

Influencia del efecto gravitacional del relieve topográfico sobre las anomalías de Bouguer hasta la zona de Hayford 0₂ en Cuba oriental

José L. Cuevas Ojeda y Maritza Pacheco Puchades.

Departamento de Geofísica del Interior

Instituto de Geofísica y Astronomía

Academia de Ciencias de Cuba, La Habana, Cuba.

Recibido: 11 de enero, 1993; aceptado: 31 de mayo, 1993.

RESUMEN

Un estudio de la influencia del efecto gravitacional del relieve topográfico sobre las anomalías de Bouguer hasta la zona de Hayford 0₂ (eg. 166.7 km) en la región de Cuba oriental ha sido realizado. Es precisamente en esta región de Cuba donde se observan los mayores desniveles de alturas, que corresponden entre la Sierra Maestra y la Hoya de los Caimanes; estos valores alcanzan magnitudes máximas por encima de 8 000 m. El cálculo del efecto gravitacional provocado por la topografía se realizó asumiendo una densidad de 2,67 t/m³, utilizándose un conjunto de radios de integración parcial de 5 y 10 km hasta la distancia antes mencionada, en tres zonas montañosas y en otra zona con carácter de llanura. Al realizarse el estudio de integración parcial del efecto gravitacional se pudo establecer que el comportamiento del decrecimiento con la distancia se ve influenciado por los desniveles adyacentes con un aumento del mismo. Se pudo establecer que para toda esta región la corrección topográfica alcanza valores máximos de hasta 70 mGal (Sierra Maestra), en las Sierras de Nipe-Cristal toman valores de hasta 11 mGal y Purial toma valores de hasta 18 mGal, discutiéndose las causas de las diferencias existentes. Se demuestra con ejemplos reales que en esta región la influencia del efecto gravitacional del relieve sobre las anomalías de Bouguer es significativa y que de hecho se introducen errores al no considerar este efecto.

PALABRAS CLAVE: Efecto gravitacional, corrección topográfica, anomalías de Bouguer.

ABSTRACT

Eastern Cuba features relief differences of more than 8 km between the Sierra Maestra and the Cayman Trough. We carry out terrain corrections to Hayford zone 0₂ (eg. 166.7 km) in three high-relief areas and one flat area assuming a density of 2,67 t/m³. Integration was done over radii of 5 km and 10 km. The terrain correction may be as large as 70 mGal in the Sierra Maestra region and may reach 11 mGal in the Sierra de Nipe-Cristal. The influence of nearby topography on the Bouguer anomalies is discussed.

KEY WORDS: Gravitational effect, topographic correction, Bouguer anomalies.

INTRODUCCION

El efecto gravitacional debido al relieve topográfico de la superficie terrestre ha sido objeto de estudio de muchos investigadores en todo el mundo (Hayford y Bowie, 1912; Hammer, 1939; Sandberg, 1958; Talwani y Ewing, 1960; Sowerbutts, 1978; Campbell, 1980; Sideris, 1984; Thanassoulas y Tsokas, 1986; Pick, 1987, 1988). La mayoría de las referencias han sido dedicadas a las formulaciones teóricas, así como al cálculo de la corrección correspondiente. Es importante la determinación de la distancia hasta la que se debe calcular este efecto, así como la zona en la que por su relieve o el adyacente debe realizarse esta tarea. En Cuba se ha tenido en cuenta el efecto gravitacional del relieve en los trabajos gravimétricos de prospección en la provincia de Pinar del Río (Volochnikovich y Kislitzin, 1984), usándose el método de Lukavchenko (Sazhina y Grushinky, 1971) hasta distancias de 10 km, y en la zona central de Cuba hasta distancias de 18 km (Lledías y Jiménez, 1990). En la zona oriental del país, en trabajos de tipo regional, se ha calculado el efecto gravitacional sobre perfiles (Gladisko *et al.*, 1975). Sánchez (1988) realizó este trabajo también en perfiles hasta una distancia de 70 km.

Por otra parte, en una área al sur de las provincias orientales en el Mar Caribe hasta distancias de 60 km, y considerando la curvatura de la Tierra, fue calculado este efecto por Cuevas (1989), donde se probó por primera vez en Cuba la formulación de Pick (1987), la cual puede ser utilizada hasta una distancia muy alejada del punto de observación (zona de Hayford 0₂). El presente estudio trata sobre la influencia del efecto gravitacional del relieve hasta distancias muy alejadas del punto de observación en la zona de Cuba oriental, donde los desniveles existentes entre la Sierra Maestra y la Hoya de los Caimanes son los mayores del país, y donde se determinaron valores grandes de la corrección topográfica (70 mGal). El conocimiento del mencionado efecto con la distancia al punto de observación es importante para la determinación del radio hasta el que se hace necesario tener en cuenta el relieve.

Relieve de la región de Cuba oriental

La zona oriental posee las mayores altitudes del archipiélago cubano. Las llanuras se localizan en la zona de Camagüey y la zona del Cauto, comprendiendo los territorios de las provincias Granma, Holguín, Tunas y Ca-

magüey. Esta zona se caracteriza por un relieve llano, no sobrepasa los cien metros de altura sobre el nivel del mar. El Golfo de Guacanayabo es poco profundo, no alcanza profundidades de más de 28 m. Ya en la zona central oriental se localizan llanuras en estrechas bandas, así como en las inmediaciones de las costas.

Sin embargo, el relieve montañoso alcanza valores de pendiente y disección vertical de más de 30 y 100 m/km (Figura 1) respectivamente (Cotilla *et al.*, 1990). La mayor altitud la tiene el Pico Turquino (1 972 m) en la Sierra Maestra (en lo adelante SM). En las Sierras del Nipe-Cristal (en lo adelante SNC), los valores de altitud alcanzan más de 1 200 m, mientras que en la zona de la Sierra del Purial (en lo adelante SP) llegan hasta los 1 000 m.

La plataforma insular rodea a la Isla con diferente ancho aunque en la región sur oriental y NE prácticamente no existe; en general es de llanura, de relieve suave y ondulado.

Al Sur de la región oriental encontramos la Hoya de los Caimanes (en lo adelante HC), caracterizada por un fondo en "V" que alcanza profundidades de 6 500 m. Bordeando la fosa encontramos una transición del relieve submarino que va desde los 5 000 m a 3 000 m hasta alcanzar al Sur de la costa oriental valores de 500 m como profundidad promedio, aunque en algunos lugares como en la zona sur de Pilón hasta Santiago de Cuba, aparecen isobatas de 200 m y algo inferiores; pero la transición de las isobatas de la costa hacia la fosa es abrupta, existiendo un gradiente intenso. Aquí las isobatas son alargadas en dirección EW (Figura 1).

Más al Sur de la fosa se rompe la armonía direccional de las isobatas, complicándose y apareciendo en la dirección SW-NE isobatas alargadas poco profundas con valores menores de 2 000 m.

Construcción del modelo digital

El área en estudio comprende la zona oriental, Este de Camagüey y las partes marinas de estas, ocupando una área de 166 725 km² que va desde los 79° 25' a los 73° 50' de long. W y los 18° 45' a los 21° 20' de lat. N (Figura 1). Para dicha zona se calculó la corrección topográfica desde 0 hasta los 166.7 km de distancia, esto es, la zona de Hayford 0₂. La digitalización se extendió, sobre una área de 779 000 km², la cual va aproximadamente desde los 80° 55' a 72° 00' de long. W y desde los 18° 20' a 24° 15' de lat. N, comprendiendo el Gran Banco de Bahamas por el norte y al sur Jamaica y Haití. Para la ejecución de esta tarea de investigación se utilizaron los materiales cartográficos que se resumen en la Tabla 1.

Para el área total de 779 000 km² se digitalizaron de forma manual los mapas a escala 1: 50 000 y automática las cartas batimétricas, digitalizándose un total de 300 189 puntos. Nótese que cada mapa se digitalizó a su escala; por tanto contamos con un modelo digital para la zona terrestre cada 0.5 km y 5 km. (MDT500, MDT5000) y para la zona marina, cada 5 km y 1.667 km (MDT1667) en las zonas cercanas a las costas, referenciándose el cálculo del

efecto gravitacional cada 5 km. En general, para toda el área se confeccionó un modelo digital cada 5 km. Un mayor detalle puede consultarse en Cuevas y Pacheco (1991).

