

Ubicación de elevaciones de los sedimentos plegados del paleomargen continental bajo las rocas del Arco Volcánico Cretácico y las ofiolitas para la exploración petrolera en Cuba

Aliss María Bejerano Kindelan¹, José Luis Gemen Prol Betancourt², Guillermo Miró Pagés³ y María Caridad Rifá Hernández⁴

- ¹ *Ingeniera Geofísica. Especialista III en investigación. Innovación y desarrollo. Centro de Investigaciones del Petróleo (CEINPET), La Habana, Cuba. Correo electrónico: aliss@digicupet.cu.*
- ² *Ingeniero Geofísico. Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Auxiliar del Centro Politécnico del Petróleo (CPP) y de la Universidad Tecnológica de La Habana «José Antonio Echeverría» (CUJAE). Investigador Auxiliar del Centro de Investigaciones del Petróleo (Ceinpet), La Habana, Cuba. Correo electrónico: prol@digicupet.cu.*
- ³ *Ingeniero Geofísico. Doctor en Ciencias Geológicas. Profesor Titular de la Universidad Tecnológica de La Habana «José Antonio Echeverría» (CUJAE), La Habana, Cuba. Correo electrónico: gmiró@civilmail.cujae.edu.cu.*
- ⁴ *Ingeniera Geofísica. Máster en Geofísica aplicada a la exploración de petróleo y gas. Profesora entrenadora del Centro Politécnico del Petróleo. Instructora de la Universidad Tecnológica de La Habana «José Antonio Echeverría» (CUJAE), La Habana, Cuba. Investigador Auxiliar del Centro de Investigaciones del Petróleo. Correo electrónico: rifa@digicupet.cu.*

RESUMEN

La modelación de las anomalías gravitacionales y magnéticas favorece la comprensión de la configuración y forma de yacencia de los cuerpos rocosos del subsuelo. Cada cuerpo rocoso da origen a diferentes anomalías de campos potenciales, en dependencia de la geometría de los mismos (profundidad, tamaño y extensión). Sin embargo, en condiciones geológicas complejas como son los cinturones de cabalgamiento, las rocas se encuentran imbricadas y una anomalía puede ser descrita como la suma de contribuciones de diferentes fuentes. Hallar un modelo adecuado para la ubicación elevaciones de los sedimentos plegados del paleomargen continental bajo las rocas del Arco Volcánico Cretácico y las ofiolitas conduce a la integración de información sísmica, datos geológicos superficiales y de pozos, y como metodología fundamental es impres-

cindible la analogía con las anomalías donde se ha encontrado este tipo de estructuras. De esta manera, se reduce así el grado de incertidumbre del modelo. El estudio del campo gravitacional en diferentes bandas del espectro de frecuencia y la modelación permitieron ubicar aquellos sectores donde con mayor probabilidad se elevarán las secuencias del paleomargen continental. De esta manera, como resultado se presenta un mapa de regionalización geológica de las anomalías gravitacionales y modelos geólogo-geofísicos a lo largo de perfiles representativos.

Palabras claves: paleomargen continental, arco volcánico cretácico, espectro de frecuencia, campo gravitatorio, campo magnético, modelación compleja.

ABSTRACT

The modeling of gravitational and magnetic anomalies

favors the understanding of the configuration and form of bedrock of the rocky bodies of the subsoil. Each rock body gives rise to different potential field anomalies, depending on their geometry (depth, size and extension). However, in complex geological conditions such as thrust belts, rocks are imbricated and an anomaly can be described as the sum of contributions from different sources. Finding a suitable model for the location of the folded sediment elevations of the continental paleomargin under the rocks of the Cretaceous Volcanic Arc and ophiolites leads to the integration of seismic information, surface geological data and wells, and as a fundamental methodology the analogy with the anomalies where this type of structure has been found. In this way, the degree of uncertainty of the model is reduced. The study of the gravitational field in different bands of the frequency spectrum and the modeling made it possible to locate those sectors where the sequences of the continental paleomargin were most likely to rise. In this way, as a result, a geological regionalization map of gravitational anomalies and geological-geophysical models are presented along representative profiles.

Keywords: continental paleomargin, Cretaceous volcanic arc, frequency spectrum, gravitational field, magnetic field, complex modeling.

RESUMO

A modelagem de anomalias gravitacionais e magnéticas favorece o entendimento da configuração e forma do alicerce dos corpos rochosos do subsolo. Cada corpo de rocha dá origem a diferentes anomalias de campo potenciais, dependendo de sua geometria (profundidade, tamanho e extensão). No entanto, em condições geológicas complexas, como cinturões de empuxo, as rochas estão imbricadas e uma anomalia pode ser descrita como a soma de contribuições de diferentes fontes. Encontrar um modelo adequado para a localização das elevações de sedimentos dobrados da paleomargem continental sob as rochas do Arco Vulcânico Cretáceo e ofiolitos leva à integração de informações sísmicas, dados geológicos de superfície e

poços, e como metodologia fundamental a analogia com as anomalias onde este tipo de estrutura foi encontrado. Desta forma, o grau de incerteza do modelo é reduzido. O estudo do campo gravitacional em diferentes bandas do espectro de frequências e a modelagem permitiram localizar os setores onde as sequências da paleomargem continental tinham maior probabilidade de subir. Desta forma, como resultado, um mapa de regionalização geológica de anomalias gravitacionais e modelos geológico-geofísicos são apresentados ao longo de perfis representativos.

Palavras-chave: paleomargem continental, arco vulcânico cretáceo, espectro de frequência, campo gravitacional, campo magnético, modelagem complexa.

INTRODUCCIÓN

En la interpretación de anomalías magnéticas y gravitacionales, ya sea la anomalía de campo total y anomalía de *Bouguer* completa respectivamente, uno de los métodos más usados es la modelación directa de estas anomalías (datos), mediante un proceso interactivo de prueba y error. La señal gravitacional/magnética producida por cuerpos de ciertas formas y contraste de densidades/magnetizaciones es directamente comparada con los datos. Si el ajuste a los datos se considera que es inadecuado, se varían las formas y densidades/magnetizaciones de estos cuerpos de modo iterativo, hasta conseguir el ajuste deseado. En este modelamiento, las estructuras a estudiar varían principalmente en 2 dimensiones (x, z) y en el sentido perpendicular (y) se extienden de manera indefinida. Aunque en la realidad este no sea el caso, el carácter bidimensional de las estructuras es, sin embargo, una buena y útil primera aproximación a la realidad.

Bejerano-Kindelan *et al.*, (2020) consideran que en el área de trabajo los cuerpos buzan en dirección sureste-noreste con aproximadamente 70 grados lo cual es apreciable con la información de los pozos perforados y por los modelos sismo-geológicos previamente concebidos.

Investigaciones anteriores han señalado el Mínimo Norte Cubano (MNC) como un rasgo primario en el

panorama regional del campo gravitatorio (Valencio *et al.*, 1960). A pesar de existir diversas opiniones sobre las fuentes geológicas que generan esta anomalía, se puede afirmar que la inmensa mayoría de los yacimientos descubiertos en el país hasta la actualidad, están localizados dentro de ese mínimo. La mencionada anomalía negativa responde a la existencia de grandes espesores de sedimentos plegados de las Unidades Tectono Estratigráficas (UTES) Placetas y Camajuani, y es el único argumento geofísico de carácter regional identificado hasta el presente, que presupone la posibilidad de encontrar a estas UTES en profundidad, ya sea recubiertas tectónicamente por las rocas del arco volcánico cretácico (AVC), las ofiolitas o sedimentos postorogénicos (Rifá-Hernández, 2012; Rifá-Hernández *et al.*, 2012; Prol-Betancourt *et al.*, 2016). Las variedades efusivas y efusivos-sedimentarias del AVC y las ofiolitas se agrupan en el denominado Terreno Zaza (Hatten *et al.*, 1958).

La extensión del MNC hacia el este expresa la posible existencia de sedimentos del paleomargen continental bajo el Terreno Zaza en esa dirección. Existen evidencias geológicas que hacen suponer la presencia

de estas rocas bajo las ultrabasitas, como son los afloramientos de la Sierra de Camaján, en la provincia Camagüey, considerados como un relictos de la UTE Placetas (Iturralde y Roque, 1982). En ese sentido el área de investigación, donde se han realizado algunos levantamientos sísmicos, incluye una parte del MNC.

UBICACIÓN GEOGRÁFICA

El área de trabajo Vertientes-La Gloria (**Figura 1**), cubre parte de las provincias Ciego de Ávila y Camagüey, al colindar al norte con la bahía de Jigüey y bahía La Gloria, al sur con la localidad de Vertientes, al este con el Neoplano Florida-Camagüey-Las Tunas y al oeste con el poblado Violeta en la provincia Ciego de Ávila. Toma parte de la llanura calcárea septentrional de Camagüey y ocupa un área de 7 900 m² (Matos-Jardines, Cuba. Político-Administrativo, 2014). En general, en el sector que ocupa la provincia camagüeyana, existen escasos grupos montañosos, entre los cuales se destacan: Sierra de Cubitas al este y Sierra de Najasa al sur. La principal elevación es el Cerro Tuabaquey con 335 m de altura (Matos-Jardines, Cuba. Físico, 2014).

