

Mapeo de estructuras sismo-generadoras en un sector del sistema falla Pinar

Mapping of seismic-generating structures in a sector of the Pinar fault system

Mapeamento de estruturas geradoras de sísmicos em um setor do sistema de falhas Pinar

Lazaro Javier Miranda Vega

Ingeniero Geólogo, profesor Instructor, Universidad de Pinar del Río Hermanos Saíz Montes de Oca, Facultad de Ciencias Técnicas, Departamento de Geología, Pinar del Río, Cuba.

 : lazarojaviermirandavega@gmail.com;  : <https://orcid.org/0000-0001-9821-2762>

Robert Ramírez Hernández

Doctor en Ciencias de la Geología, Profesor Titular, Universidad de Pinar del Río Hermanos Saíz Montes de Oca, Facultad de Ciencias Técnicas, Departamento de Geología, Pinar del Río, Cuba.

 : robertrh@upr.edu.cu;  : <https://orcid.org/0000-0002-0224-0011>

Para citar este artículo/To reference this article/Para citar este artigo

Miranda Vega, L. J., & Ramírez Hernández, R. (2023). Mapeo de estructuras profundas sismo-generadoras en un sector del sistema falla Pinar. *Avances*, 25(1), 63-79. <http://avances.pinar.cu/index.php/publicaciones/article/view/737/2064>

Recibido: 9 de junio de 2022

Aceptado: 25 de noviembre de 2022

RESUMEN

La investigación tiene como objetivo revelar las principales estructuras sismo-generadoras, así como servir de contribución al estudio de la sismicidad del sistema falla Pinar. Para ello se implementaron filtros pasa alta y baja en el dominio de las frecuencias espaciales, basado en la transformada de Fourier (filtro de Butterworth). Para la representación espacial de las estructuras se emplearon

reglas interpretativas basadas en modelos de diques no magnéticos. Los filtros se aplicaron a la componente total del campo geomagnético, lo que permitió identificar estructuras regionales con profundidades de 14.57 km, 4.07 km y 1.87 km y para las locales 498 m, 277 m y 89 m. El patrón de anomalías obtenidas en las componentes con rumbo preferencial suroeste-noreste está relacionado con fallas de

sobrecorrimientos, mientras que las que poseen rumbo preferencial sureste-noroeste se relacionan con fallas de desgarre. Los sismos que son generados a profundidades entre 15 km y 20 km están asociados a estructuras regionales, mientras que los sismos que se generan a profundidades menores de 1 km están asociadas a estructuras locales. Los resultados obtenidos permiten demostrar que la fuente sismogénica más importante del área es el sistema falla Pinar.

Palabras clave: sismos; estructuras; filtro; modelos; método; sismogénica.

ABSTRACT

The present investigation aims to reveal the main earthquake-generating structures, as a contribution to the study of the seismicity is the Pinar fault system. For this, high-pass and low-pass filters were implemented in the domain of spatial frequencies, based on the Fourier transform (Butterworth filter).

INTRODUCCIÓN

Los estudios geofísicos son aplicados a zonas geológicas de tectónica compresiva, correspondientes a los llamados cinturones de cabalgamiento, los que presentan un gran interés exploratorio a escala mundial, por poseer cerca del 14 % de las reservas petroleras descubiertas y el 15 % del volumen que se estima está aún por descubrir (Miró-Pagés et al. 2017). En este caso particular la investigación está dirigida al mapeo de estructuras en zonas

For the spatial representation of the structures, interpretive rules based on non-magnetic dike models were used. These filters were applied to the total component of the geomagnetic field, which allowed the identification of regional structures with depths of 14.57 km, 4.07 km and 1.87 km and for the local ones 498 m, 277 m and 89 m. The pattern of anomalies obtained in the local components is related, some are associated with thrust faults with anomalies with a preferential southwest-northeast trend and other anomalies that respond to strike-slip faults with a preferential southeast-northwest trend. Earthquakes generated at depths between 15 km and 20 km are associated with regional structures, while earthquakes generated at depths less than 1 km are associated with local structures. The results obtained show that the most important seismogenic source in the area is the Pinar fault system.

Keywords: earthquakes; structures; filter; models; method; seismogenic.

geológicas de tectónica compresiva, a través de la aplicación de filtros en el dominio de la frecuencia espacial, para contribuir a los estudios de peligrosidad sísmica en la zona más occidental de Pinar del Río, específicamente en la zona sismogénica Pinar 6.1, de categoría sismotectónica 2A (Cotilla et al. 1993). El área cubre el margen norte de la cuenca Los Palacios, cuya frontera tectónica es la falla Pinar, la que posee un desplazamiento

horizontal izquierdo y otro normal (Cofiño & Cáceres, 2003). El área de estudio es denominada de baja sismicidad, aunque se han reportado 13 sismos entre los años 1880 al 2013. Resulta evidente que la interpretación sismotectónica del área tiene que ser abordada clasificando al área como una zona interior de placas y considerando a las fallas como estructuras homogéneas capaces de producir terremotos (Rubio, 1984).