Método de cálculo

Para el cálculo de la corrección topográfica fue utilizada la formulación desarrollada por Pick (1987), donde se tiene en cuenta la curvatura de la Tierra, así como la forma del elipsoide de referencia. Son expresadas las coordenadas de cada punto de observación y el área del elemento de superficie limitado por meridianos y paralelos. De forma muy general las expresiones que se utilizan para realizar el cálculo son las siguientes:

$$\Delta g_{top} = \Delta g_{top}^{\circ} + \frac{1}{2} f \sigma_0 \left[\left\{ \frac{-\Delta k}{R} - \frac{\Delta k^2}{ro} \left[1 + \frac{\Delta}{8ro^2} \left(1 + \frac{10y^2}{ro^2} - \frac{\Delta^2}{128ro^4} \left(21 - \frac{336y^2}{ro^2} + \frac{252y^4}{ro^4} \right) \right) + \frac{3\Delta k^4}{4ro} \left(1 + \frac{5\Delta}{24ro^2} \left(3 + \frac{14y^2}{ro^2} \right) \right) - \frac{5\Delta k^6}{8ro} \right] \frac{\delta}{p} - \frac{\Delta^2 k^2}{ro^3} \left[\frac{3}{8} \left(1 - \frac{5y^2}{ro^2} \right) + \frac{15\Delta}{64ro^2} \left(1 - \frac{7y^2}{ro^2} \right) \right] \frac{\delta^2}{p^2} \right] \right]_{\Delta h=ho}^{\Delta h=ho-h} \quad (1)$$

donde

$$\Delta g_{top}^{\circ} = \frac{1}{2} f \sigma_0 \left\{ \frac{\Delta k}{R} \left(1 + \frac{\Delta}{24ro^2} \right) + \frac{\Delta k^2}{ro} \left(1 - \frac{\Delta h}{6R} \right) \left[1 + \frac{3\Delta}{8ro^2} + \frac{7\Delta^2}{128ro^4} \right] - \frac{3\Delta k^4}{4ro} \left(1 + \frac{25\Delta}{24ro^2} \right) + \frac{5\Delta k^6}{8ro} \left(1 + \frac{49}{24ro^2} \right) - \frac{35\Delta k^8}{64ro} \left(1 + \frac{27\Delta}{8ro^2} \right) + \frac{63\Delta k^{10}}{128ro} \left(1 + \frac{121\Delta}{24ro^2} \right) \right\} \left[\right]_{\Delta h1}^{\Delta h2} \quad (2)$$

f: constante gravitacional

σ_0 : densidad para el cálculo del efecto gravitacional

Todos los parámetros utilizados, así como las expresiones matemáticas para el cálculo, están relacionadas en el Apéndice 1.

Para el cálculo de la corrección topográfica se implementó un algoritmo (Cuevas, 1991) capaz de calcular el efecto gravitacional de las masas topográficas de forma parcial, léase de un radio interno a otro externo, y además teniendo en cuenta el elipsoide de referencia que se utilice, cuestión esta última que se le incorporó al algoritmo que si bien lo exige, no está formulado (ver Apéndice 1, excentricidad del elipsoide de referencia). En el sistema se tiene en cuenta los diferentes elipsoides que son utilizados en el mundo, escogiéndose para el caso particular de nuestra área geográfica el de Clarke 1886 (Bortoluzzi y Ligi, 1986).

DISCUSION Y RESULTADOS

Efecto gravitacional en zonas montañosas y llanas

Para estudiar comparativamente el efecto gravitacional del relieve de la superficie terrestre en la zona en estudio, se analizaron cuatro áreas que por sus características generales, podemos dividir las en dos grupos: montañosas y de llanuras. Dentro del primer grupo se escogieron tres zonas que cubren geográficamente a la SM (1 050 km²), SNC (2 400 km²) y la SP (2 025 km²), y en el segundo grupo se escogió la zona de la Cuenca del Cauto (en lo adelante CC) (1 200 km²). En la Figura 1 se muestra un mapa de la ubicación geográfica de las áreas (a, b, c y d).

El efecto gravitacional del relieve terrestre sobre un punto dado depende, entre otras variables, de las diferencias relativas entre las alturas alrededor del punto dado y la altura de éste; es por esta razón que en las diferentes zonas escogidas se realizó un análisis estadístico de las distribuciones de frecuencias de las alturas topográficas, así como el cálculo de algunos parámetros estadísticos que dan una idea cuantitativa que caracteriza a cada zona en particular para poder comparar los efectos gravitacionales.

Primeramente expondremos de forma general los efectos gravitacionales, calculados hasta una distancia de 166.7 km (en la práctica 165 km) para cada zona; después los caracterizaremos estadísticamente. En la Figura 2 se muestran estos efectos gravitacionales para las cuatro zonas bajo estudio; pueden apreciarse diferencias significativas entre las zonas montañosas y las llanas. Por ejemplo, en la SM (Figura 2a) se determinaron valores de hasta 70m Gal; en la SNC (Figura 2d) se observan valores de

hasta 11 mGal y en la SP (Figura 2b) los valores alcanzan hasta 18 mGal; en contraposición a estos resultados, en la zona de la CC (Figura 2c) se determinaron valores algo por encima de los 4 mGal. Los valores son crecientes en la dirección NW-SE, lo que indica la influencia de las alturas de la SM al SE de la zona seleccionada. También se pueden observar diferencias significativas entre las propias zonas montañosas, donde se destaca la SM del resto. Entre las SNC y SP se observan también diferencias (Figura 2b y d), aunque no son tan notables como sucede entre éstas y la SM.

Caracterización estadística de las zonas bajo estudio

En la Tabla 2 se han resumido algunos parámetros estadísticos que caracterizan las diferentes zonas.

Las tres zonas montañosas (Figura 1) tienen áreas con relieve submarino, aunque con diferentes grados: la zona de la SM presenta un mínimo significativo (-6 782 m) que corresponde a la HC, le sigue la SP con -2 816 m y la SNC que por el Norte sólo alcanza los -50 m. Los máximos son para la zona de la SM 1 640 m, para SNC y SP 910 m y 885 m respectivamente.

En cuanto a los valores modales la SNC y la SP presentan valores similares (200 m y 220 m respectivamente) y la SM 720 m lo que la diferencia del resto. Hay grandes diferencias en el rango de variación, donde los 8 872 m de la SM sobresalen grandemente de los 3701 m de la SP y los 960 m de la SNC. La zona de la CC se diferencia sustancialmente del resto de las zonas, con un rango máximo de 139 m y una moda de 21 m. El 20% de las alturas de la SM está entre los 500 m y los 1 000 m (Tabla 3) y un 10%

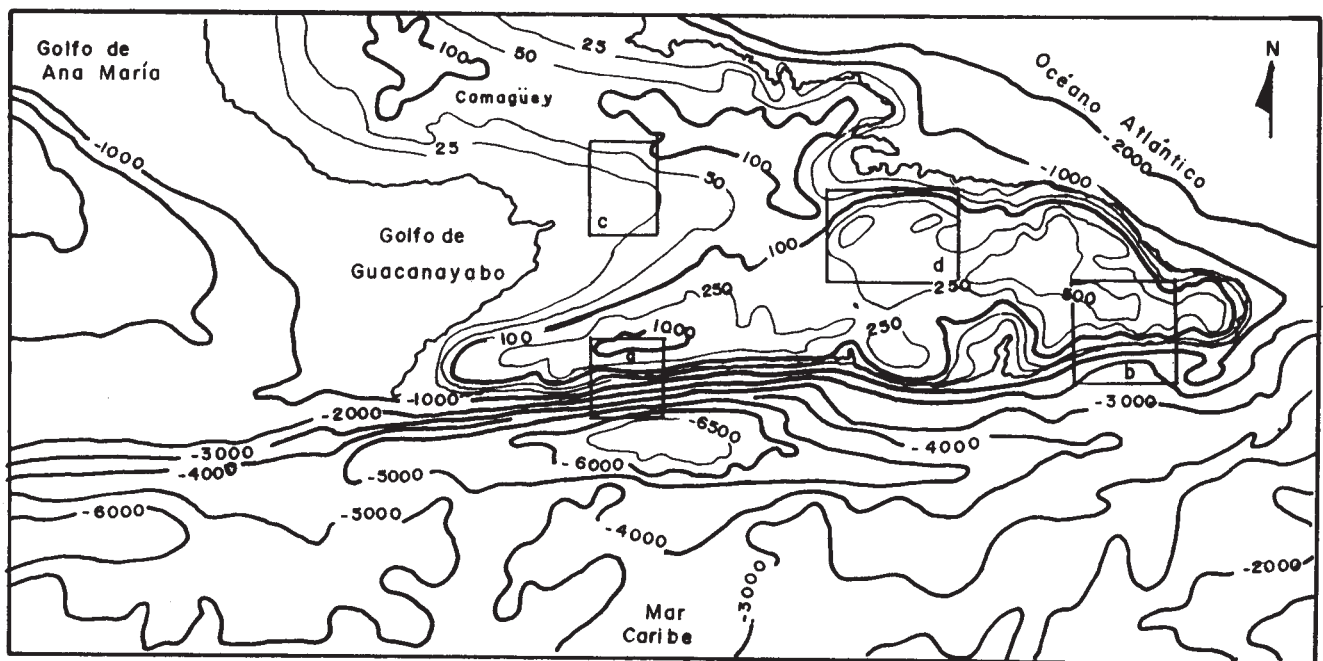


Fig. 1. Mapa esquemático del relieve en el área en estudio y de ubicación de las áreas donde se calcularon los efectos gravitacionales parciales: a) Sierra Maestra, b) Sierra del Purial, c) Cuenca del Cauto, d) Sierra de Nipe-Cristal. Isolíneas de alturas y profundidades en metros.