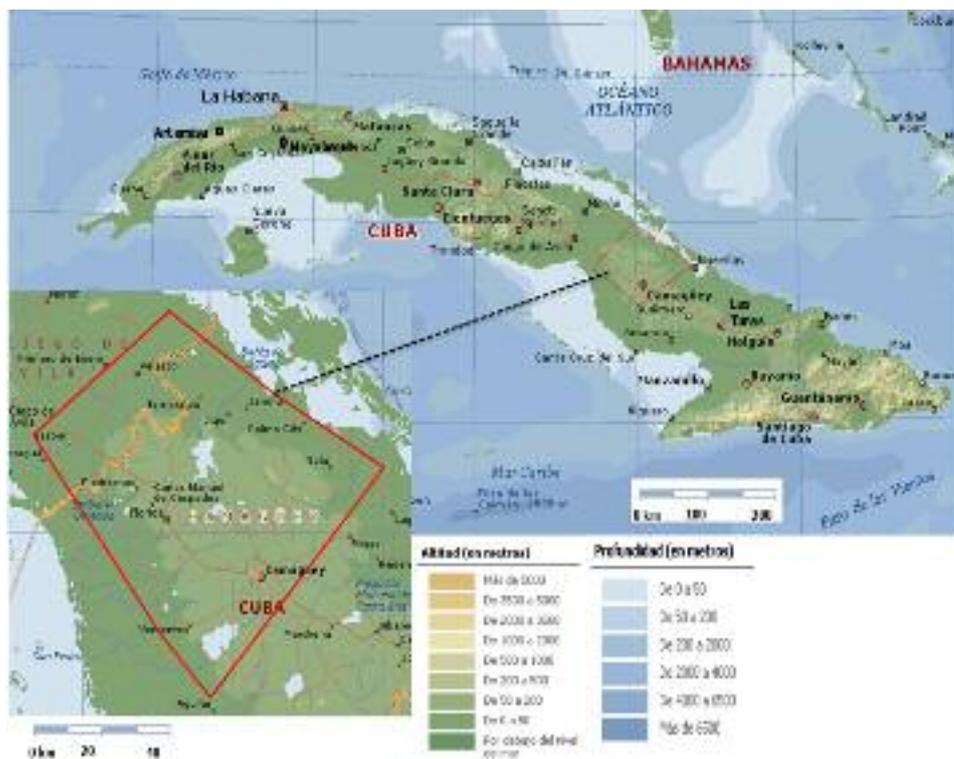


Figura 1. Área de investigación Vertientes-La Gloria (Tomado de Bejerano-Kindelan *et al.*, 2020)

MARCO GEOLÓGICO

La constitución geológica del área de estudio es muy compleja. La colisión entre la placa Norteamericana y la placa Caribe hizo posible que, en la actualidad, existan rocas de diferente naturaleza en contacto tectónico. Como resultado de ese movimiento, rocas efusivas y efusivo-sedimentarias y variedades ígneas de la corteza oceánica del Protocaribe, se desplazaron sobre sedimentos de un talud continental, y fueron formados complicados plegamientos en la forma de escamas tectónicas. Todo este complejo de rocas se comprimió

contra la Plataforma de Bahamas-Florida (UTE Remedios) durante el Eoceno Medio. En este proceso, que comenzó en el Cretácico Superior Maestrichtiano, se formaron cuencas donde se depositaban sedimentos con clastos del AVC, tales como los que caracterizan a la Formación Vía Blanca. Otros sedimentos sinorogénicos se formaron sobre el talud continental al cubrir a las Unidades Tectónicas y Estratigráficas (UTE), Placetas y Camajuaní, conocidas como las Formaciones Vega Alta y Vega respectivamente (Valladares-Amaro *et al.*, 2011) (**Figura 2**).

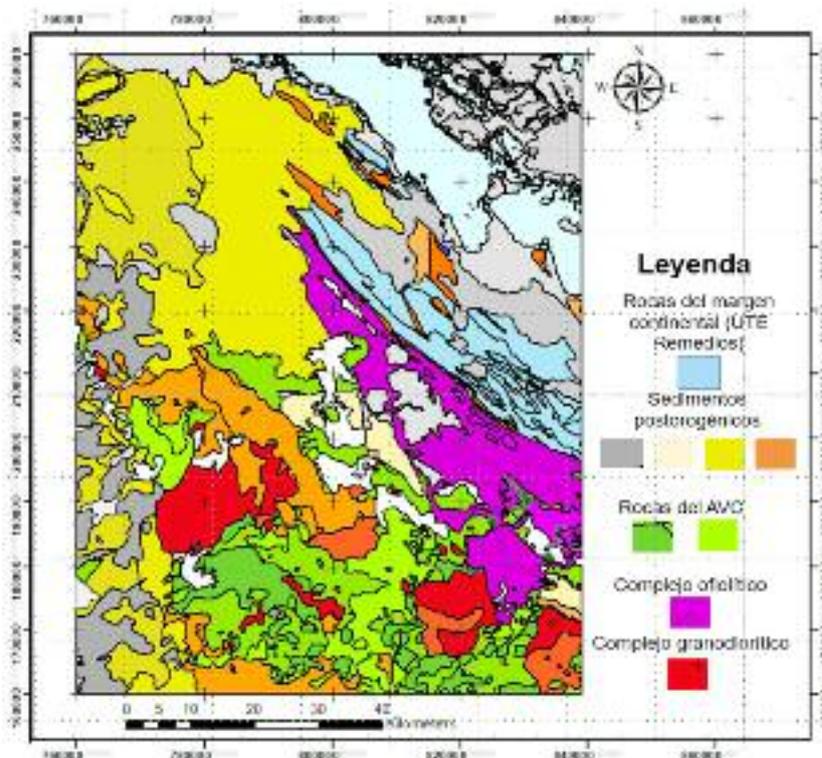


Figura 2. Mapa geológico del área de investigación (Tomado de Bejerano-Kindelan *et al.*, 2020)

MATERIALES Y MÉTODOS

Sobre la base a la concepción del análisis integrado de un conjunto de datos, a fin de disminuir en la medida posible el grado de ambigüedad en la solución de la tarea inversa, de forma inicial se concibió un procedimiento de trabajo expresado en un diagrama de bloques (**Figura 3**).

METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para llevar a cabo la investigación se consideró la in-

formación geológica de superficie y de pozo, el comportamiento del cuadro ondulatorio con sus posibles analogías en zonas de igual condición geológica, y la interpretación de las anomalías gravitacionales y magnéticas, enfocadas estas últimas en la modelación.

Comportamiento del cuadro ondulatorio

El cuadro ondulatorio por su complejidad es muy difícil de interpretar si no se cuenta con una concepción coherente del modelo geológico de estas regiones de



Figura 3. Diagrama indicador del flujo de trabajo

cinturones plegados. No existe experiencia previa que haya sido exitosa en la exploración de objetivos geológicos como los que se pretende localizar en el área Vertientes-La Gloria. Por eso, se hace necesario asumir con anterioridad el tipo de respuesta sísmica esperada, a partir de la extrapolación de patrones de sectores similares para identificar en los cortes sísmicos cada uno de los complejos geológicos, que por diferentes datos se conocen en estas regiones. Se debe tener en cuenta, además, las características de yacencia de los mismos, las cuales corresponden a los más fuertes eventos compresivos que puedan reportarse en la costa norte de la isla de Cuba, y es por ello que se considera sumamente complicado el corte geológico en estas regiones (Miró-Pagés, 2001; Miró-Pagés *et al.*, 2013; Miró-Pagés *et al.*, 2017). Teniendo en cuenta los yacimientos probados de la Franja Petrolera Norte Cubana (FPNC), se identifican varios paquetes sísmicos que se diferencian por su expresión cinemática y dinámica, aunque carecen de correlación con sus respectivos paquetes sedimentarios, excepto lo que se refiere a la frontera convencionalmente asociada a la llamada envolvente próxima al tope de los reservorios (Miró-Pagés, 2019). De superficie a profundidad se identifican los siguientes paquetes:

- Postorogénicos: corresponden en edades a rocas predominantemente del Neógeno;

presenta reflectores alargados, coherentes, con frecuencias entre 25-35 Hz, de altas a medias amplitudes, entre los cuales se distinguen regiones opacas. Dentro de ella se observan estructuras con terminaciones en *onlap*, *toplap* y *downlap* (Domínguez-Gómez, 2008; Rifá-Hernández, 2012).

- En la parte inferior, por debajo de la discordancia del Eoceno Medio, donde aparecen franjas de reflectores que se clasifican como:
- Cuadro de ondas variado (Formación Vía Blanca): presenta reflectores cortos dispuestos de forma caótica, de baja a media energía, en el intervalo de los conglomerados serpentiniticos; pero cuando corresponde a sedimentos terrígenos, los reflectores sísmicos son de alta amplitud, baja frecuencia y alargados.
- Cuadro de onda asociado al sello (Formación Vega Alta): se observan reflectores de altas amplitudes, baja frecuencia, con buena coherencia, ordenadamente dispuestos como si expresaran el buzamiento de las rocas formando estructuras envolventes, que corresponde con sedimentos terrígenos. Esta opinión quedó afirmada según datos de pozo.
- Cuadro de onda asociado al tope del reservorio: los sedimentos constituyentes del reservorio se presentan en la sección sísmica, inmediatamente debajo del cuadro correspondiente a la Formación Vega Alta. Son reflectores con distribución predominantemente caótica, que se agrupan en la forma de «parches», con alguna disposición ordenada solo cuando se pueden asociar a la parte más alta de la bóveda de los pliegues.

