



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN  
CIENCIAS DE LA TIERRA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“ CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA  
DEL RELIEVE BATIMÉTRICO DE LOS  
DIAPIROS SALINOS PROFUNDOS DE  
LA SONDA DE CAMPECHE DEL  
GOLFO DE MÉXICO”**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO GEOFÍSICO**

**P R E S E N T A :**

**FRANCISCO PONCE NÚÑEZ**

DIRECTOR DE TESIS:

**DR. CARLOS A. Q. MORTERA GUTIÉRREZ**

JURADO:

**DR. RICARDO J. PADILLA Y SÁNCHEZ**

**M. en. C. DAVID ESCOBEDO ZENIL**

**DR. WILLIAM L. BANDY**

**DR. OSVALDO SÁNCHEZ ZAMORA**



CIUDAD UNIVERSITARIA, D. F., NOVIEMBRE 2009



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIRECCIÓN  
60-I-705

**SR. FRANCISCO PONCE NÚÑEZ**  
**Presente**

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Dr. Carlos A. Mortera Gutiérrez y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geofísico:

**CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DEL RELIEVE BATIMÉTRICO DE LOS DIAPIROS  
SALINOS PROFUNDOS DE LA SONDA DE CAMPECHE DEL GOLFO DE MÉXICO**

**RESUMEN**

- I INTRODUCCIÓN**
- II ANTECEDENTES**
- III PROCESAMIENTO DE DATOS MULTIBAZ MARINOS**
- IV RESULTADOS**
- V INTERPRETACIÓN**
- VI CONCLUSIONES**
- BIBLIOGRAFÍA**
- ANEXO**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente

**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**

CD. Universitaria, D.F., a 4 de Junio de 2009

EL DIRECTOR

**MTRO. JOSÉ GONZALO GUERRERO ZEPEDA**

**JGGZ\* RJPYS\*srs**

*A todos Ustedes, mis Padres, Familiares, Amigos y Maestros, quienes me enseñaron a pescar; su confianza, apoyo y consejo están reflejados en este logro.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Deseo expresar mi mas sincero agradecimiento para

El Dr. Carlos A. Mortera Gutiérrez por el apoyo, dirección y orientación brindados durante mi estancia en el Instituto de Geofísica, como director de esta Tesis y el tiempo que hemos trabajado juntos, contribuyendo a mi formación personal y profesional.

El Dr. William L. Bandy, por su consejo y apoyo académico durante mi estancia en el Instituto de Geofísica y la elaboración de esta Tesis.

El Dr. Ricardo J. Padilla y Sánchez, M. en C. David Escobedo Zenil, y Dr. Osvaldo Sánchez Zamora, miembros del jurado de mi examen profesional, por la confianza brindada, comentarios y aportes a este trabajo.

El Dr. Gerhard Bohrmann, Dr. Carlos A. Mortera Gutiérrez, Dra Elva Escobar Briones, Dr. Ian R. McDonald y participantes de la campaña SO174-2 y tripulación del RV SONNE, por proporcionar la materia prima para la realización de este trabajo (Datos batimétricos multihaz).

El Ing. Miguel A. García Palacios e Ing. Héctor Tecanhuey Sánchez, por su apoyo técnico durante mi estancia en el Instituto de Geofísica y el desarrollo de esta tesis.

La Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería, por sentar las bases de mi formación profesional.

El personal administrativo del Instituto de Geofísica y de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México

DGAPA-PAPIIT, por la beca otorgada dentro del proyecto IN-104707.

Mis padres, familiares y amigos, por su confianza, tiempo y apoyo incondicionales.

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
RESUMEN .....	v
ÍNDICE GENERAL.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ANTECEDENTES.....	3
2.1. Fisiografía y morfología del área de estudio .....	3
2.1.1. Provincias Fisiográficas de la Cuenca del Golfo de México .....	5
2.1.2. Morfología del Área Norte de los Domos de Campeche .....	7
2.2. Marco Geológico.....	7
2.2.1. Tectónica Salina.....	8
2.2.2. Sonda de Campeche .....	9
2.3. Datos de Geofísica Marina en los Domos de Campeche; .....	10
2.3.1. Ecosondeo Monohaz .....	10
2.3.2. Sísmica Monocanal .....	11
2.4. Ecosondas en Aguas Profundas .....	13
2.4.1. Ecosonda Monohaz.....	13
2.4.2. Ecosonda Multihaz.....	14
2.4.3 Registro del Movimientos del Buque.....	15
2.4.4. Propagación acústica en la mar .....	16
2.4.5. Distribución de la velocidad acústica en el agua .....	19
2.4.6. Refracción del sonido en la columna de agua .....	21
2.4.7. Retro-dispersión Acústica del Lecho Marino .....	23



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

2.5 Campaña SO174-2 abordó de R/F SONNE .....	24
2.5.1 Objetivos de la Campaña SO174-2 .....	25
2.5.2 Equipos abordó del RV SONNE .....	26
2.6. Datos Multihaz en el Norte de los Dómos de Campeche .....	27
<b>3. PROCESAMIENTO DE DATOS MULTHAZ MARINOS .....</b>	<b>28</b>
3.1. Conceptos de Datos Multihaz .....	28
3.1.1. Retrodispersión .....	28
3.1.2. Intensidad Instantánea de Retrodispersión .....	31
3.1.3. Resolución Acústica del Lecho Marino .....	34
3.2. Procesamiento de Datos Batimétricos Multihaz .....	34
3.2.1. Correcciones por la Escora de un Buque .....	37
3.2.2. Perfil Vertical de las Velocidades Acústicas .....	42
3.2.3. Extracción de Segmentos de Dirección Constante .....	45
3.2.4. Filtrado de Datos .....	47
3.2.5. Modelo Digital de Terreno .....	50
3.3. Imágenes Acústicas del Lecho Marino .....	52
3.3.1. Imágenes Acústicas .....	53
3.3.2. Compilación del Mosaico Final .....	56
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>60</b>
4.1 Carta Batimétrica .....	60
4.2 Mosaico de Imágenes de Backscatter.....	68
4.3 Análisis de Resultados.....	76
<b>5. INTERPRETACIÓN .....</b>	<b>78</b>
5.1 Morfología .....	78
5.2 <i>Backscatter</i> .....	79
<b>6. CONCLUSIONES .....</b>	<b>81</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>82</b>
<b>ANEXO.....</b>	<b>86</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Áreas acústicamente radiadas y sus extensiones <i>alongtrack</i> y <i>acrosstrack</i> en metros.	34
Tabla 3.2. <i>Surveys</i> de la campaña SO174-2 en el área de los Domos de Campeche.	35
Tabla 3.3. Segmentos del <i>Survey</i> SO174-2_18 usados en la calibración.	40
Tabla 3.4. Resumen de los segmentos extraídos.	46
Tabla 3.5. Estadísticas por <i>Survey</i> del proceso de Filtrado.	47

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Límites estructurales de la cuenca del Golfo de México. [Salvador, 1991].	3
Figura 2.2. Batimetría del Golfo de México [modificada de Salvador, 1991].	4
Figura 2.3. Regiones fisiográficas marinas del Golfo de México. [Salvador, 1991].	6
Figura 2.4. Halokinesis. a) Comienzo del flujo de sal bajo la tectónica de extensión; b) Perforación en los sedimentos superiores debida al diapirismo. [Modificada de Warren, 2006].	9
Figura 2.5. Batimetría monohaz. Mapa batimétrico derivado de los sondeos monohaz. Sector Norte de los Domos de Campeche delimitado por el recuadro; Perfil sísmico monocanal señalado en rojo. Cortesía de: NGDC, NOAA y Lamont-Doherty Earth Observatory.	11
Figura 2.6. Perfil sísmico de la campaña V2402 en el área norte de los Domos de Campeche.	12
Figura 2.7. Problemática del ecosondeo monohaz.	14
Figura 2.8. Esquema de un sistema multihaz. Se muestran: Swath, swath width, direcciones <i>alongtrack</i> y <i>acrosstrack</i> .	15
Figura 2.9. Movimientos del buque.	16
Figura 2.10. Promedio anual de temperaturas superficiales.	18
Figura 2.11. Estratificación del agua del océano.	19
Figura 2.12. Perfil de velocidades acústicas en el océano y su variación con la salinidad y temperatura.	20
Figura 2.13. Trayectorias de los rayos. a) Ley de Snell de la refracción. b) Relación entre el gradiente de velocidad y la trayectoria del rayo. [Modificada de de Moustier, 2009].	21
Figura 2.14. Solución del trazado de rayos. [Modificada de de Moustier, 2009].	22
Figura 2.15. Ley de Snell para un rayo que incide en el lecho marino. Nótese que para ángulos menores al crítico existe una contribución de <i>bacscatter</i> del volumen sedimento.	23
Figura 2.16. Relación de la energía retrodispersada por la superficie del lecho marino debido a la rugosidad y contraste de impedancias acústicas. [modificada de Moustier, 2009].	24
Figura 2.17. Levantamiento en aguas mexicanas de la campaña SO174-2 (Leg 2). [Bohrmann and Schenck, 2004].	25

Figura 3.1. Geometría de la dispersión.	29
Figura 3.2. Rugosidad y contraste de impedancia en el backscatter.	30
Figura 3.3. Contribución de los fenómenos al backscatter con el ángulo de incidencia.	30
Figura 3.4. Intensidad instantánea de retrodispersión.	31
Figura 3.5. Medición del Backscatter.	32
Figura 3.6. Área acústicamente radiada.	33
Figura 3.7. Entorno gráfico del CARAIBES-PP.	36
Figura 3.8. Procesamiento general de datos de Batimetría multihaz.	36
Figura 3.9. Diagrama de flujo para determinación de errores sistemáticos de balanceo y perfil de velocidades acústicas.	37
Figura 3.10. Efecto de escora en la batimetría.	38
Figura 3.11. Zona de calibración (Survey SO174-2_18) en la región de los Domos de Sigsbee.	39
Figura 3.12. Calibración por efecto de escora. a) izquierda: Batimetría de los dos perfiles; derecha: corte transversal del relieve batimétrico; b) batimetría mostrando la corrección. inferior: corte del área de calibración.	41
Figura 3.13. Corrección del efecto de escora.	42
Figura 3.14. Perfil de velocidades usado durante la campaña SO174-2.	43
Figura 3.15. Efecto de error en el perfil de velocidades acústicas.	44
Figura 3.16. Calibración del perfil de velocidades.	44
Figura 3.17. Segmentos extraídos para el archivo SO174-2_20 a) Batimetría en crudo del Survey SO174-2_20; b) histograma de navegación para líneas horizontales; c) histograma de dirección para líneas verticales.	45
Figura 3.18. Filtrado automático. a) Método Delauney; b) acercamiento de la batimetría sin filtrar.	48
Figura 3.19. Ventanas de Odicce.	49
Figura 3.20. Filtrado manual de sondeos en Odicce.	50
Figura 3.21. Tipos de entornos para los procesos de mallado. (a) Entornos para el módulo Mailla: (i) entorno de 1 celda, (ii) entorno de 2 celdas, (iii) entorno de 3 celdas; (b) Entorno para el módulo Maillp.	51
Figura 3.22. Diagrama de flujo del proceso para obtener el mosaico de imágenes acústicas.	52
Figura 3.23. Posición de los valores de backscatter en la imagen acústica.	53
Figura 3.24. Imagen acústica preliminar para un segmento del survey SO174-2_20.	54
Figura 3.25. Traslape de áreas iluminadas.	55
Figura 3.26. Interpolación de la imagen acústica.	56
Figura 3.27. Mosaico de imágenes acústicas.	57
Figura 3.28. Histograma de contraste.	58
Figura 3.29. Ecuilización de contraste.	59
Figura 4.1. Carta batimétrica de alta resolución: a) carta batimétrica con curvas de nivel; b) relieve batimétrico.	61
Figura 4.2. Estructuras mayores del relieve batimétrico. Se muestran los domos numerados, el valle al Sureste y la zona de slump y ripples en el sector Noreste.	62

Figura 4.3. Orientación de las estructuras dómicas. Se distinguen dos agrupaciones de orientación, Sur y Norte de la línea punteada.	63
Figura 4.4. Cordilleras de domos sucesivos.	64
Figura 4.5. Pendiente en la región Norte de los Domos de Campeche. Se muestra la pendiente general (amarillo) y la de los valles interdómicos (rojo)	65
Figura 4.6. Lineamiento con rumbo de 60°	66
Figura 4.7. Canal. El canal fluye de Norte a Sur, hasta desembocar en la planicie de Sigsbee	67
Figura 4.8. Mesetas de los domos 11 (a) y 13 (b)	68
Figura 4.9. Mosaico de Imágenes de Backscatter, mostrando las dos escalas, tanto en dB como Gr.	69
Figura 4.10. Artefactos en la imagen acústica.	70
Figura 4.11. Ejemplo de la imagen acústica que revela la morfología (sector NO)	71
Figura 4.12. Zonas de alto <i>backscatter</i> de cimas y flancos.(a) domos 5, 6, 7, 10 .	72
Figura 4.13. Ejemplos de zonas de alto BS asociadas a posibles aludes	73
Figura 4.14. Zonas de alto backscatter en valles, o planicies	74
Figura 4.15. Zonas de alto BS asociadas a canales	75
Figura 4.16. Zonas de bajo BS no asociadas a domos	76

## RESUMEN

Durante la campaña SO174-2 (octubre 26 a noviembre 13 de 2003) a bordo del RV SONNE se colectaron por vez primera datos de batimetría multihaz de alta resolución y reflectividad acústica (backscatter) del piso marino en el área norte de la provincia salina de los Domos de Campeche (21°15' N a 22° 10' N y 92°40' W a 93°35' W), con una ecosonda multihaz Kongsberg, modelo EM120. Los datos batimétricos fueron postprocesados para corregir errores sistemáticos de escora y generar un modelo digital de terreno de esta área. Se realizaron el mosaico de imágenes de intensidad de backscatter tomando como base el modelo batimétrico, lo que permite asignar una característica acústica en una pequeña porción del piso marino (50 m x 50m). El área norte de los Domos de Campeche presenta una profundidad entre 2500m y 3600m, está marcada por una morfología monticular. Los domos alcanzan una altura de hasta 600m; en la región norte predominan las estructuras aisladas, mientras que en la región sur predominan las cordilleras de estructuras ligadas. En la porción éste del área de estudio, conocida como el Cañón de Campeche no se aprecian gran relieve ni estructuras. Las imágenes de intensidad acústica muestran cambios en las características acústicas a lo largo de toda el área, permitiéndonos reconocer procesos sedimentarios que ocurren en la región y distinguirlos de los artefactos de adquisición. Las imágenes muestran canales submarinos y aludes. En algunos domos se aprecia una región de mayor intensidad en la cima, posiblemente producto de las evaporitas que afloran o del crecimiento del domo. En el domo conocido como "Chapopote" – así como en otros domos - se observan zonas de alta intensidad cubriendo regiones sobre los flancos, posiblemente asociadas con mineralización de hidratos de gas o formación de carbonatos relacionados con la filtración de hidrocarburos al piso marino en la región.



