

DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA APLICADA Y MEDIO AMBIENTE FACULTAD DE ING. CIVIL, ISPJAE

Nuestro Departamento puede acometer tareas relacionadas con las investigaciones geólogo-geofísicas y trabajos medio ambientales, garantizando la seriedad, calidad y eficiencia de sus resultados avalados principalmente por sus especialistas de alto nivel científico (70 % de Doctores y Masters), y por más de treinta años de experiencia.

Principales esferas de desarrollo del Departamento

1. Medio Ambiente

- Estudios de impacto ambiental.
- Estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos para la conservación del medio ambiente.

2. Procesamiento de la Información

- Procesamiento de datos geólogo-geofísicos para la prospección de agua subterránea, minerales sólidos y petróleo.
- Interpretación compleja de datos geólogo-geofísicos para la prospección de agua subterránea, minerales sólidos y petróleo.

3. Informática

- Diseño y elaboración de *software* para el tratamiento y la interpretación de datos en la rama geológica.

4. Minerales y Aguas Subterráneas

- Complejo de métodos geofísicos en el estudio de yacimientos lateríticos.
- Confección de mapas pronósticos para la evaluación de minerales y aguas subterráneas.
- Interpretación de registros geofísicos de pozos para la caracterización de los yacimientos minerales sólidos y agua subterránea.
- Prospección geológica de yacimientos de minerales metálicos y no metálicos.
- Oferta de un catálogo con la caracterización de las propiedades físico-mecánicas de los mármoles cubanos, que pueden ser utilizados para trabajos en otras localidades.

5. Ingeniería Geológica y Arqueología

- Investigaciones geofísicas para la ingeniería geológica.
- Trabajos geofísicos para investigaciones arqueológicas en sitios urbanizados y no urbanizados.

6. Paleomagnetismo

- Ejecución e interpretación de trabajos paleomagnéticos con aplicación a la tectónica y geocronología.

7. Prospección Petrolera

- Metodología para la interpretación combinada de datos geológicos, geofísicos, morfométricos y de teledetección con la concepción de la interpretación cosmo-aire-tierra-pozo para la determinación del grado de prospectividad de yacimientos petrolíferos en áreas que posean información de este tipo. Se han obtenido muy buenos resultados en zonas de cuencas superpuestas de nuestro país.
- Cartografía automatizada empleando técnicas no convencionales y confección de mapas pronósticos.

Actividades de Posgrado

- Desarrollo de cursos cortos y entrenamientos especializados.
- Diplomados en Medio Ambiente, Procesamiento Digital, Teledetección y Sistema de Información Geográfica y Estudios Marinos.
- Maestría en Geofísica Aplicada con menciones en: Estudio del Medio Ambiente Físico, Hidrogeología e Ingeniería Geológica, Minerales, Petróleo y Geoprocesamiento.
- Desarrollo de Doctorados en el área de las Geociencias.

Eventos Científicos

- Desarrollo del III TALLER DE GEOCIENCIAS Y MEDIO AMBIENTE en el mes de marzo de 1999, con sede en el Instituto Superior Politécnico «José Antonio Echeverría», Ciudad de La Habana, Cuba.

Para mayor relación con cualquier aspecto de la actividad que desarrolla nuestro colectivo dirigirse a:

Dr. José Pérez Lazo, J'Dpto. Geofísica, Fac. Ing. Civil, ISPJAE, Ciudad de La Habana, Cuba.
Teléfono: 20 0641 al 51 Ext. 141 Fax: (537) 27 2964
Correo Electrónico: geofisica@civil.ispjae.edu.cu

Caracterización de la influencia del relieve en las observaciones gravitacionales para Cuba con el uso de métodos no supervisados de reconocimiento de patrones

Ing. Lázaro A. Díaz Larrinaga*
Dr. José Luis Cuevas Ojeda*
Téc. Bárbara Polo González*

* Instituto de Geofísica y Astronomía, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, La Habana.

RESUMEN: Con la aplicación de los métodos no supervisados de reconocimiento de patrones (Análisis Euclidiano de Agrupaciones y el método de Ward-Wishart), se obtuvo 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 cuatro niveles del comportamiento anómalo del relieve: de muy alta, alta, moderada y baja complejidad, sobre las observaciones de la gravedad. Todo ello, realizado a partir del estudio de los mapas obtenidos por Cuevas (1996) a escala 1:500 000 de las correcciones topográficas parciales (de la zona lejana y cercana), así como de la morfometría del relieve (altura topográfica y gradiente horizontal máximo de la altura).

Palabras claves: efecto gravitacional, métodos no supervisados de reconocimiento de patrones.

ABSTRACT: With the application of Non Supervised Pattern Recognition Methods a regional characterization scheme, for gravitational effect of terrain in the scale of 1:1 500 000 for all the National Territory was obtained. In this one, four levels of the anomaly character of terrain correction are shown (Very High, High, Moderate and Low Complex) about gravimeter observations. It has been made from Partial Terrain Correction Maps obtained by Cuevas (1996), as well as from Morphometric Maps (Topographic Elevation and Maximum Horizontal Gradient of Elevation).

Key Words: gravity effect, non supervised pattern recognition methods.

INTRODUCCIÓN

Las mediciones de la fuerza de la gravedad realizadas para la exploración de yacimientos minerales, petróleo y gas, así como para la cartografía de estructuras profundas, están influidas por las heterogeneidades del relieve circundante al punto de observación, teniendo que realizarle a las mismas varias correcciones como son: corrección por aire libre, corrección por capa intermedia, corrección por relieve, corrección isostática, entre otras; siendo la corrección por relieve o topográfica la de mayor peso y más contradictoria a la hora de ser calculada, debido al desconocimiento de su comportamiento espacial por lo trabajado de su aplicación.

