

Cambios en la geomorfología y el medio ambiente litoral asociados al dragado de los fondos marinos en Moa, Cuba

Yosbanis Cervantes-Guerra
Alina Rodríguez-Infante
Allan Pierra-Conde
Yuri Almaguer-Carmenate
Hans-Jürgen Gursky

Resumen

La presente investigación analiza las modificaciones geomorfológicas y medioambientales que origina el dragado de cieno carbonatado en la bahía de Cayo Moa. Se compararon datos batimétricos de diferentes fechas (1972, 2001 y 2010) y se analizaron los elementos Fe, Ca, K, Al y Si en muestras de sedimentos. En el análisis de la dinámica de los sedimentos se aplicó el método de *Ratio Matching* (concordancia de proporciones) para determinar la orientación predominante de los flujos y su posible nexos con las transformaciones del fondo. Se pudo constatar que el dragado transforma el medio de sedimentación en su geometría, carga sedimentaria disponible y en la energía que interviene en el proceso de sedimentación. Desde el punto de vista ecológico, el dragado en la bahía de Cayo Moa ha contribuido al deterioro de las formas de vida, impactando el medio marino a través del incremento de sólidos en suspensión y disueltos, cambios en la morfología del fondo, aumento de la dinámica erosiva y sedimentaria y la pérdida de la estructura natural y la biodiversidad florística en las zonas afectadas por la extracción.

Palabras clave: dragado de fondos marinos; cieno carbonatado; bahía de Cayo Moa; geomorfología litoral; procesos geodinámicos; sedimentación.

Changes in the geomorphology and littoral environment associated to dredged of seabed in Moa, Cuba

Abstract

Geomorphological and environmental modifications that originate the dredging of carbonated mud in Cayo Moa bay were analyzed. Bathymetric data of different dates (1972, 2001 and 2010) were compared to evaluate the geomorphological changes in the bottom of the bay; also were determined elements as Fe, Ca, K, Al and Si in sediment samples. The Ratio Matching method was applied to determine the predominant orientation of the flows and their possible nexus with the background transformations. It was verified that dredging transforms the sedimentation medium into its geometry, the available sedimentary load and the energy involved in the sedimentation process. From the ecological point of view, dredging in the Cayo Moa bay of has contributed to the deterioration of life forms, impacting the marine environment through the increase of suspended and dissolved solids, changes in the morphology of the bottom, erosive and sedimentary dynamics and the loss of natural structure and floristic biodiversity in areas affected by extraction.

Keywords: dredging; seabed; carbonated mud; Cayo-Moa bay; coastal geomorphology; geodynamic processes; sedimentation.

1. INTRODUCCIÓN

La extracción de minerales en los fondos marinos difiere de la que se realiza en la superficie terrestre en que debe llevarse a cabo bajo el agua y ser controlada a distancia desde una plataforma flotante en la superficie. Según la Autoridad Internacional de los Fondos Marinos (*International Seabed Authority- ISA 2007*), existen diferentes métodos básicos de explotación minera o extracción de depósitos minerales marinos, desde recogerlos de la superficie a través del dragado del fondo; excavarlos haciendo un agujero; a través de túneles para llegar a un depósito que esté por debajo de la superficie o perforar hasta llegar al depósito y licuarlo (Figura 1).

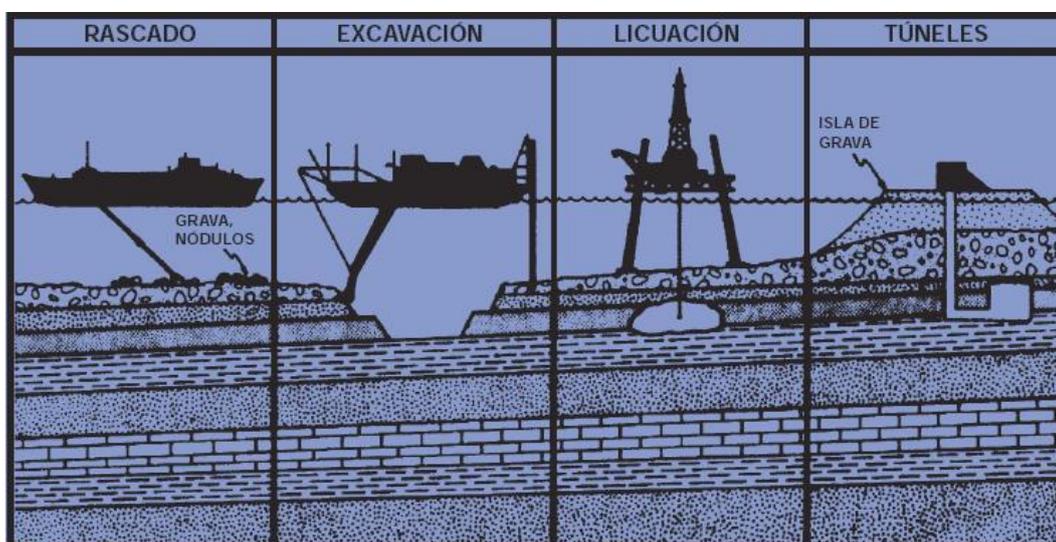


Figura 1. Cuatro métodos básicos de minería marina (Tomado de ISA 2007).

