

## REGIONALIZACION GRAVIMETRICA EN EL CARIBE CENTRO OCCIDENTAL (I): NUEVOS MAPAS DE ANOMALIAS DE BOUGUER TOTAL Y AIRE LIBRE DE CUBA, A ESCALA 1: 500 000

**José Luis Cuevas Ojeda<sup>(1)</sup> Lázaro A. Díaz Larrinaga<sup>(2)</sup>, Bárbara Polo González<sup>(3)</sup>**

*Instituto de Geofísica y Astronomía, Agencia de Medio Ambiente, Calle 212 No. 2906 e/ 29 y 31. La Coronela, La Lisa, Ciudad de la Habana CP 11 600, CUBA*

*(1) jlcuevas@geoastro.inf.cu, (2) ldiaz@geoastro.inf.cu, (3) bpolo@geoastro.inf.cu*

### RESUMEN

En el presente trabajo se aborda la regionalización gravimétrica en Cuba, como parte del Caribe centro occidental. En la elaboración del trabajo que se expone, fue utilizada la misma metodología propuesta e implementada por el autor, para la confección de este tipo de mapa, donde se tienen en cuenta las masas topográficas hasta los 167 km y por tanto el método de cálculo del efecto gravitacional del relieve considera la curvatura de la Tierra. El mapa que con este carácter aquí se presenta, constituye la primera regionalización de las Anomalías de Bouguer de toda Cuba que considera la corrección topográfica completa (e.g. 167 km), y que a diferencia incluso con los demás resultados de este mismo carácter presentados con anterioridad, introduce el uso de la Fórmula Internacional de 1967 en el cálculo de la gravedad normal, de forma tal de actualizar los datos gravimétricos de Cuba a uno de los sistemas internacionales más utilizados. Las diferencias introducidas a los datos están en el orden de los 16,3 mGal, valores significativos que de hecho varían las magnitudes de las anomalías gravimétricas en Cuba. El presente trabajo culmina una etapa en el estudio del campo gravimétrico en Cuba, tanto de las anomalías de Aire Libre, como de Bouguer Total, lo que ha permitido contar con este tipo de mapa hasta el momento inexistente. La obtención del modelo digital del campo gravimétrico cualitativamente superior, brinda información actualizada para las investigaciones geólogo-geofísicas regionales y completan una etapa importantísima en el proceso de obtención de regionalización gravimétrica en el Caribe centro occidental.

### ABSTRACT

In this paper is approached the gravimetric regionalization in Cuba, how part of the Caribbean Western center. In the elaboration of the paper that is exposed, the same methodology was used proposal and implemented by the author, for the making of this type of map, where the topographical masses are kept in mind the 167 km even and therefore the method of calculation of the gravitational effect of the relief considers the bend of the Earth. The map that with this character here comes, it constitute the first regionalization of the Anomalies of Bouguer of all Cuba that considers the topographical complete correction (e.g. 167 km), and that to difference even with the others results of this same presented character previously, it introduce the use of the International Formula of 1967 in the calculation of the normal gravity, of such form of modernizing the gravimetric data from Cuba to one of the international systems more used. The entered differences the data are in the order of the 16,3 mGal, significant values that in fact the magnitudes of the gravity anomalies in Cuba. The present paper culminates a stage in the study of the gravity field in Cuba, so much of the anomalies of Free Air, like of complete Bouguer, what has allowed to count with this type of map until the nonexistent moment. The obtaining of the digital model of the high quality gravity field, it offers modernized information for the regional geological and geophysical investigations and they complete an important stage in the process of obtaining of gravimetric regionalization in the Caribbean Western center.

## INTRODUCCION

En el marco del proyecto “Caracterización e Interpretación de los Campos Magnéticos y Gravimétricos en el Caribe centro occidental” (Alvarez et al., 2000), uno de los objetivos principales del proyecto lo constituyó la confección de los nuevos mapas gravimétricos en reducción de Bouguer total ( $\sigma = 2,67 \text{ t/m}^3$ ) que considera la corrección topográfica completa (e.g. 167 km), que a diferencia incluso con los demás resultados de este mismo carácter obtenidos por los autores en 1991 y 1994 (Cuevas y Pacheco, 1991; Cuevas, 1994), introdujo el uso de la Fórmula Internacional de 1967 (Bureau Gravimétrique International, 1988) en el cálculo de la gravedad normal, de forma tal de actualizar los datos gravimétricos de Cuba a uno de los sistemas internacionales más utilizados. Las diferencias introducidas a los datos están en el orden de los 16,3 mGal, valores significativos que de hecho varían los valores absolutos de las anomalías gravimétricas en Cuba.

Abordar la cartografía gravimétrica con corrección topográfica para todo el territorio de Cuba, como parte del Caribe centro occidental, ha constituido una tarea extremadamente ardua y laboriosa de muchos años de trabajo, por lo que ha sido cumplimentada por diferentes etapas.

Este mapa se elaboró con algo más de 8700 observaciones gravimétricas seleccionadas de levantamientos regionales y de detalle realizados por diferentes instituciones o empresas nacionales y extranjeras en el período desde 1968 a 1987, inclusive (Cuevas et al., 1989), posteriormente no se han realizado trabajos significativos.

