

Análisis sísmo-estratigráfico para la caracterización de los sedimentos de la ensenada El Cristo, Cuba

Idoris Alfonso Santiesteban¹, Jorge Luis Perdomo², Moraima Álvarez Ortiz³, Carlos F. Salazar Pérez⁴.

¹ *Ingeniera Geofísica, Master en Ciencias en Geo-información y Observaciones de la Tierra, Investigadora Agregada de GEOCUBA Estudios marinos, Punta Santa. Catalina, s/n, Regla, La Habana, CP 11200. ORCID: 0009-0001-5431-6903. Correo E.: idoris67@nauta.cu.*

² *Ingeniero geofísico. GEOCUBA Estudios marinos, Punta Santa. Catalina, s/n, Regla, La Habana, CP 11200. ORCID: 0009-0002-5907-5018. Correo E.: perdomo@emarininos.geocuba.cu.*

³ *Ingeniera Geofísica, Master en Ciencias en Geomática. GEOCUBA Estudios marinos, Punta Santa. Catalina, s/n, Regla, La Habana, CP 11200. ORCID: 0009-0004-5465-7830. Correo E.: moraima@emarininos.geocuba.cu.*

⁴ *Ingeniero geofísico. GEOCUBA Estudios marinos, Punta Santa. Catalina, s/n, Regla, La Habana, CP 11200. ORCID: 0009-0008-1101-3890. Correo E.: charly@emarininos.geocuba.cu.*

RESUMEN

Los métodos acústicos permiten inferir información acerca de las propiedades físicas de las capas de sedimentos más superficiales del corte geológico bajo el lecho marino. Uno de los métodos geofísicos más útiles para los levantamientos de ingeniería del fondo y subfondo marinos es la sísmica de reflexión de alta resolución y un procedimiento de trabajo que permite el empleo exitoso de dicho método en la interpretación compleja de los ambientes marinos, es la aplicación de la sísmo-estratigrafía. Esta investigación se enfoca en el análisis sísmo-estratigráfico, como una importante herramienta para la caracterización de los sedimentos orientada a la prospección de arena de mar, ante la necesidad de realizar proyectos ejecutivos para la localización y posterior vertimiento de arenas en playas locales, dentro del programa nacional de recuperación y mantenimiento de playas. Para este trabajo se tomó como caso de estudio, la prospección geológico-geofísica marina para la localización de préstamos de arena en la ensenada El Cristo, que se encuentra ubi-

cada en el canal de entrada a la bahía de Nipe, en la costa norte de cayo Saetía en la provincia de Holguín. Los resultados obtenidos con las técnicas acústicas empleadas y la aplicación de criterios y patrones sísmo-estratigráficos para la delimitación de los diferentes horizontes reflectores, permitieron diferenciar los tipos de sedimentos no consolidados presentes en el área de estudio. Este tipo de análisis constituye el punto de partida para la caracterización geoacústica de los sedimentos marinos y sugieren que el procedimiento desarrollado en este trabajo puede mejorar de forma significativa las metodologías de búsqueda de arena marina y otras aplicaciones de ingeniería e indicar a los métodos acústicos como técnicas remotas efectivas en la caracterización de los sedimentos marinos con la consecuente disminución de los muestreos *in situ*.

Palabras clave: Sísmica de reflexión de alta resolución, sísmoestratigrafía, sedimentos marinos, patrones de reflexión.

Alfonso Santiesteban, I., Perdomo, J. L., Alvarez-Ortiz, M., Salazar-Pérez., C.F., 2026, Análisis sísmo-estratigráfico para la caracterización de los sedimentos de la ensenada El Cristo, Cuba: Geociencias UO. v. 17, núm. 1, junio 2026. pp. 38-53

ABSTRACT

Acoustic methods make it possible to infer information about the physical properties of the most superficial sediment layers of the geological section under seabed. One of the most useful geophysical methods for engineering surveys of the sub-bottom and seabed is high resolution reflection seismic. A working procedure that allows a successful use of this geophysical method in the complex interpretation of marine environments is the application of seismic stratigraphy. The present paper is focused to the seismic stratigraphy analysis, as an important tool for sediment characterization oriented for sea sand prospecting, based on the need to carry out executive projects for location and subsequent dumping of sand on local beaches, into the national program of beach recovery and maintenance. For this work, the marine geological-geophysical prospecting was taken as a case study for location of sand borrows in the Ensenada El Cristo, which is located in the entrance channel to the Nipe Bay, on the north coast of Saetía cay. Holguín province. The results obtained with the acoustical techniques used and the application of seismic stratigraphy patterns and criteria for delimitation of the different reflector horizons, allowed to differentiate the types of sediments in the study area. This kind of analysis constitute the starting point for geoacoustical characterization of marine sediments and suggest the procedures developed in this work, they can significantly improve marine sand search methodologies and other engineering applications and indicate acoustic methods as effective remote techniques in the characterization of marine sediments with the consequent reduction of in situ samplings.

Key words: High resolution reflection seismic, sismo-stratigraphy, marine sediments, reflection patterns.

RESUMO

Os métodos acústicos permitem inferir informações sobre as propriedades físicas das camadas de sedimentos mais superficiais da seção geológica sob o fundo do mar. Um dos métodos geofísicos mais úteis para levantamentos de engenharia do fundo e do sub-

fundo é a sísmica de reflexão de alta resolução e um procedimento de trabalho que permite o uso bem-sucedido deste método na interpretação complexa de ambientes marinhos é a aplicação da sísmo-estratigrafia. O presente trabalho centra-se na análise sísmo-estratigráfica, como uma ferramenta importante para a caracterização dos sedimentos orientada para a prospecção de areias marinhas, dada a necessidade de realização de projectos executivos para a localização e posterior descarga de areias nas praias locais, no âmbito do programa nacional de recuperação e manutenção de praias. Para este trabalho, tomou-se como estudo de caso a prospecção geológico-geofísica marinha para a localização de depósitos de areia na enseada El Cristo, localizada no canal de entrada da baía de Nipe, na costa norte. na província de Holguín. Os resultados obtidos com as técnicas acústicas utilizadas e a aplicação de critérios e padrões sísmico-estratigráficos para a delimitação dos diferentes horizontes refletores, permitiram diferenciar os tipos de sedimentos inconsolidados presentes na área de estudo. Este tipo de análise constitui o ponto de partida para a caracterização geoacústica de sedimentos marinhos e sugere que o procedimento desenvolvido neste trabalho pode melhorar significativamente as metodologias de pesquisa de areia marinha e outras aplicações de engenharia e indicar métodos acústicos como técnicas remotas eficazes na caracterização de sedimentos marinhos com a consequente diminuição da amostragem *in situ*.

Palavras-chave: Sísmica de reflexão de alta resolução, sísmo-estratigrafia, sedimentos marinhos, padrões de reflexão.

INTRODUCCIÓN

El empleo de los métodos acústicos permite inferir información acerca de las propiedades físicas de las capas de sedimentos más superficiales del corte geológico que yacen bajo el lecho marino. Uno de los métodos geofísicos más útiles para los levantamientos de ingeniería del fondo y subfondo marinos es la sísmica de reflexión de alta resolución (SRAR), al tener en

cuenta una de sus mayores ventajas: el registro continuo de los horizontes reflectores a lo largo de un perfil de navegación a medida que la embarcación se desplaza a través del agua. La combinación de este método sísmico con otras técnicas acústicas como el sonar de barrido lateral (SBL), ecosondas y muestreos de sedimentos, contribuye al estudio de un considerable número de tareas geológicas y propósitos ingenieros y/o ambientales. Un procedimiento de trabajo que permite el empleo exitoso de la SRAR, es la aplicación de la sismo-estratigrafía, una herramienta ampliamente utilizada en la interpretación compleja de los ambientes marinos para el estudio de los sedimentos. La sismo-estratigrafía es el estudio de las facies deposicionales y estratigrafía interpretadas a partir de datos sísmicos (Mitchum *et al.*, 1977). En numerosas investigaciones realizadas durante las últimas décadas en distintos ambientes costeros del mundo, los métodos de prospección sismoacústicos han aportado resultados relevantes. Desde los trabajos pioneros de Damuth (1975); Mitchum *et al.*, (1977) y Sangree (1979), no son pocos los estudios que han demostrado que la sísmica marina de alta resolución es una poderosa herramienta para la determinación de las características geólogo-geomorfológicas de los fondos y subfondos marinos y de los procesos de sedimentación y no solo a nivel internacional sino también en Cuba (Corrada *et al.*, 1995). En los ambientes marinos es conocido que la aplicación del concepto de sismo-estratigrafía es importante no solo para la clasificación de las unidades sismo-faciales, sino también para la determinación de características dentro de los propios sedimentos que puedan constituir riesgos en obras de ingeniería como por ejemplo: canales rellenos con sedimentos muy finos de baja resistencia mecánica, las zonas opacadas de forma acústica producidas por emanaciones gaseosas, acumulaciones de turba o zonas de fallas, etc. En general, la aplicación de estos conceptos permite alcanzar un mayor conocimiento de la historia geológica de las formaciones más recientes en las zonas sumergidas.