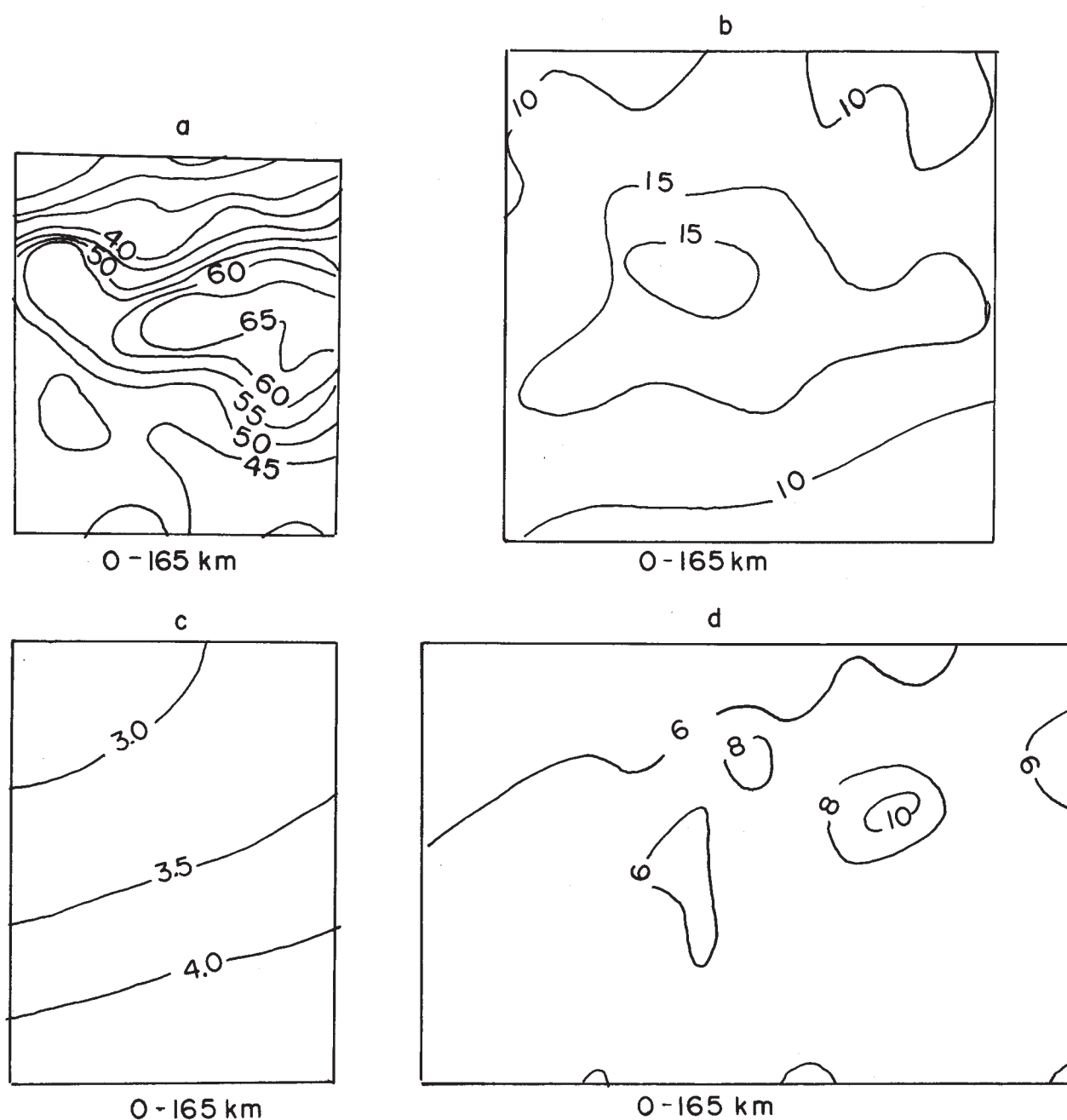


Fig. 2. Efectos gravitacionales (en mGal) hasta la zona de Hayford 0₂ en las cuatro zonas bajo estudio. a) Sierra Maestra, b) Sierra del Purial, c) Cuenca del Cauto, d) Sierra de Nipe-Cristal.

Tabla 1

Volumen del material cartográfico utilizado

Nº Materiales	Escala	Paso de digitalización (km)	Nº de cartas	Total de ptos. digitalizados
1 Mapas topográficos	1: 50 000	0.5	81	155 844
2. Mapas batimétricos	1:150 000	1.667	113	138 840
3 Mapas batimétricos	1:500 000	5	5	5 505

Tabla 2
Sumario de parámetros estadísticos

Alturas (m)							
Zona	Puntos	Media	Mediana	Moda	Mínimo	Máximo	Rango
Cauto	5 471	-1 430	-25	0	-6 796	1 640	8 436
S. Maestra	5 438	-1 758	-1 223	0	-6 804	1 640	8 444
S. Nipe	5 976	-1 785	-1 910	0	-6 804	1 640	8 444
S. Purial	5 744	-1 691	-1 835	10	-6 752	2 321	9 073

Diferencias de alturas (m)							
Zona	Puntos	Media	Mediana	Moda	Mínimo	Máximo	Rango
Cauto	5 471	1 472	63	38	-1 602	6 842	8 444
S. Maestra	5 438	2 101	1 552	340	-1 300	7 144	8 444
S. Nipe	5 976	2 381	2 500	600	-1 040	7 404	8 444
S. Purial	5 744	2 271	2 420	560	-2 215	7 322	9 537

Alturas (m) [áreas efectivas]							
Zona	Puntos	Media	Mediana	Moda	Mínimo	Máximo	Rango
Cauto	71	33	24	21	1	140	139
S. Maestra	90	-1 612	-180	720	-6 782	1 640	8 872
S. Nipe	165	232	202	200	-50	910	960
S. Purial	144	-468	35	220	-2 816	885	3 701

Tabla 3
Resumen de frecuencias relativas de algunas clases características

Alturas			
Zona	0 - 500 m	500 - 1 000 m	1 000 - 1 500 m
S. Maestra	16.6%	20.0%	10.0%
S. Purial	43.0%	10.4%	—
S. Nipe	62.7%	6.6%	—
S. Cauto	100.0%	—	—

entre 1 000 y 1 500 m, siendo la contribución de las dos clases, mayores que en el resto de las zonas. En la SP y la SNC se observan diferencias que apuntan también a los resultados en sus respectivos efectos gravitacionales totales (Figura 2).

Los histogramas de las diferencias de alturas hasta la distancia de 165 km alrededor de las áreas bajo estudio se muestran en la Figura 3. En la Tabla 2 puede notarse que para la CC, SM y SNC las alturas tienen un mismo máxi-

mo lo cual sugiere de una influencia mutua, que en el caso de la CC se hace más patente en el efecto gravitacional total (Figura 2c) por ser una zona llana pero con alturas significativas en sus inmediaciones.

