



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Batimetría de alta resolución
de un sector de la plataforma
de Yucatán al noroeste de
Puerto Progreso**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera Geofísica

P R E S E N T A

Fátima Edith Martínez Chavarría

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Ligia Pérez Cruz



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019



AGRADECIMIENTOS PERSONALES

A los mejores maestros que he tenido en esta vida de quienes aprendí que el amor y el respeto por uno mismo son la clave del éxito: a mis padres. A mi papá por el apoyo y la confianza incondicional que me ha ofrecido toda la vida; a mi mamá por su apoyo y por la motivación de ser cada día mejor. Gracias por todo su amor y comprensión porque sin ustedes esto no habría sido posible.

A mis tres hermanos que me dieron el privilegio de ser tía de los niños más increíbles que existen en este mundo: Julieta, Fernanda, Regina, Ximena y el pequeño Juan, quienes son parte de mi inspiración.

A mi hermano Juan por todo su apoyo y paciencia durante todo este tiempo.

A mi hermano Oswaldo por ser una persona extraordinaria e inyectar paz y alegría a mi vida. Gracias por darme consejos que me ayudaron a levantarme en los momentos más difíciles y por alentarme a seguir adelante y dar lo mejor de mí.

A mi hermano Eder por ser mi mayor ejemplo de que con disciplina, esfuerzo y dedicación todo lo que te propongas lo puedes hacer realidad.

A mis amigos por su apoyo y con quienes he vivido muchas experiencias: Zoe y Richi por su amistad incondicional durante los últimos nueve años de mi vida; Ed por los buenos consejos tanto académicos como personales; Viri por todas las aventuras en las prácticas de campo; y Angel por compartir su conocimiento y experiencia conmigo. También a mis compañeros de laboratorio por su apoyo, amistad y compañía: Mau, Isa, Rafa, Mary y Edgar.



A la Dra. Ligia por todo su apoyo y la confianza brindada desde el momento que crucé las puertas del laboratorio. Gracias por las pláticas constructivas, las cuales me ayudaron a comprender temas tanto en el ámbito académico como en el personal.

A Dani por el apoyo incondicional que me brindó durante la elaboración de este trabajo. El conocimiento y la experiencia que tiene en la materia me motivaban a esforzarme y aprender más cada día. Gracias por alentarme a seguir adelante para que las cosas salieran cada vez mejor, pero sobre todo por los consejos y ánimos en los momentos que más los necesitaba.



AGRADECIMIENTOS ACADÉMICOS

A la mejor universidad de Latinoamérica por la oportunidad de conocer personas maravillosas que contribuyeron a mi formación académica: mi amada UNAM, mi segunda casa durante los años de mi carrera.

Al financiamiento otorgado por los proyectos: G118 “Paleoceanografía y Paleoclimas en los mares mexicanos” (Responsable Dra. Ligia Pérez Cruz, Instituto de Geofísica) y DGAPA-PAPIIT IG101115 “Vinculación investigación-docencia en Exploración Geofísica, perforación de pozos y Paleoceanografía” (Responsable Dr. Jaime Urrutia Fucugauchi, Instituto de Geofísica)

A la Dra. Ligia Pérez Cruz por brindarme la oportunidad de participar en las campañas oceanográficas PALEOMAR III y CHICXULUB IV donde aprendí el manejo de equipos y adquisición de datos a bordo de los buques, lo que contribuyó a mi formación académica y profesional.

Al M. en C. Daniel A. Pérez Calderón por el apoyo técnico para la realización de este trabajo.

Al Dr. Miguel Ángel Días Flores por el apoyo en etapas importantes de este trabajo, además de sus conocimientos y experiencias transmitidas.

Al Dr. Jaime Urrutia Fucugauchi y a la Dra. Iza Canales García miembros del jurado por su tiempo y comentarios para enriquecer este trabajo.

Al Servicio Mareográfico Nacional por proporcionar los datos de marea de las estaciones Progreso y Sisal.

A la tripulación del B/O “Justo Sierra”, por su trabajo y dedicación al efectuar las maniobras necesarias para llevar a cabo la adquisición de datos.



RESUMEN

La batimetría multihaz de alta resolución proporciona información más precisa de la morfología y profundidades del fondo marino contribuyendo a la actualización de cartas náuticas existentes, generando así mayor información para la navegación marítima. Además, proporcionan información para la investigación de los procesos geológicos y físicos que modelan el lecho marino. Sin embargo, en la plataforma de Yucatán los estudios de batimetría multihaz de alta resolución son muy escasos por lo que hay muy poca información sobre los procesos que alteran la morfología del lecho marino de la plataforma. Es por ello que en el 2013 y 2015 se realizaron campañas de geofísica marina a bordo del B/O “Justo Sierra” donde se adquirieron datos batimétricos multihaz al noroeste de Puerto Progreso, dentro de la región marina del cráter de impacto Chicxulub, teniendo como resultado mapas de batimetría que muestran diversas estructuras geológicas como: disoluciones relacionadas a la erosión kárstica por la exposición del lecho marino debido a los cambios del nivel del mar; un canal sinuoso, franjas con dirección NE-SW y arrecifes coralinos orientados en diferentes direcciones asociados a la circulación de corrientes marinas. El trabajo de adquisición, procesamiento e interpretación de los datos mencionados, es presentado en este trabajo.



ÍNDICE

Agradecimientos personales.....	2
Agradecimientos académicos	4
Resumen	5
i. Introducción	7
ii. Objetivo	8
iii. Área de estudio.....	8
iv. Antecedentes	10
iv.1. Marco geológico.....	10
iv.1.1. Evolución geológica de la plataforma de Yucatán.....	10
iv.1.2. Factores que influyen en los procesos sedimentarios de la plataforma de Yucatán.....	11
iv.2. Estudios batimétricos previos	13
v. Marco teórico.....	14
v.1. Onda acústica	15
v.2. Sistemas hidroacústicos	17
v.2.1. Ecosonda Monohaz	18
v.2.2. Ecosonda Multihaz	20
v. 3. Equipos para la medición de la velocidad del sonido	21
vi. Métodos	24
vi.1. Adquisición de datos batimétricos a bordo del buque	24
vi.2. Análisis y procesamiento de datos.	28
vi.2.1. Análisis.	28
vi.2.2. Procesamiento de datos	29
vii. Resultados	40
viii. Discusión	65
ix. Conclusiones	74
x. Referencias	75



I. INTRODUCCIÓN

La batimetría se refiere al estudio de la topografía del fondo oceánico. Su estudio es relevante para una amplia gama de temas de investigación y de impacto social como: (1) el modelado de la circulación oceánica, (2) el monitoreo de hábitats marinos, arqueología subacuática, navegación marítima, protección ambiental y (3) exploración de recursos marinos.

En la actualidad, la batimetría utiliza sistemas hidroacústicos (ecosondas) cada vez más sofisticados, con distintas características, dependiendo del enfoque que se persiga. Los costos de estos equipos, al igual que el tiempo y mantenimiento del buque son significativos, por lo que el gasto en la obtención de datos es elevado.

En este trabajo se utilizaron datos batimétricos obtenidos en dos expediciones científicas: Chicxulub I y Chicxulub II, en la plataforma continental de la Península de Yucatán, a bordo del B/O “Justo Sierra” de la UNAM. Para su adquisición, se tuvieron que contemplar: (a) características de los sistemas hidroacústicos a bordo del buque y (b) requisitos y calibraciones necesarias durante el levantamiento batimétrico; mientras que, para mejorar la calidad de los mapas batimétricos se realizó un procesamiento detallado de los datos.

El área de estudio reviste gran importancia científica ya que se encuentra dentro de la región marina del cráter de Impacto de Chicxulub, por lo que el contar con mapas de batimetría de alta resolución será de gran apoyo para los estudios de geofísica marina, geología marina, oceanografía física y de los ecosistemas marinos en esta zona.



II. OBJETIVO

Mapear la morfología y los rasgos topográficos del piso oceánico, a partir de datos batimétricos de alta resolución, en la plataforma continental de Yucatán, en un sector al noroeste de Puerto de Progreso, comprendido en la región marina del cráter de impacto Chicxulub.

III. ÁREA DE ESTUDIO

La plataforma de Yucatán es la parte sumergida de una meseta baja en la cuenca del Golfo de México que incluye la Península de Yucatán y cubre aproximadamente una superficie de 300,000 km². Morfológicamente está limitada al norte y noroeste por el Talud continental del Banco de Campeche; al sur desde el Petén en Guatemala hasta las montañas Maya en Belice; al este por el Talud continental del mar Caribe y al oeste por la planicie costera del Golfo de México de los estados de Campeche y Tabasco (Logan et al., 1969; López, 1973) (Figura 1).

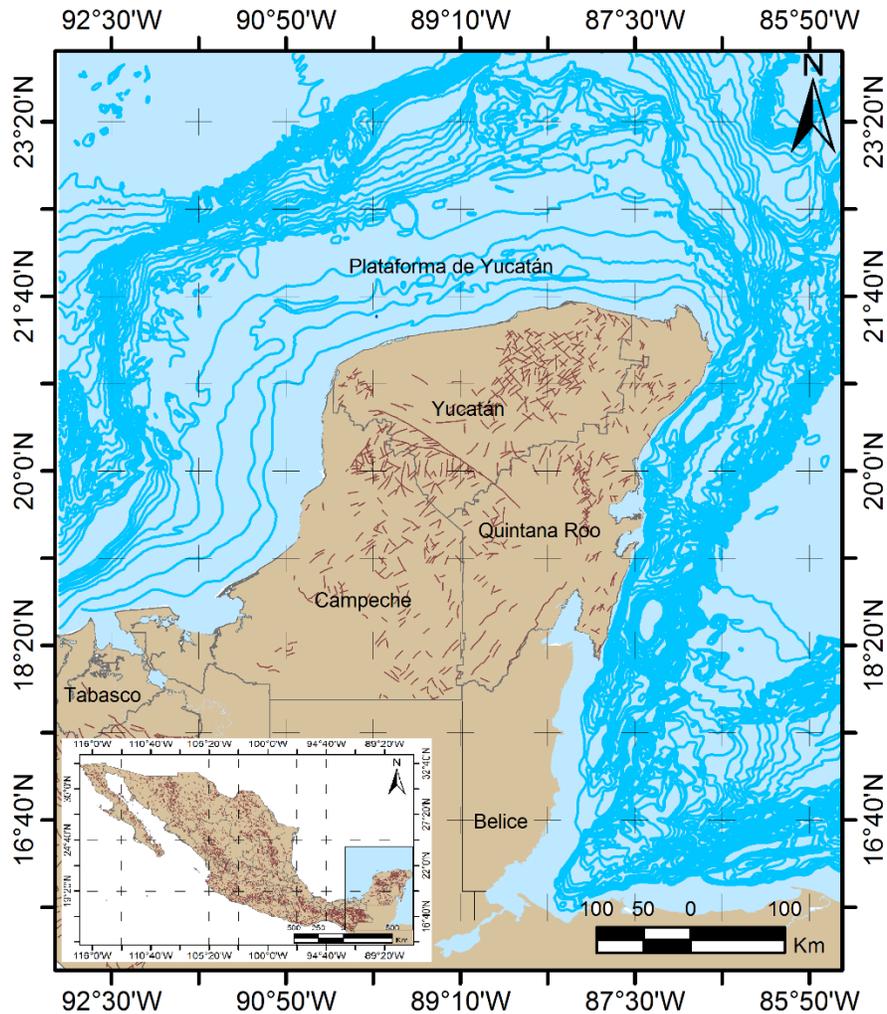


Figura 1. Plataforma de Yucatán en el Golfo de México. La parte continental abarca los estados de Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo. La parte marina la limita el talud continental del Banco de Campeche (Mapa creado con datos de CONABIO e INEGI).

Esta zona es un vasto y enorme terreno poco explorado, que después de haber estado expuesto de manera continua durante decenas o miles de años, desde la última elevación del nivel del mar, la plataforma carbonatada ha experimentado erosión kárstica significativa, que fue preservada después de la inundación por el ascenso del nivel del mar, y se mantuvo en el piso marino, debido a condiciones de no depósito (Goff et al., 2016)



IV. ANTECEDENTES

IV.1. Marco geológico

IV.1.1. Evolución geológica de la plataforma de Yucatán

La plataforma de Yucatán, también conocida como Bloque Yucatán, surge de la evolución geológica de la cuenca del Golfo de México cuando la ruptura de Pangea desvió la placa de América del Norte lejos de las placas de África y América del sur durante el periodo Triásico. Después, se reconocen dos periodos en la evolución estructural de la cuenca:

1) Un período de ruptura activa que va desde el Triásico Tardío hasta el Jurásico Medio. En este periodo probablemente la corteza continental sólo estuvo sujeta a hundimientos lentos y a ensanchamientos de *grabens* que poco a poco fueron inundados por las aguas del Pacífico. Durante el Jurásico Medio se formaron depósitos de sal en una gran cuenca de miles de kilómetros en la porción central del Golfo de México, que hoy se encuentra dividida en dos partes (una al Norte y otra al Sur), por una franja donde no hay sal, con una orientación Este-Oeste. Esta evidencia sugiere que en esa parte del Golfo existió una zona más alta y más estrecha, asociada con la presencia de una cresta de generación de corteza oceánica que indujo el movimiento del bloque de Yucatán hacia el sur junto con Yucatán (Amos, 1991; Padilla y Sánchez, 2007).

El movimiento se realizó a lo largo de dos sistemas de fallas transformantes. El sistema occidental fue denominado “Falla Transformante Tamaulipas-Oaxaca” (Robin, 1982; Padilla y Sánchez, 1986). Esta falla fue muy importante en la apertura y posterior



evolución tectónica del golfo por su forma de arco de círculo, lo que ayudó a que el Bloque Yucatán tuviera un deslizamiento lateral durante el Jurásico Temprano-Medio. Este movimiento hizo girar a Yucatán 49° en sentido contrario a las manecillas del reloj, lo cual es concordante con datos paleomagnéticos (Guerrero-García, 1975; Pindell y Kennan, 2003 en Padilla y Sánchez, 2007).

2) La mayor parte del Jurásico Tardío, fue un período tectónicamente tranquilo caracterizado por el hundimiento prolongado de la parte central de la cuenca del Golfo de México. (Amos, 1991). Entre el Jurásico Tardío y Cretácico Temprano la plataforma de Yucatán alcanzó la posición que ocupa actualmente, y estuvo sujeta a una subsidencia lenta pero continua. En esta etapa se depositaron sedimentos marinos de carbonatos y lodos calcáreos hasta el Pleistoceno. (López, 1973; Hildebrand et. al., 1991; Padilla y Sánchez, 2007).

IV.1.2. Factores que influyen en los procesos sedimentarios de la plataforma de Yucatán

La falta de actividad tectónica en la plataforma de Yucatán facilitó la precipitación de carbonatos teniendo una amplia distribución de sedimentos marinos en la que se pueden identificar cuatro zonas (Figura 2): Sigsbee, Progreso, Sisal, y arrecifes de Yucatán y arenas Veneer (Logan, et al., 1969).

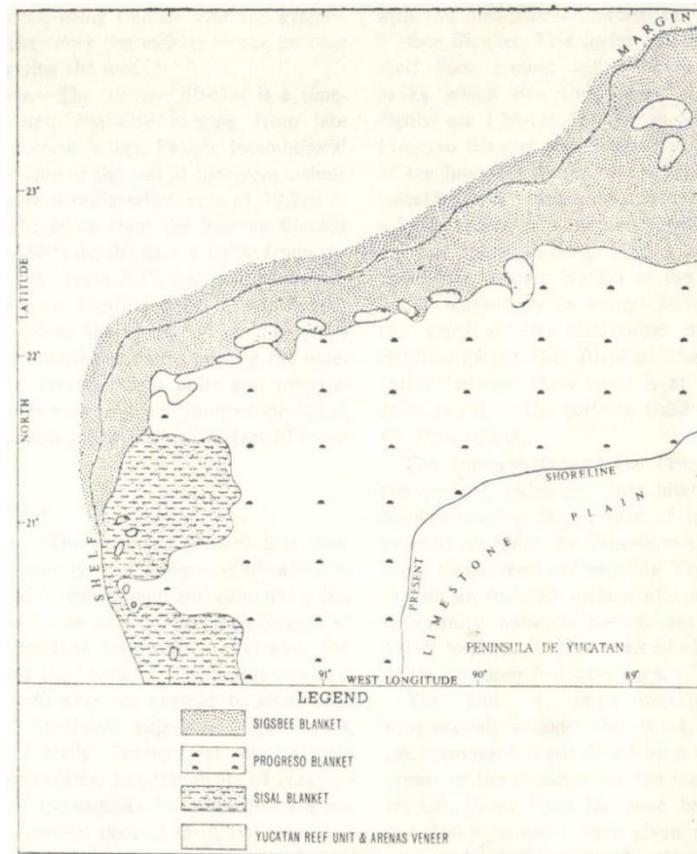


Figura 2. Distribución de sedimentos en la plataforma de Yucatán (Tomado de Logan et al., 1969)

Los sedimentos de Progreso (en el área cercana a las costas norte y oeste de la península de Yucatán), se caracterizan por tener un espesor de 0 a 1.2 m de arenas de fragmentos de carbonato biogénico (algas, moluscos, foraminíferos) y fragmentos de roca caliza. El material terrígeno es escaso debido a la carencia de ríos en la Península (McFarlan & Menes, 1991).

La distribución de los sedimentos marinos en la plataforma continental, está influenciada por la circulación de las corrientes marinas: en particular, a profundidades menores a 200 m, éstas se deben principalmente a los vientos y mareas. Las corrientes inducidas por mareas en aguas poco profundas son distorsionadas por la fricción del



fondo lo que ocasiona que el material sea resuspendido afectando la morfología de la costa (Periáñez, 2010).

La morfología del lecho marino en la plataforma de Yucatán, además de ser influenciada por las corrientes marinas, también es afectada por la disolución de la roca caliza por diferentes mecanismos físico-químicos, por ejemplo: descenso de pH (provocada por la incorporación de CO_2) y mezcla de aguas con distinto contenido de CO_2 (Rossi, 2010). Este tipo de disolución se conoce como karsticidad y se caracteriza principalmente por corrientes de hundimiento, cuevas y depresiones cerradas (Ford et al. 2007). Las depresiones se conocen por diferentes nombres de acuerdo a su tamaño y formación, y en el caso de Yucatán, las más comunes son los llamados cenotes.

IV.2. Estudios batimétricos previos

Se han realizado campañas oceanográficas para el mapeo del borde de la plataforma, lo que se conoce como Escarpe de Campeche (p. ejemplo: Paull et al., 2014). Sin embargo, en la zona cercana a la costa los estudios batimétricos de alta resolución son muy escasos.

Las páginas de instituciones de gobierno como la Secretaría de Marina (SEMAR), el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) o la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), cuentan con bases de datos batimétricos los cuales se pueden descargar de manera gratuita (Figura 1). No obstante, la resolución es muy baja por lo que es necesario el levantamiento de nuevos datos que permitan generar un mapa detallado del lecho marino.

En el 2013 un equipo de investigación de la Facultad de Ciencias de la Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación Sisal (Zarco-

Perelló et al., 2013) obtuvo información entre las isóbatas de 9 m a 21 m, sobre la topografía y la comunidad coralina asociada de tres arrecifes en el Golfo de México: Sisal, Madagascar y Serpiente (Figura 3), en la parte occidental de la zona de estudio.

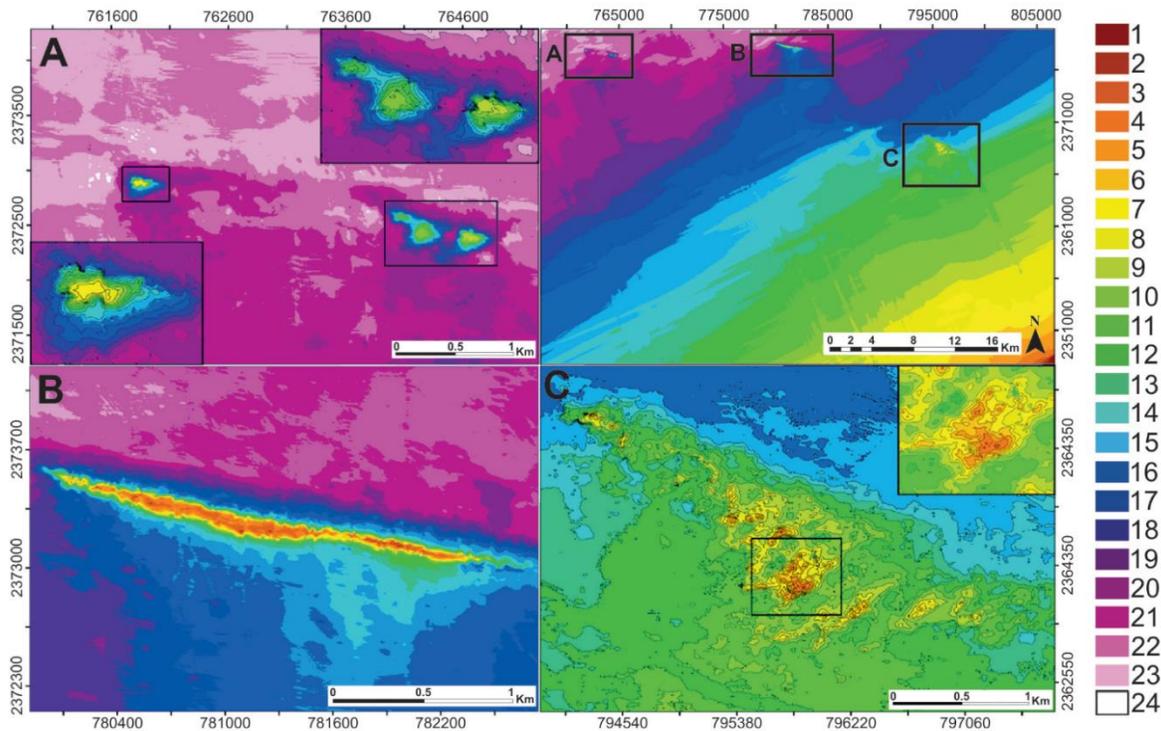


Figura 3. Mapa batimétrico de los tres arrecifes. a) Arrecife Serpiente ubicado a 54 km de la costa; b) Arrecife Madagascar, ubicado a 40 km de la costa; c) Arrecife Sisal, ubicado a 23 km de la costa. Coordenadas en el sistema UTM 15 N (Tomado de Zarco-Perelló et al., 2013).