El empleo de la sismo-estratigrafía en el presente trabajo tuvo como finalidad principal, la dife-

renciación de los tipos principales de configuraciones de reflexión que caracterizan a las capas de sedimentos recientes e inferir los tipos de sedimentos marinos no consolidados presentes en el área de estudio. Un análisis más detallado de carácter sedimentológico, mineralógico, biológico y geomorfológicos que aportan a las interpretaciones sobre procesos sedimentarios, no forman parte de la presente investigación. En este trabajo se fundamenta la necesidad del empleo de la sismo-estratigrafía orientada a la caracterización de los sedimentos para la prospección de arena de mar ante la necesidad de realizar los proyectos ejecutivos para la localización y posterior vertimiento de arena en playas locales dentro del programa nacional de recuperación y mantenimiento de playas. La aplicación de estos conceptos, al tener en cuenta la morfología del fondo y subfondo y los modelos de distribución de los espesores de los sedimentos, son algunos de los enfoques realizados para la caracterización de los sedimentos en el presente trabajo. Para ello se tomó como caso de estudio, la investigación geólogo-geofísica marina para la localización de préstamos de arena, en la subfase de Prospección (González, 2023), en la ensenada El Cristo, ubicada en el canal de entrada a la bahía de Nipe, en la costa norte de Cayo Saetía de la provincia de Holguín (**Figura 1**).

Los resultados obtenidos con la integración de los métodos acústicos, el muestreo geológico y el análisis sismo-estratigráfico de los registros sísmicos, permitieron determinar el límite entre los tipos de sedimentos marinos con vistas a la delimitación del bloque o cuerpo de arena a proponer para los fines de recuperación de playas. Se demuestra además que la sismo-estratigrafía establece el punto de partida para la caracterización geoacústica de los sedimentos marinos y sugieren que los procedimientos desarrollados en este trabajo pueden mejorar de modo significativo las metodologías de búsqueda de arena marina y otras aplicaciones de ingeniería, al indicar a los métodos acústicos como técnicas remotas efectivas en la caracterización de estos sedimentos con la consecuente disminución de los muestreos in situ. La visión geológica y geomorfológica que brinda la interpretación sismoacústica a par-

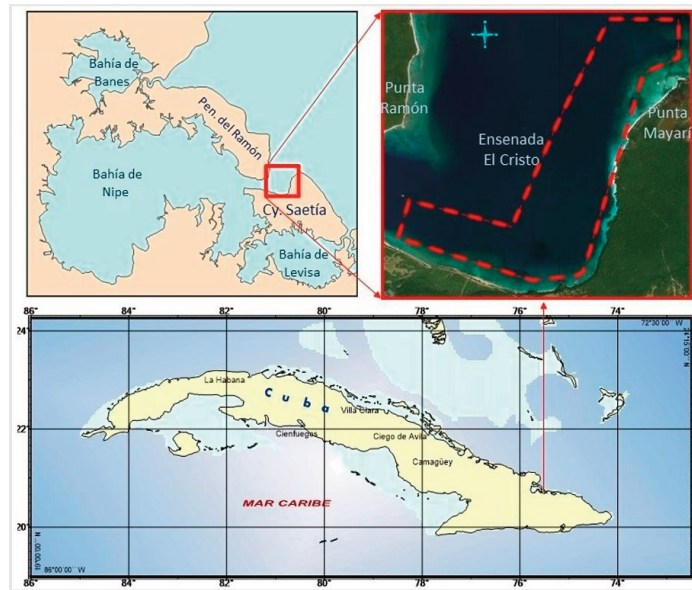


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.

tir de la sismo-estratigrafía, resulta esencial en la construcción del modelo geológico para la caracterización geoaústica de los sedimentos marinos.

Las investigaciones geólogo-geofísicas tomadas como base de este trabajo fueron ejecutadas por especialistas de la Agencia de Geología y Geofísica, pertenecientes a la empresa GEOCUBA Estudios Marinos del grupo empresarial GEOCUBA, con la colaboración de especialistas de la División de Ingeniería Costera de la Empresa Inversiones GAMMA SA.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los estudios geólogo- geofísicos referidos en el presente trabajo fueron realizados en el año 2021 en etapa de Prospección a escala 1:10000. La base de estos trabajos de prospección fueron los estudios de Reconocimiento realizados en la zona marina a escala 1:100000 (Álvarez, 2020) dirigidos a identificar depósitos de arenas potenciales con características técnicas y mineras favorables para ser empleadas en proyectos de regeneración de playas en el sector E de la plataforma norte de Holguín. Tres de los siete cuerpos de arena identificados en el estudio de Reconocimiento se localizan en la ensenada El Cristo y canal de entrada a la bahía de nipe, los que fueron propuestos para fases superiores de investigación, al cumplir

estos depósitos con un volumen estimado de 1000000 m³ en categoría de inferido y condiciones geomorfológicas del fondo marino, para la acumulación de sedimentos.

Los métodos de investigación empleados, compuestos por SRAR, SBL y batimetría acompañante, de forma conjunta con la inspección visual del fondo y muestreo geológico con barrena helicoidal de 1.65 m de penetración, tuvieron la finalidad de determinar la distribución espacial de los sedimentos no consolidados y sus espesores con un mayor detalle.

En los trabajos de Prospección para toda el área de estudio solicitada, se empleó el Sistema Estatal de coordenadas planas Cuba Sur, proyección cónica conforme de Lambert NAD 27 Cuba, Sistema de Alturas Siboney, en correspondencia con las coordenadas geográficas WGS-84. Las líneas sísmicas principales para el cubrimiento general del área, se realizaron en conjunto con el levantamiento batimétrico, en dirección aproximada N-S-N y un espaciamiento de 100 m entre ellas. Mientras que las líneas de control, tienen dirección aproximada E-W-E y espaciamiento de 100 m. En el caso del SBL, las líneas se ejecutaron en ambas direcciones (N-S-N y E-W-E) en dependencia de la morfología del área de investigación al emplear siempre un espaciamiento entre 100 y 50 m, para los ran-

gos de cubrimientos laterales de 75 y 150 m respectivamente.

El equipamiento geofísico empleado estuvo conformado por el sonar de barrido lateral C-Max con sistema de adquisición digital MaxView y sistema de procesamiento SonarWiz.Map de CHESAPEAKE TECHNOLOGY, INC. Para el perfilador de subfondo, el sistema de adquisición CODA DA 2000 de la firma APPLIED ACOUSTICS, con fuente acústica de tipo impulsiva (Boomer AA 300) con rango de frecuencias entre 800 Hz y 2400 kHz y potencia de 100-300 J. Para el procesamiento de los datos sísmicos se empleó el sistema Survey Engine Seismic+ (Figura 2) que permite delinear las fronteras reflectoras del fondo y subfondo marinos para la creación de los modelos de distribución de los espesores de sedimentos no consolidados.

La interpretación visual y sismo-estratigráfica de los perfiles sísmicos con el empleo del sistema Survey Engine Seismic+ fue correlacionada con la interpretación del SBL y el empleo de otras informaciones complementarias como la carta náutica No. 11880 de bahía de Nipe y sus accesos a escala 1: 30000 (Servicio Hidrográfico y geodésico de la República de Cuba,

1975) e imágenes satelitales. Estos materiales complementarios fueron empleados además para la delimitación de las zonas bajas en el área de estudio y el cierre del modelo de espesores al tener en cuenta el ambiente geográfico y geólogo- geomorfológico de la zona de estudio. También fueron utilizadas las informaciones de estudios precedentes realizados en la bahía de Nipe, en particular, muestreos y calas relativamente cercanas al canal de acceso (Ortega, 1995; Godínez, 2002; Perdomo, 2015).