En el caso de la SP se destaca el máximo en las alturas (2 321 m), incluso mayor que el de la SM, pero con la diferencia sustancial que este valor se encuentra en La Española (Haití), bastante alejada de la zona efectiva. En cambio en la SM el máximo (1 640 m) corresponde tanto al

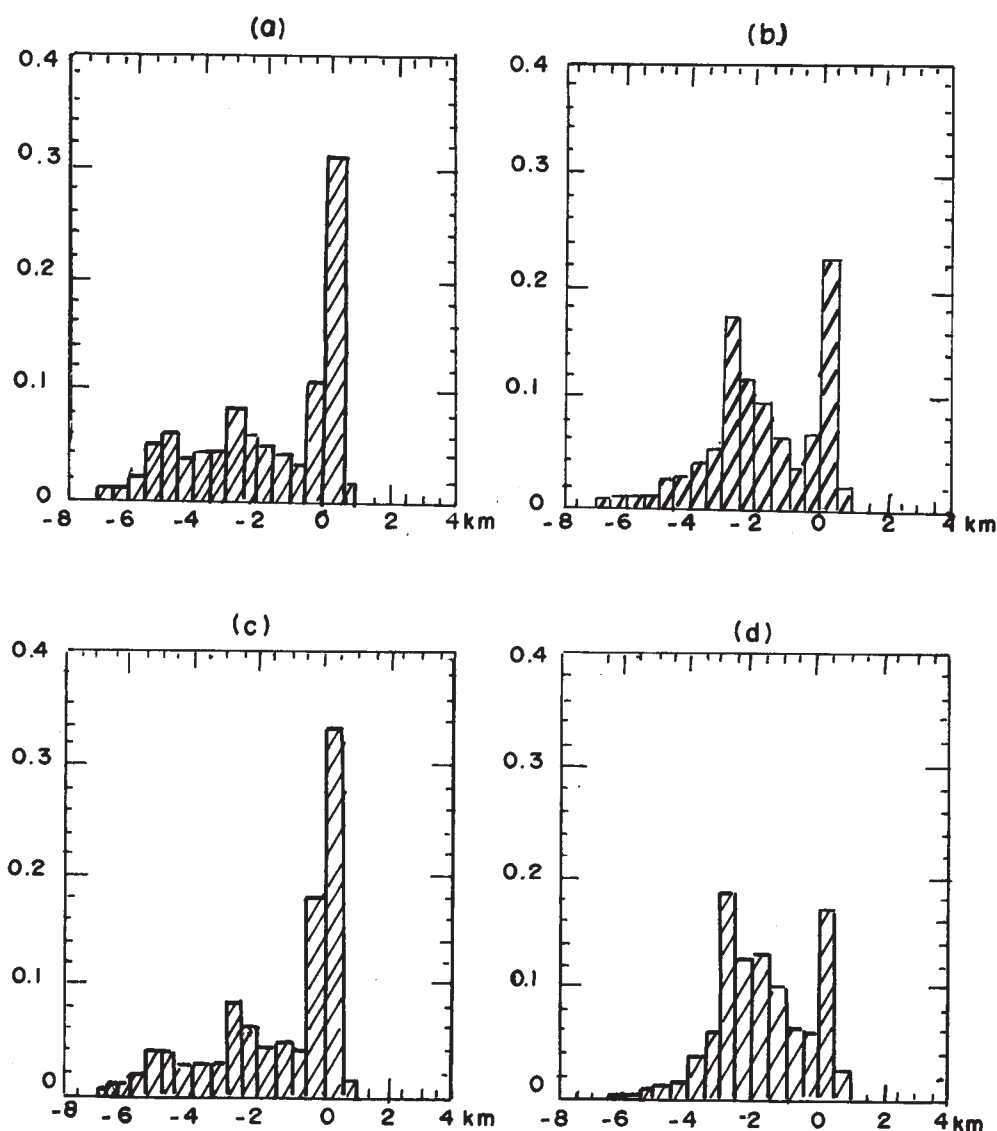


Fig. 3. Histogramas de frecuencias relativas de las alturas en las cuatro zonas bajo estudio (áreas totales): a) Sierra Maestra, b) Sierra de Nipe-Cristal, c) Sierra del Purial, d) Cuenca del Cauto.

Tabla 4

Resumen de frecuencias relativas de algunas clases características. Diferencias de alturas

Zona	Diferencias de alturas			
	0-500 m	1 000 - 4 000 m	4 000 - 5 000 m	4 000 - 8 000 m
S. Maestra				21.3%
S. Purial		66.8%	5.6%	
S. Nipe		53.5%	6.6%	13.5%
C. Cauto	50.0%			14.8%

área efectiva como a la total. En la Figura 3 se aprecian que el 21.3% de la muestra de la SM está entre 4 000 y 8 000 m; le sigue la CC con el 14.8%, SNC con el 13.5% y SP el 5.6% entre 4 000 y 5 000 m. La zona de la CC tiene más del 50% de sus diferencias de alturas entre 0 y 500 m en su zona más cercana (aprox. 40 km); de ahí la escasa

influencia en el efecto gravitacional. Por otra parte, el 66.8% está entre 1 000 y 4 000 m para la SP y el 53.5% para la SNC: de ahí los valores mayores del efecto gravitacional en Purial. En la Tabla 4 se resumen las frecuencias relativas para cada zona y en intervalos de clase de 500 m y 1 000 m.

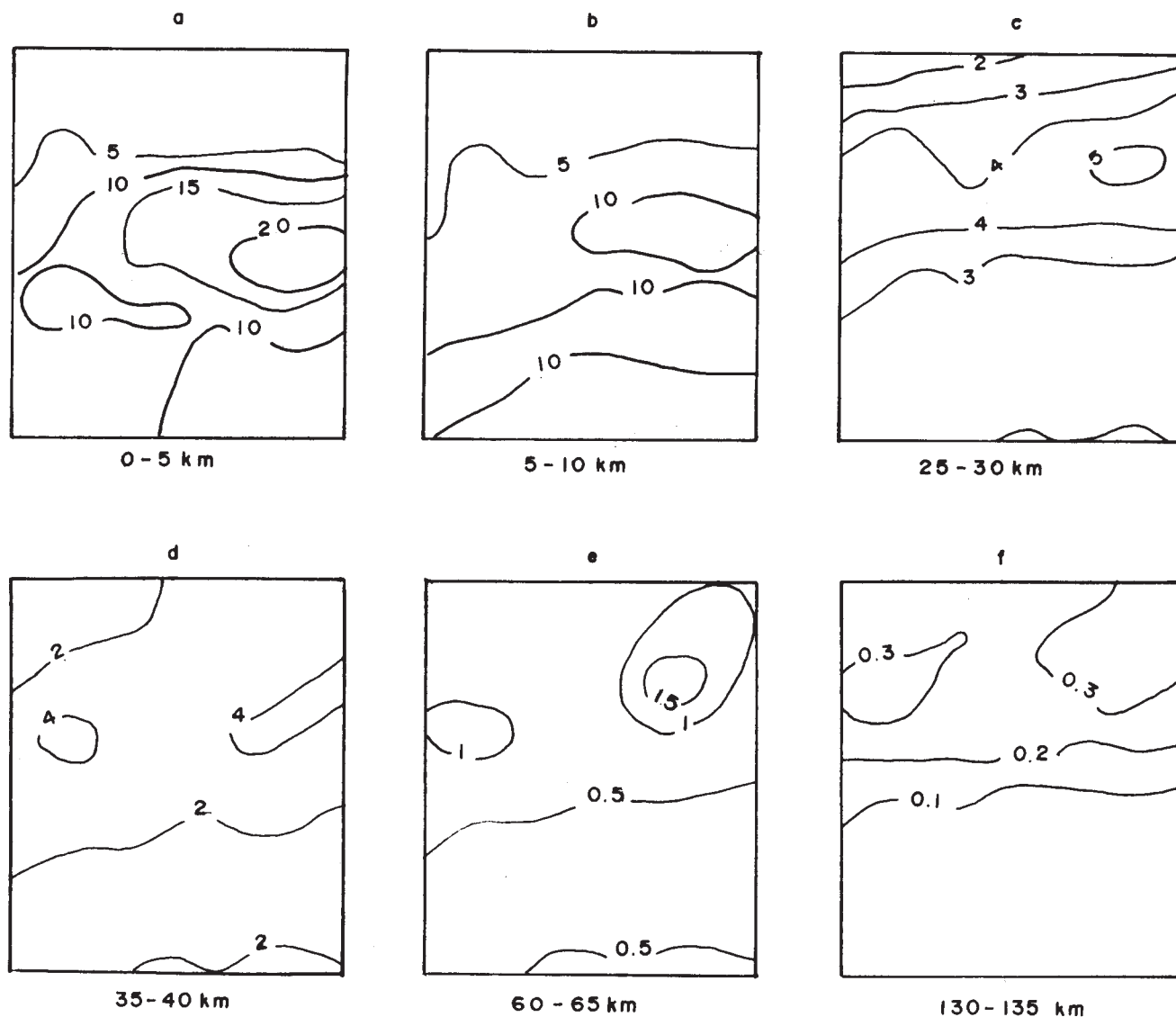


Fig. 4. Contribuciones parciales del efecto gravitacional (en mGal) debido al relieve de la superficie terrestre en la zona de la Sierra Maestra. Radio interno-externo: a) 0-5 km, b) 5-10 km, c) 25-30 km, d) 35-40 km, e) 60-65 km, f) 130-135 km.

En resumen, tanto las alturas como sus diferencias en las áreas efectivas y totales explican las diferencias que se obtienen en los efectos gravitacionales (Figura 2). La SM tiene los desniveles más notables (ver Tabla 3); la SP le sigue con desniveles para su área más cercana por encima de los 3 500 m (Figura 3) y más del 65% entre 1 000 y 4 000 m, siendo estos desniveles mayores que los observados para Nipe para el mismo rango.