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las ecosondas multihaz se desarrollaron a principios de la década de 1970, como respuesta a la necesidad de obtener una mayor densidad de datos de profundidades transversas a la trayectoria del derrotero [Glenn, 1970; Renard and Allenou, 1979]. En la actualidad, además de proporcionar un registro de los valores batimétricos a lo largo de un barrido lateral en forma una cinta o *swath*, estas ecosondas tienen la capacidad de medir la intensidad de la dispersión acústica sobre el fondo marino (referido técnicamente como “*backscatter strength*”) por cada valor de profundidad, proporcionando una imagen acústica del fondo. Esta intensidad está directamente relacionada con las propiedades físicas del lecho marino [e.g. de Moustier 1986; de Moustier and Alexandrou, 1991], lo que permite clasificar el tipo de lecho marino y su rugosidad. Desde la década de los 80’s, estas imágenes acústicas del backscatter de ecosondas multihaz se han empleado en estudios geológicos para clasificar acústicamente el tipo de piso marino en aguas someras [Gardner *et ál.*, 2003; Orange *et ál.*, 2007] así como en aguas profundas [e.g. Szusman *et ál.*, 2006; Beyer *et ál.*, 2005; Beyer *et ál.*, 2007] tanto en la industria petrolera como en otros sectores.

Varios estudios de geofísica marina [Schmahl *et ál.*, 2003; Bohrmann and Shenck, 2004; Kleiner, *et ál.*, 1999; Silva *et ál.*, 2004] han utilizado estas ecosondas multihaz para cartografiar en gran detalle el relieve batimétrico y el backscatter del lecho marino en el sector norte del Golfo de México. El primer estudio de este tipo de levantamiento en el sector sur del Golfo se llevó a cabo en la campaña SO174-2, a bordo del buque alemán *RV SONNE*, del 26 de octubre al 12 de noviembre de 2003 [Bohrmann and Shenck, 2004]. Durante esta campaña se recolectaron corredores de múltiples datos de profundidades y *backscatter* en la provincia de los diapiros salinos profundos de la Sonda de Campeche, en un rango de profundidades entre 2500 m a 3600 m, con un ecosonda multihaz de 12 kHz Kongsberg modelo EM120. Esta ecosonda emite simultáneamente 191 haces cubriendo un sector de hasta 150°. Posteriormente a cada emisión se registran los tiempos de arribo del eco proveniente del lecho marino y la intensidad media del *backscatter* por cada haz [Hammerstad, 2000; Brown and Blondel, 2008].



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

El objetivo de esta tesis es usar la imagen acústica y el modelo batimétrico, obtenidos del post-procesado de los datos de ecosonda multihaz de la campaña SO174-2, para reconocer la ocurrencia de procesos sedimentarios asociados con la filtración de hidrocarburos al lecho marino y el relieve batimétrico. El post-procesado se realizó con el paquete *PP-CARAIBES* de *IFREMER*, principalmente para identificar y corregir errores en los datos batimétricos con el fin de obtener un modelo digital de terreno suavizado, la imagen de *backscatter* del lecho marino y el modelo 3D de batimetría-imagen acústica.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1. Fisiografía y Morfología del Área de Estudio

La cuenca estructural del Golfo de México ocupa aproximadamente 2.7 millones de kilómetros cuadrados, de los cuales el 60% ( $1.5 \times 10^6 \text{ km}^2$ ) se encuentran cubiertos por el mar (Figura 2.1). Sus límites hacia el Norte, Noroeste, Oeste y Suroeste, están marcados por cadenas montañosas: al Norte, el borde sur de los Apalaches y las montañas Ouachita; al Noroeste, el cinturón orogénico de Ouachita, la Meseta Edwards y el Macizo (*uplift*) de Marathon; al Oeste, la Sierra Madre Oriental; y al Suroeste, la Plataforma de Córdoba y el Macizo de Chiapas. Los límites Sureste y Este los forman los bordes orientales de las plataformas carbonatadas de Yucatán y Florida, respectivamente.

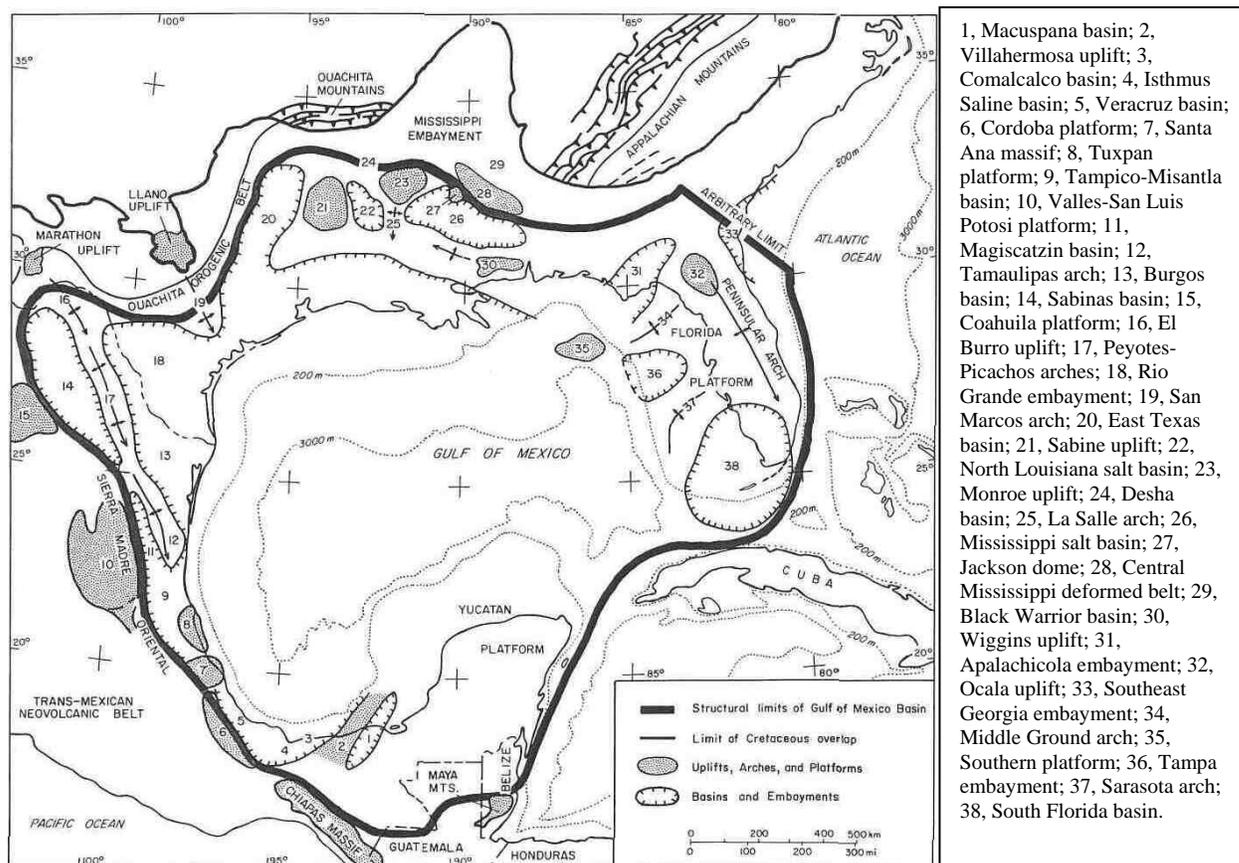


Figura 2.1. Límites estructurales de la cuenca del Golfo de México. [Salvador, 1991].



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

La fisiografía actual del relieve batimétrico de la Cuenca del Golfo de México (Figura 2.2.) es reflejo de los eventos que le dieron origen, desde su apertura hasta la actual configuración, resumiéndose en las etapas: (a) apertura (*rifting*), (b) subsidencia de la cuenca, (c) desarrollo de plataformas carbonatadas, (d) variaciones en la sedimentación y márgenes debido a los cambios eustáticos del nivel del mar, (e) movimiento de la sal en forma diapírica, (f) deslizamiento de laderas (*slumping*), y (g) flujos de densidad (turbiditas). Las enormes secuencias de sedimentos que ocasionó la subsidencia significativa han “borrado” las evidencias de la apertura (“*rift*”) del golfo. Desde el origen de este mar somero, la sal acumulada debido a la alta tasa de evaporación se ha movido a través de los sedimentos que se han estado depositando en la cuenca [Bryant *et ál.*, 1991].

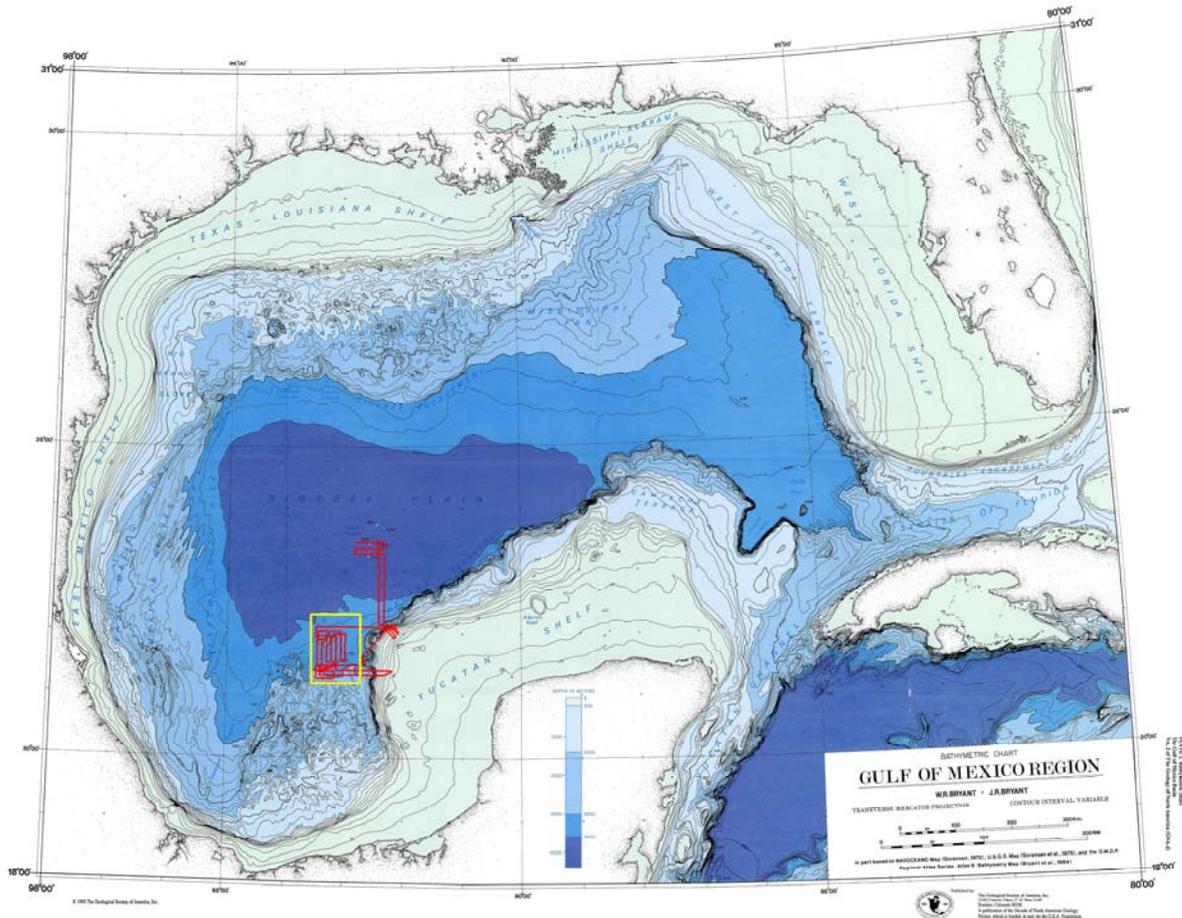


Figura 2.2. Batimetría del Golfo de México [modificada de Salvador, 1991].

### **2.1.1. Provincias Fisiográficas de la Cuenca del Golfo de México**

#### ***Regiones Fisiográficas Terrestres***

En la parte terrestre de la Cuenca del Golfo de México (Figura 2.3) se distinguen dos contrastantes provincias fisiográficas en la litología: al Sureste y Este, se encuentran los macizos de rocas carbonatadas de las penínsulas de Yucatán y Florida; y al Norte, Noroeste y Oeste se encuentran las secuencias terrígenas de las planicies costeras [Bryant *et ál.*, 1991].

Las penínsulas de Yucatán y Florida son las partes emergidas de las plataformas del mismo nombre y en general su elevación no supera los 100 m sobre el nivel del mar (SNM). Su superficie topográfica refleja una estructura plana producto de las secuencias de carbonatos del Cretácico-Cenozoico que las subyacen; estas secuencias alcanzan un espesor de 3,000 m hasta 4,000 m en la Península de Yucatán y hasta 7,000 m al Sur de la Península de Florida. La Península de Yucatán no presenta cuerpos (ríos o lagos) de aguas superficiales, mientras que el relieve de Florida es esculpida por los abundantes ríos.

Las planicies costeras son muy extensas al Norte y Noroeste de la cuenca, donde están dominadas por los valles del Mississippi y del Rio Grande (Rio Bravo); al Oeste, la Planicie Costera del Golfo de México en el territorio mexicano es la más estrecha. Estas planicies están formadas de secuencias terrígenas del Cretácico al Cuaternario, que presentan un echado general hacia el centro de la cuenca.

#### ***Regiones Fisiográficas Marinas***

Bryant *et ál.* [1991] describe la fisiografía submarina del Golfo de México que es conformada “aún más contrastante que la parte terrestre.” La Figura 2.3 muestra las regiones fisiográficas marinas. La plataforma continental es cambiante, las porciones Norte, Sur y Este son muy amplias – con anchuras de hasta 170 Km – mientras que la porción al Este de México se angosta hasta llegar a ser menor de 13 Km en algunas zonas (e.g. región del Complejo Volcánico de los Tuxtlas). La Planicie Abisal de Sigsbee es extremadamente plana, interrumpida ocasionalmente por estructuras monticulares asociadas al diapirismo salino. El extenso talud continental de Texas y Louisiana muestra una batimetría ondulante que contrasta con lo abrupto de los escarpes de las plataformas

de Campeche y Florida. El Cañón DeSoto en el talud del norte, es un valle de erosión que marca el límite entre las provincias terrígenas del oeste del Golfo de México y los carbonatos de la Plataforma de Florida. El Cañón de Campeche es el límite entre los carbonatos de la plataforma de Yucatán y la provincia diapírica de los Domos de Campeche. El Cañón de Veracruz (referido como “Veracruz Tongue”) forma un estrecho de pendiente muy suave, que separa la provincia de los Domos de Campeche del Talud Oriental de México. Este talud consiste de estructuras alargadas en forma de dorsales conformadas por las capas sedimentarias plegadas, producto del movimiento de masas. El Abanico del Mississippi es la estructura sedimentaria más prominente en la zona abisal, como resultado de los masivos depósitos de turbiditas que fluyen desde la desembocadura del Río Mississippi.