En la bahía de Cayo Moa el cieno carbonatado del fondo marino es extraído a través de una plataforma especializada en dicha tarea, conocida como draga. Las dragas son utilizadas con diferentes fines: crear artificialmente mayores profundidades en un área determinada como puertos o canales de navegación en zonas de difícil acceso, enterramiento de tuberías submarinas, extracción de minerales, así como en la protección y conservación de playas.

El dragado involucra cuatro procesos principales, desde la extracción de los materiales del fondo del mar, su traslado a la superficie, la deposición del material y el transporte. Esta última puede realizarse mediante una embarcación o a través de conductos.

El transporte del material del fondo del mar a la superficie del agua se realiza a través de dragas mecánicas o dragas de succión; existen otros tipos de dragas diseñadas para misiones específicas.

Además de los beneficios económicos que se obtienen por la actividad de dragado, existen efectos negativos asociados a la extracción de los sedimentos.

Al respecto, Morales (1999) plantea que los efectos ambientales del uso de dragas en la extracción de minerales del fondo marino son los siguientes:

- Alteración de la geomorfología del fondo.
- Perturbación y destrucción de los organismos bentónicos. Mezcla y resuspensión de los sedimentos en la trayectoria de la draga.
- Reasentamiento del sedimento removido y posibles peligros para los animales bentónicos.
- Alteración de la composición química del agua de fondo (las aguas de fondo pueden retener en solución compuestos lixiviados del sedimento obtenidos del agua intersticial).
- Incremento de la cantidad de elementos nutritivos disueltos en la capa de agua superficial (para los sistemas de extracción con inyección de aire).
- Disminución de la penetración lumínica por la pluma de turbidez.

Igualmente, en la guía de protección ambiental publicada por el Centro de Ciencias Ecológicas (CES 1999) se expresa que, desde el punto de vista medioambiental, el impacto más grave del dragado es la alteración del suelo marino causada por la extracción.

En consecuencia con lo antes comentado, en esta investigación se analiza el tipo de dragado que se practica en la bahía de Cayo Moa y su implicación en los procesos geodinámicos presentes en este medio ambiente litoral.

1.1. Dragado de los fondos marinos en la bahía de Cayo Moa

La bahía de Cayo Moa tiene una extensión de 30,6 km y 6 km de ancho (Oficina Nacional de Estadística e Información 2014). El sector objeto de estudio ocupa aproximadamente 5 km de largo y comprende la porción costera desde Punta Cabagán hasta las proximidades del puerto, también incluye las costas de cayo Moa Grande (Figura 2).

