

INSTITUTO DE GEOFÍSICA Y ASTRONOMÍA
INSTITUTO DE CIBERNÉTICA MATEMÁTICA Y FÍSICA
ACADEMIA DE CIENCIAS

Reconocimiento de elementos de estructuras espaciales

Magnitudes máximas de los terremotos en la región del Caribe determinadas con el sistema experto GEO

V. GREGOROVICH QUITIS, L. ALVAREZ GOMEZ,
T. CHUY RODRIGUEZ, M. COTILLA RODRIGUEZ

RESUMEN. En el trabajo se exponen los resultados de la aplicación del sistema experto GEO a la solución del problema del pronóstico de magnitudes máximas de terremotos en la zona del Caribe y América Central.

1. INTRODUCCION

El valor de M_{max} en un punto dado de una región define la energía máxima de los terremotos entre todos los focos probables cuyas proyecciones sobre la superficie terrestre contienen a dicho punto.

Los métodos regionales de pronóstico se basan en la hipótesis de que existe una relación entre la M_{max} y los rasgos que describen la intensidad de los procesos tectónicos, las propiedades de resistencia del medio y las dimensiones máximas de las heterogeneidades en la vecindad del punto.

La idea de solución del problema es encontrar esta relación y usarla para obtener los valores estimados de M_{max} en cualquier punto del mapa.

Sin embargo, el problema de encontrar las relaciones entre M_{max} y los rasgos geológico-geofísico es muy complicado. Su solución requiere examinar la influencia de muchos factores, contrastar varios modelos de la sismicidad de la región, crear y analizar numerosos mapas de pronóstico.

Una de las vías más promisorias para resolver problemas de tal tipo se basa en la aplicación de métodos de inteligencia artificial desarrollado en los últimos años en relación con la creación de

sistemas expertos. Se conocen alrededor de 10 sistemas expertos en el campo de las Ciencias de la Tierra, tales como: PROSPECTOR, LITO, HIDRO, DRILLING ADVISOR, etc. [1]. El conocimiento verbal y bien estructurado de los expertos se usa en tales sistemas para hallar la solución. En el caso de la predicción de M_{max} , y en la mayoría de los problemas prácticos de predicción geológica y geofísica regional, el conocimiento de los expertos no es verbal; además, contiene incertidumbre y contradicciones.

GEO [2] es un sistema experto profesional orientado, dirigido a la solución de una amplia gama de problemas de pronóstico geológico y geofísico. El sistema, diseñado para computadoras personales IBM PC/XT/AT/386 y compatibles, acumula la experiencia de 15 años de colaboración entre especialistas en computación, sismología y geología [3,4]; sus partes principales pueden ser usadas para resolver problemas de pronóstico de parámetros y de reconocimiento de elementos de estructura física a partir de un conjunto de rasgos que reflejen indirectamente las particularidades estructurales y los procesos que ocurren en dicha estructura.

El sistema asegura la adquisición del conocimiento de expertos, el establecimiento de regularidades empíricas a partir de los datos y el conocimiento; incluye facilidades de explicación y argumentación, así como procesamiento, análisis y representación gráfica de los campos geológicos y geofísicos mediante el empleo de un procesador científico de mapas avanzado. Para encontrar las regularidades el sistema integra diferentes tipos de datos: catálogo de eventos geofísicos o de objetos geológicos, patrones de estructuras lineales o circulares y el conocimiento de los expertos. Este último está constituido por una concepción de la sismicidad de la región y el conocimiento de los valores de pronóstico en puntos de muestra de la región bajo estudios obtenidos a través de evaluaciones independientes de expertos, que son reflejadas en forma de intervalos de M_{max} con indicación del grado de confiabilidad de sus valores inferior y superior.

En este trabajo se presenta la aplicación del sistema GEO a la estimación de M_{max} para terremotos someros de la región del Caribe - América Central.

2. SISMICIDAD DE LA REGIÓN DEL CARIBE

La región del Caribe es muy compleja desde el punto de vista de la tectónica, la geología y la geomorfología. En ella están presentes zonas continentales, oceánicas y de arco de islas, que reúnen prácticamente todas las características fisiográficas posibles, una gran diversidad de medios geológicos y los tipos fundamentales de estructuras tectónicas. Esta complejidad se refleja en su sismicidad, la cual está distribuida fundamentalmente a lo largo de las fronteras de la placa del Caribe con las placas de América del Norte y del Sur, Cocos y Nazca, aunque está presente también en ciertas zonas de interior de placas como son los casos del territorio insular de Cuba y la parte central del mar Caribe.