En la línea H2000 que coincide exactamente en su extremo sur con el pozo H100, se identifican las ofiolitas, la Formación Vega Alta y el reservorio. Como se puede observar, las ofiolitas conforman un manto de gran buzamiento, que comprime a la secuencia sedimentaria

ubicada más al norte; de tal manera que la UTE Placetas conforma un sistema de escamas cuya frontera sur es atravesada por el pozo H100 (Figura 4).

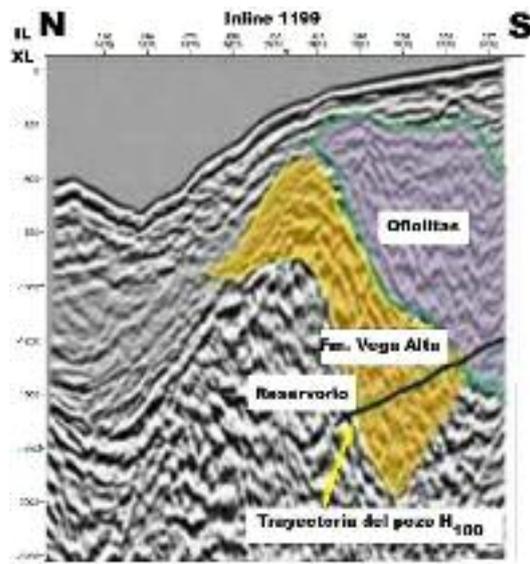


Figura 4. Línea sísmica H2000 coincidente con el pozo H100 (Rifá-Hernández, 2012).

Modelación de las anomalías magnéticas y gravitacionales

Para la modelación de las anomalías magnéticas y

gravitacionales se realizó la interpretación cualitativa de los mapas de campos potenciales, analizando las anomalías en sus respectivos entornos regionales, geofísicos y geológicos. Según lo expresado anteriormente, se puede afirmar que, en el entorno regional, el Mínimo Norte Cubano (MNC) es el ambiente geofísico adecuado para encontrar elevaciones locales de los sedimentos plegados del paleomargen continental. Con el registro de pozos de densidad se ha determinado que la UTE Placetas, perteneciente a los sedimentos plegados del paleomargen continental, no supera las 2.55 t/m^3 de densidad media, probado mediante pozos. Por lo general, las serpentinitas, o los sedimentos depositados durante la orogenia cubana, que en ocasiones cubren estas estructuras, presentan densidades medias de 2.45 t/m^3 (Shaposhnikova, 1969). Como se distingue en la diferencia de ambas densidades, se trata de un contraste de apenas 0.1 t/m^3 , capaz de generar anomalías débiles en la superficie de las mediciones. Ciertamente sobre el yacimiento Hebert, donde la perforación reporta un elevado de las calizas de la UTE Placetas bajo sedimentos del Cretácico Superior y de las serpentinas, existe un máximo local débil de 2.5 miliGales (MGAL) (Figura 5).

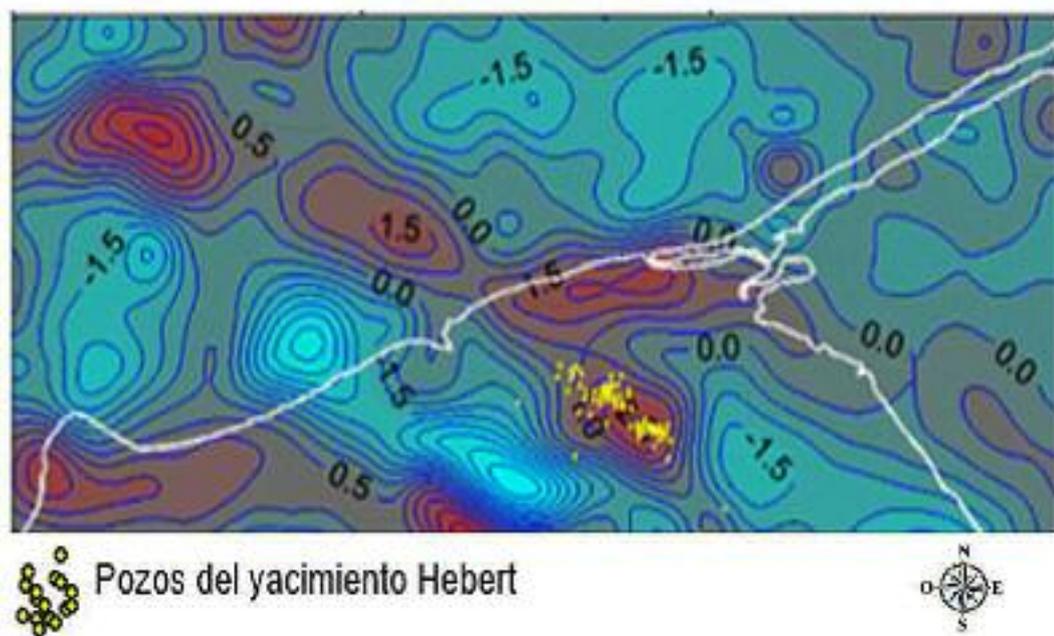


Figura 5. Mapa de anomalías locales del campo gravitatorio en el sector Maya-Varadero con resta de filtros gaussianos k_4 y k_{16} . (Rifá-Hernández, 2012)

La regionalización geológica de las anomalías magnéticas y gravitacionales del área de investigación, permitió la ubicación de sectores favorables para la elevación de sedimentos del paleomargen continental y de esta forma, la selección de perfiles para la posterior ejecución de modelos gravimétricos y magnetométricos complejos como parte de la interpretación cuantitativa.

Se añadirá, que los máximos magnéticos están ligeramente desplazados hacia el sur en relación con sus homólogos del campo gravitatorio. Esto se debe a la inclinación del campo inductor que en Cuba es aproximadamente igual a 54° . Investigaciones realizadas para la zona Cárdenas-Corralillo, demuestran que los máximos gravitacionales y magnéticos coinciden después de aplicar la reducción al polo (Prol-Betancourt y Rifá-Hernández, 2011).

Teniendo en cuenta lo anterior, en esta investigación para la selección de las anomalías locales de interés se parte de los siguientes criterios:

1. Similitud con las anomalías existentes sobre los yacimientos conocidos en otras zonas, similares al yacimiento Hebert, los máximos locales no deben exceder la intensidad de 3 mGal.
2. Los máximos locales deben encontrarse dentro del gran MNC.
3. Deben aflorar en las zonas, las rocas del Terreno Zaza, o sedimentos del Terciario o del Cretácico Superior.
4. Los máximos locales mayores de 3 mGal, aunque se encuentren dentro del MNC, deben excluirse, debido a que tienen posibilidades de estar generados por cuerpos potentes del Terreno Zaza.
5. Las anomalías en el campo magnético se deben ubicar considerando el comportamiento bipolar del campo que generan los cuerpos geológicos bajo el campo inductor en Cuba. Como es conocido, el campo normal en la latitud de Cuba presenta una

inclinación de 54° . En ocasiones, los cuerpos magnéticos generan un máximo que se ubica inmediatamente al sur de un mínimo; de tal manera que la proyección del cuerpo magnético en la superficie puede encontrarse en algún lugar de gradiente entre ambas anomalías.

En la modelación fue necesario definir la base del Terreno Zaza mediante una ley de velocidad en el corte. Para la construcción de la ley de velocidad se interpretaron secciones sísmicas migradas en tiempo antes de la suma, correlacionadas con un Perfilaje Sísmico Vertical (VSP por sus siglas en inglés Vertical Seismic Profile). Además, la interpretación cuantitativa se ejecutó sobre la base de la confección de modelos del campo magnético y gravitacional con el fin ulterior de elaborar modelos geólogo-geofísico a lo largo de los perfiles. Para ello era necesario conocer la densidad y susceptibilidad magnética del medio geológico y la base de los grandes cuerpos del AVC y las ofiolitas.

Para la confección y ajuste de los modelos geólogo-geofísicos se definieron sobre cada perfil un modelo de propiedades físicas, un modelo geológico y un modelo de campos físicos. Las propiedades físicas fueron estimadas según un análisis de muestras realizado en la provincia Camagüey y Las Tunas teniendo en cuenta las litologías y las edades de formación del complejo rocoso. El modelo geológico tomado como modelo de partida fue el elaborado por especialistas del Centro de Investigaciones del Petróleo; y los modelos de los campos físicos fueron elaborados mediante la interpretación cuantitativa de los campos potenciales, en aras de ajustar el campo calculado al observado.

RESULTADOS

A partir de los resultados de Bejerano-Kindelan *et al.* (2020), se focalizó el procesamiento hacia las bandas de frecuencias entre 0.08 y 0.18 Hz, para obtener mapas de anomalías locales mediante la convolución de filtros pasa banda con longitudes de onda entre 4760 y 7690 m, sobre la matriz del campo gravitatorio (**Figura 6 (3)**).