Cálculo del efecto gravitacional

El efecto gravitacional del relieve terrestre se calculó utilizando radios de integración parcial de 5 y 10 km, calculándose además el efecto gravitacional total para cada una de las zonas en estudio mencionadas en el epígrafe anterior.

En la Figura 2 se muestran los efectos gravitacionales totales. En el área perteneciente a la SM se determinaron

valores de hasta 70 mGal en su parte central, caracterizándose por anomalías cerradas y alargadas en la dirección EW, hasta valores de 50 mGal. Hacia la parte N-NW decrecen estos valores hasta 20 mGal (ver Figura 2a). Esta contribución total fue descompuesta en forma parcial usando radios de 5 en 5 km (0-5 km, 5-10 km..., 160-165 km); de esta forma se obtuvieron 34 secciones de isonómalas. En la Figura 4a se observa el efecto entre 0 - 5 km del punto de observación; se determinan valores de hasta 26 mGal en la zona central y Este del área, siendo las anomalías de forma cerrada (orientación EW) decreciendo tanto al Norte (valores algo menores de 5 mGal), como por el Sur (valores menores de 10 mGal). Para un radio entre 5 y 10 km, alcanza valores de 12 mGal (Figura 4b). Las contribuciones parciales (10-30 km) van perdiendo gradualmente el carácter de anomalías cerradas para tomar una orientación del gradiente horizontal N-NW con valores máximos que oscilan entre 8 y 5 mGal respectivamente.

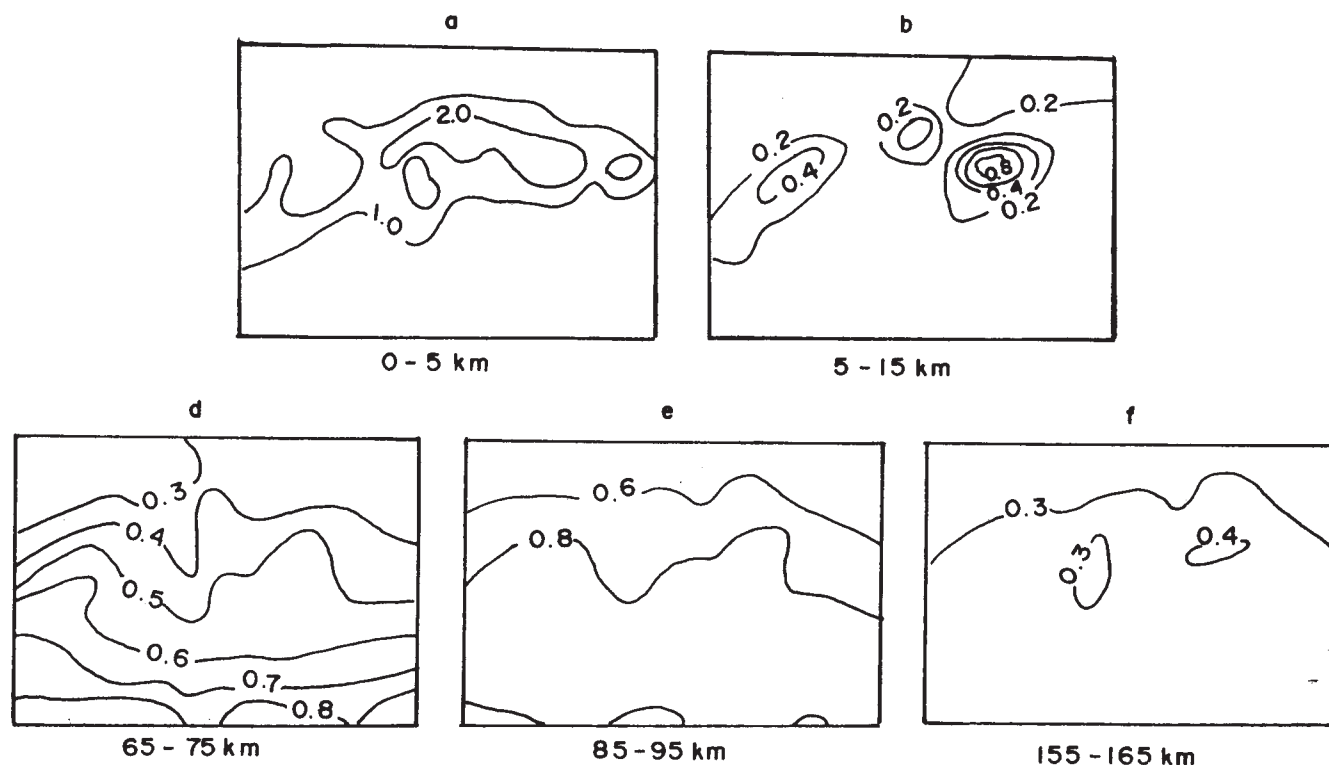


Fig. 5. Contribuciones parciales del efecto gravitacional (en mGal) debido al relieve de la superficie terrestre en la zona de la Sierra de Nipe y Cristal. Radio interno-externo: a) 0-5 km, b) 5-15 km, c) 65-75 km, d) 85-95 km, e) 155-165 km.

Un ejemplo de esta contribución para los radios de 25-30 km se muestra en la Figura 4c. Los valores máximos del efecto gravitacional entre los 35 y 65 km siguen siendo apreciables y oscilando entre los 4 y 0.5 mGal, (Figura 4d-e). De 65 km hasta los 135 km las variaciones son entre 0.8 y 0.1 mGal. En la Figura 4f se muestra la contribución del tramo 130-135 km. Entre los 150 y 160 km la contribución varía entre 0.1 y 0.2 mGal y entre 160-165 km se observan valores entre 0.2 y 0.005 mGal y algo menores. Se concluye que en esta región las contribuciones al efecto gravitacional del relieve de la superficie terrestre de la zona de la SM entre los 0 y 30 km son las más grandes (Figura 4a-c). A distancias mayores los valores siguen siendo apreciables aunque decreciendo y siempre en el orden de las unidades a las décimas de mGal (Figura 4d-f).

Este mismo procedimiento se siguió con el resto de las zonas bajo estudio, SNC y SP se hicieron con radio de integración parcial de 10 km y CC igual que SM (5 km). Una panorámica de las variaciones del efecto gravitacional de ambas zonas puede observarse en las Figuras 5 y 6.

Analizando las 34 secciones de isoanómalas del efecto gravitacional calculado para la zona de la CC podemos apreciar fácilmente las diferencias existentes entre ésta y la SM. Como se muestra en la Figura 7, los valores para distancias entre 0 y 5 km oscilan entre 0.005 y 0.015 mGal. A medida que los radios de integración se van alejando, hacia el NE, se va apreciando un aumento hasta 0.08 mGal (Figura 7b), lo que se debe a las profundidades del relieve marino y a las alturas correspondientes a la

SNC. A medida que el radio sigue aumentando, entre los 55 y 105 km se va notando un aumento de la influencia del relieve de la SM, hacia el Sur de la zona bajo estudio. En la Figura 7c-f se puede apreciar este aumento gradual del efecto gravitacional que llega hasta 0.35 mGal. Por encima de los 105 km de radio se puede apreciar en las secciones de isoanómalas un decrecimiento lento de los valores 0.30 y 0.15 mGal para radios entre 105 y 165 km.

En el caso de la SNC donde los valores alcanzan los 11 mGal para el efecto total (Figura 2d) se analizaron 17 secciones de isoanómalas. La influencia tanto de la SM al S-SW y de la SP al SE son apreciables y se muestran con el mismo carácter que en el ejemplo antes explicado (Figura 5).

En el caso de la SP la influencia de la SM se hace notar al W de la zona en estudio (Figura 6).