V. MARCO TEÓRICO

El conocimiento de la batimetría del piso oceánico es de gran interés para las investigaciones oceanográficas de exploración geofísica y elaboración o actualización de cartas náuticas. El levantamiento batimétrico está basado en la adquisición de datos a través de instrumentación acústica (Michaud et al., 2009).



Para llevar a cabo la adquisición de datos se utilizan equipos que se basan en la emisión de ondas acústicas a través de un transmisor a una determinada frecuencia; estas ondas o *ecos* viajan en toda la columna de agua hasta reflejarse en el fondo marino, posteriormente las ondas son registradas por un receptor para obtener información referente al tiempo de viaje de la onda y así conocer la profundidad.

Debido a que la batimetría utiliza técnicas para medir las profundidades del fondo del mar con instrumentos hidroacústicos, es importante conocer las características de las ondas acústicas como: frecuencia, longitud de onda y a qué velocidad viajan en el agua de mar. Por este motivo se describen los siguientes conceptos.

V.1. Onda acústica

La onda acústica es una onda elástica que tiene un movimiento armónico simple, es decir, se propaga como una función del tiempo y la distancia (longitud de onda) con un desplazamiento periódico (frecuencia) (Figura 4). La frecuencia (f) es el número de oscilaciones dentro de una unidad de tiempo (Tago, 2016) y van desde 1 Hz (1 Hz = 1 vibración por segundo) hasta miles de kilohertz (1 kHz = 1000 ciclos / s), mientras que la longitud de onda (λ) es la distancia transcurrida entre dos máximos sucesivos en donde se repite el desplazamiento y la velocidad (v) (Kinsler, 2000).

La λ depende de la velocidad y la frecuencia de la onda. Su fórmula es:

$$\lambda = \frac{v}{f} \dots (1.1)$$

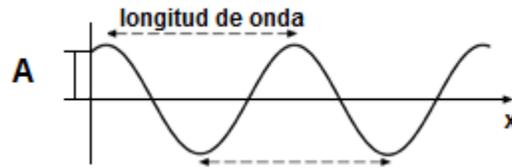


Figura 4. Longitud y amplitud de una onda armónica.

En la ecuación 1.1 se observa que a mayor frecuencia se tiene una λ más pequeña mientras que, a menor frecuencia la λ será mayor. Es decir, con una frecuencia alta la λ recorre menos distancia y con una frecuencia baja la distancia que recorre la onda es mayor (Figura 5).

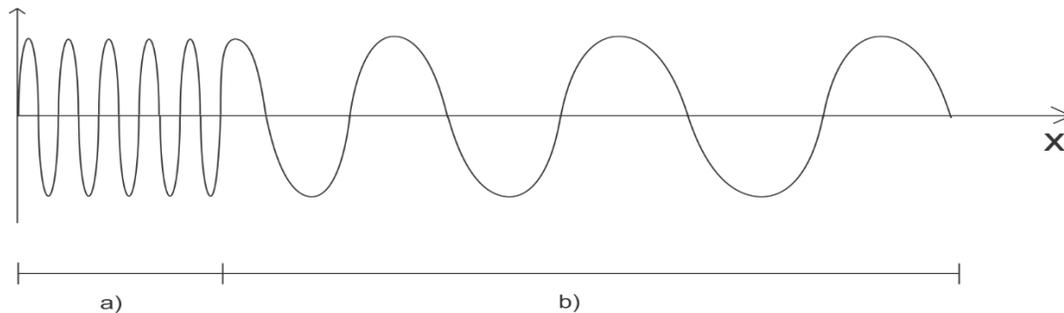


Figura 5. a) A una mayor frecuencia la onda recorre menos distancia; b) A menor frecuencia la onda recorre más distancia. Ambos casos tienen la misma duración en tiempo.

Las longitudes de onda del sonido se propagan a través del agua a una velocidad promedio de 1500 m/s. Sin embargo, dicha propagación depende de las propiedades físicas del agua, es decir, de la temperatura, salinidad y densidad. La fórmula (1.2) propuesta por Del Grosso (1974) para determinar la velocidad del sonido (c) es:

$$c = (\beta\rho)^{-\frac{1}{2}}; \quad \beta = \rho^{-1}\left(\frac{\partial\rho}{\partial p}\right)_{\theta,S} \dots (1.2)$$

Donde β es la compresibilidad adiabática del agua de mar (con el potencial de temperatura y salinidad constantes), ρ es la densidad, p es la presión, θ es el potencial de temperatura y S el de salinidad (Talley et al., 2011).



Dado que las condiciones de temperatura y salinidad son distintas a diferentes profundidades, es importante registrar estas propiedades físicas y químicas del agua para identificar los cambios de velocidad en la columna de agua y con ello calibrar los equipos hidroacústicos.

V.2. Sistemas hidroacústicos

Las ecosondas son sistemas hidroacústicos que se componen principalmente de un transmisor (fuente) y un receptor; el transmisor emite un pulso o *ping* (onda acústica) que viaja en el agua hasta reflejarse en el fondo marino produciendo *ecos*; estos ecos regresan a superficie donde el receptor recibe la señal. Cuando se manda el pulso, la frecuencia sufre un cambio aparente debido al movimiento relativo entre el transmisor y el receptor. Esto quiere decir que, si tenemos una fuente en movimiento, la frecuencia aumenta cuando el transmisor está más cerca del receptor, mientras que, si el transmisor se aleja del receptor la frecuencia es menor que la original (Figura 6). A este efecto se le conoce como *Efecto Doppler*.

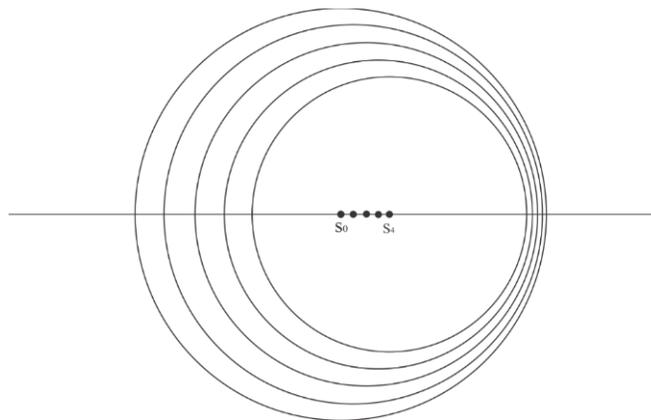


Figura 6. Una fuente S viaja en línea recta con una velocidad u a una frecuencia f . En un intervalo de tiempo τ , la fuente emite un pulso a una frecuencia generando frentes de onda circulares que están comprimidos dentro de otro (Modificada de French, 2006).

La energía acústica que transmite la ecosonda se dirige a través de uno o varios haces que registran el tiempo de viaje que tarda la onda desde que es emitida hasta que regresa. El número de haces depende del modelo, pero lo más importante es conocer el funcionamiento de los equipos, por ello a continuación se explican los dos diferentes tipos de ecosondas: monohaz y multihaz.

V.2.1. Ecosonda Monohaz

Una ecosonda monohaz es un sistema que transmite un pulso acústico dirigido a un sólo haz en forma de cono. En la base del cono (huella acústica) el pulso se refleja en distintas direcciones (Figura 7) por lo que se registran diferentes valores de profundidad, de modo que el equipo realiza un promedio para obtener un sólo valor de profundidad. En consecuencia, este equipo permite registrar valores de lecho marino a manera de perfil 2D y los mapas que se obtienen son limitados por su baja cobertura.

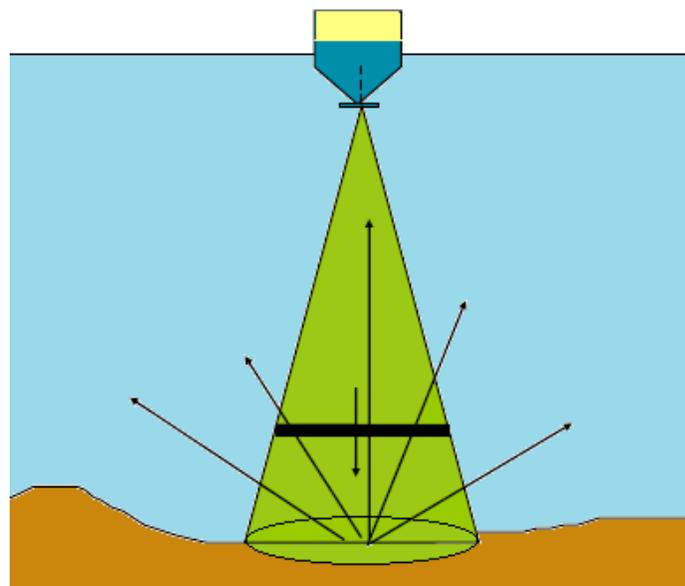


Figura 7. Proyección del haz en la columna de agua. En la base del cono se refleja el pulso en diferentes direcciones (Modificada de Kongsberg, 2016).



Para el cálculo de la profundidad se requiere el tiempo de viaje de la onda y la velocidad del sonido. Sin embargo, el tiempo de viaje registrado es el tiempo total que recorre la onda acústica en toda la columna de agua (ida y vuelta), por esta razón el tiempo se divide entre dos (ecuación 1.3).

$$D = c_{prom} \cdot \frac{T}{2} \dots (1.3)$$

Donde:

$D = \text{profundidad}$

$c_{prom} = \text{velocidad promedio del sonido en el agua } (1500 \frac{m}{s})$

$T = \text{tiempo total}$

Otro aspecto importante es el ancho del haz (Figura 8) ya que de esto depende el área de cobertura cuando se realiza un levantamiento batimétrico. Para calcular el ancho del haz se utiliza la ecuación (1.4) (Kongsberg, 2016).

$$\text{ancho del haz (grados)} = \frac{100}{L(m) \cdot f(kHz)} \dots (1.4)$$

Donde $L(m)$ es la longitud del transductor.

De aquí se infiere que, a mayor frecuencia, el ancho del haz es más pequeño, y viceversa. La frecuencia además de ser relevante para el ancho del haz, también lo es para conocer la distancia que puede recorrer el pulso (mayor frecuencia menor distancia recorrida). Por esta razón, para la investigación en aguas someras (tirantes de agua

menores a 200 m) los equipos utilizados son de alta frecuencia y por el contrario, para aguas profundas (tirantes de agua mayores a 200 m) se utilizan equipos de frecuencias bajas.

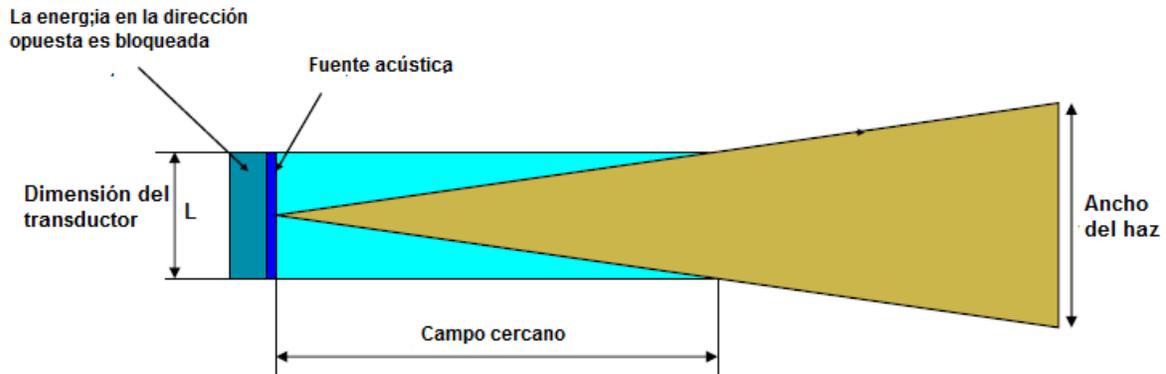


Figura 8. Imagen que muestra el ancho de un haz y las dimensiones del transductor (Modificada de Kongsberg, 2016).

V.2.2. Ecosonda Multihaz

El principio de la ecosonda multihaz es dirigir un pulso a un mayor número de haces a diferentes frecuencias. En la Figura 9 se muestra la configuración del arreglo de los transductores de una ecosonda multihaz, en donde se puede observar que los transductores verticales (en dirección de proa y popa) emiten el pulso y los horizontales (babor y estribor) reciben la señal.

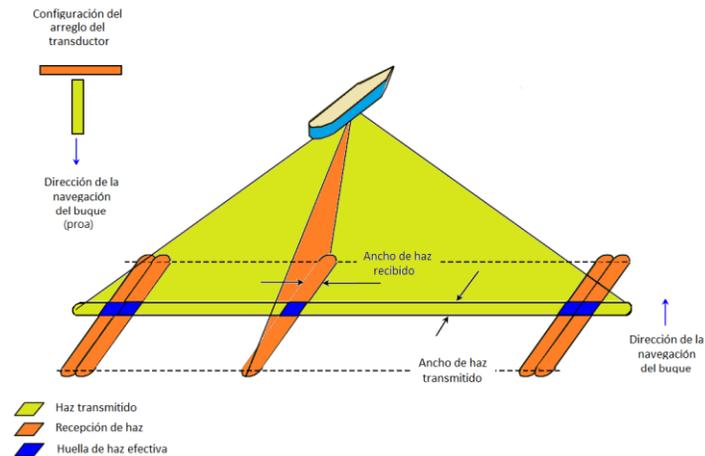


Figura 9. Arreglo de transductores y su huella acústica (Modificado de Kongsberg, 2016).

Este equipo utiliza el mismo principio de la ecosonda monohaz para obtener un sólo valor de profundidad para cada haz, sin embargo, como el equipo multihaz maneja varios haces simultáneamente, el número de datos de profundidad es mayor y por ende, la resolución es mejor.

La diferencia entre una ecosonda monohaz y una multihaz es, que la primera trabaja con un haz generando un perfil abarcando un área muy reducida y con muy baja resolución, de modo que, para realizar un levantamiento, el tiempo de la adquisición será mayor a diferencia de utilizar un equipo multihaz, donde la resolución es mayor al igual que la cobertura lo que permite tener más información del fondo marino. Aunado a esto, el tiempo para hacer un levantamiento de un área extensa es menor debido a la cantidad de haces que utiliza, además de que permite hacer la compensación de los movimientos del barco (*roll*, *pitch* y *heave*).

V. 3. Equipos para la medición de la velocidad del sonido

Conocer la velocidad del sonido en la columna de agua permite calibrar los equipos hidroacústicos para detectar con mayor precisión el fondo marino y así obtener una mejor calidad de los datos del levantamiento



batimétrico. Es por esto que, el registro del perfil de velocidad del sonido se debe adquirir dentro de la zona de estudio, las veces que sea necesario, dado que las condiciones de temperatura y salinidad varían con respecto a la profundidad.

Es decir, si hay cambios abruptos en la profundidad, se tiene que realizar nuevos perfiles, ya que las ondas atraviesan una columna de agua mayor con distintos parámetros fisicoquímicos (temperatura y salinidad).

Para el registro del perfil de la velocidad del sonido se pueden utilizar dos equipos: a) el Perfilador de Velocidad Acústica (SVP por sus siglas en inglés) el cual mide la densidad, temperatura y salinidad del agua, y con base en estos parámetros calcula la velocidad del sonido en la columna de agua a profundidad (Figura 10a); o b) el sensor múltiple de Conductividad, Temperatura y Profundidad (CTD por sus siglas en inglés) (Figura 10b).

La diferencia de utilizar un equipo u otro, radica en que, el SVP obtiene valores de velocidad de sonido de la columna de agua directamente, proporcionando al usuario un perfil de velocidad que puede ser ingresado al sistema de registro de batimetría multihaz directamente para su calibración; mientras que, el CTD mide los parámetros de conductividad, temperatura y profundidad únicamente, y a partir de ellos, se crea un perfil de velocidad de sonido.

Ambos equipos son enviados a realizar el registro de los valores correspondientes, tomando en cuenta que el SVP descienda a lo largo de la columna de agua en forma vertical, para evitar errores en la adquisición de los datos, por eso se sujeta a la estructura de la Roseta como se muestra en la Figura 10b.

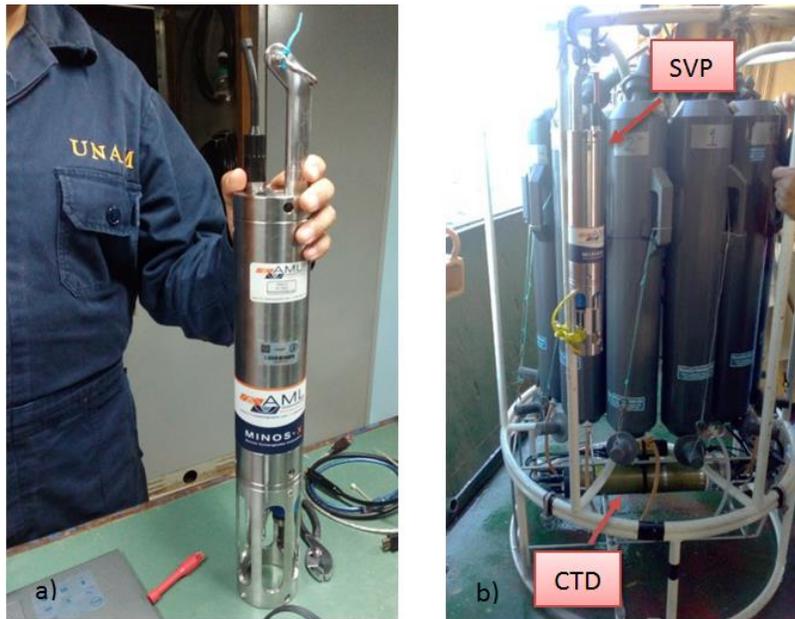


Figura 10. a) Sound Velocity Profile (SVP); b) Sensores de CTD y botellas Niskin. Si la velocidad del sonido no es considerada durante la adquisición de los datos puede ocasionar imprecisiones al momento que la ecosonda registra el fondo marino como se muestra en la Figura 11.

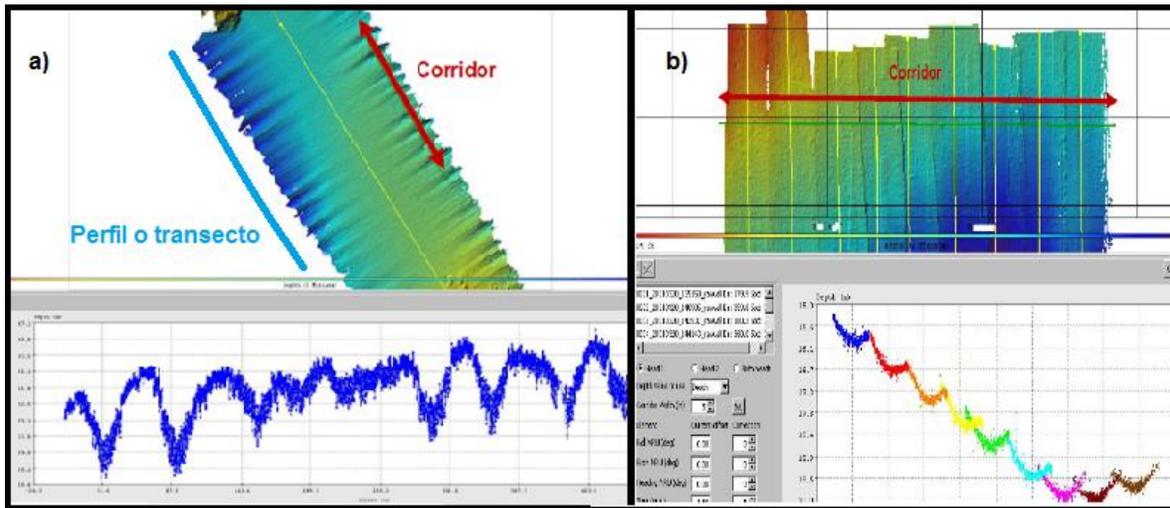


Figura 11. Transectos sin considerar el perfil de la velocidad del sonido. a) Se presentan ondulaciones en los extremos del perfil; b) En la vista perpendicular a los transectos se forman “sonrisas” (Modificado de Kongsberg, 2014).



VI. MÉTODOS

VI.1. Adquisición de datos batimétricos a bordo del buque

Los levantamientos de datos de batimetría multihaz analizados en este trabajo, se llevaron a cabo durante las campañas oceanográficas de geofísica marina “Chicxulub I” y “Chicxulub II”, a bordo del Buque Oceanográfico “Justo Sierra” de la UNAM del 17 al 22 de abril del 2013 y del 23 al 27 de abril del 2015 respectivamente. Dichas campañas se realizaron en la región de la plataforma continental de la península de Yucatán, al noroeste de Progreso (Figura 12). Las áreas de estudios se encuentran en las latitudes de $21^{\circ} 25' N$ y $21^{\circ} 42' N$, y las longitudes de $89^{\circ} 52' W$ y $89^{\circ} 58' W$ y estuvieron a cargo de la Dra. Ligia Pérez Cruz como Jefa de campaña, y quien es Investigadora del Instituto de Geofísica de la UNAM.