Para el procesamiento de los datos sísmicos, se empleó una velocidad de propagación de 1650 m/s para la conversión de las escalas de tiempo a metros, en concordancia con el material arenoso de granulometría fina que prevalece en el fondo marino, según las vibro-perforaciones, muestreos superficiales y calas realizadas en los estudios precedentes mencionados, que aun cuando se ubican algo alejado del área de trabajo (hacia el interior del canal de entrada), sirvieron como conocimiento general acerca de los tipos de sedimentos presentes en el canal. Un esquema de clasificación simplificada de las unidades de facies sísmicas (Ringis, 1986), modificadas de la clasificación propuesta por Sangree y Widmier (1979) y Sheriff

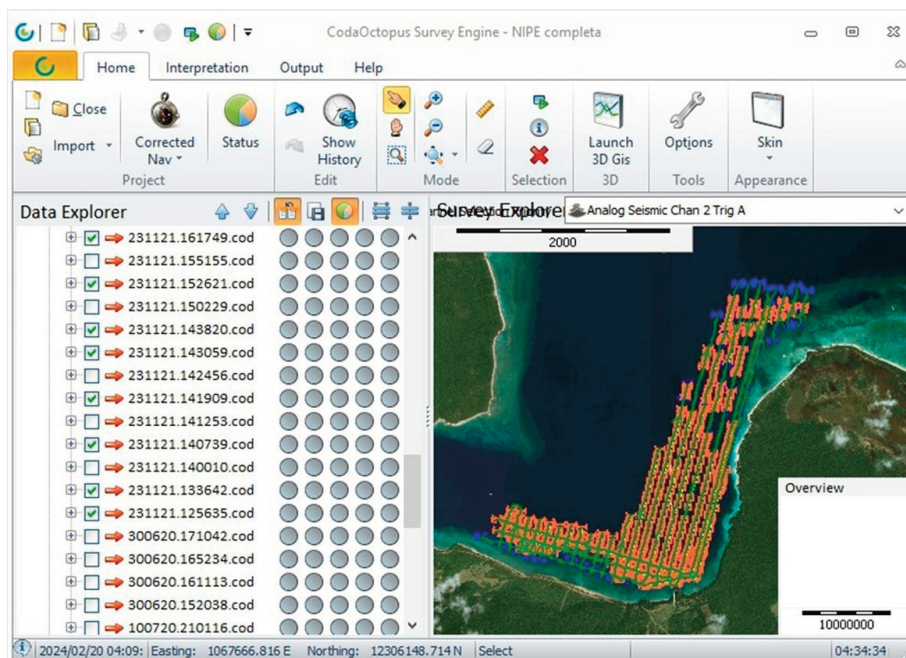


Figura 2. Ventana del sistema de procesamiento sísmico Survey Engine Seismic+

(1980), es la que se utilizó como referencia en este trabajo, así como los trabajos pioneros de Damuth (1975) y Mitchum *et al.*, (1977).

El muestreo geológico llevado a cabo para la validación de los lugares de interés obtenidos con la geofísica y la caracterización de los sedimentos del fondo marino de acuerdo con su textura, granulometría y composición, espesor y profundidad de yacencia, se realizó de forma superficial, en 23 puntos distribuidos en el polígono de estudio en los sedimentos aledaños que bordean el margen costero, con barrena helicoidal, en una red de 28 puntos dentro del polígono de mayor perspectiva (Figura 3).

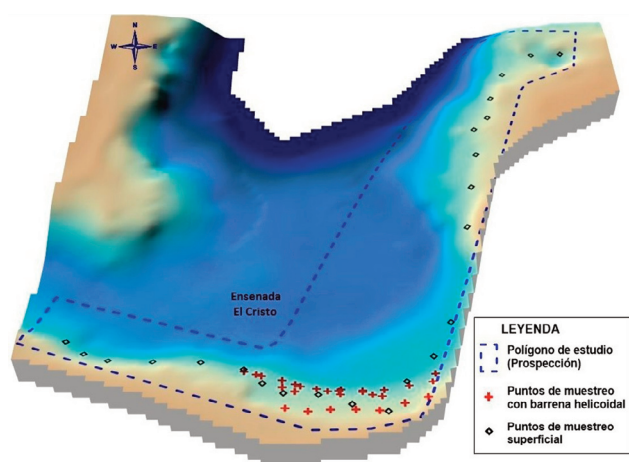


Figura 3. Ubicación del muestreo geológico en el polígono de estudio.

De acuerdo con el uso propuesto de la materia prima (arena para la recuperación o mantenimiento de playas), el Manual de Protección Costera (Shore Protection Manual, 1984), describe como análisis básico, la determinación de la fracción granulométrica y como complementario, el de composición (génesis). De los muestreos superficiales, a 17 muestras se le realizaron el análisis básico de granulometría y de los 28 puntos con barrena helicoidal, a 19 muestras. Como análisis complementario se seleccionó una muestra de los puntos con barrena helicoidal en el área del depósito de arena de mayor perspectiva.

El análisis granulométrico se realizó de acuerdo con la metodología propuesta por Petelín (1967), em-

pleando para ello una tamizadora analítica Restsh As 200 y un juego de tamices con mallas de 0.063; 0.125; 0.25; 0.50; 1. 2 y 4 mm. Los datos de peso por tamiz fueron procesados mediante el software Gradistat Versión 8.0, obteniéndose por el método de los momentos, el diámetro medio de la partícula (Md) en unidades mm y σ y la desviación estándar. Para la clasificación del sedimento (Tabla 1), se empleó la propuesta por Wentworth (Shore Protection Manual, 1984).

Los análisis de la composición se realizaron atendiendo a la metodología de Ionin *et al.*, (1977) y consiste en la observación al microscopio de 200 granos de arena seleccionados de forma aleatoria en las fracciones granulométricas de 2-1 mm, 1-0.5 mm y 0.5-0.25 mm procediéndose a la separación y conteo de cada uno de los grupos de los bioclastos presentes y los granos de origen inorgánico y luego se obtienen los porcentajes de cada grupo con respecto al total de la muestra. Se denomina bioclastos no identificados a aquellos granos que por su textura y composición se reconoce que son de origen biogénico, pero que dado el estado en que se encuentran es imposible reconocer a qué tipo de organismo corresponden.

| Tipo de sedimento | Diámetro medio Md (mm) |
|-------------------|------------------------|
| Arcilla | 0.0024 – 0.0039 |
| Limo | 0.0039 – 0.063 |
| Arena muy fina | 0.063 – 0.125 |
| Arena fina | 0.125 – 0.25 |
| Arena media | 0.25 – 0.50 |
| Arena gruesa | 0.50 – 1.00 |
| Arena muy gruesa | 1.00 – 2.00 |
| Grava | 2.00 – 4.00 |

Tabla 1. Clasificación granulométrica de Wentworth (Shore Protection Manual, 1984).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la investigación muestran el método de trabajo establecido para el análisis de los datos en este tipo de ambiente marino. En esencia, se corres-

ponden con los resultados del análisis y distribución de los datos sísmicos y su correlación con el SBL e imágenes satelitales, en la determinación de los contactos entre sedimentos y roca y delimitación de los márgenes costeros, así como en la diferenciación de los tipos de sedimentos no consolidados con la aplicación de la

sismo-estratigrafía y su validación con los resultados del muestreo geológico e información de estudios precedentes. Los resultados básicos de los métodos geofísicos se presentan en los planos batimétricos, isopacas e isohipsas, confeccionados a escala 1:10000 (Figuras 4, 5 y 6 respectivamente).