Todas estas dependencias del efecto gravitacional con la distancia se resumen en la Figura 8 (curvas 1). Estos gráficos fueron contruidos tomando el máximo del efecto gravitacional para los diferentes radios de integración normalizados por el máximo general. Aquí se muestran estos efectos referidos a las máximas alturas en la muestra de cada zona (ver también Tabla 1, áreas efectivas) y en un punto dentro de la HC (Figura 9). En la SM se produce un máximo relativo de 0.84 a los 25 km, ya dentro de los límites de la HC que es el accidente del relieve negativo más pronunciado de Cuba (Figura 8a). También se tomó un punto dentro de la HC para comprobar la influencia

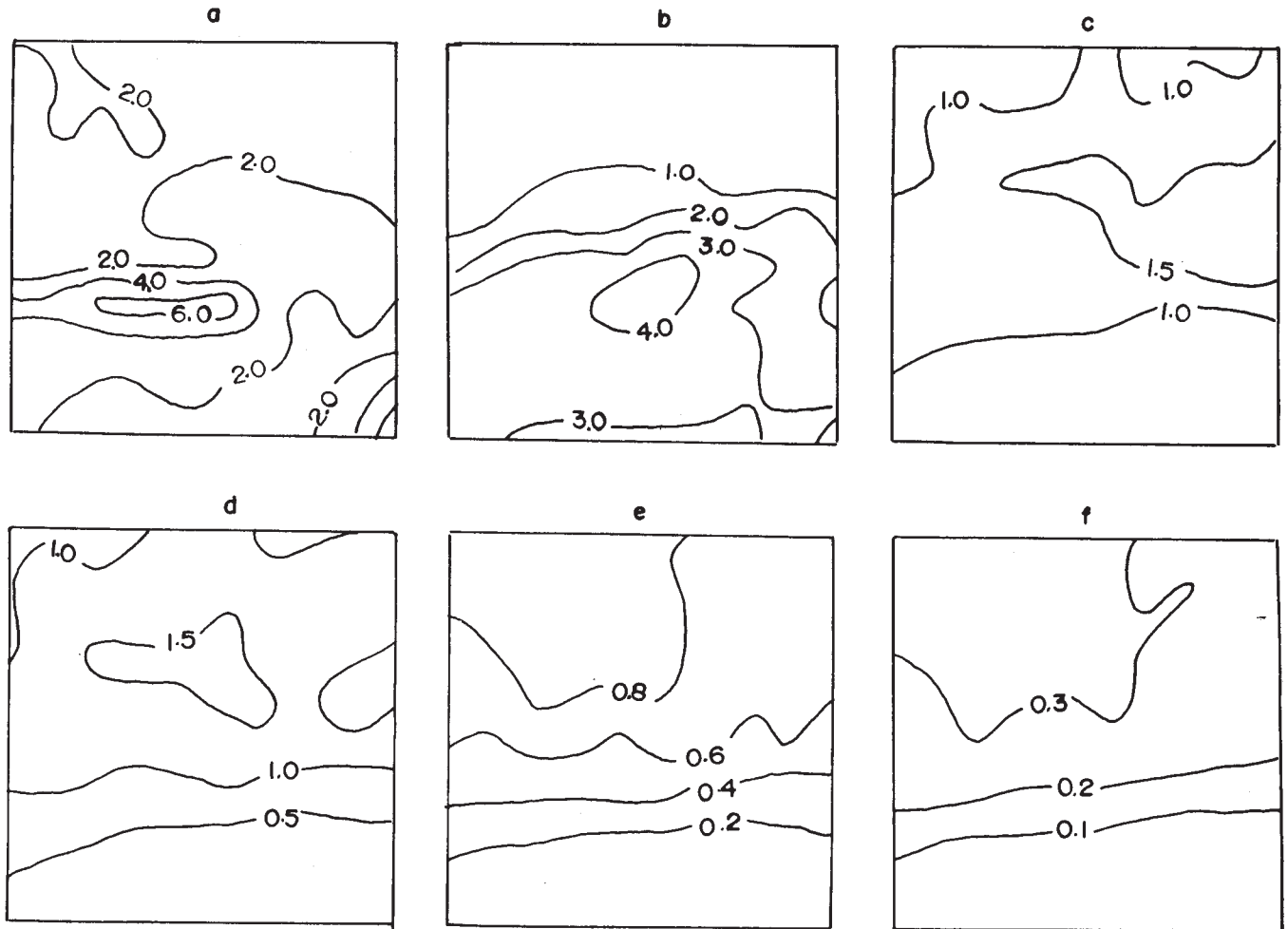


Fig. 6. Contribuciones parciales del efecto gravitacional (en mGal) debido al relieve de la superficie terrestre en la zona de la Sierra del Purial. Radio interno-externo: a) 0-5 km, b) 5-15 km, c) 25-35 km, d) 45-55 km, e) 75-85 km, f) 155-165 km.

mutua con la SM. En la Figura 9 se observa que a los 15 km hay un máximo relativo (0.65 g/gmáx) que es debido a las alturas de la SM.

Se concluye que en la SM se hace necesario tener en cuenta el efecto gravitacional producido por la HC, que es más significativo entre los 10 y 40 km, aunque para un análisis más completo se hace necesario tener en cuenta este efecto hasta 0.1 (g/gmáx) (Figura 8a). En la Figura 10, se puede observar que la mayor contribución del relieve ocurre aproximadamente a los 70 km (ver también Figura 8a).

Por otra parte, en la SP (Figura 8b) se aprecia la diferencia entre la influencia de la HC y la SM. Incluso a distancias muy alejadas del punto de observación la influencia todavía es apreciable (0.2 g/gmáx).

En la SNC se determinó un decrecimiento del efecto gravitacional hasta los 55 km (0.25 g/gmáx) para luego aumentar hasta los 105 km (0.81 g/gmáx) (Figura 8d), debido a las dos zonas montañosas adyacentes.

En la Figura 8c se muestra el comportamiento del efecto gravitacional en la CC donde se observan hasta los 40 km valores muy bajos (0.05 g/gmáx), observándose de nuevo un crecimiento con dos máximos (0.4 y 1.0 g/gmáx) a los 65 km y los 130 km respectivamente, el primero debido a la SM y el segundo a la HC y a la SNC por el Este y por el NE a las profundidades marinas.

No existe decrecimiento constante con respecto a la distancia. Invariablemente los máximos relativos (Figura 8, curvas 1), corresponden a diferencias de alturas considerables debido a accidentes del relieve.

CONCLUSIONES

- 1.- Para diferentes zonas de Cuba oriental se determinaron los valores máximos de la corrección topográfica a la anomalía de Bouguer. En la SM los valores alcanzan los 70 mGal, que de hecho constituye el valor más alto de la corrección para el país. En la SP los valores alcanzan 18 mGal, en la SNC los valores alcanzan los 11 mGal y en la CC los 5 mGal, todo esto considerando hasta la zona de Hayford 0₂.