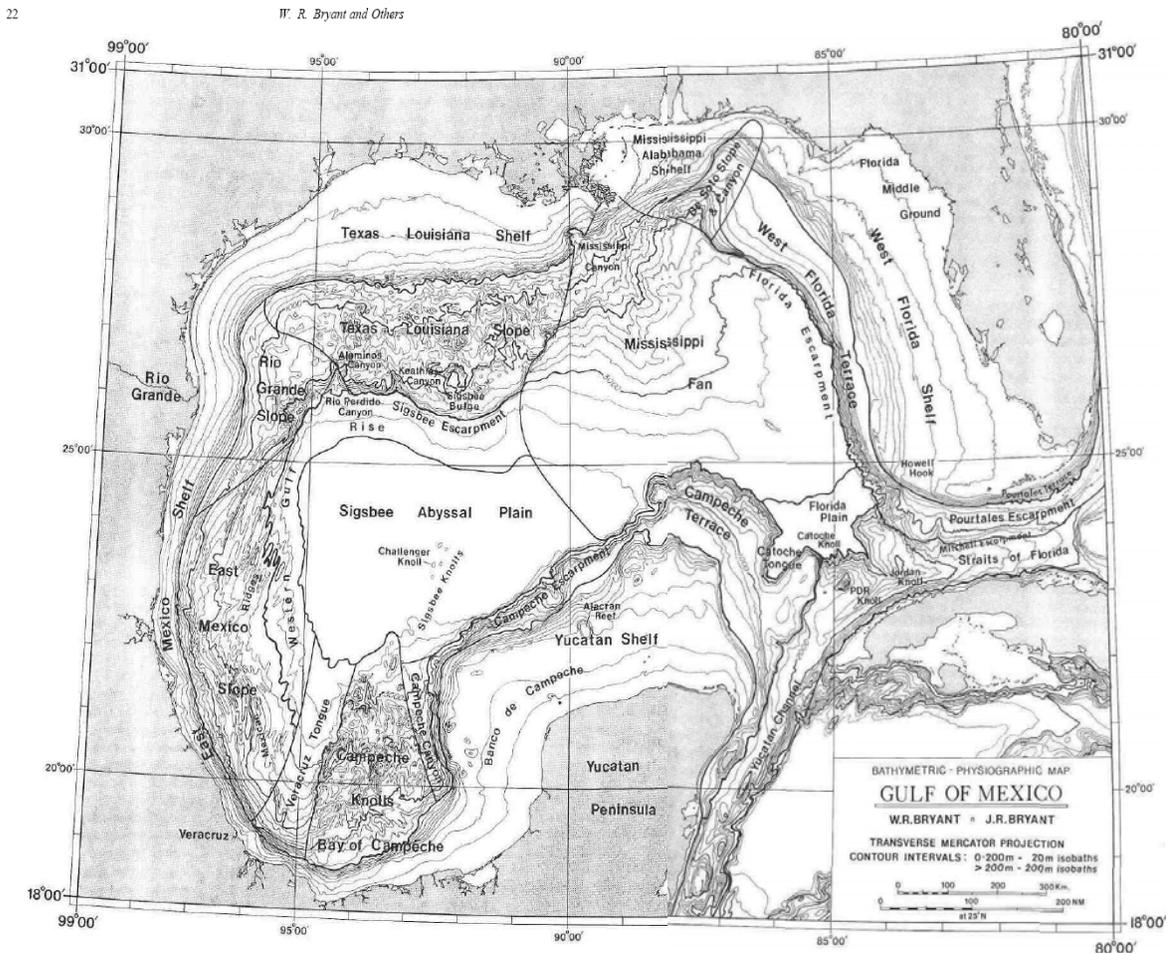


Figure 2. Bathymetric-physiographic map. Gulf of Mexico.

Figura 2.3. Regiones fisiográficas marinas del Golfo de México [Salvador, 1991].

### **2.1.2. Morfología del Área Norte de los Domos de Campeche**

La provincia de los Domos de Campeche se encuentra en la Bahía de Campeche y presenta una batimetría monticular como resultado del diapirismo salino, muy similar a la que se observa en el talud de Texas-Louisiana. Se encuentra limitada al Oeste por el Cañón de Veracruz (Veracruz Tongue), al Este por el Cañón de Campeche, su borde al Norte se disipa en la Planicie de Sigsbee. Al Sur, la provincia colinda con la prolongación de la Plataforma Mexicana del Este, la Provincia Salina del Istmo y la Plataforma de Yucatán. El alineamiento que existe entre las provincias de la Cuenca Salina del Istmo, los Domos de Campeche y los Domos de Sigsbee sugiere que la sal subyace en toda el área del talud de la Sonda de Campeche [Bryant *et ál.*, 1991; Gutiérrez-Estrada *et ál.*, 2001]

El sector norte de la provincia es caracterizado por montículos cuya altura oscila entre los 100 m y hasta 1,500 m [Salvador, 1991; Bohrmann and Schenck, 2004]. En la región central del talud, alrededor de los 20° N de latitud, la provincia es caracterizada por las estructuras formadas por los macizos salinos subyacentes. La parte superior de las masas de sal están proyectadas hacia arriba en una multitud de picos, éstos quedan cubiertos en promedio por 1 Km de sedimentos fuertemente deformados y fallados. Estas deformaciones tienen su expresión superficial en la batimetría monticular [Ewing, 1991; Aguayo *et ál.*, 2001]. En la zona norte de la Sonda de Campeche y en el área de los Domos de Sigsbee, las estructuras salinas son de menor dimensión. Los diapiros observados están mas aislados y generalmente atraviesan el lecho marino, formando domos (referidos también como “*knolls*”) de hasta 1,500 m [Bohrmann and Schenck, 2004].

## **2.2. Marco Geológico**

La cuenca del Golfo de México comenzó su formación en el Triásico Tardío (Figura 2.1). En este tiempo se dio la ruptura del supercontinente Pangea con un proceso de *rift* que separó las placas de África, Sudamérica y Norteamérica; proceso que duró hasta finales del Jurásico Medio. También durante el Jurásico Medio se dieron las condiciones de hipersalinidad para la formación de grandes depósitos de evaporitas (sal) en el centro de la cuenca, en un régimen tectónico de extensión muy lento. Se ha propuesto que durante el episodio final de la apertura del golfo, que llevó al bloque de Yucatán a su posición actual,

el cuerpo principal de sal quedó fraccionado, conformando las dos provincias salinas actuales al Sur y al Norte en el golfo [Salvador, 1991; Pindell *et ál.*, 1999]. La posterior subsidencia al interior de la cuenca desde el Cretácico provee las condiciones favorables para el diapirismo y flujos laterales de sal [Nelson, 1991].

Desde el Jurásico Tardío la mayor parte de la cuenca ha sido geológicamente estable, y la subsidencia hacia la parte central de la misma ha persistido hasta nuestros días. Inicialmente estuvo controlada por el cese del *rift*; posteriormente, la carga sedimentaria proveniente principalmente de los márgenes del norte y noroeste mantiene la subsidencia hasta la actualidad, formando una gran columna de capas sedimentarias, las cuales han sido afectadas por el movimiento de la sal formada en el Jurásico. Durante el Cretácico Temprano la mayor parte de la cuenca estuvo rodeada de plataformas carbonatadas, mientras que las plataformas de Yucatán y Florida permanecieron emergidas hasta el Cretácico Medio. Después de ser parcialmente cubiertas por el agua, la formación de carbonatos sobre éstas ha sido continua. [Salvador, 1991].

### **2.2.1. Tectónica Salina**

La tectónica salina para inducir el movimiento salino es el resultado de la carga diferencial de sedimentos sobre las capas de sal y de la reología de los depósitos de sal. El flujo y deslizamiento de la sal depende de la carga sedimentaria superior, extendiéndose lateralmente o penetrando los depósitos sobreyacientes (Figura 2.4). Las estructuras subhorizontales más comunes son: capas de sal, lenguas y montículos alóctonos. Los diapiros se definen como estructuras de flujo que muestran contactos discordantes con los estratos de sedimento que los encajonan [Warren, 2006].

La capa de sal posee una presión propia debida a su peso (carga litostática). Una situación típica previa al diapirismo es donde una unidad presurizada de sal subyace a una sección sedimentaria más competente. La sedimentación de la carga provoca el aumento de la presión, y la sección superior falla, típicamente en un régimen de extensión [Warren, 2006]. La presión se libera en la carga sedimentaria por medio de falla frágil y la sal presurizada fluye con el gradiente de presión. Mientras esto ocurre, los bloques fracturados rellenan el espacio dejado por la sal (Figura 2.4.a). La perforación de una

sección sedimentaria ocurre cuando la presión hidrostática de la sección de sal crea una fuerza de flotación que sobrepasa la resistencia de las capas superiores (Figura 2.4.b). El diapirismo activo está marcado por altos topográficos asociados a la cresta del cuerpo salino. La velocidad de desplazamiento de la sal está controlada por la sedimentación y la tectónica regional. Conforme a su proximidad al cuerpo salino, se presentan cambios en el espesor de las capas, la geometría de las mismas y las relaciones estratigráficas que guardan, así como la aparición de deslizamientos y fallamiento. (Figura 2.4.b)

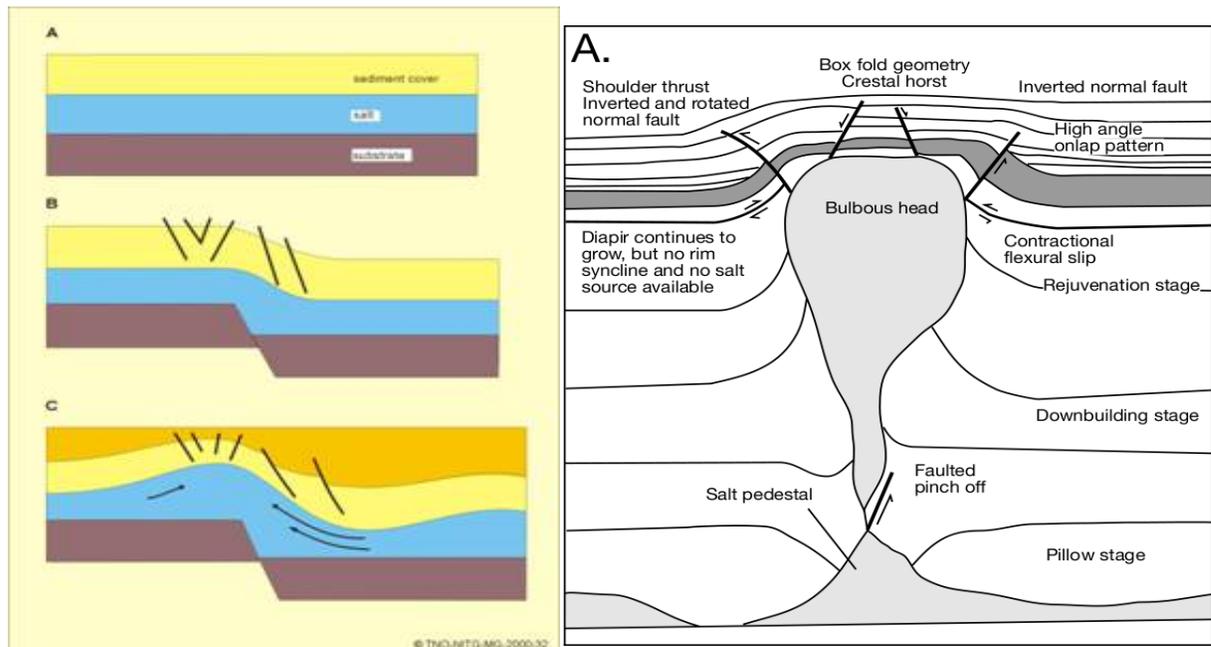


Figura 2.4. Halokinesis. a) Comienzo del flujo de sal bajo la tectónica de extensión; b) Perforación en los sedimentos superiores debida al diapirismo. [Modificada de Warren, 2006].

### 2.2.2. Sonda de Campeche

En el sur del Golfo de México y al Norte de los márgenes norte y noreste de las costas de los estados de Veracruz y Tabasco se localiza la Sonda de Campeche. La región que comprende el norte de la Bahía de Campeche y su continuación en la planicie abisal de Sigsbee. Esta región ha permanecido sumergida desde principios del Jurásico Tardío bajo un régimen sedimentario de talud y cuenca profunda [Salvador, 1991; Bohrman and Schenck, 2004].

El movimiento de la sal del Jurásico Medio (en forma de diapiros y mantos salinos) es el inductor principal de la deformación y fallamiento de los sedimentos superiores que sepultaron estas evaporitas. La mayoría de las partes superiores de estas estructuras salinas se encuentran a menos de 1,000 m de profundidad del lecho marino. En el sur de la Sonda de Campeche, la mayoría de los domos están asociados al sistema de reservas de hidrocarburos [Nelson, 1991].

### **2.3. Datos de Geofísica Marina en los Domos de Campeche;**

La base de datos del NGDC (National Geophysical Data Center) de la NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration) fue revisada para obtener distintos conjuntos de datos de batimetría (ecosondeo monohaz y sísmica monocanal) que cubren la región de interés en el golfo. Se descargaron los datos disponibles para el área definida entre las coordenadas 91° y 95° longitud oeste y 20° y 24° latitud norte, que enmarcan el área de estudio (92°40'W, 93°35' W y 21°15'N, 22°10'N). Sin embargo, la base de datos de la NGDC carece de registros de datos obtenidos con ecosondeo multihaz en el área de estudio.

#### **2.3.1. Ecosondeo Monohaz**

El conjunto correspondiente a la batimetría monohaz incluye 21 campañas. Estas fueron conducidas por distintas instituciones como: Lamont Doherty Earth Observatory, Scripps Institution, US Navy, entre otros. La base de datos aportó 14105 valores de profundidades en metros. Se realizó un mallado de los datos en el área mediante el método de entorno más cercano. La Figura 2.5 presenta el mapa batimétrico derivado de los sondeos de las 21 campañas. El área enmarcada con el rectángulo rojo representa el área de estudio. Puede apreciarse que la cobertura batimétrica monohaz es de muy baja resolución.

