

CARTOGRAFIA Y EVALUACION DEL IMPACTO GEOAMBIENTAL A TRAVES DE UN SISTEMA DE INFORMACION GEOGRAFICA

CARTOGRAPHY AND EVALUATION OF GEOENVIRONMENT IMPACT USING A GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM

RAFAEL GUARDADO LACABA

Departamento de Geología del ISMMM.
E-mail: rguardado@moa.minbas.cu

ADOLPHE KEMPENA

República del Congo. Egresado del ISMMM.

ADRIAN MARTINEZ VARGAS

Departamento de Geología del ISMMM.

RESUMEN: El trabajo aborda los procesos y fenómenos naturales y antrópicos que producen peligros y riesgos geoambientales en un sector de la zona costera y urbana de la ciudad de Moa. Se desarrolla un Sistema de Información Geográfica (SIG) que permite cartografiar el medio natural y pone de manifiesto las características geoambientales del territorio, lo que proporciona una imagen global de sus potencialidades, grado de deterioro y vulnerabilidad ante procesos naturales exógenos y endógenos. La implementación del SIG permitió la combinación de diferentes tipos de mapas para determinar el grado de amenaza y riesgo geológico por terremotos, inundación y movimiento de masas, entre otros. Los mapas se confeccionaron tomando como base los indicadores geoambientales de mayor incidencia. Se lograron separar espacialmente las zonas con diferente intensidad de ocurrencia de peligros y riesgos geológicos y ambientales.

Palabras claves: SIG, cartografía geoambiental, ingeniería geológica, riesgo geológico, amenaza geológica, medio ambiente.

ABSTRACT: This work represents a study of the geologic and environmental processes that produce different types of geologic and environmental dangers and risk in a sector of the coastal area of the city of Moa. The authors have developed a system of geographical information (GIS) of the sector that allows the cartography of the natural and human environment. It has been good to show the geologic and environmental characteristics of the territory, providing a global image of their potentialities, degree of deterioration and vulnerability in front of exogenous and endogenous natural processes conditioned by an interactive analysis of the geo-indicators more related with these processes. The implementation of this GIS have allowed to obtain the combination of different types of maps to be able the determination of the degree of geologic menaces for inundation and movement of masses, earthquakes and others. These maps were made taken as bases the most important geo-environmental indicators. It was possible to separate the areas with different intensity of occurrence of the different dangers and geologic and environmental risks.

Key words: GIS, environmental cartography, geology engineering, geological risk, geological hazards, environment.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Moa se ha convertido en una de las zonas más dinámicas de la provincia de Holguín, y ha experimentado un amplio crecimiento de sus áreas urbano-industriales debido al desarrollo minero-metalúrgico. Las acciones antrópicas en esta región producen un marcado deterioro sobre el medio ambiente y los recursos naturales. El impacto al medio ambiente por la intensificación de una serie de procesos naturales, representa una amenaza para la vida humana y una

pérdida de recursos. Muchos son los ejemplos conocidos: la contaminación de costas, ríos y aguas subterráneas, los vertidos urbanos e industriales, la degradación de ecosistemas marinos y continentales, el deterioro paisajístico, etc. Todo ello implica la necesidad de encontrar medidas que faciliten el futuro desarrollo sostenible del territorio. De esta manera, la evaluación de los riesgos y peligros geoambientales representa una herramienta eficiente para la resolución de los problemas del deterioro ambiental, así como para la selección de alternativas viables.

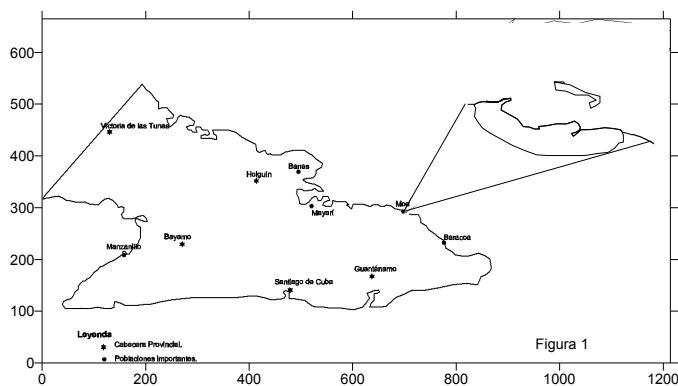


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio.

El trabajo aborda los procesos y fenómenos naturales y antrópicos que producen peligros y riesgos geoambientales en un sector de la zona costera y urbana de la ciudad, con el objetivo de desarrollar un instrumento ingeniero geoambiental que permita tomar decisiones para el ordenamiento y la planificación del territorio, utilizando como base la confección de un conjunto de mapas que reflejen las cualidades o variables más significativas del medio natural en general y geológico en particular, que sea representativo de las condiciones y relaciones del hombre con el medio, a la vez que haga posible la evaluación de la calidad geoambiental de este último, su

potencial y sus limitaciones.

La zona costera moense, comprende una estrecha franja de 20 km de longitud, con numerosos ríos que descienden desde las montañas próximas y algunas playas que se adentran hasta el cabo denominado Punta Cabagán (Fig. 1).

METODOLOGÍA

Con el auxilio de las técnicas de fotointerpretación, teledetección y procesamiento de imágenes de satélite se realizaron mapas preliminares. Los trabajos de campo consistieron en la realización de itinerarios geológicos e ingeniero-geológicos y ambientales en los que se tomaron datos característicos para cada punto de documentación. La etapa de gabinete permitió la confección de un Sistema de Información Geográfica (SIG) y el acomodo de los mapas temáticos para la obtención de los mapas sintéticos (Fig. 2).