Cofiño y Cáceres (2003) plantean que el sistema falla Pinar inicia su actividad al concluir los sobrecorrimientos laramídicos en el Eoceno Medio, manifestando cambios cinemáticos en su desplazamiento, siendo la falla Pinar la principal estructura sismo-generadora en la región (Ordaz et al. 2012). Según Burov et al. (1986) expresa que las profundidades de las estructuras de las fuentes de las anomalías residuales, tienen intensidades entre +10 nT a +15 nT, corresponden a estructuras alargadas con profundidades hasta los 300 m, mientras que la mayor profundidad calculada fue de 4 km. Serrano-Céspedes et al. (2019) plantean que la magnetometría aérea, en ausencia de sedimentos magnéticos, puede proporcionar información sobre la naturaleza y la forma del basamento cristalino, al cartografiar anomalías de poca amplitud.

Fernández de Lara et al. (2002) afirma que la falla Pinar tiene un desplazamiento vertical que contribuye a aumentar el gradiente gravimétrico

horizontal en el contacto con la Cordillera de Guaniguanico, aunque presenta un mínimo para este parámetro en la vertical, que alcanza valores de 7-22 mgl/km, en una franja de 1-2 km de ancho, cercana al contacto. Santibañez et al. (2021) plantean modelos de parámetros físicos 3D y calcularon las respuestas locales de los campos gravitatorio y magnético, producidas por fuentes que se encuentran hasta los 400 metros de profundidad, además calcularon el comportamiento de la resistividad eléctrica en el corte geológico.

Los estudios gravimétricos han sido efectivos como apoyo al mapeo geológico, al revelar estructuras profundas, sin embargo, los estudios magnetométricos no han ofrecido los mismos resultados, al estar estos condicionados por factores como: las anomalías de los campos potenciales, la latitud magnética del sector objeto de investigación y que los métodos de filtrado empleados en el dominio espacial no han sido lo suficientemente eficaces (perdidas de armónicos simples). Estudios similares han sido realizados en regiones de geología muy compleja, como es el caso discutido por Jiménez de la Fuente et al. (2017), donde el mínimo gravimétrico obtenido demuestra un estrechamiento margen continental, hacia la provincia de Holguín, lo que corrobora la disminución de espesores de las unidades del margen y, por tanto, una reducción del área de exploración.

Florencia-Ahumada et al. (2017) construyeron un modelo 1D de la corteza

en San Juan, Argentina, combinando datos sísmicos y petrológicos, para caracterizar litotipos utilizando propiedades físicas. Mientras, Barbary-Ahmed (2018) cartografió varios tipos de rocas en zonas desérticas de Egipto, integrando datos de vuelos geofísicos e imágenes satelitales. Batista-García, Vaga-Carreno y Capote-Marrero (2020) procesaron datos de los campos gravimétrico y magnético para determinar los gradientes horizontales en las diferentes direcciones, indicadores de fallas.

Rodríguez-Miranda, Mesa-Hernández y Fuentes-Rodríguez (2020) realizaron un 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, realizando pruebas de homogeneidad de medias. Conociendo que los campos potenciales responden a la influencia de cuerpos ubicados a diferentes profundidades se realizaron transformaciones que permitieran la detección de estructuras hasta aproximadamente los 300 m, ya que esta es la máxima profundidad que alcanzan los pozos en la región. Hechavarria, Rodríguez y Vega (2022) cartografiaron las unidades espectrométricas, 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.

De manera general el problema es: la necesidad de mapear las principales estructuras sismo-generadoras, así como servir de contribución al estudio de la sismicidad del territorio.

Teniendo en cuenta lo planteado anteriormente, se decide como objetivo de nuestra investigación aplicar los métodos magnetométricos específicamente filtros pasa alta y baja en el dominio de las frecuencias espaciales, basado en la transformada de Fourier (filtro de Butterworth) para revelar las estructuras profundas que poseen un carácter sismo-generador.

Geología

La Cordillera de Guaniguanico ocupa una posición bien definida en el borde suroccidental del Golfo de México. En ella se diferencian cuatro tipos de secuencias del paleomargen pasivo septentrional y que se encuentran en contacto tectónico entre ellas, entre las cuales se destaca el corte de Sierra de los Órganos. Numerosas investigaciones han manifestado el carácter alóctono de esta sierra, con una estructura geológica representada por mantos cabalgados y la superposición de los diferentes eventos tectónicos con sus implicaciones en las subsiguientes deformaciones plicativas y disyuntivas que agudizan su complejidad (Cáceres, 1997).

La Sierra de los Órganos es un sistema montañoso que se divide en tres unidades tectónicas de primer orden: Alturas de Pizarras del Sur, Alturas de

Pizarras del Norte y el Cinturón de Mogotes, ocupando este último una posición intermedia entre las dos primeras unidades. Estas secuencias limitan al sur con la falla Pinar, donde afloran rocas de un horizonte conglomerático, representado por clastos de gneis cuarzo-feldespáticos con mica moscovita y granate, rocas volcánicas efusivas y algunos fragmentos de rocas ígneas intrusivas de composición félsica (Rojo, 2017; Barrios & Gainza, 2018; Suárez, 2022).