Los terremotos someros, con profundidades $h \leq 70$ Km, pueden ocurrir en toda la región, mientras que los de profundidad intermedia ($70 < h \leq 150$ Km) están mayormente asociados con los procesos de subducción en las fronteras Este y Oeste, estando los terremotos profundos ($h > 150$ Km) casi exclusivamente en la zona de subducción de la frontera Oeste bajo la cadena volcánica de América Central. Debe señalarse que en estas fronteras los terremotos no ocurren a lo largo de líneas perfectas, sino abarcando franjas de ancho variable, siendo estas mayores en las zonas donde están presente la subducción. En el sureste de Colombia se localiza, alrededor de los 150 Km de profundidad, una fuente concentrada de focos de terremotos conocida como el "nudo de Bucaramanga". Por otra parte, debe señalarse que en siglos precedentes la región de estudio ha sido afectada por terremotos muy fuertes; información sobre ellos puede ser encontrada en [5,6].

Como la placa del Caribe se mueve hacia el este, son característicos de varias partes de sus fronteras norte y sur los desplazamientos de corrimiento por el rumbo: Motagua-Bartlett en el norte (sinistro) y Bocono-Los Alamos-El Pilar en el sur (diestro). En otras zonas están presentes otros mecanismos de desplazamientos: normal, inverso, de subducción o algunos más complicados. Una descripción general de la sismicidad de la región y del mecanismo focal de los terremotos puede encontrarse en [7].

Por otra parte, esta región ha sido objeto de innumerables trabajos que pretenden explicar diferentes aspectos de su evolución tectónica,

así como la relación de esta con la ocurrencia de los terremotos. Entre ellos se destaca el relativamente reciente trabajo [8], en el cual se realiza un análisis de los procesos neotectónicos presentes en ella.

Partiendo de la hipótesis de que la M_{max} de los terremotos depende de las propiedades físico-matemáticas del medio y de las peculiaridades de la geodinámica reciente, resulta evidente que la determinación de este parámetro en una región tan compleja como la del Caribe reviste un particular interés, máxime que el referido problema ha sido poco estudiado hasta el presente en la misma. No obstante, existen ejemplos de determinaciones por el método del desarrollo histórico-geológico, [9], por métodos sismoestadísticos [10], [11], mediante estimación de potenciales sísmicos [12], así como por reconocimiento de patrones [13,14]. Todos ellos tienen las limitantes de abarcar pequeñas regiones o de no detallar localización dentro de una región amplia.

3. INFORMACIÓN INICIAL

La información sismológica básica la constituye un catálogo de terremotos preparado por la NOAA que abarca el período 1904-Abril 1983, obtenido por cortesía del Centro Mundial de Datos 8-2 de Moscú. Además se dispone de una amplia información macrosísmica histórica de las Antillas Mayores [15].

La información geólogo-geofísica a nivel regional no abunda, por lo que pudieron ser utilizadas sólo dos fuentes: un informe sobre el Mar Caribe y el Golfo de México orientado hacia la prospección de petróleo [16] y un mapa geólogo-tectónico [17]. En estos materiales los mapas aparecen a diversas escalas, desde 1:2 000 000 hasta 1:5 000 000.

Tomando en consideración las escalas de los materiales geológicos, así como el hecho de que las coordenadas epicentrales de los terremotos de la primera mitad del siglo poseen un amplio margen de error se decidió trabajar a la escala de 1:5000 000, subdividiendo la región de estudio en una red regular con paso de 0.4 grados por cada coordenada.

Los rasgos empleados en el proceso de determinación de M_{max} son de tipo sísmológico, geológico, geofísico y estructural.

Los rasgos sísmológicos utilizados fueron 3, cuyos mapas fueron obtenidos a partir del catálogo de la NOAA:

1. Actividad sísmica (referido a la magnitud $M_s = 3,0$ calculada por el método de sumación).
2. Liberación de deformaciones.
3. Densidad de epicentros.

El primero de estos mapas fue obtenido usando sólo los eventos representativos, mientras que para los otros dos se usaron todos los terremotos que aparecían en el catálogo.