Se confeccionaron mapas analíticos, a escala 1:25 000, de los rasgos naturales más significativos del terreno para el planeamiento y ordenamiento del territorio, y se integraron posteriormente en mapas sintéticos a través de una red regular. La metodología se basó en el empleo de imágenes de satélite, modelos digitales del terreno y el sistema de información geográfica, creados para el estudio y zonificación de los peligros y riesgos geoambientales del terreno costero de la ciudad de Moa. El terreno se

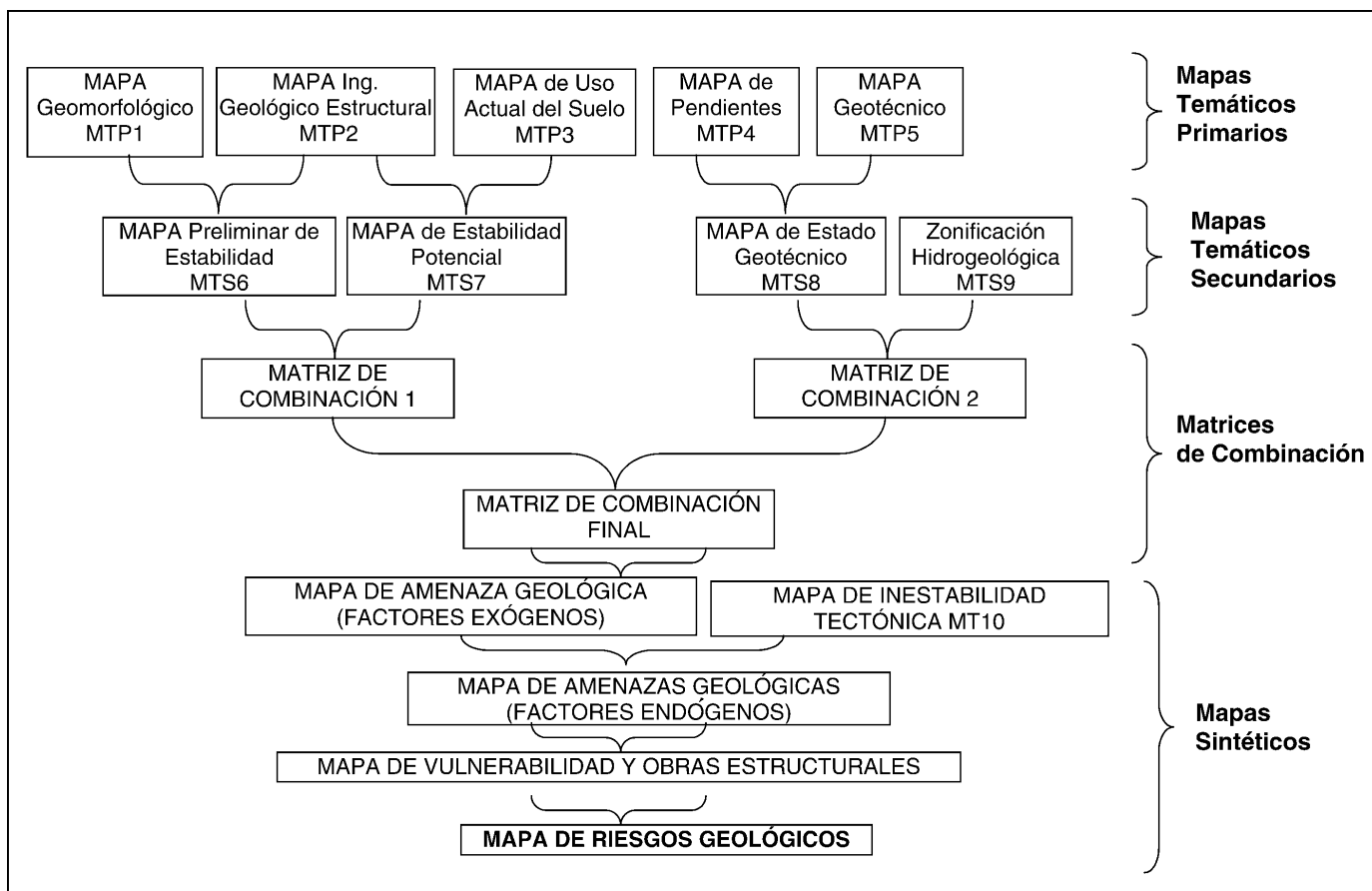


Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología empleada para la confección del SIG.

dividió en Unidades Ingeniero Geoambientales (UIG), definidas sobre la base de divisiones cartográficas interactivas consideradas como unidades homogéneas.

La metodología analítica parte del estudio del medio a través de una cartografía sectorial individualizada por medio de mapas temáticos. Éstos constituyen un inventario que sirve de base para el análisis de la influencia de las condiciones geoambientales del terreno. Aplicando los métodos estadístico-probabilísticos, se analizó el estado de cada mapa integrando la información a partir de su superposición, conforme a una red regular de 25 x 25 m. Con esta base de datos se elaboraron diferentes mapas (temáticos y sintéticos), los cuales se brindan a escala 1:25 000 y mayor.

La metodología sintética se aplicó sobre la base de la interacción precisa de las UIG para la evaluación de la capacidad, estabilidad y estado del terreno. La elaboración de estos mapas comprendió cuatro fases:

1. Utilización de técnicas de procesamiento digital de imágenes con el objetivo de identificar y resaltar las características geológicas, geomorfológicas, e ingeniero-geoambientales del terreno.
2. Uso de diferentes procesos de mapeo digital.
3. Empleo del método de análisis digital para determinar cuantitativamente el peso de las variables geoambientales y para relacionar cada unidad o parámetro del terreno. Este proceso se realizó sobre un sistema de información geográfica.
4. Obtención de los mapas sintéticos, tomando los criterios de riesgos geológicos y geoambientales del sistema costero, y utilizando la recodificación de las imágenes y mapas con base al término de susceptibilidad.

MAPAS TEMÁTICOS PRIMARIOS (MTP)

En la actualidad se han desarrollado muchos métodos de confección de mapas ingeniero - geológicos y ambientales, que se diferencian unos de otros no sólo por su contenido, sino también por su composición, volumen y carácter de los datos empleados en su confección. Es costumbre clasificar los mapas ingeniero-geológicos en varios tipos según su contenido; los autores han empleado la clasificación de mapas temáticos y mapas sintéticos.

Los mapas temáticos primarios recogen la información preliminar caracterizada por las variables geoambientales de mayor peso en el territorio. Estos mapas se obtuvieron mediante trabajos de fotogeología, teledetección, procesamiento de imágenes satélite, la aplicación del Modelo Digital del Relieve (MDR) y trabajos de campo y laboratorio. Ellos responden a una acción programada en sus detalles, con un enfoque eficaz y preciso de los elementos y las condiciones ingeniero-geológicas, así como del entorno costero de Moa.

MTP 1: Mapa geomorfológico

El análisis de las condiciones geomorfológicas del litoral costero de Moa se realizó tomando como base el mapa geomorfológico elaborado por Rodríguez Infante (1999), el cual fue modificado por los autores utilizando el MDR. Como resultado de las irregularidades del terreno, el área

de estudio fue dividida en dos componentes geomorfológicas: terreno llano y terreno alomado. En el MTP1 se representan los diferentes procesos y fenómenos geológicos que tienen lugar en el área de estudio: erosión, acumulación de sedimentos y otros.