A partir de dicha base se comenzó a trabajar en la confección de un mapa regional a la misma escala pero que considerara la llamada corrección topográfica ó efecto gravitacional del relieve, aspecto este que nunca había sido abordado en Cuba a dicho nivel y aún menos considerando este tipo de efecto hasta distancias muy alejadas del punto de observación, es decir considerar dicho efecto hasta lo que se conoce en la literatura internacional como Zona de Hayford  $O_2$  (e.g. 167 km). Se trabajó en cuatro etapas: la parte oriental del país (Cuevas y Pacheco, 1991), centro oriental (Cuevas, 1994), occidental (Cuevas et. al., 1998) y la presente generalización.

La culminación de la generalización metodológica del cálculo de las anomalías gravimétricas de Bouguer total en Cuba como parte importante del área centro occidental del Caribe, donde se encuentran la mayor parte de las islas pertenecientes a las Antillas Mayores, es lo que ha permitido, llevar a cabo interpretaciones geólogo-geofísicas con nueva información, que prepara las condiciones para nuevos Proyectos de investigaciones en el área (Alvarez et al., 2000).

## MATERIALES Y METODOS

### MATERIALES

**Área de Estudio.** El área de estudio se ha ubicado entre los  $18,90^\circ$  y los  $23,87^\circ$  de Latitud Norte y los  $73,94^\circ$  y  $85,31^\circ$  de Longitud Oeste, que incluye a Cuba y sus mares adyacentes.

**Modelo Digital de Elevación (MDE).** La confección de los MDE para una red de 500 m, a partir de la cartografía a escala 1 : 50 000, ha permitido abordar las correcciones topográficas en toda la región de Cuba, complementándose con otro MDE generado a partir de las cartas náuticas y los datos batimétricos de observaciones de levantamientos gravimétricos marinos llevados a cabo por un grupo grande de instituciones resumidas y compiladas por Bowin et al. (1976), (fig.1) lo que permitió completar la parte marina hasta los 167 km de la zona que se posee información gravimétrica con un ancho de red de 5 km. La unión de todos los modelos conforma un modelo completo para uso de cualquier punto de la región bajo estudio con una red de 5 km. La corrección topográfica (ó efecto gravitacional del relieve) de las observaciones gravimétricas, que se ha llevado a cabo hasta los 167 km de distancia del punto de observación, utilizando el MDE descrito aquí, será explicado más adelante.

## MÉTODOS

### Métodos de reducción de los datos gravimétricos

#### Anomalía de aire libre o Faye

La anomalía de aire libre queda definida como:

$$\Delta g_{AL} = g_{obs} - \gamma_o + 0,3086h \quad (1)$$

donde  $g_{obs}$  – gravedad observada,  $\gamma_o$  – gravedad normal,  $h$  – altura del punto de observación y corresponde a la diferencia entre la gravedad observada y la correspondiente teórica sobre el elipsoide, transportada a la altitud del punto de observación. Es decir, que la reducción de aire libre trata de compensar las variaciones en la distancia del punto de observación al centro de atracción de la Tierra.

En el caso que nos ocupa, además de las observaciones terrestres, se han tenido en cuenta, tanto observaciones donde se utilizan gravímetros de fondo como a bordo de embarcaciones y en este último caso particular la fórmula anterior toma la siguiente forma:

$$\Delta g_{AL} = g_{obs} - \gamma_o \quad (2)$$

Como característica fundamental las anomalías de aire libre tienen una fuerte dependencia de la altitud del punto de observación.

#### Anomalía de Bouguer

El objetivo de la reducción de Bouguer es eliminar los efectos de las masas topográficas existentes entre el elipsoide y la superficie de la tierra, donde se encuentra el punto de observación. En la práctica cotidiana de la gravimetría este efecto es simplificado teniendo en cuenta la influencia que ejerce una placa o lámina de Bouguer de extensión lateralmente infinita, densidad constante y altura correspondiente a la del punto de observación, la que puede definirse como:

$$C^B = 2\pi f\sigma \quad (3)$$

Donde  $f$  – constante gravitacional,  $\sigma$  - densidad de la placa.

La anomalía de la gravedad con el efecto de aire libre incluido y el efecto antes mencionado recibe el nombre de anomalía de Bouguer, y queda definido como:

$$\Delta g_B = g_{obs} - \gamma_o + (0,3086 - 2\pi f \sigma)h \quad (4)$$

Algunos autores llaman a esta anomalía, la anomalía de Bouguer simple. En nuestro caso también la denominamos de esta forma. Al igual que en el caso anterior cuando las observaciones gravimétricas han sido obtenidas de levantamientos marinos con gravímetros de a bordo la anomalía de Bouguer se calcula como:

$$\Delta g_B = g_{obs} - \gamma_o + 0.3086h_{inst} + 2\pi f (\sigma - \sigma_a)P \quad (5)$$

donde  $h_{inst}$  – altura del instrumento de medición sobre el nivel del mar,  $\sigma_a$  – densidad del agua de mar,  $P$  - profundidad del océano considerado como positivo a partir de la superficie hacia el fondo.