Bejerano-Kindelan *et al.* (2020), analizaron el

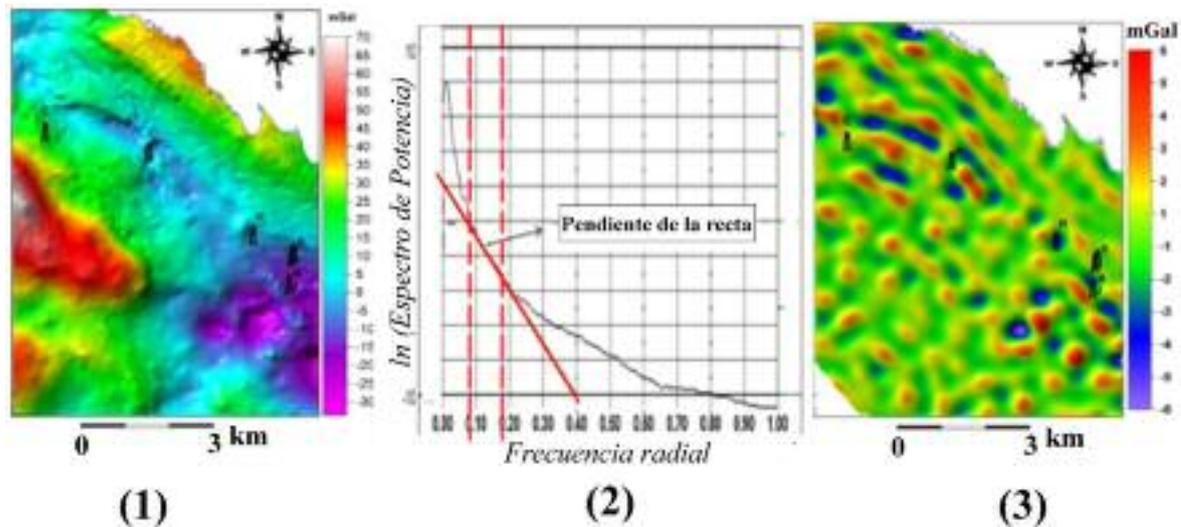


Figura 6. Mapa de anomalías de Bouguer (1). Espectro de Potencia Radial Promedio del campo gravitacional (2) (Tomado de Bejerano-Kindelan *et al.*, 2020). Mapa de anomalías locales del campo gravitatorio en la banda $\lambda = 4760$ m y $\lambda = 7690$ m (3).

comportamiento de las anomalías de campos potenciales se pueden identificar los sectores correspondientes a grandes cuerpos del AVC, las ofiolitas y los sedimentos plegados del paleomargen continental.

Los grandes cuerpos del AVC o de las rocas de corteza oceánica, cuyas bases yacen probablemente a profundidades mayores de 5 000 m, se manifiestan en el campo gravitacional como máximos intensos de carácter regional. Perforaciones ubicadas en estos máximos de gran intensidad, tales como Cabaiguán, Jobabo, Guanah, entre otros, confirman lo expuesto con anterioridad. Por consiguiente, en el mapa de anomalías de Bouguer se separará una gran región en la mitad suroeste, donde predominan grandes espesores de rocas efusivas, efusivo-sedimentarias y serpentinitas pertenecientes al Terreno Zaza (**Figura 7a** elipse A).

Hacia el norte también existe una región de máximos, pero estos son ocasionados por potentes espesores de rocas muy densas de la paleoplataforma Bahamas-Florida, en la cual existen carbonatos de banco, calizas dolomitizadas, anhidritas y dolomitas, cuyas densidades medias superan los 2.70 g/cm^3 (**Figura 7a** elipse B). Entre las dos zonas señaladas se encuentra el MNC producido posiblemente por apilamientos de pliegues sedimentarios correspondientes a las UTE Placetitas y Camajuaní que yacerían en profundidad (**Fi-**

gura 7a elipse D). Se presupone que el mínimo que se identifica hacia la región sureste del mapa pudiera responder a rocas ígneas de composición media a ácidas de menor densidad (**Figura 7a** elipse C).

Para precisar los límites de las zonas, se confeccionó el mapa de gradiente horizontal del campo gravitacional. Los ejes de los máximos gradientes en este mapa delimitan de forma aproximada la posición de las fallas que dividen a la región en grandes bloques tectónicos. Asimismo, el mapa de gradiente horizontal manifiesta de sureste a noroeste una cadena de máximos, generado por el contraste de densidad entre los sedimentos densos de la UTE Remedios y las rocas del Terreno Zaza (**Figura 7b** línea negra).

El contacto tectónico señalado se conoce como falla Las Villas o falla Cubitas y constituye el límite sur de la UTE Remedios. Hacia el sur del área enmarcada, por el eje del máximo gradiente, se delimita la frontera norte de los grandes cuerpos del AVC (tobas, tufitas, basaltos) (**Figura 7b**, línea azul).

Al superponer el mapa geológico, a escala 1:100 000, se distingue la falla Las Villas en la región sureste del área. Es de gran interés señalar que el hecho de coincidir el eje de máximo gradiente horizontal del campo gravitacional, con la denominada falla Cubitas, entre las calizas de agua somera y las serpentinitas, ex-

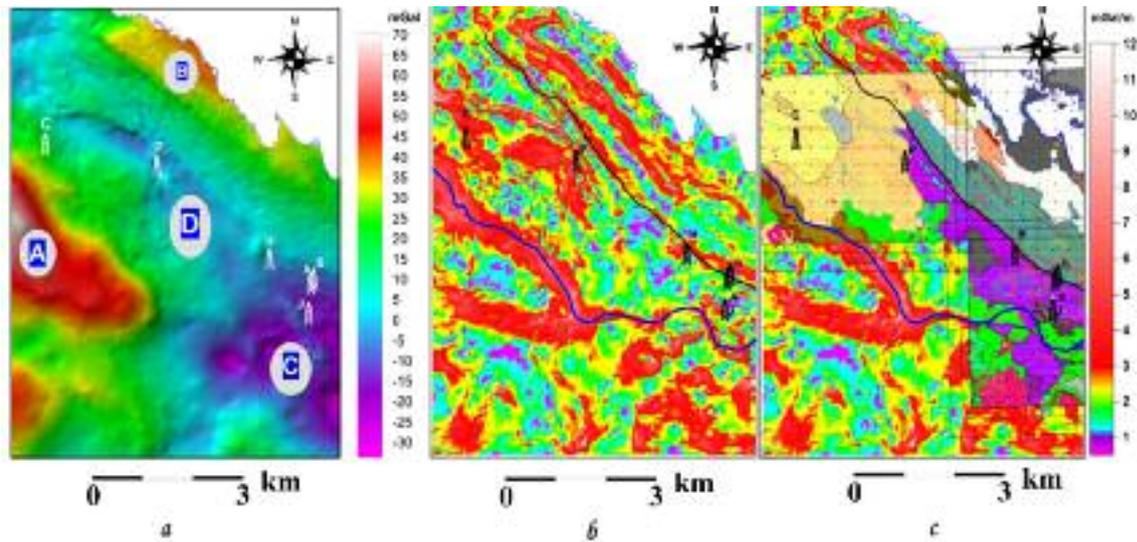


Figura 7. (a) Mapa de anomalías de Bouguer, (b) mapa de gradiente horizontal del campo gravitatorio, (c) mapa gradiente horizontal del campo gravitatorio combinado con el mapa geológico.

presa la presencia de un contacto muy abrupto de forma extrema en ese lugar. Además, la cadena de máximos que se extiende hacia el noroeste, comprueba que la falla se hunde bajo sedimentos jóvenes en esa dirección (**Figura 7c**).

Con ayuda del mapa de anomalías magnéticas

de ΔT se identifica al noroeste la cuña del Terreno Zaza que yace sobre las rocas densas de la UTE Remedios, la cual continúa hacia el sureste coincidente con la falla Las Villas. Nótese que el borde frontal de la cuña del Terreno Zaza coincide con un mínimo local del campo magnético (**Figuras 8**).

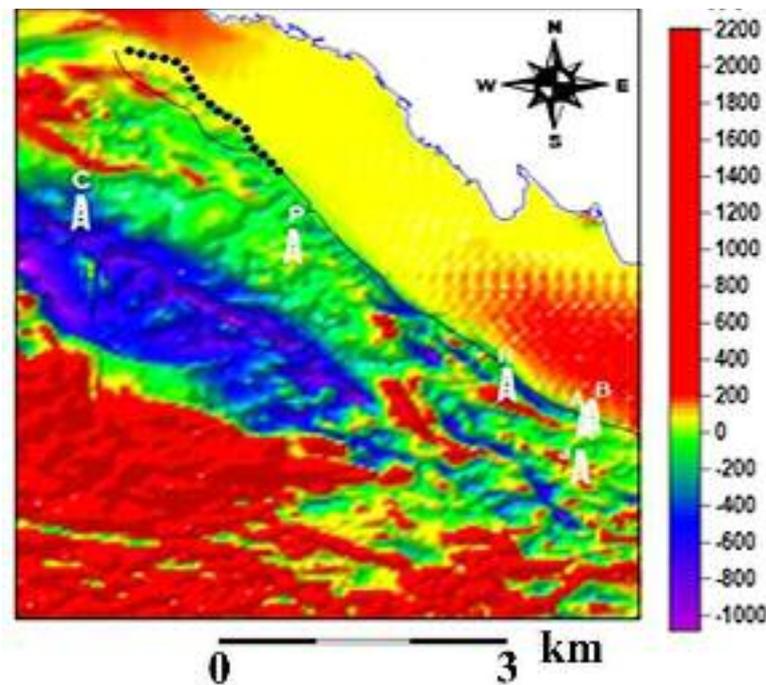


Figura 8. Mapa de anomalías magnéticas de ΔT . Línea negra discontinua límite norte de la cuya del Terreno Zaza y línea negra continua falla Las Villas

Entre el límite norte de los grandes cuerpos del AVC y la falla Las Villas se encuentra el MNC y es dentro de esta anomalía regional donde se identificarán máximos locales débiles de interés exploratorios; los cuales pudieran estar asociados a sectores elevados de las UTE Placetas y Camajuaní bajo las rocas del AVC y las ofiolitas. De esta manera, queda bien definido que hacia el norte de la falla Las Villas estarían las rocas densas de la UTE Remedios y hacia el sur los grandes cuerpos del AVC.