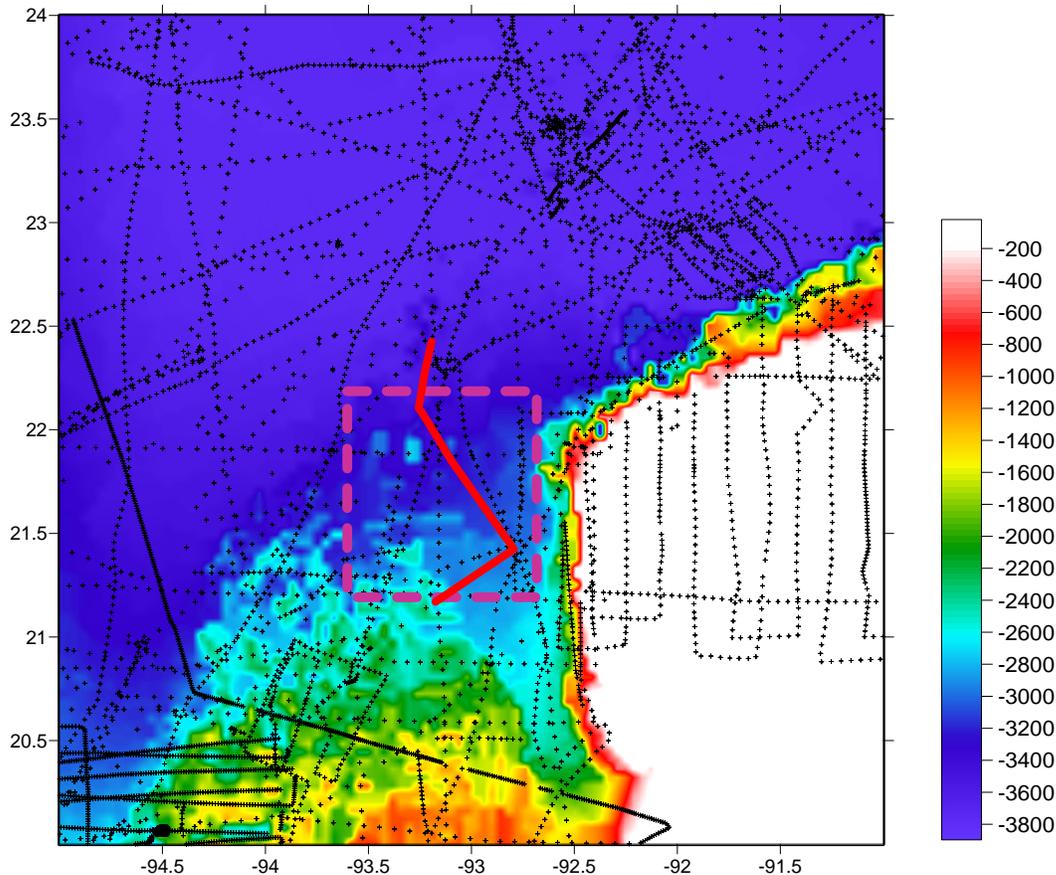


Figura 2.5. Batimetría monohaz. Mapa batimétrico derivado de los sondeos monohaz. Sector Norte de los Doms de Campeche delimitado por el recuadro; Perfil sísmico monocanal señalado en rojo. Cortesía de: NGDC, NOAA y Lamont-Doherty Earth Observatory.

### 2.3.2. Sísmica Monocanal

Los perfiles de la estructura sedimentaria de los estratos del lecho marino rutinariamente se obtienen utilizando la técnica de reflexión sísmica monocanal. La Figura 2.6 muestra un perfil sísmico de reflexión, correspondiente a la campaña V2402 que realizó Lamont-Doherty Earth Observatory en 1967. Este perfil de reflexión se extiende casi 130 km en longitud. El registro de este perfil (sección sísmica) se hizo en papel sobre un tambor y posteriormente fue fotografiado y digitalizado. En la sección sísmica pueden apreciarse las estructuras dómicas, tanto al final como al principio del perfil. Es de notarse que en la mayoría de los domos, la cima del cuerpo salino no ha aflorado en el lecho marino. La atenuación observada en el domo CK2156 puede ser producto de presencia de gas asociado a esta estructura. No se encontraron otras secciones sísmicas digitales de reflexiones en la base de datos de la NGDC, dentro del área de estudio.

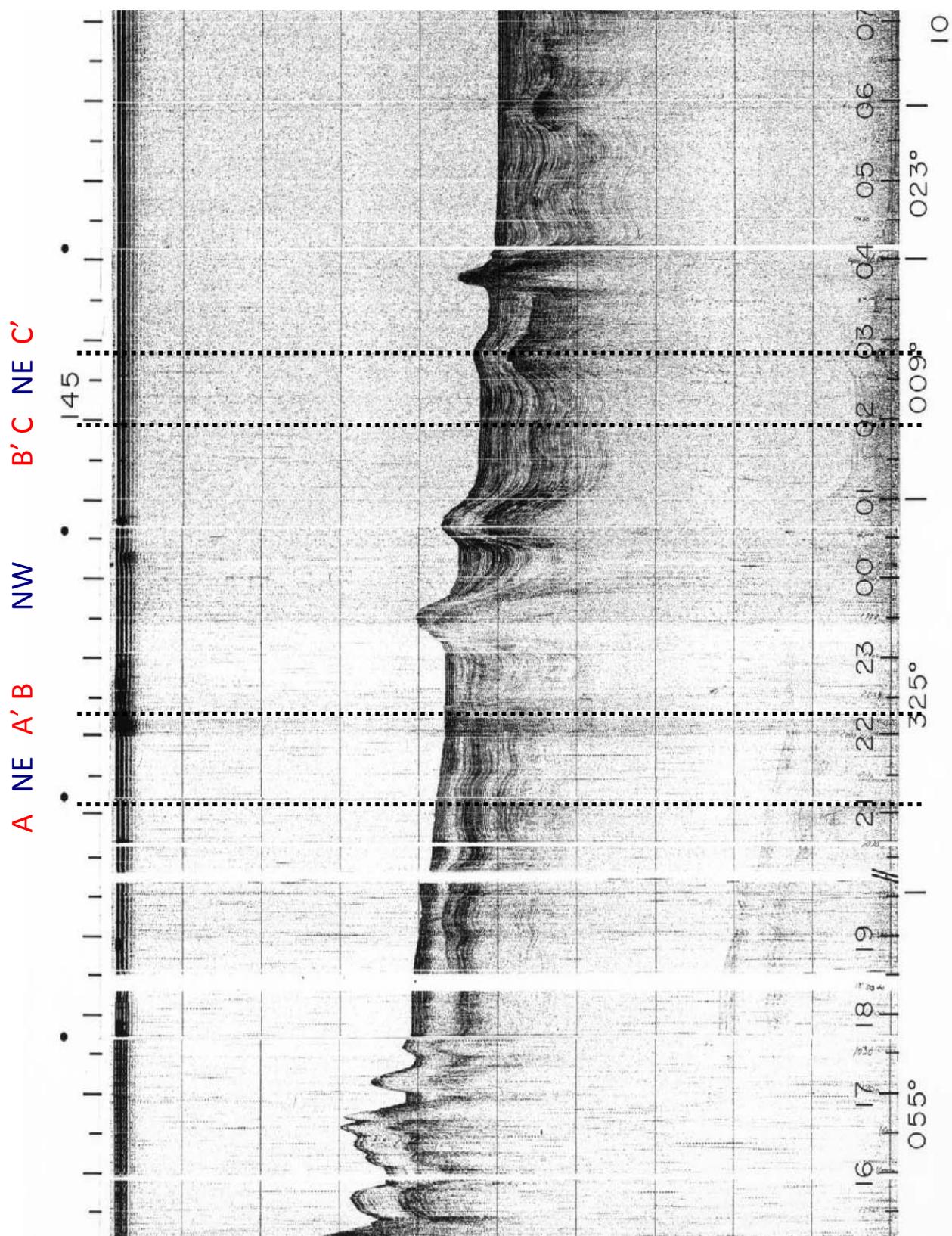


Figura 2.6. Perfil sísmico de la campaña V2402 en el área norte de los Domos de Campeche. Cortesía del Lamont-Doherty Earth Observatory a través del NGDC.

## **2.4. Ecosondas en Aguas Profundas**

Desde principios del siglo XIX se reconoció la posibilidad de conocer la profundidad midiendo el tiempo de viaje de pulsos sónicos que se reflejaban en el piso oceánico, aunque fue hasta principios del siglo XX que el desarrollo tecnológico permitió la aplicación de este principio. Ya hacia la tercera década del siglo XX las mediciones acústicas se volvieron rutinarias, reemplazando a la sondaleza (plomada).

La idea fundamental detrás del ecosondeo es la transmisión de un pulso (una señal acústica) y la recepción de un eco del fondo marino. Se puede calcular la distancia (profundidad) de la fuente a la zona sonificada por el pulso en el lecho marino con base en la velocidad del sonido a través de la columna de agua y el tiempo que tarda en registrarse el reflejo del pulso acústico emitido (eco).

### **2.4.1. Ecosonda Monohaz**

La ecosonda monohaz está diseñada para obtener una medida de profundidad a la vez, directamente por debajo del barco en movimiento (Figura 2.7). El sistema de ecosondeo monohaz lo conforman principalmente 4 componentes: a) sistema transmisor, b) sistema receptor, c) transductor, y d) la consola de control y desplegado. El transmisor excita al transductor (el cual se encuentra montado en la quilla del barco) con una señal eléctrica, la cual convierte en una onda acústica que es emitida por las características del transductor. Esta onda acústica se propaga en el agua hasta alcanzar el fondo, donde produce un eco, el cual regresa hacia el transductor que también funciona como un hidrófono. El hidrófono transforma la onda acústica en una señal eléctrica para alcanzar al receptor, donde se aplican una serie de algoritmos para detectar el eco proveniente del fondo. Conociendo el tiempo entre la transmisión de la onda acústica y la recepción del eco, se mide la profundidad. La unidad de control asigna la profundidad calculada a la posición directamente por debajo del barco y se prepara para el siguiente ciclo de transmisión-recepción (ping).

El piso marino no es completamente plano, si consideramos una onda acústica que se propaga en todas direcciones, se presenta incertidumbre acerca de la procedencia del eco (Figura 2.7.a). Mediante un transductor que incorpore cierta directividad tanto en la

transmisión como en la recepción acústica – la energía se enfoca en un ángulo sólido estrecho o haz - se puede tener control de la porción acústicamente iluminada del fondo marino. Otro problema radica en que al permanecer fijo respecto del barco, el sector acústico se mueve con el mismo (Figura 2.7.b).

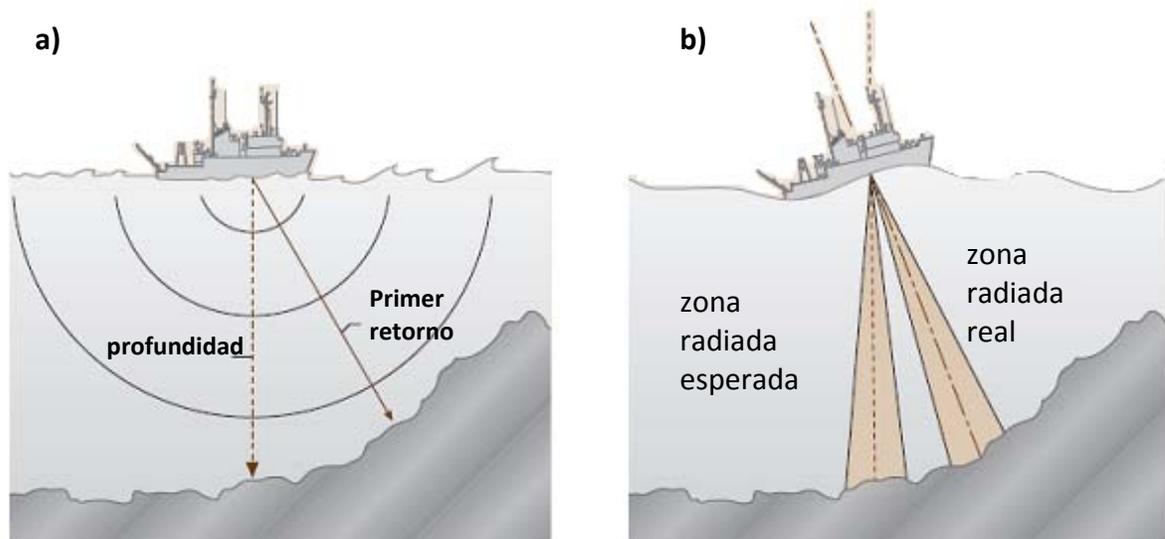


Figura 2.7. Problemática del ecosondeo monohaz.

#### 2.4.2. Ecosonda Multihaz

Básicamente, la ecosonda multihaz realiza el trabajo de una ecosonda monohaz de haz estrecho en varias direcciones y porciones del fondo marino casi-simultáneamente, en forma de un barrido. Estas porciones están distribuidas de tal manera que cubren un área contigua – usualmente una serie de posiciones en dirección perpendicular a la línea de navegación (“*acrosstrack*”), formando un barrido lateral. A esta área se le refiere como “*swath*” y el ancho del “*acrosstrack*” se le conoce como *swath width*. (Figura 2.8).

Se sabe que para un transductor (proyector o hidrófono), el ancho del haz – o tamaño del ángulo sólido – es inversamente proporcional a la apertura del transductor, expresada en términos de la longitud de onda [de Moustier, 2009]. Así, entre mayor sea la apertura, el haz resultante es más estrecho en la dirección ortogonal a la longitud del transductor. Para poder mapear una porción mayor del piso marino al mismo tiempo, se requeriría colocar varios transductores trabajando simultáneamente. Un sistema de este tipo resulta poco práctico y de difícil fabricación, por lo que se opta por hacer un muestreo espacial de la

apertura. Esto consiste en armar un transductor usando elementos idénticos equiespaciados hasta cubrir la apertura deseada. El tener múltiples elementos nos da acceso individual a cada uno de ellos, permitiéndonos controlar las relaciones de fase o tiempo entre cada uno.

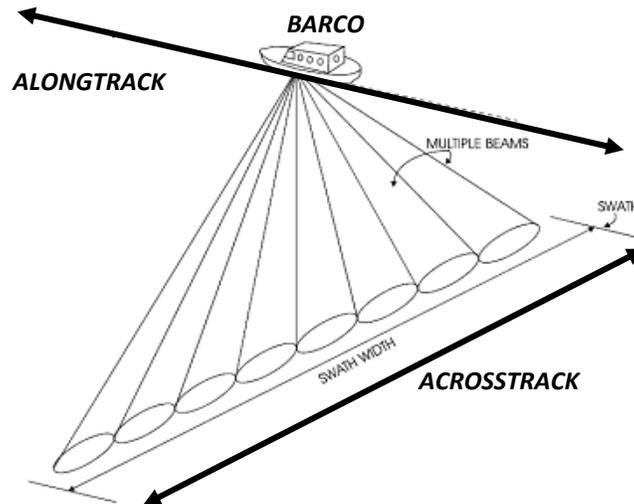


Figura 2.8. Esquema de un sistema multihaz. Se muestran: Swath, swath width, direcciones alongtrack y acrosstrack.