Los rasgos geológicos fueron 3:

4. Presencia de vulcanismo cuaternario, tomado del mapa geológico tectónico [17].
5. Profundidad de la discontinuidad de Mohorovicic, tomado del mapa esquemático del relieve de la superficie de Mohorovicic, escala 1:3 000 000 [16].
6. Gradiente de la profundidad de la discontinuidad de Mohorovicic calculado a través de los valores discretos (puntos de la red de $0,40 \times 0,40$) del anterior usando las facilidades del sistema GEO.

Como rasgos geofísicos se utilizaron dos casos:

7. Anomalías de Bouguer, tomado del mapa esquemático de las anomalías de Bouguer ($\rho = 2,67 \text{ g/cm}^3$), escala 1:2 000 000 [16].
8. Gradiente de las anomalías de Bouguer, obtenido a partir de los valores discretos del anterior usando las facilidades del sistema GEO.

El rasgo estructural utilizado fue:

9. Distancia a las estructuras fundamentales (límites de placas, cadenas volcánicas, fallas secundarias importantes, etc.) obtenida a partir de un recuadro del mapa [17].

4. RESULTADOS

Para la solución del problema se preparó una evaluación de experto de 187 puntos distribuidos en toda la región. No obstante, las va-

riables no están distribuidas igualmente, existiendo un grupo grande para las cuales no existen datos de América Central ni de la parte norte de América del Sur. Esto conduce, por características del sistema GEO, a la reducción de la región de estudio a la parte de ella en la cual existe información de todas las variables.

Utilizando la evaluación de experto, se realizó el análisis de las variables, encontrándose que varias de ellas no aportaban información. Además, las variables correspondientes a la anomalía de Bouguer presentan ausencia de información en la isla de La Española, por lo que se decidió eliminarlas.

Finalmente, en la función de predicción entraron a formar parte los rasgos siguientes:

- actividad sísmica,
- liberación de deformaciones,
- gradiente de la profundidad de la discontinuidad de Mohorovicic,
- distancia a elementos estructurales fundamentales.

El mapa obtenido se muestra en la Figura 1. En el mismo los valores de M_{max} aparecen divididos en 5 intervalos con ancho de una unidad M_s , representándose en blanco las zonas para las que no se realizó clasificación. En las Figuras 2a,b se presentan dos detalles ampliados para Cuba-Jamaica y La Española-Puerto Rico. En las Figuras 3a,b se presentan los mismos detalles, pero sólo para los valores de $M_{max} \geq 5,5$, en 5 intervalos de ancho $0,5 M_s$.

En términos generales se observa una buena correspondencia entre los valores pronosticados y la información existente sobre las magnitudes máximas ocurridas en la región, aunque aparecen casos de errores, tanto de falsa alarma como de pérdida de objetivo.

Un caso de falsa alarma se ve en varias regiones al sur de Cuba, donde se pronostican magnitudes en el intervalo (5-5,5), al sur de Pinar del Río, en la Península de Zapata y al sur de la misma, así como al sur de Camagüey, regiones en que nunca se han reportado eventos de tal magnitud y según el cuadro general de la sismicidad de Cuba es muy poco probable que ocurran.

La pérdida de objetivo se puede ver en La Española, donde aparece una zona amarilla con magnitud $M_s \geq 5,5$ y más ancha aún con magnitud en el intervalo (5,5-6,0). En estas zonas están incluidos los epicentros de terremotos históricos muy fuertes [6]. Además, en la parte noroccidental de dicha isla aparece una zona con magnitud en el intervalo (6-7), a pesar de existir información de un terremoto con $M_s > 8$ que fue usada en el proceso de establecimiento de la función de predicción.

Existen dos factores que influyen fundamentalmente en los estimados de magnitud máxima que se obtienen por este método: El primero de ellos es la estimación de experto, en la cual se vierte una carga de subjetividad y el segundo es la calidad de la información inicial usada como valores de las variables.