El espesor de este horizonte es variable y manifiesta gradación en su granulometría (Cobiella, 2021), comportándose a lo largo del borde meridional de la Cordillera de Guaniguanico como una estructura única y uniforme perteneciente a la Fm. Capdevila. Por otra parte, el estudio detallado de la falla Pinar en el frente montañoso permite suponer la existencia de diferentes tramos o sectores con comportamientos diferenciales de los parámetros estudiados (segmentación), que indica niveles variables de actividad tectónica (Estévez-Cruz et al. 2021) (Figura 1). El rumbo de la falla es variable, propiciando el desarrollo de una estructura

en flor positiva, con la consecuente transpresión y extrusión tectónica, reactivación de los cabalgamientos y la aparición de nuevas estructuras acompañantes que se superponen a las anteriores (Cáceres & Cruz-Gámez, 2022).

Sismicidad y movimientos tectónicos recientes.

El territorio cubano se emplaza sobre la placa norteamericana, por lo tanto, la sismicidad que se registra en el territorio nacional está relacionada con la sismicidad interior de la placa de Norteamérica, bajo la influencia dinámica del límite de placas Caribe-Norteamérica en las zonas de fallas y sus intersecciones (Cotilla, 2019).

A esta zona de falla se asocia el terremoto de $M=5,9$ grados de magnitud Richter que produjo sacudidas de VIII grados de intensidad MSK en localidades de San Cristóbal y Candelaria, el 22 de enero de 1880 (Salteraín, 1884), así como numerosos eventos sísmicos de magnitudes inferiores, reportados en las cercanías de la falla Pinar entre 1880 y 2013 (Tabla 1).

Tabla 1. Sismos originados en el área de estudio. **Leyenda:** M= magnitud, N= sin información

#	Año	Mes	Día	X	Y	Prof. (km)	M
1	1880	1	26	219969	289467	15	3.0
2	1939	4	20	240725	299072	< 1	N
3	1973	N	N	234855	316891	20	3.0
4	1980	10	18	221377	310482	20	3.0
5	1981	6	9	207345	275303	15	3.2
6	1984	1	16	211508	277440	< 1	2.0
7	1985	2	15	242782	299038	< 1	2.0
8	1985	9	21	203816	306378	< 1	2.0
9	1985	6	13	230726	315854	< 1	2.0
10	2002	1	29	236814	311209	< 1	1.2
11	2002	1	29	236816	311320	< 1	2.0
12	2002	7	20	244786	314509	< 1	2.1
13	2011	11	1	215624	293975	< 1	0.8

Fuente: Datos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS).

Se puede establecer su funcionamiento en el tiempo como una falla sinestral (al inicio de su desarrollo) y como una falla normal en su etapa final donde se confirma su origen como una fractura de Riedel principal, provocada por la desviación al noreste del máximo stress compresivo σ_1 (Cofiño & Cáceres, 2003; Ramírez, 2018).

MATERIALES Y MÉTODOS

El sistema falla Pinar constituye la estructura tectónica de mayor extensión mapeada en superficie al sur de la

Cordillera de Guaniguanico, la cual se extiende por más de 170 km y alcanza una profundidad máxima de 25 km (Figura 1).

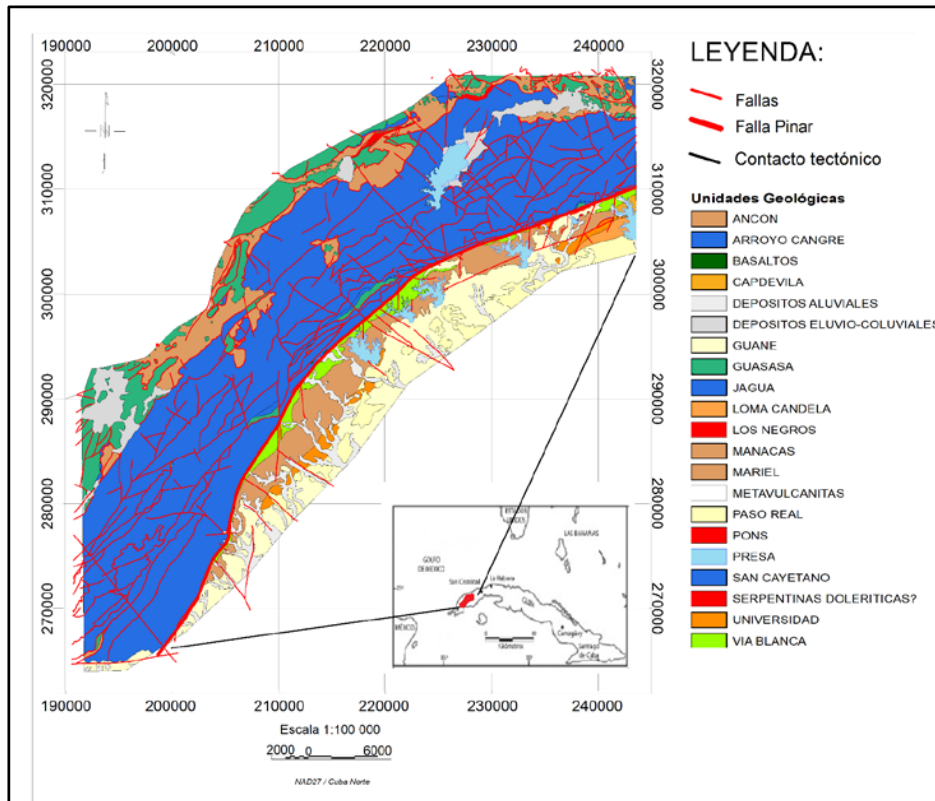


Figura 1. Esquema geológico escala 1:100 000. **Fuente:** Elaboración propia en base a García et al. (2005).