MTP 2: Mapa ingeniero geo-estructural

Este mapa representa la información relacionada con la distribución espacial de los diferentes tipos ingeniero-petrológicos de rocas y suelos que se distribuyen en el sector costero, y caracteriza el comportamiento geomecánico y geotécnico del terreno. Para la confección del mismo los autores tomaron como base el mapa geológico del territorio modificado por Blanco, J. (1999) y reacomodado según la clasificación ingeniero-petrológica de Savarenski-Lomtadze (Lomtadze, 1972) y Guardado, R. (1986), en el cual las rocas se subdividen en los grupos siguientes:

- Grupo I: rocas duras.
- Grupo II: rocas semiduras.
- Grupo III: rocas friables no cohesivas.
- Grupo IV: rocas friables cohesivas.
- Grupo V: rocas con características especiales.

El mapa suministra los posibles contactos litológico-estructurales, estratigráficos e ingeniero-petrológicos.

MTP 3: Mapa de uso actual del suelo

El MTP 3 permite obtener el uso actual del suelo en el litoral, la presencia de industrias, tipo de cobertura vegetal, etc. Para su confección se tomó en consideración la imagen satélite Spot con una resolución de 10 x 10 m y su digitalización, y se realizaron comprobaciones y rectificaciones por medio de los datos de trabajos de campo. El área se subdividió de la forma siguiente:

1. Zona urbana - industrial sin vegetación
2. Zona urbana - industrial con vegetación
3. Vegetación nativa
4. Vegetación herbácea
5. Cultivos
6. Sin vegetación
7. Pantanos herbáceos
8. Presa de cola

El mapa de uso actual del suelo ha sido básico en la determinación de la susceptibilidad que presentan taludes y laderas ante fenómenos como la erosión, los movimientos de masa y los eventos sísmicos, así como la susceptibilidad a inundaciones en terrenos planos y bajos.

MTP 4: Mapa de pendientes

Este mapa contiene una red regular de puntos que caracteriza la pendiente real expresada en porcentaje y en grados. Este mapa se confeccionó de forma automatizada a partir del MDR (DEM en la literatura inglesa) con base topográfica 1: 25 000. Para su análisis, desde el punto de vista de estabilidad de taludes, se utilizaron los siguientes rangos críticos de pendiente: bajas, entre

TABLA 1. MATRIZ DE COMBINACION ENTRE EL MAPA GEOMORFOLOGICO Y EL MAPA INGENIERO GEO-ESTRUCTURAL

Mapa geomorfológico	Mapa ingeniero geo-estructural				
	I	II	III	IV	V
Terreno llano	Ze	Ze	Ze	Ze	Ze
Terreno alomado	Ze	Zm	Zi	Zi	Zi

0 y 10 %; medias, entre 10 y 20 %; altas, entre 20 y 30 %; muy altas, mayores que 30 % (Cendero, A., 1989, 1997). Este mapa refleja las características del factor topográfico del terreno, lo que permite conocer las áreas de mayor poder de erosión y abrasión marinas e inundación del terreno.

MTP 5: Mapa geotécnico

El mapa brinda información acerca del comportamiento geotécnico de los materiales, y caracteriza su estado competente ante procesos y fenómenos geológicos potencialmente activos, como son los deslizamientos y las inundaciones entre otros. Fue confeccionado tomando como base la zonificación geotécnica realizada por Guardado y Carmenate (1995) y por Riverón, B. (1996). Los autores subdividen el área en once sectores donde se recoge información de las propiedades físico-mecánicas de los suelos que conforman el área de estudio. Para la confección del MTP 5 se tomaron los indicadores geotécnicos siguientes: γ , densidad natural de la roca; W, humedad; S, saturación; C, cohesión; ϕ , ángulo de fricción interna, y SG, objeto areal al que se le asignaron estos valores en el SIG (Tabla 3).

MAPAS TEMÁTICOS SECUNDARIOS (MTS)

Los mapas temáticos secundarios o de segundo orden son confeccionados a partir de la combinación adecuada de los mapas temáticos primarios. En éstos se reflejan las áreas de mayor probabilidad de ocurrencia de los fenómenos geológicos de interés (deslizamientos, inundaciones, sismos) y constituyen un eslabón fundamental para alcanzar la comprensión geológico-ambiental del territorio estudiado.

MTS 6: Mapa de estabilidad preliminar

Su elaboración parte de la combinación del mapa geomorfológico (MTP 1) y el mapa ingeniero geo-estructural (MTP 2). El mapa de estabilidad preliminar muestra las unidades litológicas que presentan los principales procesos morfodinámicos, y da una idea clara del compor-

TABLA 2. MATRIZ DE COMBINACION ENTRE EL MAPA DE USO ACTUAL DEL SUELO Y EL MAPA DE PENDIENTES

Mapa de pendientes (%)	Mapa de uso actual del suelo							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0-10	Bu	Bu	Vn	Vi	Va	Vi	Vi	Mu
10-20	Bu	Bu	Vn	Vi	Va	Vi	Vi	Mu
20-30	Mu	Mu	Vn	Vi	Vi	Vi	Vi	Mu
>30	Mu	Mu	Vn	Vi	Vi	Vi	Vi	Mu

TABLA 3. CLASIFICACION INGENIERO-GEOLOGICA DE LOS SUELOS COSTEROS DE LA CIUDAD DE MOA

Clasificación	γ	W	S	C	ϕ	SG
Suelos later ticos gruesos (arenas gravosas mezcladas con arcillas limosas, densidad baja y saturados)	34,4	51,4	99,4	7,35	18	I-a
Suelos later ticos gruesos (arenas gravosas mezcladas con arcillas limosas, densidad baja y saturados)	36,8	22,4	92,6	3,1	20,5	I-b / I-c / I-d
Suelo later tico fino con (arena muy fina, mezclada con arcilla limosa, densidad baja y saturados, consistencia solida)	3,88	30,7	88	6	27	I-e
Suelos later ticos gruesos (arenas finas mezcladas con arcillas, densidad muy baja y saturados)	36,2	42,5	92,8	20	4,6	II-a
Suelos later ticos gruesos (arena mezclada con arcilla plastica, densidad baja y saturados)	35,9	45,7	91,1	16	3,9	II-b
Suelos later ticos finos (arcillas limosas de densidad alta, saturados, consistencia solida)	32,7	18,1	81	28	2	II-c / III-a / III-c
Cieno de color oscuro de consistencia fluida plastica, densidad muy baja)	26,9	71,1	77	9	3	III-b

tamiento dinámico ante los agentes externos. En la zona del litoral costero, al sur del ISMM y en la zona de Rolo Monterrey, existen zonas inestables (Zi) y zonas estables (Ze) desde el punto de vista de los deslizamientos de taludes y de la erosión. Estos valores o rangos de estabilidad se describen en la Tabla 1.