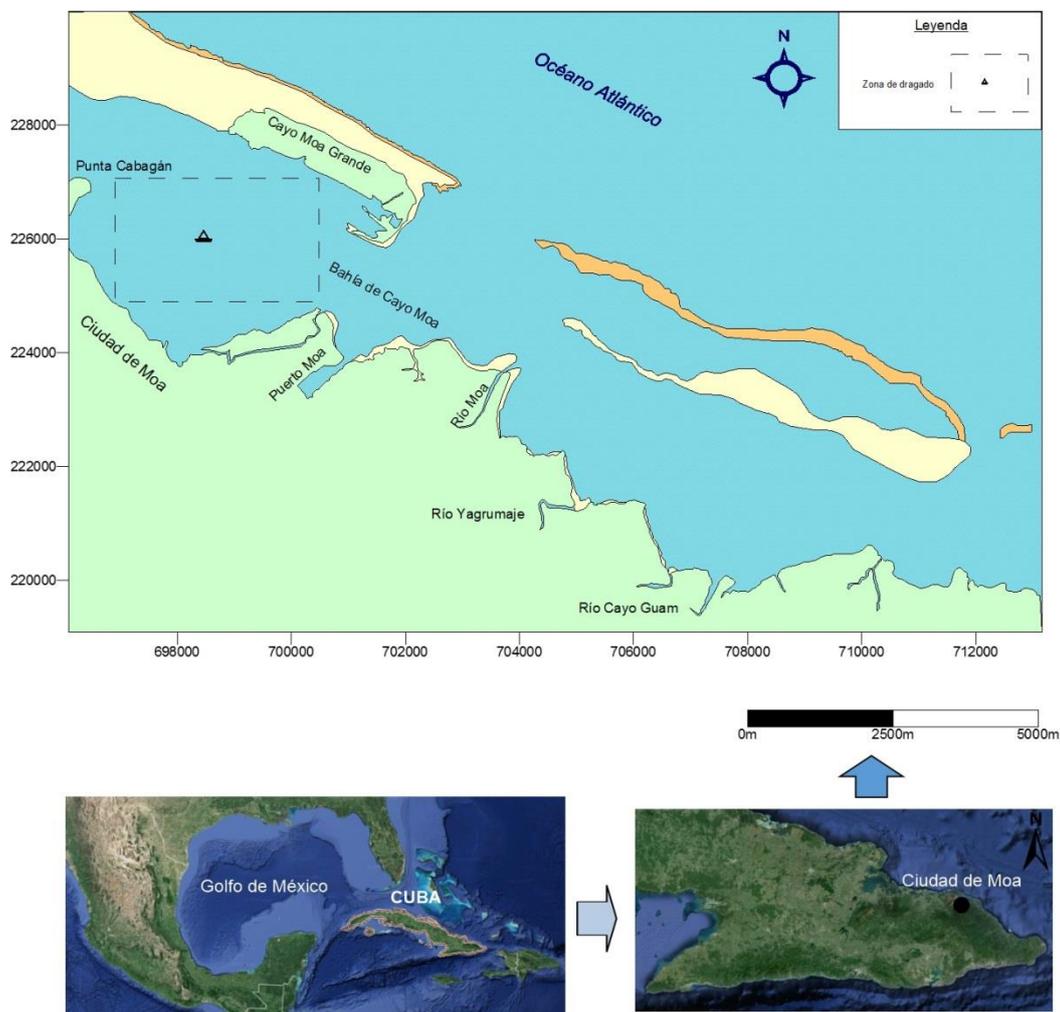


Figura 2. Ubicación geográfica de la bahía de Cayo Moa (Imagen tomada de Google Earth 2013).

La Figura 2 en su parte superior muestra la zona entre la costa de Moa y Cayo Moa Grande donde se draga el fondo marino. Diariamente se extraen más de 1 200 t de cienos carbonatados para ser utilizados en la neutralización de residuales ácidos que se producen durante el beneficio de minerales para la producción de níquel y cobalto (Cueto, Rondón & Fuentes 2003).

El dragado de los fondos marinos en la bahía de Cayo Moa afecta directamente el litoral de este municipio, donde predominan los sedimentos clásticos friables de carácter biodetrítico y terrígeno del período Cuaternario. La columna sedimentaria está representada por cuatro horizontes: desde arena calcárea en la parte más baja, sobreyacida sucesivamente por cieno carbonatado arenoso, cieno carbonatado limoso y cieno terrígeno en la parte alta (Menéndez 2001; Azcuy *et al.* 2001).

El origen de estos sedimentos está asociado a la barrera arrecifal que bordea todo el sector costero y al aporte de sedimentos de las principales corrientes fluviales del entorno que descargan en la laguna costera, donde el régimen de corrientes está regido por el efecto de la marea, observándose un movimiento predominante de dirección oeste durante el período llenante y hacia el este durante el vaciante, aunque este último con menor intensidad (Menéndez 2001). Esto implica que gran parte de los sedimentos arrastrados por los ríos y la escorrentía lleguen a la bahía y se depositen en el entorno costero (Cervantes *et al.* 2011).

El dragado de los fondos marinos en la bahía de Cayo Moa se realiza a través de una draga mecánica (de cubo), constituida por una excavadora con una cuchara de 2,5 m³ ubicada sobre una patana (Figura 3).

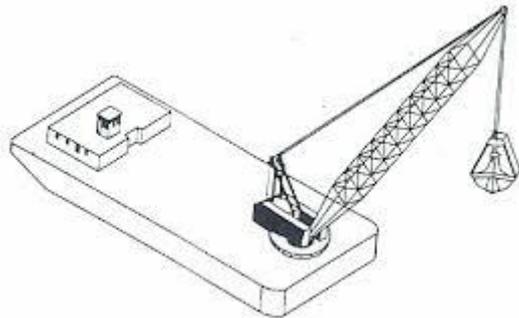


Figura 3. Excavadora con cuchara de quijada bivalva.

Antes de realizar las labores para la extracción mineral, la draga se ubica espacialmente en el sector que va a ser explotado. La localización del sitio a explotar se realiza mediante un Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés), lo cual garantiza la precisión necesaria para la ubicación de boyas que delimitan los bloques de extracción.

Posteriormente se realiza el posicionamiento de la plataforma, la que es anclada al fondo mediante un sistema que le permite permanecer fija en un sector para la ejecución de la actividad planificada. La extracción se realiza tomando en consideración las corrientes marinas, así como los cambios de marea y la ubicación de la patana de carga, la cual es acoplada a la plataforma de extracción por un lateral de la misma (Menéndez 2001).