Magnetometría

Para el procesamiento se utilizaron los datos del vuelo aeromagnético CAME 1980. Esta información fue empleada, además, para crear los modelos derivados Campo de Referencia Geomagnético Internacional (IGRF) y diques no magnéticos. Esta base de datos corresponde a una red de puntos de la intensidad total del campo geomagnético y cuenta con 29 769 puntos, con un intervalo

entre ellos de 200 m x 200 m a escala 1:100 000. El modelo de diques no magnéticos fue empleado para construir perfiles con azimuts 0°, 45°, 90° y 315°, los que fueron generados por la herramienta Mag2DC (Cooper, 2002) mostrado en la Figura 2. Estos perfiles son procesados por el módulo de filtros en el dominio de Fourier.

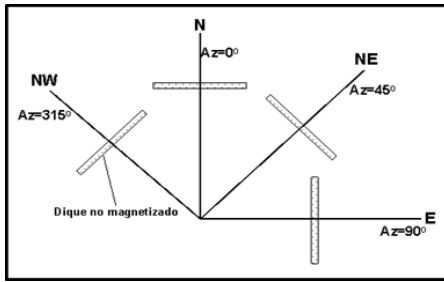


Figura 2. Modelos de diques en diferentes azimuts de los perfiles.

La metodología de procesamiento consta de tres etapas:

En la etapa 1 las anomalías magnéticas dipolares se transforman en anomalías monopulares centradas encima de los cuerpos anómalos, simplificando la interpretación de los datos (Serrano-Céspedes *et al.* 2019). Se elaboró el espectro radial promediado de potencia y a partir de este se estimó la profundidad promedio de las fuentes regionales y locales del campo geomagnético. El procedimiento consiste en definir un intervalo de corte, en valores de la frecuencia de Nyquist, y calcular los valores $\Delta \log(E)$ y ΔK para obtener la pendiente de la curva y así calcular la profundidad promedio de las estructuras regionales y locales (ecuación 1) según Meskó, (1984).

$$m = \frac{\Delta \log(E)}{\Delta K}; m = \frac{\log(E2) - \log(E1)}{K2 - K1} \quad [1]$$

Donde:

M= pendiente de la curva.

K1= número de ondas (ciclos/km) inicial.

K2= número de ondas (ciclos/km) final.

$\log(E1)$ = logaritmo de frecuencia de Nyquist inicial.

$\log(E2)$ = logaritmo de frecuencia de Nyquist final.

Para la estimación de la profundidad promedio de las estructuras se emplea la ecuación 2 (Meskó, 1984).

$$h = \frac{m}{4\pi} \quad [2]$$

Donde:

h= profundidad promedio de las estructuras

m= pendiente de la curva

En la etapa 2 se trazaron los perfiles de las anomalías esperadas del componente regional y local y se aplicaron reglas interpretativas para mapear las estructuras que se encuentran en varias direcciones. Este procedimiento dificulta la interpretación de las anomalías, por lo tanto, se optó por modelar estos perfiles en varias direcciones, con el propósito de hacer más exacta la ubicación espacial de estas estructuras. Posteriormente, los datos magnetométricos son filtrados en el dominio de Fourier, se elaboran los perfiles y se establecen cuáles son las respuestas esperadas en cada una de las direcciones, lo que permite establecer cuáles de ellas

son las más efectivas para el apoyo al mapeo estructural. En la tercera etapa se obtuvieron el campo regional y local mediante la aplicación de filtros pasa baja y alta frecuencia espacial Butterworth,

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El valor medio calculado de la intensidad del campo magnético total es 45534 nT, el ángulo de declinación es de $-0,0005^\circ$ (siendo despreciable su influencia en la obtención de la reducción al polo) mientras que el valor medio del ángulo de inclinación magnética es de 53.6° (Figura 3). Estos valores indican que la ubicación latitudinal del área de estudio es relativamente baja, influyendo significativamente en la forma de las anomalías y consecuentemente en la ubicación espacial de los cuerpos que se mapearon. Las profundidades promedio de las estructuras regionales son: de 14,5 km, 4,07 km y 1,87 km, mientras que las estructuras locales se encuentran a profundidades de: 498 m, 277 m y 89 m.

empleando la transformada de Fourier, lo que permitió elaborar el mapa de contacto estructural profundo de las estructuras sismogénicas.

Anomalías para modelos de diques.

En la Figura 4 se observa el modelo de la curva para estructuras regionales y locales, compuesto por prismas débilmente magnéticos y diques no magnéticos, a partir de los cuales se obtuvieron las anomalías para los rumbos predominantes en las estructuras locales (noroeste-suroeste y noroeste-sureste), que corresponden al azimut ¿rumbo? de los perfiles de 45° y 315° (Figura 2). En la Tabla 2 se aprecian parámetros cualitativos de las anomalías. Las características que aparecen en las columnas del signo y forma de las anomalías serán los criterios interpretativos para identificar aquellas zonas que definirán los límites entre los cuerpos del piso estructural inferior en el área de investigación.