Con respecto a la primera, realizada para 187 puntos, se incluyeron numerosos de ellos para los cuales no existían reportes de magnitudes máximas iguales o próximas a los valores evaluados. Por otra parte, está presente el problema de la ubicación geográfica de los puntos usados; en nuestro caso en la misma se incluyeron muchos correspondientes a América Central y del Sur, regiones que no aparecen en el mapa obtenido, debido a no existir información de todas las variables utilizadas para las mismas. Esto restó representatividad a la estimación de experto, lo que se refleja en la eliminación de muchos de ellos al establecer la función de predicción en la parte correspondiente al gradiente de la discontinuidad de Mohorovičić, mientras que para las demás variables la función de predicción, al ser calculada usando todos los puntos, está influida por el comportamiento de las mismas en una zona que no fue objeto de análisis.

Con respecto a la calidad de la información utilizada como variables podemos señalar dos fuentes de incertidumbre, el catálogo de terremotos y los mapas geólogo-tectónicos. El catálogo de terremotos usado para obtener las variables sismológicas contiene información desde 1904 hasta 1983. La precisión de las coordenadas de los eventos es buena con posterioridad a 1950, pero con anterioridad a esta fecha no es así, y los errores pueden llegar en casos aislados a unos 100 Km, situación que se puede comprobar comparando las determinaciones para un mismo evento hechas por diferentes

fuentes. Con respecto a los mapas geológicos, tectónicos y geofísicos usuales, estos no corresponden a levantamientos rigurosos del campo representado, lo que es muy difícil de realizar para regiones tan grandes. En la práctica son el resultado de una compilación de diversos trabajos en regiones reducidas que a la hora de empalmar son sometidos a interpolación, extrapolación, suavizamiento, etc.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se obtuvo un mapa de magnitudes máximas para el área del Caribe que en términos generales corresponde al cuadro de la sismicidad conocida de la región, aunque presenta errores de falsa alarma y pérdida de objetivo. No obstante, podemos considerar que constituye una primera aproximación de calidad a este complejo problema.

La información inicial utilizada, tanto sismológica como geólogo-tectónica lleva implícitos elementos de incertidumbre que deben ser eliminados o reducidos para obtener resultados más confiables. Sería de mucha utilidad la inclusión de nuevas variables con información geofísica e información geólogo-tectónica adicional.

El resultado de utilizar el sistema experto GEO muestra que es un instrumento efectivo para componer y analizar mapas pronósticos de M_{max} para regiones de grandes dimensiones y un alto grado de complejidad, como es el caso del área del Caribe. Su utilización sucesiva, mejorando la calidad de la información inicial que se emplea, debe conducir, en el caso aquí analizado, a resultados de mejor calidad.

REFERENCIAS

- [1] Waterman, A.D. (1985). A guide to expert systems. Addison-Wesley Pub. Co.
- [2] Guitis, V.G. Sistema experto GEO (En este volumen).
- [3] Guitis, V.G.; Mironov, M.A.; Buné, V.I.; Kalenik, V.N.; Senukin Yu.K. (1981). M_{max} earthquake prediction map development; methods, software, results. En: Proc. 2nd Int. Symp. on the Analysis of Seismicity and on Seismic Hazard. pp. 437-466.
- [4] Guitis, V.G.; Mironov, M.A.; Buné, V.I.; Kalenik, V.N.; Senukin Yu.K. (1986). M_{max} de los terremotos sobre la base de la aproximación por intervalos de los estimados de experto (en ruso) Fizika Zemli, No.4, pp. 24-31.