Los sedimentos extraídos se trasladan hacia la planta de beneficio ubicada en el puerto. El transporte de la patana de carga se realiza con remolcadores.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para valorar los cambios geomorfológicos en el fondo de la bahía se generaron, compararon e interpretaron bases de datos batimétricos de

diferentes fechas. La línea base para la comparación asumida fue la información batimétrica contenida en el mapa topográfico de 1972; se identificaron las transformaciones mediante la comparación con dos bases de datos similares realizadas en los años 2001 y 2010. En todos los casos los valores de profundidad fueron corregidos por la tabla de marea y métodos de calibración.

La modelación de los datos se obtuvo mediante la utilización de un Sistema de Información Geográfico (SIG), lo que permitió representar gráficamente los cambios morfológicos de los fondos marinos. Con el uso del SIG se densificó la red de puntos y, a partir de ella, se obtuvo el mapa tridimensional de las isobatas. Para su mejor comprensión se modelaron, a través de los perfiles batimétricos I-I' y II-II', los que se cortan ortogonalmente, como se muestra en la Figura 4.

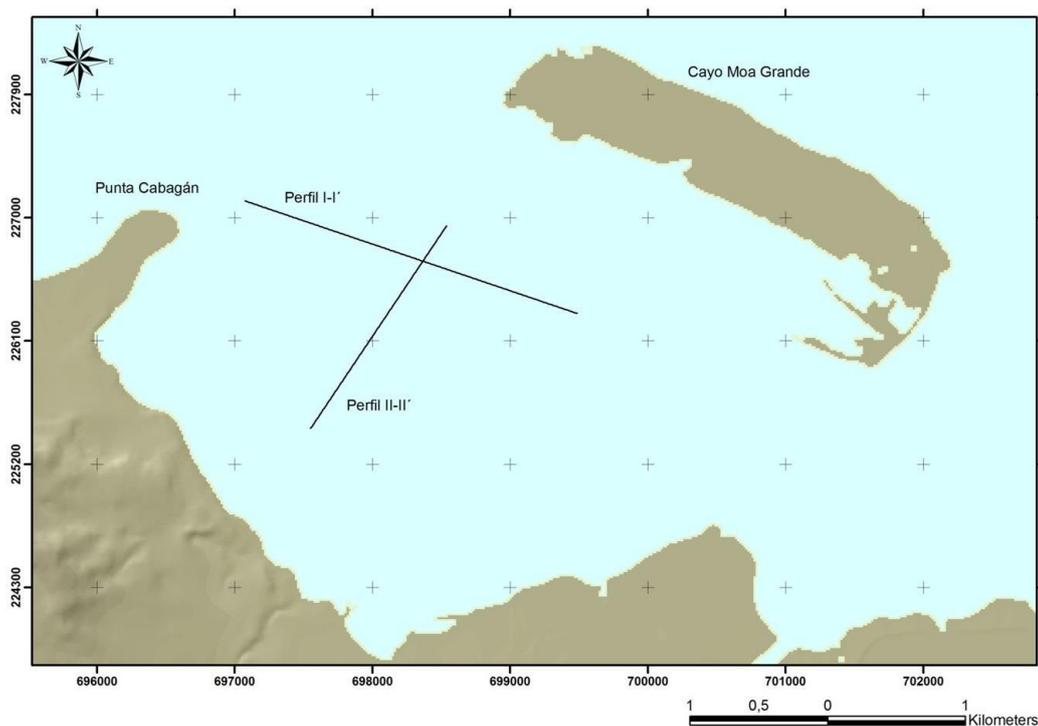


Figura 4. Ubicación de los perfiles batimétricos utilizados para valorar los cambios geomorfológicos en el fondo de la laguna.

El procesamiento de la información se realizó mediante el software ArcGIS 10.0., mientras que para la determinación de la orientación predominante de los flujos de sedimentos en el interior de la laguna y su posible nexa con las transformaciones en los fondos marinos y en la costa sur de cayo Moa Grande fue aplicado el método de *Ratio Matching*, el cual ha sido utilizado por Mizumura y otros investigadores (1995) en el estudio del movimiento de arenas. El método permite obtener, mediante la espectrometría de fluorescencia de rayos X (FRX), los valores en kiloconteos

por segundo (kcps) en la muestra, los cuales corresponden a las relaciones entre los elementos geoquímicos.

Al emplear la relación entre los valores de kcps obtenidos, si el número de correlación es alto o igual a uno, dos muestras de arena están constituidas por los mismos elementos geoquímicos y la fuente geológica de la arena es la misma (Mizumura *et al.* 1995).

Las direcciones del movimiento de la arena pueden ser estimadas por comparación de las magnitudes de kcps (Mizumura *et al.* 1995). Las direcciones coinciden con los gradientes de los valores de kcps de cada elemento.

En la investigación se estudiaron cinco elementos geoquímicos dentro de los sedimentos superficiales, estos fueron: Fe, Ca, K, Al y Si. Para su identificación se colectaron 12 muestras de sedimentos superficiales dentro del área (Figura 5) y fueron colocadas en bolsas plásticas con capacidad para dos kilogramos de cienos.