En el mapa residual del campo gravitatorio entre las bandas 7 690 y 4 760 m, se evidencian cinco máximos locales débiles, que no superan los 2 mGal. Las cinco anomalías locales (a, b, c, d, e), de gran interés se encuentran dentro del MNC. Las anomalías a, b, c parecen tener cierto alineamiento en rumbo noroeste-sureste (**Figura 9a**).

Para discriminar si el origen de estos máximos locales débiles es provocado por elevaciones de rocas del paleomargen continental o por cuerpos ígneos densos, se ubican en el mapa de anomalías magnéticas de ΔT . Debido a las analogías existentes con el yaci-

miento Hebert, se tiene en cuenta que los máximos locales débiles se encontrarán dentro del MNC y ser menores de 3 mGal y además ubicarse dentro de un mínimo magnético. Así, si superan los 3 mGal pudieran estar generados por potentes cuerpos densos dentro del Terreno Zaza, tal como ocurre en el pozo Jazmines 78, Cuenca Central, donde se cortaron hasta 5 000 m aproximadamente de rocas del AVC sin salir de estas. Por lo tanto, se seleccionaron dos anomalías locales que responden a posibles elevaciones de las rocas de paleotalud continental, puesto que se cumple la combinación: máximo gravitacional local débil, mínimo magnético. Las anomalías b y c son las únicas que cumplen con estas características. En cambio, la anomalía c tuvo que ser redefinida porque parte de ella no se encontraba dentro del mínimo magnético (**Figura 9b** elipse roja). Las anomalías locales a, d y e representarían solo las elevaciones del basamento, si las anomalías magnéticas con las que coinciden estuvieran asociadas a un gran aumento de la susceptibilidad magnética en el Terreno Zaza. De cualquier manera, su prioridad disminuye considerablemente.

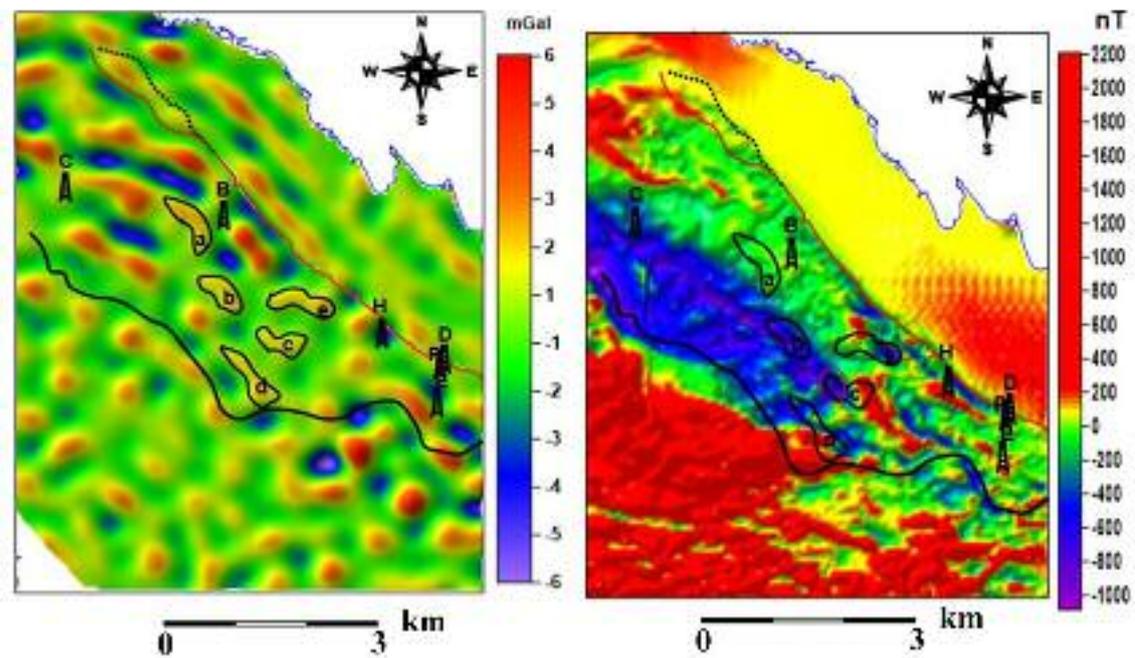


Figura 9. Mapa de anomalías locales del campo gravitatorio entre la banda $\lambda = 4\ 760$ m y $\lambda = 7\ 690$ m. (a). Mapa de anomalías magnéticas de ΔT (b).

Definidas las anomalías de interés para la exploración se trazaron tres perfiles (I, II, III), en direcciones noreste suroeste y perpendiculares a las posibles estructuras. Uno de los perfiles se trazó sobre la línea sísmica F2003 por su cercanía al sector de interés y al servir como patrón de interpretación para los otros perfiles (**Figura 10**), sobre estos últimos no existe otra información que no sea la de campos potenciales. Como los levantamientos sísmicos realizados en el área no cubren la zona de los máximos gravitacionales locales débiles b y c, no se corroborará algún alto estructural en correspondencia con estos máximos; solo cubren las anomalías a y e, las cuales tienen menor grado de interés debido a que se encuentran en un campo magnético ruidoso.

Para estimar la base de los grandes cuerpos del AVC y las ofiolitas se estudiaron las velocidades sísmicas de adquisiciones sísmicas anteriores y los datos de velocidades derivados del VSP. Los VSP de los pozos C, H, J y D presentan un corte de alta velocidad. El pozo H, alcanza apenas 0.66 segundos de recorrido de la onda sísmica (**Figura 11**). En un pozo «tan veloz» como este, es de esperarse que se corten sedimentos

muy densos como los de la UTE Remedios, rocas densas del AVC y las ofiolitas, tal como ocurrió en Picanes, provincia Las Tunas (Pérez-Hernández, 2016; Pérez-Hernández *et al.*, 2017). Desafortunadamente, el pozo B que es el más cercano a las líneas sísmicas, es el único pozo del sector de investigación que no posee VSP. Por lo que se procedió a encontrar dentro de los pozos una ley de velocidad con alto grado de correlación y capaz de calibrar las secciones sísmicas utilizadas. Debido a que el pozo H cumplía tales requisitos, se ajustaron los datos de velocidad de este pozo según una curva de regresión polinómica. De esta manera, la información proveniente de las secciones sísmicas solo estaría calibrada hasta el tiempo doble (*Two Wave Time TWT*) de 1.32 segundos (**Figura 11**).

El valor máximo de tiempo del pozo H fue identificado en las líneas sísmicas X2003 y F2003 y marcado con una línea negra discontinua. La frontera interpretada de color amarillo, marca un contraste entre reflectores: encima es identificable un gran paquete de reflectores mudos y caóticos y debajo reflectores cortos alineados y en dirección supuesta al ascenso de la frontera. Los autores consideran, que la

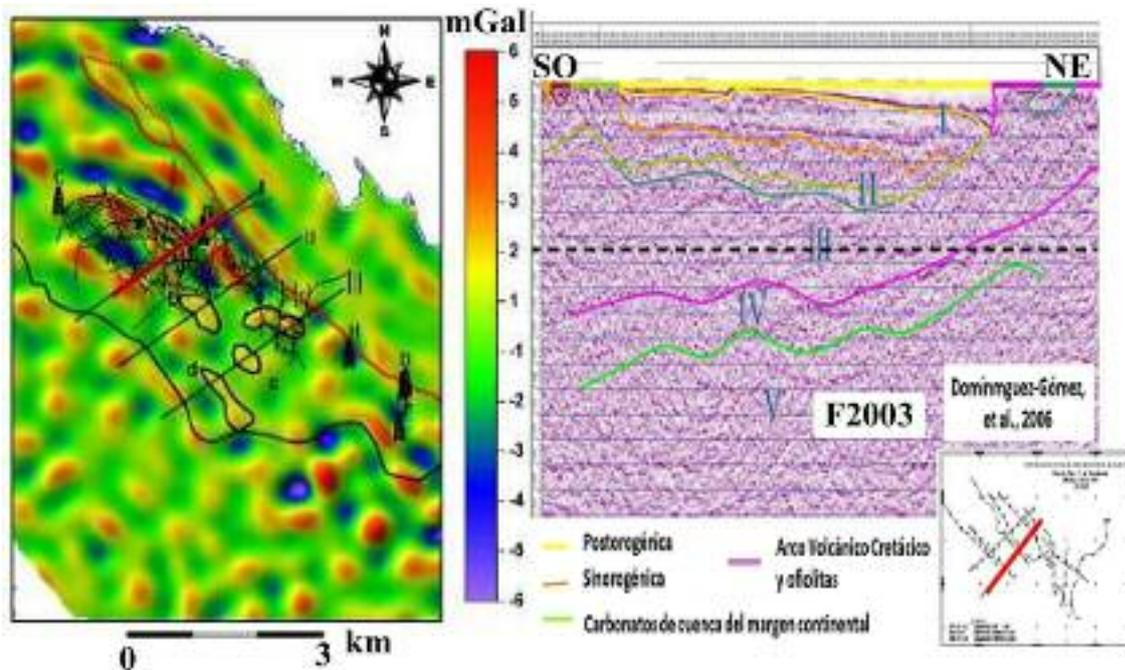


Figura 10. Ubicación de los perfiles de interpretación sobre las posibles estructuras. Sección sísmica de la línea F2003