A esta reducción de Bouguer es necesario corregirla por el efecto de la topografía, en exceso o defecto de la reducción de lámina de Bouguer. Este efecto o influencia, en zonas de relieve muy pronunciado, puede ser bastante, por lo que su consideración es a veces totalmente necesaria. Entonces las expresiones anteriores quedan adicionadas por dicho efecto  $\Delta g_{top}$  de las masas topográficas, que están por encima de la altura  $h$  (ej. Montañas) que crean una componente vertical de atracción dirigida hacia arriba, lo cual disminuye el valor de la fuerza de gravedad en dicho punto. Este efecto también es provocado por una influencia de masas por debajo de la altura  $h$ , de ahí que la influencia del relieve sea siempre positiva, aunque en ocasiones puede ser negativa cuando las distancias a tener en cuenta son muy grandes y la curvatura de la Tierra debe ser considerada, como es nuestro caso.

A esta anomalía suele llamársele, anomalía de Bouguer completa o total. En estos términos se hace referencia a los mapas elaborados en el presente trabajo.

### **Gravedad normal**

En las anteriores expresiones para la reducción de aire libre y de Bouguer aparece el término  $\gamma_o$ , conocido como gravedad normal, que es la teórica referida al elipsoide. Esta gravedad posee diferentes formulaciones, en el caso que nos ocupa de una generalización que incluye a las Antillas Mayores se ha utilizado una de las formulaciones más utilizadas a escala internacional: la fórmula de 1967 (Bureau Gravimétrique International, 1988):

$$\gamma_o = \gamma_e (1 + \beta \sin^2 \varphi + \beta_1 \sin^4 \varphi) \quad (6)$$

Donde  $\gamma_e$ ,  $\beta$ ,  $\beta_1$  son la gravedad normal en el ecuador, el aplanamiento gravimétrico y el factor que depende del aplanamiento geométrico  $\alpha$  y de la relación entre la fuerza centrífuga y la aceleración en el ecuador.

Los valores de dichos parámetros para la formulación de 1967 son:

$$\gamma_e = 978031,85$$

$$\beta = 0,005278895$$

$$\beta_1 = 0,000023462$$

**Método de cálculo del efecto gravitacional del relieve.** La formulación de Pick (1987) fue utilizada para la realización de la corrección topográfica, donde se tiene en cuenta la curvatura de la Tierra, así como la forma del elipsoide de referencia en el que son expresadas las coordenadas de cada punto de observación y el área del elemento de superficie limitado por meridianos y paralelos. Para la realización efectiva de este cálculo se utilizó el algoritmo implementado por Cuevas (1991), un mayor detalle sobre este aspecto puede encontrarse en Cuevas (1994); Cuevas y Pacheco (1994).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las técnicas de representación cartográfica que se utilizan, permiten obtener un mayor rendimiento, en cuanto a implementación se refiere. Fue utilizado el Sistema WinSurfer V 6.02 para la representación de los mapas calculados.

La equidistancia entre isolíneas es de 5 mGal y 10 mGal válidas para la solución de problemas geólogo-geofísicos regionales a la escala 1 : 500 000 en que se trabajó. Con el objetivo de facilitar la interpretación de los valores de anomalías se han trazado una serie de líneas maestras cada 10 mGal y 50 mGal y por otra parte, se han representado los máximos y mínimos relativos con los símbolos + y -, con el objeto de que de una forma rápida e inequívoca se pueda deducir el valor de la isolínea de la anomalía estudiada.

Para poder realizar una comparación entre el MDE y los mapas de anomalías de aire libre y de Bouguer total, los mismos se han representado en las figuras 1, 2 y 3. Se pone de manifiesto la relación directa entre el MDE y la anomalía de aire libre, siendo de carácter simétrico con la anomalía de Bouguer.

Con el objeto de poner de manifiesto las diferencias introducidas por la introducción de la corrección por el nivel de cálculo de la fórmula internacional de 1967, se muestra un perfil característico en la zona oriental del país (fig.2), en la figura 4, donde pueden observarse las diferencias significativas que introduce en los valores de las anomalías, lo que permitirá llevar al mismo nivel la información gravimétrica del país, con la existente en el área caribeña. Este perfil pasa por la conocida anomalía de Levingstone en la zona oriental del país, en este caso la anomalía alcanzaba los 171 mGal (con corrección topográfica) y con la corrección de gravedad normal alcanza los 187 mGal.

Para el caso de Cuba ya con anterioridad se había realizado un estudio detallado (Cuevas y Pacheco, 1994; Cuevas y Díaz, 1996), así como otro estudio de regionalización de zonas a partir de métodos no supervisados de reconocimiento de patrones (Díaz et. al, 1998), donde se establecieron diferentes zonas de complejidades, pudiéndose obtener un esquema de caracterización regional del efecto gravitacional del relieve en todo el territorio nacional, a escala 1: 1 500 000. En el mismo se representan tres niveles del comportamiento anómalo del relieve topográfico de alta, moderada y baja complejidad, sobre las

observaciones de la gravedad. Todo esto fue realizado a partir del estudio de los mapas obtenidos por Cuevas (1994) a escala 1: 500 000 de las correcciones topográficas parciales (de la zona lejana y cercana), así como de la morfometría del relieve topográfico (altura topográfica y gradiente horizontal máximo de la altura).