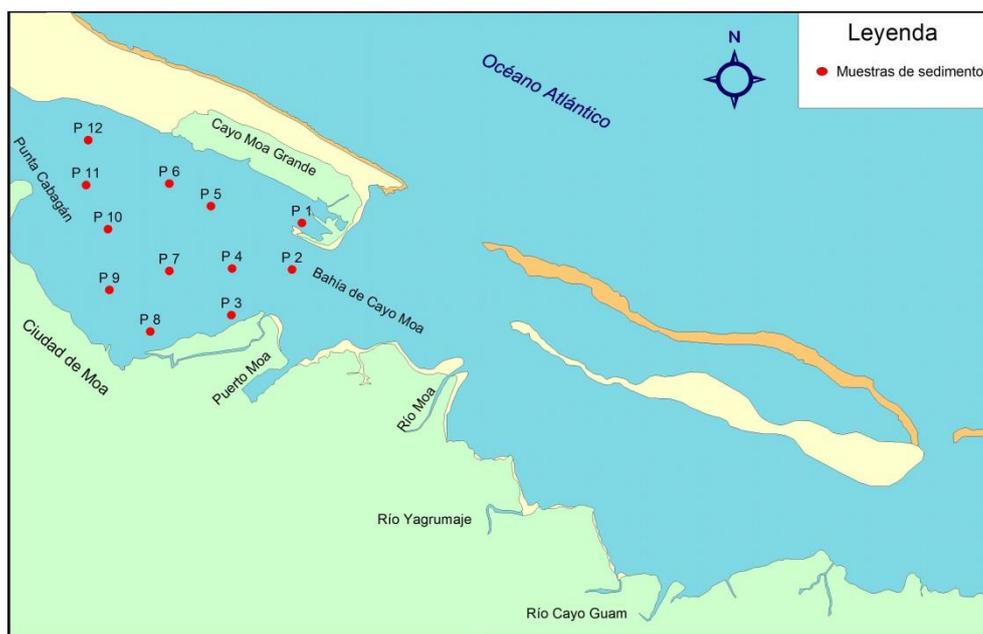


Figura 5. Puntos para el monitoreo de sedimentos.

Las muestras colectadas fueron secadas en una estufa durante 48 horas. El cieno seco fue reducido a un polvo fino ($63 \mu\text{m}$), posteriormente prensado para hacer briquetas cilíndricas de cinco centímetros de diámetro y tres milímetros de espesor. El análisis por FRX se efectuó en los laboratorios del Centro de Investigaciones del Níquel (CEDINIQ).

El procesamiento de la información se realizó mediante la aplicación de la herramienta informática *Arena_Move.*, creada por el departamento de Ingeniería Informática de la Universidad de Holguín, con el fin de estudiar el

movimiento de las arenas de la playa de cayo Moa Grande durante el monitoreo ambiental realizado por CESIGMA en el año 2001.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los fondos marinos al sur del cayo muestran grandes transformaciones morfológicas debido al constante dragado de la laguna litoral y el canal artificial que da acceso al puerto. La empresa minera encargada del dragado de los cienos carbonatados extrae diariamente un aproximado de 1 200 t de sedimentos, lo que provoca grandes afectaciones al medio sedimentario marino.

Como resultado de la comparación entre datos batimétricos de los años 1972, 2001 y 2010, el modelo que representa los cambios en el fondo marino del perfil I-I' (SO-NE) muestra la dinámica de los sedimentos en el período estudiado (Figura 6).

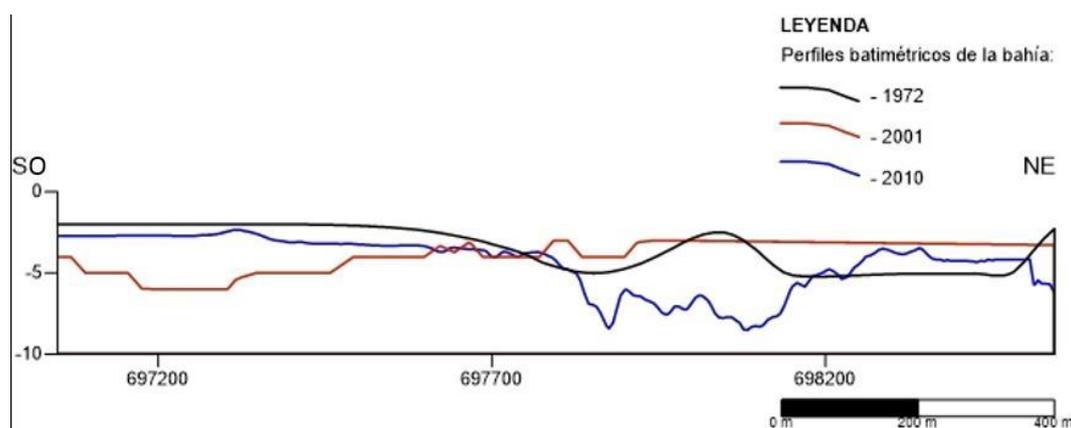


Figura 6. Modelo gráfico que muestra el perfil batimétrico I-I'.