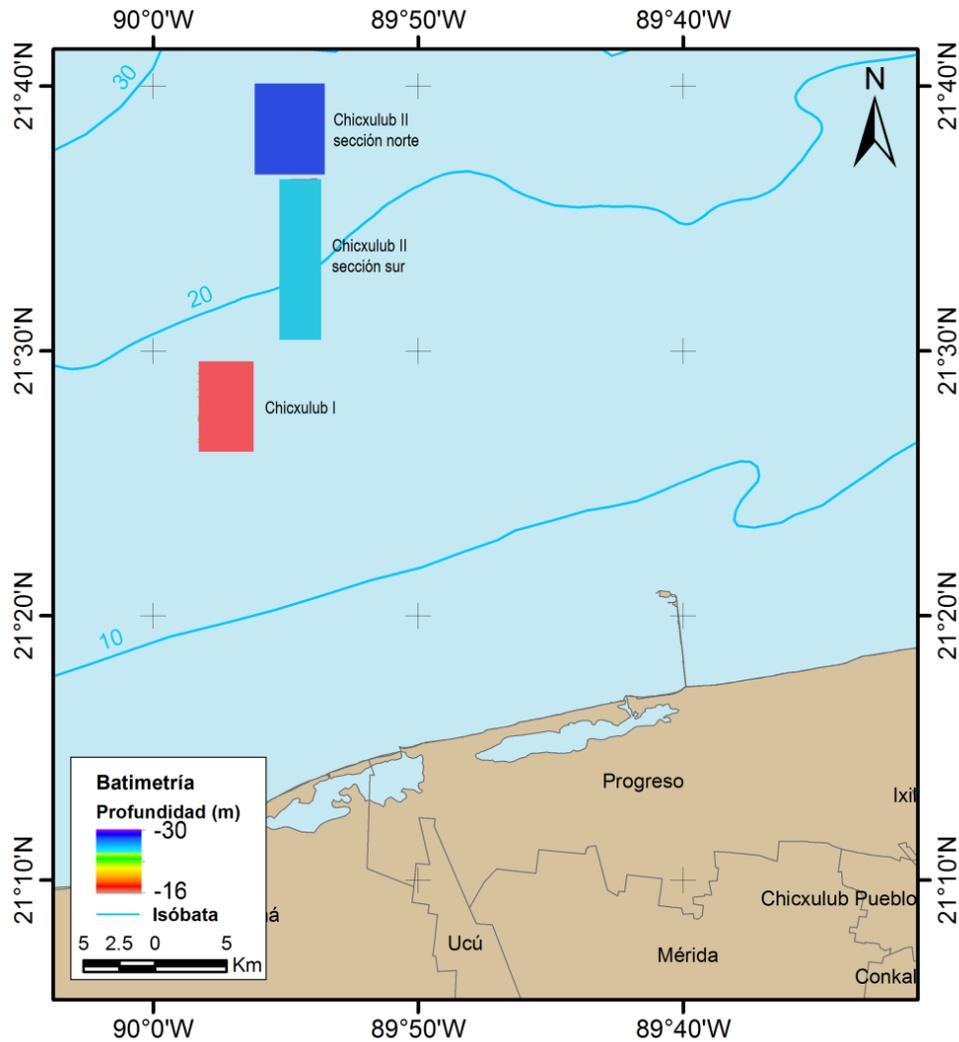


Figura 12. El levantamiento batimétrico de la campaña Chicxulub I se marca con un rectángulo rojo y el levantamiento batimétrico de la campaña Chicxulub II con color azul. Esta última campaña se divide en sección norte y sur.

La campaña Chixculub I se realizó en colaboración con instituciones internacionales y el Instituto de Geofísica de la UNAM. El levantamiento batimétrico se realizó en un tirante de agua que tiene como profundidad entre 15 m y 19 m. Se trazaron 160 transectos (Tabla 1) que cubrieron una superficie de 15.99 km² con un ancho del barrido de la ecosoda (swath) de 60 m a 65 m.



Día	Número de transectos	Orientación
17	19	N-S
18	21	N-S
	12	E-W
19	30	N-S
	1	E-W
20	19	N-S
	21	E-W
22	6	N-S
	31	E-W
Total	160	

Tabla 1. Transectos del levantamiento batimétrico de la campaña Chicxulub I.

La campaña Chicxulub II, es parte del proyecto del Dr. Jaime Urrutia Fucugauchi del Instituto de Geofísica de la UNAM. Para esta campaña, el levantamiento se llevó a cabo en dos secciones (Figura 12): 1) en la sección norte se adquirieron 83 transectos con orientación Este-Oeste (Tabla 2), con un ancho de barrido de la ecosonda de 42 m a 58 m y una separación entre transectos de 20 m a 38 m a una profundidad entre 17 m y 31 m, cubriendo una superficie de 27.072 km²; 2) en la sección sur se adquirieron 30 transectos con orientación Norte-Sur (Tabla 2) con un ancho del barrido de la ecosonda de 44 m a 65 m y una separación entre transectos de 24 m a 36 m, a profundidades entre 17 m y 25 m, abarcando una superficie de 24.381 km².

Día	Número de transectos	Orientación
23	27	E-W
24	49	E-W
25	7	E-W
26	24	N-S
27	6	N-S
Total	113	

Tabla 2. Transectos del levantamiento batimétrico de la campaña Chicxulub II.

Para el levantamiento batimétrico de ambas campañas se consideró una velocidad de buque entre 4 y 5 nudos, con el propósito de mejorar la respuesta acústica en la adquisición de los datos.



Los equipos utilizados para la calibración de los datos y el levantamiento batimétrico fueron:

- CTD para el registro de los valores de temperatura, conductividad y densidad con los cuales se obtuvieron los perfiles de velocidad del sonido.
- Sistema de posicionamiento SeatexSeapath 200 para la navegación.
- Ecosonda multihaz, marca Kongsberg-Simrad, modelo EM3002. Esta ecosonda utiliza una frecuencia de 300 kHz y emite 254 haces por ping; realiza batimetría de alta resolución en profundidades entre 0.5 m y 250 m con una cobertura de hasta 200 m en el sistema dual, es decir, puede generar dos barridos por ping dando como resultado un perfil más denso del fondo marino con una mayor resolución.

El sistema multihaz EM3002 se conforma de cuatro unidades (Figura 13).

1. Unidad de transductores de transmisión.
2. Unidad de transductores de recepción.
3. Unidad de procesamiento de la señal transeiver.
4. Estación de trabajo del operador.

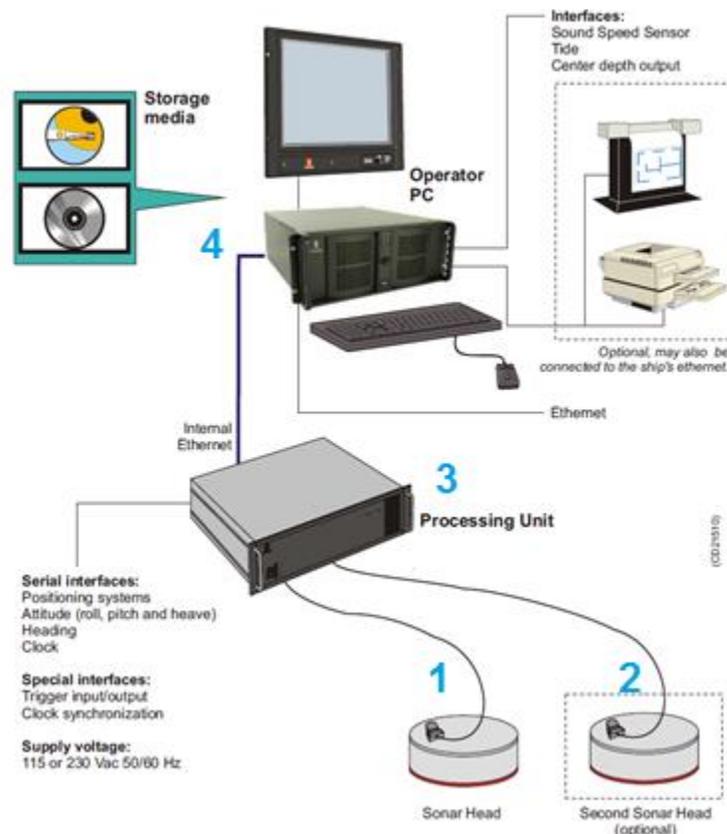


Figura 13. Diseño de un sistema EM3002 (Modificada de Kongsberg, 2010).

VI.2. Análisis y procesamiento de datos

VI.2.1. Análisis

El análisis se llevó a cabo separando los datos por días con el objetivo de conocer el comportamiento de cada uno de los transectos.

El análisis de los datos consistió en:

- 1) Cargar los archivos al programa por día para visualizar todos los transectos y así conocer el comportamiento de cada uno de ellos. Simultáneamente se creó una base de datos para cada día en una hoja de Excel teniendo como encabezado: número de transecto y observaciones. En esta última columna se registraron si los transectos presentaban una forma curvada o



si tenían alguna inclinación. Esto con la finalidad de conocer el tipo de corrección que se le aplicaría a cada uno.

- 2) Eliminación, si era el caso, de transectos que no registraron de forma correcta el fondo marino ya sea por falta de alguna consideración durante la adquisición o por agentes externos como el oleaje.

VI.2.2. Procesamiento de datos

El procesamiento de datos se describe a continuación:

1. Creación un archivo de buque (*Vessel*).

Inicialmente se requiere crear un “archivo de buque” con el propósito de indicar al programa: dimensiones del buque (Figura 14), el modelo y el número de haces de la ecosonda que se utilizaron en el levantamiento. En este paso se activan los comandos relacionados con los sensores de los movimientos del barco (*heave*, *pitch*, *roll*) para realizar posteriormente las correcciones de estos movimientos.

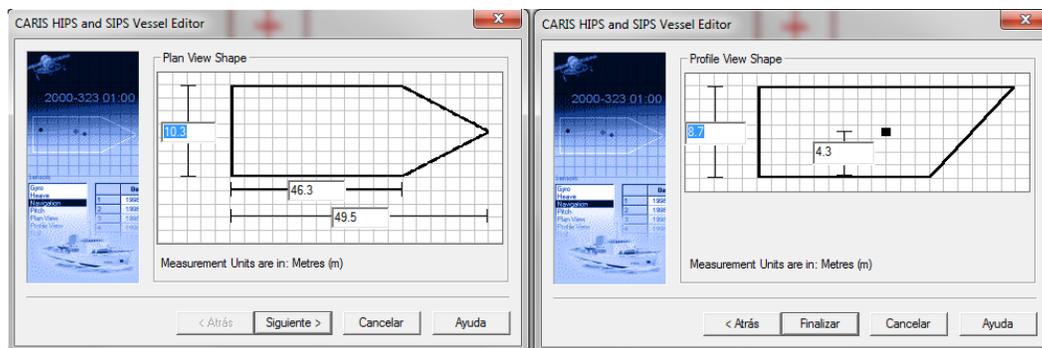


Figura 14. Ventana de CARIS donde se indican las dimensiones del B/O “Justo Sierra” (vistas aérea y de perfil).



2. Creación de un nuevo proyecto.

Se crea un Proyecto con el archivo del buque y se eligen los días en el calendario Juliano (que el software trae por defecto) en los que se realizó la campaña.

3. Conversión de datos brutos.

El software puede convertir los archivos (.all) que genera la ecosonda a diferentes formatos para hacer el post-procesamiento (Figura 15).

Se seleccionó el tipo *Simrad*, (debido a que es la marca de la ecosonda) y posteriormente se indicaron las coordenadas de la zona de estudio para, finalmente visualizar los datos en el software.

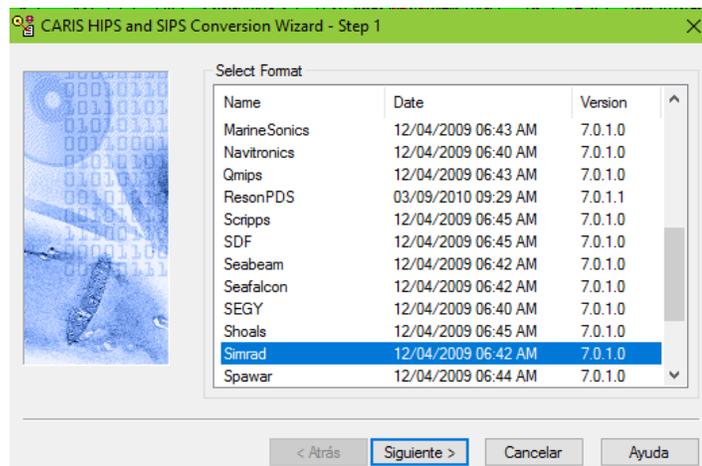


Figura 15. Formatos con los que puede trabajar CARIS.

4. Corrección de la velocidad del sonido (SVC).

Para la corrección por velocidad del sonido se requiere cargar el archivo del perfil de velocidad que se adquirió durante los días del levantamiento al programa para visualizar la gráfica del perfil (Figuras 16 y 17). Después de ello, se identifican los primeros valores donde la profundidad es 0 m para eliminarlos debido a que a esa profundidad el



sensor está ligeramente en contacto con el agua por lo que la lectura de estos datos no es precisa.

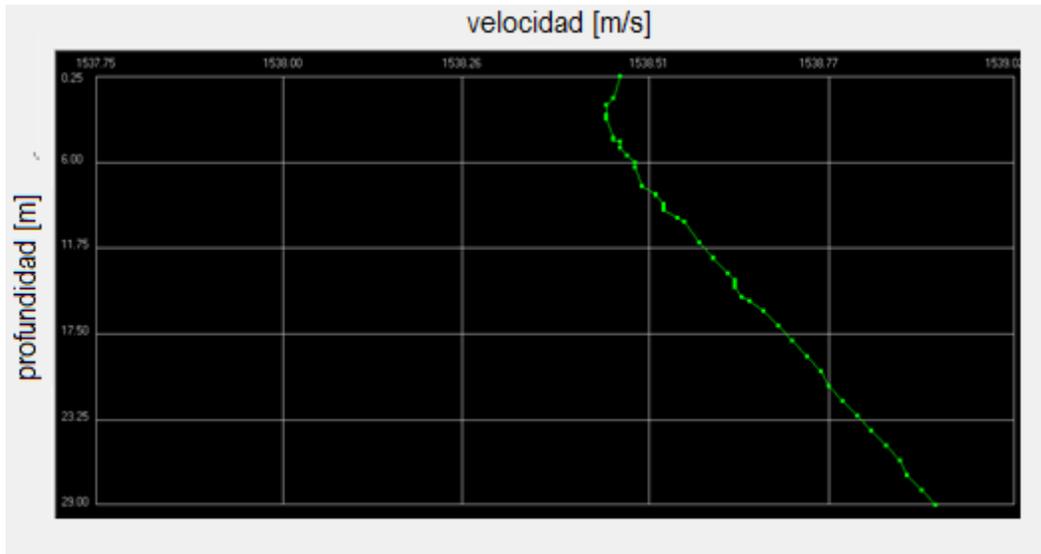


Figura 16. Perfil de velocidad del día 18 de abril 2013 de la campaña Chicxulub I con coordenadas $21^{\circ}28'N$ $89^{\circ}57'W$. L.

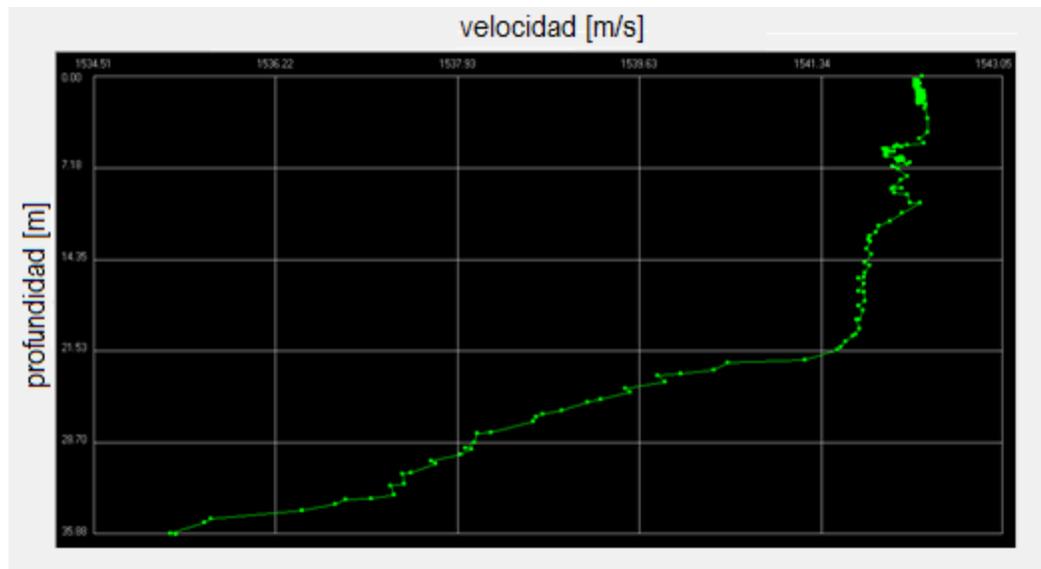


Figura 17. Perfil de velocidad del día 23 de abril 2015 de la campaña Chicxulub II con coordenadas $21^{\circ}36'N$ $89^{\circ}55'W$.

Después de eliminar los primeros puntos se guardaron los cambios y finalmente se cargaron a las líneas de levantamiento con la opción “*Sound Velocity Correction*”.

5. Corrección por movimientos del barco.

Durante la adquisición de datos el barco está sujeto a diferentes movimientos debido a las olas del mar (Figura 18). Estos movimientos son los siguientes:

- *Roll* (Balanceo): inclinación del buque a estribor o a babor.
- *Pitch* (Cabeceo): movimiento que propicia el levantamiento la proa del buque
- *Heave* (Traslación vertical): movimiento en el eje vertical parecido a un salto por el oleaje.

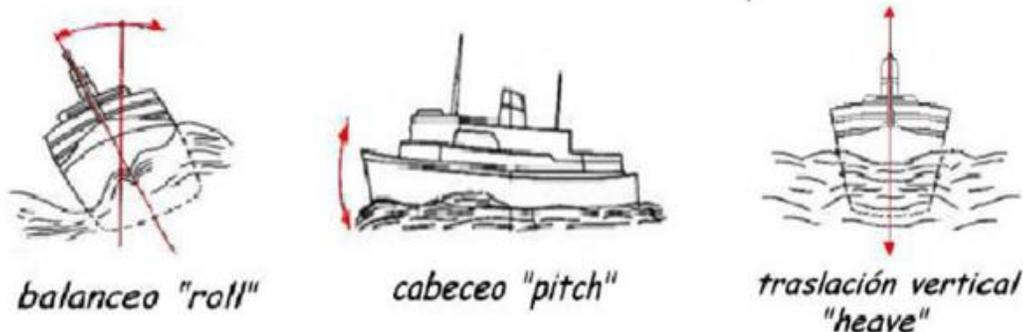


Figura 18. Movimientos del buque (Tomado de CARIS, 2009).

Con el software CARIS HIPS & SIPS usando los archivos Simrad este proceso es opcional ya que estos archivos contienen información sobre la calibración de cada uno de los sensores antes de la adquisición. Si la calibración no se hizo de forma adecuada, los datos carecerán de precisión en el registro de la profundidad y será necesario aplicar la corrección por movimiento del barco en la etapa del procesamiento.

Para la corrección en el programa se utiliza la herramienta "Calibration", donde se elige una zona con dos transectos traslapados,



para que de este modo, se logre observar si la forma de los datos coincide en la zona de traslape. En caso de que no coincida, los valores de *pitch* y *roll* se modifican de tal manera que los datos de ambos perfiles se ajusten y, conociendo estos datos (Tabla 3) se prosigue a modificar el archivo del buque para que el programa realice la corrección.

Para verificar si los valores son correctos se elige una zona con más de tres transectos traslapados (Figura 19).

Campaña	Día	Número total de transectos	Corrección por <i>pitch</i>	Corrección por <i>roll</i>
Chicxulub I	18	8	0.1	-0.1
	19	32	0.09	-0.15
	20	36	-0.15	-0.17
	22	37	0.04	-0.09
Chicxulub II	23	27	0	-0.05
	24	49	0	-0.12
	25	7	0	-0.05
	26	24	0	-0.08

Tabla 3. Valores modificados (*pitch* y *roll*) para la corrección por movimientos del buque de ambas campañas.

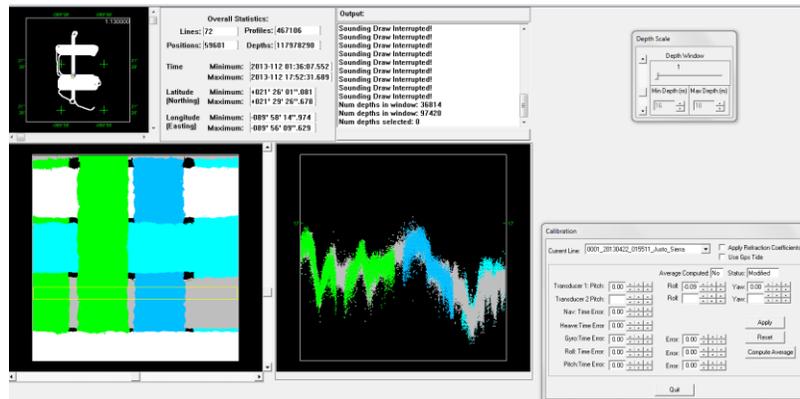


Figura 19. Ventana Calibration. Esta herramienta permite modificar los valores de los sensores de movimiento (*pitch*, *roll* y *heave*) para hacer la corrección por movimientos del barco. Cada transecto es una línea de color.

6. Datos de marea.

La información utilizada sobre las mareas de las estaciones Progreso y Sisal cercanas al área de estudio (Figura 20), en los periodos de levantamiento batimétrico fue proporcionada por el Servicio Mareográfico Nacional.