MTS 7: Mapa de estabilidad potencial

Es el resultado de la combinación de los mapas de uso actual de suelo (MTP 3) y el de pendientes (MTP 4). Considera el tipo de vegetación y el uso del terreno, lo que da una idea general de la susceptibilidad de este último ante los agentes erosivos, los deslizamientos y las inundaciones provocadas por su uso inadecuado, como consecuencia de la existencia de pendientes excesivas o por la existencia de obras industriales con peligrosidad potencial para el medio ambiente ante la ocurrencia de algunos de los fenómenos antes mencionados. Tal es el caso de la presa de cola. En este mapa se expresan las zonas siguientes:

- Vegetación inapropiada (Vi)
 - Vegetación apropiada (Va)
 - Vegetación nativa (Vn)
 - Urbanización e industrias mal ubicadas (Um)
 - Urbanización e industrias bien ubicadas (Ub)
- En el área se destacan las condiciones siguientes:
1. Vegetación inapropiada en taludes abruptos que no garantiza la estabilidad de éstos por anclaje natural de las raíces o en zonas pantanosas donde su presencia impide el drenaje y la eliminación de agua por transpiración.

2. Urbanización e industrias mal ubicadas en zonas con taludes muy abruptos (ej. Parte alta de Rolo Monterrey y la Pesquera) o en aquellas que representan un peligro potencial para el ecosistema marino en caso de ocurrencia de alguno de los procesos geológicos estudiados. Nos referimos específicamente a la presa de cola, donde se aprecia un avance gradual hacia la costa que influye como factor cambiante del hábitat costero y donde la ocurrencia de alguna catástrofe que provoque un derrame de cola al medio traería consigo la aparición de cambios irreversibles en el medio marino.

MTS 8: Mapa de estado geotécnico

Utilizando los valores de los indicadores geotécnicos (Guardado Lacaba, R., 1999) del MTP 5 y del MTP 4, se calcularon los factores de seguridad en cada punto de la red y se determinó la estabilidad de taludes en la zona litoral de acuerdo con la geometría del talud, el tipo de suelo y las condiciones ingeniero-geológicas existentes, lo que constituye una novedad en este trabajo. Estos cálculos se realizaron de forma automatizada, nodo a nodo del mapa topográfico y/o de pendiente. Según los valores del factor de seguridad (Fs), la zona litoral costera se subdivide en:

- Zonas susceptibles (Zs) $F_s < 1$
- Zonas medianamente susceptibles (Zms) $1 < F_s < 1,5$
- Zonas de baja susceptibilidad (Zb) $F_s > 1,5$

Este mapa permite realizar una mejor evaluación, de forma espacial, de la estabilidad del terreno. Durante los trabajos de campo se pudo comprobar la existencia de las zonas críticas reflejadas en este mapa, por ejemplo: en la parte más alta del reparto Rolo Monterrey aparecen zonas de deslizamientos de tierra, y en el Combinado Pesquero los procesos erosivos han formado una enorme cárcava con paredes muy escarpadas, afectadas por deslizamientos de tierra.

MTS 9: Mapa de zonificación hidrogeológica de los depósitos superficiales

La confección de este mapa parte de la zonificación ingeniero-geológica de Riverón (Riverón, B., 1996) y de Guardado (Guardado L., R., 1999). Tomando en consideración el grado de saturación y la descripción de cada una de las subzonas, se distinguen:

- Depósitos saturados (ds).
- Depósitos sobresaturados (dss).
- Depósitos no saturados o insaturados (di).

Este mapa sirve en la determinación del grado de estabilidad de depósitos cuaternarios y su potencialidad al generar flujos de detritos, y es de mucha utilidad en el pronóstico de las amenazas por inundaciones.

MTS 10: Mapa de inestabilidad tectónica

Para la confección de este mapa (Fig. 3) se hizo la interpretación compleja de las estructuras tectónicas disyuntivas que afectan el área de estudio; para ello se confeccionó una capa raster, utilizando un área de in-

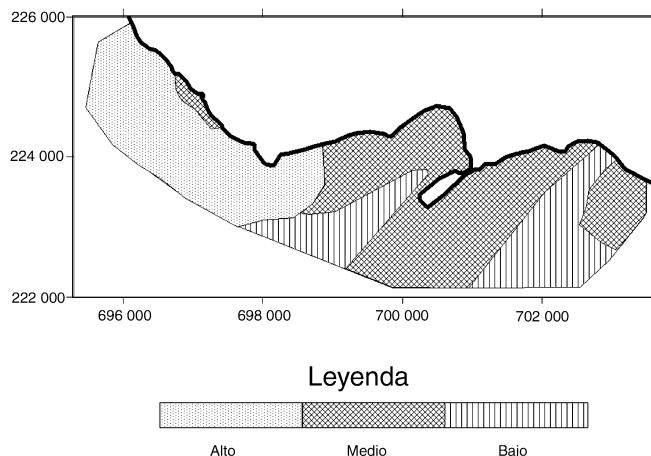


Figura 3. Mapa de inestabilidad tectónica.

fluencia (buffer) de 500 m a cada lado de las fallas. Se emplearon tres categorías:

- Alta: donde se cortan más de dos fallas, incluyendo el área de influencia de las mismas.
- Media: donde corta sólo una falla, incluyendo área de influencia.
- Baja: donde no corta ninguna falla ni su área de influencia.

Las estructuras tectónicas empleadas en el análisis de inestabilidad se extrajeron del mapa geológico de Moa modificado por Jorge Blanco (1999), a escala 1:50 000. Se pudo comprobar durante los trabajos de levantamiento que la mayoría de estas fallas son activas. En el análisis tectónico aparece como zona más afectada la parte occidental de la zona estudiada, que abarca toda el área poblada de Moa con excepción del reparto Rolo Monterrey.

MTS 11. Mapa de vulnerabilidad de las obras estructurales

Representa el grado de vulnerabilidad del terreno ante los fenómenos y procesos geológicos, y toma en consideración la competencia que muestran los diferentes tipos de obras civiles construidas en la ciudad atendiendo al tipo de estructura. En ellas se destacan las siguientes categorías de acuerdo con la escala MSK-1964 (Lomtadze, 1984):

- A: obra de estructura de madera (casa de un piso).
- B: obra de estructura de ladrillo y/o bloque, edificaciones mono y biplantas.
- C: obra de estructura de panel, edificaciones de hormigón de 4 y 5 plantas.