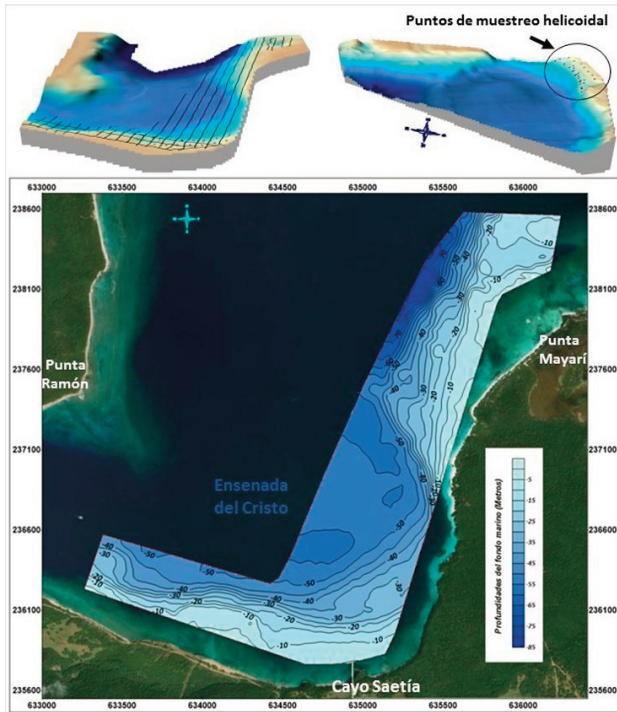


Figura 4. Morfología del fondo marino del área de estudio

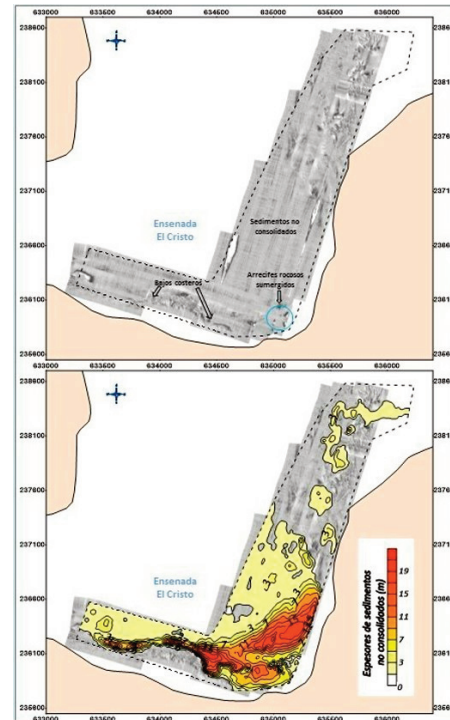


Figura 5. Mosaico del SBL con superposición de los espesores de sedimentos no consolidados.

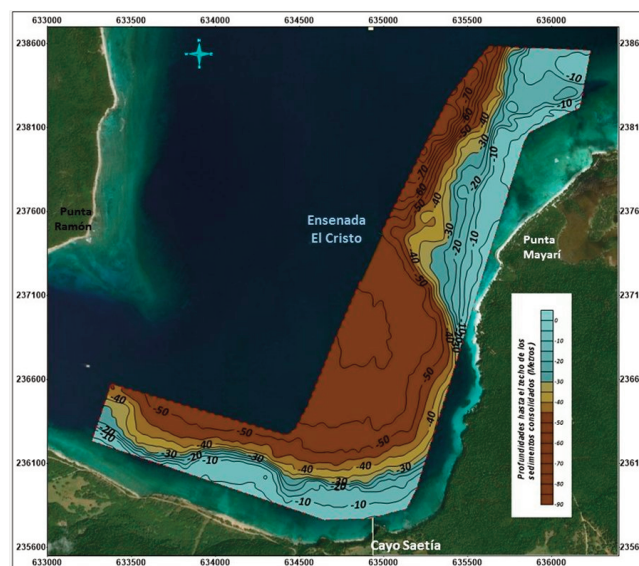


Figura 6. Plano de Isohipsas hasta el techo de los sedimentos consolidados o basamento acústico.

La inspección visual del entorno geográfico, la morfología del fondo marino, los bajos costeros y las características de los fondos, así como la distribución de los espesores de los sedimentos totales en la ensenada (depósitos holocénicos, Q_2), permitieron realizar un primer análisis sobre la caracterización de los sedimentos marinos en el área de estudio. Una vez realizado este análisis, se empleó la sísmo-estratigrafía para la interpretación de los resultados, de forma conjunta con la correlación de la descripción de los puntos de muestreo cuya ubicación en el bajo costero se puede apreciar en la vista tridimensional del modelo batimétrico de la **Figura 3**. De manera general, las profundidades en el canal de entrada a la bahía son considerables, alcanzan los -100 m en la boca y disminuyen hacia el interior de la misma, con un relieve irregular a lo largo del canal de entrada, de pendientes bruscas hacia donde se encuentran las mayores profundidades.

En la **Figura 7** se muestra un perfil sísmico realizado durante los estudios de reconocimiento que cruza el canal de entrada a la bahía de Nipe. En el centro del canal con más de 50 m de profundidad del fondo marino, se observan espesores de sedimentos despreciables al tener en cuenta los grandes taludes, las pro-

fundidades y las corrientes de mareas que circulan por el canal, en lo fundamental las de marea baja que llegan a alcanzar velocidades mayores de 1 m/s (GEOCUBA Estudios Marinos, 2003).

En la ensenada El Cristo (boca del canal), la morfología del fondo es muy variable y se caracteriza por la presencia de bajos costeros (en menos de 5 m de profundidad) que bordean la costa de cayo Saetía. De forma específica, se aprecia un predominio de los fondos rocosos hacia las bajas profundidades, en las franjas aledañas a la costa hacia el NE donde se ubica punta Mayarí (donde se forman rompientes sobre los arrecifes de poca profundidad y más allá las profundidades aumentan de forma abrupta) y hacia el S y SW del área.

En el área de estudio de la ensenada, entre estos bajos costeros rocosos del NE y el SW, existen segmentos arenosos que descienden hacia las mayores profundidades, de forma gradual al S y de forma más brusca al SE (**Figuras 4, 5 y 6**). Al bordear la mayor parte de la costa N del cayo se localiza la Formación Jaimanitas (Fm. Js.) de edad Pleistoceno Superior temprano (Q_1), en una franja estrecha al alcanzar su mayor amplitud en el sector NE, al oscilar entre 0.5 y 1 km de longitud. La formación está constituida por calizas

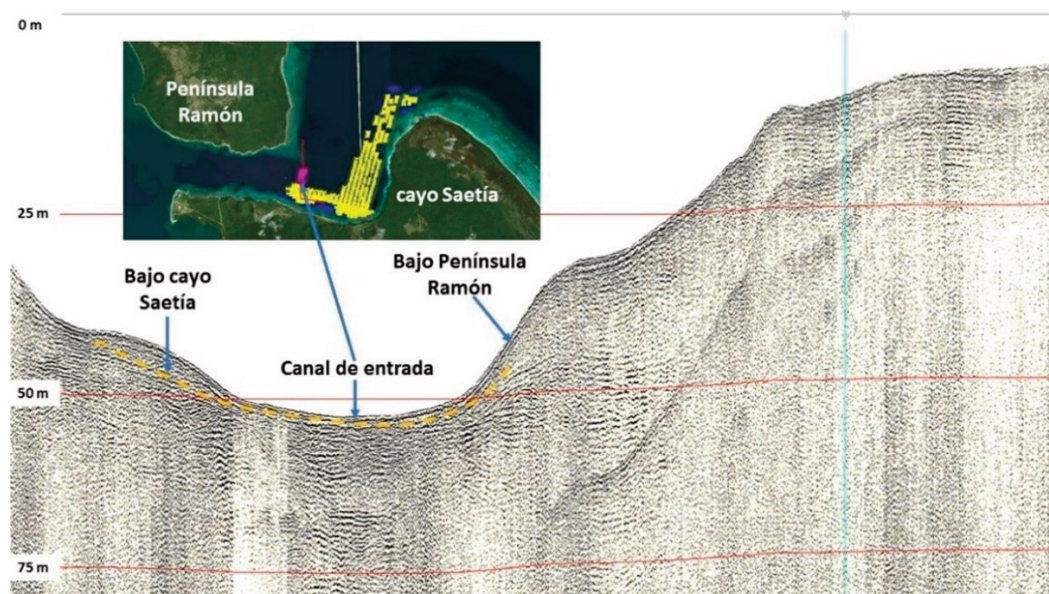


Figura 6. Plano de Isohipsas hasta el techo de los sedimentos consolidados o basamento acústico

biodetríticas, masivas, algo cavernosas, con sedimentos duros de color amarillento, de estructura masiva con indicios pocos marcados de estratificación, además de presentar intercalaciones de calcarenitas, de granos finos con especies actuales de restos de moluscos y corales.

