

Determinación de estructuras tectónicas disyuntivas utilizando técnicas de procesamiento de imágenes y de gradiente total normalizado a partir de datos gravimétricos de Cuba central

J. L. Cuevas Ojeda¹, F. García Pérez¹, M. Pacheco Puchades¹, D. González Despaigne² y R. Ramírez Ramírez³,

¹*Departamento de Geofísica del Interior, Instituto de Geofísica y Astronomía, Ministerio de Ciencias, Tecnología y Medio Ambiente, Habana, Cuba.*

²*Empresa de Geofísica, MINBAS, Habana, Cuba.*

³*ENERGO-PROYECTO, MINBAS, Habana, Cuba.*

Recibido: 8 de diciembre, 1993; aceptado: 15 de agosto, 1994.

RESUMEN

El presente trabajo constituye la utilización combinada y de forma complementaria de métodos propios del procesamiento de imágenes y del Gradiente Total Normalizado para la determinación de las direcciones y profundidades de las estructuras tectónicas disyuntivas a partir de la información gravimétrica. Entre las técnicas de procesamiento de imágenes se encuentra la detección de bordes y lineamientos y el reconocimiento de patrones. Estos procedimientos resaltan los cambios abruptos en los valores de una imagen; permite encontrar la ubicación de un patrón determinado dentro de la propia imagen. El efecto gravitacional de las fallas cumple estas características utilizando operadores especiales direccionales que permiten extraer de la información gravimétrica las direcciones de las diferentes estructuras tectónicas disyuntivas, completándose la información de las profundidades de éstas con el método de Gradiente Total Normalizado. Se presentan ejemplos de utilización en la determinación de estructuras tectónicas conocidas y propuestas en la región de Cuba central, donde se detectaron fallas transcorticales que se encuentran presentes a partir de profundidades de 5-7 km hasta 25-30 km.

PALABRAS CLAVE: Procesamiento digital de imágenes, Gradiente Total Normalizado, estructuras tectónicas disyuntivas.

ABSTRACT

Some examples of tectonic structures detected in central Cuba by digital processing of the Bouguer gravity map are discussed. Some evidence of crustal faulting at depths of 5-30 km is provided.

KEY WORDS: Digital image processing, standard total gradient, disjunctive tectonic structures.

INTRODUCCION

Muchos de los problemas que se le presentan a los geólogos tanto en la prospección de yacimientos minerales, gasopetrolíferos y en el estudio de la estructura profunda de la corteza terrestre, entre otros, han sido resueltos con la ayuda de la geofísica, en una interrelación compleja con otros métodos de las ciencias de la Tierra. La geofísica como ciencia ha desarrollado muchos métodos de medición de los campos potenciales, así como métodos de procesamiento de esa información, por otra parte se han incorporado otros desarrollados primariamente en otras ciencias. Los grandes avances de la tecnología computacional y en especial de los microprocesadores, han hecho que se hayan alcanzado éxitos en la solución de diferentes tareas, significando grandes contribuciones a la superación del nivel tradicional grandemente subjetivo de análisis de los problemas observacionales, que son los más abundantes en la investigación moderna y en particular, son precisamente el tipo de problemas al que pertenecen importantes tareas geológicas, geofísicas, geoquímicas y geográficas (Alfonso *et al.*, 1984; Valdés y De la Cruz., 1984; García *et al.*, 1984).

En el presente trabajo se aborda el procesamiento de la información geofísica, en particular la gravimétrica con métodos de procesamiento de imágenes (Pratt, 1978), com-

binándolo con el método del gradiente total normalizado (Beriozkin, 1973), procedimiento convencional en la geofísica y utilizado en Cuba por algunos autores (Febles, 1983; Sorá *et al.*, 1989; Díaz-Duque *et al.*, 1990; Fundora y Pacheco, 1991). El tratamiento de la información gravimétrica con los métodos antes mencionados para la determinación de las dislocaciones tectónicas disyuntivas es abordado en el presente trabajo, prestandole atención especial a la utilización del procesamiento de imágenes para la determinación de las direcciones principales de éstas, presentándose una filosofía de trabajo para la solución de la tarea planteada. Las concepciones y métodos aquí aplicados fueron empleados como parte de un proyecto más amplio para el estudio de la constitución profunda de la corteza terrestre en la región central de Cuba con el objetivo de caracterizarla desde el punto de vista geofísico (Cuevas *et al.*, 1992), para realizar la evaluación de las zonas potencialmente sismogeneradoras en dicha región como parte de los estudios necesarios para el emplazamiento de obras industriales de gran importancia económica.

MATERIALES Y METODOS

Modelo conceptual

En la naturaleza, las fuentes geológicas de los campos potenciales, como el gravimétrico y el magnético, super-

ponen las respuestas en general heterogéneas, con las de los objetos de interés; casi invariablemente sucede que el efecto de dicha superposición trae por consecuencia un *enmascaramiento* del objeto buscado. Tal es el efecto de las heterogeneidades de la roca encajante, la cobertura, etc., pudiéndose entender su acción expresando que añaden *ruidos* a la *señal útil* que representa la respuesta debida a la presencia del cuerpo de interés. Si este tiene una dimensión lo suficientemente alargada como para que pueda ser cortado por más de un perfil de la red de medición, el enmascaramiento del objetivo en cada uno de ellos puede hacer indiscernible el trazado de la proyección del cuerpo en superficie. Tal efecto indeseable puede darse en el caso de estructuras alineadas como zonas mineralizadas, fallas y contactos geológicos, estos dos últimos, objetivos de localización en el presente trabajo.

Mapa de anomalías gravimétricas en reducción de Bouguer total $\sigma=2, 67 \text{ t/m}^3$

Los materiales gravimétricos que se utilizaron en la presente investigación, se prepararon en el marco de ésta, a partir de la información gravimétrica primaria compilada para la construcción del mapa de anomalías gravimétricas en reducción de Bouguer simple $\sigma=2, 3 \text{ t/m}^3$ de Cuba a escala 1: 500 000 (Cuevas et al., 1989).

Para la construcción del Mapa de anomalías gravimétricas en reducción de Bouguer total $\sigma=2, 67 \text{ t/m}^3$, se calcularon las correcciones topográficas cercana y lejana, teniendo en cuenta la respuesta gravitacional de las masas topográficas que se encuentran dentro del radio de hasta 167 km alrededor del punto de observación, de ahí que se tuvo en cuenta la influencia de la curvatura de la Tierra (Pick, 1987) dado que las distancias son muy alejadas del punto de observación, para lo cual se utilizó el algoritmo implementado por Cuevas (1991).

Una vez obtenido el mapa de Bouguer total con vistas a realizar la interpretación de los datos gravimétricos, estos fueron transformados por el método de la continuación analítica ascendente (CAA), a 10, 20, 30, 40 y 50 km ya que nuestro objetivo presenta un carácter regional.

Posteriormente a estos mapas se les aplicaron las técnicas correspondientes al procesamiento de imágenes mediante métodos de detección de bordes y lineamientos y reconocimiento de patrones que se detallan más adelante.

Métodos del procesamiento de imágenes

El procesamiento digital de imágenes ha solucionado muchos y variados problemas en diversos campos, entre los cuales la teledetección para resolver problemas geológicos y tectónico estructurales es un ejemplo. Ahora bien no siempre la información está constituida por una imagen real de entrada, como pudiera ser una imagen cósmica; en muchos casos la información a procesar tiene la forma de datos de carácter bidimensional, los cuales no constituyen algo directamente visible, sino por ejemplo, la información de carácter gravimétrico como se mencionó para nuestro caso.

Los métodos que se emplean aquí son una pequeñísima muestra de los existentes (Pratt, 1978) y están implementados en el Sistema IMAG-PC V 1.2, proyecto de procesamiento de imágenes e información bidimensional desarrollado por Valdés et al., (1990).