La ciudad de Moa, en su parte litoral, posee un asentamiento poblacional de más de 15 000 habitantes. De ellos, el 30 % se ubica en edificaciones de tipo A, el 55 % en edificaciones del tipo B, y 15 % del tipo C, con predominio de las obras del tipo A, AB y B.

Desde el punto de vista de la competencia de las obras ante los fenómenos sísmicos las estructuras más críticas son las de tipo A, las cuales alcanzan mayor desarrollo en la parte norte central del área de estudio, constituida por los barrios Las Coloradas (vieja) y La Pla-

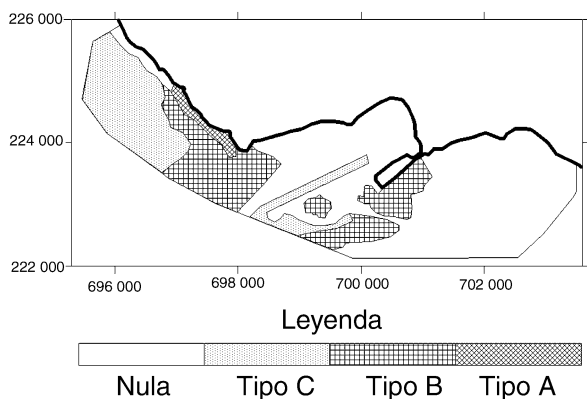


Figura 4. Mapa de vulnerabilidad de las obras estructurales.

ya. Estas obras reflejan una ubicación desfavorable desde el punto de vista de la vulnerabilidad sísmica del terreno, ya que las mismas coinciden con el área más afectada por la actividad tectónica (Fig. 4).

MAPAS SINTÉTICOS (MS)

Los mapas sintéticos contienen la evaluación sumaria de los factores naturales que determinan las condiciones ingeniero-geológicas y ambientales del territorio de estudio. Se obtienen al combinar los mapas temáticos primarios y secundarios, conjugando las causales y condicionantes que provocan los diversos tipos de amenaza geológica. Para su confección se emplearon matrices de combinación.

Mapa de peligrosidad por erosión y deslizamiento

Este mapa está basado en los mapas de estabilidad potencial y de estabilidad preliminar (Fig. 5 y Tabla 4). Según la combinación de los mapas y la matriz expuesta, los sectores de mayor peligrosidad son: la presa de cola de la fábrica Ernesto Guevara, la zona del Combinado Pesquero, el sector norte del reparto Rolo Monterrey y parte del sector Miraflores-Universidad.

Mapa de peligrosidad por deslizamiento e inundación

Resulta de la interacción del mapa geotécnico y el mapa de zonificación hidrogeológica de los depósitos superficiales. Se aprecian claramente las zonas de mayor inundación del sector costero, sobresaliendo la zona del puerto y las presas de cola, los repartos La Playa y Joselillo, y partes del sector de Las Coloradas (vieja), donde se alcanzan valores altos de inundación (Fig. 6).

TABLA 4. MATRIZ QUE DA LUGAR AL MAPA DE PELIGROSIDAD POR EROSION Y DESLIZAMIENTO

Mapa de estabilidad preliminar	Mapa de estabilidad potencial				
	Vi	Va	Vn	Um	Ub
Ze	1	0	0	3	0
Zm	2	1	1	3	2
Zi	3	2	2	4	3

Ze: zona estable; Zm: zona medianamente estable; Zi: Zona inestable

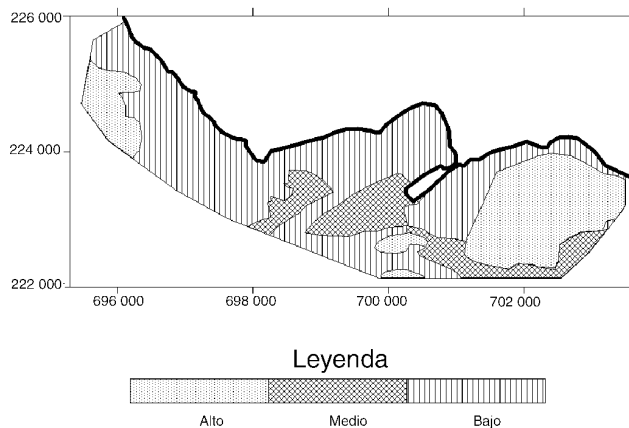


Figura 5. Mapa de peligrosidad por erosión y deslizamiento.

Mapa de amenaza por movimientos de masa e inundaciones

Como resultado de la combinación del MTS 6 y el MTS 7, y tomando en consideración un sistema de categoría de peligrosidad en el cual: 0: Peligrosidad mínima, 1: Peligrosidad baja, 2: Peligrosidad media, 3: Peligrosidad alta, 4: Peligrosidad muy alta, se obtuvo una matriz. De la combinación del MTP 8 y MTP 9, y empleando el mismo sis-

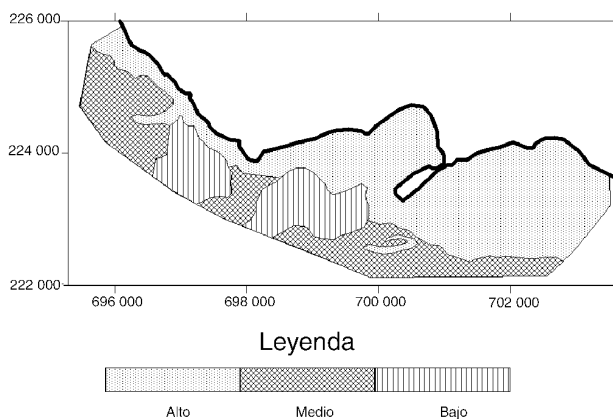


Figura 6. Mapa de peligrosidad por deslizamiento e inundación.

tema de categoría de peligrosidad anterior, se elaboró otra matriz que es el reflejo de los procesos geológicos exógenos que afectan el área de estudio (Figs. 7 y 8). El grado de amenaza se subdividió en tres categorías:

- Aa: Amenaza alta.
- Am: Amenaza media.
- Ab: Amenaza baja.