De los registros del SBL se obtuvo una clara diferenciación en superficie entre los fondos rocosos de textura rugosa (elevada reflectividad y tonalidad relativamente más oscura) y los sedimentos friables de textura suave y homogénea (baja reflectividad), además de delimitar las formaciones coralinas al SE de la ensenada que se desarrollan sobre el sustrato rocoso y que emergen entre los sedimentos (**Figura 8**). La interpretación del SBL mostró una clara correlación con los resultados de la distribución de los espesores totales de sedimentos obtenidos con la SRAR. La interpretación de los datos sísmicos permitió identificar el basamento acústico (**Figura 8**), desde profundidades del fondo de -4.0 m al S del área, hasta casi el borde superior del talud insular que se extiende a más de -50.0 m hacia el N (**Figura 6**). Como se muestra en la **Figura 5**, la distribución de los mayores espesores de

sedimentos se localiza al SE de la ensenada, llegando a alcanzar una potencia de alrededor de 21 m. Aunque cuando estos espesores se corresponden con las áreas más deprimidas del subfondo, como se muestran en las isohipsas entre -35 y -50 m, se observa que, hacia el margen costero S del área, los espesores de sedimentos llegan a alcanzar potencias de hasta 11 m sobre elevaciones del subfondo entre los -30 y -5 m.

En adición a los resultados básicos mencionados, fue necesario determinar las facies sísmicas con el objetivo de diferenciar la arena de los sedimentos finos, enfocado a la prospección de arena de mar. Una vez determinados los horizontes reflectores principales, se identificaron las unidades sísmicas al utilizar los conceptos sismo-estratigráficos y esquema de clasificación simplificada de las unidades de facies sísmicas de Ringis (1986), el cual está basado en el análisis de las secciones de tiempo en los sismogramas, al tomar en cuenta la amplitud de las señales, cambios en el paralelismo y continuidad de los ejes co-fásicos de las reflexiones. El análisis e interpretación de perfiles consecutivos, permitió observar de forma más visible la arquitectura estratigráfica de las unidades que com-

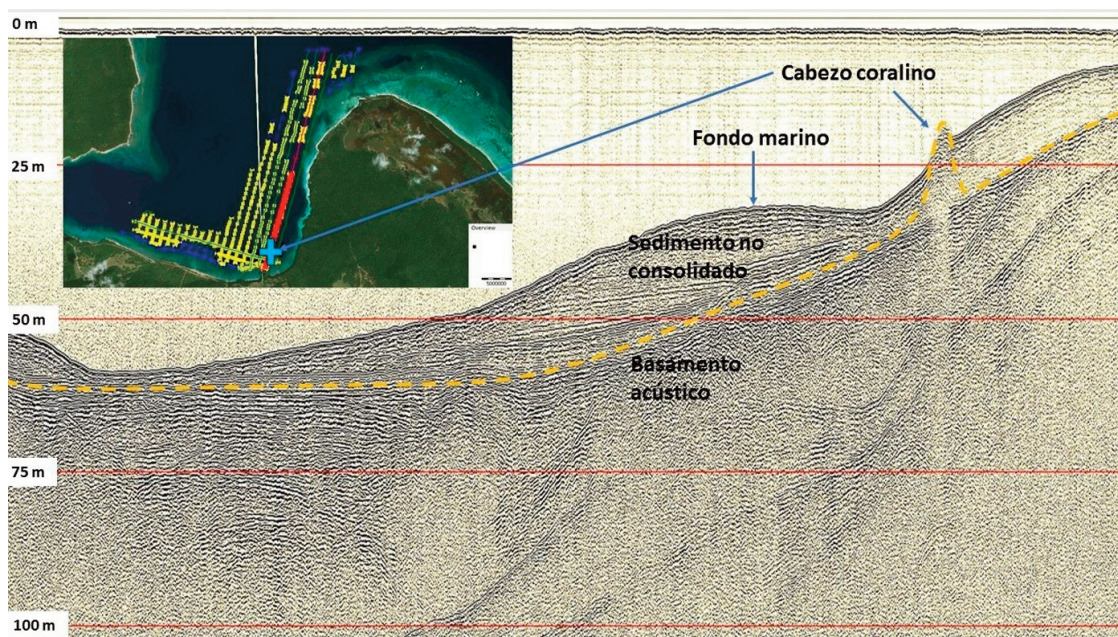


Figura 8. Tramo (en color rojo) de un perfil sísmico en dirección SW-NE, cercano al borde costero de cayo Saetía, que muestra la geometría del corte geológico y presencia de cabezos coralinos.

ponen los depósitos de sedimentos, así como la diferenciación vertical y lateral de las mismas.

Al tener en cuenta el concepto de unidad sismoestratigráfica de Ringis (1986) que la define como una unidad o capa que se caracteriza por un patrón interno de reflexión sísmica que difiere de las unidades adyacentes, por encima, por debajo o en los laterales (Ringis, 1986) o el concepto de unidades de facies sísmicas de Mitchum *et al.*, (1977), como grupos de reflexiones sísmicas cuyos parámetros (configuración, amplitud, continuidad, frecuencia y velocidad de intervalo) difieren de los grupos adyacentes, fue posible diferenciar tres unidades sísmicas, las cuales se muestran en la **Figura 9** a escala vertical algo exagerada para su visualización.

En esta clasificación se tuvo en cuenta que las unidades de facies sísmicas son interpretadas en términos de los ambientes deposicionales, la energía de deposición en el medio y el contenido litológico potencial del estrato que genera el patrón de reflexión de las facies sísmicas (Mitchum, *et al.*, 1977).

La caracterización de estas unidades a partir de sus patrones de reflexión permitió diferenciar los sedi-

mentos arenosos de los sedimentos más finos que pudieran estar constituidos por sedimentos limo-arenosos o limo-arcillosos. Dichas unidades se presentan a continuación al comenzar desde la más profunda hacia la más somera.

•**Unidad sísmica (1):** Constituye el basamento acústico de todos los materiales supra-yacentes determinados. De acuerdo con estudios precedentes (Godínez, 2002; Perdomo, 2015), el basamento acústico en una gran parte de la bahía de Nipe está representado por arcilla, de firme a dura. Mientras que en la península de Ramón en el canal de entrada de la bahía (Hernández, 2019), por caliza organógena poco cementada pertenecientes a la Formación Jaimanitas, de edad Pleistoceno Superior. Este basamento presenta un relieve muy variable tal como se presenta en las isohipsas y se encuentra cubierto por sedimentos de espesor variable. El límite superior de esta unidad presenta un reflector bien definido, de elevada respuesta acústica y en

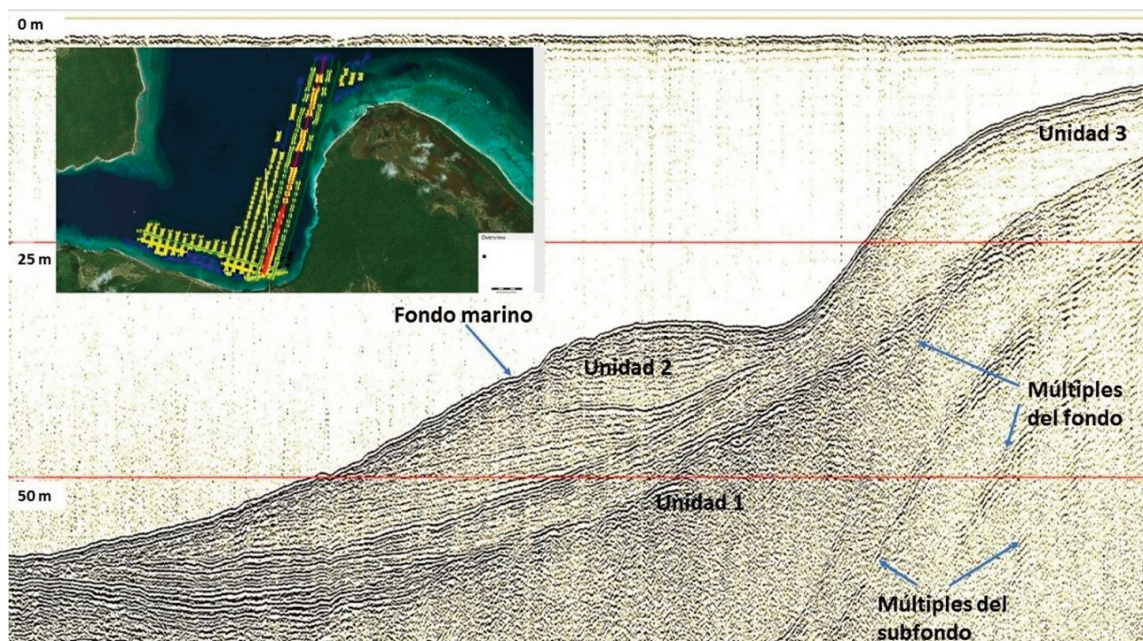


Figura 9. Tramo del perfil en dirección SW-NE longitudinal a la costa de cay Saetía que muestra las diferentes unidades sísmicas