- [5] Kelleher, J.; Sykes, L.; Oliver, L. (1973). Possible criteria for predicting earthquake locations and their application to major plate boundaries of the Pacific and the Caribbean. J. Geophys. Res., Vol. 78, No.14, p. 2547-2585.
- [6] Alvarez, L. y Chuy, T. (1985). Isoleismal model for Greater Antilles. En: Proceeding of the International Symposium on the Analysis of Seismicity and on Seismic Risk, Liblice Castle, Czechoslovakia, June 17-22, 1985, pp. 134-141.
- [7] Molnar, P.; Sykes, L.R. (1969). Tectonics of the Caribbean and Middle America from focal mechanism and seismicity Geol. Soc. Amer. Bull., Vol. 80, No.9, pp. 1639-1684.
- [8] Mann, P.; Burke, K. (1984). Neotectonics of the Caribbean Rev. Geophys. and Space Phys., Vol. 22, No.4, pp. 309-362.
- [9] Belousov, T.P.; Krestnikov, V.I.; Shebalin, N.V. (1983). Delimitación de zonas sismogeneradoras en Cuba Central y estimación de su magnitud máxima (en ruso). En: Investigación de la sismicidad de las zonas de baja actividad sísmica (Cuba Central). Moscú, Nauka, pp.81-85.
- [10] Cosentino, P.; Luzio, D. (1977). The seismic statistical parameters in the world wide seismic regions in the hypothesis of a maximum possible magnitude. Pub. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc. A-5(116), 1977, p.211-220.
- [11] González, B.S.; Kogan, L.A.; Mijailova, R.S. (1988). Magnitud del terremoto máximo posible de la región suroriental de Cuba. Movimientos Tectónicos Recientes, No.2, pp. 75-84.
- [12] McCann, W.R.; Sykes, L. (1984). Subduction of aseismic ridges beneath the Caribbean Plate: Implications for the tectonics potential of the Northeastern Caribbean. J.G.R., Vol. 89, No. 86, pp. 4493-4519.
- [13] Grishiani, A.D.; Zelevinskij, A.V.; Keylis-Borok, V.I.; Kosobkov, V.G. (1978). Estudio de las áreas de ocurrencia de terremotos violentos en el Cinturón del Pacífico, con ayuda de algunos datos de reconocimiento (en ruso). Fizika Zemli, 1978, No.9, pp. 31-42.
- [14] Grishiani, A.D.; Zelevinskii, A.V.; Keylis-Borok, V.F.; Kosobkov, V.G. (1980). Diagnóstico de los lugares de surgimiento de los terremotos más fuertes del Cinturón del Pacífico ($M > 8.2$) (en ruso). Vichislitel'naya Seismologiya, No.13, pp. 30-43.
- [15] Chuy, T.; Dzhuhaev, R.U.; Alvarez, L.; Alvarez, H.; Mirzoev, K.M. (1988). Informe técnico de las investigaciones macrosísmicas en el territorio de Cuba Oriental y en la región de emplazamiento de las variantes No.2 y 10 de la CSM de Holguín. Archivo. Datos. Seismología. IGA.
- [16] Levchenko, U.A.; Gurevich, G.S.; Zablina, V.V.; Kitsis, N.A.; Parfionova, S.I.; et.al., (1976). Características comparativas de la construcción geológica de Cuba y otros países de la Cuenca del Mar Caribe y el Golfo de México con el objetivo de evaluar perspectivas de posibilidades petrolíferas y gasíferas de Cuba y las acuatorias adyacentes. Informe. Fondo Geológico Nacional.
- [17] Case, J.E.; Holcombe, T.L. (1980). Geologic-Tectonic map of the Caribbean region. Dept. of Interior, U.S. Geological Survey.