TABLA 5. MATRIZ QUE DA LUGAR AL MAPA DE PELIGROSIDAD POR DESLIZAMIENTO E INUNDACION

Mapa de zonificación hidrogeológica	Mapa de estado geotecnico		
	Zs	Zms	Zb
di	4	3	2
ds	4	1	0

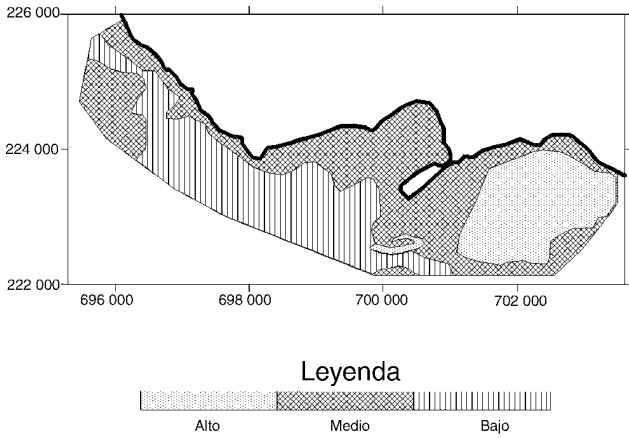


Figura 7. Mapa de amenaza por movimiento de masa e inundaciones.

Este mapa refleja de forma sintetizada la influencia de las diferentes variables geoambientales recogidas en los mapas temáticos. Según el mapa, las zonas de peligrosidad alta y muy alta coinciden con la parte sur del ISMM, Rolo Monterrey y la presa de cola.

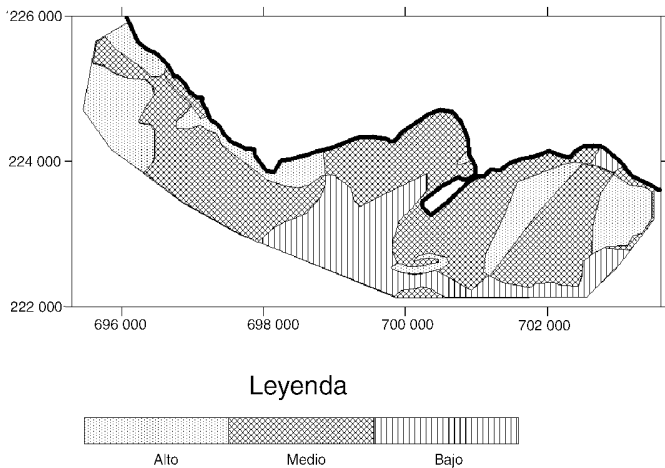


Figura 8. Mapa de amenaza geológica.

Las zonas de alta peligrosidad por deslizamientos han sido corroboradas durante los trabajos de campo. Se destacan como críticas las zonas del Combinado Pesquero, los taludes del sector portuario del reparto Rolo Monterrey y la zona costera, donde existen importantes afectaciones por inundaciones debido al exceso de humedad en

TABLA 6. MATRIZ QUE DA LUGAR AL MAPA DE AMENAZAS POR MOVIMIENTO DE MASAS E INUNDACIONES

Matriz 2	Matriz 1				
	0	1	2	3	4
0	Ab	Ab	Ab	Am	Am
1	Ab	Ab	Am	Am	Am
2	Ab	Am	Am	Aa	Aa
3	Am	Am	Am	Aa	Aa
4	Am	Am	Aa	Aa	Aa

el suelo. Las partes más afectadas por los movimientos de tierra en el reparto Rolo Monterrey y la presa de cola de la fábrica Ernesto Guevara están enmarcadas dentro de este grupo. La zona de peligrosidad media corresponde a las zonas afectadas por las inundaciones.

Mapa de amenazas geológicas

Representa el grado y el tipo de amenaza, tomando en consideración la combinación de los procesos geológicos endógenos y exógenos. Es el resultado del análisis complejo entre el mapa de amenazas geológicas por inundaciones y movimientos de masas y el mapa de inestabilidad tectónica (Fig. 8). Al igual que en el anterior, se distinguen tres categorías de amenazas geológicas (baja, media y alta), pero en este caso se da un mayor peso a la inestabilidad tectónica por su influencia en la ocurrencia de los fenómenos geológicos estudiados.

Mapa de riesgos geológicos

Es el resultado final del SIG elaborado, y resulta de la combinación del mapa de amenazas geológicas y el grado de vulnerabilidad de las obras ingenieriles existentes en el área de estudio, obtenido a partir de las características de las estructuras civiles, la importancia de las obras y los bienes sujetos a la amenaza. Hemos tomado los conceptos de riesgos dados por Ayala (1990). El mapa de riesgos, subdividido en tres rangos de valores fundamentales: riesgo alto (Ra), riesgo medio (Rm) y riesgo bajo (Rb), refleja las áreas con probabilidad de ser afectadas y causar daños o pérdidas materiales o de vidas humanas (Fig. 9).

Las áreas de mayor riesgo coinciden con aquellas donde las estructuras son desfavorables o poco competentes y las amenazas geológicas son altas, éstas son:

1. Parte alta de Rolo Monterrey.
2. Repartos Las Coloradas (vieja) y La Playa.
3. Reparto Checo.
4. Parte suroccidental del reparto Miraflores.

El sector de amenaza baja o mínima coincide con las zonas despobladas donde no existe desarrollo urbano-industrial, a pesar de que en algunas de estas zonas se pueden localizar áreas de amenaza geológica alta. Este mapa permite un mejor ordenamiento de territorio y un mejor uso del suelo.

ANÁLISIS DEL RESULTADO

El concepto y la utilización de un SIG en el estudio de los peligros y riesgos costeros resulta una herramienta indispensable, pues permite el almacenamiento estructurado

TABLA 7. MATRIZ QUE DA LUGAR AL MAPA DE AMENAZA GEOLOGICA

Mapa de inestabilidad tectónica	Mapa de amenaza por movimientos de masa e inundaciones		
	Ab	Am	Aa
Ab	Ab	Ab	Am
Am	Am	Am	Aa
Aa	Am	Aa	Aa

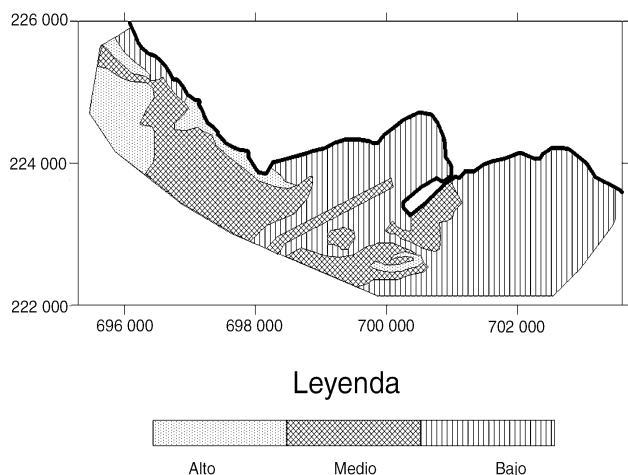


Figura 9. Mapa de riesgos geológicos del sector costero de Moa.

de la información cartográfica y el análisis espacial en la determinación de la estabilidad y vulnerabilidad del terreno de acuerdo con los distintos indicadores geoambientales considerados en el análisis de evaluación ingeniero-geoambiental.