la mayoría de los sismogramas, debajo del mismo se observan reflectores menores, de escasa continuidad lateral. Aparece bien definido en las zonas deprimidas del fondo y subfondo de la ensenada, al mostrar reflexiones de relativamente gran amplitud entre los -30 y -55 m de profundidad. Sin embargo, hacia las zonas menos profundas, con un relieve irregular, las reflexiones aparecen más débilmente en los registros sísmicos, marcado por un bajo contraste de impedancia acústica con los sedimentos que lo sobreyacen.

•**Unidad sísmica (2):** Sobreyace el basamento acústico en las zonas más deprimidas del fondo y subfondo, de espesor variable. El espesor máximo determinado para esta unidad fue de 21 m, sin embargo, los espesores son variables en su distribución espacial de acuerdo con la morfología del fondo y del subfondo, donde las profundidades del fondo marino varían en un rango entre los -20 y -40 m y el subfondo, entre los -20 y -50 m aproximadamente. Esta unidad se encuentra aflorante por lo tanto el techo lo conforma la superficie del fondo marino (Figura 9). La estructura sismo-estratigráfica de esta unidad se caracteriza por una estratificación bien marcada, con reflectores inclinados en dirección aparente hacia el norte y noreste, donde aumentan las profundidades del paleocanal y canal actual. La unidad está constituida por varias secuencias que indican cambios durante las condiciones de sedimentación. La forma y ubicación de estos sedimentos permiten clasificarlos como rellenos de canal, de granulometría fina a media. Sin embargo, la respuesta acústica y la gran penetración lograda con el perfilador sísmico en esta unidad de considerables espesores y grandes profundidades de yacencia, permiten inferir tamaños de granos finos para estos sedimentos. Este análisis fue indicado con anterioridad por Da-

muth (1975), quien planteó que una limitada penetración del subfondo sugiere granos de tamaños relativamente gruesos, mientras una penetración profunda sugiere granos de tamaños finos. De manera general, estos sedimentos pudieran estar constituidos por limos arenosos o areno-limosos o incluso algo arcillosos, como resultado de las condiciones hidrodinámicas reguladas por las corrientes de marea y el transporte de sedimentos. La orientación de las formas del fondo, indican una movilidad sedimentaria en dirección también a la boca de la ensenada, fuertemente vinculada con las corrientes de reflujó. Resultados de algunos de los puntos de muestreo realizados en etapa de reconocimiento 1:100000 mencionado con anterioridad, describen estos materiales como materiales menos seleccionados, lo cual indica mayores porcentajes de limo-arcilla en los sedimentos.

•**Unidad sísmica (3):** Fue definida en el área de estudio para la capa de sedimentos cercana a los bordes costeros con espesor variable entre 5 y 10 m. Presenta un patrón típico con ausencia de estratificaciones, que sugieren como fracción dominante a la arena, aunque se complementan con diversos porcentajes de limo y arcilla. Estos sedimentos son típicos de los bordes costeros del canal de entrada, los cuales se forman bajo las condiciones hidrodinámicas mencionadas, reguladas por las corrientes de marea y el transporte de sedimentos. De forma inversa a la unidad (2), esta unidad pudiera estar representada por sedimentos algo más gruesos, teniendo en cuenta que aun en condiciones más someras (menores de -20 m), la penetración del perfilador en el subfondo es algo menor. En este caso, el eco en los sismogramas contiene solo el reflector de la base, el cual en ocasiones es discontinuo y desaparece en las partes de mayor espesor, lo cual permite inferir, de acuerdo con lo seña-

lado por Damuth (1975), que esta unidad pudiera estar constituida por materiales algo más gruesos que no permiten una penetración de la señal acústica lo suficientemente profunda. Esta unidad sísmica sobreyace la unidad 1, al aflorar desde el borde costero que se localiza al sur del área hasta las profundidades del fondo de -20 y -25 aproximadamente, con pendientes ligeramente más abruptas hacia el SW y pendientes más suaves hacia el SE. De acuerdo con las características geológicas y geomorfológicas de esta unidad, además de su cercanía a la costa, se llevó a cabo un muestreo helicoidal, de modo específico en las áreas más someras y de pendientes más suaves. Según los resultados del muestreo, la litología de esta unidad estratigráfica es arena, con granulometría de media a fina, de color gris a gris claro y compacidad suelta al menos en la parte más superficial del corte geológico, aunque pudiera ser variable en profundidad. Son sedimentos biogénicos producto de la actividad marina, con presencia de fragmentos de conchas de moluscos. En los registros del sonar y sismogramas fueron detectados numerosos arrecifes coralinos y bajos rocosos costeros, que los indican como importantes fuentes de aporte a estos sedimentos.

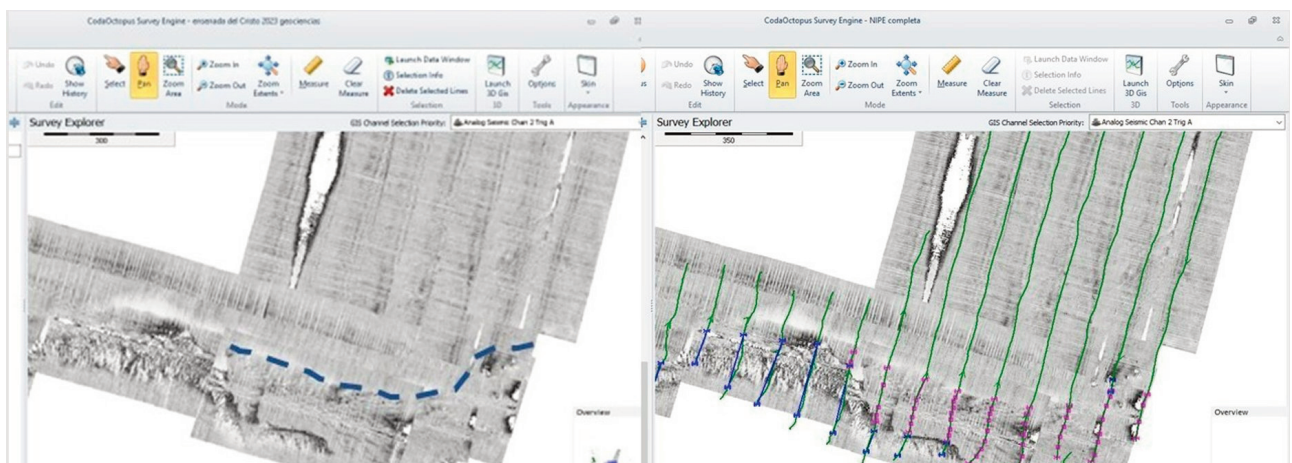
En la **Figura 10** se muestra la correlación total en la interpretación de estas arenas de granulometría de media a fina, con el registro del sonar que muestra una textura no tan homogénea como en el caso de los sedimentos finos de las zonas más profundas, sino algo más rugosa que sugiere una granulometría no tan fina.

Los resultados geólogo- geofísicos de prospección indicaron que las acumulaciones de sedimentos de mayor perspectiva se localizan precisamente en esta arena ubicada al sur del área de estudio y cercanas a la margen costera de cayo Saetía, en profundidades de agua entre los -5 y -20 m.