Empleando la metodología descrita anteriormente, se determinaron valores en tierra del efecto gravitacional del relieve (EG) que alcanzan los 58 mGal, localizándose en el extremo meridional de Cuba oriental (no la máxima altura de 1972 m). Los mínimos valores del EG en Cuba se localizan en las zonas de llanuras que se extienden a todo lo largo del territorio como son: la Cuenca del Cauto (4-6 mGal) y las llanuras de Camagüey (1-2 mGal) por el oriente, por el occidente la llanura Habana-Matanzas (1-2 mGal) y toda la parte meridional de la Isla de la Juventud (4-10 mGal, Altura máxima: 310 m) entre otras. Las zonas de altos valores del EG, se ubican en la Sierra Maestra, la Sierra de Nipe-Cristal (8 mGal, Altura máxima: 1231 m), y la Sierra del Purial, parte oriental (9-10 mGal, Altura máxima: 1137 m), el Macizo Guamuhaya, parte central (Sierra Escambray y Trinidad, 3-11 mGal, Altura máxima: 1140 m), occidente de la Cordillera de Guaniguanico (3-6 mGal, Altura máxima: 692 m). Los valores máximos de gradiente del EG, se localizan en el extremo sur oriental de Cuba, con dirección de máximo gradiente de N a S (Cuevas y Pacheco, 1994; Cuevas y Díaz, 1996). A manera de ejemplificar se muestra en la Fig. 5, un perfil de anomalías de Bouguer Simple y Total en la zona oriental de Cuba (incluyendo parte de Jamaica) donde se aprecian las diferencias significativas entre ambas anomalías.