El presente trabajo es una continuación de otras investigaciones (Cuevas y Pacheco, 1994; Cuevas, 1994; Cuevas y Díaz, 1996) en el estudio de las características e influencias del efecto gravitacional del relieve sobre las anomalías de Bouguer, en este caso para todo el territorio nacional y a partir del uso de métodos no supervisados de reconocimiento de patrones, para lo cual se hizo uso de las bases de datos topográficas creadas por Cuevas y Pacheco (1994) para la región oriental, Cuevas (1994) para la región central, y Cuevas y Díaz (1996) para la región occidental. Es de señalar que el cálculo de las correcciones parciales y total, fueron implementadas mediante la formulación de Pick (1987), en la que se tiene en cuenta la curvatura de la tierra para distancias muy alejadas (ejemplo: 166,7 km) al punto de observación, elemento este que le da mayor integridad a los resultados de la presente investigación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Atributos empleados en la clasificación

En total se emplearon en la clasificación cuatro variables, dos de carácter morfométrico, la Altura Topográfica (H) y el Gradiente Horizontal Máximo de la Altura Topográfica (GHMH); y dos de carácter geofísico, la Corrección Topográfica de la Zona Lejana (CTZL) y la Corrección Topográfica de la Zona Cercana (CTZC). Los elementos a clasificar se ubican de forma regular en una red de 15 x 15 km, los que se obtuvieron al regularizar los mapas topográficos a escala 1:50 000 y 1:150 000, para el caso de la H y el GHMH, mientras que la CTZL y la CTZC se consiguieron a partir de los mapas 1:500 000 de correcciones topográficas parciales (0 a 5 km y 5 a 165 km), realizados por Cuevas (1989; 1994) y Cuevas y Díaz (1996), para toda Cuba y regularizados a 1:1 500 000, previo análisis estructural de los

datos, para así seleccionar los parámetros óptimos de regularización (Díaz, 1994), y obtener un total de 549 puntos.

Fundamento teórico de los métodos usados en la clasificación

Para resolver el objetivo principal de la presente investigación se emplearon dos técnicas de análisis de agrupaciones, no supervisadas, una de tipo no jerárquica, el método de Análisis Euclidiano de Agrupaciones; y otra de tipo jerárquica, el método de Ward-Wishart (Roche, 1989). También se aplicó el método de Evaluación de la Efectividad, para así evaluar el grado de información que aportan cada uno de los atributos al proceso de clasificación.

Método de Evaluación de la Efectividad

Dada una matriz $[X]$ de datos originales, formada por N puntos, que estén separados en K grupos y que cada punto tenga M atributos, la evaluación de la efectividad de la clasificación, según la teoría de la información, parte de la preparación para cada una de las M variables, de una tabla de distribuciones de frecuencias empíricas con los datos de los patrones de cada grupo, escogiendo los intervalos de clase más adecuados. Con estos datos se obtienen las probabilidades condicionales $P(Gi/Ij)$, las probabilidades marginales para cada grupo $P(Gi)$ y las probabilidades marginales para cada intervalo $P(Ij)$, donde las probabilidades condicionales se calculan:

$$P_{ij} = P(Gi/Ij) = n_{ij}/n_j \quad (1)$$

y las probabilidades marginales se definen como:

$$P(Gi) = N_i/N \quad \text{y} \quad P(Ij) = n_j/N \quad (2)$$

Estas probabilidades se utilizan para calcular la entropía a posteriori del sistema, mediante:

$$H(G/I) = P(Ij) * P(Gi/Ij) * \log [P(Gi/Ij)] \quad (3)$$

y la entropía a priori del sistema según:

$$H(G) = P(Gi) \log [P(Gi)] \quad (4)$$

donde:

$P(Gi)$: son los valores de las probabilidades a priori de aparición de cada grupo o evento i .

n_{ij} : número de puntos en el grupo i -ésimo perteneciente al intervalo j -ésimo.

La diferencia entre las entropías a priori (que debe ser mayor) y a posteriori (que debe ser menor), proporciona una medida de la cantidad de información que brinda la variable sobre el sistema estudiado.

$$I = H(G) - H(G/I) \text{ bits} \quad (5)$$

y para obtener una medida normalizada se calcula la cantidad de información relativa J (efectividad).

$$J = [1 - H(G/I)/H(G)] \text{ 100 \%} \quad (6)$$

Un mayor detalle puede consultarse en Escartín y Rodríguez (1988).

Método de Análisis Euclidiano de Agrupaciones

Las técnicas de clasificación no jerárquicas tienen un amplio uso en geología y geofísica dado que asumen la existencia de grupos discretos con estructuras independientes, cuando la información a priori es muy pobre. El método consiste en revelar la presencia de aglomeraciones o nubes discretas de puntos más o menos próximos en el espacio de las variables. Estas aglomeraciones o concentraciones de puntos en el espacio no tienen puntos comunes entre sí y se separan unas de otras por zonas donde la densidad de puntos es muy baja (Rodríguez, 1987).

En el método se parte de la existencia de un número máximo y mínimo de grupos ($C_{\text{máx}}$ y $C_{\text{mín}}$), cuyos centros se conocen o pueden ser determinados automáticamente, mediante el valor medio del intervalo de cada atributo, intervalo este sujeto a la cantidad máxima y mínima de grupos seleccionados a priori, para así asignar a cada grupo el elemento más cercano, mediante el criterio de la distancia al cuadrado, como medida de similitud (fórmula 7).

Realizada la preasignación de los n elementos se redefinen las coordenadas de los centroides de cada grupo según la media de las coordenadas de cada uno de los elementos que integran el grupo en cuestión. Este proceso se repite hasta que ningún elemento sea trasladado de grupo, y así lograr la clasificación para el número máximo de grupos:

$$d_{ij}^2 = \frac{\sum_{k=1}^M (x_{ik} - x_{jk})^2}{M} \quad (7)$$

donde:

x_{ik} : elemento i -ésimo del k -ésimo grupo.

x_{jk} : elemento j -ésimo del k -ésimo grupo.

M : tamaño de la muestra.

La cantidad máxima de grupos se reduce uniendo los pares de grupos, que la distancia entre sus centros sea mínima, y se repite todo el proceso anterior con $C_{\text{máx}} - 1$ grupos hasta llegar a $C_{\text{mín}}$.

Para seleccionar la cantidad óptima de grupos se determina una magnitud que depende de la densidad de los puntos alrededor de los centroides, siendo posible realizar la prueba de hipótesis para verificar las siguientes alternativas:

H_0 : C es tan bueno como $C+1$ grupos (estadísticamente equivalentes).