Los límites tanto verticales como laterales de estos sedimentos por su posible uso como material de playa, fueron validados con el muestreo geológico de la etapa de prospección 1:10000.

El resto de los cuerpos definidos en el estudio precedente de Reconocimiento, no poseen las condiciones adecuadas para su extracción.

Los resultados de esta etapa de prospección permitieron definir los contornos del depósito propuesto que forman parte de los recursos indicados para esta etapa, que aun cuando en el presente trabajo no es objetivo presentar sus límites y volúmenes, en la **Figura 11** se muestra una imagen ampliada de los espesores totales de los sedimentos no consolidados del área de mayor perspectiva y la ubicación de los puntos de muestreo geológicos.



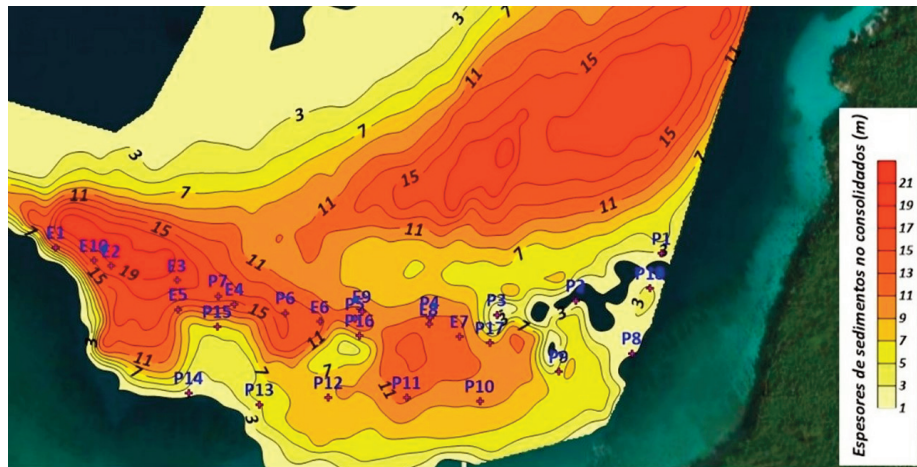


Figura 11. Imagen ampliada de los espesores de sedimentos totales en el área del polígono de mayor perspectiva

El resultado de los análisis granulométricos de las muestras tomadas (Tabla 2), mostró que los sedimentos arenosos están constituidos en lo fundamental por arena media, entre 0.27 y 0.42 mm, pobremente seleccionadas y asimétricas, al atender a los resultados de los parámetros estadísticos determinados mediante el GRADISTAT versión 8.0. Solo dos muestras ubicadas al oeste de esta área clasifican como fina, precisamente donde las características geomorfológicas cambian y la profundidad del fondo donde yace tiene una pendiente mayor y una arena gruesa, cercana al bajo costero.

Los resultados granulométricos en esta etapa de prospección, que clasifican a estos sedimentos como arena en lo fundamental de granulometría de media a fina, justifican su uso como material de playa, dadas las condiciones batimétricas entre -10 y -15 m, espesores mayores de 3 m y localización cercana a la costa para el tipo de tecnología de extracción que se pretende utilizar (draga de tipo succión).

Los resultados de la composición del sedimento, realizado en la muestra 11 (Tabla 3) lo describen como arena biogénica, de color gris con predominio de algas calcáreas, seguida de moluscos, bioclastos no identificados y foraminíferos, muchos granos aparecen teñidos de gris lo que le da una apariencia oscura a la muestra, esta característica la tienen todas las muestras de arena que se tamizaron, la composición también es similar, los granos aparecen

| Id | x | y | Descripción |
|-----|--------|--------|--------------|
| P1 | 635223 | 236089 | Roca |
| P2 | 635097 | 236020 | Roca |
| P3 | 634981 | 235999 | arena media |
| P4 | 634883 | 235995 | |
| P5 | 634773 | 235993 | |
| P6 | 634671 | 236002 | |
| P7 | 634572 | 236027 | |
| P8 | 635179 | 235943 | arena gruesa |
| P9 | 635072 | 235916 | |
| P10 | 634956 | 235873 | arena media |
| P11 | 634849 | 235878 | arena media |
| P12 | 634734 | 235878 | arena media |
| P13 | 634633 | 235868 | arena media |
| P14 | 634529 | 235885 | arena media |
| P15 | 634571 | 235982 | arena media |
| P16 | 634780 | 235969 | arena media |
| P17 | 634971 | 235958 | |
| P18 | 635206 | 236038 | |
| E1 | 634334 | 236098 | Arena media |
| E2 | 634415 | 236071 | Arena fina |
| E3 | 634512 | 236049 | Arena media |
| E4 | 634596 | 236015 | Arena media |
| E5 | 634514 | 236007 | Arena media |
| E6 | 634721 | 235989 | Arena media |
| E7 | 634926 | 235968 | Arena media |
| E8 | 634881 | 235985 | Arena media |
| E9 | 634783 | 236004 | Arena media |
| E10 | 634390 | 236079 | Arena fina |

Tabla 2. Resultados del muestreo geológico helicoidal.

| Muestra | Algas calcáreas [%] | Moluscos [%] | Foraminíferos [%] | Bioclastos no identificados [%] | Otros Grupos [%] | Clasificación |
|---------|---------------------|--------------|-------------------|---------------------------------|------------------|---------------------|
| M - 11 | 58.8 | 18.3 | 8.6 | 12.8 | 1.3 | Arena media, 0.38mm |

Tabla 3. Resultados del análisis de composición del sedimento

pulidos y con aristas subredondeadas sobre todo en algas, muchos han perdido las características morfológicas que los identifican, de ahí el alto por ciento de bioclastos no identificados (12.8 %), en otros grupos aparecen espinas de erizos y briozoos.

Los resultados demuestran que la aplicación de los conceptos sismo-estratigráficos para la interpretación de los datos sísmicos marinos de alta resolución, permiten obtener buenos resultados en la prospección de arena marina, al diferenciar los tipos principales de configuraciones de reflexión que caracterizan a las capas de sedimentos recientes, además de tener en cuenta la respuesta acústica y la penetración lograda con el perfilador sísmico. La caracterización de los sedimentos recientes de la plataforma marina resulta difícil, depende del sitio. Según autores como Ionin, Pawlidis y Avello (1977), plantean que la composición litológica de los sedimentos que se encuentran en la plataforma cubana posee una característica propia, la cual está relacionada con factores como las particularidades morfológicas de la plataforma, las características de las fuentes de abasto sedimentario, el clima, particularidades del transporte del material terrígeno, la influencia de algunas masas de aguas oceánicas y el carácter de los procesos hidrodinámicos (Ionin *et al.*, 1977). Es por ello que la aplicación combinada de los métodos acústicos y herramientas como la sismo-estratigrafía, permiten caracterizar la geología del área, los ambientes de deposición, la estructura sedimentaria, así como inferir la composición de los sedimentos en los territorios marino-costeros.

Con la calidad de los registros sísmicos se visualizaron las diferentes unidades sísmicas e inferir los tipos de sedimentos, no solo de acuerdo con la morfo-

logía del fondo y subfondo marinos y patrones típicos, sino también de acuerdo con la respuesta acústica de estas unidades y la penetración lograda en el subfondo, de acuerdo con los análisis indicados con anterioridad por Damuth (1975), que penetraciones del subfondo limitadas sugieren la presencia de sedimentos de granos de tamaños relativamente gruesos, mientras una penetración profunda sugiere granos de tamaños finos. Las tres unidades sísmicas determinadas en el área permitieron caracterizar de forma general la geología y ambientes de deposición fundamentales.