Detección de bordes y lineamientos

Este tipo de procedimiento está orientado a la detección de bordes (contactos) y los lineamientos que pudieran estar presentes en una imagen de entrada; la salida la constituye una imagen donde estos eventos, de existir, quedan realzados. El fundamento de estos procedimientos está en las características locales que normalmente envuelven cambios abruptos en los valores de una imagen. De forma general puede decirse que una imagen dada presenta un borde cuando los valores sobre regiones extensas son relativamente constantes y cambia abruptamente en el límite que separa las regiones. En el caso de un lineamiento, los valores en cada punto son relativamente constantes, excepto a lo largo de una franja delgada.

Es precisamente esta característica de este tipo de procedimiento, la que hace sugerente su aplicación en el caso del procesamiento de la información gravimétrica. El efecto gravitacional de las estructuras de tipo fallas y de zonas de fallas cumple precisamente con la característica que resaltan los procedimientos antes mencionados, de ahí que encontramos muy adecuada la utilización de los procedimientos de detección de bordes y lineamientos en la búsqueda de estas estructuras tectónicas.

Estos procedimientos se aplican en dos etapas; la primera amplifica el borde o lineamiento y en la segunda se clasifica la existencia o no del evento buscado, partiendo de un valor de umbral seleccionado por el interpretador. Para la amplificación de los bordes se utilizan varios tipos de operadores, entre los que se encuentran los llamados laplacianos, lineales, no lineales (de Rosenfeld, de Sobel, de Kirsh, de Wallis y de Markov o estadístico); en el caso de los lineamientos se usan operadores especializados en las direcciones fundamentales: NS, EW, NE-SW y NW-SE (Pratt, 1978). En el Apéndice 1 se muestran los núcleos de estos últimos operadores.

De todo este conjunto de operadores para la detección de bordes y lineamientos, se escogió para los bordes el subconjunto de éstos que tienen características direccionales al igual que los mencionados para los lineamientos, dado que de la información gravimétrica se desea extraer las anomalías de fallas y zonas de éstas en las diferentes direcciones en que se encuentran en el medio geológico y que con preferencia coinciden con las direcciones fundamentales resaltadas por estos operadores (Apéndice 1).

Algunos experimentos fueron realizados para seleccionar los procedimientos óptimos de elaboración. Aquí sólo mostraremos un ejemplo. A partir del efecto gravitacional de un modelo tipo falla (en forma bidimensional) orientada en dirección NE-SW y que se muestra en la Figura 1a, sobre un perfil perpendicular a la dirección de la falla, se

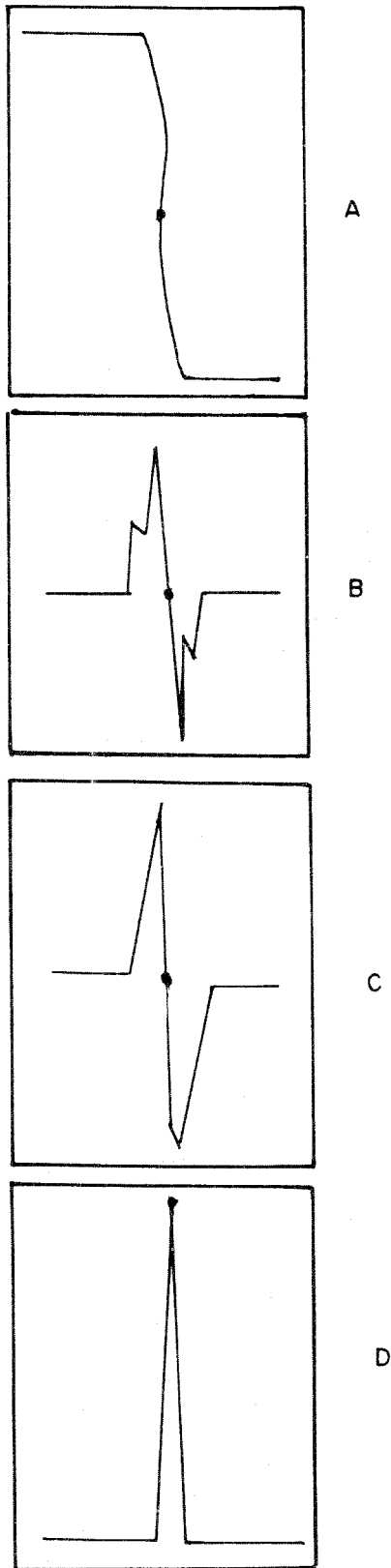


Fig. 1. Ejemplos de experimentos para seleccionar la variante óptima de procesamiento para la detección de bordes.

procedió en este caso a aplicar un operador lineal direccional de borde SE (Apéndice 1). En la Figura 1b se puede observar el tipo de anomalía de salida, aquí la característica fundamental es el carácter asimétrico con respecto al punto de inflexión con un máximo y mínimo absolutos y sus respectivos correspondientes secundarios. Pudiéndose simplificar con un filtro suavizador por promedios móviles (Apéndice 1), cuya salida se observa en la Figura 1c.

Ya en este punto puede pasarse a la clasificación de la existencia o no del evento o anomalía, estableciendo un umbral que depende de lo que el interpretador desee resaltar, en nuestro caso una zona cercana al punto de inflexión que es el que determinaría el eje de la anomalía, en la Figura 1d puede observarse el máximo absoluto en que se transforma la anomalía de entrada.

Análisis de imágenes, método de las diferencias absolutas

El método que aquí se describe, como el antes mencionado de detección de bordes y lineamientos, también pertenece al procesamiento de imágenes (Pratt, 1978). Aquí de nuevo se hace uso de la similitud de objetivos para la utilización del presente procedimiento.

El análisis de imágenes (reconocimiento de patrones) es un proceso que permite encontrar la ubicación óptima de un patrón dentro de una imagen. Este proceso se realiza, mediante la búsqueda del patrón en una imagen de entrada, que en nuestro caso está dada por una representación bidimensional de un campo físico determinado, en forma matricial o simplemente como una imagen en su forma alternativa.

El patrón de búsqueda será un subconjunto de la matriz de datos que vendrá dada en función de los objetivos que estamos buscando, diseñado de antemano a partir de un modelo físico-geológico del terreno, de la cual se quiere registrar su existencia en la zona de interés.

El análisis de imágenes está basado en el método de las diferencias absolutas y sigue el principio de la similaridad secuencial en el cual se calcula un error a partir de las diferencias absolutas (residuales) entre el patrón y la matriz de entrada para cada punto de la fila. Estas diferencias se definen en el caso unidimensional como:

$$D(x_1) = \sum_{j=1}^n |f(x_{1-j+1}) - S(x_j)| \quad (1)$$

donde

- f - función de entrada
- S - función patrón
- D - función de diferencias absolutas
- n - número de puntos del patrón

Para el análisis de imágenes en el presente trabajo, se crearon diferentes tipos de modelos patrones, (tareas directas del modelo escalón, en forma bidimensional), cuyos

ejes de anomalías se tomaron en diferentes direcciones NW-SE, NE-SW, NS y EW. Dos ejemplos de modelos patrones se muestran en el Apéndice 1 (ej. 4 y 5), el primero correspondiente al efecto gravitacional de una falla orientada en dirección NW y un buzamiento de 90° y el segundo ejemplo con la misma dirección pero con un buzamiento de 45° en dirección SW.

Las densidades de los modelos fueron asumidas a partir del mapa de densidades de las rocas de los complejos aflorantes en Cuba centro-oriental a escala 1: 1 000 000 (Vega et al., 1991), además se tuvo en cuenta la presencia y/o no de la cobertura sedimentaria y el ancho de la zona de falla según la interpretación. De esta forma se crearon un gran número de modelos característicos posibles de encontrar en nuestra área, siendo rastreada su existencia en el mapa de anomalías en reducción de Bouguer total $\sigma=2,67 \text{ t/m}^3$.

Superposición de campos y/o sus transformaciones

En la interpretación compleja, y este es nuestro caso, puede presentarse la necesidad de establecer la comparación y/o síntesis de la información dada por varios campos físicos medidos en un área o sus transformaciones, generalmente el interpretador lo realiza de manera cualitativa, por lo que la subjetividad está presente en este análisis. Mediante un procedimiento matemático sencillo es posible atenuar la subjetividad indicada.