En el año 1972 los fondos se caracterizan por ser relativamente llanos con gradiente uniforme, rasgo geomorfológico típico del medio ambiente lagunar.

En el 2001 ya se observan cambios considerables en toda la longitud del perfil, lo cual tiene justificación por el dragado de sedimentos en la porción SO y la acumulación o deposición de una capa de 2,3 m de sedimentos en el extremo NE del sector.

Los datos del año 2010 muestran que se hace notable la deposición de sedimentos desde la porción central del perfil hasta el extremo SO y de forma opuesta se manifiesta la porción central-nororiental, con pérdidas de hasta 5,3 m de sedimento y una irregularidad significativa en la morfología del fondo.

Los cambios que se aprecian en el período evaluado muestran una alta capacidad de respuesta del medio de sedimentación ante la actividad

extractiva, lo cual queda demostrado al observarse cómo se acumula sedimento en las oquedades ocasionadas por el dragado en el período 2001–2010.

El modelo que representa los cambios en el fondo marino del perfil II-II' (SE-NO) muestra similitud con la morfología del fondo marino en los años 1972 y 2010; sin embargo, en el 2001 ocurren considerables transformaciones en todo el perfil, motivadas por la pérdida de hasta seis metros de sedimentos en la porción central y la irregularidad significativa del fondo en todo el perfil (Figura 7).

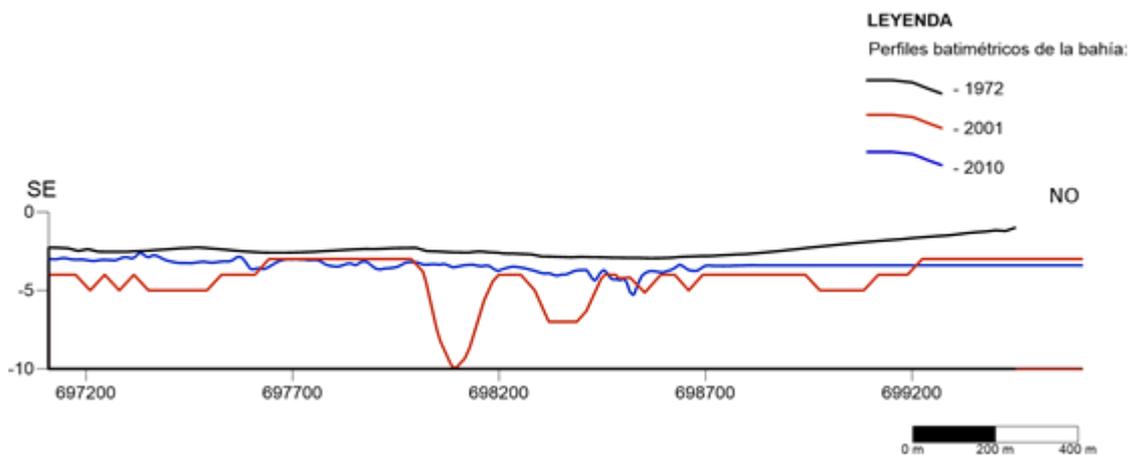


Figura 7. Modelo gráfico que muestra el perfil batimétrico II-II'.

La diferencia que expresa el modelo entre los años 1972 y el 2001 y la irregularidad en la morfología del fondo demuestra que el área estudiada fue dragada en una etapa próxima al 2001 y, a la vez, la capacidad del medio de sedimentación, capaz de rellenar en nueve años las depresiones existentes en el fondo.

3.1. Aplicación del método Ratio Matching

Mediante el análisis de fluorescencia rayos X se obtuvo el valor de kcps (Tabla 1) en las muestras de sedimentos.

Tabla 1. Resultados del análisis de FRX en sedimentos superficiales en la bahía de Cayo Moa

Código	Fe (kcps)	Ca (kcps)	K (kcps)	Al (kcps)	Si (kcps)
P1	5,1009	9,0985	0,1646	3,1304	3,6056
P2	10,4080	2,7910	0,1244	3,7229	1,3755
P3	22,0413	0,7313	0,1169	8,6906	2,8362
P4	9,3709	3,7430	0,1671	5,6983	2,0979

P5	9,5615	7,3463	0,1182	4,3664	2,8812
P6	3,5452	23,1135	0,1245	2,0678	3,8045
P7	8,3893	9,0285	0,1538	4,1877	3,9272
P8	15,0401	2,1803	0,1293	9,2857	2,8008
P10	11,5826	1,9225	0,1748	6,3378	3,6044
P11	10,8688	2,8675	0,1758	5,4669	3,8591
P12	11,3196	2,5870	0,1640	5,5115	3,3084
P13	1,2266	31,0698	0,1004	1,2721	1,8174

Con el fin de determinar la dirección del transporte de los sedimentos en el interior de la laguna se realizó un análisis de relación entre las muestras con la aplicación informática *Arena_Move*. Como resultado se obtuvo la matriz de correlación que se expone en la Tabla 2.