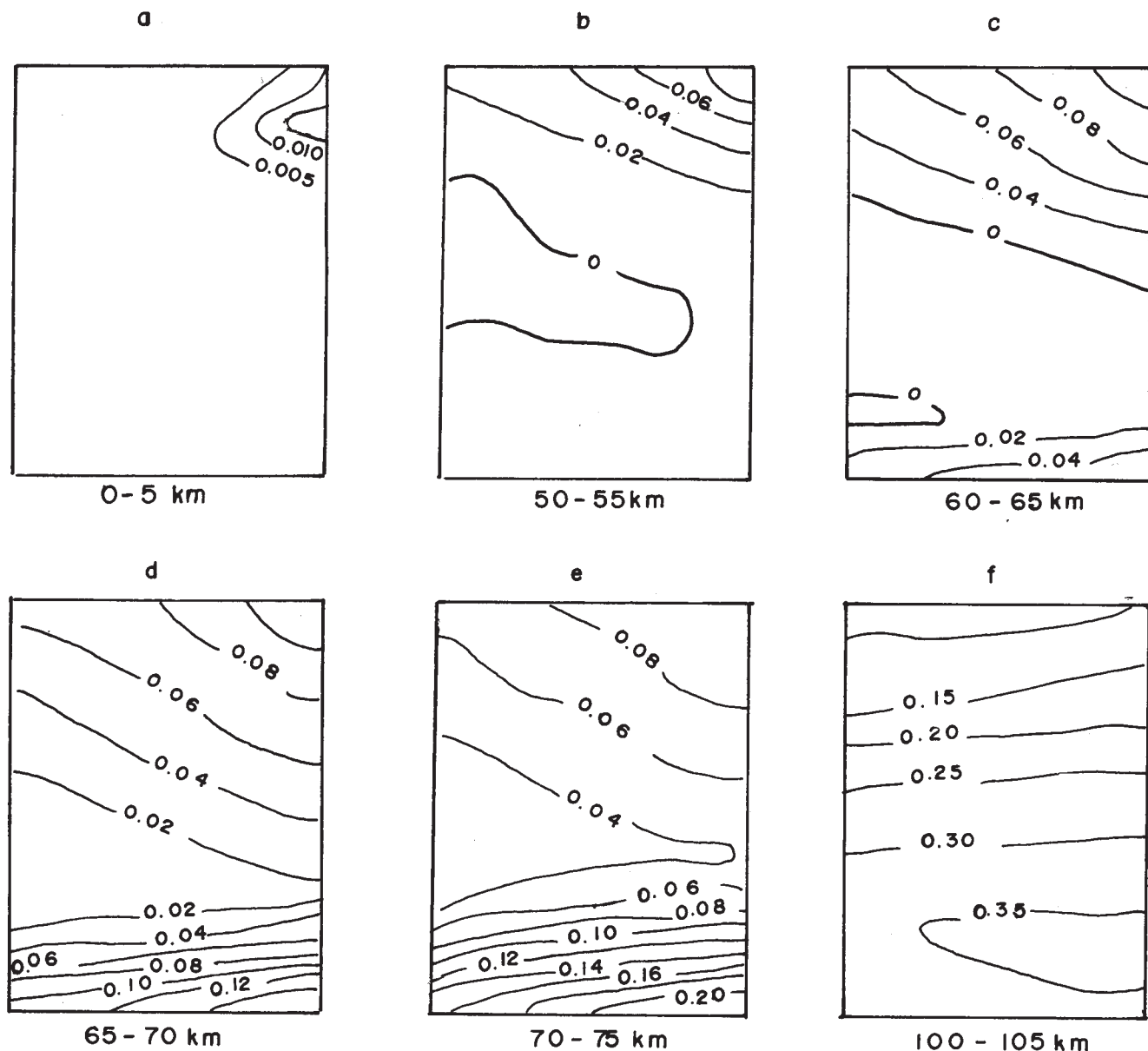


Fig. 7. Contribuciones parciales del efecto gravitacional (en mGal) debido al relieve de la superficie terrestre en la zona de la Cuenca del Cauto. Radio interno-externo: a) 0-5 km, b) 50-55 km, c) 60-65 km, d) 65-70 km, e) 70-75 km, f) 100-105 km.

2.- Las alturas y sus diferencias en las áreas efectivas como totales explican las diferencias de la corrección para las zonas montañosas y llanas. La SM tiene los desniveles más notables, entre los 4 000 y 8 000 m (21.3%) e incluso por encima de los 8 400 m. La SP le sigue con desniveles en su área más cercana por encima de los 3 500 m y más del 65% entre los 1 000 - 4 000 m siendo estos desniveles mayores que los observados para la SNC para el mismo rango.

3.- En general se puede decir que el efecto gravitacional del relieve con la distancia es decreciente.

4.- Se obtuvieron las dependencias del % de contribución parcial del efecto gravitacional con respecto a la distan-

cia desde el punto de observación, así como la dependencia del efecto máximo con la distancia, lo que permitirá tener una idea cuantitativa de hasta qué distancia sería necesario calcular correcciones topográficas según la tarea geofísica a acometer y la precisión de los trabajos.

5.- Ha quedado demostrado con ejemplos reales que en esta región del país la influencia del relieve sobre las anomalías de Bouguer son significativas, provocando aumentos sustanciales en las intensidades de las anomalías (Moa-Nicaró, Sierra Cristal, Yateras, Sabana La Mar y Levingstone), corrimientos de fases en otras (Pí-lón) y lográndose rescatar anomalías encubiertas en el mapa de anomalías de Bouguer simple.

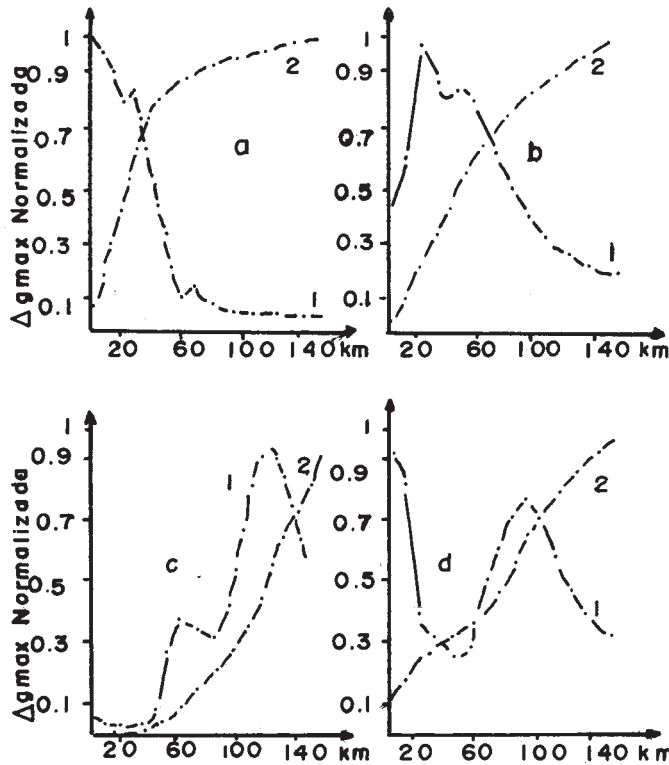


Fig. 8. Dependencias del efecto gravitacional del relieve con la distancia. Curva 1: Efecto gravitacional máximo. Curva 2: Efecto gravitacional acumulativo. Zonas y puntos de referencias (coordenadas y alturas): a) Sierra Maestra, 20°00' Lat. N y 76°50' Long. W, h= 1640 m; b) Sierra del Purial, 20°10' Lat. N y 74°42' Long. W, h=885 m; c) Cuenca del Cauto, 20°49' Lat. N y 76°35' Long. W, h= 140 m; d) Sierra de Nipe-Cristal, 20°32' Lat. N y 75°29' Long. W, h= 910 m.

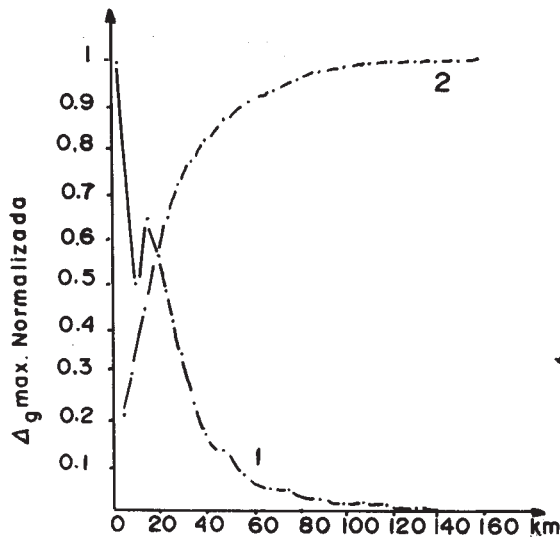


Fig. 9. Dependencia del efecto gravitacional en la Hoya de los Caimanes. Curva 1: Efecto gravitacional máximo. Curva 2: Efecto gravitacional acumulativo. Punto de referencia (coordenadas y profundidad): 19°46' Lat. N y 76°38' Long. W, profundidad 5938m.

El hecho de no considerar este efecto en trabajos gravimétricos de prospección y proyectos de investigaciones regionales puede acarrear apreciables errores en las anomalías de Bouguer.

- 6.- Se cuenta con los mapas de la corrección topográfica total hasta 167 km de toda la región de Cuba oriental, que representa un valioso auxiliar para la proyección de trabajos gravimétricos a cualquier escala.
- 7.- Desde el punto de vista metodológico, es la primera vez en Cuba que en una zona amplia del territorio nacional ha sido aplicado el cálculo de la corrección topográfica en gravimetría hasta distancias muy alejadas del punto de observación (eg. 166, 7 km) teniendo en cuenta la curvatura de la Tierra.

APENDICE 1

Expresiones matemáticas y parámetros geodésicos.

1. Lista de símbolos y definición de los parámetros utilizados.

Φ, λ	Latitud y longitud
M	radio de la curvatura por el meridano
N	radio de la curvatura por el paralelo
a	semieje mayor del elipsoide de referencia
e	excentricidad del elipsoide de referencia
α	aplastamiento recíproco
p	media distancia del trapecio esférico (elemento de superficie, en lo adelante ES) en la dirección paralela
q	media distancia de ES en la dirección meridiana
m	número de sectores (ES) en la dirección X
n	número de sectores (ES) en la dirección Y
x	coordenada horizontal
y	coordenada vertical
$d\Phi, d\lambda$	medias distancias del ES en las direcciones paralela y meridiana respectivamente (expresadas en minutos)
Δ	área del ES
R	radio medio de la curvatura de la Tierra
k	relación entre $\Delta h = h_o - h$ y r
r	distancia horizontal entre el punto P_o y el ES (variable P_o es el punto centro)
h_o	altura (profundidad) del punto P_o
h	altura (profundidad) del ES variable