### 2.4.3. Registro del Movimientos del Buque

Los datos de batimetría, tanto multihaz como monohaz, son recolectados en una plataforma móvil como lo es un buque. En el agua, el buque se comporta como un cuerpo rígido, con seis grados de libertad, tres angulares y tres de traslación (Figura 2.9). Para poder registrar adecuadamente estos movimientos, se coloca un sistema de referencia en el buque. Los registros de los movimientos son utilizados para corregir las posiciones de los multi-ecos por los seis movimientos en el registro de cada uno de los pings en los barridos laterales. Estos movimientos son:

1. Cabeceo (*Pitch*), rotación alrededor del eje transversal, movimiento angular que levanta la proa del buque;
2. Balanceo (*Roll*), rotación alrededor del eje longitudinal, movimiento que “acuesta” al buque, hacia una u otra banda;
3. Guiñada (*Yaw*), rotación alrededor del eje Z, movimiento sobre el plano horizontal que “gira” el buque;

4. Deriva vertical (Heave) que es la traslación vertical sobre el eje Z;
5. Deriva horizontal (*Surge*), la traslación horizontal sobre el eje longitudinal; y
6. Deriva horizontal (*Sway*) que es la traslación horizontal sobre el eje transversal.

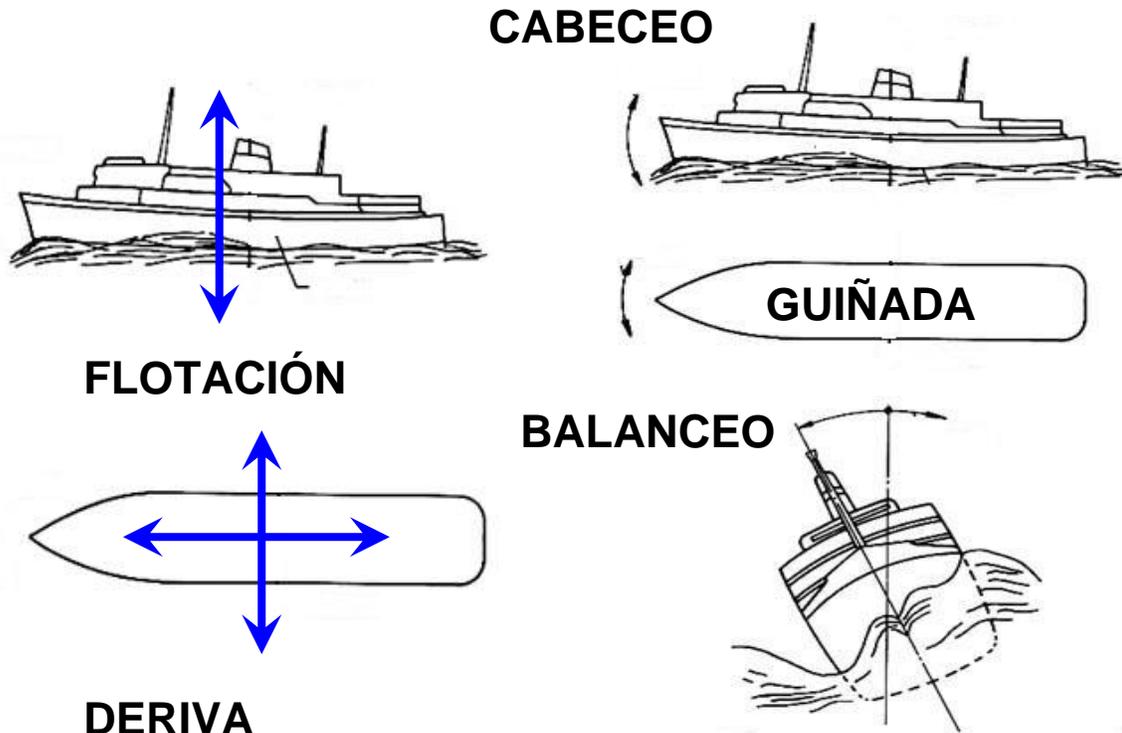


Figura 2.9. Movimientos del buque.

Usualmente la magnitud de estos movimientos depende de factores oceanográficos y meteorológicos (oleaje, corrientes y viento), la operación y el diseño del buque. Generalmente se registran los cuatro movimientos más críticos: *pitch*, *roll*, *yaw* y *heave* que afectan el cálculo del posicionamiento de los haces.

#### 2.4.4. Propagación Acústica en la Mar

La columna de agua en los océanos es un medio cambiante y sus propiedades pueden variar de un lugar a otro y en cualquier dirección. Esta variabilidad está controlada principalmente por las corrientes oceánicas, insolación, aportes de agua dulce, evaporación, congelamiento, partículas suspendidas y salinidad. Estos fenómenos tienen repercusión en la distribución de la densidad, temperatura y velocidad acústica a diferentes profundidades en la columna de agua.

### ***El Océano -- Medio Estratificado Acústico***

Para los levantamientos batimétricos multihaz es necesario el conocimiento preciso de la distribución de la velocidad acústica a través de la columna de agua. La velocidad de una onda compresional (inducida por el pulso emitido) en el agua es afectada por la distribución de la densidad y el módulo de compresibilidad en profundidad. Tanto la densidad como la compresibilidad están en función de la temperatura, presión y salinidad de la columna de agua. Por lo que la distribución de la velocidad del sonido en la columna de agua es una función de estos tres parámetros en profundidad.

La temperatura superficial está controlada principalmente por la insolación. Ésta presenta una distribución asimétrica, de modo que la distribución de la temperatura superficial es también asimétrica latitudinalmente. La temperatura en el sentido vertical disminuye conforme aumenta la profundidad, pero se estabiliza peculiarmente después de los 1,000 m donde hay una temperatura de casi 4° C.

La distribución de la temperatura de la superficie del océano presenta un comportamiento zonal, generalmente independiente de la Longitud (Figura 2.10). El agua más caliente se encuentra cerca del Ecuador y el agua más fría está hacia las regiones polares. La variación de la temperatura es mayor en latitudes altas que en las regiones tropicales.

La salinidad está controlada por fenómenos como evaporación, congelamiento, precipitación, deshielo, y aportes de ríos, agua dulce y sedimentos. Este comportamiento está influido mayormente por la latitud. La evaporación es mayor en las zonas tropicales y subtropicales; además, las zonas tropicales reciben gran cantidad de precipitación. Por otro lado, el congelamiento y deshielo tienen mayor influencia en las zonas de latitudes polares. La distribución de la salinidad presenta también un comportamiento zonal. El agua más salina se encuentra en latitudes medias, donde la evaporación es mayor. Agua menos salina se encuentra en el ecuador y en las regiones polares donde la gran cantidad de precipitación y el deshielo, respectivamente, aportan agua dulce a los océanos. El promedio zonal (este-oeste) de la salinidad muestra una relación estrecha de ésta con la evaporación y una menor con la precipitación y el aporte de los ríos (Figura 2.10).

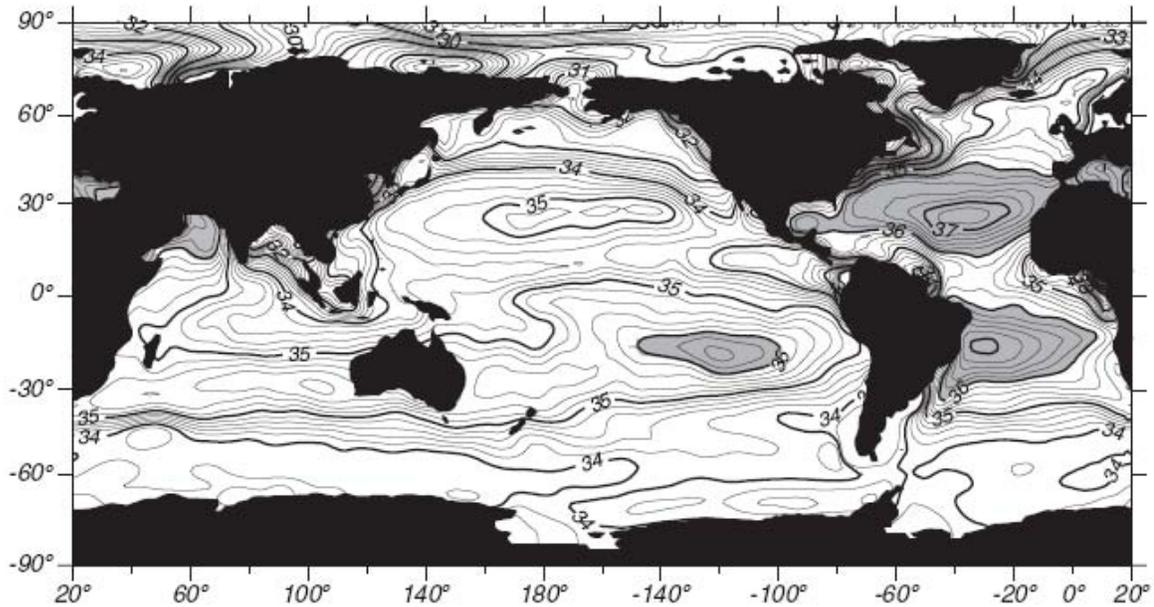


Figura 2.10. Promedio anual de temperaturas superficiales.[Stewart, 2006].

Los cambios en la temperatura y salinidad alteran la densidad del agua en la superficie, lo que ocasiona convección. La distribución lateral de la densidad dentro del océano depende directamente de los gradientes horizontales de presión y corrientes oceánicas. En general, existe agua más densa y fría en latitudes altas y agua menos densa y caliente en las regiones tropicales, aunado al efecto de la rotación terrestre, que produce una estratificación en los océanos a mayor profundidad (Figura 2.11). Se observa que sobre la superficie del océano se tiene una circulación controlada principalmente por los vientos, y a profundidad se presenta una circulación termohalina.

La circulación superficial, debida principalmente al viento, revuelve las capas más superficiales generando un estrato “mezclado” hacia la superficie. En esta capa de mezcla, tanto la temperatura como la salinidad son constantes y puede tener entre 10 m y 200 m en las zonas tropicales. Esta capa varía día con día y estacionalmente debido al flujo de calor en la capa y a la turbulencia del viento y el oleaje.

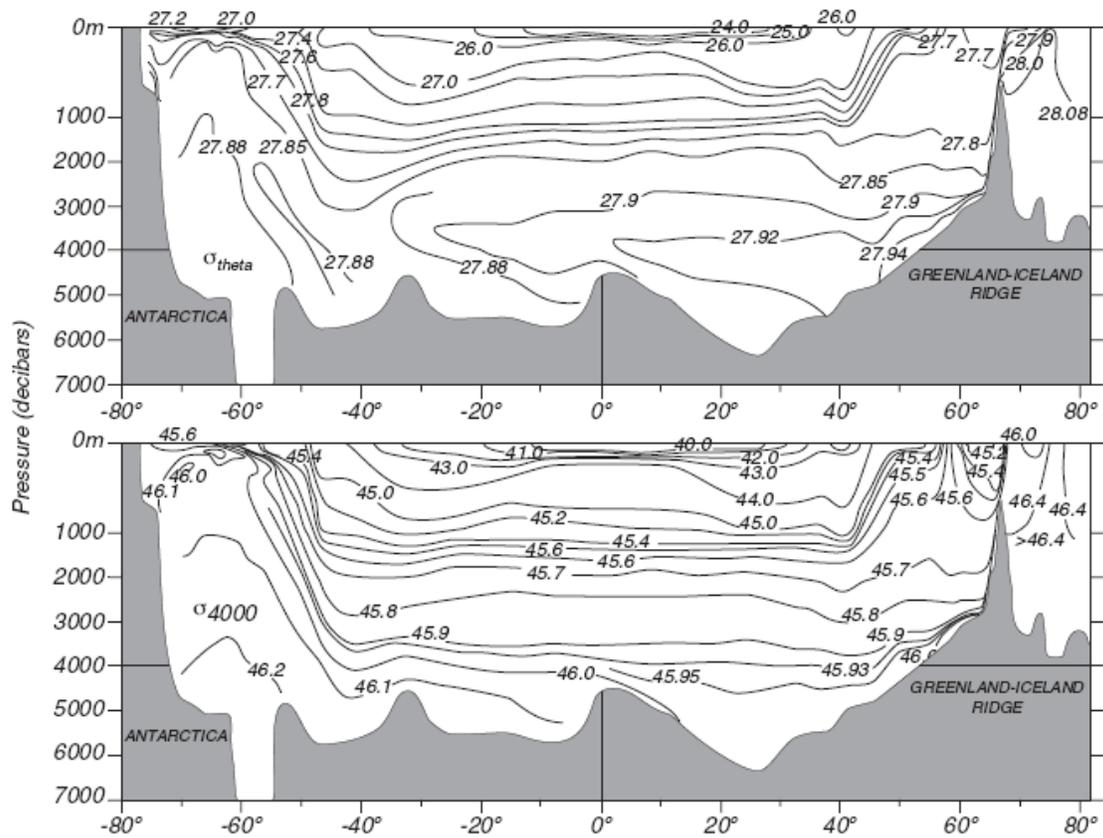


Figura 2.11. Estratificación del agua del océano [Stewart, 2006].

Por debajo de la capa de mezcla, la temperatura decrece rápidamente, excepto en latitudes altas. El intervalo de profundidad en el cual el gradiente de temperatura decrece rápidamente se le llama termoclina. Debido a que la densidad está relacionada con la temperatura, la termoclina tiene el mayor gradiente de densidad, la pycnoclina. La termoclina presenta dos componentes, la termoclina estacional (~200 m de profundidad) y la termoclina permanente (entre ~200 m a ~2,000 m). Por debajo de la termoclina, la temperatura del agua a mayor profundidad se estabiliza alrededor de los 4° C.

Análogamente, existe un intervalo de profundidad donde el gradiente de salinidad es mayor, la haloclina. Este intervalo corresponde aproximadamente a la termoclina estacional, alcanzando hasta ~ 200 m. Después de la termoclina, la salinidad aumenta muy lentamente.

#### 2.4.5. Distribución de la Velocidad Acústica en el Agua

El conocimiento preciso de la distribución de la velocidad del sonido en la columna de agua es necesario en los levantamientos batimétricos para: a) convertir con exactitud

tiempo a profundidad y b) calcular la refracción del sonido para ecos que no son verticales. Varios autores [de Moustier, 2009] han propuesto fórmulas empíricas para calcular la velocidad del sonido en el agua, basándose en mediciones de temperatura, salinidad y presión a lo largo de la columna (Figura 2.12). Desde la superficie hasta la base de la termoclina la velocidad del sonido está controlada principalmente por la temperatura, la velocidad decrece directamente con la temperatura. Para profundidades mayores, la presión domina el comportamiento de la velocidad, ésta aumenta con la profundidad. En promedio, un incremento de  $1^{\circ}\text{C}$  en la temperatura provoca un incremento de  $3\text{ ms}^{-1}$  en la velocidad. El incremento de la salinidad en  $1\text{‰}$  incrementa  $1.3\text{ ms}^{-1}$  la velocidad. Así mismo, la velocidad aumenta con la presión (conforme aumenta la profundidad) incrementándose  $1.8\text{ ms}^{-1}$  por cada  $100\text{ m}$ .