En la práctica el algoritmo utilizado permite el estudio cuantitativo simultáneo de un mapa de diferentes parámetros. El mapa resultante es el obtenido producto de la operación simultánea, punto a punto, de los parámetros originales de los mapas primarios, en forma estandarizada si el caso lo requiere, lo que nos permite obtener un mapa de similitud o viceversa según la operación que apliquemos.

En esencia la superposición de mapas puede resumirse de la siguiente manera:

$$Z_i^1 = \frac{X_{1i} - \bar{X}_1}{S_{x1}} \quad Z_i^2 = \frac{X_{2i} - \bar{X}_2}{S_{x2}} \quad (2)$$

$$Z_i = Z_i^1 \cdot Z_i^2 \quad (3)$$

donde

- X_{1i}, X_{2i} - Valores del parámetro físico 1 y 2
- \bar{X}_1, \bar{X}_2 - Medias de los valores de los parámetros 1 y 2
- S_{x1}, S_{x2} - Dispersión de los valores de los parámetros 1 y 2
- Z_i^1, Z_i^2 - Valores estandarizados para los parámetros 1 y 2
- Z_i - Valores de la similitud

Para el caso de n mapas estas expresiones pueden ser generalizadas como:

$$Z_i^j = \frac{X_{ji} - \bar{X}_j}{S_{xj}} \quad (4)$$

$$Z_i = \prod_{j=1}^n Z_i^j \quad (5)$$

Entendiéndose como

- j - Cantidad de mapas
- i - Subíndice que varía para los m puntos del mapa j.

Las zonas de igual comportamiento en el mapa resultante, aparecerán con valores absolutos altos y positivos, mientras que las zonas no concordantes serán de valores negativos.

El caso que se ha expuesto es el clásico del producto, punto a punto aplicado ya con anterioridad con resultados satisfactorios en el procesamiento de información geofísica en Cuba (Cuevas et al., 1985) y el desarrollado teniendo en cuenta también el peso promedio de cada mapa a utilizar (Herzfeld y Sondergard, 1988).

El caso más general es el de la sustitución de la productoria (π) por otras operaciones elementales (suma, resta, máximo, mínimo, promedio) y que destacan un efecto diferente de los mapas a comparar, desarrollando e implementado por Valdés et al. (1990).

Método del Gradiente Total Normalizado

Este es un método de transformación del campo desarrollado por Beriozkin a finales de los años 60 (Beriozkin, 1973).

Su expresión general es la siguiente:

$$Gn(x, z) = G(x, z) / G(z) = \frac{\sqrt{(V_{zz}^2(x, z) + V_{zx}^2(x, z))}}{1/m \sum_1^m \sqrt{(V_{zz}^2(x, z) + V_{zx}^2(x, z))}} \quad (6)$$

donde

- m - Número de puntos del perfil
- $G(x, z)$ - Gradiente Total de la Gravedad
- $G(z)$ - Gradiente medio para un nivel dado
- $Gn(x, z)$ - Gradiente Total Normalizado
- $V_{zz}(x, z)$ - Gradiente vertical
- $V_{zx}(x, z)$ - Gradiente horizontal.

Dicho método de localización nos permite detectar e interpretar algunos de los factores geológicos que dan origen a las anomalías, como son las fallas (contactos verticales), objeto de estudio en el presente trabajo y también nos brinda algunos datos cuantitativos de las mismas, pues nos permite conocer su profundidad. Ejemplos de utilización de este tipo de procedimiento para el estudio de la corteza profunda existen en la literatura (Eliseiva et al., 1986).

Para el procesamiento del método se trazaron ocho perfiles en la zona de los trabajos, de la cual se tenía la información gravimétrica (Figura 2). A cada uno de estos perfiles se le calculó el campo del gradiente total normalizado. Se tomó para cada perfil un intervalo de muestreo de 5 km. Los resultados en cada perfil se presentaron en cortes de

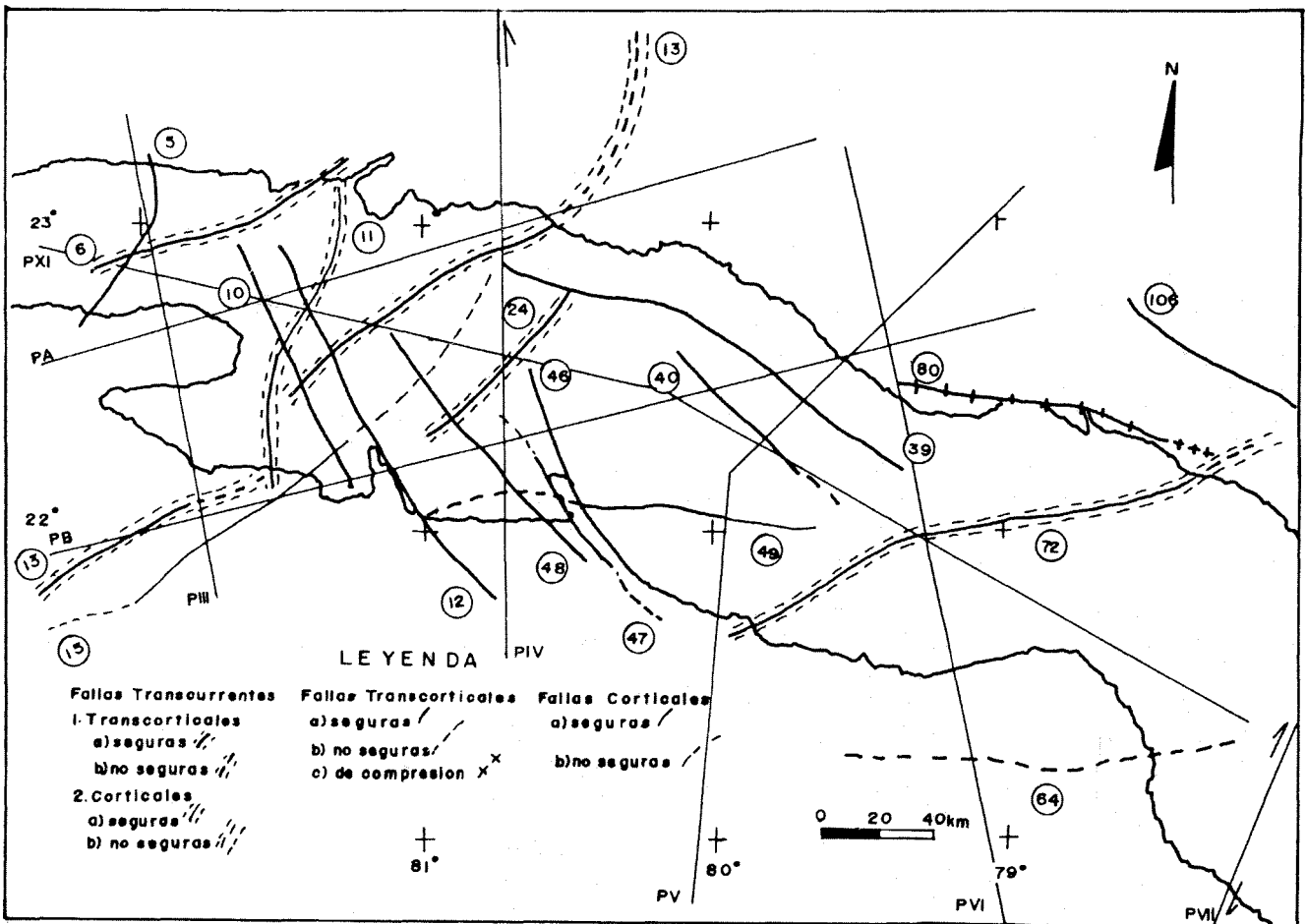


Fig. 2. Esquema tectónico de la zona de Cuba central.

isolíneas para cada variante de armónicos, con intervalo de isolíneas de 0,1 y niveles de profundidad que oscilan entre 0-40 km, con un paso de recálculo al semiespacio inferior de 5 km. La cantidad de variantes de armónicos para cada perfil se escogió teniendo en cuenta la longitud del mismo. Para mayor detalle véase la Tabla 1.