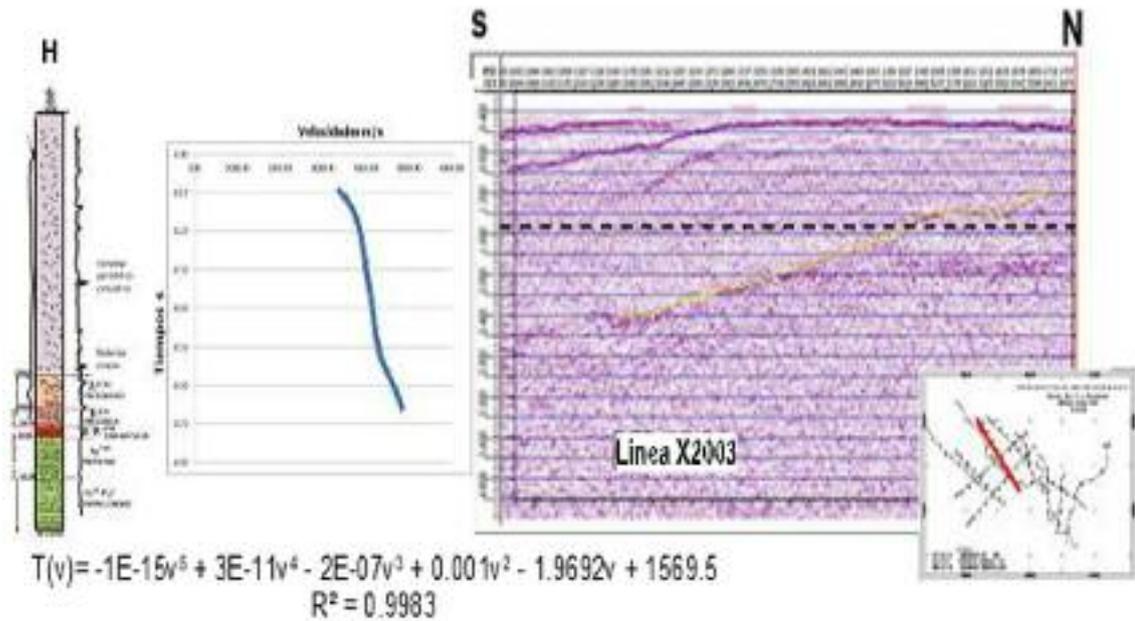


Figura 11. Ley de velocidad del pozo H e Interpretación de la base de los grandes cuerpos del AVC y las ofiolitas.

frontera (línea continua de color amarillo en la **Figura 11** derecha), pudiera representar la base de los grandes cuerpos del AVC y las ofiolitas y de forma consecuente debajo pudieran hallarse escamas tectónicas de los sedimentos plegados del paleomargen continental. Solo será calibrado el límite norte de la frontera, hacia el sur esta se encuentra a mayores tiempos y por ende a profundidades mayores

Ajuste de los modelos de campos potenciales

Para el ajuste de los modelos se tuvieron en cuenta las formaciones que cortaban los perfiles y su susceptibilidad magnética. Una simple revisión al mapa geológico de Cuba a escala 1:100 000, revela la existencia de varias rocas asociadas al AVC como por ejemplo conglomerados vulcanomícticos, tobas, tufitas y vulcanitas, al indicar que estas rocas responden a máximos en el campo magnético por su alta susceptibilidad. En esta zona el campo está muy alterado pues no solo hay fuentes someras del campo magnético que están aflorando (tope de los cuerpos magnéticos), sino que estos tienen un gran espesor. De acuerdo con las litologías que caracterizan a cada formación se le asigna una susceptibilidad inicial a cada cuerpo.

Otro elemento a tener en cuenta en el modelado es el buzamiento de los cuerpos. Un trabajo realizado por Linares (1998), al norte de Las Villas estima que la inclinación de estos cuerpos es casi vertical al alcanzar los 70 ° (Montalvo-Casanova, 2015). Se considerará que la susceptibilidad magnética será expresada en Sistema Internacional y no en el Sistema Cegesimal de Unidades Magnéticas (CSGM). Se conoce que esta propiedad es adimensional, pero si se multiplican por 4π pueden llevarse al Sistema Internacional (SI).

Los ajustes realizados al campo magnético confirman lo siguiente:

- Los grandes cuerpos magnéticos con fuerte buzamiento hacia el suroeste, llegan a alcanzar hasta $57\ 302.65 \times 10^{-6}$ SI valores de susceptibilidad magnética, localizándose sus bases entre 6 000 y 7 500m de profundidad en lo que se refiere a los grandes cuerpos del AVC (zona A en la **Figura 12**). Es razonable pensar que el intenso buzamiento en dirección norte-noreste, haya sido ocasionado por el proceso compresivo contra la plataforma Bahamas-Florida, la que constituyó una barrera natural durante

la orogenia. De esta forma, los cuerpos del AVC fueron emplazados casi verticalmente. La imbricación entre sedimentos sinorogénicos y cuerpos de ofiolitas ha sido explicada en otras investigaciones para otros sectores del territorio cubano que pueden considerarse análogos al sector investigado en esta tesis (Rifá-Hernández, 2012).

- Existe una variación entre los cuerpos que constituyen la zona B (**Figuras 12 y 13**). Cuerpos altamente magnéticos en ocasiones se alternan con cuerpos de menor susceptibilidad magnética a lo largo de los perfiles al dar como respuesta un campo altamente ruidoso. Al norte existe una zona de baja susceptibilidad magnética que alcanzará hasta $37\ 699.11 \times 10^{-6}$ si. En esta región el espesor de las rocas del Terreno Zaza disminuye hasta los 2 000 m.
- Finalmente, la zona C representa desde el punto de vista magnetométrico un gran cuerpo cuya susceptibilidad es despreciable y que corresponde a los sedimentos de la UTE Remedios. Esta zona se caracteriza por un campo magnético tranquilo y poco perturbado que asciende suavemente hacia el norte. Dicha elevación del campo puede ser asociada a la elevación del basamento, alejada de la superficie a profundidades de 8 000m a 10 000 m (**Figuras 12 y 13**).

Para el ajuste del campo gravitacional se tomaron los modelos magnetométricos ajustados y se le agregó la curva de anomalías de reducción *Bouguer* en el software Geomodel. Al estimar una densidad promedio ponderada de 2.4 g/cm^3 , se procedió a variar los contrastes de densidad dentro de un rango permisible, de forma tal que se ajustó al campo observado el campo calculado. Este proceso solo se llevó a cabo sobre los perfiles II y III porque mostraban anomalías gravitacionales favorables a posibles sectores elevados de los sedimentos plegados del paleomargen continental. Sobre el perfil línea sísmica F2003 solo se ajustó mag-

netimetría para pronosticar la supuesta base del Terreno Zaza y guiar la modelación sobre los perfiles II y III.

Los ajustes realizados al campo gravitacional confirman lo siguiente:

- Hacia el sur el máximo gravitacional de las curvas de anomalías de Bouguer, evidencian rocas de elevada densidad al alcanzar los 2.76 g/cm^3 . Esta zona representa los grandes cuerpos del AVC conformados por gabros y gabrodioritas, en ocasiones recubiertas por rocas ácidas de la Formación Caobilla (**Figura 12 y 13**).
- Hacia el norte, como evidencia de los frentes de cabalgamiento existe un mínimo gravimétrico asociado a una cuenca sinorogénica. Con probabilidad, este mínimo también represente el choque abrupto de los grandes cuerpos del AVC que durante la orogenia cabalgaron sobre los carbonatos de cuencas del margen continental. Este contacto abrupto se ha identificado en esta investigación como el límite norte de los grandes cuerpos del AVC (**Figura 12 y 13**).
- La cuña de las rocas del Terreno Zaza, presenta una densidad variable entre los 2.42 g/cm^3 hasta 2.47 g/cm^3 , debido al mayor o menor grado de fracturación de las rocas. La zona A cuenta del esfuerzo al que estuvo sometida al ser comprimida entre los grandes cuerpos del AVC y el promontorio de Remedios. Sobre esta cuña se extiende un mínimo gravitacional regional con presencia de máximos locales aislados (**Figura 12 y 13**).
- El mínimo regional responde a los sedimentos plegados del paleomargen continental y no es más que el MNC en el sector de investigación. No siempre son coincidentes los máximos locales con elevaciones de los sedimentos plegados del paleomargen continental, en ocasiones están asociados con cuerpos ígneos super-

ficiales de mayor densidad. La densidad de estas rocas varía desde los 2.55 g/cm³ hasta los 2.68 g/cm³ y con probabilidad yacen entre los 4 000 m y 6 000 m. Sobre los sedimentos plegados del paleomargen continental se encuentran en contraste negativo, sedimentos sinorogénicos que constituyen un sello regional. Este sello alcanza una densidad de 2.35 g/cm³ (Figura 12 y 13).