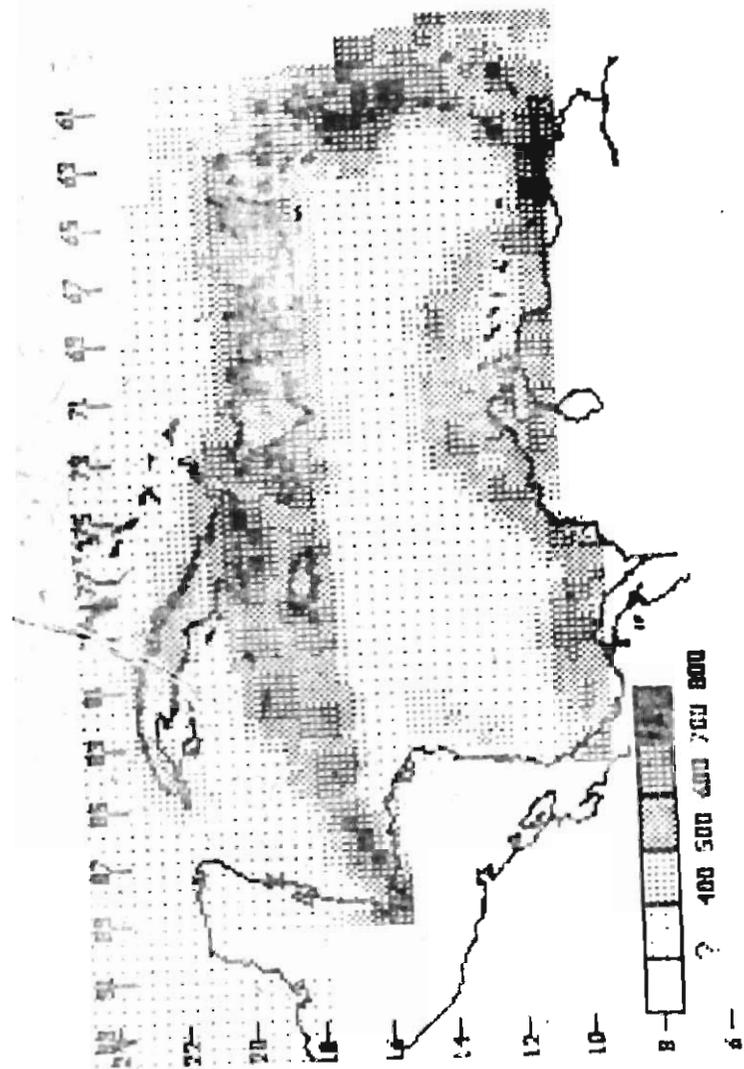


Fig. 1. Mapa de temas para la región estudiada. Los números en la leyenda corresponden a 100 veces el valor de la magnitud máxima.

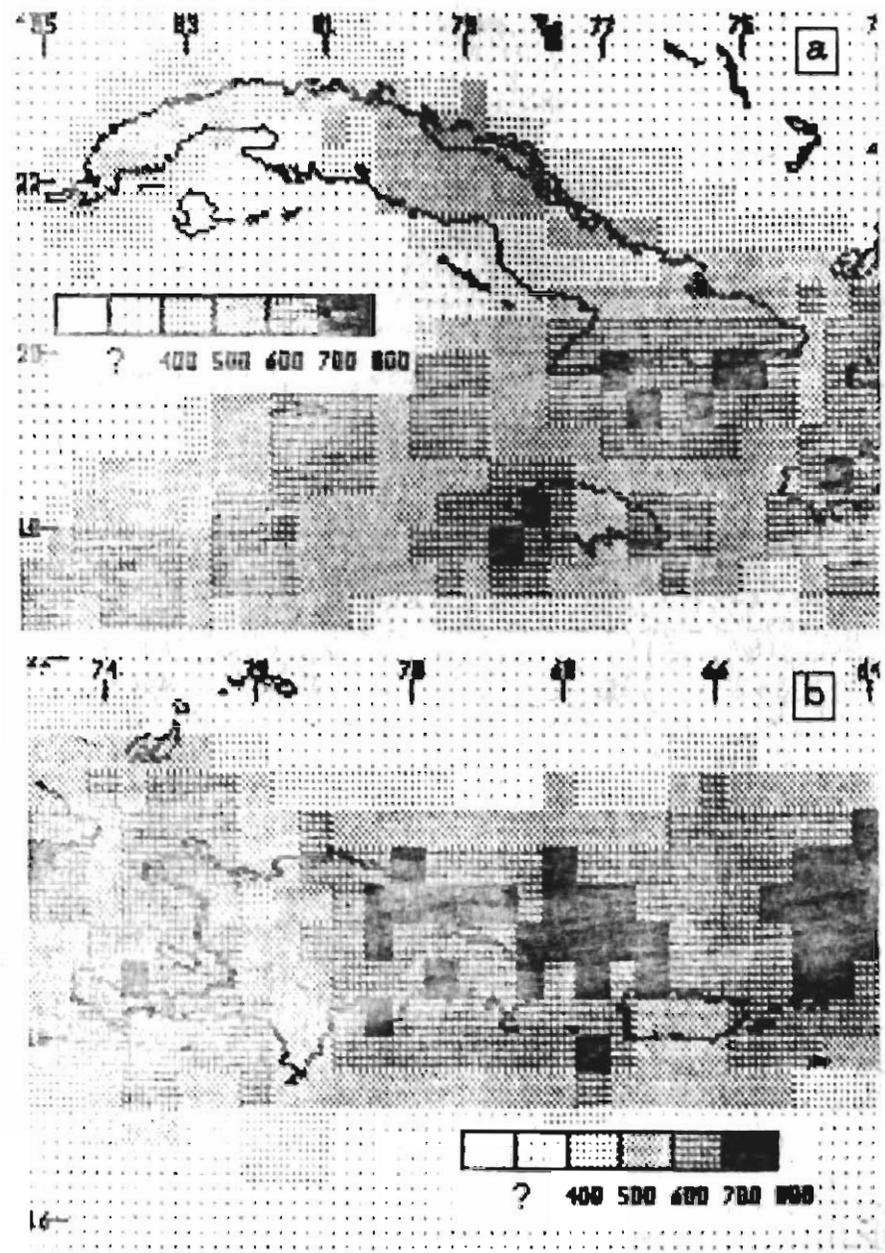


Fig. 2. Detalles ampliados para los sectores Cuba-Jamaica (A) y Española-Puerto Rico (B).