H : C es mejor que $C+1$ grupos (estadísticamente mejor).

Se admite una u otra en dependencia del criterio de la prueba de Fischer, donde se acepta H_0 si se cum-

ple que $F_p > F$ crítico, para un determinado $\alpha - 1$ grados de libertad:

$$F_p = \frac{SCR(n_1) - SCR(n_2)}{SCR(n_2) \left[\frac{n - n_1}{n - n_2} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^{2/p} \right] - 1} \quad (8)$$

donde:

SCR: suma de los cuadrados de los residuos punto-centroide.

n : número de centroides considerados.

p : número de atributos.

Método de Ward-Wishart

Este método tiene como objetivo representar los vínculos entre los puntos observados en el espacio de las variables de manera que reflejen una estructura jerárquica, en la que cada grupo integrado al nivel i forma parte de un grupo mayor al nivel $i+1$. Estos grupos se van unificando unos con otros con el paso a niveles superiores, de tal manera que todos formen parte de un solo conjunto en el nivel jerárquico máximo.

El método se basa en que dada una matriz $[X]$ formada por N puntos observados en el espacio M -dimensional de las variables y una expresión usada como medida de semejanza (distancia euclidiana) (ver fórmula 9), combinar en un grupo a un nivel jerárquico $k+1$ aquella pareja de puntos (i, j) en el nivel jerárquico k que más se parecen entre sí.

$$d_{ij} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^M (x_{ik} - x_{jk})^2}{M}} \quad (9)$$

donde:

x_{ik} : elemento i -ésimo del k -ésimo grupo.

x_{jk} : elemento j -ésimo del k -ésimo grupo.

M : tamaño de la muestra.

Este proceso de unión de puntos se repite hasta que todos los puntos quedan incorporados a un grupo único, y se resume de la siguiente forma:

1. Cálculo de la matriz D de semejanzas entre los N puntos originales.
2. Encontrar el elemento d_{ij} más pequeño de la matriz D .
3. Unir los puntos i y j en un grupo k .
4. Calcular las nuevas semejanzas d_{km} , donde m representa cada uno de los puntos restantes.
5. Repetir desde el paso 2 hasta completar $(N - 1)$ ciclos. Para ganar eficiencia, el paso 4 se puede diseñar para aprovechar al máximo la información en la matriz D (estrategia combinatoria), de manera que:

$$d_{km} = a_i * d_{im} + a_j * d_{jm} + b * d_{ij} + c * |d_{im} - d_{jm}| \quad (10)$$

Donde los coeficientes (a_i, a_j, b y c) toman los siguientes valores:

$$a_i = (nm + ni)/(nm + nk)$$

$$a_j = (nm + nj)/(nm + nk) \quad (11)$$

$$b = -nm/(nm + nk)$$

$$c = 0$$

Siendo n_i y n_j las cantidades de miembros en los grupos i y j respectivamente, $nk = n_i + n_j$, es la cantidad de puntos en el grupo k resultante de unir los grupos i y j , y nm es la cantidad de puntos restantes. El algoritmo de Ward-Wishart fue diseñado para obtener grupos con la mínima varianza en cada ciclo, es decir, grupos con la máxima homogeneidad interna.

Características de los atributos empleados en la clasificación

Las variables que intervienen en el proceso de clasificación caracterizan el relieve de forma unidimensional, mediante el atributo H; de forma bidimensional, con el atributo GHMH; y de forma tridimensional, expresado en mGal, mediante los atributos CTZC y CTZL. No fue incluida la corrección topográfica total, por ser una variable redundante en el sistema, ya que la misma no es más que la suma algebraica de los efectos gravitacionales parciales.

Altura Topográfica: atributo que caracteriza de forma puntual la morfometría del relieve, y se expresa en metros. Según la Figura 1, que representa la distribución en frecuencia de la variable, la mayor parte de los puntos tienen valores que podemos considerarlos de bajos a moderados, los cuales oscilan entre 0 y 150 m, intervalo de clase donde está el 85 % del total de puntos. Aquí están incluidas las zonas de llanuras que se extienden a todo lo largo de Cuba, como son: la cuenca del Cauto (CC), las llanuras de Camagüey por el oriente y por el occidente las llanuras Habana-Matanzas y toda la parte meridional de la Isla de la Juventud, entre otras. El 15 % restante lo integran la Sierra Maestra (SM), el macizo Escambray (ME), la cordillera de Guaniguanico (CG), la sierra de Nipe-Cristal (SNC), y la sierra del Purial (SP).

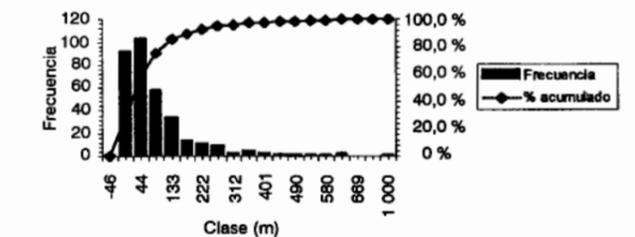


FIGURA 1. Histograma del atributo Altura Topográfica.

Gradiente Horizontal Máximo de la Altura Topográfica: índice que relaciona la distancia vertical y horizontal del relieve, expresado en m/km. Refleja los cam-

bios laterales del relieve, y el mismo está relacionado con algunos parámetros geomorfológicos como son: la pendiente del relieve y la disección vertical. De forma general (Figura 2) la región de estudio está caracterizada por valores que oscilan entre los 5 y 40 m/km, los cuales podemos considerar de moderados, con un contraste bien marcado en algunas regiones como son SM, CG y ME con valores que superan los 50 m/km. Este atributo se obtuvo mediante la expresión desarrollada por Válek (1972) e implementada por Cuevas (1991a), el cual toma de una red regular cuatro puntos separados a una distancia $t = s\sqrt{2}$ unidades de muestreo a partir del punto de cálculo en diagonal, donde s es el paso de medición expresado en kilómetros, y queda el GHMH en el punto P de la siguiente forma:

$$GHM(P) = \left(\frac{0,707}{2s} \right) \sqrt{(R_1^2 + R_2^2)} \quad (12)$$

donde:

$$R_1 = H_1 - H_3$$

$$R_2 = H_2 - H_4$$

H_i : altura máxima en el punto i -ésimo.