Estas estaciones se ubican en el continente, las cuales registran información sobre el comportamiento de las mareas durante las 24 h los 365 días del año.

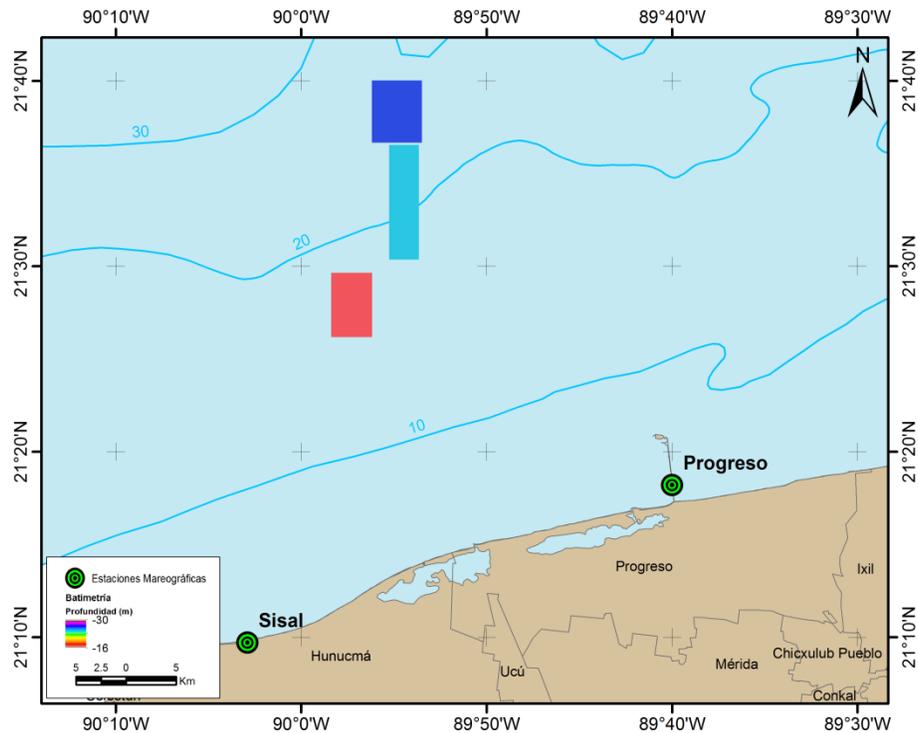


Figura 20. Localización de estaciones mareográficas de Progreso y Sisal (puntos verdes) en el estado de Yucatán (Servicio Mareográfico Nacional). Levantamiento de la campaña Chicxulub I (recuadro rojo). Levantamiento de la campaña Chicxulub II (recuadros azules). Los datos de marea se cargan al programa para hacer la corrección correspondiente.

Para ingresar el o los archivos de marea al software puede ser de dos maneras con las siguientes extensiones:

- .tid para una sola estación
- .zdf para dos estaciones

Es importante que los datos de marea tengan un intervalo de tiempo corto y constante, por ejemplo, un valor cada minuto. Esto es, porque la corrección requiere el dato de marea registrado en el tiempo de la adquisición de un transecto, de lo contrario, el software tomará un valor interpolado en lugar de un valor real.



Dado que los datos de la estación Progreso no cumplían con lo anterior se utilizaron los datos de la estación Sisal para ambas campañas (Figuras 21 y 22).

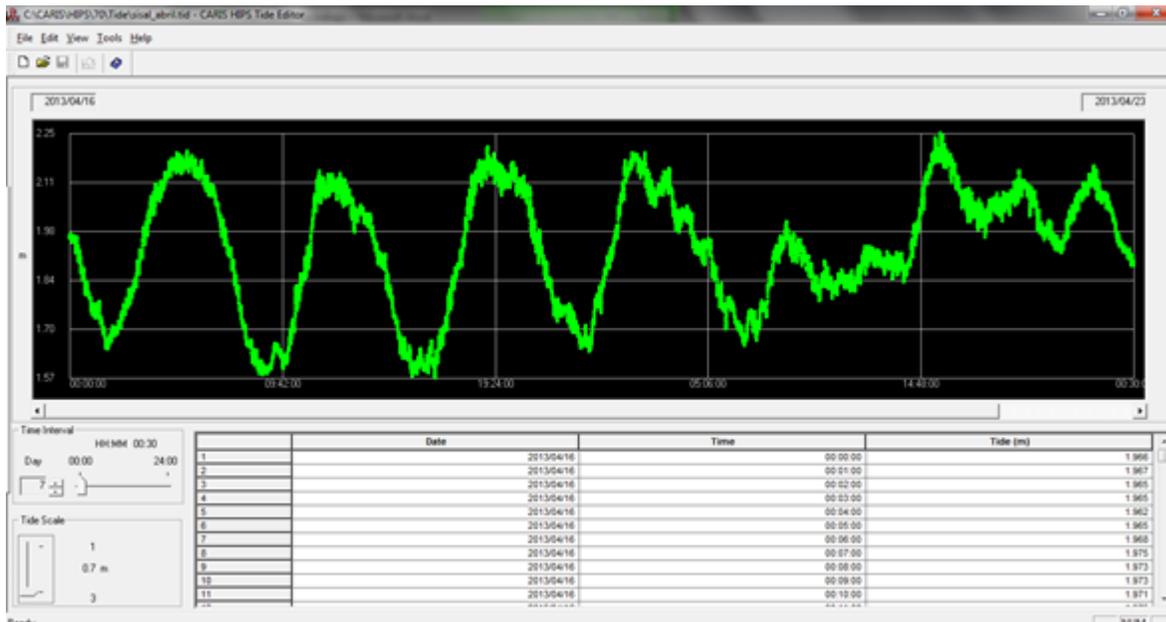


Figura 21. Datos de marea de la Estación Mareográfica Sisal, Yuc., del 16 al 23 de abril del 2013.

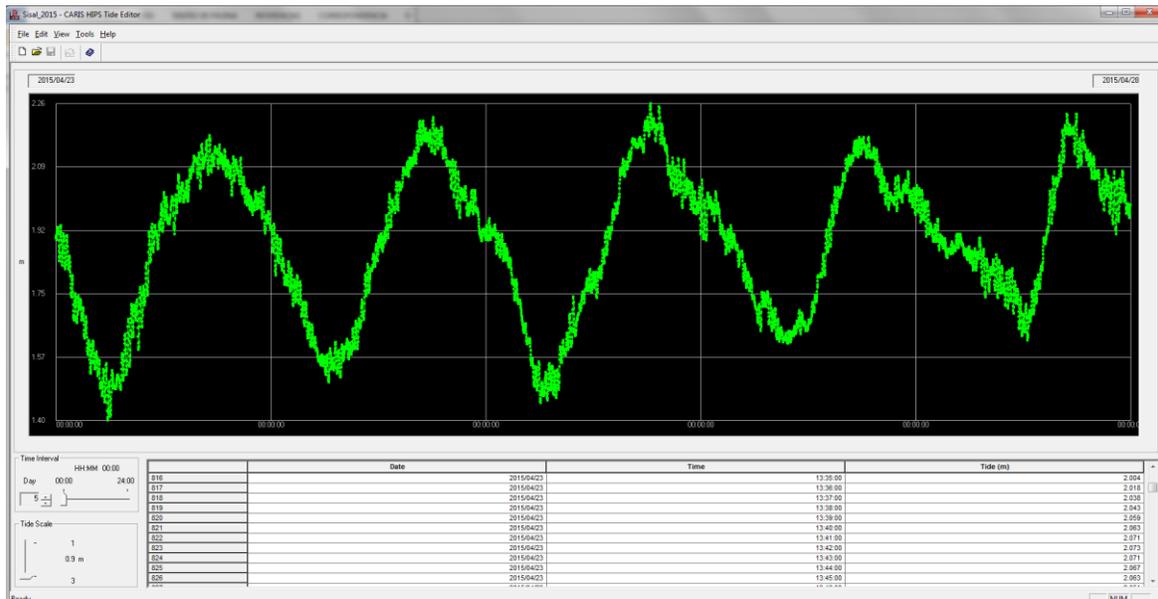


Figura 22. Datos de marea de la Estación Mareográfica Sisal, Yuc., del 22 al 27 de abril del 2015.



7. Merge.

Durante este proceso se calculó la posición geográfica y la profundidad de las líneas de levantamiento combinando la información de desplazamiento vertical y horizontal producida por los datos una vez aplicada la corrección por velocidad del sonido y por marea.

8. Hojas de trabajo.

La hoja de trabajo es un archivo CARIS para almacenar la información sobre los datos procesados, además tienen un papel importante en casi todos los procesos en CARIS HIPS y SIPS puesto que son esenciales para la creación de superficies BASE (Figura 23).

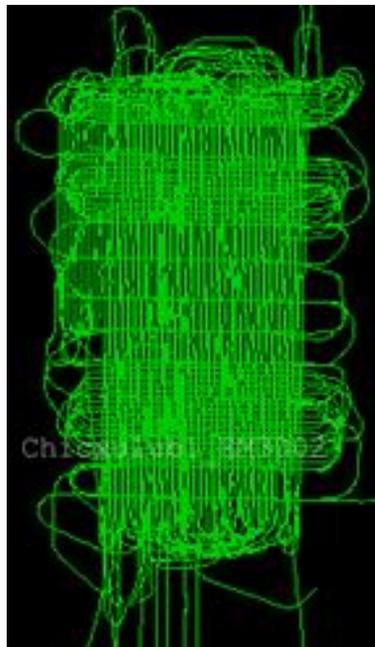


Figura 23. La hoja de trabajo contiene información de todos los puntos registrados por la ecosonda (coordenadas, profundidad). Las líneas verdes son los transectos registrados durante la campaña.



9. Generación de una Batimetría Asociada con la Superficie de Error estadístico (BASE):

La BASE es una representación de la superficie a partir de los *pings* de la ecosonda (Figura 24). Esta herramienta permite al usuario definir la resolución horizontal y vertical (distancia entre cada punto o nodo) de la malla (*grid*) y exportar los datos como un archivo de texto XYZ con esas características para construir modelos digitales de terreno en algún otro software.

La superficie se crea con diferentes métodos de ponderación para que se produzca una superficie suavizada. En este caso se utilizó el método de Peso del Ángulo del Barrido (*Swath Angle Weight*), el cual utiliza un esquema de ponderación basado en el ángulo de intersección de un haz con el fondo marino.

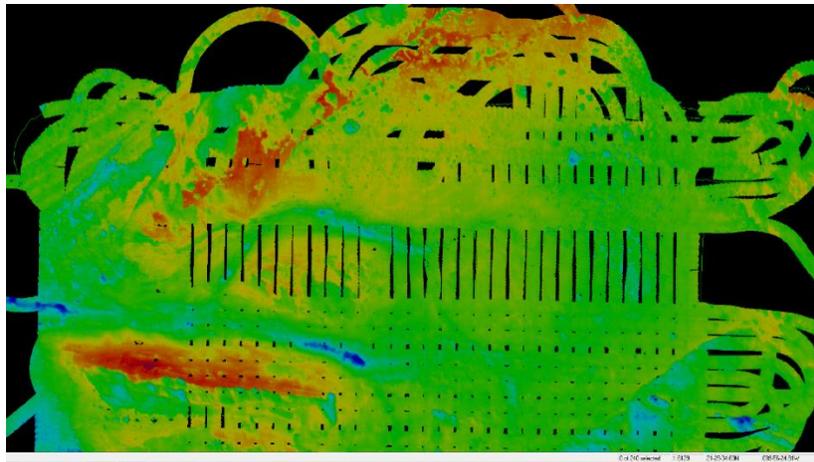


Figura 24. Con la superficie BASE se identifica el rango de profundidades de toda la zona.

10. Limpieza o invalidación de datos.

El “*Swath Editor*” permite analizar una pequeña parte de un transecto mostrando la vista frontal y de perfil (Figura 25) en dos colores: verde para los haces a estribor y rojo para los haces a babor. Con esta

herramienta se puede limpiar los datos eliminando los rayos o líneas con valores fuera de todo el conjunto de datos.

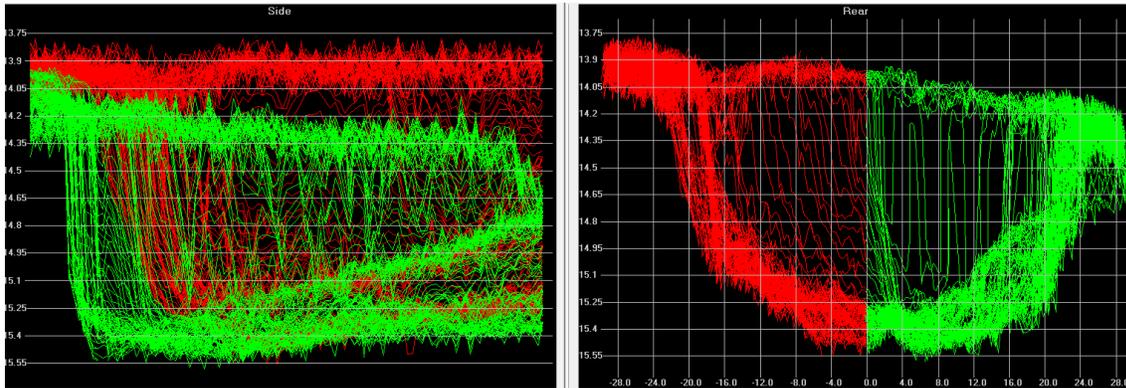


Figura 25. El “*Swath Editor*” permite limpiar una porción de un sólo transecto.

“*Subset Editor*” es otra herramienta para la limpieza de datos en la cual podemos visualizar los datos con puntos en lugar de líneas y, a diferencia de la primera, ésta tiene la visualización en 3D donde se puede cargar más de un perfil y así tener una imagen más completa de un sector del área de estudio (Figura 26), además de mostrar la vista de un corte perpendicular y/o paralelo a los transectos, lo que ayuda a la calidad de la limpieza de los datos.

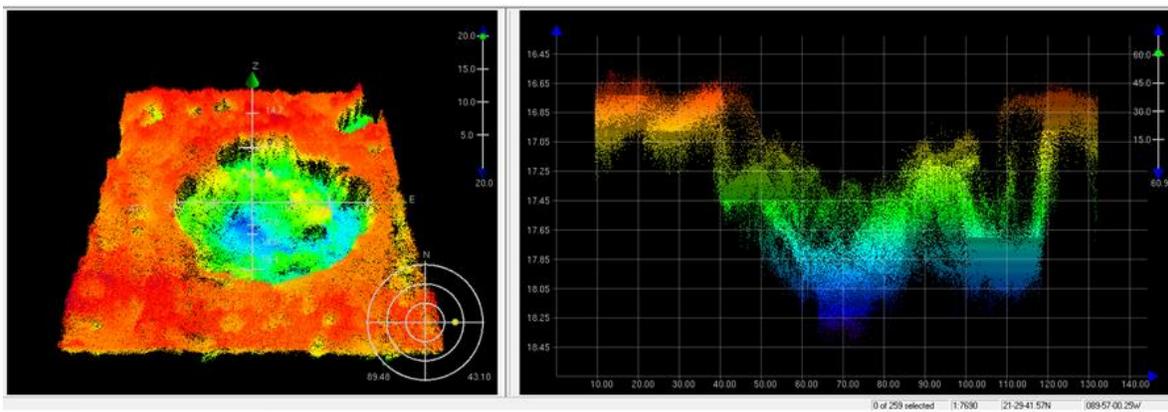


Figura 26. Limpieza de datos utilizando el “*Subset Editor*”. Con esta herramienta se maneja una mayor cantidad de datos, lo cual facilita la limpieza.



VII. RESULTADOS

Los datos batimétricos obtenidos con la ecosonda multihaz EM 3002 de las campañas oceanográficas de geofísica marina Chicxulub I y II, procesados con el software CARIS HIPS AND SIPS 7.0 se exportaron a archivos “.xyz” con una resolución horizontal de 0.5 m entre cada nodo y 0.10 m en la resolución vertical con los cuales se crearon mapas de batimetría de alta resolución para obtener modelos digitales de terreno 3D y mapas de pendientes.

El área de este estudio engloba un sector al noroeste de la plataforma de Yucatán, en Golfo de México y en ella, se detectaron profundidades entre 15 m y 30 m mostrando una morfología compleja del piso oceánico. A partir de esta configuración del lecho marino, se pudo identificar desde depresiones, montículos de material con diferente orientación hasta una estructura en forma de barrera, lo que indica que dichas estructuras se formaron por la intervención de diferentes procesos que afectaron la modelación del fondo marino.

La descripción de las estructuras identificadas en los mapas de batimetría se hizo por separado, debido a que al utilizar el mismo rango de profundidad para las tres zonas, se perdían rasgos morfológicos importantes (Figura 27). De modo que, para la descripción se nombraron a los mapas de la siguiente manera: 1) Chicxulub I, 2) Chicxulub II sección norte y 3) Chicxulub II sección sur.

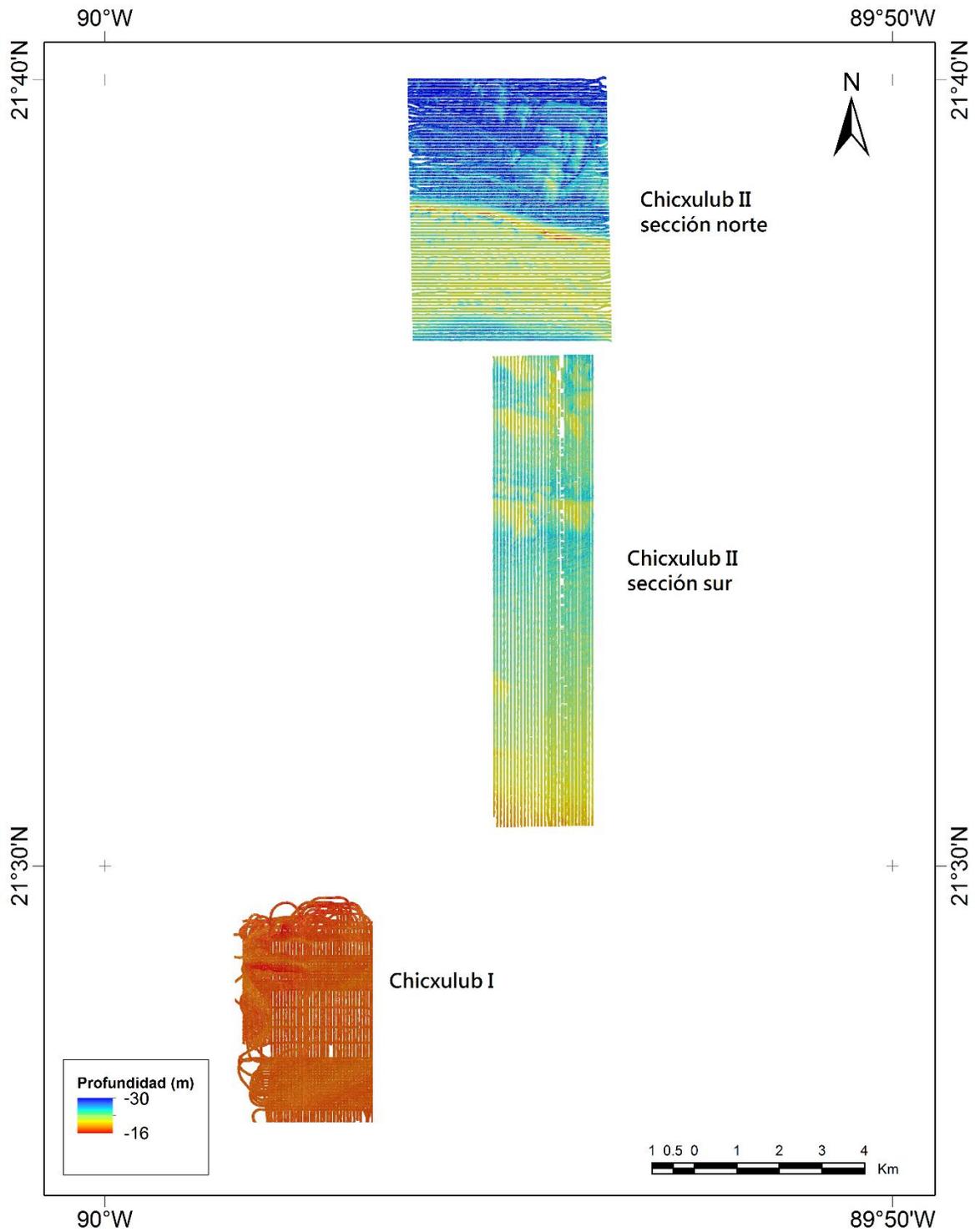


Figura 27. Batimetría de las campañas Chicxulub I y II con el mismo rango de profundidades.



Campaña Chicxulub I.