Tabla 1

Datos de perfiles empleados en las técnicas de GTN

Perfiles	Longitud (m)	Cantidad de puntos	Cantidad de armónicos	Variantes de armónicos*
III	183 807	36	6	5-30
IV	237 291	47	7	10-40
V	311 509	62	8	20-55
VI	296 850	57	7	20-50
VII	267 500	52	6	20-45
XI	472 682	94	12	20-75
A	291 760	58	7	20-50
B	365 016	73	9	20-60

* La sucesión de armónicos es de cinco en cinco.

Area de ubicación de la zona de trabajo

Como se ha planteado anteriormente, los métodos aquí empleados estuvieron destinados a determinar las direcciones y profundidades de dislocaciones tectónicas disyuntivas dentro de un proyecto general de estudio en la región central de Cuba, entendiéndose por esta el área enmarcada entre los 19°40' y 24°00' de lat. N y los 77°30' y 82°00' de long. W, la cual comprende las provincias desde Matanzas, hasta Camagüey; en esta zona en la parte sumergida se observan valores de hasta 3,500 m de profundidad y en las emergidas altitudes máximas de hasta 1,156 m como es el caso de la Sierra Trinidad.

RESULTADOS Y DISCUSION

Estrategia de la interpretación

La interpretación compleja de las anomalías gravimétricas, teniendo en cuenta los métodos de procesamiento y su combinación adecuada, tuvo como tarea principal la de determinar las direcciones y profundidades de las diferentes estructuras tectónicas disyuntivas principales en la zona de estudio. Con este objetivo se trazó una estrategia que nos permitiera determinar a partir de las anomalías gravi-

métricas las principales direcciones de las fallas tectónicas existentes reconocidas y de otras que como resultado del presente trabajo han sido propuestas, determinando en los casos que así lo permitieron los datos, y en otros valorar las profundidades de dichas estructuras.

En primer lugar, después de realizarles las correcciones por el efecto del relieve a las anomalías gravimétricas de Bouguer, reduciéndose los problemas de la interpretación en lo que se refiere a ubicación real de las anomalías, así como las determinaciones en profundidad, con el objetivo de determinar estructuras que pudieran clasificarse como corticales y transcorticales, se le realizaron CAA para ir delimitando las estructuras a los diferentes niveles de recálculo (10, 20, 30, 40 y 50 km). El análisis cualitativo de las diferentes CAA determinó un conjunto de fallas tectónicas, que su expresión geofísica es clara incluso en alturas de recálculo como 40-50 km, lo que habla de su carácter transcortical (ej.: falla La Troncha (72), Sutura Ofiolítica (39), etc.). Ahora bien ya nos hemos referido al llamado enmascaramiento de algunos cuerpos de interés, de ahí que se utilizó el método de la detección de bordes y lineamientos, así como el reconocimiento de patrones, teniendo en cuenta modelos de tipo *escalón* calculados con parámetros físicos de densidad estimados a partir de investigaciones petrofísicas (Vega et al., 1991). Con este último procedimiento se detectaron también grandes estructuras como la Sutura Ofiolítica (39) entre otras. La Figura 3 muestra un mapa resultado de este procesamiento, con un modelo de falla de orientación NW-SE, donde puede observarse varias anomalías que denotan algunas estructuras como: Las Víboras (48), Tuinicú (49), Punta Alegre (80), La Trocha (72) y Canal Bretón-Vertientes (64).

El procedimiento de bordes y lineamientos tiene gran importancia para la determinación de fallas tectónicas, que lo demuestra el hecho intrínseco de poder con este procedimiento detectar estructuras en diferentes direcciones, dadas las características de los operadores lineales utilizados que amplifican las respuestas del medio en direcciones tales como: NS, EW, NW-SE y NE-SW (Apéndice 1).

Por otra parte, con el objetivo de sintetizar la información obtenida por bordes y lineamientos para diferentes direcciones, se utilizó la superposición aditiva, multiplicativa y promediada de forma tal que desde el punto de vista metodológico sirviera para disminuir un poco la subjetividad en la interpretación compleja. En la Figura 4 se ilustra un ejemplo de sintetización de la información resultante de dos procesamientos de lineamientos con dirección NW-SE de las CAA de 20 y 40 km, donde puede observarse claramente las anomalías que denotan a la Sutura Ofiolítica (39), fallas Monte Negro (40), Cienfuegos Norte (46) y también son delimitadas las fallas de direcciones NE-SW, La Trocha (72), Aguada de Pasajeros (24) y Guamá (15).

Un aspecto al que se le dió una gran importancia dentro del conjunto de los métodos de elaboración fue el método del GTN ya que no sólo nos permite conocer la ubica-

ción de los contactos ya sean verticales u horizontales; sino que además nos brinda la profundidad a la que estos se encuentran, dato de gran importancia. Esta profundidad se determina directamente del corte de isolíneas de GTN. Como complemento del procesamiento del GTN se utilizó la segunda derivada V_{zzz} dado que en ella se expresan muy bien los contactos verticales, lo que permitió discernir la naturaleza de algunas anomalías del GTN, como en el caso de las fallas Hicacos (6) y La Trocha (72).

En la Figura 5 se ilustran tres armónicos representativos del perfil B, uno de los perfiles al que se le aplicó esta técnica. En el mismo se representaron los interceptos obtenidos durante la interpretación del campo $Gn(x,z)$, lo que nos permitió corroborar la existencia de las fallas: Guamá (15), Cochinos Este (12) y Oeste (10), Las Víboras (48), Cienfuegos Norte (46), Sutura Ofiolítica (39) y otras; detectadas también por el método de bordes y lineamientos.

Durante el análisis de los campos $Gn(x,z)$ de cada perfil se alcanzó a descubrir zonas de altos gradientes de diferentes tipos, así como cadenas de mínimos gradientes asociados a fronteras subverticales.

La Figura 5 muestra los cortes más representativos del campo $Gn(x,z)$ obtenido en el perfil ejemplificado. Se visualiza en el punto 37 (Figura 5a-b) una cadena vertical de mínimos que se corresponde a la falla Cienfuegos Norte (46) con reporte de profundidad que varía entre 5-30 km. Aquí se observa además en el punto 54 unos máximos de tipo I (Beriozkin, 1973) que se reflejan también en los armónicos anteriores, lo que se interpretó como la Sutura Ofiolítica (39).

Finalmente en la Figura 5c se ilustra en el punto 26 una cadena de mínimo correspondiente a la falla Cochinos Oeste (10). La mayor parte de las fallas obtenidas por los métodos de procesamientos aquí expuestos se les pudo determinar la profundidad por el método de GTN.

En la totalidad de los cortes de GTN se pudieron observar anomalías detectadas por el procedimiento de bordes y lineamientos, lo que hizo que no se tomaran las correlaciones sólo por la interpretación cualitativa, sino que como se expresó antes, se utilizó la determinación cuantitativa de forma conjunta y complementada.

Ejemplos de delimitación de dislocaciones tectónicas

En el presente trabajo se ha analizado la estrategia del procesamiento matemático, realizado a la información gravimétrica para determinar estructuras tectónicas disyuntivas, las cuales se muestran en la Figura 2, denotándose cuales elementos pueden considerarse como transcorticales y cuales corticales.