- Hacia el norte, se observa un campo gravitatorio tranquilo al ascender hacia el norte. Este máximo refleja las dolomitas, anhidritas y calizas dolomitizadas de la UTE Remedios al alcanzar densidades 2.74 g/cm³ (Figura 12 y 13).
- En contacto tectónico con la cuña del Terreno Zaza y al norte de ella, aparece una cuenca comprimida contra las calizas, evaporitas y dolomitas de la UTE Remedios (Figura 12 y 13). Se caracteriza por una cadena de mínimos estrechos locales del campo gravitatorio que se ubica de forma inmediata al sur de la falla Las Villas. Se trata de un accidente geográfico que existió como cuenca de antepaís para todo el oró-

geno y contiene fragmentos de las rocas del Terreno Zaza, de modo presumible sobre sedimentos erosionados del banco carbonatado que existe al norte (Iturralde-Vinent, 2012) densidad alcanza los 2.23 g/cm³.

- En profundidad, entre los 8 000 m y 10 000 m, se encuentra el basamento con una densidad de hasta 2.83 g/cm³.
- Una particularidad favorable resultó ser el hecho que debido a que el perfil III corta también las anomalías d y e, confirmó que la anomalía d corresponde a un cuerpo denso del AVC, como había planteado la autora en la interpretación cualitativa. Sin embargo, según el modelado la anomalía responde de forma favorable a elevaciones de los sedimentos plegados del paleomargen continental (Figura 12 y 13) y coincide con un alto estructural interpretado por sísmica como estructura Los Joberos Sur 15F (Álvarez-Castro *et al.*, 2002).

DISCUSIÓN

La anomalía a se encuentra sobre sedimentos postorogénicos y en la periferia del pozo B, donde se reportan

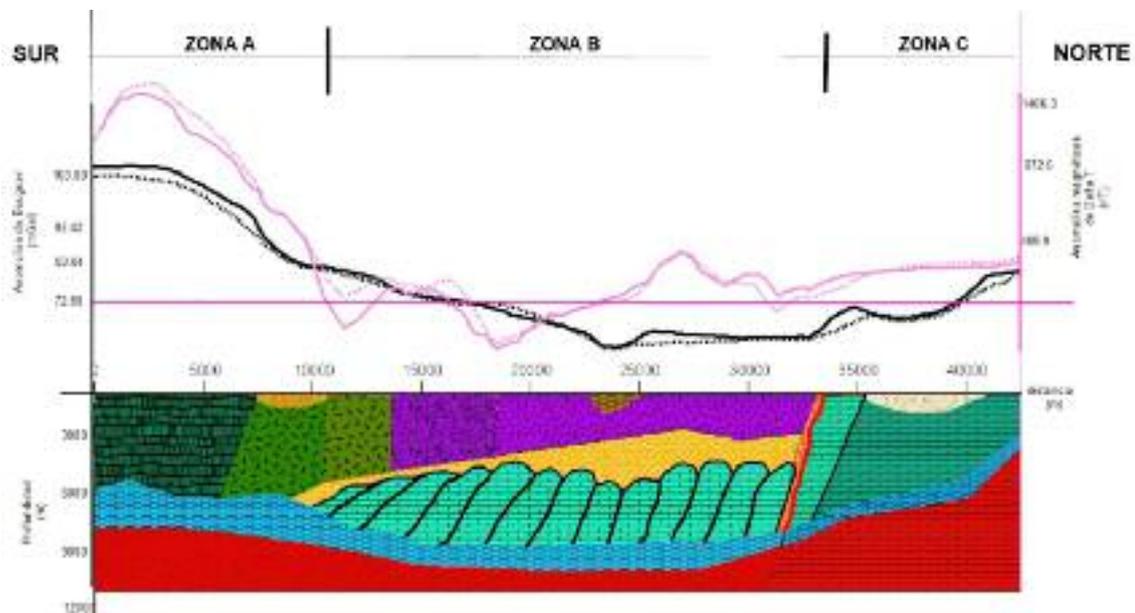


Figura 12. Modelo geológico-geofísico por el perfil II

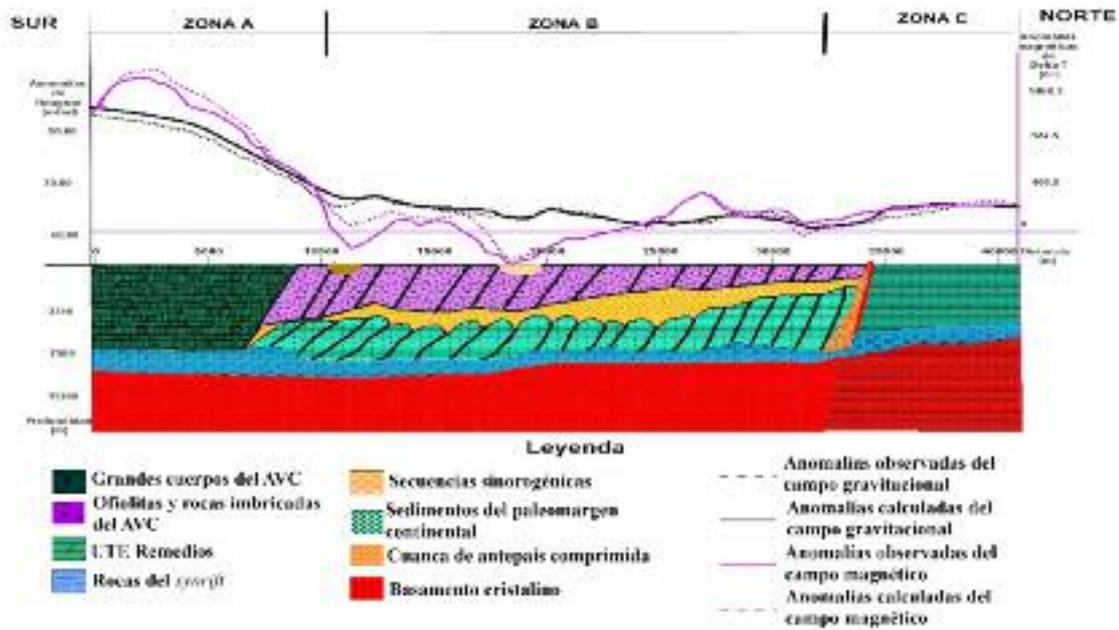


Figura 13. Modelo geólogo-geofísico por el perfil III

más de 2 000 m de rocas del complejo peridotítico acumulativo. De igual criterio, son las interpretaciones sísmicas de las líneas que recubren esta área donde los especialistas confirman que, hacia el suroeste, la base del alóctono yace más profunda. La anomalía d se encuentra en la porción sur del sector, casi en contacto con el límite norte de los grandes cuerpos del AVC por lo que, al tener en cuenta datos de pozos, aquí los espesores de rocas efusivas y efusivo-sedimentarias pueden alcanzar más de 5 000 m. En cambio, la anomalía e está sobre una cadena de máximos y mínimos propio de la parte frontal de la cuña del Terreno Zaza. Sin embargo, si se sigue en dirección noroeste la cadena de los mínimos magnéticos, estaría en correspondencia con rocas de la cuenca de antepaís que quedó comprimida contra el promontorio de la UTE Remedios durante la orogenia (Iturralde-Vinent, 2012). La anomalía b se encuentra sobre una cuenca postorogénica donde abundan sedimentos palustres y calizas, margas, calizas arcillosas, biodetríticas, biohémicas y dolomitizadas de la Formación Paso Real. La anomalía c se encuentra sobre un Complejo Plagiogranítico, depósitos eluvio-columbiales y rocas limo-calcáreas o arcillosas, margas, pseudoconglomerados, conglomerados

calcáreos y polimícticos, constituidos por serpentinitas, gabros, cuarzo, vulcanitas y granitoides de la Formación Vázquez (Colectivo-de-Autores, 2013). De esta forma, se confeccionó el mapa de regionalización geológica de las anomalías de campos (Figura 14).

CONCLUSIONES

La regionalización geológica de las anomalías de los campos potenciales, la interpretación compleja de los campos magnético y gravitatorio en diferentes bandas del espectro de este y la generación de modelos gravimétricos y magnetométricos complejos, en conjunto con los datos geológicos y sísmicos, ha permitido identificar un sector, donde el espesor del Terreno Zaza probablemente disminuye y por lo tanto, los sedimentos plegados del paleomargen continental están más próximos a la superficie aquí.