Tabla 2. Matriz de correlación entre las muestras

	P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8	P 9	P 10	P 11	P 12
P1	1											
P2	0,1	1										
P3	0,1	0,3	1									
P4	0,2	0,8	0,1	1								
P5	0,4	0,4	0,2	0,5	1							
P6	0,4	0	0,2	0,1	0,2	1						
P7	0,7	0,3	0,2	0,4	0,9	0,2	1					
P8	0,2	0,4	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	1				
P9	0,2	0,2	0,2	0,4	0,6	0,2	0,4	0,5	1			
P10	0,2	0,6	0,2	0,5	0,6	0,2	0,6	0,4	0,8	1		
P11	0,2	0,5	0,2	0,6	0,6	0,1	0,4	0,4	0,9	1	1	
P 12	0,2	0	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	1

Al analizar la tabla se percibe una correlación alta entre las estaciones P5 y P7, P9, P10, P11; es decir, una dirección predominante del noreste hacia el suroeste de la laguna. De igual forma, se muestra una estrecha relación entre las estaciones E-13, E-14 y E-15, así como entre E-4, E-7 y E-14.

Las relaciones entre las muestras evidencian que la dirección predominante de los sedimentos superficiales en la laguna es en sentido noreste-suroeste, lo que coincide con la dirección de las corrientes marinas, el oleaje

predominante en este sector costero y las zonas afectadas por el dragado (Figura 8).

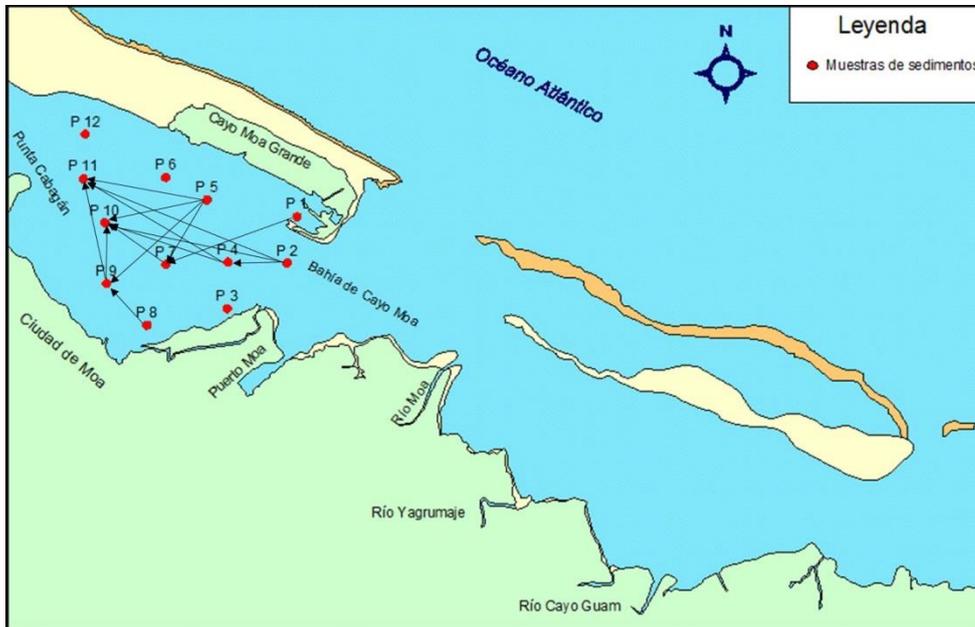


Figura 8. Dirección del movimiento en los sedimentos superficiales en la laguna.

También se valida el hecho de que los sedimentos superficiales migran desde la periferia de las áreas afectadas por el dragado hacia las depresiones que quedan en el fondo.

Otro fenómeno con el cual se relaciona el transporte de sedimentos es el acelerado proceso erosivo al este del cayo (Cervantes *et al.* 2009), el cual se puede interpretar según la relación entre P1 y P7, así como la de P2 con P4, P10 y P11.

Conjuntamente con las afectaciones geodinámicas y variaciones continuas de la topografía del fondo, el proceso de dragado genera impactos ecológicos, afectando a los organismos que habitan los fondos y el medio marino circundante. Entre las principales causas que perjudican a los seres vivos del entorno marino de la laguna se encuentran:

- El incremento de sólidos en suspensión y disueltos, producto de la remoción de los sedimentos del fondo y el lavado del equipo de extracción en su ascenso por la columna de agua, lo cual es proporcional al aumento de la turbidez en la zona de extracción y áreas aledañas durante las operaciones de dragado.
- Los cambios en la morfología del fondo marino, debido a la extracción de los cienos carbonatados.