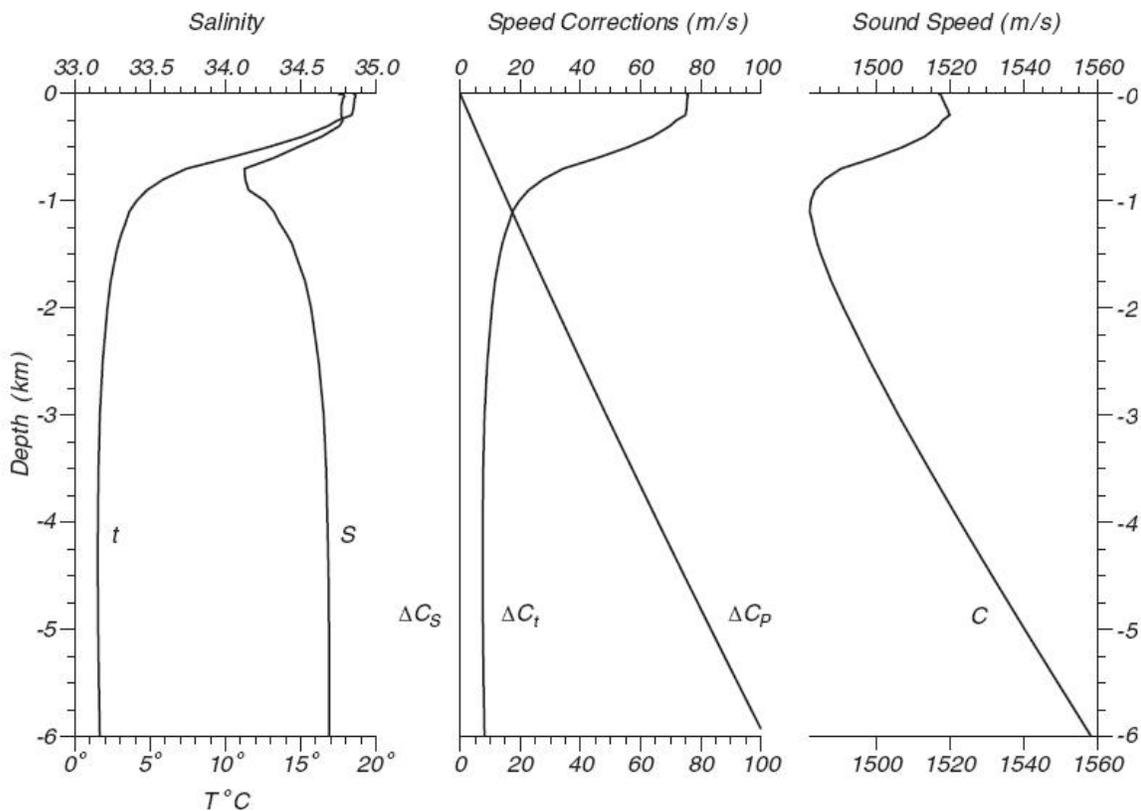


Figura 2.12. Perfil de velocidades acústicas en el océano y su variación con la salinidad y temperatura.

### 2.4.6. Refracción del Sonido en la Columna de Agua

A mayor profundidad el sonido se propaga a través de las capas con distinta velocidad acústica, por lo que su trayectoria se refracta (curvándose) en la dirección del gradiente de velocidad. La Ley de Snell de Refracción representa analíticamente este fenómeno, estableciendo la conservación del parámetro del rayo. Para un rayo que incide con un ángulo ( $\theta_i$ ) en la interfaz entre dos medios, con velocidades  $C_1$  y  $C_2$  respectivamente, la relación entre el seno del ángulo de incidencia y la velocidad del medio 1 se conserva al transmitirse al medio 2, donde el cambio en el ángulo de salida del rayo sigue al cambio en la velocidad del sonido, de tal suerte, que si la velocidad aumenta de un medio a otro, el ángulo incrementa, y si la velocidad disminuye, el ángulo decrece (Figura 2.13).

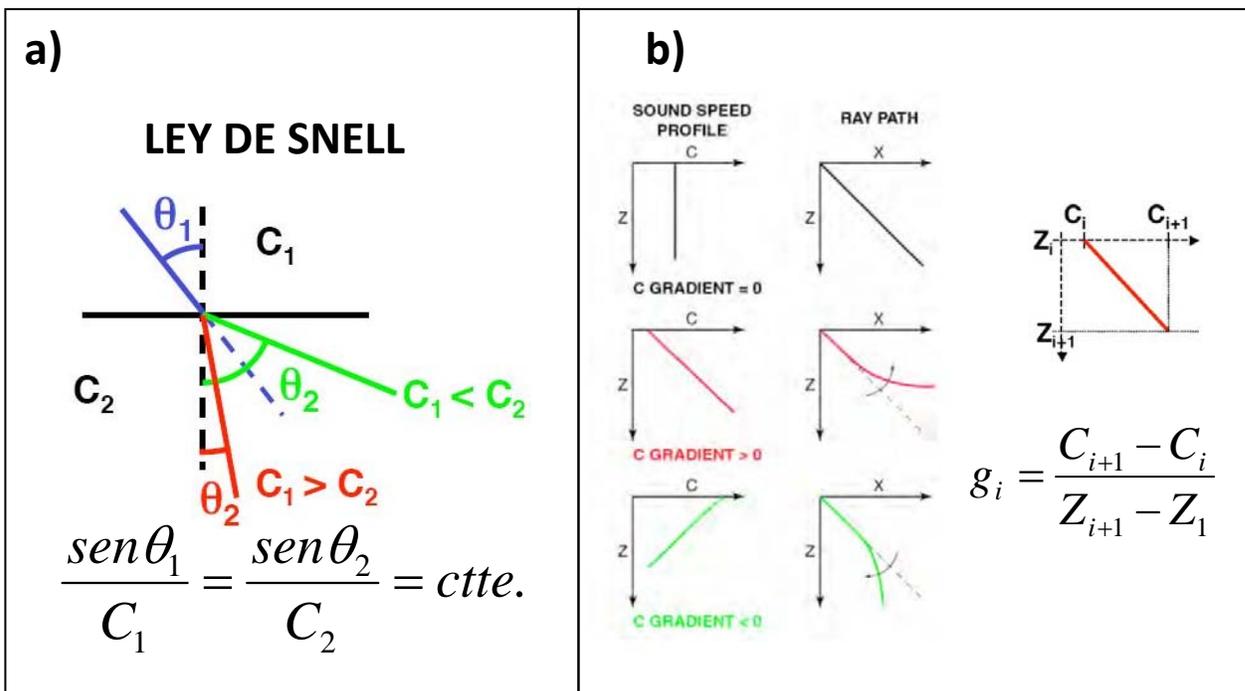


Figura 2.13. Trayectorias de los rayos. a) Ley de Snell de la refracción. b) Relación entre el gradiente de velocidad y la trayectoria del rayo. [Modificadas de de Moustier, 2009].

Un sistema de ecosonda multihaz se basa en la transmisión y recepción acústica fuera de la vertical. Para poder obtener información a los lados del derrotero es imperativo que se haga una reconstrucción de la trayectoria del rayo, para poder establecer la posición del eco. Para calcular la trayectoria del rayo en el agua y la posición del eco en el lecho marino, se considera lo siguiente:

- a) un perfil de velocidad acústica  $C(z)$  a profundidad,
- b) sólo existen gradientes verticales en el perfil,
- c) el parámetro del rayo (calculado a la profundidad,  $z_d$ , del transductor y la velocidad en la posición del transductor),
- d) el ángulo  $\theta_i$  del haz formado respecto de la vertical, y
- e) el tiempo de viaje registrado  $t_i$ .

De la Figura 2.14, partiendo de los puntos (a), (b) y (c) se calcula el parámetro del rayo, conforme a la Ley de Snell, que se conserva a lo largo de toda la trayectoria. Como resultado del algoritmo, para cada haz se tiene la solución de las profundidades  $Z_i$  y distancias horizontales ( $X_i, Y_i$ ).

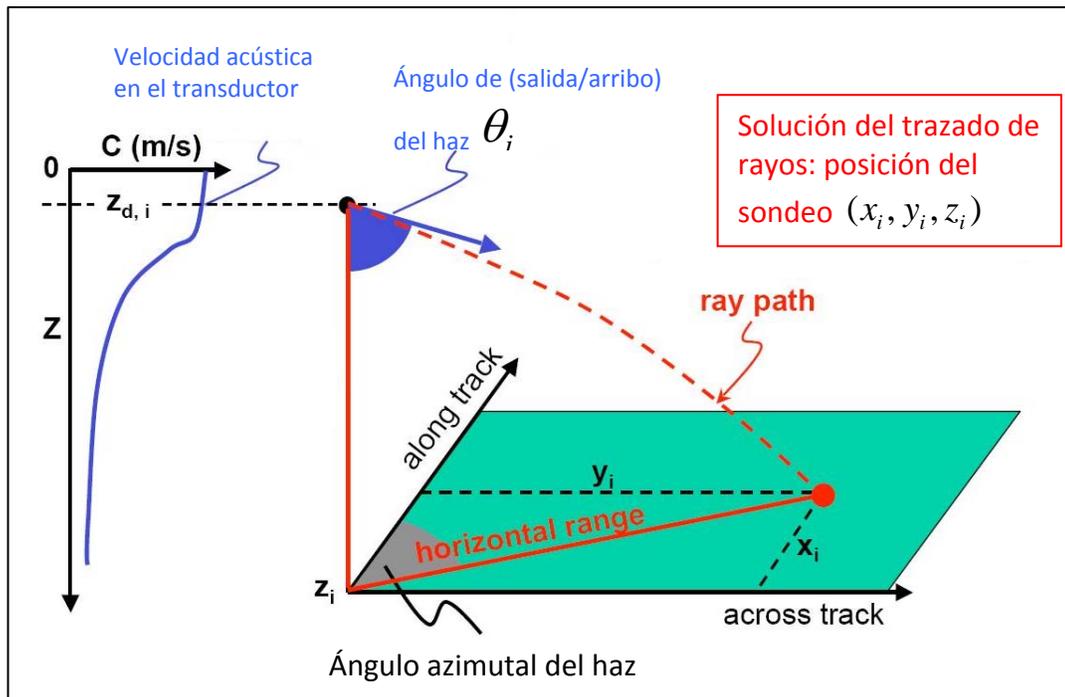


Figura 2.14. Solución del trazado de rayos. [Modificada de de Moustier, 2009].

### 2.4.7. Retro-dispersión Acústica del Lecho Marino.

Un frente de onda acústico que se propaga por el agua y alcanza el fondo marino es afectado diferentemente si la interfaz agua-fondo marino es “suave”. En relación con la longitud de onda, la mayor parte de la energía incidente será reflejada en la dirección especular (siguiendo la Ley de Snell de reflexión), otra parte penetrará en el sedimento y, parcialmente, algo de la energía regresará por la misma trayectoria de propagación – esta se llama energía retro-dispersada o *backscattered* (Figura 2.15).

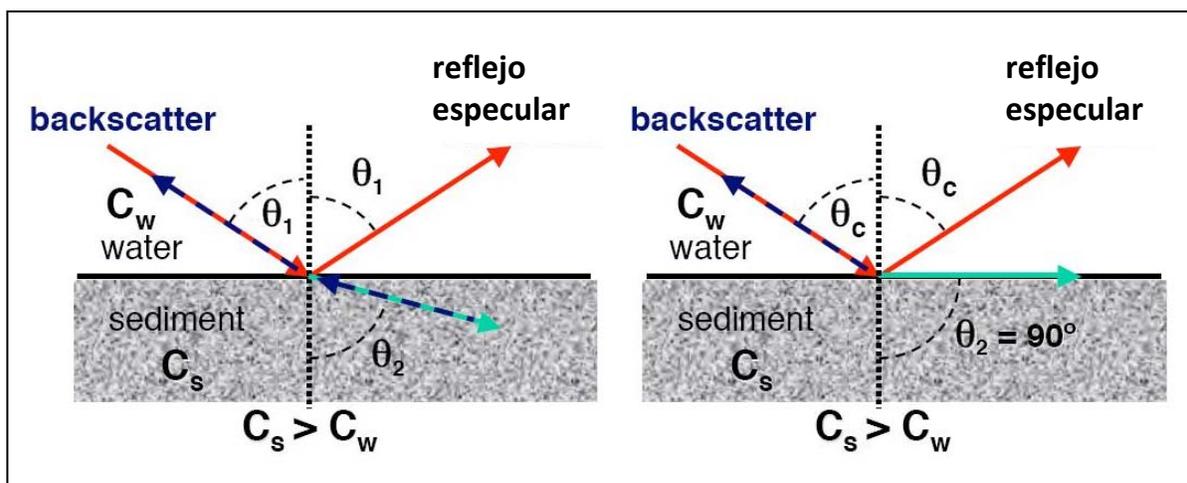


Figura 2.15. Ley de Snell para un rayo que incide en el lecho marino. Nótese que para ángulos menores al crítico existe una contribución de backscatter del volumen sedimento [Modificada de de Moustier, 2009].

La proporción entre la energía dispersada y aquella transmitida al medio depende tanto del ángulo de incidencia como de las propiedades acústicas de ambos medios (Ley de Snell de Refracción). La Figura 2.15 muestra que para una incidencia en ángulos superiores al ángulo crítico no hay transmisión de energía al medio inferior, en consecuencia, no habrá dispersión causada por el volumen de sedimento. La proporción de energía que es reflejada y dispersada en la superficie del lecho depende del contraste de impedancia acústica entre ambos medios y de la rugosidad en la interfase (Figura 2.16).