Los resultados de la investigación geofísica y los trabajos geológicos con barrena helicoidal en los 28 puntos de muestreo, permitieron trazar los límites verticales y laterales entre los tipos de sedimentos con vistas a la delimitación del bloque o cuerpo de arena a proponer para los fines de recuperación de playas. La justificación de la propuesta del cuerpo de arena que se localiza entre las isobatas de -10 y -15 m de profundidad, se basó en las características granulométricas de la arena (en lo fundamental de media a fina), que aun cuando una parte de esta área (margen sureste) se caracteriza por la presencia de arrecifes rocosos sumergidos, además de los bajos costeros, la arena que se pretende extraer mediante una draga de tipo succión, requiere de cierta cercanía a la costa. Los resultados del presente trabajo permiten recomendar la realización de un programa de muestreo, con un menor espaciamiento entre las estaciones, con la finalidad de definir con mayor exactitud los límites espaciales y volumen del material útil posible a emplear para la toma de decisiones correspondientes. Aun cuando en una etapa de detalle, el muestreo se realice con muestreador helicoidal de 1.65 m, deberá definir con mayor

precisión el bloque o cuerpo de arena a proponer para su extracción, con una densidad de la red de muestreo adecuada que permita delimitar los bajos rocosos sumergidos. De acuerdo con los resultados del presente trabajo, en cuanto a los resultados de la granulometría (poca variabilidad espacial en los depósitos de arena), una red de 50 x 50 m permitirá delimitar el bloque de recursos alejado de los bajos rocosos.

La utilidad del empleo de los conceptos sismo-estratigráficos como herramientas fundamentales en la caracterización de los sedimentos marinos, constituyen un primer acercamiento a la caracterización geoacústica de los sedimentos al constituir la base para la construcción del modelo geológico con vistas al modelaje sísmico. Algunas de las propiedades físicas de los sedimentos son inferidas de las propiedades acústicas. Si existe un fuerte contraste de impedancia acústica entre dos capas adyacentes se produce una fuerte reflexión y aunque cambios en el tamaño de los granos de sedimentos detectados en perforaciones pueden que no causen un suficiente contraste de impedancia acústica para ser registrados con las técnicas de sísmica de reflexión, las reflexiones en el registro sísmico por lo general, indican cambios en estructura, litología, densidad, porosidad y otras propiedades que afectan las propiedades acústicas de los sedimentos y roca. Por ello, la combinación de estos aspectos con una visión geológica y geomorfológica y la interpretación sismo-acústica a partir de la aplicación de los criterios y conceptos sismo-estratigráficos, además de la experiencia en la interpretación de los registros sísmicos, resulta esencial en la caracterización geoacústica.

Los resultados sugieren que los procedimientos desarrollados, mejoran de forma significativa las metodologías de búsqueda de arena marina y otras aplicaciones de ingeniería e indicar a los métodos acústicos como técnicas remotas efectivas en la caracterización de los sedimentos marinos con la consecuente disminución de los muestreos *in situ*.

CONCLUSIONES

1. El empleo de conceptos y criterios sismo-estratigráficos como herramientas fundamen-

tales en este trabajo, permitieron caracterizar de forma general la geología del área de estudio y ambiente de deposición, al diferenciar tres unidades sísmicas a partir de sus patrones de estratificación e inferir la composición de los sedimentos.

2. Los resultados geólogo-geofísicos de prospección indicaron que las acumulaciones de sedimentos de mayor perspectiva se localizan precisamente en la unidad sísmica 3 ubicada al sur del área de estudio y cercanas a la margen costera de cayo Saetía, en profundidades de agua entre los -5 y -20 m.

3. El muestreo geológico en etapa de prospección 1:10000, permitió validar los resultados geofísicos y los límites tanto verticales como laterales del depósito de arena propuesto por su posible uso como material de playa, con características granulométricas adecuadas (en lo fundamental de media a fina), de color gris a gris claro, con fragmentos de conchas de moluscos y de compacidad suelta, que aun cuando una parte de esta área (margen sureste) se caracteriza por la presencia de arrecifes rocosos sumergidos, además de los bajos costeros, la arena que se pretende extraer mediante una draga de tipo succión, requiere de cierta cercanía a la costa.

4. Los resultados del presente trabajo permiten recomendar la realización de un programa de muestreo en el cuerpo de arena de mayor perspectiva, con un menor espaciamiento entre las estaciones, con la finalidad de definir con mayor exactitud los límites espaciales, volumen del material útil y categoría del recurso para etapa de exploración. En el resto del área de investigación no se detectaron otras zonas con condiciones favorables para la acumulación de sedimentos no consolidados de interés.

5. Los resultados obtenidos con las técnicas acústicas y la aplicación de criterios y conceptos sismo-estratigráficos para la delimita-

ción de los diferentes horizontes reflectores, constituyen el punto de partida para la caracterización geoacústica de los sedimentos marinos y sugieren que los procedimientos desarrollados mejoran de forma significativa las metodologías de búsqueda de arena marina y otras aplicaciones de ingeniería e indicar a los métodos acústicos como técnicas remotas efectivas en la caracterización de los sedimentos marinos con la consecuente disminución de los muestreos *in situ*.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, M.**, 2020, Reconocimiento arenas Norte Holguín. La Habana, Cuba, Archivo Técnico GEOCUBA Estudios Marinos, Informe técnico.
- Cabrera, M., Ugalde, C. y Pantaleón, G.**, 2004, Mapa Geológico de los Mares Neríticos del Archipiélago Cubano a escala 1:100000. Instituto de Geología y Paleontología/Sociedad Geológica de Cuba.
- Servicio Hidrográfico y geodésico de la República de Cuba**, 1975, Bahía de Nipe y sus accesos. Escala 1:30000. GEOCUBA Estudios Marinos. La Habana.
- GEOCUBA Estudios Marinos, 2003, Derrotero de las Costas de Cuba (Región Marítima S. De Cabo Cruz a Punta María Aguilar. Editor Agencia de Cartografía Náutica. La Habana. 116 pág.
- Corrada, R., Macías, A., Alfonso, I., Nápoles E.**, 1995, Estratigrafía sísmica para la caracterización de los depósitos Pliocuaternarios del Shelf de Cuba. Boletín Resúmenes I Taller Geofísica Somera, 1995.
- Damuth, J. E.**, 1975, Echo character of western equatorial Atlantic floor and its relationship to the dispersal and the distribution of the terrigenous sediments. *Marine Geology* 18:17–45.
- Ortega, F.**, 1995, Estudio para campo de boyas de Felton. La Habana, Cuba, Archivo Técnico GEOCUBA Estudios Marinos, Informe técnico.
- Godínez, G.**, 2002, Investigaciones Ingeniero - Geológicas. Conductora del Ramón, La Habana, Cuba, Archivo Técnico GEOCUBA Estudios Marinos, Informe técnico.
- González, R.**, 2023, Concesión de Investigación Geológica, Arena Marina «El Cristo», Bahía de Nipe, Provincia de Holguín. Informe técnico (inédito). GAMMA (CITMA).
- Hernández, E.**, 2019, Estudio geotécnico para atraques en península del Ramón. La Habana, Cuba, Archivo Técnico GEOCUBA Estudios Marinos, Informe técnico.
- Ionin, A., Pavlidis, Y., Avello, O.**, 1977, Geología de la plataforma de Cuba. Editor: Nauka. Moscú. (Traducción).
- Mitchum, R. M. Jr., Vail, P. R., Sangree, J.B.**, 1977, Seismic stratigraphy and global changes of sea level; Part 6, Seismic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences, in Payton, C.E., ed., *Seismic Stratigraphy—Applications to Hydrocarbon Exploration: American Association of Petroleum Geologists Memoir 26*, p.117-133.
- Perdomo, J. L.**, 2015, Estudios geofísicos en las bahías de Nipe y Levisa para la ubicación de una conductora para agua potable. Provincia Holguín. La Habana, Cuba, Archivo Técnico GEOEM, Informe técnico.
- Petelín, V. M.**, 1967, Análisis granulométrico de los sedimentos marinos. Edit. Nauta, Moscú, pp. 76.
- Ringis, J.**, 1986, Seismic Stratigraphy In Very High Resolution Shallow Marine Seismic Data. *Proceedings of the Joint ASCOPE/CCOP Workshop I*, 119 – 128.
- Sangree, J. B. and Widmier, J. M.**, 1979, Interpretation of depositional facies from seismic data: *Geophysics* v.44, p.131 – 160.
- Sheriff, R.**, 1980, *Seismic Stratigraphy*. International Humans resources development corporation, Bonton, 222.
- Shore Protection Manual**, 1984, Tomo 1. Capítulo 4. Coastal Engineering Research Center, pp 4 – 12.