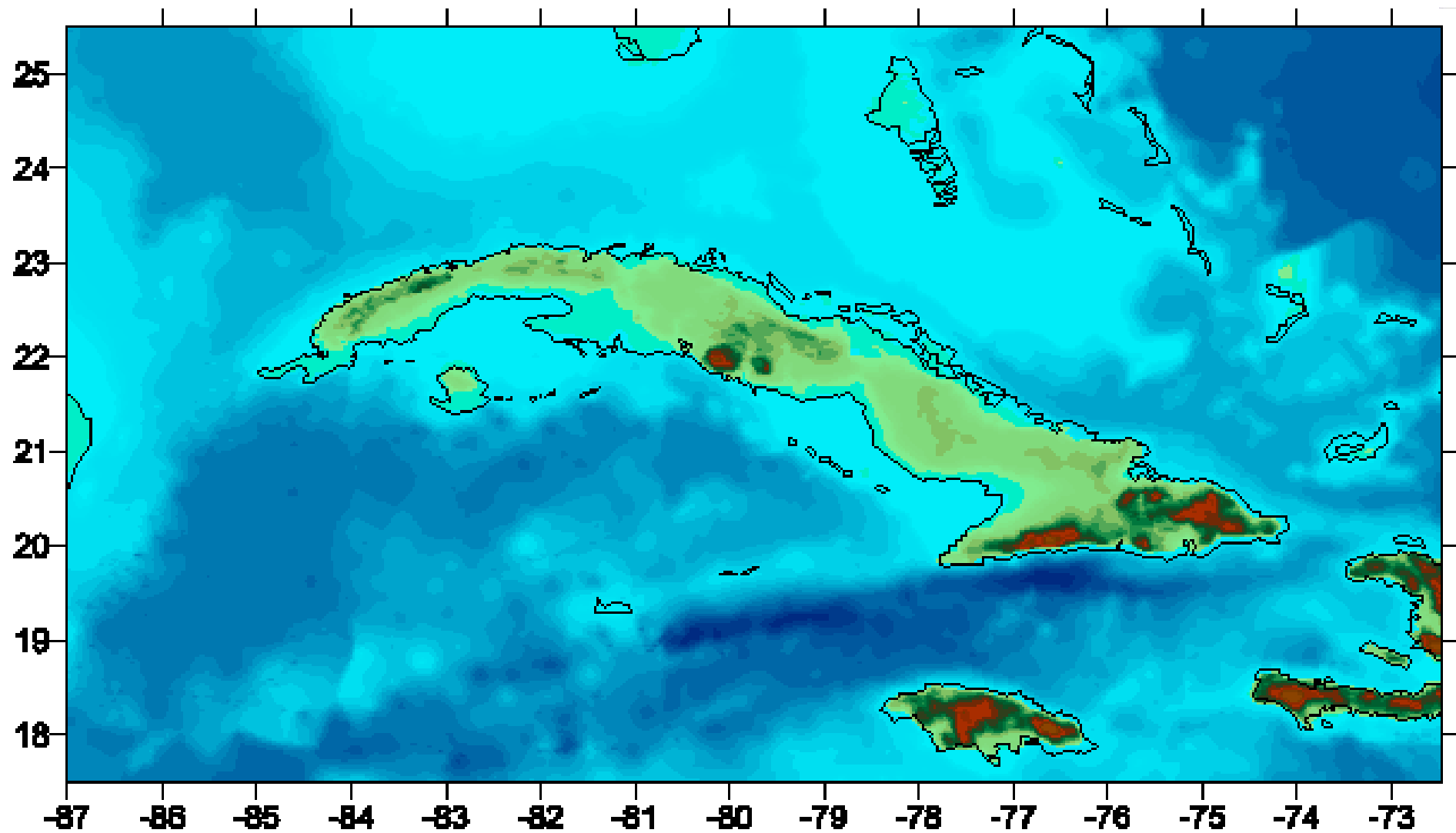
## CONCLUSIONES

- ⌘ El presente trabajo cumplió satisfactoriamente el objetivo de la confección de los mapas gravimétricos de aire libre y en reducción de Bouguer total ( $\sigma = 2,67 \text{ t/m}^3$ ) de Cuba, así como los mares adyacentes, a una escala de 1 : 500 000,
- ⌘ Los mencionados mapas recién concluidos completan el material necesario para la culminación de los mapas gravimétricos de aire libre, isostáticos y en reducción de Bouguer total del Caribe centro occidental,
- ⌘ Todos los valores del efecto gravitacional del relieve en el área de Cuba son significativos y necesarios tener en cuenta para corregir los valores de las anomalías de Bouguer para llevar a cabo investigaciones de interpretación geólogo-geofísica del país,
- ⌘ El presente resultado culmina una etapa en el estudio del campo gravimétrico en Cuba, que permitirá contar con este tipo de mapas hasta estos momentos inexistentes, a partir de la información gravimétrica actualizada y corregida para ser integrada a la información del Caribe centro occidental, para las investigaciones geólogo-geofísicas regionales. Este resultado nos posibilita poder contar con

el modelo digital del campo gravimétrico, para su posterior análisis e interpretación conjuntamente con otros campos físicos, con el concurso de técnicas de interpretación de avanzada.