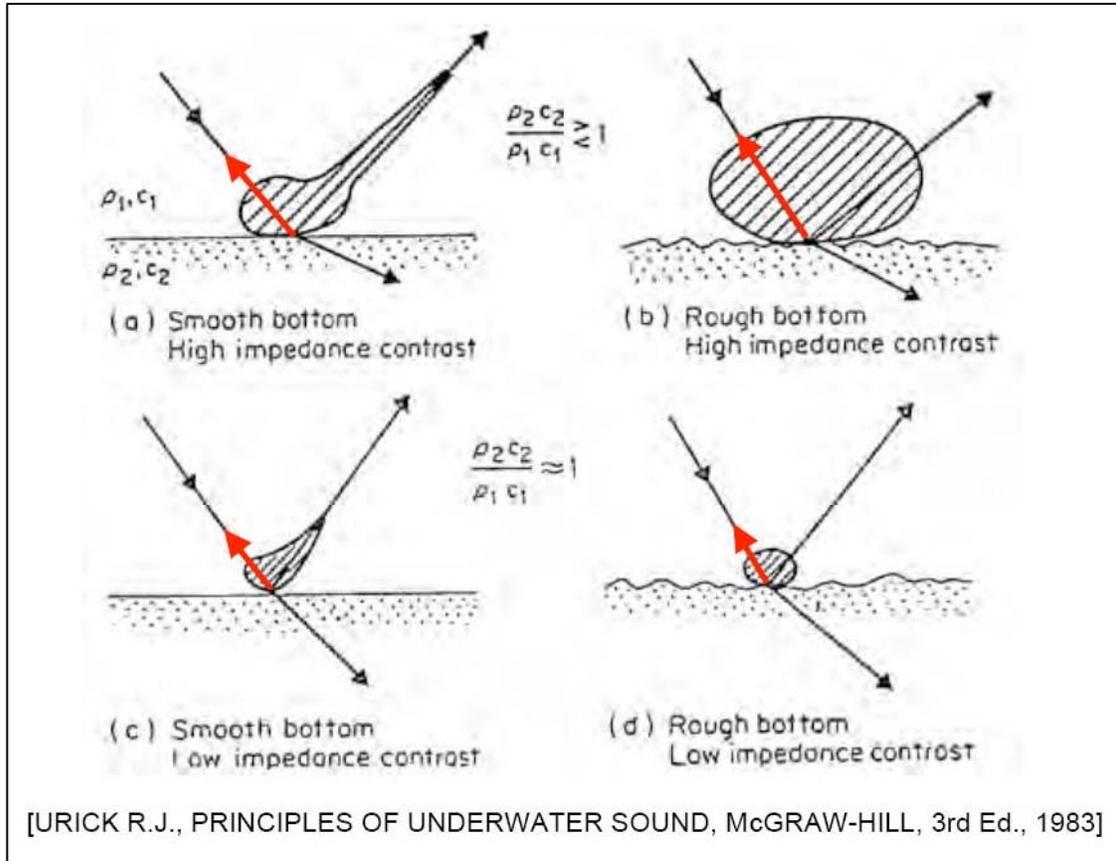


Figura 2.16. Relación de la energía retrodispersada por la superficie del lecho marino debido a la rugosidad y contraste de impedancias acústicas. [de Moustier, 2009].

## 2.5. Campaña SO174-2 abordado del RV SONNE

La campaña SO174-2, segunda rama del crucero SO174 (OTEGA II), se llevó a cabo del 26 de octubre al 12 de noviembre de 2003, partiendo del puerto de Corpus Christi, Texas, EUA. Las zonas estudiadas en aguas mexicanas durante esta campaña están mostradas en la Figura 2.17, que conforman: la planicie y domos de Sigsbee, el Escarpe de Campeche y la provincia de los Domos de Campeche (referida indistintamente como Bahía o Provincia Salina de Campeche). Por primera ocasión fueron colectados de estas regiones datos de ecosonda multihaz, perfiles sísmicos de muy alta resolución y muestras de sedimentos y rocas.

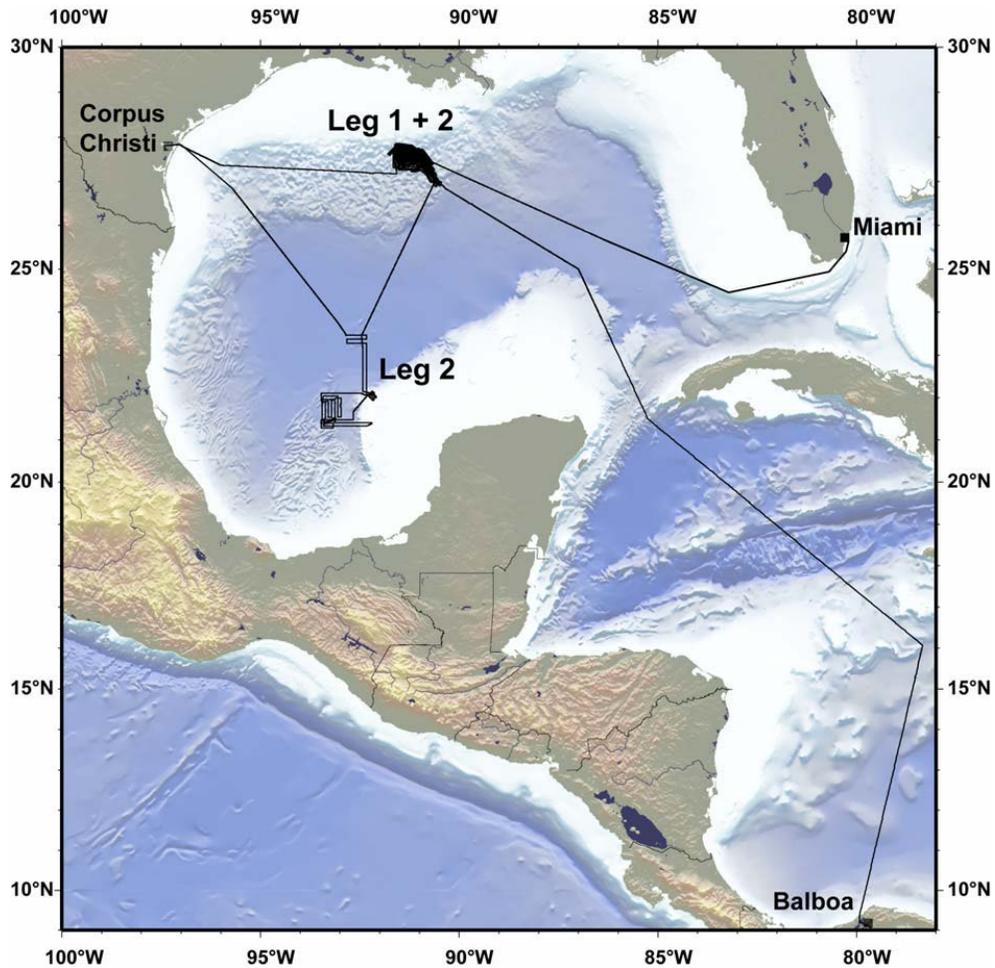


Figura 2.17. Levantamiento en aguas mexicanas de la campaña SO174-2 (Leg 2).  
SO174 Cruise report [Bohrmann y Schenck, 2004].

### 2.5.1. Objetivos de la Campaña SO174-2

El objetivo principal de campaña SO174-2 fue el entendimiento del origen y comportamiento de las estructuras geológicas y biológicas asociadas a la formación de hidrato de metano de emplazamiento somero, su interacción con el ambiente oceánico y sedimentario y, además, para evaluar estas asociaciones en el ciclo del carbono global. Particularmente, la prospección geofísica se enfocó a los depósitos someros y estructuras de estos hidratos, así como las condiciones para su formación. Como otra componente del estudio, se tomaron muestras biológicas y químicas para evaluar el desarrollo de los organismos asociados a las filtraciones (*seep*) de hidrocarburos y gases para examinar los mecanismos que controlan la formación y disociación de los hidratos. Estas muestras

fueron colectadas con sondas posicionadas (*landers*). Se obtuvieron muestras de los sedimentos ricos en hidratos en el lecho marino, mediante nucleadores controlados remotamente desde el buque. Los núcleos y muestras de roca obtenidos se analizaron abordo mediante un equipo de tomografía computarizada.

En la provincia salina de los domos de Campeche, el principal objetivo era de evidenciar la presencia de hidratos de gas asociados a ventilas de hidrocarburos en el lecho marino, que estuvieran asociadas a las manchas de aceite que se observaban en imágenes de satélite del Golfo de México. Por ser un área que no había sido previamente mapeada, el objetivo fue producir un mapa batimétrico de alta resolución e investigar las estructuras someras, para identificar los procesos que controlan la morfología del lecho marino y de los sedimentos que las rodean.

### **2.5.2 Equipos Abordo del RV SONNE**

Durante esta campaña, los datos de batimetría de alta resolución fueron obtenidos utilizando un ecosonda multihaz EM120 y los datos de los perfiles sísmicos del suelo marino fueron obtenidos con un perfilador de penetración o ecosonda paramétrica PARASOUND. La batimetría multihaz de alta resolución proporcionó un mapeo completo a gran detalle del relieve submarino, mientras que el ecosonda paramétrica proporcionó información acerca de las estructuras sedimentarias en el subsuelo a lo largo de los derroteros [Bohrmann and Schenck, 2004]. Las Características del ecosonda EM120 son sintetizadas en el Anexo C.

Para obtener información de las condiciones y parámetros fisicoquímicos relacionados con los hidratos de metano, las muestras in situ fueron colectadas con las sondas: a) BIGO (*BioGeochemical Observatory*) para datos químicos de  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $SO_4$ ,  $CH_4$  en la interfaz sedimento-agua; b) FLUFO (*FLUId Flux Observatory*) para la medición de flujos verticales en la interfaz sedimento-agua; c) *GasQuant* para cuantificar las emisiones de gas a la columna de agua. Para las muestras de sedimentos se usaron: d) MAC (*Multi-Autoclave Corer*) para obtener núcleos de 50 cm y preservarlos en condiciones in situ; e) DAPC (*Dynamic Autoclave Piston Corer*) para colectar núcleos de 8 cm de diámetro y hasta 2m de longitud y preservarlos en condiciones in situ; éstos núcleos se analizaron con un

tomógrafo computarizado. Se usó también una canastilla que contenía un arreglo de cámaras, referido como OFOS (*Ocean Floor Observation System*) que contenía una cámara en blanco y negro, dos lámparas de xenón, una cámara de diapositivas, tres sensores láser y un CTD autónomo. Este sistema se utiliza particularmente para la evaluación preliminar de sitios y, posteriormente, realizar los muestreos con los otros instrumentos, así como auxiliar en la interpretación de imágenes de sonar de barrido lateral y perfilador acústico. El Anexo B muestra un resumen de las muestras y núcleos que fueron colectadas durante la Campaña SO174-2.

## **2.6. Batimetría Multihaz en el Norte de los Domos de Campeche**

Los datos de batimetría e intensidad de backscatter recolectados durante la campaña SO174-2 en el área de los Domos de Campeche cubren un área de 6,900 km<sup>2</sup>, aproximadamente, sobre la cual no se tenían antecedentes de este tipo de datos [Canet *et ál.*, 2004; Bohrman and Shenck, 2004]. Éstos abarcan desde los 21° 15' N hasta los 22° 10' N en latitud y desde los 92° 40' W hasta 93° 35' W de longitud. Se cubrieron profundidades que van desde los 2,200 m, en la cima de los domos, hasta los 3,700 m en los valles entre los mismos, así como en la planicie.

El levantamiento con el ecosonda EM120 se realizó con un pulso acústico CW de 12 kHz de frecuencia con una duración de 15 ms, que geoméricamente corresponde con una longitud de onda de 0.125 cm y una resolución de distancia de 12.8 m [de Moustier, 2009]. En promedio, cada ciclo ping tomó un tiempo de 10s. Para obtener un muestreo mas uniforme del piso oceánico se usó el modo *equidistante* en la configuración de los haces de la ecosonda EM120. Se limitó la apertura de los mismos a 120° por cada barrido, cubriendo un *swath* de 9 km en promedio, obteniéndose una densidad espacial aproximada de 1 sondeo por cada 50 m. La resolución espacial de los datos multihaz depende de la geometría del área radiada acústicamente [Augustin *et ál.*, 1996], la cual varía de acuerdo con la profundidad y el ángulo de incidencia.

### **3. PROCESAMIENTO DE DATOS MULTHAZ MARINOS**

La metodología empleada para procesar los datos batimétricos y *backscatter* adquiridos con una ecosonda multihaz durante un levantamiento geofísico requiere de varias etapas, algunas de ellas iterativas, para afinar los productos finales, que son: la carta batimétrica de alta resolución espacial (representativa del relieve batimétrico) y un mosaico de imágenes de las propiedades acústicas (representativa de la litología y rugosidad) del lecho marino. Todas las etapas iterativas de los métodos que se emplearon en esta tesis son estándar en el procesado de datos hidrográficos multihaz que se obtuvieron durante campañas oceanográficas de investigación.

El objetivo principal del procesamiento de los datos batimétricos multihaz es la generación de un modelo digital de terreno. Inicialmente, en el procesado se requiere corregir el gran volumen de valores batimétricos multihaz por los errores sistemáticos que fueron introducidos durante la fase de adquisición, y posteriormente realizar un filtrado de los datos, para finalmente generar el modelo digital de terreno suavizado. Por su parte, el procesado de los datos de *backscatter* multihaz tiene como objetivo principal generar un mosaico de imágenes acústicas del lecho marino, el cual puede ser suavizado y en el que se emplean técnicas de realzado de imagen. Finalmente, en el procesado se integra un modelo batimétrico tridimensional (3D) sobre el cual se superpone el mosaico final de las imágenes acústicas. Con este modelo se obtiene una mejor apreciación de las características acústicas del lecho marino en asociación con la morfología.

#### **3.1. Conceptos de Datos Multihaz**

##### **3.1.1. Retrodispersión**

Cuando las ondas acústicas emitidas por la ecosonda multihaz arriban al lecho marino, en principio son dispersadas (*scatter*) aleatoriamente por las irregularidades en el mismo. Esta dispersión es debida tanto a las propiedades físicas del lecho, como son: (a) rugosidad de la interfaz agua-lecho marino; (b) contraste de propiedades acústicas en la interfase y (c) variaciones espaciales de los dos anteriores; como también a las características del pulso acústico, principalmente la frecuencia y en consecuencia la longitud de onda. Para pulsos



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

de alta frecuencia, cualquier lecho marino presenta irregularidades conmensurables con la longitud de onda. La Figura 3.1 ilustra un área A del lecho marino, radiada acústicamente en el campo lejano de una fuente ubicada en S; si dentro de ésta área A se presentan rugosidad y/o heterogeneidades cuya escala sea comparable con la longitud de onda acústica, ésta área dispersará el frente de onda en una distribución aleatoria de direcciones. En el caso de la ecosonda tanto la fuente como el receptor se encuentran en la misma posición, de modo que la porción de la energía dispersada medida por el receptor corresponde a aquella que regresa a la fuente por el mismo trayecto, dándole el nombre de retrodispersión (*backscatter*).

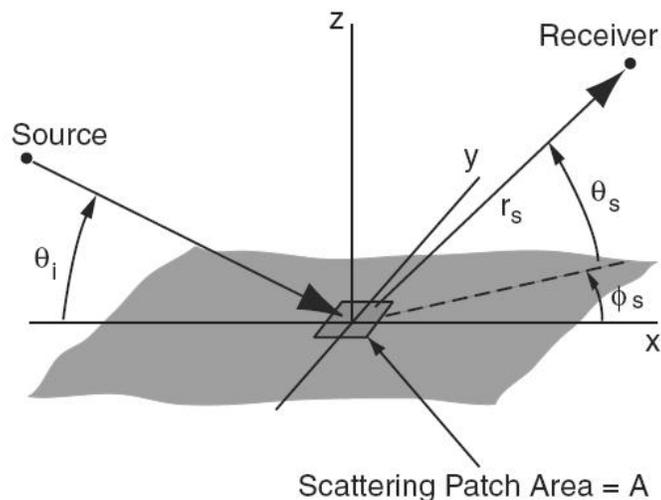


Figura 3.1. Geometría de la dispersión.