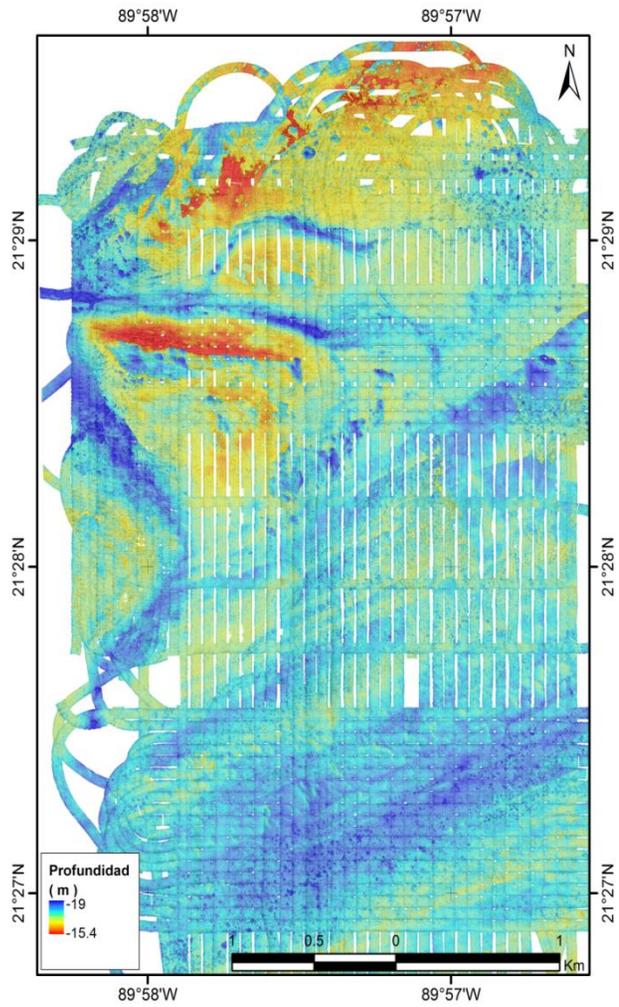
Para la campaña Chicxulub I durante el análisis y el procesamiento de los datos batimétricos, se identificó que no se contaba con el perfil de velocidad del sonido durante el levantamiento realizado el día 17 de abril y para 17 transectos del 18 de abril. Además en 12 transectos se observó que los datos registrados eran un artificio del oleaje, por lo que no se consideraron para la conformación del mapa de batimetría. Para la integración del mapa en este sector, se analizan un total de 112 transectos (Tabla 4) con una separación entre ellos de 12 m a 18 m.

Día	Número de transectos	Orientación
18	8	N-S
19	30	N-S
	1	E-W
20	17	N-S
	19	E-W
22	6	N-S
	31	E-W
Total	112	

Tabla 4. Total de transectos para la campaña Chicxulub I.

En el mapa de batimetría se observa la configuración del relieve marino con profundidades que oscilan entre los 15.4 m en su parte más somera y hasta los 19 m en la zona profunda (Figura 28).

a)



b)

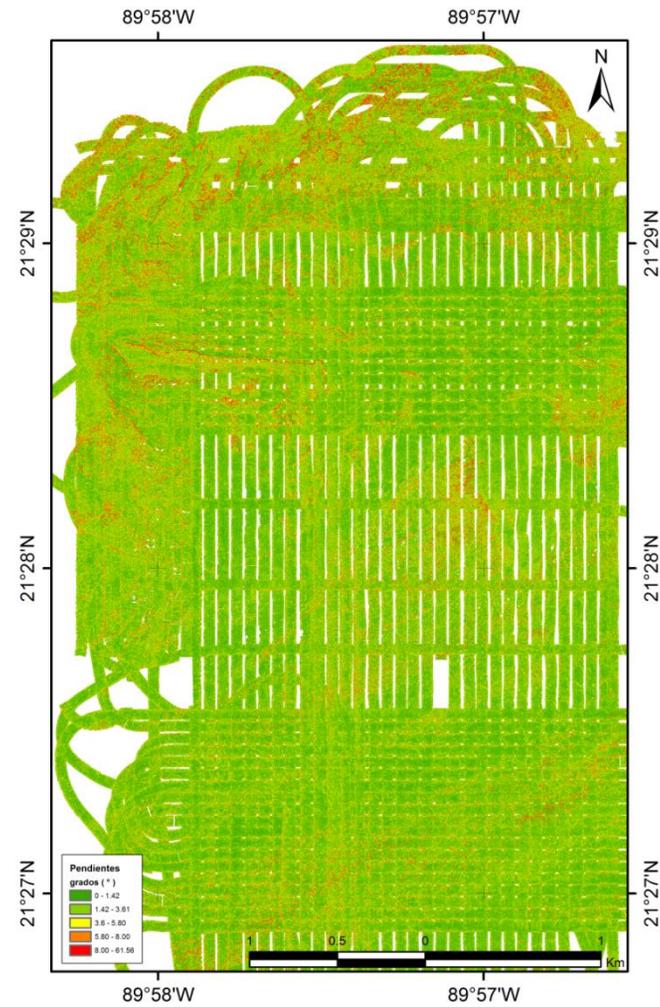


Figura 28. a) Batimetría de la campaña Chicxulub I; b) Mapa de pendientes. El color verde indica la inclinación menor (0°) mientras que el color rojo indica la inclinación más grande del piso marino, con un valor máximo de 40°

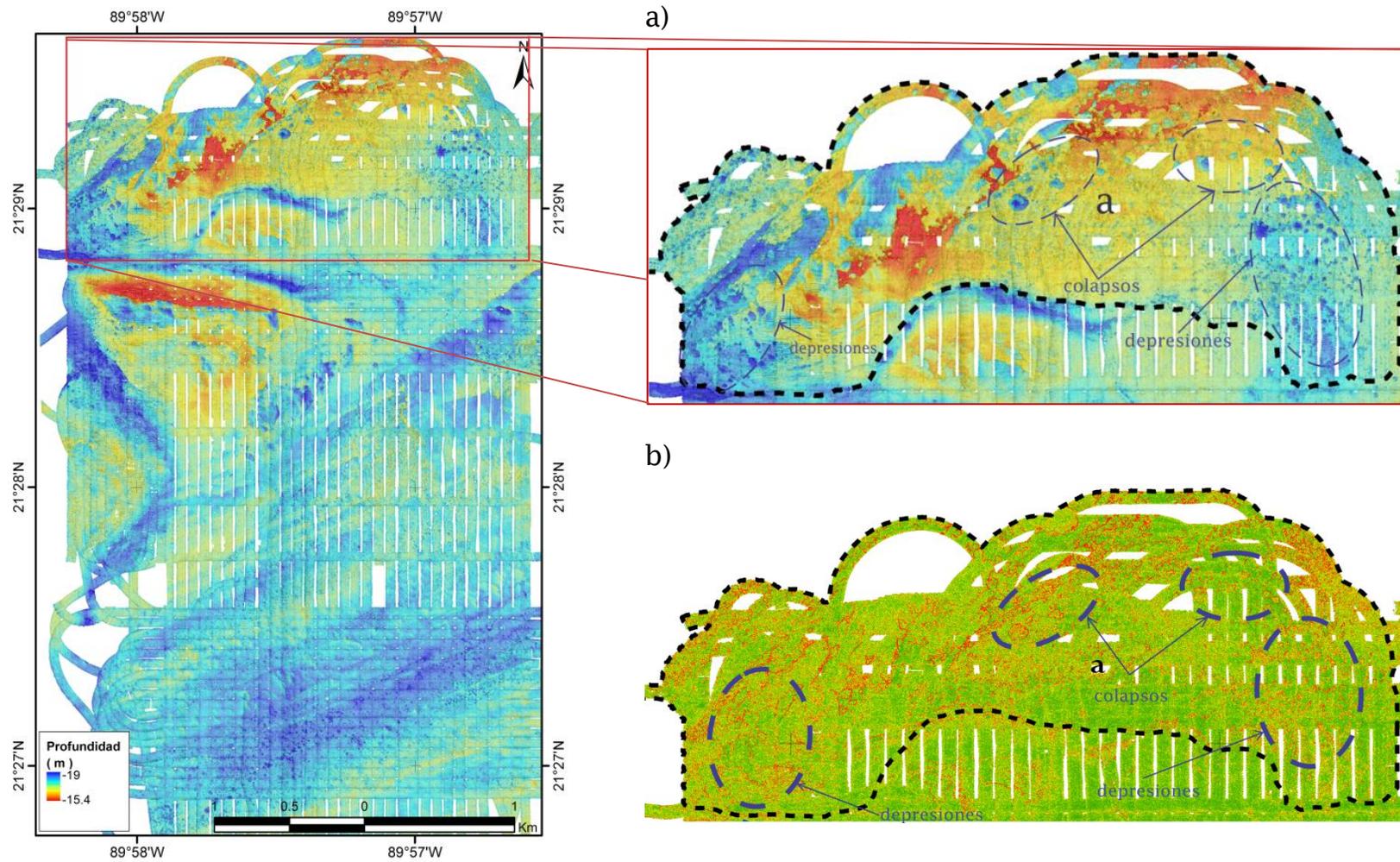


El área de estudio de la campaña Chicxulub I se dividió en 4 sectores para una mejor descripción de las estructuras geológicas y los rasgos morfológicos, las cuales se describen a continuación:

a) Es una región con profundidades de 15.4 m a 17.5 m. En la parte norte se observa una estructura en forma de barrera semicircular de aproximadamente 2 km de longitud con profundidades de 15.4 m a 16.5 m, con presencia de colapsos de material con diámetros de 15 m hasta 77 m y profundidades de 16 m a 19 m con paredes inclinadas de 7.6° a 40° de pendiente.

En la zona Este de este sector, es posible distinguir depresiones circulares, con profundidades menores a 2 m y diámetros de 10 m a 20 m, que al unirse, forman depresiones irregulares de mayor longitud, llegando a medir 80 m.

En la zona Oeste, se tienen otras depresiones más alargadas, de 8 m a 45 m de longitud y profundidades menores a 2 m. Al igual que la zona Este, las depresiones al unirse alcanzan longitudes de 70 m (Figura 29).



**Figura 29. Sector “a”: presencia de colapsos y depresiones circulares con profundidades menores a 2 m.
a) Mapa de batimetría; b) Mapa de pendientes.**



b) Al oeste de este sector, se observa la procedencia de un canal principal, el cual termina en dos ramificaciones: una con orientación N-S y otra O-E. Ambas de 17 m a 19 m de profundidad con laderas que tienen una pendiente de entre los 7.6° y hasta 40° de inclinación, siendo la primera la ramificación más grande, con una longitud de alrededor de 2.8 km a diferencia de la segunda, que es paralela a la costa, con una longitud de 1.7 km. Así mismo, se observa un meandro de 1.3 km de longitud con profundidades de 16.5 m a 18 m y paredes inclinadas hasta 40° .

Dentro del canal se distinguen depresiones circulares e irregulares de 14 m a 30 m de longitud, y que si se conectan, es posible distinguir depresiones de mayor tamaño alcanzado 300 m de longitud (Figura 30).

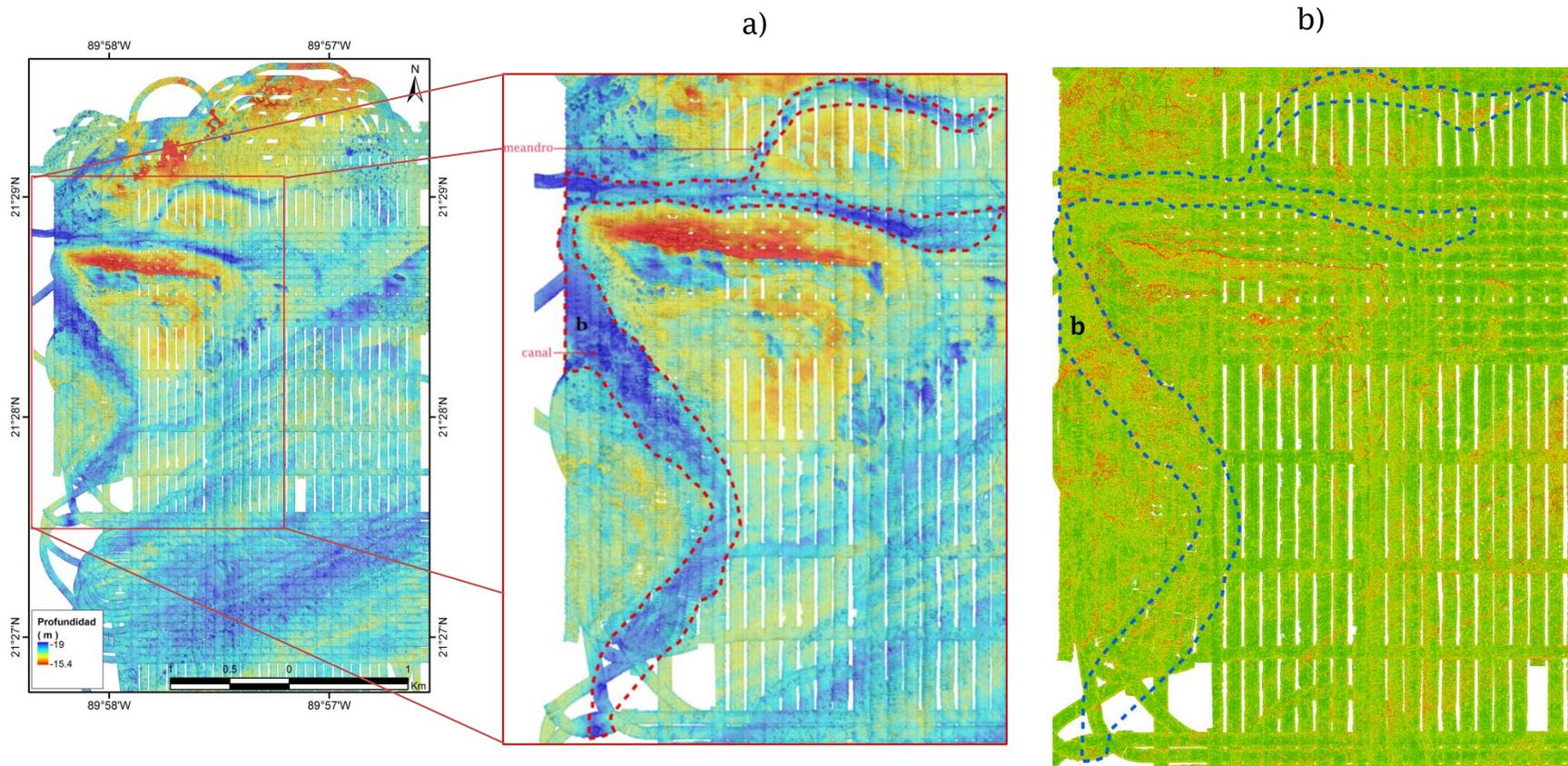


Figura 30. Sector “b”: canal de 2.3 km de longitud y profundidades de 1 m a 3 m. a) Mapa de batimetría: b) Mapa de pendientes.



c) En este sector, se muestra un área con profundidades de 15.4 m a 18 m rodeada al norte y al oeste por el canal. La zona norte se caracteriza por una estructura en forma de barrera paralela a la línea de costa, de 1.7 km de longitud y profundidades alrededor de 15.4 m en la parte más elevada, descendiendo a 17 m por una pendiente menor a 5° de inclinación en su flanco norte, mientras que en su flanco sur, el cambio de altitud está dado por una pendiente mayor a 40°, llegando a 18 m de profundidad (Figura 31).

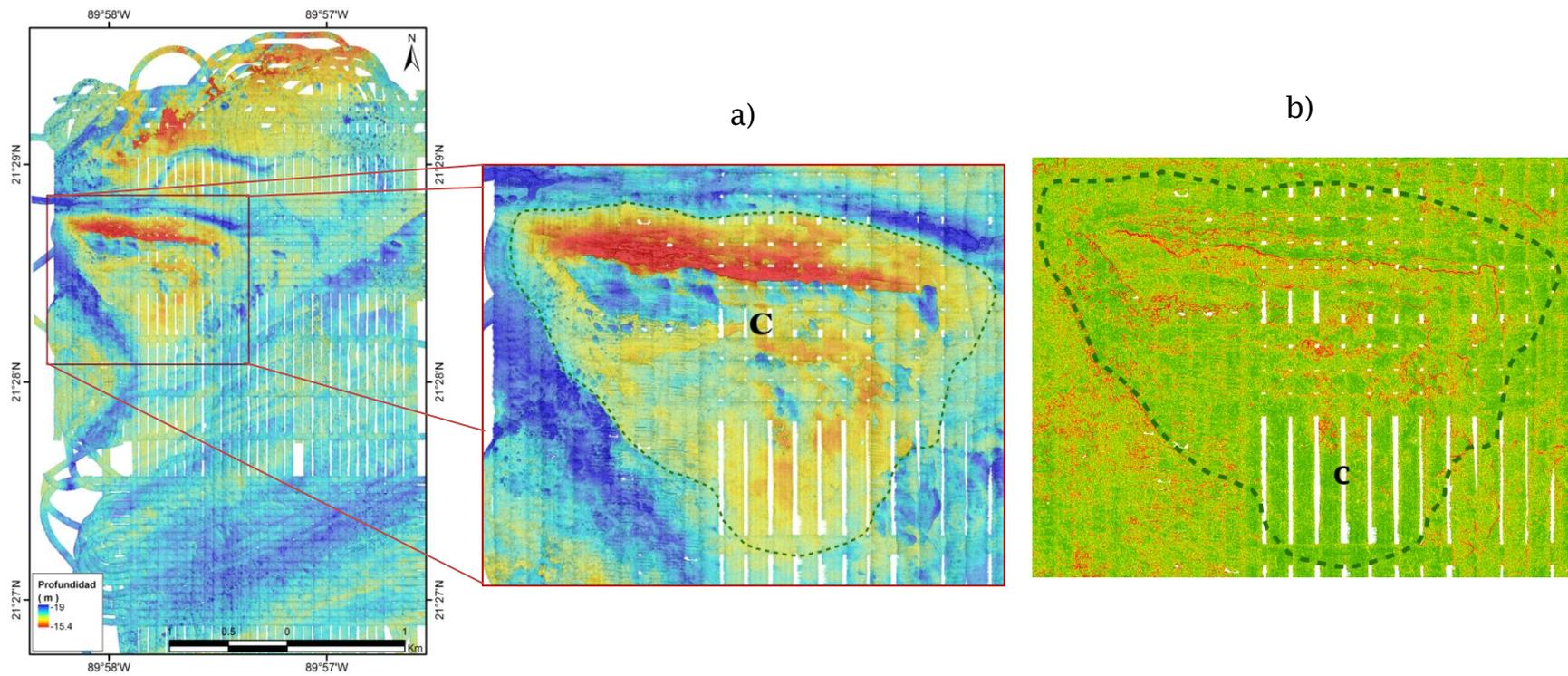


Figura 31. Sector “c”: barrera de 1.7 km de longitud y profundidades alrededor de 15.4 m y 18 m con orientación E-O.
 a) Mapa de batimetría: b) Mapa de pendientes



d) Es el sector más profundo, con valores de 17 m a 19 m en donde se observan intercalaciones de franjas de mayor y menor profundidad, alineadas en dirección NE-SO, las cuales abarcan un área muy extensa (Figura 32).

En la franja norte de este sector, se identifica una zona muy profunda al NE, donde se aprecian depresiones circulares de 10 m a 26 m de diámetro, con profundidades menores a 1 m, además de una depresión ovalada de 111 m de longitud y de 1.6 m de profundidad.

Al sur se tienen los valores más profundas con 17.5 m a 19 m donde se observan depresiones circulares de 1 m a 12 m de longitud y profundidades de 0.5 m a 1 m con paredes inclinadas de 7.6° a 40° .