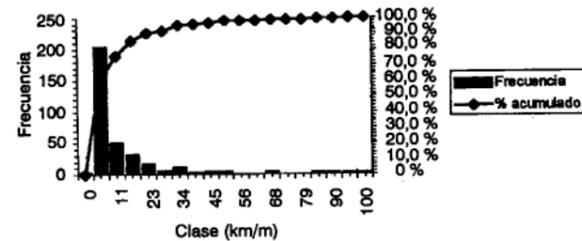


FIGURA 2. Histograma del atributo Gradiente Horizontal Máximo de la Altura Topográfica.

Corrección Topográfica de la Zona Lejana: parámetro que caracteriza el aporte del relieve sobre las anomalías de la gravedad, desde los 5 hasta los 167 km del punto de observación. Está expresado en mGal. Para su cálculo se emplearon sistemas capaces de calcular el efecto gravitacional del relieve de forma parcial e integral, implementados por Cuevas (1991b). En las zonas de altos gradientes de la altura topográfica se localizan valores que podemos considerarlos de altos, los que superan los 60 mGal, ubicados en el extremo meridional de Cuba oriental, provocados por los altos gradientes topográficos de la Sierra Maestra y la fosa de Bartlett-Caimán. Estos valores son los que menos se repiten, como se puede observar en la Figura 3; a los mismos les corresponden los valores de frecuencia más bajos.

Corrección Topográfica de la Zona Cercana: caracteriza el aporte del relieve sobre las anomalías de la gravedad hasta los 5 km del punto de observación. Se expresa en mGal. Gran parte del territorio se caracteriza por un comportamiento monótono, con valores muy bajos, los que no superan los 0,5 mGal (Figura 4). Sólo en

la región oriental encontramos valores que superan los 4 mGal, con gradientes que van de altos a moderados.

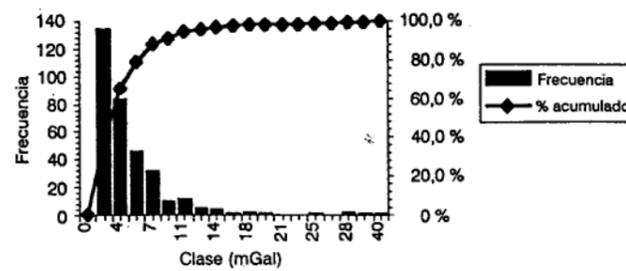


FIGURA 3. Histograma del atributo Corrección Topográfica de la Zona Lejana.

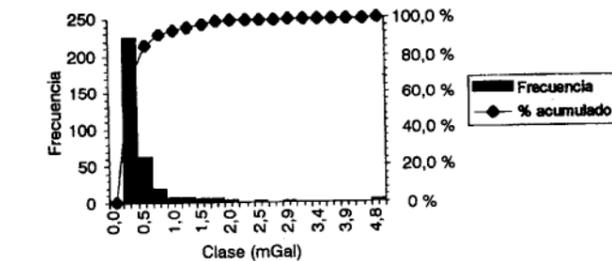


FIGURA 4. Histograma del atributo Corrección Topográfica de la Zona Cercana.

DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Análisis de la efectividad de los atributos para la clasificación

Para determinar las posibilidades de una variable o atributo para diferenciar la presencia de dos o más clases, se le aplicó al conjunto de cuatro variables el método de Evaluación de la Efectividad, para lo cual cada atributo se dividió en seis intervalos equivalentes. Aplicando las fórmulas 6 y 7, se llegó a los resultados que se resumen en la Tabla 1.

TABLA 1. Aporte de cada variable al sistema

Variable	E a priori	E a posteriori	Informatividad (%)
H	2,58	1,47	42,6
GHMH	2,58	1,43	44,4
CTZC	2,58	1,67	34,9
CTZL	2,58	1,51	41,1

De ahí se concluye que todas las variables aportan información sobre el sistema y ninguna por sí sola es capaz de aclarar totalmente la estructura del mismo, o sea, ninguna presenta informatividad máxima igual a 100 %, siendo la CTZC la que menos aporta al sistema y el GHMH la variable que más aporta al sistema.

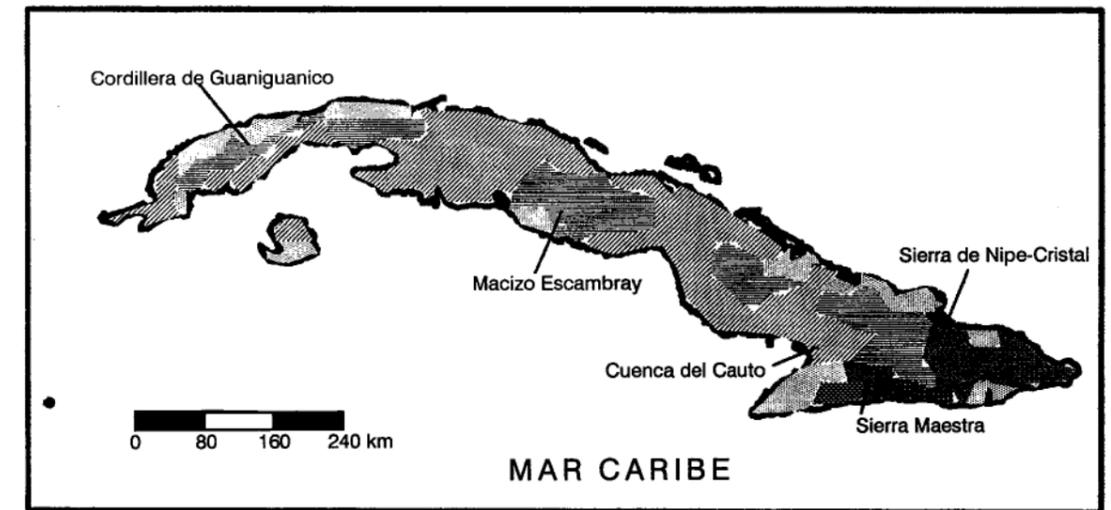
Resultados del método de Análisis Euclidiano de Agrupaciones

De los resultados obtenidos por este método de clasificación se concluyó, una vez realizada la prueba de

Fischer, que el número de grupos con mayor significación estadística resultó ser ocho, cantidad esta que no tiene gran sentido físico a la hora de justificar el objetivo del trabajo, por lo que se seleccionó el modelo de seis grupos, el cual tiene gran sentido geológico.