En la costa de Moa, los procesos de abrasión y sedimentación son el resultado de la acción del mar, las olas y las corrientes fluviales. Este proceso de erosión costera se hace más fuerte durante las tormentas, los huracanes y los frentes fríos, por lo que la pérdida de terreno representa un serio problema para el desarrollo urbano. La erosión y sedimentación marinas tienden a modelar el paisaje de la costa. En el litoral de Moa estos procesos se ven disminuidos por la amplia barrera coralina que se extiende a lo largo de la costa. El agua tiene un papel aún más importante en lo que se refiere al transporte de material erosionado. Las laderas suaves sufren erosión laminar y acarreamiento.

La forma del paisaje costero del territorio de Moa cambia continuamente en la medida que las olas y las mareas invaden tierra firme y el limo de los ríos gana terreno al mar. De igual modo que los arroyos y ríos ahondan sus cauces, las cárcavas se convierten en barrancos. Ejemplo de ello se puede apreciar en la zona de la empresa pesquera de Moa y en los ríos Moa, Yagrumaje, y otros.

El cordón litoral costero de Moa aparece representado por un depósito de arena y grava dispuesto a modo de barrera paralela a la línea de la costa, de la que está separado por una laguna y sobresalen por encima de la marea alta Cayo Moa, Cayo Burro, y otros.

TABLA 8. MATRIZ DE COMBINACION QUE DA ORIGEN AL MAPA DE RIESGOS GEOLOGICOS

Mapa vulnerabilidad de las obras estructurales	Mapa de amenazas geológicas		
	Ab	Am	Aa
A	Rm	Ra	Ra
B	Rm	Rm	Ra
C	Rm	Rm	Ra
Nula	Rb	Rb	Rb

Tomando en consideración las condiciones ingeniero-geológicas y el impacto del hombre sobre el medio, se procedió a establecer la cartografía de la zona de la costa de Moa lo que permitió establecer:

- Las áreas de mayor vulnerabilidad y riesgos geológicos y ambientales.
- La importancia del método empleado para el análisis y la cartografía.

El método empleado en la cartografía ingeniero-geoambiental del terreno con la aplicación de técnicas de SIG permitió, en primer lugar, hacer un uso adecuado de las imágenes obtenidas. Otro elemento importante es el modelaje numérico o digital del terreno, el cual constituye un producto indispensable en estos estudios, así como la necesidad de combinar diferentes sistemas cartográficos georreferenciados. En la caracterización y cartografía del mapa temático de ocupación y uso de suelo, la interpretación de imágenes satelitales mostró su mayor utilidad cartográfica.

Por último, se debe señalar que la metodología ha sido desarrollada con diez elementos básicos en el análisis del terreno, entre los que se destacan los parámetros geológicos, tectónicos, geomorfológicos, geotécnicos, ingeniero-geológicos, estructurales, de uso del suelo, etc. Sin embargo, existen otros factores no contemplados, como el sísmológico y meteorológico, que pueden desempeñar un gran papel dentro del análisis evaluativo del nivel de riesgo y peligrosidad del terreno. La determinación y peso de estos factores permiten una evaluación más compleja y precisa del terreno desde el punto de vista de su estabilidad. El desarrollo del SIG ofrece mayores capacidades si se amplía hacia el resto del territorio de la ciudad y de sus áreas exteriores, como son las minas y áreas de bosques del municipio.

CONCLUSIONES

- La aplicación de un método basado en un sistema de información geográfica (SIG), el cual permite cuantificar el nivel de peligrosidad y riesgo del terreno costero de la ciudad de Moa, es el principal resultado de este trabajo, pues brinda información básica para realizar la evaluación geoambiental, el diseño de planes y manejo de zonas inestables, y el ordenamiento del territorio costero en el plan de gestión municipal de los geo-recursos.
- El método y la metodología empleados permiten obtener un sistema de unidades cartográficas geoambientales que facilitan la obtención, en breve tiempo y a menor costo, de evaluaciones confiables de la estabilidad del terreno, en particular del sector costero de Moa. La determinación y peso de estos factores permiten una evaluación más compleja y precisa del terreno desde el punto de vista de su estabilidad. El desarrollo del SIG ofrece mejores capacidades en su ampliación hacia el resto del territorio de la ciudad y de sus áreas exteriores, como son las minas y áreas de bosques del municipio de Moa.
- Ha quedado demostrado que el método numérico del terreno es una herramienta de gran capacidad carto-

gráfica en estudios de ingeniería geológica y ambiental, pues permite determinar los riesgos y prevenir desastres naturales y antrópicos. La cartografía de unidades morfodinámicas resultó apropiada en la cartografía geoambiental, ya que la delimitación de los contornos de las unidades se realiza a través de las condiciones ingeniero-geológicas

- La cartografía de los factores de seguridad en cada punto de la red, determinando la estabilidad de taludes en la zona litoral, constituye una novedad para este tipo de trabajo. Estos cálculos se realizaron de forma automatizada, nodo a nodo del mapa topográfico y/o de pendiente, según los valores del factor de seguridad (Fs) de la zona litoral costera. Este mapa permite realizar una mejor evaluación de la estabilidad del terreno de forma espacial. Durante los trabajos de campo se pudo comprobar la existencia de las zonas críticas, por ejemplo: Rolo Monterrey, donde en su parte más alta aparecen zonas de deslizamientos de tierra, y el Combinado Pesquero donde los procesos erosivos han formado una enorme cárcava con paredes muy escarpadas afectadas por deslizamientos de tierra. Se logra por primera vez la cartografía de los factores de seguridad de los taludes y laderas, enmarcados en el área cartografiada.
- Se logró obtener el mapa de riesgo geológico mediante la combinación de los mapas de vulnerabilidad de las obras ingenieriles, inestabilidad tectónica y amenaza geológica, lo que constituye una herramienta muy valiosa en la cartografía de evaluación del impacto medioambiental de los terrenos a escalas intermedias y detalladas, debido a la precisión de sus contornos y el elevado grado de homogeneidad interna. Las áreas de mayor riesgo coinciden con aquellas donde las estructuras son desfavorables o poco competentes y las amenazas geológicas son altas, éstas son: parte alta de Rolo Monterrey, repartos Las Coloradas (vieja), La Playa y Checo, así como la parte suroccidental del reparto Miraflores. El sector de amenaza baja o mínima coincide con las zonas despobladas donde no existe desarrollo urbano-industrial, a pesar de que pueden existir pequeños focos de amenaza geológica alta dentro de este sector.