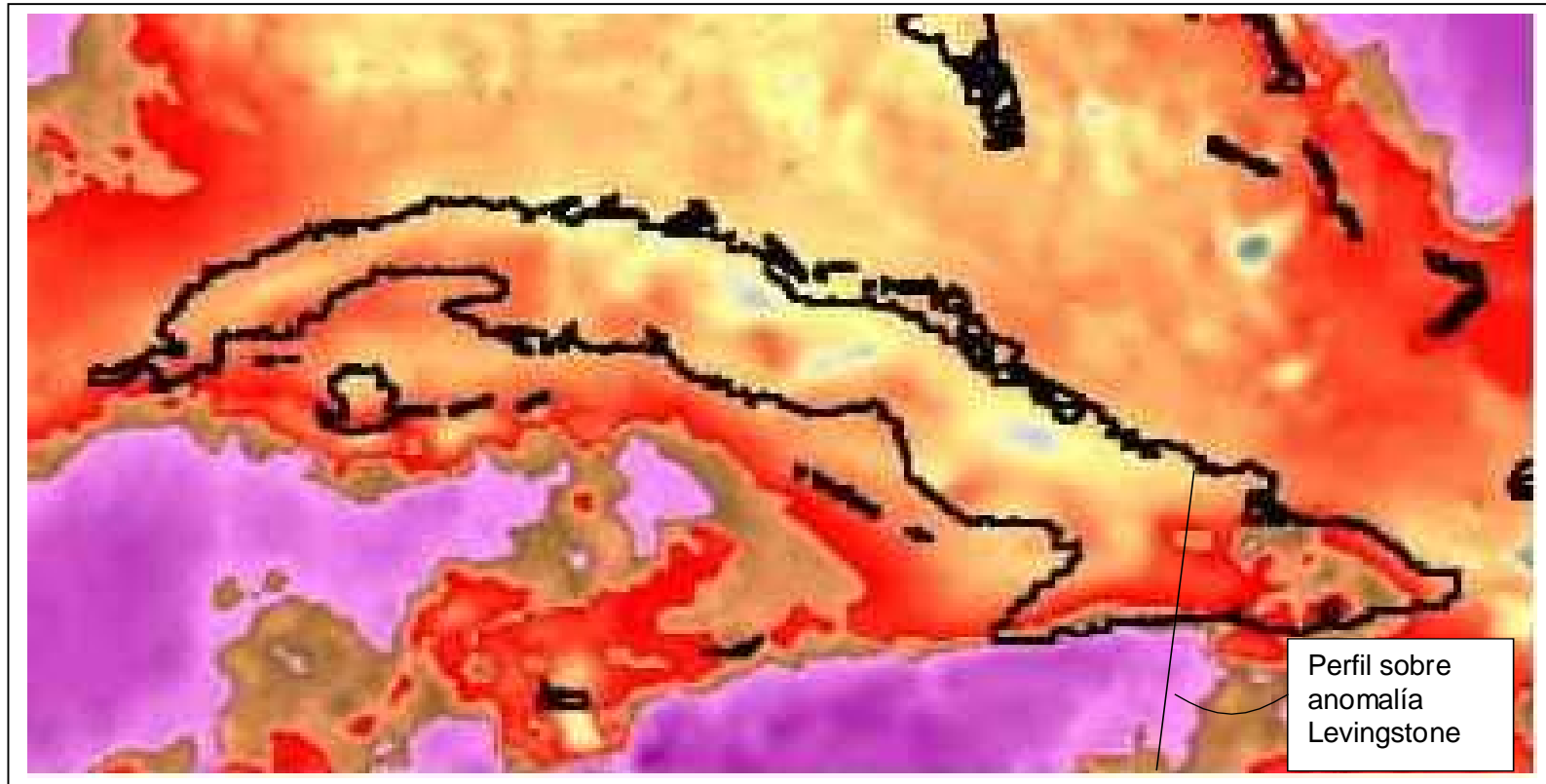
## Referencias

- Alvarez, R. J. L. Cuevas, L. A. Díaz, E. Pérez y B. Polo, 2000. Interpretación Integrada de los Campos Geomagnético y de Anomalías de Bouguer total en el Caribe centro occidental. Memorias del I Congreso Cubano de Geofísica, Revista Electrónica Memorias de GEOINFO, ISSN 1028-8961, 13 pp.
- Bowin, C. (1976): Caribbean Gravity Field and Plate Tectonics. The Geological Society of America, Special Paper 169, 79 pp.
- Bureau Gravimétrique International; Association Internationale de Geodésie, Francia(1988): Bulletin D'Information, No. 62, Toulouse, 25 pp.
- Cuevas, J. L., 1991. TERCORR: Un Sistema Turbo Pascal para el cálculo de las correcciones topográficas parciales hasta la zona de Hayford O<sub>2</sub>, utilizando un modelo digital de Elevación. II Encuentro Nacional de Ingenieros Geofísicos, La Habana, mayo ISPJAE, Resúmenes, p. 29.
- Cuevas, J. L., 1994. Caracterización de Anomalías de la Gravedad y su Utilización en Estudios de Tectónica y Sismicidad de Cuba centro oriental [inédito], Tesis Doctorado, IGA-ACC, mayo, La Habana, 146 pp.
- Cuevas, J. L. y L. A. Díaz, 1996. Efecto Gravitacional del Relieve Topográfico en Cuba: Características e Influencia. En Resúmenes, III Simposio Cubano de Geofísica GEOFÍSICA'96, 21-24 Oct., La Habana, 64-65 y en Resúmenes, XI Fórum de Base de Ciencia y Técnica y VI Jornada Científica IGA, 25-26 Sept., La Habana, 17-18.
- Cuevas, J. L. y M. Pacheco, 1991. Informe sobre el mapa de Anomalías Gravimétricas en reducción de Bouguer total  $\sigma=2,67 \text{ t/m}^3$ , de Cuba oriental a escala 1:500 000. [inédito]. Reporte de Investigación, Inst. Geof. y Astron., ACC, La Habana, 28 pp.
- Cuevas, J. L. y M. Pacheco, 1994. Influencia del Efecto Gravitacional del Relieve Topográfico sobre las Anomalías de Bouguer hasta la Zona de Hayford O<sub>2</sub> en Cuba oriental. *Geof. Int.*, Vol. 33, No. 3, 385-397
- Cuevas, J. L., M. Fundora, M. Pacheco y B. Polo, 1989. Nuevo Mapa de Anomalías Gravimétricas de Bouguer para la República de Cuba a escala 1 : 500 000. En 1er. Congreso Cubano de Geología, La Habana, marzo, Resúmenes, p 114.
- Díaz L. A., J. L. Cuevas y B. Polo, 1998. Caracterización de la influencia del relieve en las observaciones gravitacionales para Cuba, con el uso de métodos no supervisados de reconocimiento de patrones. *Revista Minería y Geología*, Vol. XV, No. 3, 31-38
- Pick, M., 1987. On the calculation of the gravity terrain corrections in Czechoslovakia. *Studia. geoph. et geod.*, No. 39, 245-248