Sus principales características se encuentran resumidas en la Tabla 2, donde se expresan de manera explícita los

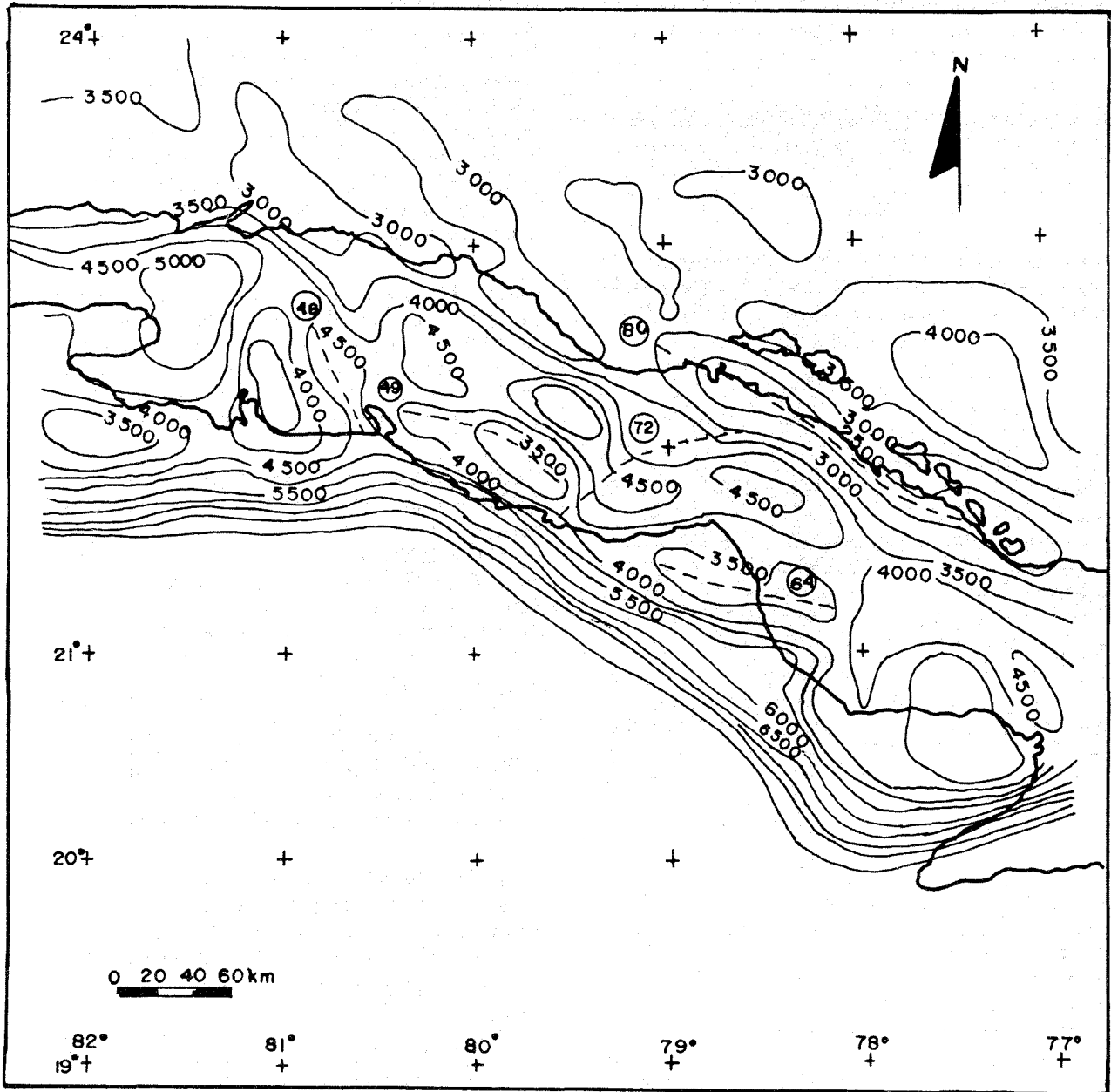


Fig. 3. Mapa resultado del análisis de imágenes. Modelo falla de orientación NW-SE.

métodos y procedimientos que fueron capaces de detectarlos, así como los datos de profundidad. Como cuestión metodológica se procedió a la comparación del presente resultado con los mapas tectónicos y geológicos publicados hasta la actualidad (Shein *et al.*, 1985; Mossakovskiy *et al.*, 1989; Linares *et al.*, 1985). Se ha respetado la nomenclatura de las fallas ya conocidas y que otros autores han nombrado, aquí hemos dado nombres a fallas antes no reportadas a manera de hacer más fácil su posterior identificación.

A continuación describiremos de forma general algunas de estas fallas, así como sus características principales y evidencias geofísicas por las cuales fueron determinadas.

Falla Hicacos (6). Su longitud es de 105 km con una orientación NE-SW. Por el método de GTN se determinó una profundidad que oscila entre 0-31 km, a través de una cadena vertical de mínimos (CVM). Por otra parte su alineación y extensión fueron determinadas por el procedimiento de lineamientos (direcciones EW, NW-SE, NS y NE-SW) tanto para las CAA de 20 y 40 km, de ahí la determinación de su carácter transcortical.

Falla La Trocha (72). Tiene un carácter transcurrente (datos geológicos) y transcortical. Zona muy importante de falla, bien representada en la Figura 2. Su extensión es de 150 km, prolongándose hacia el mar por el norte unos 35 km. Esta fue determinada por todas las técnicas aquí apli-

cad. Esta falla fue interceptada por 2 perfiles de GTN, reportándosele datos de profundidad entre 5 y 30 km en uno y entre 10-23 km en otro.

Zona de Fallas Cochinos Este (12) y Oeste (10). Ambas quedaron determinadas por los cortes de GTN mediante

Tabla 2

Relación de algunas de las principales estructuras tectónicas disyuntivas detectadas (conocidas y propuestas) por los diferentes procedimientos. Determinaciones de sus profundidades según GTN.

No.	Nombre	Prof. (km)							
			1	2	3	4	5	6	7
5	Güines-Santa Cruz Norte (P)	17-30	X	X	X	X			
6	Hicacos * ** ≡	0-31	X	X	X	X	X	X	
10	Cochinos Oeste (P)	5-30					X		
11	San Miguel de los Baños-	5-15	X	°	X		X	X	
-	Zapata (P)	10-20					X		
12	Cochinos Este (P)	5-30	X	°	°		X	X	
13	Colón (E) *	20-33	X	•			X	X	
15	Guamá (E) ** ≡	5-20	•	X			X		
-	-	10-15					X	X	
24	Aguada de Pasajeros (P)	20-25	X	X	X	X	X		
39	Sutura Ofiolítica ** ≡	5-15	X	X	X	X	X	X	X
-	-	5-20					X	X	
-	-	0-25					X	X	
-	-	5-20					X	X	
40	Monte Negro -	5-25	•	X	°		X	X	
-	Cabaiguán (P) ** ≡								
46	Cienfuegos Norte ≡	5-30	X	X			X		
47	Cienfuegos Sur ** **	-	X						
48	Las Víboras (E)	0-30	•	X	•		X	X	
49	Tuinicú (E)	12-30					•	X	X
-	-	15-20						X	X
64	Canal Bretón-Vertientes (P)	-		X	X		X		
72	La Trocha (E) * ≡	5-30		X	X		X	X	X
-	-	10-23					X		
80	Punta Alegre (E) α	10-30					X	X	X
106	Cayo Cruz (P)	-	X	•				X	

- | | |
|----------------------------|-------------------------|
| 1. Borde-Lineamiento NW-SE | 5. GNT |
| 2. Borde-Lineamiento NE-SW | 6. Análisis de imágenes |
| 3. Borde-Lineamiento NS | 7. V_{zz} |
| 4. Borde-Lineamiento EW | |

° CAA 20 km • CAA 40 km X CAA 20-40 km o variante completa

(P) Estructura Disyuntiva Propuesta

(E) Estructura Disyuntiva Propuesta de Extensión

* Coincide al menos una parte con Mossakovskiy et al. (1989)

** Coincide al menos una parte con Shein et al. (1985)

≡ Coincide al menos una parte con Linares et al. (1985)

α Coincide al menos una parte con Meyerhoff y Hatten (1968).

CVM que se observan en la Figura 5c, con profundidad de 5-30 km para las dos. Fue también detectada por los bordes NW-SE de CAA 40 km, así como lineamientos NW-SE, NE-SW y NS de CAA 20 km. La extensión es de 150 km y 100 km respectivamente. La dirección NW-SE que tiene esta zona de fallas difiere en algunos grados al NW de la delineada en el mapa tectónico de Mossakovskiy et al. (1989), al respecto debemos decir que en todo momento se respetaron las evidencias geofísicas que no dieron margen a dudas.

