.63	2.69	0.098	0	0.25	0.09	0.10	0.03	0.07
Oñolitas	20	2.27	3.01	2.61	2.63	2.56	0.189	0	45.84	5.01	0.27	0.33	11.92

Anexo 2. Información estadística de σ y k de las litologías presentes hasta la profundidad de 15m

Litologías (0-15 m)	No. Muestras	Propiedades físicas									
		Densidad (t/m ³)					Suscep. magnét. x10 ⁻³ SI				
		Media	Mediana	Moda	Desv. Estánd.		Media	Mediana	Moda	Desv. Estánd.	
Calizas	138	2.62	2.67	2.69	0.17		0.05	0.00	0.00	0.22	
Areniscas	58(60)	2.47	2.51	2.36	0.20		0.71	0.13	0.06	1.86	
Arcillas	21	2.52	2.62	2.67	0.22		0.23	0.04	0.00	0.69	
Zonas Caóticas	13	2.62	2.61		0.18		5.49	0.34	0.19	8.92	
Porfiritas	12	2.57	2.57	2.57	0.25		3.79	0.33		6.42	
Aleurolitas	11	2.46	2.52		0.24		2.19	0.06	0.06	6.98	
Aleurolitas y areniscas	11	2.53	2.43	2.43	0.38		0.31	0.15	0.13	0.61	
Gravelitas	11	2.34	2.29		0.22		1.54	0.26		2.30	
Interv. fracturado	10	2.56	2.58		0.07		0.07	0.04	0.00	0.11	
Esquistos	6	2.63	2.64		0.13		0.10	0.12		0.07	
Serpentinitas	5	2.42	2.55		0.30		20.06	25.12		19.72	
Gabros	5	2.61	2.67		0.17		5.46	0.26		11.69	
Andesitas	4	2.56	2.56		0.09		0.39	0.38		0.24	
Gabrodiabasas	2	2.23	2.23		0.01		0.19	0.19		0.09	
Interc. de aleurolitas-areniscas-gravelitas	2	2.32	2.32		0.25		0.97	0.97		0.99	
Alternancia de esquistos y areniscas	1	2.39					0.09				
Arena arcillosa	1	2.67					0.04				
Conglomerados polimícticos	1	2.32					0.19				
Corteza de intemperismo	1	2.65					0.00				
Deluvio de areniscas	1	2.63					0.04				
Diabasas	1	2.12					3.14				
Gabroides	1	2.68					0.46				
Gravas	1	2.22					5.34				

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

Los autores de este trabajo declaran presentar una participación igualitaria en la concepción, ejecución y escritura de la investigación.

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/)