2. Expresiones matemáticas

$$e = 2\alpha - \alpha^2$$

$$M = a(1 - e^2)(1 - e^2 \sin^2 \Phi)^{-3/2}, N = a(1 - e^2 \sin^2 \Phi)^{-1/2}$$

$$R = \sqrt{(M N)}$$

$$p = M d\Phi, q = N \cos \Phi d\lambda$$

$$\Delta = 4pq$$

$$x = 2mq, y = 2mp, r = \sqrt{(x^2 + y^2)}$$

$$k = \Delta h/r$$

$$\delta p = 1 - \cos \Phi$$

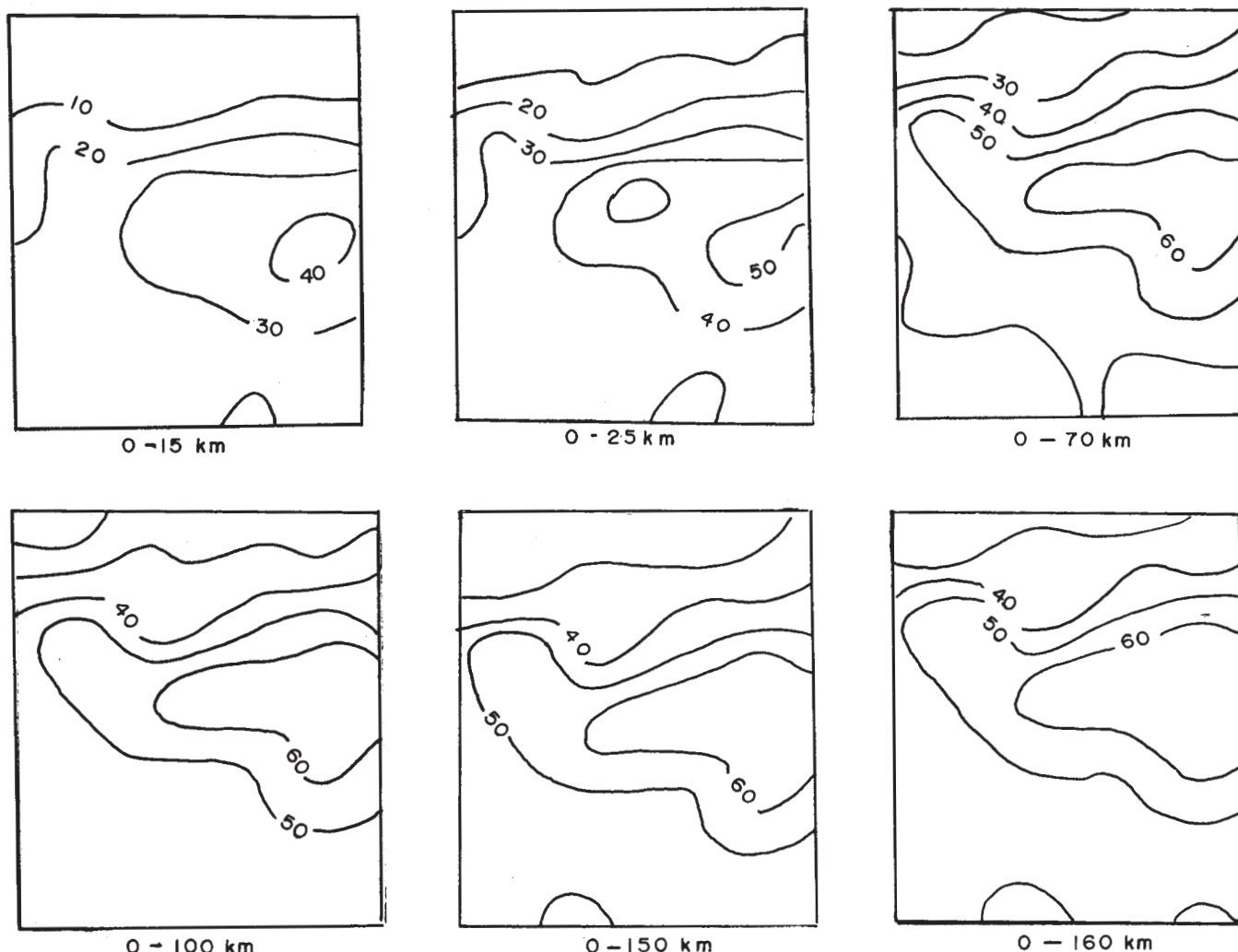


Fig. 10. Contribuciones parciales acumulativas del efecto gravitacional (en mGal) debido al relieve de la superficie terrestre en la zona de la Sierra Maestra. a) 0-15 km, b) 0-25 km, c) 0-70 km, d) 0-100 km, e) 0-150 km y f) 0-160 km.

BIBLIOGRAFIA

- BORTOLUZZI, G. y M. LIGI, 1986. DIGMAP: A computer for accurate acquisition by digitizer of geographical coordinates from conformal projections. *Computer and Geosciences*, 12, 2, 175-197.
- CAMPBELL, D. L., 1980. Gravity terrain corrections for stations on a uniform slope—a power law approximation. *Geophysics*, 45, 1, 109-112.
- COTILLA, M., E. C. GONZALEZ, F. ARTEAGA y L. ALVAREZ, 1990. Mapa neotectónico de Cuba, escala 1: 1 000 000 (inédito). Inst. Geof. y Astron., La Habana, 75 pp.
- CUEVAS, J. L., 1989. Mapa de correcciones topográficas parciales hasta la zona de Hayford M, en el Mar Caribe al sureste de Cuba. En V Jornada Científica. Inst. Geof. y Astron. La Habana, Oct. 1989. Resúmenes, p. 27.
- CUEVAS, J. L., 1991. TERCORR: Un sistema turbo pascal para el cálculo de las correcciones topográficas parciales hasta la Zona de Hayford O₂, utilizando un modelo digital del terreno. En II Encuentro Nacional de Ingenieros Geofísicos, La Habana, mayo 1991 (Inst. Sup. Polit. José A. Echeverría), Resúmenes, p. 29.
- CUEVAS, J. L. y M. PACHECO, 1991. Informe sobre el Mapa de Anomalías Gravimétricas en reducción de Bouguer total (densidad = 2.67 t/m³) de Cuba oriental a escala 1: 500 000 (inédito). Inst. Geof. y Astron., La Habana, 26 pp.
- GLADISKO, P., M. RODRIGUEZ y J. L. PROL, 1975. Informe sobre los trabajos gravimétricos y magnéticos realizados en los perfiles regionales VIII y XIII (parte Sur de la prov. de Oriente) (inédito). Cen. Nac. Fondo Geol., La Habana.
- HAMMER, S., 1939. Terrain corrections for gravimeter stations. *Geophysics*, 4, 134-194.

- HAYFORD, J. F. y W. BOWIE, 1912. The effect of topography and isostatic compensation upon the intensity of gravity. U. S. Coast Geod. Surv. Spec. Publ., N° 10, 132.
- LLEDIAS, J. P. y G. JIMENEZ, 1990. Informe sobre la magnitud de la corrección por efecto del relieve lejano en el territorio de Cuba central (inédito). Cen. Nac. Fondo Geol., La Habana, 13 pp.
- PICK, M., 1987. On the calculation on the gravity terrain corrections in Czechoslovakia. *Studia geoph. et geod.*, 31, 131-144.
- PICK, M., 1988. Gravity topographic corrections computed from a square grid of height point. *Studia geoph. et geod.*, 32, 245-248.
- SANCHEZ, F., 1988. Estructura profunda de la corteza terrestre en Cuba oriental por datos geólogo-geofísicos (en ruso) (inédito). Tesis de doctorado, Leningrado.
- SANDBERG, C. H., 1958. Terrain corrections for an inclined plane in gravity computations. *Geophysics*, 23, 4, 701-711.
- SAZHINA, N. y N. GRUSHINSKY, 1971. Gravity prospecting. MIR publishers, Moscow, 491 pp.
- SIDERIS, M. G., 1984. Computation of gravimetric terrain corrections using fast Fourier transform techniques. UCSE Reports, No. 20007, 110 pp.
- SOWEBUTTS, W. T. C., 1987. A computer method to determine terrain corrections for gravity studies, including those for near topography. *Bull. d'Inform. (B. G. I.)*, 61, 78-95.
- TALWANI, M. y M. EWING, 1960. Rapid computation of gravitational attraction of three-dimensional bodies of arbitrary shape. *Geophysics*, 25, 1, 203-225.
- THANASSOULAS, C. y G. N. TSOKAS, 1986. A simple BASIC program for computing terrain corrections on microcomputer. *Computer and Geosciences*, 12, 1, 89-91.
- VOLOCHKOVICH, K. y P. KISLITZIN, 1984. Informe final sobre los trabajos geológicos complejos de búsqueda a escala 1: 100 000 en el área NW de la prov. de Pinar del Río (inédito). Cen. Nac. Fondo Geol., La Habana.
-
- José L. Cuevas Ojeda y Maritza Pacheco Puchades.
Departamento de Geofísica del Interior
Instituto de Geofísica y Astronomía, Academia de Ciencias de Cuba.
Calle 212 No. 2906 el 29 y 31, La Lisa
11600 Ciudad de La Habana, Cuba.