Dentro de la región más favorables se han delimitado anomalías locales gravitacionales de baja intensidad que pudieran estar asociada a elevaciones de los sedimentos plegados del paleomargen continental bajo los grandes cuerpos del AVC y las ofiolitas.

Los modelos magnéticos y gravimétricos reflejan enormes espesores de rocas del AVC y ofiolitas de

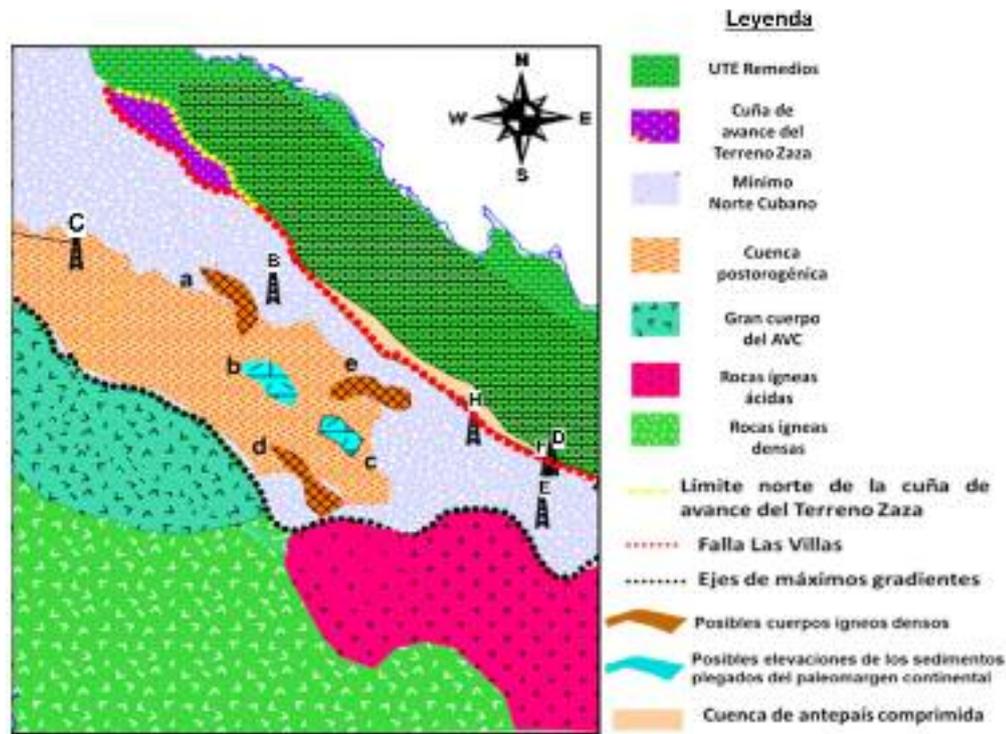


Figura 14. Mapa de zonificación geológica de campos potenciales

alta susceptibilidad magnética y alta densidad y revelan la presencia de un campo magnético ruidoso sobre la cuña del Terreno Zaza y a su vez, un mínimo gravimétrico regional correspondiente a los sedimentos plegados del paleomargen continental que yacerían en profundidad por debajo esta cuña.

La profundidad de la base de las rocas del Terreno Zaza es variable a lo largo de los perfiles, entre los 2 000 m y 3 250 m al noreste y hasta los 6 000 m y 7 500 m al suroeste.

Los modelos geólogo-geofísicos indican que, en las zonas dentro del MNC donde coinciden máximos gravimétricos locales y mínimos magnéticos, probablemente se ubican los sedimentos plegados del paleomargen continental, pronosticándose sus profundidades de yacencia entre los 4 000 m y 6 000 m en la región investigada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Álvarez-Castro, Otero-Ramírez, López-Mora, Domínguez-Garcés y Prol-Betancourt, 2002, Evaluación de objetivos y prospectos de los blo-

ques 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 y 21. In. Cuba: CEIPET, p.160.

Bejerano-Kindelan A.M., Prol-Betancourt J.L.G., Miró-Pagés G., Rifá-Hernández M.C., 2020, Transformaciones de campos potenciales para la separación de la contribución de distintas fuentes de anomalías en la exploración petrolera en Cuba. Caso Vertientes-La Gloria: revista Geociencias UO, v.3, núm. 2, diciembre 2020, pp 11.

Colectivo-de-Autores, 2013, Léxico Estratigráfico de Cuba. In IGP. La Habana: Servicio Geológico de Cuba, vol. 3, p. 255-257.

Domínguez-Gómez, 2008, Caracterización sísmica de los reservorios del terciario inferior en la Franja Septentrional Petrolera Cubana. In.: Universidad de Pinar del Río «Hermanos Saíz Montes de Oca», p. 103.

Hatten, C.W., Schooler, O.E., Giedt, N. Y Meyer, A.A., 1958, Geology of Cuban central, eastern Las Villas and western Camagüey provinces. In INÉDITO. La Habana: Fondo geológico del Ministerio de Industria Básica.

- Iturralde-Vinent**, 2012, Geología y Plaeogeografía. Unidades Tectono-Estratigráficas. Compendio de Geología de Cuba y del Caribe, vol. II.
- Iturralde Y. Roque**, 1982, La falla Cubitas su edad y desplazamientos. Ciencias de la Tierra y el Espacio, vol. 4.
- Matos-Jardines**, 2014, Cuba. Físico. In Arias-Ramires, Pescoso-Vives y Martínez-Núñez. Ediciones GEO. La Habana: Empresa Cartográfica y Soluciones- Geomáticas.
- Matos-Jardines. Cuba**, 2014, Político-Administrativo. In Pescoso-Vives y Martínez-Núñez. Ediciones GEO. La Habana: Empresa Cartográfica y Soluciones Geomáticas.
- Miró-Pagés**, 2001, Principales tipos de fronteras reconocidas mediante la prospección sísmica. Memorias del V Congreso de Geología y Minería.
- Miró-Pagés, Escartín-Sauleda; Amador-Longoria**, 2013, Nuevas tendencias de la exploración sísmica. Revista Cubana de Ingeniería, vol. IV, no. 2.
- Miró-Pagés, Prol-Betancourt, Rifá-Hernández y Echagarruga-Palomo**, 2017, Métodos geofísicos integrados en la exploración petrolera en los cinturones de cabalgamiento. Revista Cubana de Ingeniería, vol. 8.
- Montalvo-Casanova**, 2015, Determinación de la base de los cuerpos magnéticos del Arco Volcánico del Cretácico y las ofiolitas al norte de la provincia Camagüey-Las Tunas, Cuba. In Departamento de Geociencias. La Habana, Cuba: Instituto Superior Politécnico «José Antonio Echeverría», CUJAE, p. 56.
- Pérez-Hernández, Y.**, 2016, Calibración Geológica de fronteras sísmicas en secciones 2D terrestre del sector Maniabón-La Farola, Las Tunas, utilizando datos geólogos-geofísicos correspondientes al pozo Picanes 1x. In Departamento de Geociencias. La Habana, Cuba: Instituto Superior Politécnico «José Antonio Echeverría», CUJAE, p. 97.
- Pérez-Hernández, Y., Veiga-Bravo, C. Y Miró-Pagés, G.**, 2017, Calibración sísmogeológica en secciones 2D terrestre del sector Maniabón-La Farola, utilizando datos geólogos-geofísicos correspondientes al pozo Picanes 1X. CD-ROM VII Convención de Ciencias de la Tierra.
- Prol-Betancourt y Rifá-Hernández**, 2011, Interpretación de los campos potenciales en el sector ciénaga de Majaguillar-Motembo.
- Prol-Betancourt, Rifá-Hernández; Miró-Pagés**, 2016, Ubicación de zonas favorables para la exploración petrolera a partir del estudio de los campos potenciales en el sector Esmeralda, Cuba. Ciencias de la Tierra y el Espacio, vol. 17.
- Rifá-Hernández**, 2012, Ubicación de los sectores elevados de los sedimentos del margen continental en Cuenca Central, Cuba. In Departamento de Geociencias. La Habana: Universidad Tecnológica de La Habana «José Antonio Echeverría», CUJAE, p. 73.
- Rifá-Hernández, Prol-Betancourt, Febles-Elejaldes; Fundora-Granda**, 2012, Argumentos geofísicos acerca del margen continental en la Cuenca Central de Cuba. Revista Cubana de Ingeniería, vol. III, no. 3, p. 21-27.
- Shaposhnikova**, 1969, Propiedades Físicas de las Rocas de Cuba. Revista Cubana de Ingeniería Geológica, vol. 7, no. Publicación Especial, p. 80.
- Valencio, Gatti, Mera y Bustos**, 1960, Sobre el esquema estructural de la Isla de Cuba. In Cuba: Archivo del Ceinpet, p. 214.
- Valladares-Amaro, Segura-Soto, Álvarez-Castro, Brey-Del-Rey, Castro-Castiñeira, Rodríguez-Viera, González-Despaigne y Reyes-Paredes**, 2011, Reservorios gasopetrolíferos fracturados de Cuba. Caso de estudio: reservorios carbonatados en la Franja Norte de Crudos Pesados. In

Fecha de recepción: 30 de junio de 2020
Fecha de arbitraje: 13 de febrero de 2021
Fecha de aprobación: 13 de mayo de 2021