En la Figura 5 se representa la distribución espacial para el modelo de seis grupos. Tanto el grupo I como el II están localizados en el extremo meridional de Cuba oriental (SM), siendo estos los más afectados por las influencias del relieve. Los grupos III y IV lo integran los macizos montañosos del Escambray y Guaniguanico, el extremo norte de la SM y la SNC. Los restantes grupos

(V y VI) corresponden a las zonas de llanura del territorio, caracterizados por los bajos valores de todos los atributos. En estos últimos grupos hay que tener presente que cerca del 90 % de la contribución de los efectos parciales a la Corrección Topográfica Total, lo aporta la CTZL. En la Tabla 2 aparecen las coordenadas de los centroides para el modelo de seis grupos. Es de señalar que estas coordenadas no se pueden tomar como valores absolutos de las variables, sino como valores medios relativos que caracterizan el comportamiento de los diferentes grupos en el espacio M -dimensional de la población objeto de estudio.



LEYENDA

	Grupo I		Grupo III		Grupo V
	Grupo II		Grupo IV		Grupo VI

FIGURA 5. Esquema de ubicación de los grupos según el método de Análisis Euclidiano de Agrupaciones.

TABLA 2. Coordenadas de los centroides de los grupos por el método de Análisis Euclidiano de Agrupaciones

Grupo	H(m)	CTZC (mGal)	CTZL (mGal)	GHMH (m/km)
I	658	4,34	29,0	77,0
II	233	2,50	20	71,0
III	304	0,96	8,6	24,0
IV	17	0,38	5,65	19,0
V	100	0,16	2,8	6,5
VI	12	0,1	2,0	2,9

Resultados del método de Ward-Wishart

Antes de aplicar este método, primeramente se tipificaron todas las variables (media igual a cero y desviación típica unitaria), eliminando con ello que las diferentes escalas de los atributos afecten los resultados. En la Figura 6 se muestra de forma esquemática los resultados obtenidos de la clasificación jerárquica, donde se observa la no división del grupo I a medida que aumentan los ciclos; este grupo está ubicado en el extremo suroriental de Cuba. El resto de los grupos (ver Figura 7) se subdividen para clasificar la zona de llanura integrada por los grupos V y VI; de montaña, integrada por los

grupos II y III; e intermedia, representada por el grupo IV, con lo que se completan seis grupos con característi-

cas específicas. En la Tabla 3 se recogen las coordenadas de los centroides para cada grupo.

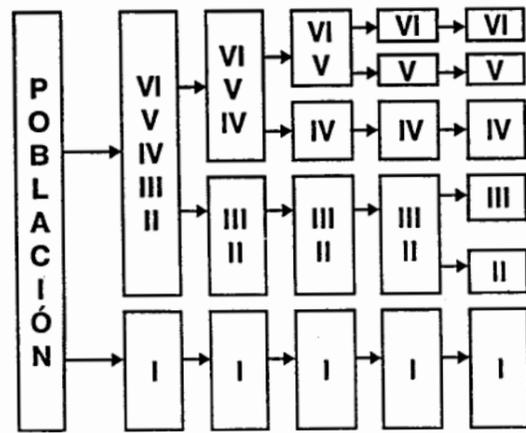
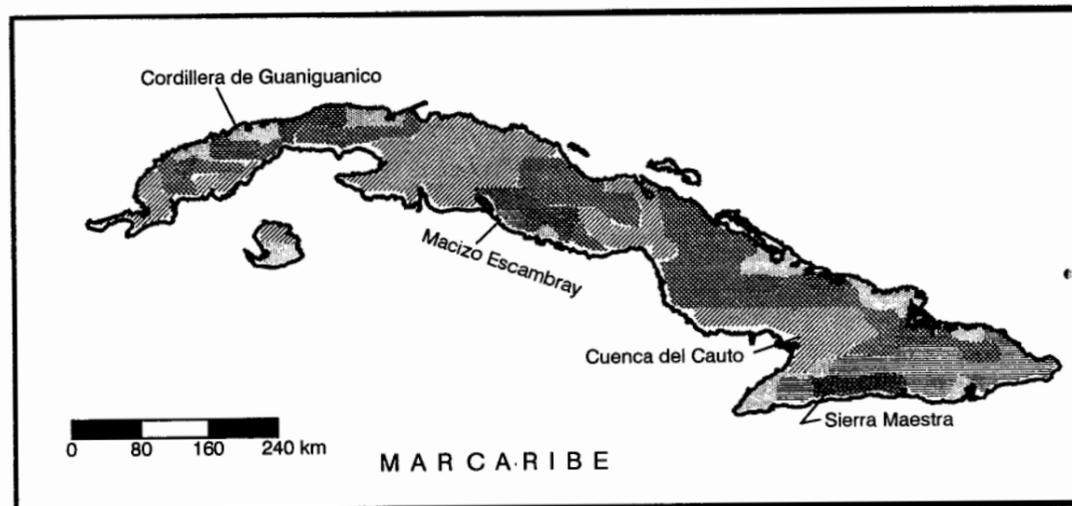


FIGURA 6. Esquema de los resultados de la clasificación por el método de Ward-Wishart.



LEYENDA

- Grupo I
- Grupo II
- Grupo III
- Grupo IV
- Grupo V
- Grupo VI

FIGURA 7. Esquema de ubicación de los grupos según el método de Ward-Wishart.