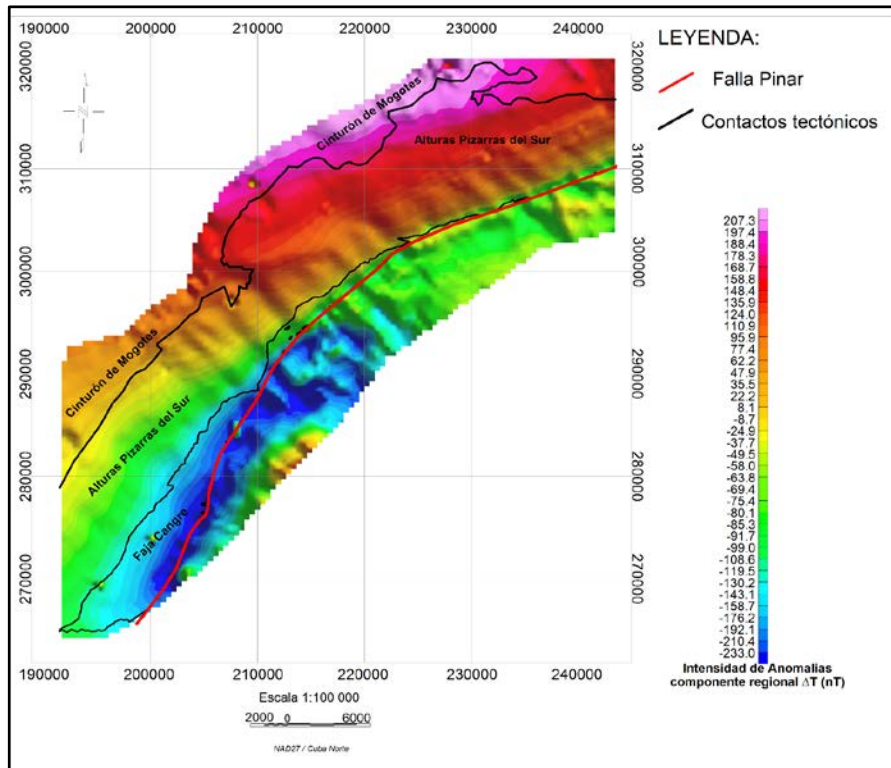


Figura 3. Mapa de intensidad de anomalías de la componente ΔT aplicando el filtro de Butterworth.

Tabla 2. Resultados cualitativos de las anomalías para perfil con azimut de 45° , con patrones de muy similar al perfil con azimut de 315° .

Azimut	Magnitud	Amplitud	Signo	Extensión	Forma	Ruido
45°	ΔT	13,5 nT	Negativo	3000 m	Mínimo ligeramente asimétrico	Bajo
315°	ΔT	13 nT	Negativo	3000 m	Mínimo ligeramente asimétrico	Bajo

Fuente: Elaboración propia.

La extensión de la anomalía manifiesta un cambio significativo en dependencia del rumbo de la estructura,

bajo la influencia del ángulo de inclinación magnética.

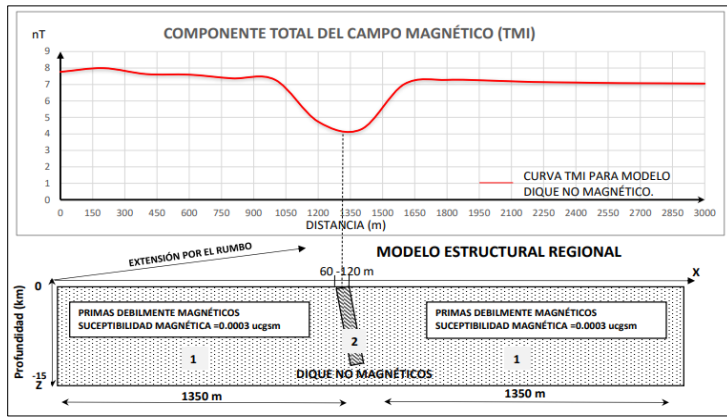


Figura 4. Perfiles de estructuras locales que corresponden al azimut de los perfiles de 45° y 315° (1: cuerpos de baja susceptibilidad magnética; 2: dique no magnético).

Componente residual del campo geomagnético

Los valores residuales del campo magnético varían entre -17.5 nT y 13.5 nT, por lo que los límites de las estructuras que

originan las anomalías regionales y locales se mapearon donde se registran los valores mínimos del campo magnético según el modelo dique no magnético (Figura 5).