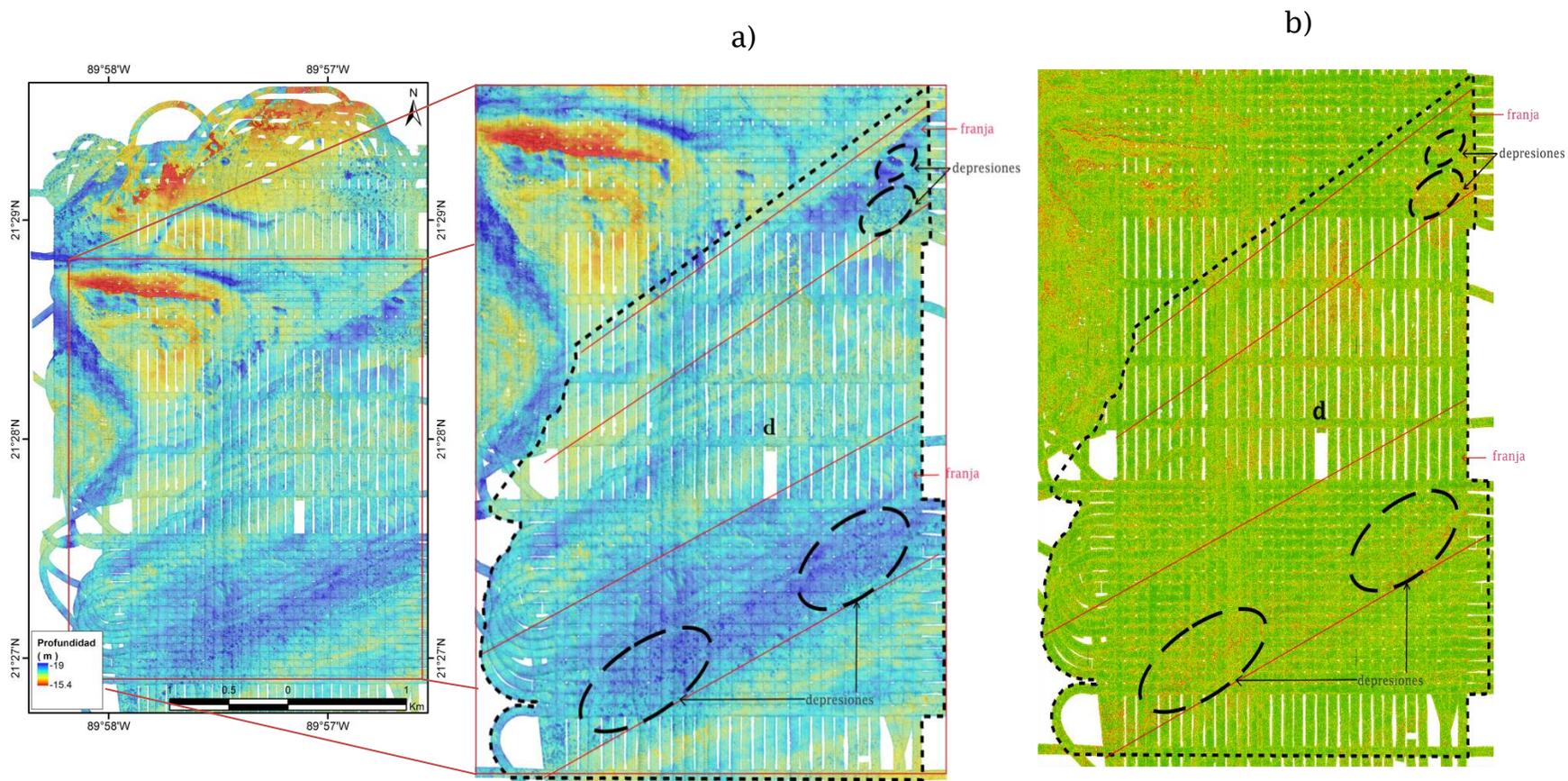


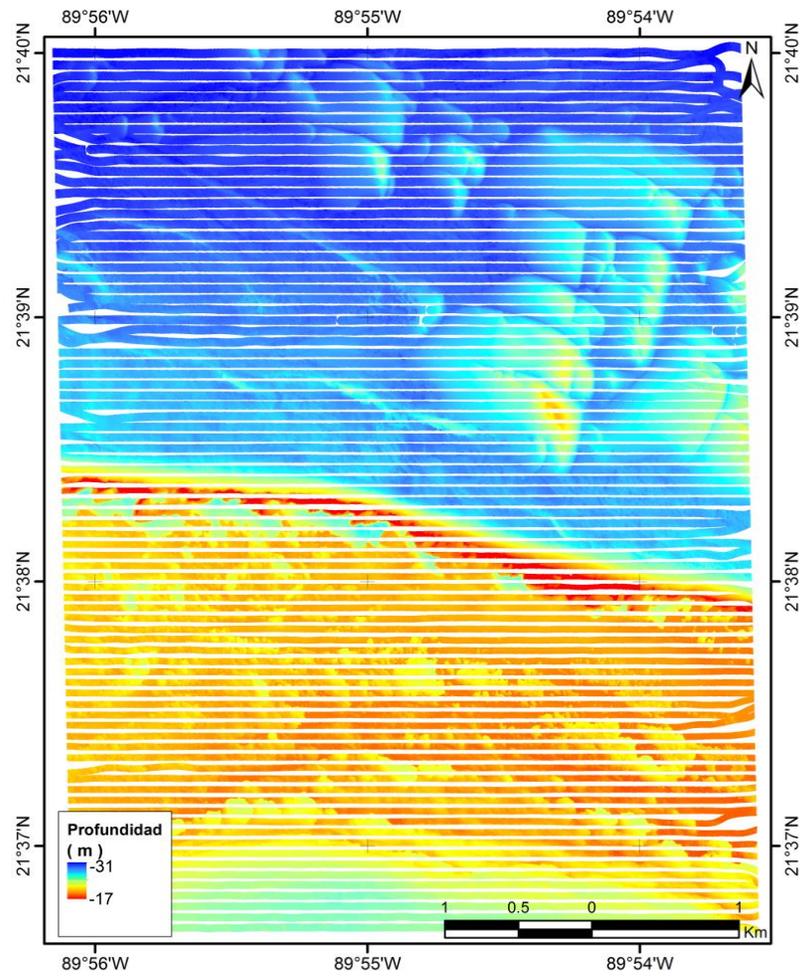
Figura 32. Sector "d":, sector con lineamientos muy marcados y depresiones con diferentes dimensiones.



Chicxulub II sección norte.

En la Figura 33 se observa que la batimetría del piso marino en este sector tiene un rango entre 17 m y 31 m de profundidad, siendo esta sección la más alejada de la costa.

a)



b)

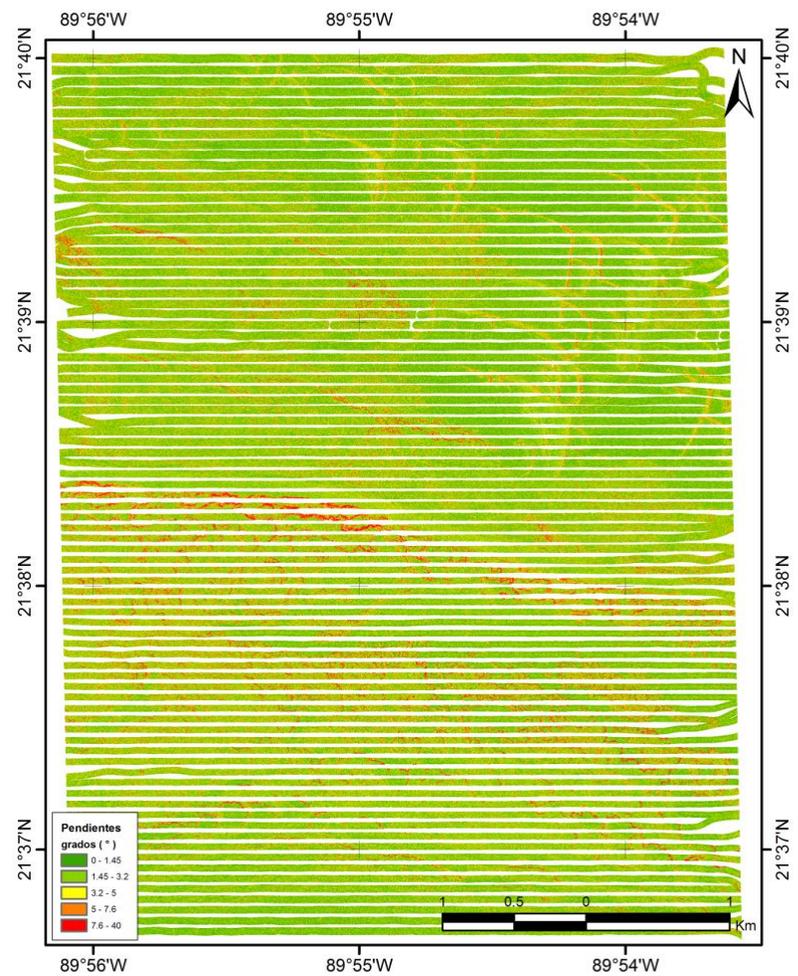


Figura 33. a) Batimetría de la campaña Chicxulub II sección norte, dividida en dos zonas por una barrera bien definida; b) Mapa de pendientes. El color verde indica la inclinación menor (0°) mientras que el color rojo indica la inclinación más



Debido a la presencia de una barrera que delimita este sector, es posible distinguir dos regiones:

a) En la región más profunda hacia el norte, donde las profundidades son mayores a 24 m, se pueden apreciar estructuras en forma de “almohadillas” (Figura 34), con un aumento en su pendiente en dirección NO a SE de 0° a 40° de inclinación. Las “almohadillas” más grandes tienen una longitud de 1 km y altitudes de casi 4 m, considerando que sus profundidades son de 22 m a 26 m, mientras que las “almohadillas” más pequeñas varían en cuanto a su longitud (200 m a 500 m) y elevaciones menores a 3 m (de 25 m a 28 m de profundidad).

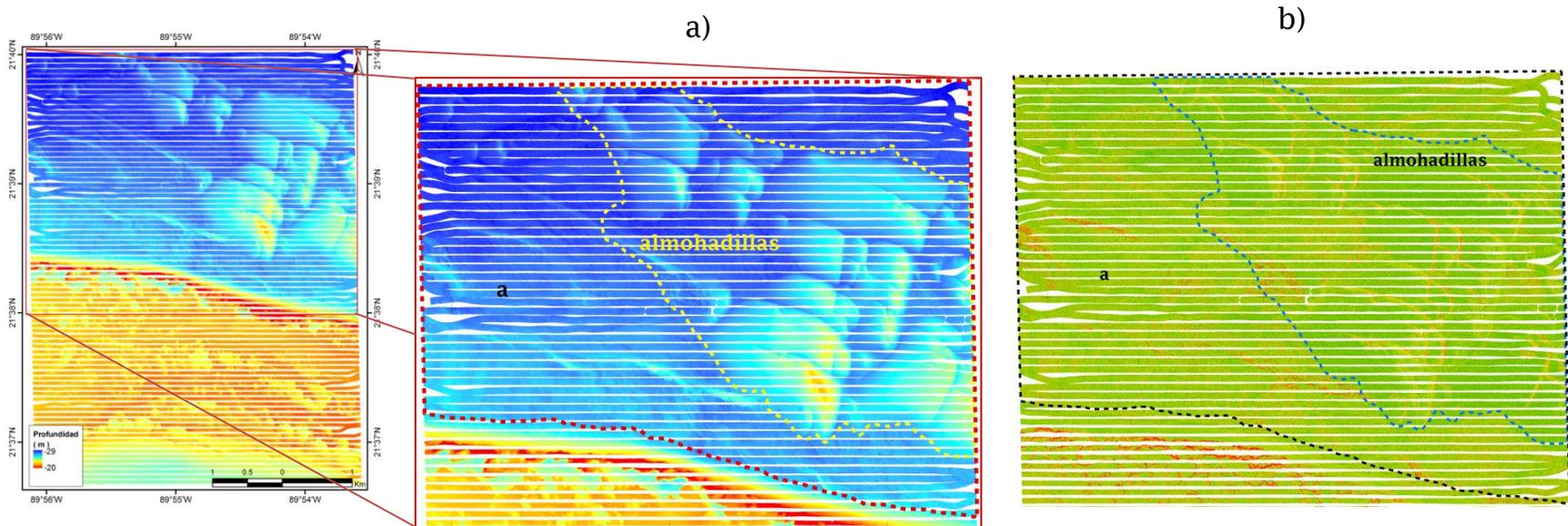


Figura 34. Sector "a": zona más profunda con valores entre 24 m a 31 m y presencia de estructuras en forma de "almohadillas".
 a) Mapa de batimetría; b) Mapa de pendientes



b) La región sur está delimitada por una barrera que cubre todo el sector de O-E, con una longitud de 4 km aproximadamente y profundidades que descienden en su flanco norte de 17 m hasta 25 m por una pendiente de 1.5° de inclinación. Hacia el sur le sigue una zona donde el rango de profundidades se encuentran alrededor de 20 m y 23.5 m dado por la presencia de cavidades con paredes muy pronunciadas de 7.6° a 40° de inclinación (Figura 35).

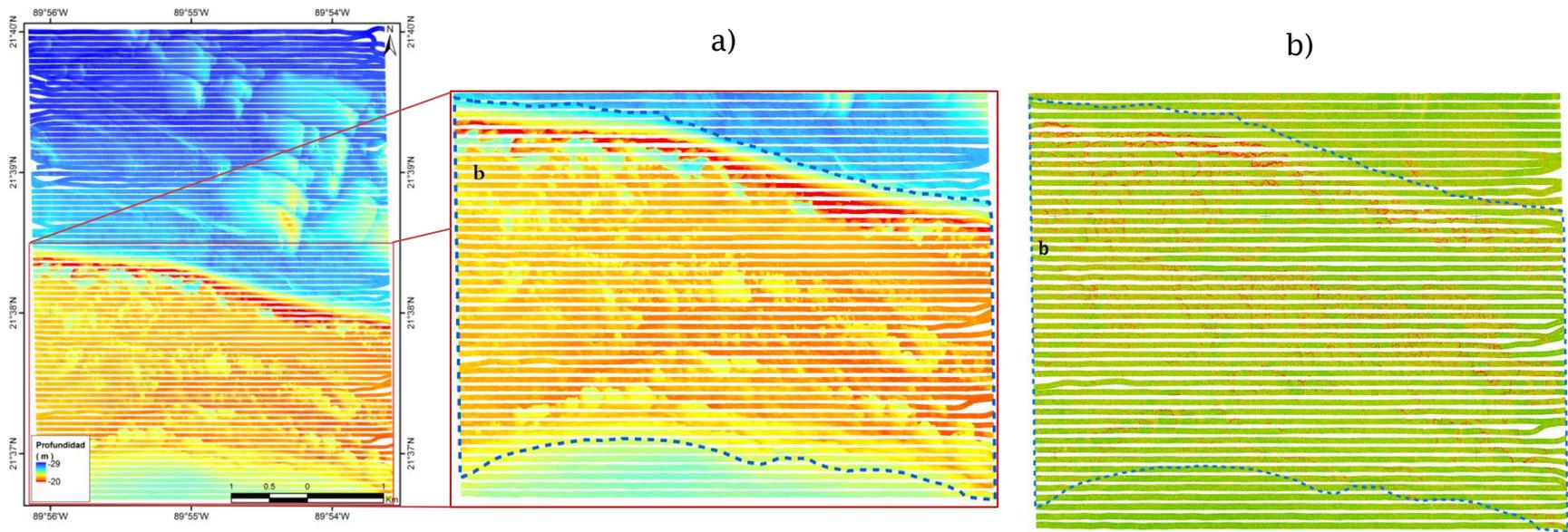


Figura 35. Sector “b”: barrera con profundidades de 17 m en la parte norte, descendiendo hasta los 25 m. En la zona central de la estructura las profundidades varían de 20 m a 23 m. a) Mapa de batimetría: b) Mapa de pendientes.



Chicxulub II sección sur.

La batimetría del lecho marino en esta sección tiene un rango de profundidades alrededor de 18 m y 27 m (Figura 36).

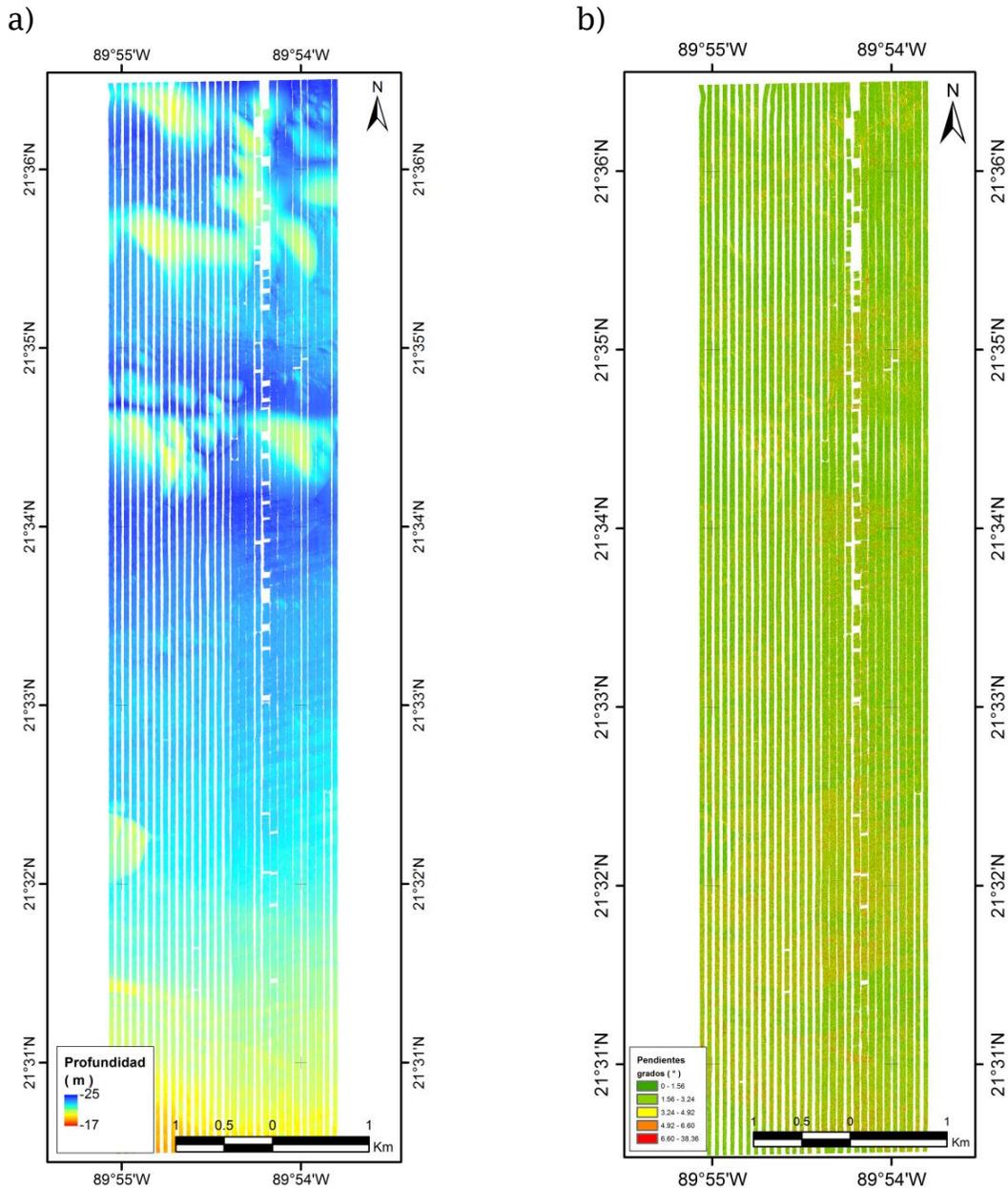


Figura 36. a) Batimetría de la campaña Chicxulub II sección sur; b) Mapa de pendientes. El color verde indica la inclinación menor (0°) mientras que el color rojo indica la inclinación más grande del piso marino, con un valor máximo de 40.



Con base en sus rasgos batimétricos, es posible identificar tres regiones:

a) La zona noreste de esta región, es la zona más profunda del mapa con valores entre 25 m y 27 m. Esta región se caracteriza por la presencia de montículos de material alineados en diferentes direcciones (Figura 37):

1) El primer montículo se encuentra al noroeste de este sector, con 19 m a 23 m de profundidad, teniendo aproximadamente 4 m de elevación y 1.1 km de longitud, y con una pendiente de 7.6° .

2) En la zona central, la unión de cuatro montículos de 20 m a 24 m de profundidad forman una barrera con una alineación N-S y una longitud de 1.6 km.

3) Al sur se encuentra un montículo de mayor dimensión con 1.3 km de longitud y profundidades de 20 m a 23 m (Figura 37).

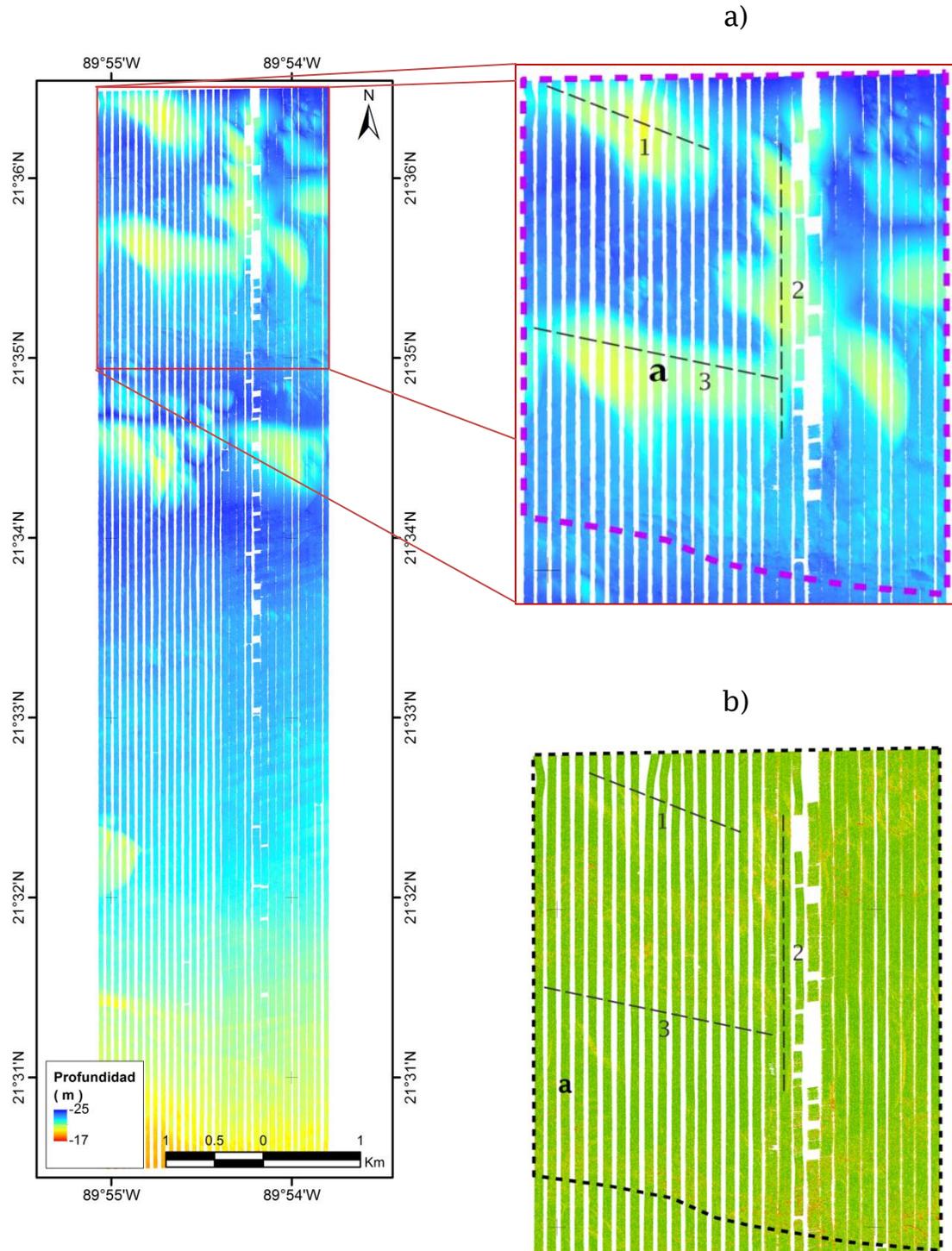


Figura 37. Sector "a": montículos de material: 1) montículo de aproximadamente 4 m de elevación; 2) barrera formada por 4 montículos; 3) montículo de mayor longitud. a) Mapa de batimetría; b) Mapa de pendientes



b) En esta región se distinguen dos grupos de montículos, con elevaciones promedio de 2 m a 4 m: al norte se encuentran pequeños montículos de 220 m a 400 m de longitud y de 22 m a 24 m de profundidad con orientación NW-SE con pendientes menores a 5°; al sur los montículos de material se encuentran alineados paralelos a la costa formando una barrera, sus longitudes varían de 350 m a 780 m y los rangos de profundidad varían de 20 m a 24 m con un aumento en su pendiente en dirección Norte a Sur (Figura 38).