TABLA 3. Coordenadas de los centroides de los grupos por el método de Ward-Wishart

Grupo	H(m)	CTZC (mGal)	CTZL (mGal)	GMMH (m/km)
I	553	3,5	33,0	86,0
II	232	0,8	10,0	28,0
III	161	0,5	3,7	16,0
IV	61	0,2	1,8	4,0
V	33	0,5	5,0	24,0
VI	9	0,05	2,7	3,0

Todos estos resultados fueron validados con los análisis realizados por Cuevas y Pacheco (1994), donde se recoge el estudio del comportamiento de la influencia del relieve topográfico con la distancia en cuatro regiones de la zona oriental; ellas son: la SM, la SP, la SNC y la CC. Es de significar que tanto la SNC como la SP, tienen un comportamiento similar sobre el efecto gravitacional con la distancia, en ambas el mayor aporte de la influencia del relieve se alcanza a los 120 km aproximadamente; no sucede lo mismo en la SM, que se alcanza a los 30 km, siendo esta zona única dentro de todo el territorio. En la zona de la CC para distancias superiores a los 167 km de

cálculo no se alcanza la saturación de la curva que relaciona la distancia al punto de cálculo con la corrección topográfica, lo cual nos dice que esta región es la más afectada en cuanto al aporte de la influencia de las masas topográficas de la zona lejana. Más reciente, en los trabajos de Cuevas y Díaz (1996), se hace el mismo análisis para el occidente de Cuba, para las zonas de la CG y el ME, las que presentan un comportamiento muy similar al exhibido por las zonas de SNC y SP.

Los resultados de ambas técnicas de clasificación tienen un gran sentido geólogo-geofísico al dividir el territorio en seis grupos, atendiendo al grado de complejidad que aportan las heterogeneidades del relieve en las observaciones de la fuerza de gravedad.

Por la escala de la base de datos, así como por los resultados alcanzados en trabajos anteriores, podemos subdividir la región bajo estudio en cuatro zonas fundamentales, previa integración de los grupos obtenidos en el proceso de clasificación, en: Zona de Muy Alta Complejidad, Zona de Alta Complejidad, Zona de Moderada Complejidad y Zona de Baja Complejidad.

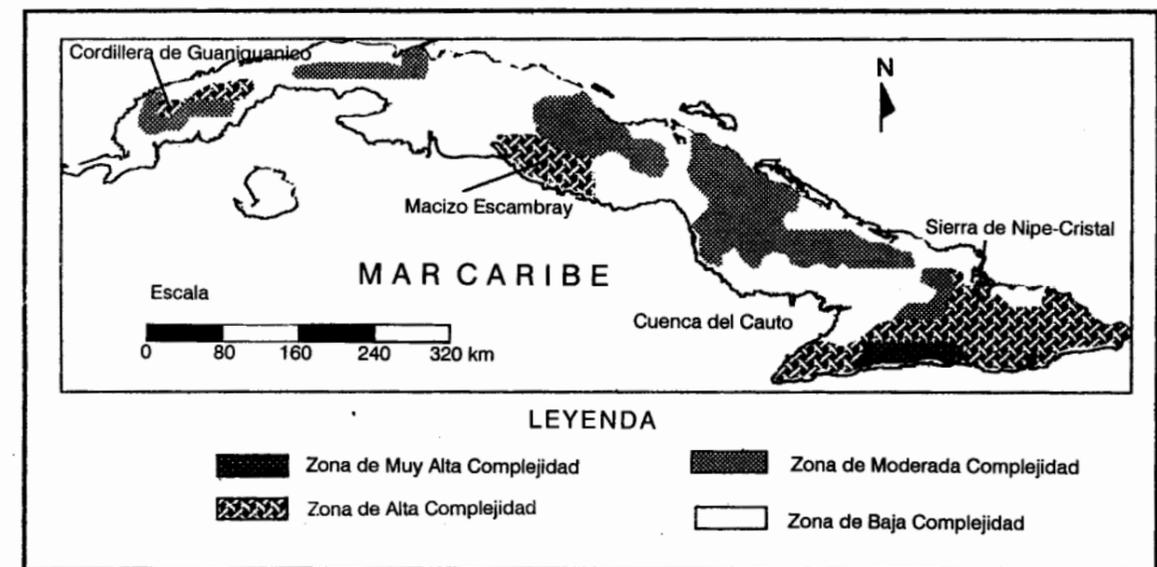
Zona de Muy Alta Complejidad: esta es la zona de mayor complejidad para las mediciones e interpretación de la fuerza de gravedad; se localiza en el extremo meridional de Cuba oriental (Figura 8). Aquí se encuentran los mayores valores hipsométricos del territorio, donde se alcanza los 1 972 m y en correspondencia existen los máximos gradientes de altura. Los máximos valores de corrección topográfica de la zona cercana y lejana alcanzan 12 y 60 mGal respectivamente; estos valores son de gran peso en las observaciones de la gravedad. Toda esta zona es afectada por el complejo morfoestructural fosa de Bartlett y la SM, región esta clasificada en el grupo I por el método de clasificación jerárquica; identificado a partir del nivel de mayor jerarquía, es totalmente independiente del resto de los demás al no for-

mar subgrupos en los restantes ciclos de jerarquía. También identificada por los grupos I y II del método de Análisis Euclidiano de Agrupaciones (AEA).

Zona de Alta Complejidad: esta zona se localiza en el oriente del país, el ME y la CG (Figura 8). Está integrada por los grupos II y III, clasificados por el método de W-W, y es equivalente a los grupos IV y V del método de AEA. En la misma existe una marcada estabilidad del comportamiento de la influencia del relieve con la morfometría a pesar de los valores moderadamente altos que tienen las coordenadas de los centros de estos grupos, donde la altura oscila entre los 150 y 1 231 m, y las correcciones topográficas varían entre 3,7 y 10 mGal para la zona lejana, y entre 0,4 y 7 mGal para la zona cercana.

Zona de Moderada Complejidad: la conforman los grupos III y IV clasificados por los métodos de AEA y W-W respectivamente; está localizada entre las provincias de Ciego de Ávila y Las Tunas, así como al norte del ME y en la región central de Cuba occidental.