Falla Guamá (15). Presenta una orientación NE-SW y de carácter cortical. Fue determinada claramente por el método GTN, en la Figura 5 se manifiesta por un máximo que se observa en todos los armónicos con determinación de profundidad de 5-20 km. También pudo establecerse por los lineamientos NE-SW de 20 y 40 km.

Falla Cienfuegos Norte (46). Tiene una extensión de 85 km, orientación NW-SE, se delineó su dirección por el lineamiento de CAA de 20 km, NE-SW, NW-SE y lo mismo para toda la CAA de 40 km. También se determina por cortes de GTN (Figura 5a-b), en el punto 37. Existe coincidencia en su tramo sur, con lo trazado en el mapa geológico (Linares et al., 1985) y con otros trabajos.

Falla Güines-Santa Cruz del Norte (5). Fue detectada tanto por los lineamientos de las CAA de 20-40 km en las direcciones NW-SE, NS, NE-SW como por los cortes de GTN con profundidad entre 17-30 km lo que define su carácter transcortical. Esto se corroboró con la segunda derivada de la gravedad V_{zz} lo cual dió un corte claro.

Falla San Miguel de los Baños-Zapata (11). Tiene una orientación general NS, pero con inflexiones NE-SW y una extensión de 115 km. Esta falla fue determinada por dos perfiles de GTN obteniéndose profundidades de 5-15 km en uno y de 10-20 km en el otro existiendo anomalías de V_{zz} , presentando carácter cortical. Fue detectada además por los bordes y lineamientos de las CAA de 20 km en las direcciones NE-SW, NW-SE, y NS, así como por CAA de 40 km en la dirección NW-SE y NS.

Sutura Ofiolítica (39). Fue detectada en una extensión de 190 km orientada NW-SE, expresada en lineamientos de CAA de 20 y 40 km en las direcciones NE-SW, EW, NW-SE, de carácter transcortical. En todos los casos de cortes de esta estructura con los perfiles del área se obtuvieron anomalías de V_{zz} coincidiendo con los realizados a través de GTN. Estas estimaciones de profundidad en los diferentes perfiles fueron de 15-25 km, 5-15 km, 5-20 km y de 0-20 km, en todos los casos mediante un máximo de gradiente. Esta estructura coincide por tramos con los mapeados en los mapas geológicos y tectónicos (Linares et al., 1985; Shein et al., 1985). También fue cartografiada por el método de análisis de imágenes con modelo de tipo escalón, dando anomalías significativas en la dirección de la misma.

SUPERPOSICION PROMEDIADA

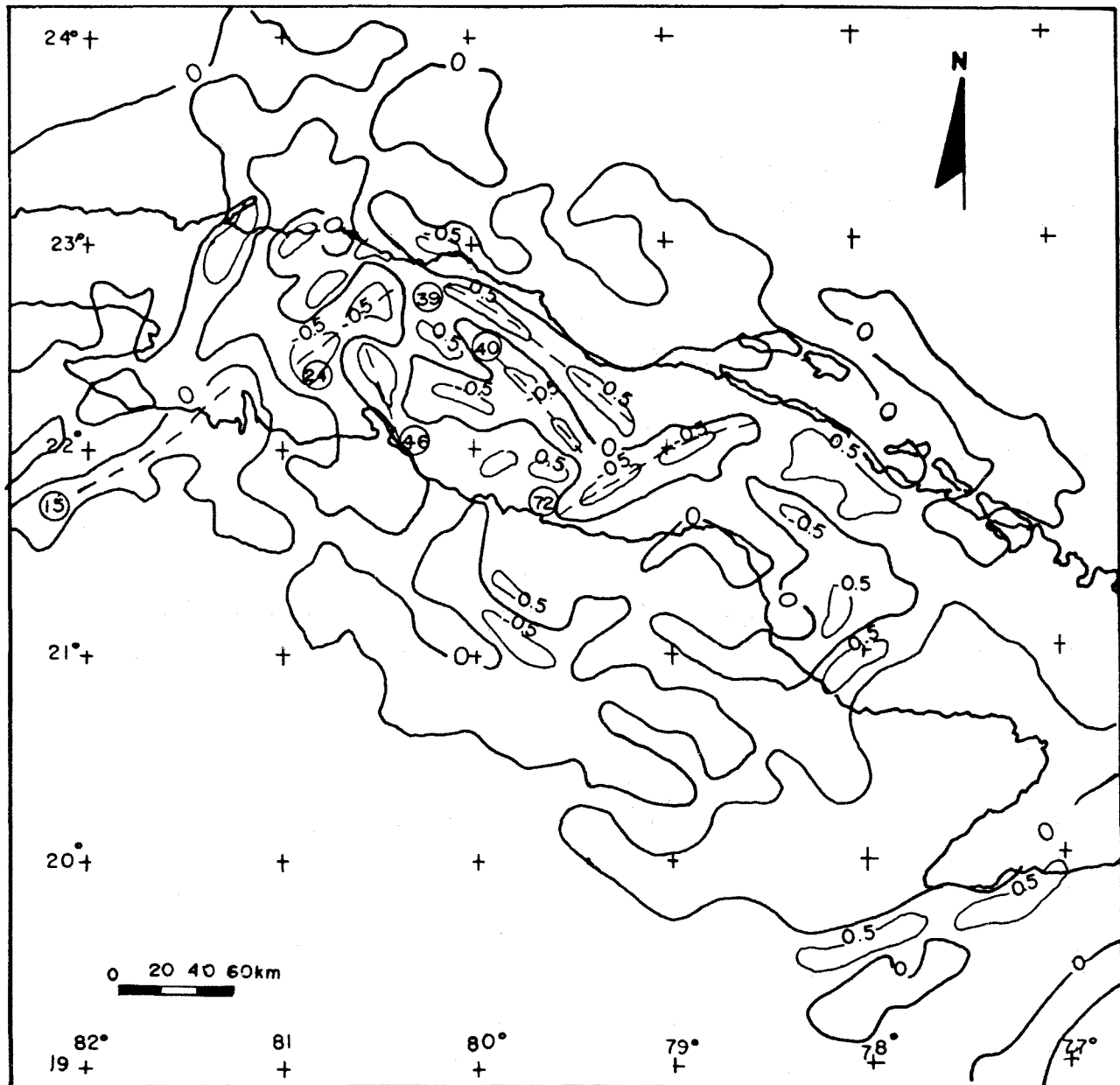


Fig. 4. Mapa resultado de la superposición promediada de los lineamientos CAA 20 y 40 km, orientación NE-SW.

Falla Colón (13). Su longitud en tierra es de 125 km con una orientación NE-SW. Hacia el norte se extendió unos 70 km en virtud de los lineamientos NE-SW de la CAA de 40 km. Esta falla se extiende al sur de la Ciénaga de Zapata. Se determinó además por el GTN con una profundidad de 20-33 km, lo que evidencia su carácter transcortical, asociándosele una anomalía de V_{zzz} .

Falla Las Víboras (48). Tiene una longitud de 115 km, con una orientación NW-SE siendo cartografiada por los

lineamientos de CAA de 20 km de orientación NE-SW y en la CAA de 40 km en las direcciones NE-SW, NS, NW-SE. Fue detectada por el GTN en el punto 31 mediante un máximo en todos los armónicos (Figura 5), con profundidad entre 10-30 km. Hacia el norte fue interceptada por otro perfil, reportándose una profundidad de 0-30 km. Fue detectada también por el análisis de imágenes.