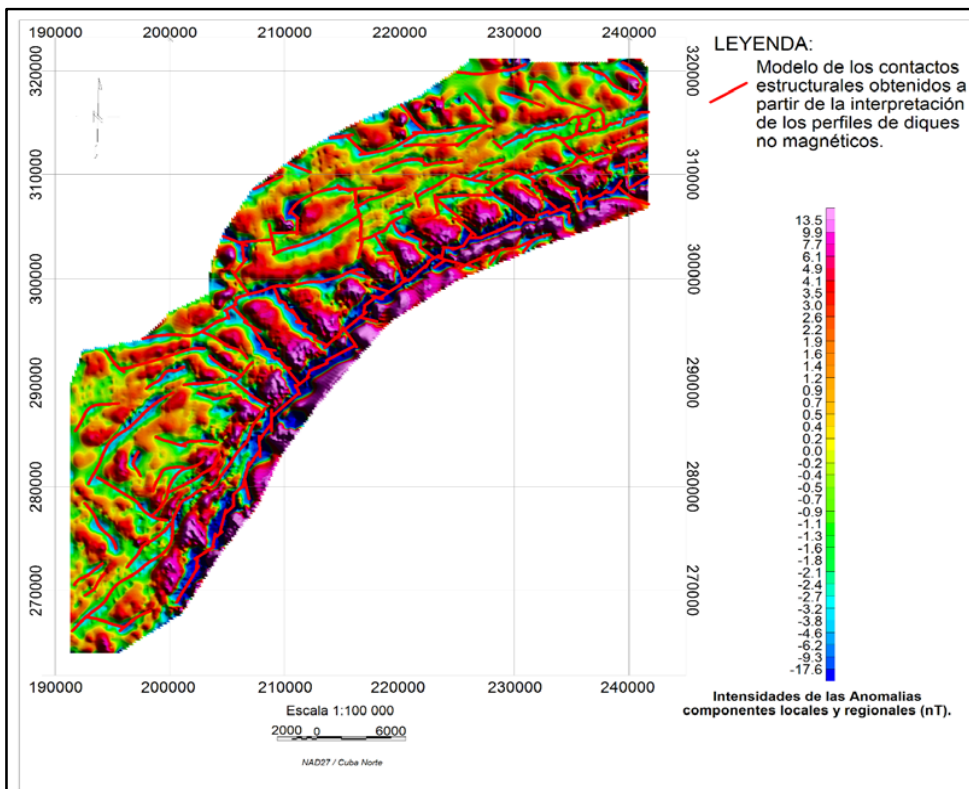


Figura 5. Mapa de anomalías de susceptibilidad magnética de la componente local del campo geomagnético aplicando el filtro pasa alta frecuencia espacial Butterworth.

Modelo estructural profundo

Se destacan dos direcciones principales de las estructuras (Figura 6): suroeste-noreste y sureste-noroeste, siendo esta última la dirección predominante. Se asume que los límites de las anomalías con dirección sureste-noroeste están asociadas a fallas de desgarres, mientras que las estructuras que se encuentran con rumbo suroeste-

noreste están asociadas a los frentes de los sobrecorrimientos. En la zona falla Pinar se observa que la estructura está constituida por un sistema de fallas escalonadas con rumbo suroeste-noreste, originadas bajo un régimen compresivo hacia el noreste del mapa y transpresivo hacia el sureste. Este sistema de fallas escalonadas representa las estructuras locales.

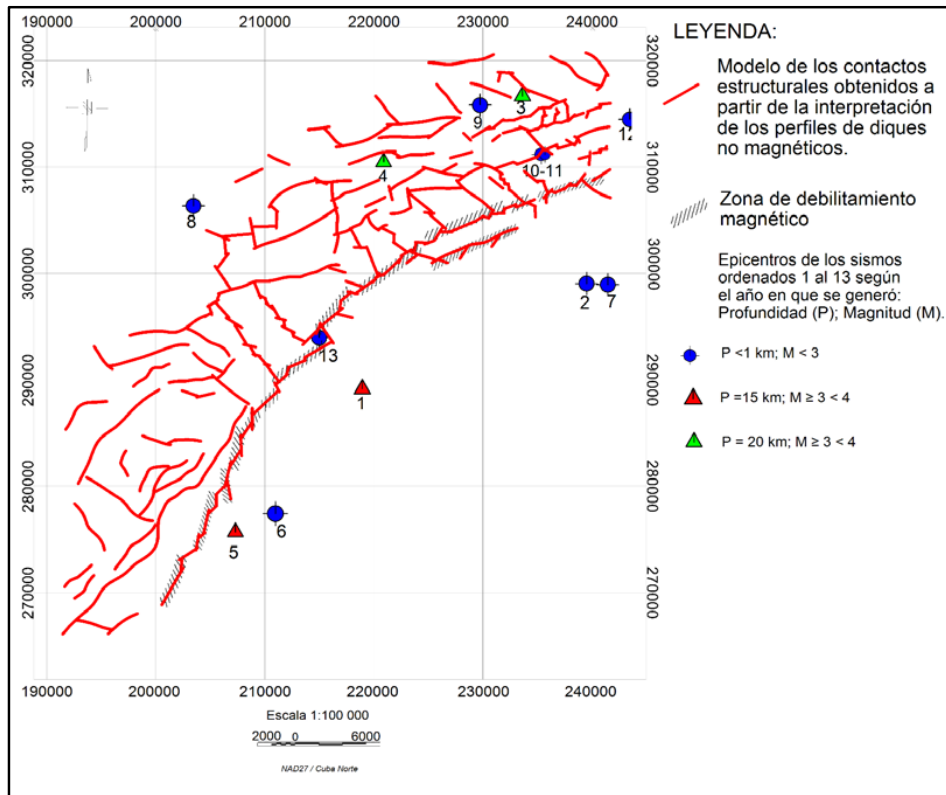


Figura 6. Modelo estructural profundo obtenido a partir de la interpretación de las anomalías de diques no magnéticos.