BIBLIOGRAFÍA

- ALBERRUCHE DEL CAMPO, E.: "Cabecera del río Sor. Caracterización de su medio físico", *Boletín Geológico y Minero*, 103 (4), julio-agosto, 1992.
- ANGULO RODOLFO Y PAULO CESAR FONSECA GIANINI: "Variación das características sedimentológicas a través de una sucessão de cordões litoraneos na ilha do mel, Estado do Parana", *Boletín Paranaense de Geociencias* 44 (2): 77 - 79, 1996.
- : "Variación del nivel relativo do mar nos ultimos dois mil anos na regio sul do Brasil": uma discussao. *Boletín Paranaense de Geociencias*, 44 (2):67 - 69, 1996.
- CALLABA DE ROA, A.: "Niveles seguros de contaminantes en suelos a partir de consideraciones de riesgos", *Boletín Geológico y Minero*, 110 (1): 35-37, 1998
- AYALA, F. J.: "Análisis de los conceptos fundamentales de riesgos y aplicación a la definición de tipos de mapas de riesgos geológicos", *Boletín Geológico y Minero*, 101 (3):108 -124, 1990.
- : "Los peligros naturales en las evaluaciones de impacto ambiental en obras civiles", *Boletín Geológico y Minero*, 101 (6):145- 167, 1990.
- : "Notas sobre la evolución histórica del conocimiento, estrategias y técnicas de mitigación de las inundaciones y movimientos de ladera en España", *Boletín Geológico y Minero*, 109 (1):69-71, 1998.
- BLANCO, JORGE: "Profundización en el estudio geomorfológico y tectónico de Moa", Tesis de Maestría, Departamento de Geología, ISMM, Moa, 1999.
- CENDERO, ANTONIO: "La interpretación de la problemática ambiental: enfoques básicos", *Riesgos naturales e impacto ambiental, Col. Medio Ambiente y Educación Ambiental*, 8 (3): 23 -84, Madrid, 1997.
- : "Mapping and evaluation of coastal areas for planning", *Ocean & Shoreline Management*, 12 (2):427-462, 1989.
- DAVIS, R. A. JR.: "Morphodynamics of the West- Central Florida barrier system: the delicate balance between wave and tide denomination", *Geology and Geotechnology, Proceedings of the Symposium Loeland organized by The Royal Geological and Mining Society of the Netherlands (KNGMG) Hague*, 23 - 27 May, 1998.
- DUQUE, ÁNGEL, GEMA ECHAVERRÍA, ANTONIO CENDERO Y JOSÉ RAMÓN DÍAZ DE TERÁN: "A methodological approach for the development of predictive models for hazard assessment", Soldati & M. M. Coltellacci (eds.), *European Experimental Course on Applied Geomorfology*, vol. 2- Proceedings, Instituto di Geologia, Università degli Studi di Modena, 13- 5, 1991.
- GRETCHEN G., MOISEN, THOMAS EDWARD, JR. AND RICHARD CUTLER: *Environmental information management and analysis: ecosystem to global scales*, Taylor & Francis Inc., USA, 1990.
- GUARDADO LACABA, R.: "Consideraciones para la evaluación de las condiciones geoambientales de la ciudad de Moa", *Minería y Geología*, 14 (3):11 -17, 1997.
- : "Evaluación de los peligros y riesgos geológicos", *Curso Posgrado Internacional*, 478 pp., Universidad de San Juan, Argentina, 1999.
- : *Ingeniería petrológica. Ingeniería geológica*, 2. ed., 349 pp., Ed. Pueblo y Educación, La Habana, 1986.
- GUARDADO LACABA, R. Y JOSÉ CARMENATE FERNÁNDEZ: "Evaluación ingeniero-geológica de las áreas con peligro y riesgo geológicos", *Minería y Geología*, 12 (1):45-48, 1995.
- HEPNER, GEORGE F. AND MARK V. FINCO: "Modeling dense gaseous contaminant pathways over complex terrain using a geographic information system", *Journal Hazardous Material*, 42: 187-199, 1995.
- LOMTADZE, V. D.: *Ingeniería Geología. Ingeniería Petrología*, 390 pp., Niedra, Leningrado, 1972 (en ruso).
- : *Ingeniería Geología. Ingeniería Geodinámica*, 495 pp., Niedra, Leningrado, 1984 (en ruso).
- LUCAS, JANSSEN AND MARTIEN MOLENAAR: "Terrain objects, their dynamics and their monitoring by the integration of gis and remote sensing". *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 33 (3):749-758, 1995.
- LUCAS, JANSSEN, MARIJKE N. JAARMSMA AND ERIK T. M. VAN DER LINDEN: "Integrating Topographic Data with Remote Sensing for Land-Cover Classification", *Photogrammetric engineering & remote sensing*, 56 (11):1503-1506, 1990.
- OLOUFA, A. A., A. I. EL-KADI, A.A. ELTHAN AND H. U. MALIK: "An analytical groundwater modeling approach for natural resources utilizing GIS", *Civil Eng. Syst.*, 12: 49-65, 1995.
- RAY, C. F. et al.: "The use of GIS in a major water utility company", *Proc. Instn Civ. Engng, Geographic Information System*: 23-29, 1996.
- RICHARD, DARLEN, M. MALES AND PETER SUSHISKY: "Integrated GIS and Hydrologic Modeling for countrywide Drainage Study", *Journal Resources Planning and Management*, 119 (2): 112-128, 1993.
- RIVERÓN, BEATRIZ: "Estudio de la respuesta dinámica de los suelos de Moa", Tesis de Maestría, Departamento de Geología, ISMM, Moa, 1996.
- RODRÍGUEZ INFANTE, ALINA: "Estudio morfo-tectónico de Moa y áreas adyacentes para la evaluación de riesgos de génesis tectónica", Tesis de Doctorado, ISMM, Moa, 1999.
- SALAZAR, G. J. P.: "Propuesta metodológica en los estudios geológicos ambientales", *Ingeniería Geológica*, año 1, no 1: 20-25, 1995.