Falla Tuinicú (49). Se extiende en dirección EW con una longitud de 40 km al este de la Bahía de Cienfuegos, de-

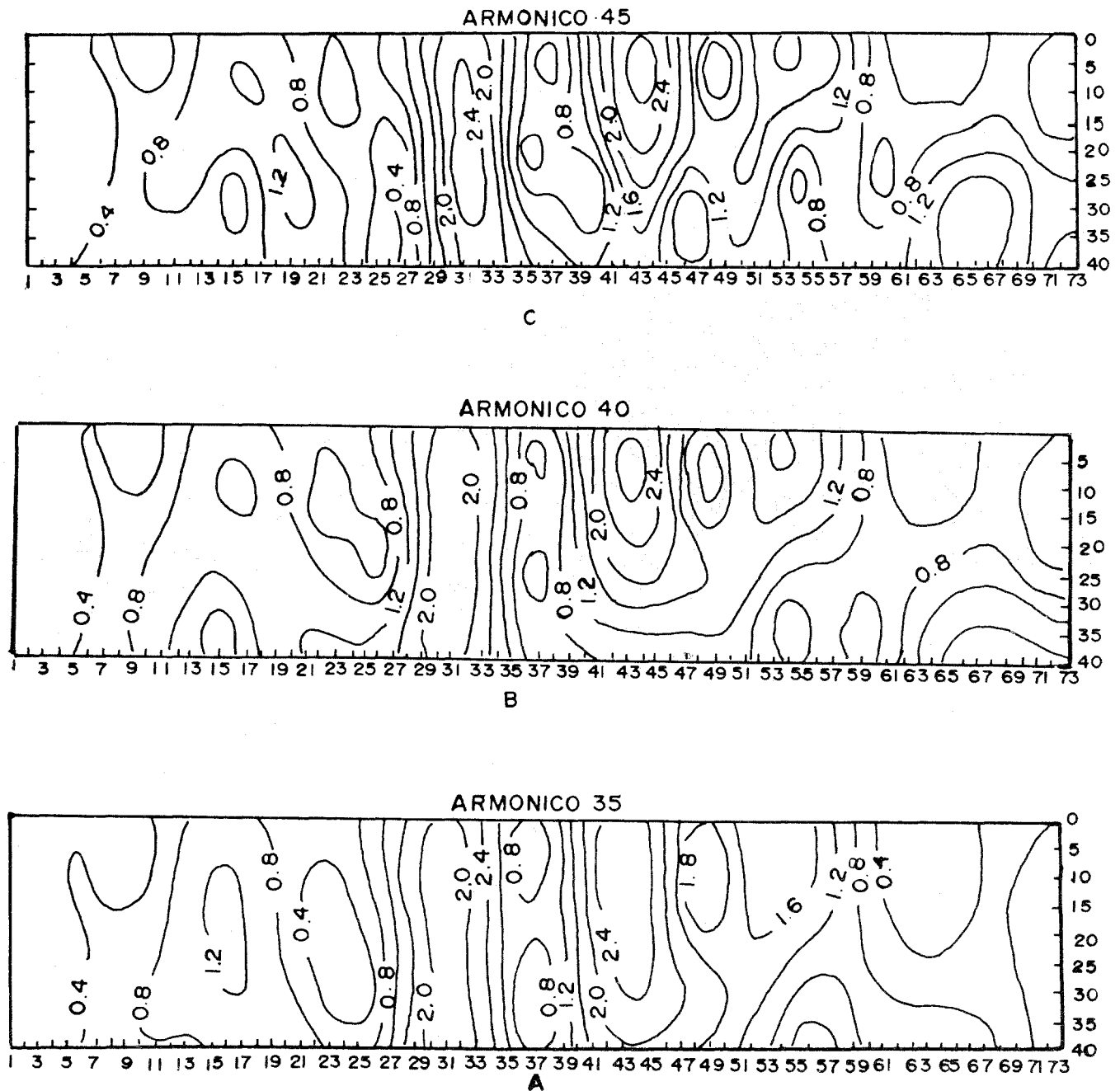


Fig. 5. Cortes del campo del gradiente total normalizado en tres armónicos (35, 40, 45) del perfil B. Distancia entre puntos 5 km, intervalo de isolíneas 0, 1.

terminado por un corte de GTN a profundidades de 15-20 km, considerándose como cortical; mientras que al oeste de esta misma bahía se extiende unos 55 km y fue detectada por los lineamientos en dirección EW de CAA de 40 km y un corte de GTN que reportó una profundidad entre 12-30 km con carácter transcortical y no segura, también por análisis de imágenes.

Falla Cayo Bretón-Vertientes (64). Esta tiene una orientación EW determinada por los lineamientos de CAA de 20

y 40 km en las direcciones EW, NE-SW y análisis de imágenes.

Todos los ejemplos de fallas aquí mencionadas fueron cartografiadas además por otros métodos geofísicos (componentes anómalas del campo geomagnético) y de procesamiento (gradiente horizontal máximo, modelos espectrales magnéticos, determinación de contactos magnéticos, correlación interperfiles con dirección variable, etc.) que no han sido objeto de estudio en el presente trabajo y que

formaron parte del estudio general antes mencionado (Cuevas *et al.*, 1992).

CONCLUSIONES

A la presente investigación geofísica se le planteó como objetivo la delimitación por los métodos gravimétricos de las principales fallas determinando su profundidad y extensión en los casos que así pudiera ser. El principal resultado del presente trabajo lo constituye el Esquema Tectónico (Figura 2) construido sobre la base de las transformaciones al campo gravimétrico. En este esquema se ha podido constatar que en el territorio de Cuba central están presentes un gran número de elementos tectónicos disyuntivos. Existen fallas que se clasificaron como transcorticales y que se encuentran presentes a partir de profundidades de 5-7 km e incluso otras que se encuentran determinadas a partir de profundidades de 10-17 km y llegando a profundidades de 25-30 km. Queremos por otra parte concluir que la utilización de métodos del procesamiento de la información gravimétrica no convencionales, como los del tratamiento de imágenes en este tipo de investigación son válidos y de un basamento científico-técnico que perfectamente se ajustan a las exigencias del tratamiento a la información geofísica, por citar nuestro caso particular.

Recomendamos por otra parte utilizar algunos métodos propios del procesamiento de imágenes para el tratamiento de la información geofísica de los campos potenciales, para la determinación de estructuras tectónicas tanto regionales como locales.

El método del Gradiente Total Normalizado debe ser más explotado y experimentado en las condiciones complejas de nuestro país donde deberá investigarse el carácter de la resolución de este método para cuando existan confluencias de estructuras subverticales cercanas e incluso que se corten entre sí.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a nuestra más cercana colaboradora, Bárbara Polo González del Dpto. de Geofísica del Interior perteneciente al Instituto de Geofísica y Astronomía por su participación en la creación de bases de datos, dibujos de figuras, así como la mecanografía del presente artículo, también al Prof. Dr. Damián Febles Elejalde del Instituto Superior Politécnico "José A. Echeverría" por sus valiosos consejos en la revisión del manuscrito.

APENDICE I

1. Ejemplos de los operadores lineales direccionales para lineamientos

$$\begin{bmatrix} -1 & 2 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \end{bmatrix} \text{ Norte-Sur (NS)} \quad \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 2 & 2 & 2 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \text{ Este-Oeste (EW)}$$

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & 2 \\ -1 & 2 & -1 \\ 2 & -1 & -1 \end{bmatrix} \text{ Noreste-Suroeste (NE-SW)} \quad \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \text{ Noroeste-Sureste (NW-SE)}$$

2. Ejemplos de núcleos de los operadores lineales amplificadores de bordes

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \text{ Noreste (NE)} \quad \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \text{ Este (E)}$$

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \text{ Sureste (SE)} \quad \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \text{ Sur (S)}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \text{ Suroeste (SW)} \quad \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \text{ Oeste (W)}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \text{ Noroeste (NW)}$$

3. Ejemplo de filtro suavizador por promedios móviles

$$\begin{bmatrix} 1/9 & 1/9 & 1/9 \\ 1/9 & 1/9 & 1/9 \\ 1/9 & 1/9 & 1/9 \end{bmatrix}$$