La profundidad promedio de las estructuras locales obtenidas por Burov et

al. (1986) es de 300 m, mientras que la profundidad de las estructuras regionales

es de 4 km. En esta investigación las profundidades de las estructuras locales se encuentran en los intervalos: 89 m, 277 m y 498 m, mientras que las estructuras regionales se localizan a los 1.87 km, 4.07 km y 14.57 km. Estos resultados son posibles debido al poder resolutivo de la anti transformada de Fourier y la aplicación del filtro de Butterworth empleado. Además, el cálculo de las profundidades en el dominio de la frecuencia, utilizado en este trabajo, es más resolutivo que el cálculo de las profundidades en el dominio del espacio, el cual fue empleado por Burov et al. (1986).

Los sismos registrados en áreas cercanas al sistema falla Pinar presentan profundidades variables, por lo que deben estar asociados a diferentes estructuras. Los sismos 1 y 5 (Tabla 1) se generaron a 15 km de profundidad, donde la fuente sismogénica es el sistema falla Pinar,

CONCLUSIONES

Las profundidades estimadas para las estructuras regionales, a partir de los estudios del campo magnético, fueron: 14.57 km, 4.07 km y 1.87 km y para las locales 498 m, 277 m y 89 m.

Los rumbos predominantes de las estructuras son: suroeste-noreste, de carácter regional, asociadas a fallas de sobrecojimientos y sureste-noroeste, de carácter local, asociadas a fallas de desgarres.

mientras que los sismos 2, 6 y del 7 al 13 tienen profundidades menores a 1 km, por lo que la fuente sismo- generadora debe estar asociada a las fallas de desgarres de naturaleza local. Al norte de la falla Pinar se encuentran los epicentros de los sismos 3 y 4, cuyos hipocentros se localizaron a 20 km de profundidad y la fuente de sismicidad está asociada a estructuras regionales. Los hipocentros de los sismos 8, 9, 10, 11 y 12 tienen profundidades menores a 1 km y la fuente sismo-generadora son las fallas de sobrecojimientos y de desgarre de carácter local. Los resultados obtenidos permiten demostrar que la fuente sismogénica más importante del área es el sistema falla Pinar, además de confirmar la existencia de la segmentación de la falla Pinar por su rumbo, lo que genera diferentes niveles de actividad tectónica, coincidiendo con lo planteado por Estévez-Cruz et al. (2021).

Los sismos que son generados a profundidades entre 15 km y 20 km están asociados a estructuras regionales, mientras que los sismos que se generan a profundidades menores de 1 km están asociadas a estructuras locales.

Existe una segmentación en diferentes tramos por el rumbo de la falla Pinar coincidiendo con movimientos diferenciales indicando diferentes niveles de actividad tectónica, un régimen compresivo hacia el noreste y uno transpresivo hacia el sureste.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barrios, L., & Gainza, A. (2018). *Relación genética entre los clastos de gneis presentes en el horizonte conglomerático de la Formación Capdevila en las localidades de El Guayabo y San Diego de los Baños* [Tesis de grado]. Universidad de Pinar del Río Hermanos Saíz Montes de Oca.
- 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.
- Batista-Garcia, J. C., Vega-Carreno, M. B., & Capote-Marrero, C. R. (2020). Identificación mediante interpretación geofísica del control estructural metalogénico en la zona aurífera La Unión-La Botija, provincias Camagüey y Las Tunas. *Minería y Geología*, 36(4), 377-389. ISSN 1993-8012.
- Burov, V., Martínez D., Yusainov Y., Fernández de Lara, R., Debenev, V., Uspensky, A., (1986). *Informe de los trabajos de levantamiento geológico escala 1:50 000 realizado en la parte occidental de la provincia de Pinar del Río*. Empresa Geológica Pinar del Río, O.N.R.M, MINBAS.
- Cáceres, D. (1997). *Estructura geológica y pronóstico preliminar para minerales básicos + barita en la parte central de las "Alturas Pizarrosas del Sur"*. Pinar del Río [Tesis presentada para la opción al título de Doctor en Ciencias Geológicas]. Universidad de Pinar del Río Hermanos Saíz Montes de Oca.
- Cáceres, D., & Cruz-Gámez, E. M. (2022). Implicaciones tectono-metamórficas bajo una dinámica de compresión en Faja Cangre, occidente de Cuba. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 39(1), 1-15.
- Cobiella, J. L (2021). *An Overview to the Tectonics of Cuba. Geology of Cuba*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67798-5_5, 189-218
- Cofiño, C. E., & Cáceres, D. (2003). Efectividad de la utilización de métodos microtectónicos en el desciframiento de la evolución de estructuras tectónicas (Falla Pinar), *Revista Minería y Geología*, 19(3-4), 29-34.
- Cooper, G. R. J. (2002). An improved algorithm for the Euler deconvolution of potential field data.