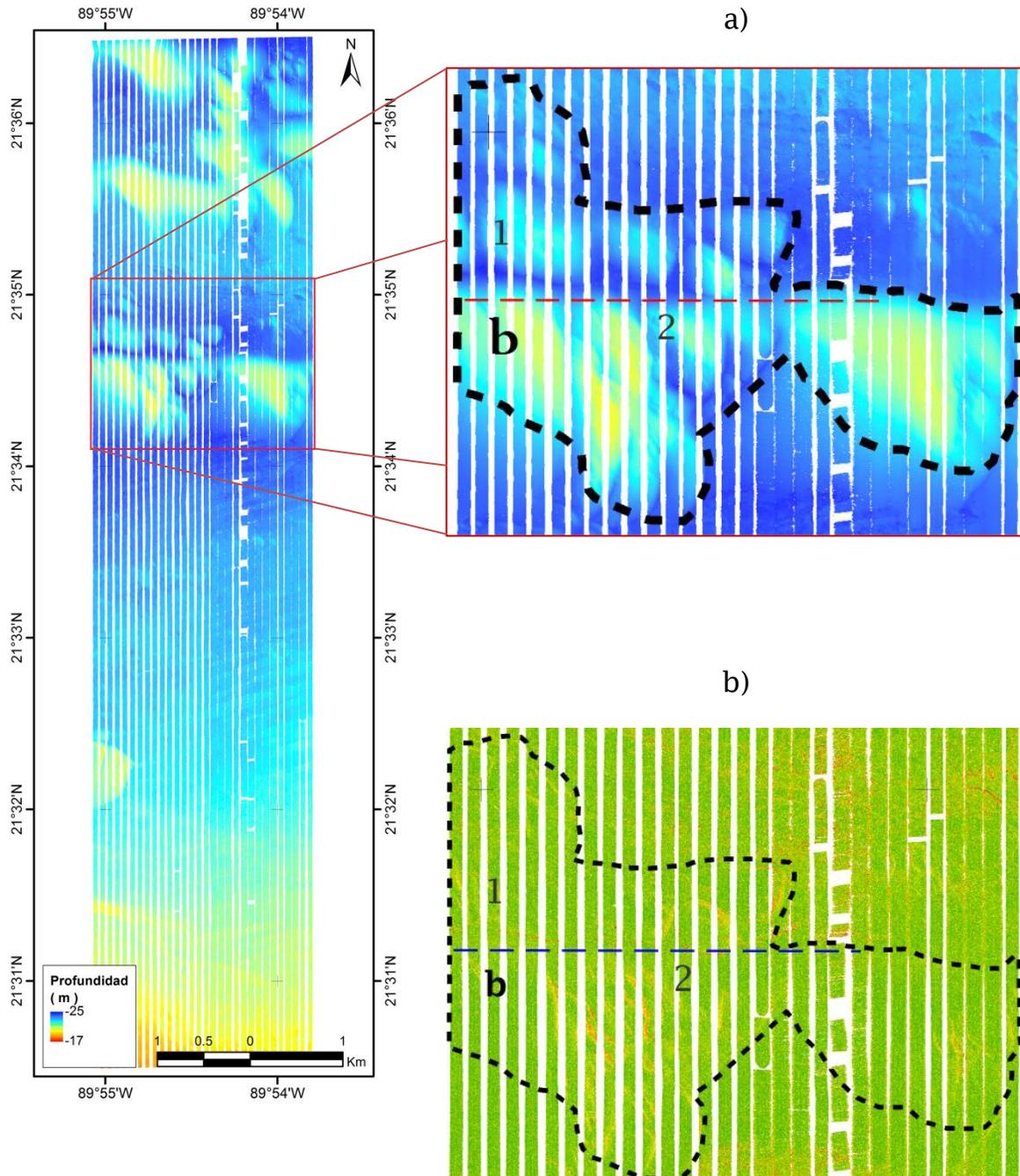


Figura 38. Sector "b": serie de montículos: 1) montículos de menor longitud; 2) barrera conformada por 5 montículos. a) Mapa de batimetría: b) Mapa de pendientes



c) Es una zona plana donde la parte más somera, con 17 m de profundidad se encuentra al sur y desciende hacia el norte hasta llegar a los 24 m de profundidad. En esta región se identifican rizaduras poco marcadas en dirección NE-SO (Figura 39), además de un montículo de aproximadamente 540 m de longitud y una elevación de 2.5 m aproximadamente.

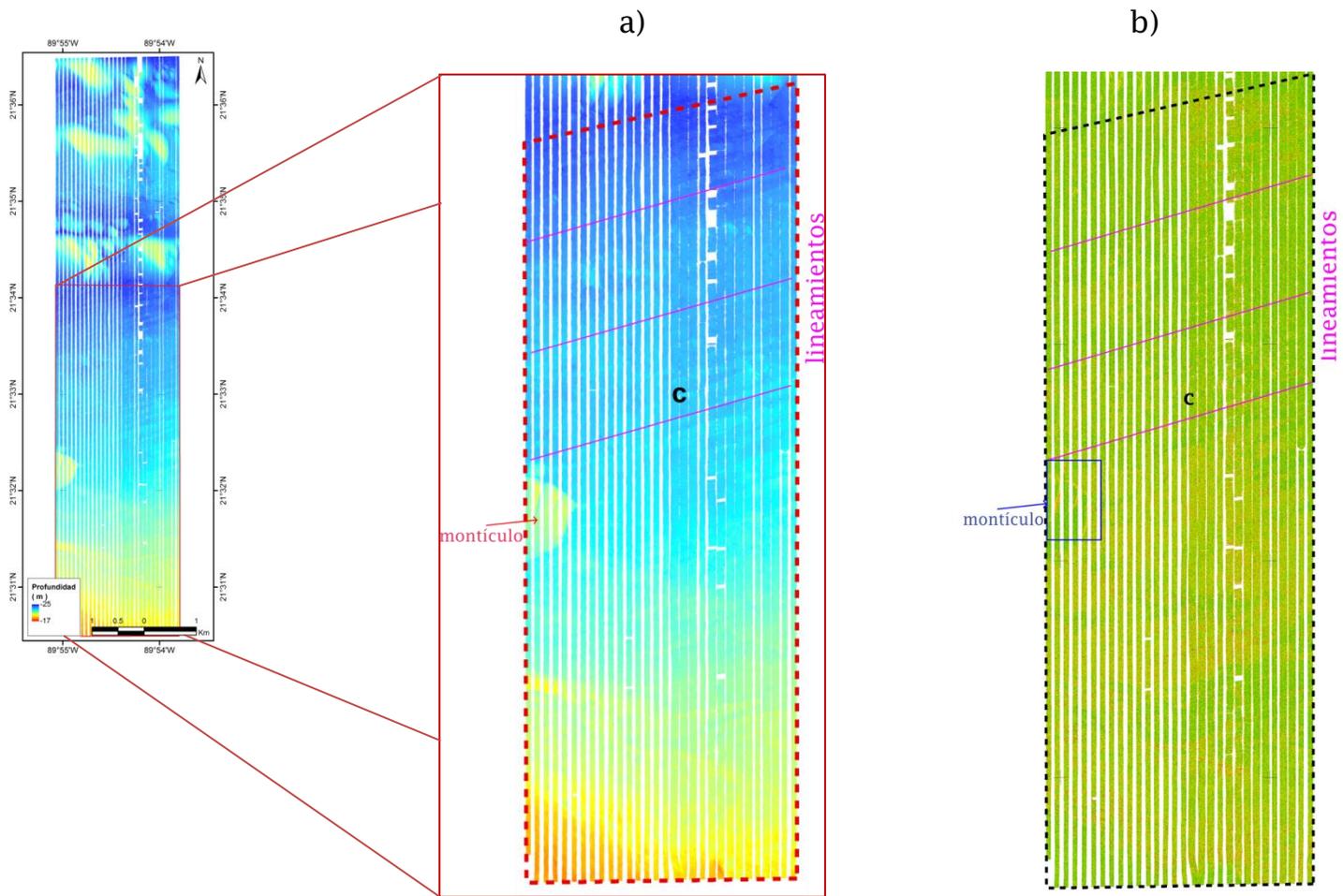


Figura 39. Sector “c”: zona plana y somera con rizaduras poco marcadas con orientación NE-SW y un montículo de material.



VIII. DISCUSIÓN

Los mapas de batimetría de alta resolución resultantes se superpusieron a un mapa de batimetría generada por datos satelitales para identificar si las estructuras encontradas se asociaban a estructuras a una escala más regional (Figura 40). Cabe mencionar que los datos satelitales son de baja resolución por lo que no se aprecian rasgos con mayor detalle a diferencia de la batimetría multihaz.

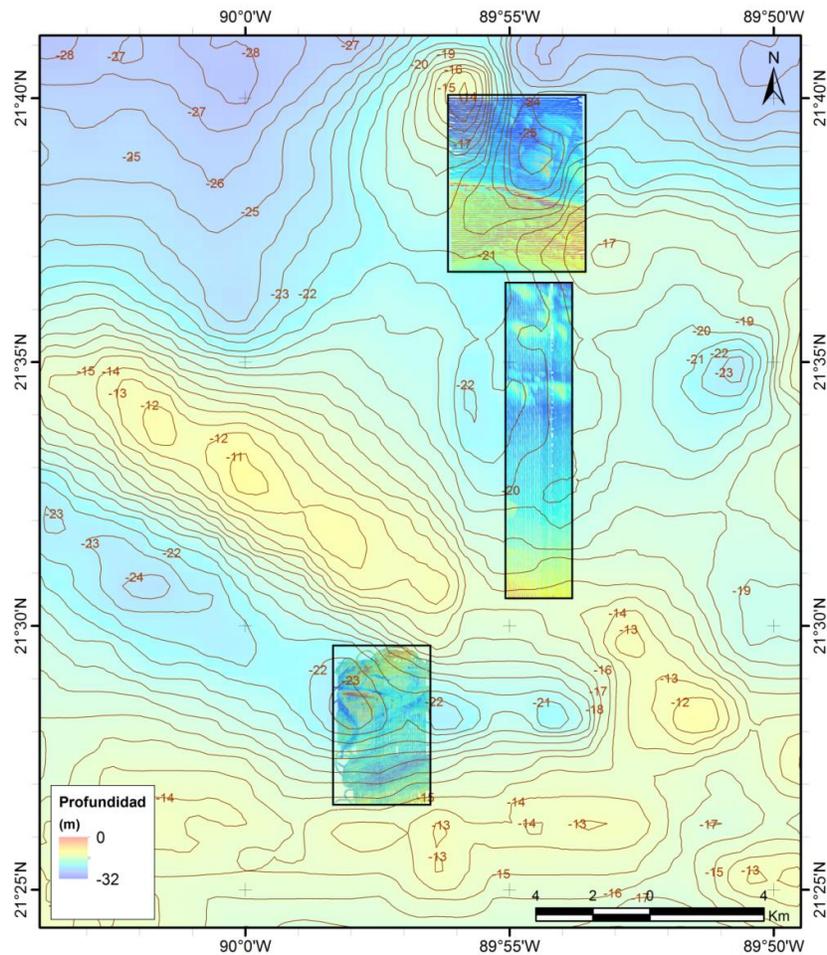


Figura 40. Mapa de batimetría con datos satelitales. Los recuadros negros son los mapas de batimetría de las campañas Chicxulub I y II.



Observando el mapa de batimetría de la campaña Chicxulub I (Figura 41), podemos identificar un canal sinuoso en la zona oeste. Dado que, el flujo del canal puede cambiar de dirección al encontrarse en su curso pliegues, fracturas o fallas creando así meandros (Derruau, 1978), la formación del meandro en la zona somera, se debe a una pequeña fractura que ocasionó que el agua se filtrara y empezara a erosionar la roca. También la sección recta del canal se debe a otra fractura, la cual, incluso ayudó a la formación de la barrera paralela. Esto se comprueba al observar la misma configuración desde la barrera semicircular hasta la barrera paralela.

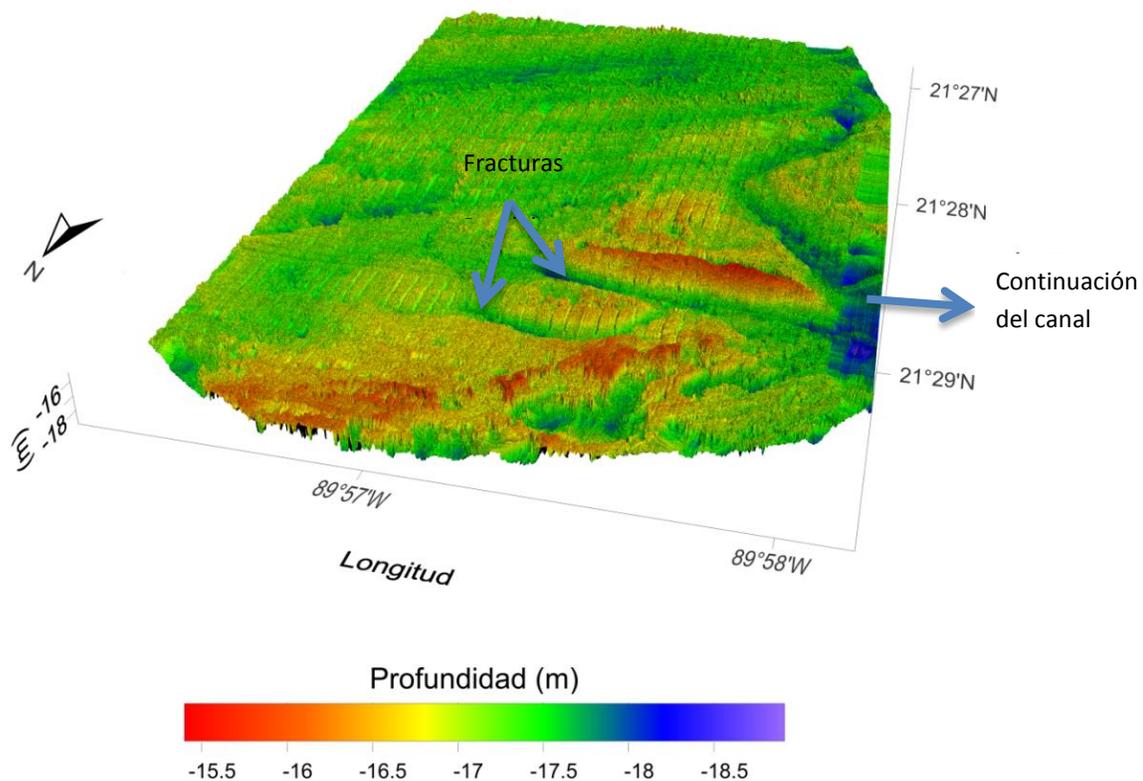


Figura 41. Mapa de batimetría en 3D de la campaña Chicxulub I.



Como se mencionó anteriormente, el canal al cambiar su curso forma meandros, lo que significa que el canal es más extenso de lo que se logra ver en el mapa. Esta teoría se reafirma con la información de la zona cercana a esta misma área en la Figura 40, donde se registra una zona de mayor extensión con profundidades entre 22 m y 23 m.

Las depresiones encontradas en esta área, (Figuras 29 y 32), son un tipo de disolución en rocas calizas llamado “*solution pan*” por las dimensiones registradas en cada una de ellas (diámetros más grandes que sus profundidades) ya que este tipo de disolución se caracteriza por su crecimiento hacia los extremos en lugar de hacia abajo debido a la acumulación de sedimentos dentro de las depresiones. Además, para su formación, requiere que la roca esté expuesta o con poca vegetación para que el agua de lluvia pueda acumularse en las depresiones y disolver la roca (Ford et al., 2007; Goff et al., 2016).

Sin embargo, el agua de lluvia o con concentraciones de CO₂, también se filtra en el subsuelo a causa de la porosidad secundaria (fracturas) producida por la misma disolución en superficie (Ford et al., 2007; Rossi, 2010). Estos flujos de agua subterránea se transportan a través de las fracturas (James et al., 1985), dando lugar a lo que se conoce como acuíferos meteóricos, que al llegar a la zona de descarga se mezcla con el agua de mar propiciando las mejores condiciones para la disolución de carbonatos (Rossi, 2010).

Para la formación de una disolución de 8 m de diámetro se requeriría 80 mil años, por lo tanto, las disoluciones de mayor tamaño indican largos periodos para su desarrollo, lo que significa que la plataforma de Yucatán experimentó una erosión kárstica y que conservó a pesar del aumento del nivel del mar (Goff et al., 2016), mientras que las



disoluciones de menor tamaño sugieren una constante disolución por la presencia de aguas subterráneas meteóricas

Otro rasgo importante en esta zona son las franjas alineadas al NE-SO encontradas en la Figura 32. Al igual que en la Figura 39, entre las longitudes $21^{\circ} 31' N$ a $21^{\circ} 34' N$, se observan lineamientos con esa misma dirección, pero sólo se identifican como rizaduras. Este patrón permite inferir que las alineaciones de material se extienden de Este a Oeste entre las latitudes $21^{\circ} 27' N$ a $21^{\circ} 34' N$.

Este tipo de alineaciones se atribuyen al transporte de sedimentos (Kenyon, 1970), principalmente por el paso de tormentas, ya que los estudios de flujos de aire registrados en la plataforma de Yucatán señalaban direcciones diferentes a los lineamientos (Goff et al., 2016). No obstante, de acuerdo a Figueroa-Espinoza et al. en 2017 los vientos predominantes registrados cerca del área de estudio se dirigen hacia el NE al igual que el oleaje (Appendini et al., 2012; López-Domínguez et al., 2017), dirección que concuerda con los lineamientos marcados en los mapas de batimetría Chicxulub I y Chicxulub II sección sur.

Dado que la plataforma carbonatada de Yucatán, es un ambiente ideal para el desarrollo de arrecifes de coral por las aguas cálidas y profundidades menores donde puede penetrar la luz solar, se pueden encontrar diferentes morfologías de arrecifes como las vistas por Zarco-Perelló et al. en 2013. Estas variaciones en las estructuras se deben principalmente, a los cambios de las condiciones de formación a lo largo de la plataforma, las cuales están en función de la profundidad, controlada por factores tales como oleaje, intensidad de sedimentación, iluminación, etc. (Martín et al., 2010),

Con los datos satelitales (Figura 40), en el área de estudio Chicxulub II sección norte, se identifica una estructura con profundidades entre 17 m y 21 m, datos que coinciden con los obtenidos en este trabajo. Sin embargo, la forma de la estructura es diferente, dando como resultado una barrera de arrecifes (Figura 42) que se extiende de Este a Oeste. Este tipo de barrera puede llegar a medir decenas de kilómetros y su crecimiento es perpendicular en dirección del oleaje formando así, una barrera para las olas por lo que los sedimentos internos se desarrollan en aguas tranquilas protegidas por la barrera, por el contrario, el frente del arrecife se constituye por bloques del arrecife que han sido arrancados durante las tempestades (Rogers et al., 1969; Kennett, 1982; Martín et al., 2010).

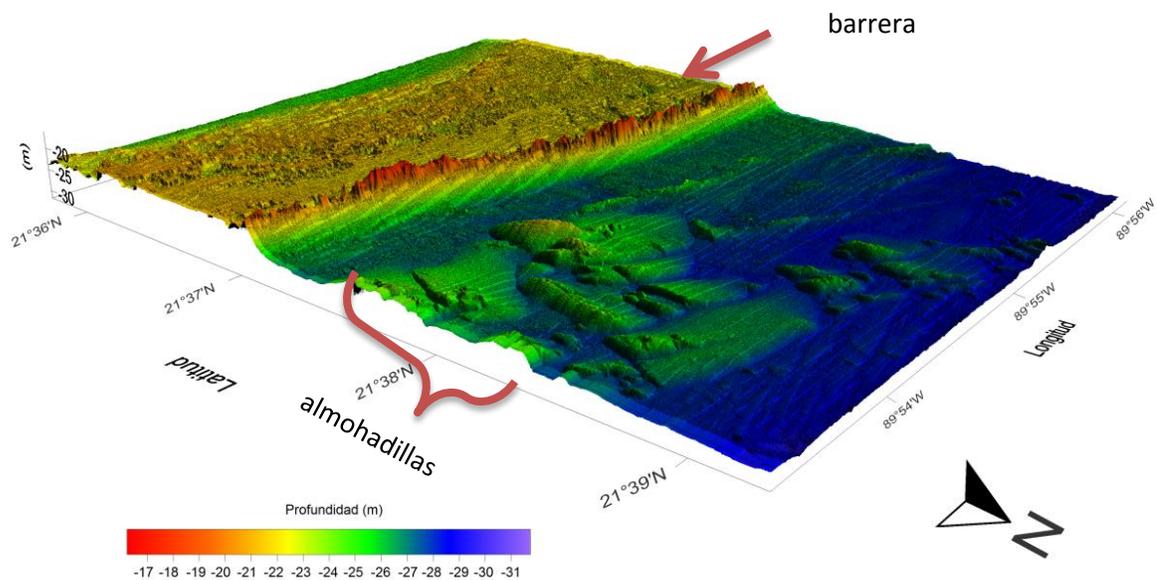


Figura 42. Mapa de batimetría en 3D de la campaña Chicxulub II sección norte.