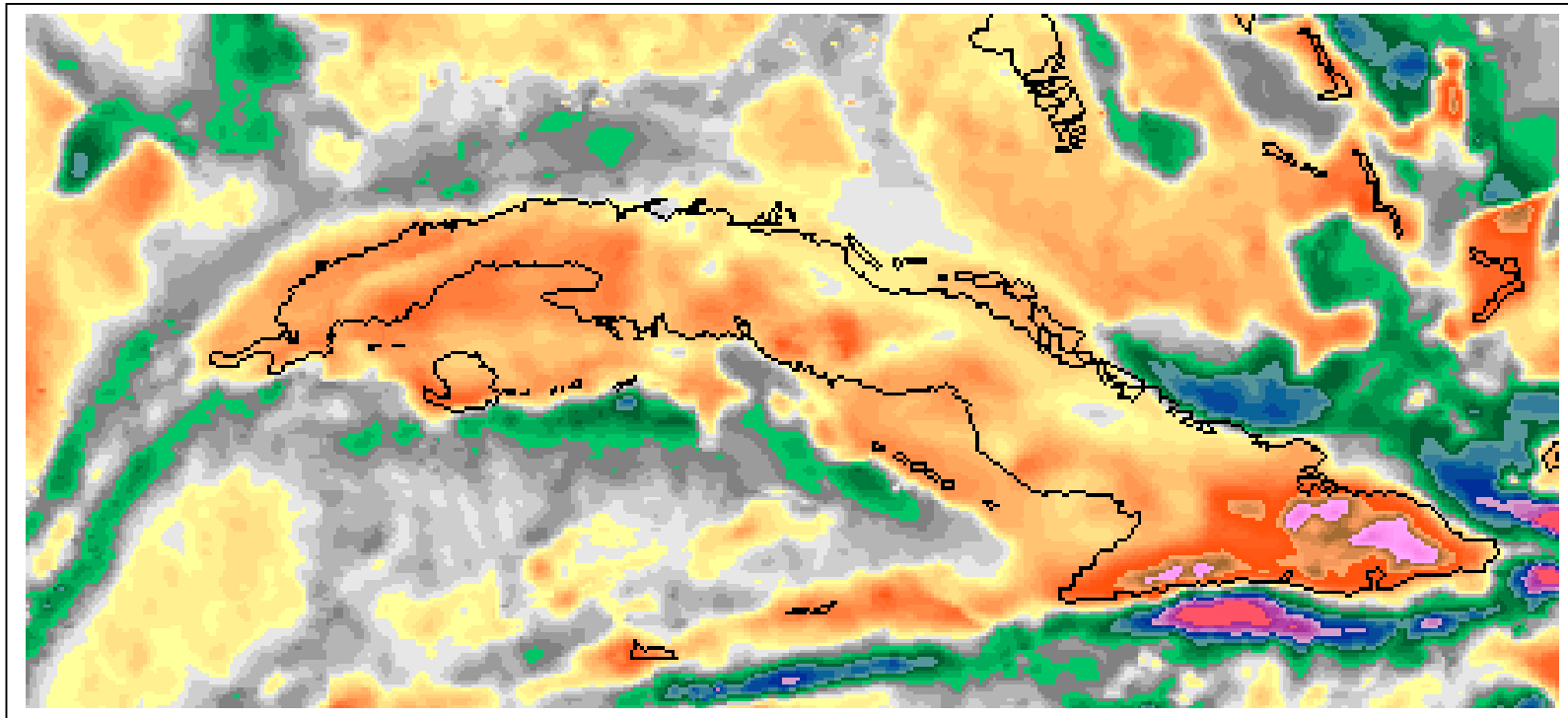


*Fig. 1. Modelo Digital de Elevación de Cuba y sus mares adyacentes*

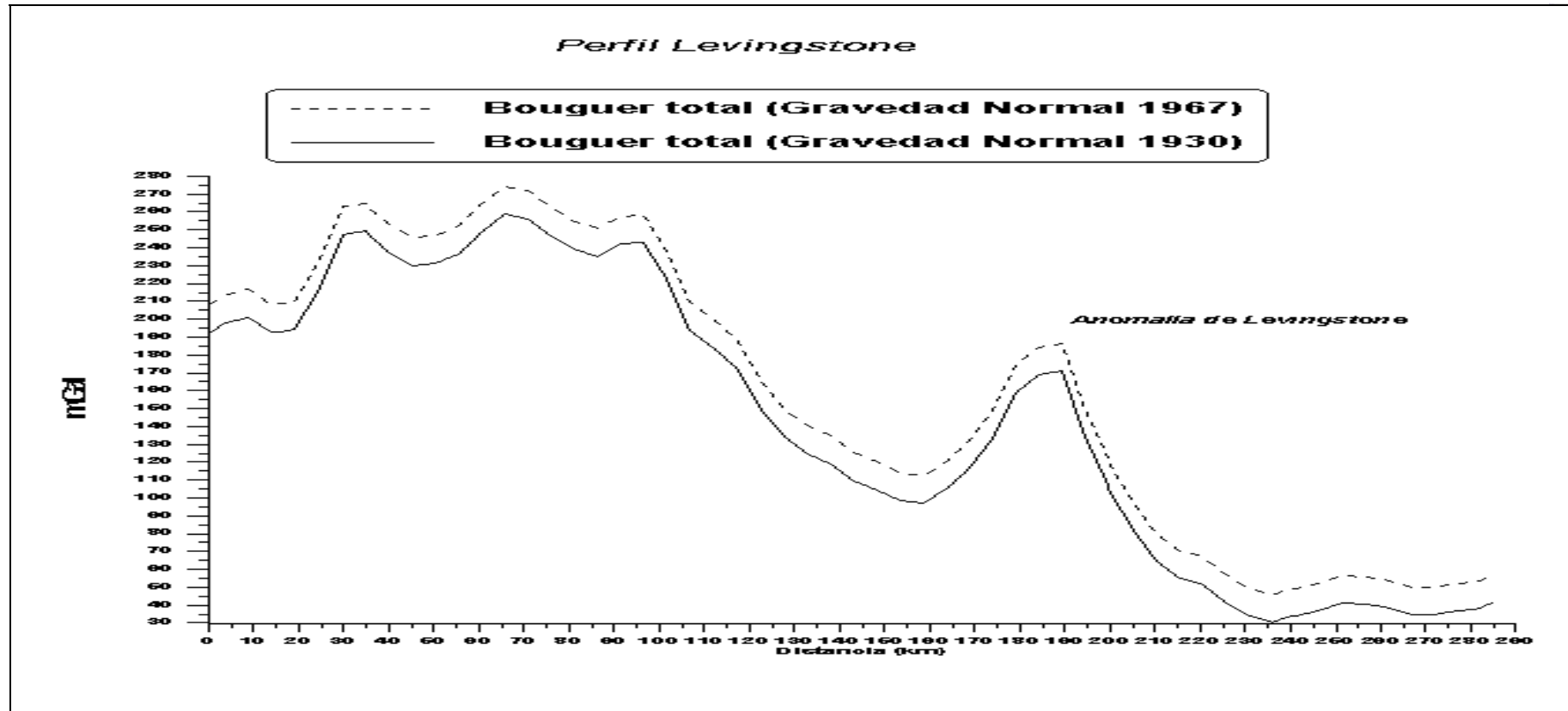




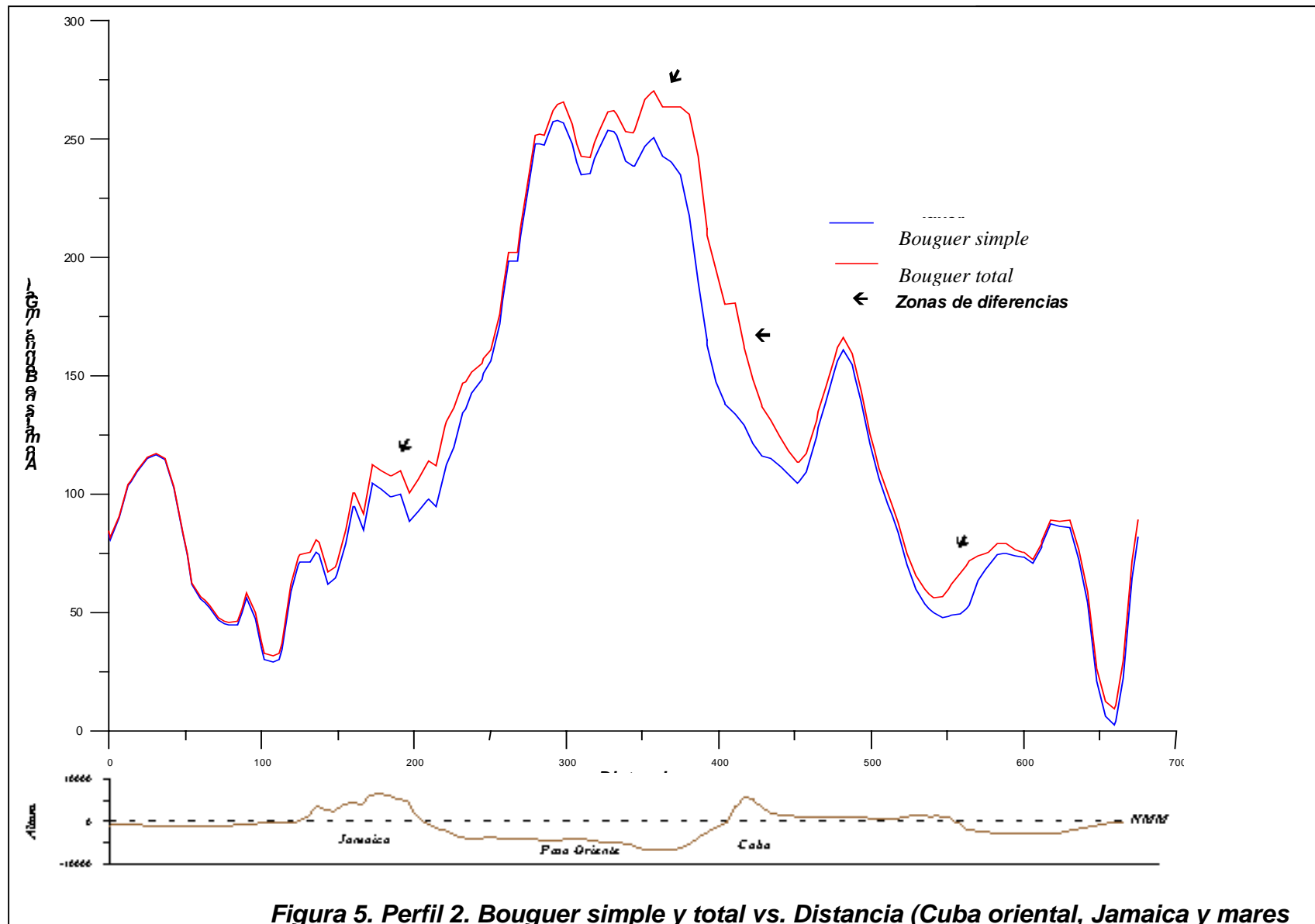
**Fig 2. Mapa de Anomalías de Bouguer total de Cuba y sus mares adyacentes (e.g. con corrección topográfica hasta 167 km)**



**Fig 3. Mapa de Anomalías de Aire Libre de Cuba y sus mares adyacentes**



**Figura. 4. Perfil sobre la anomalía de Bouguer total y simple de Levingstone**



**Figura 5. Perfil 2. Bouguer simple y total vs. Distancia (Cuba oriental, Jamaica y mares adyacentes).**