- El aumento de la dinámica erosiva y sedimentaria por migración de los sedimentos desde las zonas periféricas hacia las áreas de extracción y otras zonas deprimidas del fondo marino.
- La desaparición de la estructura natural y la biodiversidad florística en las áreas afectadas directa e indirectamente por la extracción.

4. CONCLUSIONES

- Los modelos gráficos obtenidos expresan el carácter dinámico de los cambios en la morfología de los fondos de la laguna litoral, los cuales están asociados fundamentalmente con el constante dragado de este sector, que transforma el medio de sedimentación en su geometría, la carga sedimentaria disponible y en la energía que interviene en el proceso de sedimentación.
- Desde el punto de vista ecológico, la actividad de dragado en la bahía de Cayo Moa ha contribuido al deterioro de las formas de vida del entorno, impactando el medio marino a través del incremento de sólidos en suspensión y disueltos, cambios en la morfología del fondo, aumento de la dinámica erosiva y sedimentaria y la pérdida de la estructura natural y biodiversidad florística en las áreas afectadas por la extracción.

5. REFERENCIAS

- AZCUY, E.; PÉREZ, E.; CAMPOS, M.; GARCÍA, A.; OLIVERA, J.; FERNÁNDEZ, L. & AIRAS, C. 2001: Interpretación y correlación entre los datos aportados por los levantamientos geofísicos y de pozos para la caracterización morfoestructural de la plataforma marina al sur de cayo Moa Grande, Holguín. *Revista Internacional de Ciencias de la Tierra. Mapping Interactivo* 73: 80-90.
- CENTRO DE CIENCIAS ECOLÓGICAS. 1999: Guía de protección ambiental. Material auxiliar para la identificación y evaluación de impactos ambientales. Consulta: 31 ene 2007. Disponible en: <http://www.ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/HDL/ENV/envsp/Vol215.htm>
- CERVANTES, Y.; ALMAGUER, Y.; PIERRA, A.; OROZCO, G. & GURSKY, H. 2009: Variación de la dinámica erosiva y acumulativa en cayo Moa Grande, bahía de Cayo Moa, Cuba. Período 1972–2007. *Minería & Geología* 25(4): 1-16.
- CERVANTES, Y.; ALMAGUER, Y.; PIERRA, A.; OROZCO, G. & GURSKY, H. 2011: Metales traza en sedimentos de la bahía de Cayo Moa (Cuba): evaluación preliminar de la contaminación. *Minería & Geología* 27(4): 1-19.

- CUETO, F.; RONDÓN, E. & FUENTES, R. 2003: Efluente líquido (WL) de la tecnología de lixiviación ácida: alternativas de tratamiento. *Minería & Geología* 3(4): 1-6.
- INTERNATIONAL SEABED AUTHORITY. 2007: Tecnología para la exploración y explotación de los fondos marinos. Consulta: 29 oct 2007. Disponible en:
http://www.isa.org.jm/files/documents/ES/Brochures/IA10_SPA.PDF
- OFICINA NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMACIÓN. 2014: Anuario estadístico de Moa 2013. Versión 2014.
- MENÉNDEZ, M. 2001: *Explotación racional del yacimiento de Cienos Carbonatados en la bahía de Cayo Moa*. (Tesis de maestría) Instituto Superior Minero Metalúrgico. 68 p.
- MIZUMURA, K.; NISHIMOTO, T.; YAMAMOTO, T. & TSUTSUI, H. 1995: Prediction method of sand movement direction in water by geochemical elements. *Environmental Geology* 25(2): 100-108.
- MORALES, G. 1999: Recursos no renovables de los fondos marinos. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Consulta: 24 mar 2007. Disponible en: <http://biblioteca.ucv.cl/poseidon/libros/libro3/i41.html>.

Yosbanis Cervantes-Guerra, ycervantes@ismm.edu.cu
Máster en Minería. Profesor Asistente
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba

Alina Rodríguez-Infante, rinfante@ismm.edu.cu
Doctora en Ciencias Geológicas. Profesora Titular.
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba.

Allan Pierra-Conde, apierre@mes.gob.cu
Doctor en Ciencias Químicas.
Profesor Titular. Ministerio de Educación Superior. La Habana, Cuba

Yuri Almaguer-Carmenates, yalmaguer97@gmail.com
Doctor en Ciencias Geológicas.
Universidad Autónoma de Coahuila, México.

Hans-Jürgen Gusrky, gursky@geologie.tu-clausthal.de
Doctor y Catedrático.
Universidad Técnica de Clausthal, Alemania.