- The Leading Edge*, 21(12), 1197-1198.
- Cotilla, M. O. (2019). Sismicidad de interior de placa en Cuba. *Revista Geofísica*, 93-125.
<https://doi.org/10.35424/regeofi.v0i64.312>
- Cotilla, M. O., Álvarez, L., González, D., Pacheco, M., & Arteaga, E. (1993). *Elementos del esquema neotectogénico de Cuba. Informe Científico Técnico del departamento de Geofísica del Interior*, 100. La Habana: Instituto de Geofísica y Astronomía.
- Estévez-Cruz, E., Cueto-Gil, C. J., Díaz-Guanche, C., Ramírez-Hernández, R., & Ordaz-Hernández, A. (2021). Estudio del Frente montañoso de la zona de Falla Pinar, Cuba occidental, y su relación con la tectónica reciente. ISSN 0214-1744. *Cuaternario y Geomorfología*, 35(3-4), 29-53.
- Fernández de Lara, R., & Fajardo, S. (2002). Contribución de la Información Geofísica a la constitución geológica de la provincia de Pinar del Río en apoyo a modelos regionales de prospección, *Memorias del II Congreso Cubano de Geofísica*, Ciudad de La Habana.
- Florencia-Ahumada, M., Castro-de-Machuca, B., Alvarado, P., Ammirati, J. B., & 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, D. E., Gil, S., Delgado, R. D., Millán, G., Peñalver, L. L., Cabrera, M. C., Denis, R., Chang, J. L., Fuentes, M., Díaz, C. O., Suárez, V., Llanes, A. I., Pérez, R. A., Torres, M., Pérez, C. P., & Díaz de Villalvilla, L.C. (2005). Mapa geológico de la provincia de Pinar del Río a escala 1: 100 000, en base digital. *Geociencias 2005*, La Habana, Cuba.
- Hechavarria Govin, E., Rodríguez Miranda, W. R., & Vega Carreño, M. B. (2022). Contribución de los métodos geofísicos y la minería de datos a la cartografía geológica del sector Nueva Gerona, Isla de la Juventud. *Infomin*, 12, enero-diciembre. E-ISSN: 1992-4194.
https://www.researchgate.net/publication/346612682_Contribucion_de_los_metodos_geofisicos
- Jiménez de la Fuente, L., Cruz Toledo, R., Pérez Martínez, Y., Valdivia Tabares,

- C., Rodríguez Moran, O., & Pérez Peña, M.V. (2017). Métodos geológicos y geomorfológicos para la exploración petrolera en la región centro-oriental de Cuba. *Minería y Geología*, 33(1) enero-marzo 13-25. ISSN 1993 8012.
- Meskó, A. (1984). *Digital filtering applications in geophysical exploration for oil*. Akadémiai Kiadó, Budapest. Pitman publishing Ltd, London and Halsted Press, New York. 636 p.
- Miró-Pagés, G., Prol-Betancourt, J.G.L., Rifá-Hernández, M.C., & Echagarruga-Palomo, Y.M. (2017). Métodos geofísicos integrados en la exploración petrolera de los cinturones de cabalgamiento. ISSN 2223 -178, *Revista Cubana de Ingeniería*, VIII(1), enero - abril, 38 – 45.
- Ordaz, A., Chuy, T. J., Hernández, J. R., & García, J. A. (2012). División geológico-geotécnica aplicada a la zonación sísmica urbana: San Cristóbal, Cuba occidental, *Cuaternario y Geomorfología*, 26(1-2), 89-104.
- Ramírez, R. (2018). *Análisis morfotectónico del sector sur de la cordillera de Guaniguanico, entre las cuencas de los ríos el Cangre y San Cristóbal, Pinar del Río-Artemisa* [Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Geológicas], Universidad de Pinar del Río Hermanos Saíz Montes de Oca. 189 p.
- Rodríguez-Miranda, W. R., Mesa-Hernández, E., & Fuentes-Rodríguez, M. (2020). Caracterización petrofísica de los litotipos en la región de Bahía Honda, Cuba occidental. *Minería y Geología* 36(3) julio-septiembre, 284-299. ISSN 1993 8012.
- Rojo, N. (2017). *Caracterización de la composición litológica del horizonte conglomerático de la Formación Capdevila. Polígono Docente Las Terrazas. Artemisa* [Tesis de grado]. Universidad de Pinar del Río Hermanos Saíz Montes de Oca.
- Rubio, M. (1984). Seismicity of the Republic of Cuba and adjacent areas. *Academy of Sciences of Czechoslovakia's Report*, 60 p.
- Salteraín, P. (1884). Ligera reseña de los temblores de tierra ocurridos en la Isla de Cuba, *Anales de la Academia de Ciencias de La Habana*, 21, 203-218.
- Santibañez-Rodríguez, A. J., Nuñez-Haugh, L., & Díaz Duque, J. A. (2021).

Modelo físico geológico del acuífero cárstico San Diego de los Baños, Pinar del Río, Cuba. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, XLII(1), 79-95.

Serrano-Céspedes, K, Pardo-Echarte, M. E., & Vega-Carreño, M. B., (2019). Cartografía geólogo-estructural y litológica a partir de datos geofísicos del área de Rodas-Fomento (Cuba central). *Boletín de Geología*, 41(2). <https://doi.org/10.18273/revbol.v41n2-2019005>

Suárez, M. M. (2022). *Relación petrográfica entre los clastos de gneis del horizonte conglomerático de la formación Capdevila en San Diego de los Baños* [Tesis de grado]. Universidad de Pinar del Río Hermanos Saíz Montes de Oca.

Conflicto de intereses:

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Contribución de los autores:

Los autores han participado en el diseño, redacción del trabajo y análisis de los documentos.

Avances journal assumes the Creative Commons 4.0 international license