Zona de Baja Complejidad: integrada por los grupos V y VI clasificados por el método de W-W, y VI por el método de AEA. En esta zona la CTZL tiene gran peso, ya que la misma, aunque relativamente baja, aporta un por ciento elevado al valor total de la corrección; esto ocurre con marcada significación en la CC por el aporte proveniente de la SM. Otras regiones con similares características, pero de menos significación, son: la región de llanura comprendida entre Matanzas y Villa Clara, la cual es afectada por el aporte proveniente del ME; la Isla de la Juventud y toda la región meridional y septentrional de Cuba occidental. Los valores de la CTZC oscilan entre 0,05 y 1 mGal, mientras la CTZL llega a alcanzar los 7 mGal. Esta zona se caracteriza por pendientes suaves, los mayores valores hipsométricos son del orden de los 50 m.



LEYENDA

- Zona de Muy Alta Complejidad
- Zona de Alta Complejidad
- Zona de Moderada Complejidad
- Zona de Baja Complejidad

FIGURA 8. Esquema de ubicación de las zonas.

CONCLUSIONES

- Con la aplicación de las técnicas no supervisadas de reconocimiento de patrones, fue posible obtener un esquema de clasificación regional, en el cual se muestra el grado de complejidad que tienen las heterogeneidades del relieve para las observaciones de la fuerza de gravedad.
- Teniendo en cuenta la escala de la base de datos, así como el grado de similitud entre los grupos obtenidos en la clasificación, según los métodos empleados, el territorio se dividió en seis grupos, los que a su vez se integraron para formar cuatro grandes zonas: de Muy Alta Complejidad, integrada por el grupo I del método de W-W, siendo equivalente a los grupos I y II del método de AEA; de Alta Complejidad, integrada por los grupos II y III del método de W-W, equivalentes a los grupos IV y V obtenidos por el método de AEA; de Moderada Complejidad, integrada por el grupo IV del método de W-W, equivalente al grupo III obtenido por el método de AEA; y de Baja Complejidad, integrada por los grupos V y VI del método de W-W, equivalentes al grupo VI obtenido por el método de AEA.
- La zona de mayor complejidad, tanto para las mediciones de la fuerza de la gravedad como para su interpretación, está localizada en el extremo meridional de Cuba oriental; seguida por los macizos montañosos de ME, sierra de Nipe-Cristal y cordillera de Guaniguanico. En estas zonas se recomienda la realización de las correcciones topográficas tanto de la zona cercana como de la lejana, para lograr con ello una interpretación efectiva y correcta de las anomalías de Bouguer.
- Con el uso de ambas técnicas de clasificación, se identificaron varias regiones con un comportamiento similar al exhibido por la región de la CC, estudiada con profundidad en los trabajos de Cuevas y Pacheco (1994); estas regiones están localizadas en el grupo VI clasificado por ambos métodos y se ubican al este y oeste del ME, al norte de la Isla de la Juventud y todo el extremo meridional de Cuba occidental. Este grupo, aunque considerado en la zona de baja complejidad, no deja de tener importancia a la hora de determinar si se realiza o no la corrección topográfica, ya que estas zonas están afectadas en un por ciento considerable por la influencia que ejercen las grandes masas de la zona lejana.

- El presente trabajo aporta nuevos conocimientos para la planificación y elaboración de los proyectos de investigación gravimétrica aplicados a la búsqueda y exploración de yacimientos minerales, gas y petróleo, además de posibilitar el esclarecimiento de las anomalías de la gravedad, por lo que se logra una identificación efectiva de los objetos de interés.

BIBLIOGRAFÍA

- CUEVAS, J.L.: «Mapa de correcciones topográficas parciales hasta la zona de Hayford M, en el mar Caribe al sudeste de Cuba». *Resúmenes*, p. 29, en V Jornada Científica, Inst. Geof. y Astron., La Habana, oct. 1989.
- : *Sistema para el cálculo del Gradiente Horizontal Máximo, GHM, Versión 1.0*, Dpto. Geofísica del Interior, Instituto de Geofísica y Astronomía, La Habana, 1991a.
- : «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». *Resúmenes*, p. 29, en II Encuentro Nacional de Ingenieros Geofísicos, La Habana, mayo, ISPJAE, 1991b; y en Primer Taller Iberoamericano "Informática y Geociencias", La Habana, 7-10 julio, 1992.
- : «Caracterización de las anomalías de la gravedad en Cuba centro-oriental y su utilización en estudios de tectónica y sismicidad», Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Geofísicas, 146 pp., Dpto. Geofísica del Interior, Instituto de Geofísica y Astronomía, La Habana, 1994.
- CUEVAS, J.L. y M. PACHECO: «Influencia del relieve topográfico sobre las anomalías de Bouguer hasta la zona de Hayford O₂ en Cuba oriental», *Geofísica Internacional*, 33(3): 385-397, 1994.
- CUEVAS, J.L. y L. DÍAZ: «Efecto gravitacional del relieve topográfico en Cuba: características e influencia», *Resúmenes*, p. 29, en V Jornada Científica, Instituto de Geofísica y Astronomía, La Habana, oct. 1996.
- DÍAZ, M.: «Sistema para el análisis estadístico de los datos geológicos, GEOESTAD», Laboratorio de Geomatemática, Inst. Geof. y Astron., La Habana.
- ESCARTIN, E. y W. RODRÍGUEZ: *Manual de usuario del Sistema MULVAR*, 15 pp., Dpto. Geofísica, ISPJAE, La Habana.
- PICK, M.: «On the calculation of gravity terrain corrections in Czechoslovakia», *Studia Geoph. et Geod.*, No. 39, pp. 131-144, 1987.
- ROCHE, A.: *Estadísticas en las Ciencias Geológicas*, tomo 2, 307 pp., Dpto. Geofísica, ISPJAE, La Habana, 1989.
- RODRÍGUEZ, W.: *Procesamiento cuantitativo de los datos geológico-geofísicos*, Dpto. Geofísica, ISPJAE, La Habana, 1987.
- VALEK, R.: «Vypocet gradientu anomálního pole y geofyzice», *Geologický Průzkum*, No. 4, pp. 116-117.