4. Modelo patrón del efecto gravitacional de una falla orientada en dirección NW-SE y buzamiento de 90°

49.0	120.6	155.8	176.8	190.9	190.9	190.9	190.9	190.9
49.4	49.0	120.6	155.8	176.8	190.9	190.9	190.9	190.9
44.4	49.4	49.0	120.6	155.8	176.8	190.9	190.9	190.9
39.0	44.4	49.4	49.0	120.6	155.8	176.8	190.9	190.9
34.5	39.0	44.4	49.4	49.0	120.6	155.8	176.8	190.9
34.5	34.5	39.0	44.4	49.4	49.0	120.6	155.8	176.8
34.5	34.5	34.5	39.0	44.4	49.4	49.0	120.6	155.8
34.5	34.5	34.5	34.5	39.0	44.4	49.4	49.0	120.6
34.5	34.5	34.5	34.5	34.5	39.0	44.4	49.4	49.0

5. Modelo patrón del efecto gravitacional de una falla orientada en dirección NW-SE y buzamiento de 45°

76.3	148.6	176.0	191.7	202.2	202.2	202.2	202.2	202.2
63.9	76.3	148.6	176.0	191.7	202.2	202.2	202.2	202.2
55.3	63.9	76.3	148.6	176.0	191.7	202.2	202.2	202.2
47.3	55.3	63.9	76.3	148.6	176.0	191.7	202.2	202.2
41.0	47.3	55.3	63.9	76.3	148.6	176.0	191.7	202.2
41.0	41.0	47.3	55.3	63.9	76.3	148.6	176.0	191.7
41.0	41.0	41.0	47.3	55.3	63.9	76.3	148.6	176.0
41.0	41.0	41.0	41.0	47.3	55.3	63.9	76.3	148.6
41.0	41.0	41.0	41.0	41.0	47.3	55.3	63.9	76.3

BIBLIOGRAFIA

- ALFONSO, J. R., C. ALAMINOS y J. L. OUBIÑAS, 1984. Preparación y estudio de zonas patrones para la confección de un mapa pronóstico de yacimientos de sulfuros metálicos en el NW de la provincia de Pinar del Río. *En: IV Jornada Científica Inst. Geof. y Astron., ACC, Resúmenes*, 42.
- BERIOZKIN, V. M., 1973. Utilización de la gravimetría para la búsqueda de yacimientos de petróleo y gas. (en ruso) Ed. Nauka, Moscú, 264.
- CUEVAS, J. L., J. J. VALDES, J. L. GIL *et al.*, 1985. Aplicación de diferentes técnicas de procesamiento matemático a la información geofísica en zonas kársticas. *Inf. Cient. Téc., Inst. Geof. y Astron., Dpto. Geof. Aplic., La Habana, Cuba*, 69.
- 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*, 114.
- CUEVAS, J. L., 1991. TERCORR: Un Sistema Turbo Pascal para el Cálculo de las correcciones topográficas parciales hasta la zona de Hayford O_2 , utilizando un modelo digital del terreno. *En: II Encuentro Nacional de Ingenieros Geofísicos, La Habana, mayo, ISPJAE, Resúmenes*, 29.
- CUEVAS, J. L., R. ALVAREZ, F. GARCIA *et al.*, 1992. Investigaciones geofísicas regionales complejas para el estudio de la constitución profunda de la corteza terrestre en la región central de Cuba (inédito). *Inf. Cient. Téc., Inst. Geof. y Astron., Acad. Cien. Cuba, La Habana*, 114.
- DIAZ-DUQUE, J., R. FERNANDEZ de LARA, I. de LA VEGA *et al.*, 1990. Trabajos por el método del gradiente total normalizado (en ruso). *En: Investigación Sísmica en la región de emplazamiento del Centro de Investigaciones Nucleares (Inédito), Inf. Cient.-Téc., Secret. Asun. Nucl., La Habana*, 225-232.
- ELISEIVA, I. S., V. S. VOLJONIN y Z. N. SOBOLEV, 1986. Estudio de la constitución geológica profunda de la corteza terrestre de la sineclisa de Tunguska, por el método del gradiente total normalizado (en ruso). *Razvedochnaya Geofizika*, V. 103, Ed. Nedra, Moscú, 98-103.
- FEBLES, D., 1983. Constitución profunda y perspectivas de yacimientos cromíticos en rocas ultrabásicas por datos geofísicos en Camagüey, Cuba (en ruso), (inédito), Tesis de Doctorado, Leningrado, 147.
- FUNDORA, M. y M. PACHECO, 1991. Utilización del Gradiente Total Normalizado en la evaluación tectónica estructural en perfiles sismogravimétricos de Cuba oriental. *En: II Encuentro Nacional de Ingenieros Geofísicos, La Habana, 14-15 Mayo, ISPJAE, Resúmenes*, 1.
- GARCIA, A. E., A. V. DE LA CRUZ y J. J. VALDES, 1984. Aplicación de métodos geomatemáticos a la caracterización geomorfológica de un territorio en el ejemplo de la Sierra del Pan de Guajabón y sus inmediaciones. *En: IV Conferencia de Ciencias Naturales y Exactas, Univ. Hab., Resúmenes*.
- HERZFELD, U. C. y M. A. SONDERGARD, 1988. MAPCOMP A Fortran Program for weighted thematic map comparison. *Computers and Geosciences*, 14, 5, 699-713.
- LINARES, E., P. G. OSADCHIY, V. A. DOVBNIA *et al.*, 1985. Mapa Geológico de la República de Cuba a escala 1/500 000. Texto: Breve nota explicativa, CIG, MINBAS, Ed. Enpes. La Habana, 1986, 38.
- MEYERHOFF, A. y C.W. HATTEN, 1968. Diapiric structures in Central Cuba. *Diapirism and Diapirs-Memoir*, No. 8, The American Association of Petroleum.
- MOSSAKOVSKIY, A. A., G. E. NEKRASOV, S. D. SOKOLOV *et al.*, 1989. Mapa tectónico de Cuba, a escala 1/500 000. Texto: Tectónica de la República de Cuba (en ruso), *Inst. Geol. y Paleon., ACC e Inst. Geol. AC URSS, Ed. Nauka, Moscú*, 77.
- PRATT, W. K., 1978. Digital Image Processing. A Wiley Interscience Publication, John Wiley and Sons, New York, 749.
- PICK, M., 1987. On the calculation of the gravity terrain corrections in Czechoslovakia. *Studia geoph. et geod.*, 39, 131-144.
- SHEIN, V. S., K. A. KLISCHOV, J. L. YPARRAGUIRRE *et al.*, 1985. Mapa Tectónico de Cuba a escala 1/ 500 000. CIG, MINBAS, Texto: Tecnología. 15, 1, 37-39.
- SORA, A. *et al.*, 1989. Informe correspondiente al Proyecto 1026 sobre los trabajos sísmicos MPCP en el área de Minas al norte de la provincia de Camagüey con el uso del complejo de fuentes gasodinámicas no explosivas GSK-6 (inédito). *Cent. Nac. Fondo Geol., La Habana*.
- VALDES, J.J. y A.V. DE LA CRUZ, 1984. El análisis exploratorio de datos en el contexto de las geociencias. *En Symposium Internacional de Geología, URSS*.
- VALDES, J. J., J. L. GIL *et al.*, 1990. Sistema de procesamiento de imágenes e información bidimensional IMAG-PC V 1.2. Manual usuario, Softel-ACC, La Habana, 105.

VEGA, M., J. PEREZ-LAZO, A. E. GARCIA y C. CRUZ,
1991. Mapa de la densidad de los complejos aflorantes
en Cuba centrooriental a escala 1/1 000 000. ISPJAE e
Inst. Geof. y Astron., La Habana.

J. L. Cuevas Ojeda¹, F. García Pérez¹, M.
Pacheco Puchades¹, D. González Despaigne² y
R. Ramírez Ramírez³

¹*Departamento de Geofísica del Interior, Instituto de
Geofísica y Astronomía, Ministerio de Ciencias, Tecno-
logía y Medio Ambiente, Calle 212 No. 2906, e/ 29 y 31
La Lisa, C. Habana, 11600 Cuba.*

²*Empresa de Geofísica, MINBAS, calle 19 y 8, Vedado, C.
Habana, Cuba.*

³*ENERGO-PROYECTO, MINBAS, calle 23 No. 105 esq.
0. Vedado, C. Habana, Cuba.*