En la Figuras 43, se observan montículos de material que presentan escaso relieve (0° a 5° de inclinación) y, de acuerdo a la clasificación de Martín et al. (2010), este tipo de montículos se denominan parches arrecifales por su forma y su pendiente. La dirección de estos conjuntos de parches arrecifales son diferentes, lo que indica un cambio en la dirección de las corrientes marinas. Asimismo, este tipo de arrecifes se forma en una zona de mayor energía donde las corrientes erosionan la estructura.

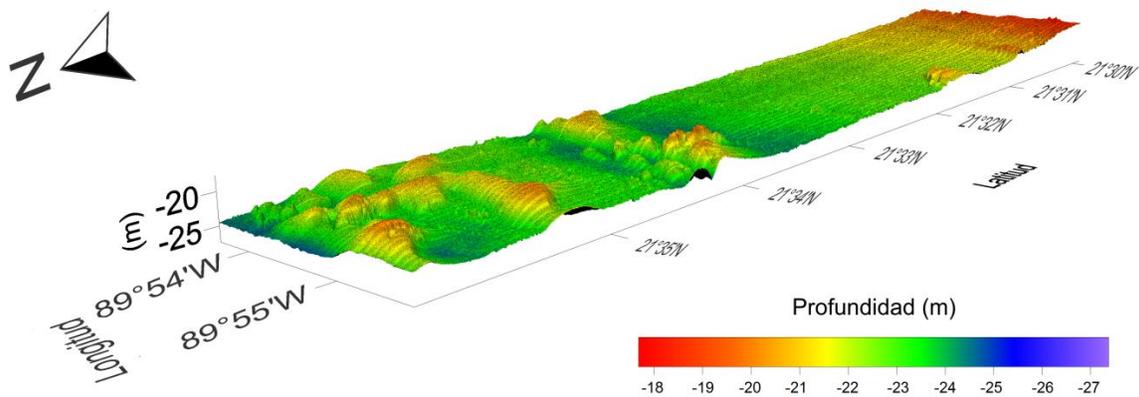


Figura 43. Mapa de batimetría en 3D de la campaña Chicxulub II sección sur. En este mapa se aprecian con mayor detalle los parches arrecifales.

Debido a que los datos de la campaña Chicxulub II (norte y sur) se adquirieron con una separación de 500 m, es posible generar un perfil perpendicular a los transectos de la batimetría Chicxulub II sección norte y, un perfil paralelo a los transectos de la batimetría Chicxulub II sección sur para conocer de forma general, la morfología a lo largo de esta zona de la plataforma de Yucatán (Figura 44). Este perfil tiene una longitud de 17 km con orientación NS y permite identificar cada una de las estructuras que se perciben en el lecho marino.

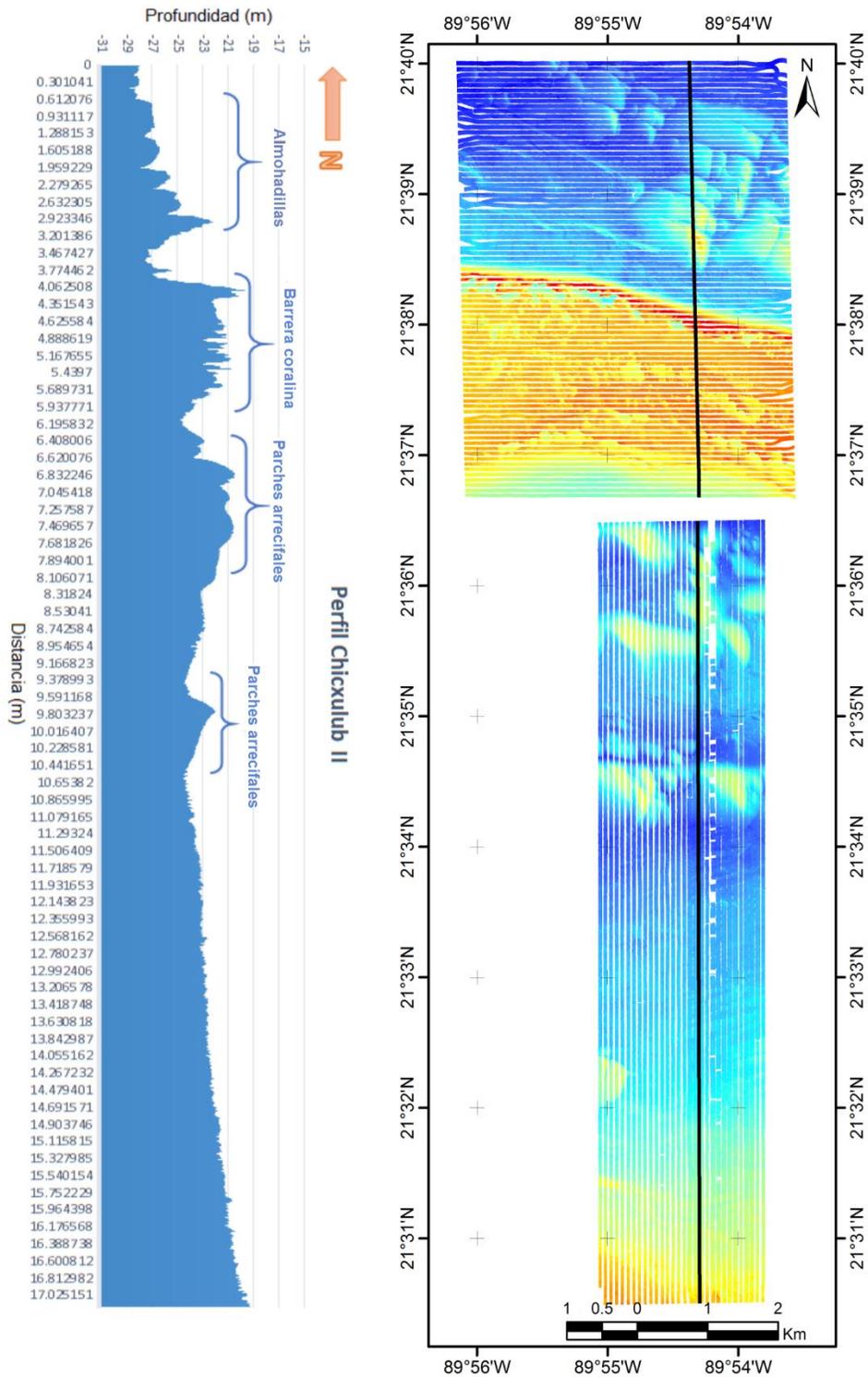


Figura 44. Perfil en dirección N-S donde se especifican las estructuras coralinas encontradas con información de la batimetría de la campaña Chicxulub II.

De acuerdo a la información de Figura 44 comparando con los modelos de plataformas y bioconstrucciones asociadas de los ciclos mayores de desarrollo arrecifal (Figura 45) (Martín et al., 2010), tenemos que este sector es la fase final de un desarrollo arrecifal.

En esta etapa, antes de la barrera arrecifal podemos encontrar montículos profundos, como los identificados en la Figura 34 como un conjunto de “almohadillas” orientadas al SE (con pendientes mayores a 7.8° de inclinación que hacen referencia a una zona de energía moderada al paso de las corrientes), mientras que, después de la barrera se encuentran otro tipo de montículos, que de acuerdo a su morfología se conocen como parches arrecifales como los vistos en la Figura 43.

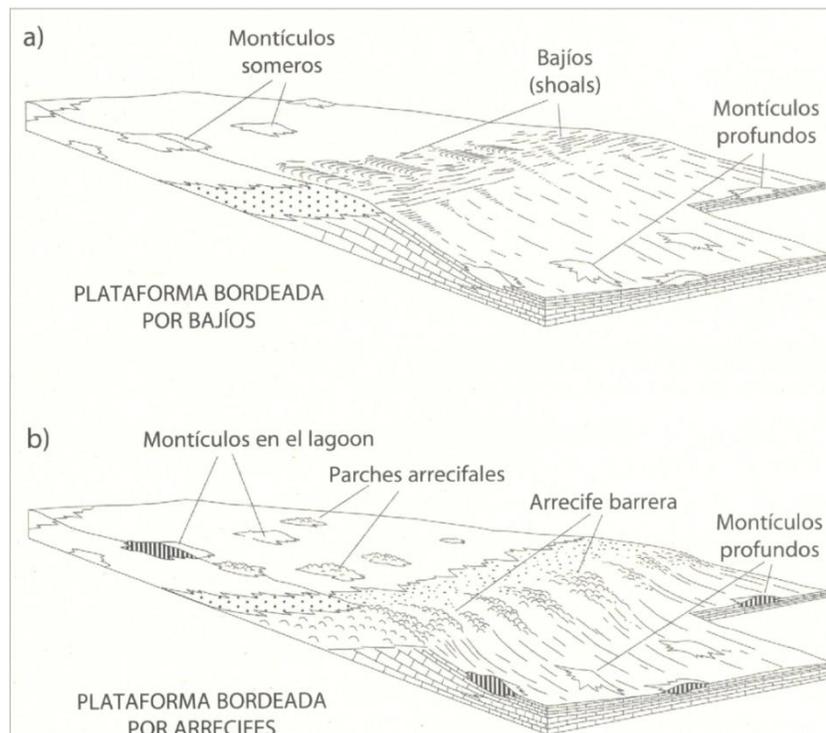


Figura 45. Modelos de plataformas y bioconstrucciones asociadas en las fases inicial a) y final b) de los ciclos mayores de desarrollo arrecifal. (Martín et al., 2010)

Finalmente, con las estructuras encontradas, se creó un mapa (Figura 45) donde se muestra un comportamiento regional de las mismas, para el caso del canal, los lineamientos de material y la extensión de la barrera arrecifal.

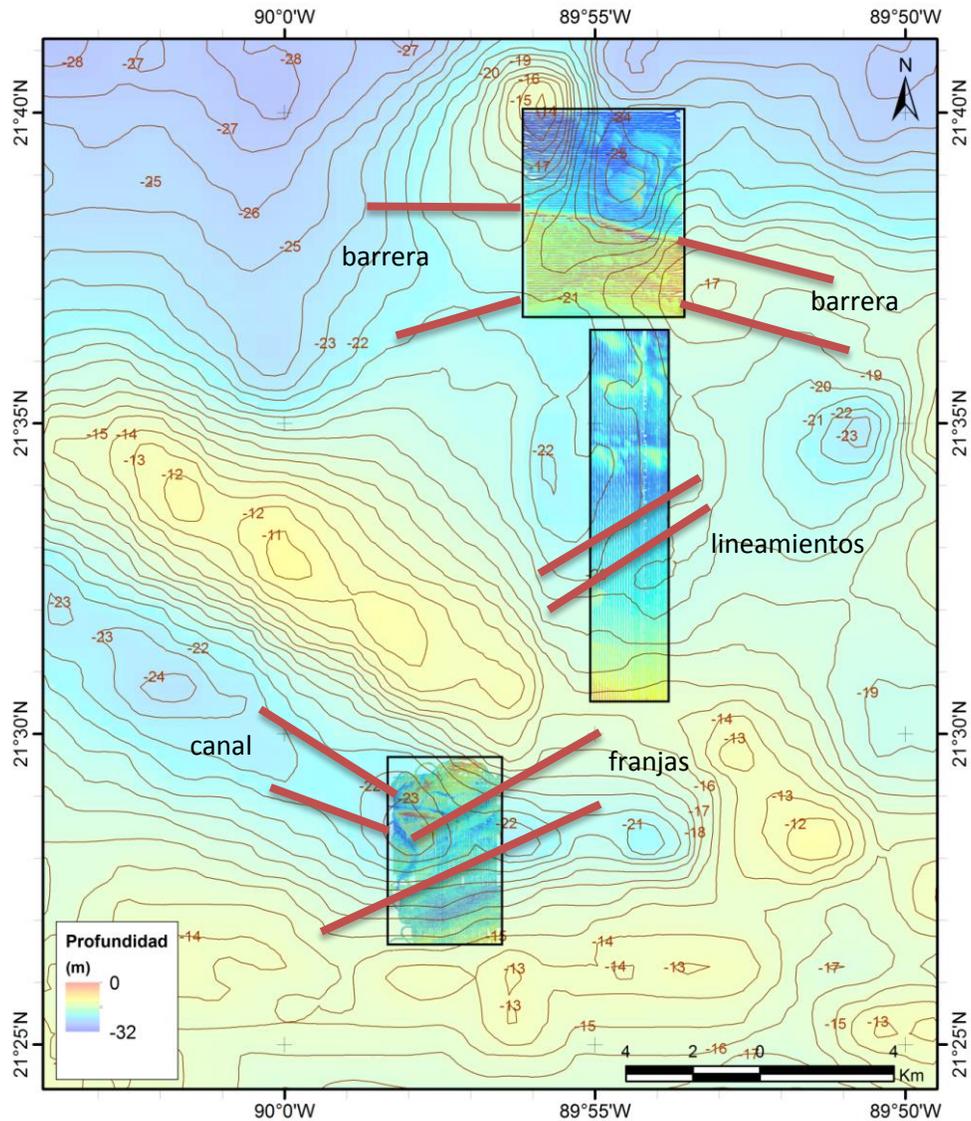


Figura 46. Mapa regional de la batimetría de las campañas Chicxulub I y II



IX. CONCLUSIONES

Con la batimetría de alta resolución, podemos observar que la configuración del piso oceánico en esta zona de la plataforma de Yucatán, se encuentra muy accidentada con rasgos morfológicos que se forman a partir del desplazamiento y erosión de sedimentos. Por un lado debido a corrientes marinas y por otro, a contribuciones de sedimentos biogénicos.

Un ejemplo de ello es la presencia de franjas y rizaduras en dirección NE-SO, las cuales coinciden con la dirección de los vientos intensos y el oleaje registrados cerca del área de estudio. Además del desarrollo de estructuras arrecifales en diferentes direcciones, ya que la circulación de las corrientes marinas favorece las condiciones de productividad orgánica y por ende, el crecimiento de organismos como los arrecifes de corales.

La complejidad de la zona más cercana a la costa (Chicxulub I), dada por la presencia de las disoluciones encontradas indica un nivel del mar más bajo que el actual debido a que este tipo de disolución se genera principalmente en roca expuesta o con poca vegetación.

Aunado a esto, la presencia del canal y el desarrollo de las disoluciones más pequeñas sugieren la presencia de cuerpos de agua subterráneos que continúan con el proceso de disolución y colapso de material.



X. REFERENCIAS

- Amos, S. (1991). Triassic-Jurassic. En Amos, S. *The Gulf of Mexico Basin* (pp. 181-204). U.S.: The Geological Society of America.
- Appendini, C. M., Salles, P., Tonatiuh-Mendoza, E., López, J., Torres-Freyermuth, A. (2012). *Longshore sediment transport on the northern coast of the Yucatan Peninsula*. Journal of Coast Research
- CARIS. (2009). CARIS HIPS & SIPS User Guide 7.0.
- Connors, M., Hildebrand, A. R., Pilkington, M., Ortiz-Aleman, C., Chavez, R., Urrutia-Fucugauchi, J., Graniel-Castro, E., Camara-Zi, A., Vasquez, J., Halpenny, J. F. (1996). *Yucatan karst features and the size of Chicxulub crater*. Geophysic Journal, 127, F11-F14.
- Derruau, M. (1978). *Geomorfología*. Francia: Ariel, 300-318
- Figuroa-Espinoza, B., Salles, P., López-González, J., Ruiz-Angulo, A., Martín-Ruiz, G. U. (2017). *Caracterización del viento en Sisal*. En Garza-Pérez, J. R., Ize-Lema, I. *Caracterización multidisciplinaria de la zona costera de Sisal, Yucatán* (pp. 13-29). Dante S.A. de C.V.
- Ford, D., William, P. (2007). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley & Sons, Ltd, 321-361
- French, A. P. (2006). *Vibraciones y ondas*. España: Reverté, 308-314
- Goff, J. A., Gulick, S. P., Pérez-Cruz, L., Stewart, H. A., Davis, M., Duncan, D., Saustrup, S., Sanford, J., Urrutia-Fucugauchi, J. (2016). *Solution pans and linear sand bedforms on the bare-rock limestone shelf of the Champeche Bank, Yucatán Peninsula, México*. Continental Shelf Research, 117, 57-66.



Hildebrand, A. R., Penfield, G. T., Kring, D. A., Pilkington, M., Camargo, A., Jacobsen, S. B., Boynton, W. V. (1991). *Chicxulub crater: a possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatan Peninsula, Mexico*. *Geology*, 19, 867-871.

James, N.P., Choquette, P.W. (1985). *Paleokarst*. USA. Springer-Verlag, 25-57

Kennett, J.P. (1982). *Marine geology*. USA. Prentice-Hall, 316-337

Kenyon, N. H. (1970). *Sand ribbons of European tidal seas*. *Marine Geology*, 9, 25-39.

Kinsler, L. E., Frey, R. A., Coppers, A. B., Sanders, J. V. (2000). *Fundamentals of acoustics*. Estados Unidos: John Wiley and Sons Inc. 120-121, 448-455

Kongsberg. (2010). *The hydrographic product family. Sound in water reveals the secrets of the deep blue*. Kongsberg, 4-11

Kongsberg. (2016). *Short EM Series Multibeam Theory*. Kongsberg, 10, 20, 40-46

Logan, B. W., Harding, J. L., Ahr, W. M., Williams, J. D., Snead, R. G. (1969). *Carbonate sediments and reefs Yucatán shelf, Mexico*. *Am. Assoc. Pet. Geol. Mem* 11, 23-103

López-González, J., Domínguez-Sandoval, M. F. (2017). *Caracterización de oleaje frente a la costa de Sisal, Yucatán*. En Garza-Pérez, J. R., Ize-Lema, I. *Caracterización multidisciplinaria de la zona costera de Sisal, Yucatán* (pp. 30-39). Dante S.A. de C.V.

López, R. E. (1973). *Estudio geológico de la península de Yucatán*. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*. Vol. 25 1-3, 23-76.



Lugo-Hubp, J., Córdova, C.-F. A. (29 de 02 de 2008). Geomorfología Marina. Recuperado el 2018, de Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad: http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/geom4mgw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no

Mapas. (s.f.). Recuperado el 2018, de Instituto Nacional de Estadística y Geografía: <http://www.beta.inegi.org.mx/app/mapas/>

Martín, J. M., Braga, J. C. (2010). *Arrecifes*. En Arche, A. *Sedimentología. Del proceso físico a la cuenca sedimentaria*. (pp. 919-970). Consejo superior de investigaciones científicas.

McFarlan, E. J., Menes, L. S. (1991). *Lower Cretaceous*. En Amos, S. *The Gulf of Mexico Basin* (pp. 181-204). Vol. J. The Geological Society of America.

Michaud, F., Ratzov, G., Sallarés, V., Collot, J., Pazmiño, N., De la Torre, G. (2009). Métodos de Instrumentación acústica para la exploración. En Collot, J. Y., Sallares, V., Pazmiño, N. *Geología y geofísica marina y terrestre del Ecuador*, (pp. 10-28), PSE-001-2009.

Monreal-Gómez, M. A., Salas-de León, D. A. (1997). *Circulación y estructura termohalina del Golfo de México*. En Lavin, M. F. *Contribución a la Oceanografía Física en México* (pp. 183-199). Monografía No. 3. Unión Geofísica Mexicana.

Monreal-Gómez, M. A., Salas-de León, D. A., García-Gasca, A. (2004). *Golfo de México, circulación y productividad*. Ciencias. 24-76

Monreal-Gómez, M. A., Salas-de León, D. A., Velasco-Mendoza, H. (2004). *La hidrodinámica en el Golfo de México*. En Caso, M., Pisanty, I., Ezcurra,



E. *Diagnóstico ambiental del Golfo de México* (pp. 47-68). Instituto Nacional de Ecología.

Ocean Currents and Surface. Recuperado el 2019, de OSCAR/Earth & Space Research: <https://earth.nullschool.net>

Padilla y Sánchez, R. J. (2007). *Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 59, 19-42.

Paull, C. K., Caress, D.W., Gwiazda, R., Urrutia-Fucugauchi, J., Rebolledo-Vieyra, M., Lundsten, E., Anderson, K., Sumner, E.J. (2014). *Cretaceous-Paleogene boundary exposed: Campeche Escarpment, Gulf of Mexico*. Marine Geology, 357,392-400.

Periáñez, R. (2010). *Fundamentos de Oceanografía dinámica*. Secretariado de publicaciones Universidad de Sevilla, 80-94, 209-232

Pope, K. O., Ocampo, A. C., Duller, C. E. (1993). *Surficial geology of the Chicxulub impact crater, Yucatan, Mexico*. Earth, Moon and Planets, 63, 93-104.

Rogers, J.J.W., Adams, J. A. S. (1969). *Fundamentos de geología*. Ediciones Omega S. A. 325-360

Rosales, J. (2017). *Principles of oceanography*. Estados Unidos: Delve Publishing.

Rossi, C. (2010). *Introducción a la diagénesis de las rocas carbonáticas*. En Arche, A. *Sedimentología. Del proceso físico a la cuenca sedimentaria*. (pp. 1105-1169). Consejo superior de investigaciones científicas.

Servicio Mareográfico Nacional. (s.f.). Obtenido de <http://www.mareografico.unam.mx/portal/>



Tago, J. (2016). *Notas de física de las ondas*. Ciudad Universitaria, México: Facultad de Ingeniería.30-33

Talley, D. L., Pickard, L. G., Emery, J. W., Swift , H. J. (2011). *Descriptive Physical Oceanography: an introduction*. United States of America: Elsevier. 49-54

Urrutia-Fucugauchi, J., Pérez-Cruz, L. (2011). *Buried impact basins, the evolution of planetary surfaces and the Chicxulub multi-ring crater*. *Geology Today*, 27(6), 220-225.

Zarco-Perelló, S., Máscaró, M., Garza-Pérez, R., Simoes, N., (2013). *Topography and coral community of the Sisal Reefs, Campeche Bank, Yucatán, México*. *Hidrobiológica*, 23(1), 28-41