El Karst en el archipiélago cubano y la región Caribe-Antillana

M. Roberto Gutiérrez Domech* *Instituto de Geología y Paleontología.

RESUMEN: El conjunto de fenómenos y procesos que se producen bajo la acción del agua, caracterizados por el predominio de la disolución y la corrosión, principalmente, en rocas carbonatadas, en la región Caribe-Antillana y en particular en el archipiélago cubano, tiene una importancia incalculable en la vida y el desarrollo económico de las naciones de esa área.

La historia geológica de las islas mayores y las áreas continentales, fundamentalmente las características paleogeográficas de la región, unidas a un paleoclima de relativa estabilidad hasta el Pleistoceno, donde se conjugan la fuerte insolación —y, por consiguiente, altas temperaturas— con abundantes precipitaciones, alternadas durante ese período con etapas de sequía; así como los notables movimientos del nivel medio del mar y, por ende, del nivel de base de las aguas en las tierras emergidas, como consecuencia de las reconocidas oscilaciones glacioeustáticas, determinaron la formación y existencia de paisajes kársticos de una riqueza y variedad de formas considerable, mucho más agresivo y de rápida evolución, incluso que los del área tipo en los Alpes Dináricos.

Se describen las principales zonas kársticas del archipiélago cubano, de la península de Yucatán y otras comarcas de México, de Jamaica, Puerto Rico, República Dominicana y Haití, Venezuela, Guatemala, Belice y otras; así como las mesoformas kársticas más características e importantes, entre las que se distinguen los mogotes de Cuba y sus similares cerros kársticos de Puerto Rico; los "cayos" presentes en áreas inundadas de Los Haitises, en República Dominicana, y los "morros" de San Juan, en Venezuela, donde también se encuentran los "tepulis" en cuarcitas precámbricas, así como los cenotes yucatecos, guatemaltecos y beliceños, y sus equivalentes "casimbas" en Cuba y Dominicana.

Así mismo se describen poljes y otros valles kársticos de Cuba, México, República Dominicana, Haití, Jamaica, etcétera, y los campos de lapies que aparecen en estos y otros países.

Además de la importancia de las áreas kársticas para la economía de las naciones de la región, por la posibilidad de explotación de los acuíferos subterráneos, la necesidad de utilización de los terrenos kársticos para obras de ingeniería, para la prospección de yacimientos minerales, etcétera, se señala su interés por contener yacimientos fosilíferos de fauna, principalmente del Cuaternario y residuarios de los primitivos habitantes de la región, y por albergar ecosistemas de gran biodiversidad y riqueza.

ABSTRACT: The ensemble phenomena and processes produced under the water action distinguished by the dissolution and corrosion, principally on carbonate rocks, at the Caribbean-Antillean region, particularly at the Cuban Archipelago, has a not calculate importance for live and economic development for this area's nations.

The geological history of the Greater Islands and the continental areas, principally, the paleogeographic characteristics of the region, together with the relatively paleoclimatic stability to the Pleistocene, where the strong insolation —consequently with high temperatures— with heavy rainfalls, are combine, during this geological period with drought stages; the strong sea level movements and therefore the changing of the underground waters level, on the lands as a consequence of the glacioeustatic fluctuations, determinated the development and existence of karstic landscapes with a richness and a variety of forms quiet important, much more aggressive and of faster evolution than those of the classic Dinaric Alps area.

The main karstic areas of the Cuban Archipelago, the Yucatan peninsula, and other Mexican areas; from Jamaica, Puerto Rico, Dominican Republic, Haiti, Venezuela, Guatemala, Belize and others are described. So are described those more typical karstic mesoforms, such as the Cuban mogotes and the similar Jamaica and Puerto Rico's karstic hills; the so called "cayos" from the flooded areas of Los Haitises, Dominican Republic; and San Juan "morros", from Venezuela, where the Precambrian quarcites "tepulis" towers can be found; such as the Yucatan cenotes, also presents at Guatemala and Belize and their Cuban and Dominican equivalents the "casimbas".

Poljes and others karstic valleys from Cuba, and others Greates Antilles and Mexico, are described, and also these countries and others "karrenfelds".

In addition to the importance of the karstic areas for the region nations economy, because of the possibilities of operation of the underground aquifer, the necessity of karstic terrains for engineering works, prospecting of minerals deposits, etc., the interest for fossils deposits, mainly from Quaternary, and the ancient inhabitants remains are unquestionable, together with the fact of having ecosystems of great biodeiversity and richness.

ÁREA INSULAR

Cuba

El archipiélago cubano, y con esta denominación se hace referencia al territorio formado por las islas de Cuba, de la Juventud (antigua Isla de Pinos), Romano y más de 1 200 cayos, entre los que se incluyen Coco, Sabinal y otros de considerable extensión, ha sido señalado como un mosaico geológico por su posición en el borde de la plataforma de Bahamas, también del área volcánica del Caribe, así como de la cuenca de Yucatán, la dorsal de las Caimanes y otras estructuras geológicas (Figura 1). Nuestro territorio ha evolucionado como una placa (la microplaca cubana) de la región del Caribe, donde las secuencias rocosas aparecen dislocadas, sobrecorridas e incluso caóticamente mezcladas. No obstante, el predominio de los sedimentos carbonatados es evidente.

Más del 66 % de la superficie de Cuba está formada por rocas clasificadas en mayor o menor grado. Unos 44 000 km² se presentan como carso desnudo o cubierto por delgadas capas de suelos, en montañas, colinas y llanos. Cerca de 18 000 km² se encuentran cubiertos por suelos rojos y pardos, con profundidades mayores en zonas de relieve llano y colinoso, que ocupan el fondo de algunos valles fértiles; y aproximadamente 8 700 km² se hallan enterrados bajo gruesos espesores de suelos de diversos orígenes y características, principalmente en zonas llanas.

Por su configuración Cuba carece de grandes corrientes fluviales. Las aguas subterráneas, sin embargo, constituyen una fuente de abasto de carácter más estable y de potencial apreciable. Se calculan en unas 165 las cuencas subterráneas del territorio cubano, de ellas 151 son cársicas.