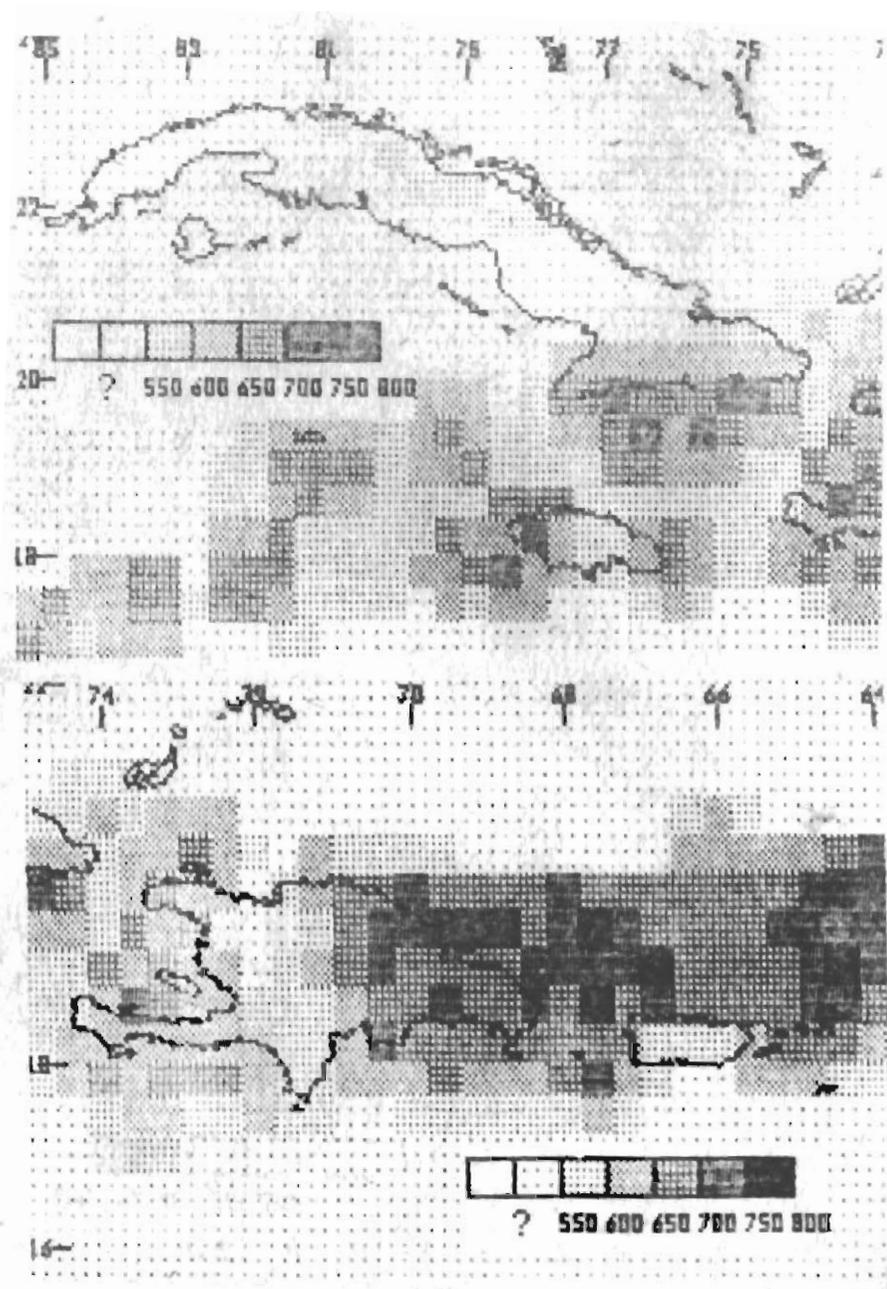


Fig.3. Detalles ampliados para los mismos sectores con cambio de intervalos en la leyenda