En la práctica, se considera que una parte de la energía acústica incidente será retrodispersada en la superficie del lecho marino debido a su rugosidad local y por el contraste de impedancia acústica entre el agua y el lecho marino (Figura 3.2); otra parte de la energía acústica se transmitirá hacia el sedimento y resultará en retrodispersión causada por la estructura de las primeras capas [Agoustin *et ál.*, 1996]. La contribución relativa de cada uno de estos fenómenos al campo retrodispersado dependerá, del ángulo de incidencia del campo sobre el lecho oceánico y de las características del pulso (Figura 3.3) [e.g. de Moustier, 1986; de Moustier and Alexandrou, 1991; Agoustin *et ál.*, 1996].

La forma de cuantificar la energía dispersada en el fondo marino es utilizando la intensidad de la dispersión (*scatter strength*) registrada en los elementos piezoeléctricos que conforman los transductores receptores de la ecosonda multihaz. Esta medición tiene un sentido estadístico, pues resulta imposible determinar la energía dispersada puntualmente proveniente del lecho marino [Stewart, 2006]

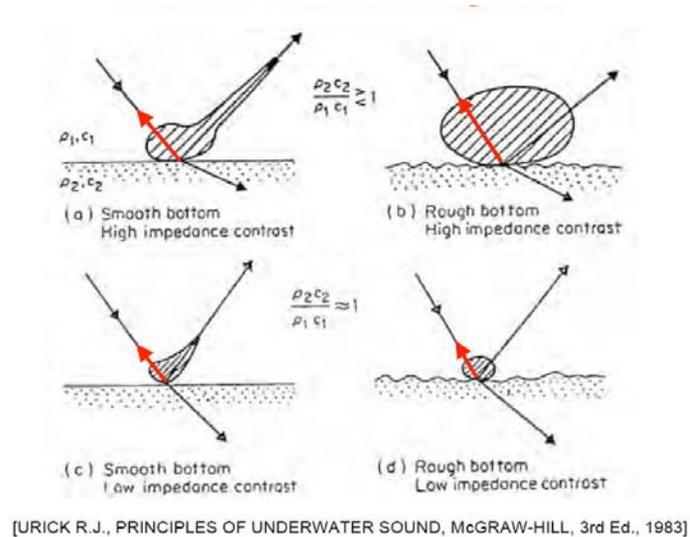


Figura 3.2. Rugosidad y contraste de impedancia en el backscatter

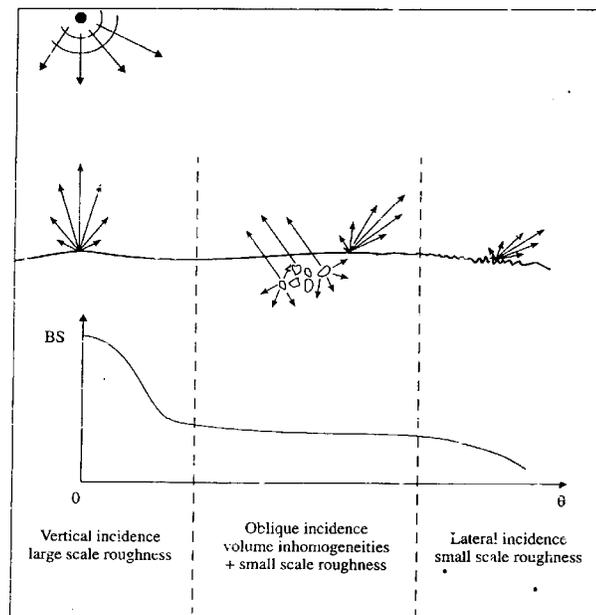


Figura 3.3. Contribución de los fenómenos al backscatter con el ángulo de incidencia

### 3.1.2. Intensidad Instantánea de Retrodispersión

Resumiendo la geometría del haz emitido para un instante dado (Figura 3.4), un sistema de ecosonda transmite un pulso acústico de intensidad  $I_0$ , este término contempla los componentes de directividad de la fuente. El pulso se propaga una distancia  $R$  hasta el piso oceánico, donde “radia” acústicamente una área AE incidiendo con un ángulo ( $\theta_i$ ). En la propagación, la intensidad  $I_0$  se ve disminuida por dispersión geométrica y pérdidas por absorción en la columna de agua, en donde:

$$I_s(\theta_i) = I_0 \frac{A s(\theta_i)}{R^4 10^{\frac{2\alpha_w R}{10}}} \quad (3.1)$$

En el receptor, la intensidad medida  $I_s$ , representa la intensidad del sonido retrodispersado que radia el área AE en un instante dado y que ha sido atenuada por la propagación en el trayecto de retorno. La contribución del área AE al sonido retrodispersado está incluida en la sección de retrodispersión  $A s(\theta_i)$  vista desde el receptor. La sección de retrodispersión es el producto del área  $A$  que subtiende el ángulo sólido del receptor hacia  $AE$  ( $\Omega$ ), por el coeficiente de retrodispersión  $s(\theta_i)$  que es adimensional. En la literatura, habitualmente se hace referencia a la intensidad de retrodispersión (*backscatter strength*) como:

$$S_B(\theta_i) = 10 \log_{10}(s(\theta_i)) \quad (3.2)$$

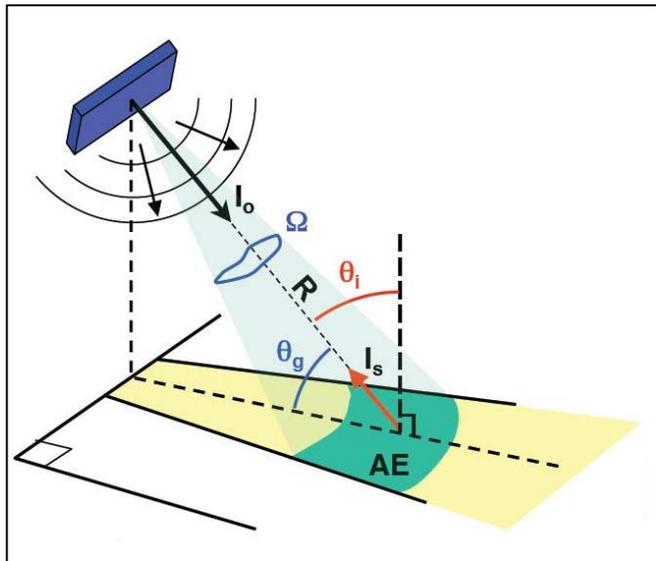


Figura 3.4. Intensidad instantánea de retrodispersión.

Ahora, expandiendo las ecuaciones anteriores (3.1 y 3.2) para darles una relación más directa con los parámetros físicos involucrados en el proceso de medición de la energía retrodispersada que es ilustrado en la Figura 3.5, hay que tomar en consideración los siguientes aspectos físicos:

- a) Características del transductor: los patrones de radiación del arreglo transductor, que son función de los ángulos de azimuth ( $\psi$ ) y elevación ( $\theta$ ), siendo ambos patrones distintos para la transmisión  $b(\theta, \psi)$  que para la recepción  $b'(\theta, \psi)$ .
- b) Características de la señal acústica: la frecuencia  $F_s$  y duración efectiva ( $1/B_w$ ), que controlan el tamaño del área iluminada.
- c) Efectos dependientes de la distancia: las pérdidas por transmisión en el doble viaje, para una distancia  $R$  entre el transductor y el área iluminada, que incluyen divergencia esférica y absorción acústica en la columna de agua.
- d) Parámetros que dependen del fondo: el coeficiente de retrodispersión instantáneo  $s(\theta_i)$  para el elemento de área  $dA$ , es la suma de las contribuciones debidas tanto a la rugosidad de la superficie, como al volumen del sedimento, el contraste de impedancias acústicas ( $\rho v$ ) en la interfaz, expresado como el cociente de las velocidades acústicas  $v$  y de las densidades  $\rho$ .

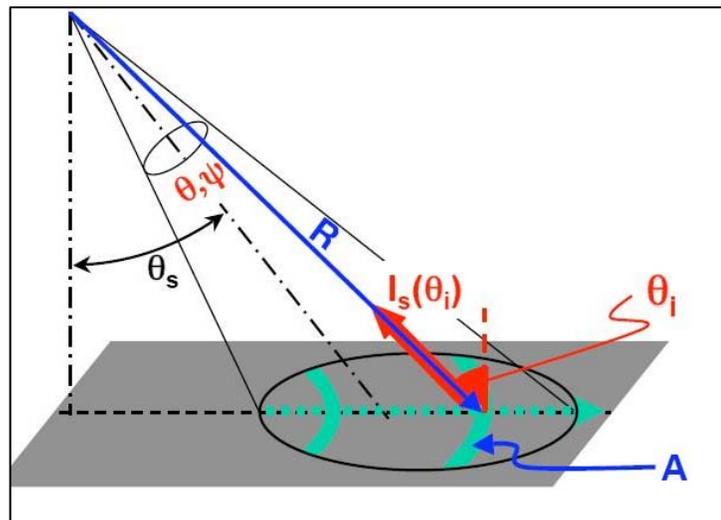


Figura 3.5. Medición del Backscatter.

Así, una intensidad acústica radiada  $I_S(\theta_i)$  que es medida en el receptor puede ser expresada como la suma de todas las contribuciones de los elementos del área radiada AE por una intensidad acústica transmitida  $I_0$ , en una frecuencia dada  $F_S$  (con coeficiente de absorción para agua salada,  $\alpha_w$ ), por un arreglo transductor con patrones de radiación  $b(\theta, \psi)$  y  $b'(\theta, \psi)$  para transmisor y receptor, respectivamente; que incide con un ángulo  $\theta_i$  sobre un área  $A$  a una distancia  $R$  del sonar, con un coeficiente de retrodispersión dado  $s(\theta_i)$ , quedando:

$$I_S(\theta_i) = I_0 \int_A \frac{s(\theta_i) b(\theta, \psi) b'(\theta, \psi)}{R^4 10^{2\alpha_w R/10}} dA \quad (3.3)$$

Para un pulso acústico CW de duración finita, el área acústicamente radiada para incidencia cercana a la vertical depende del tamaño de la huella del haz; mientras que para incidencia oblicua, el área radiada dependerá de la duración del pulso (Figura 3.6).

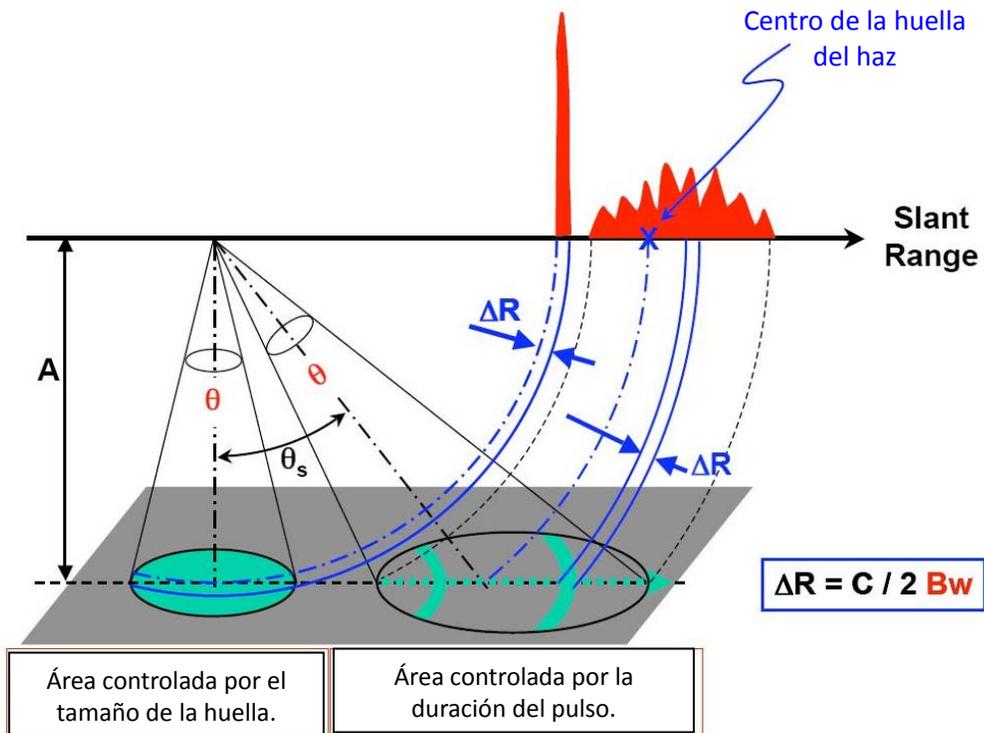


Figura 3.6. Área acústicamente radiada.

### 3.1.3. Resolución Acústica del Lecho Marino

La resolución espacial está limitada principalmente al tamaño de la huella acústica del haz en el lecho marino. El área radiada acústicamente por cada haz aumenta con la profundidad y el ángulo de inclinación; por ende, la resolución disminuye conforme aumenta la profundidad y hacia los extremos del *swath*. Cada sondeo representa un promedio acústico de la porción del lecho marino que queda dentro del área iluminada. Por ejemplo, la Tabla 3.1 cuantifica el tamaño del área radiada para el intervalo de profundidad del área norte de los Domos de Campeche (2500-3500) [Bohrman and Schenk, 2004], en donde varió desde un círculo de 27 m de diámetro cerca del nadir, hasta un sector de 13x200 m para el haz más extremo.

Tabla 3.1. Áreas radiadas y sus extensiones alongtrack y acrosstrack en metros

ángulo de incidencia	along	across								
	<b>2000</b>		<b>2500</b>		<b>3000</b>		<b>3500</b>		<b>4000</b>	
<b>0</b>	22.2	22.2	27.8	27.8	33.3	33.3	38.9	38.9	44.4	44.4
<b>60</b>	171.9	13.0	179.7	13.0	188.8	13.0	199.0	13.0	210.2	13.0
Area radiada	2232 m <sup>2</sup>		2334 m <sup>2</sup>		2452 m <sup>2</sup>		2585 m <sup>2</sup>		2730 m <sup>2</sup>	

Para establecer los parámetros de mallado es importante conocer: a) el área radiada acústicamente por haz; b) el tamaño del *swath*; c) la separación entre sondeos; con objeto de que cada celda sea representativa de la resolución real del levantamiento.

### 3.2. Procesamiento de Datos Batimétricos Multihaz

Hay movimientos y desviaciones horizontales en el equilibrio de un buque que afectan los valores y posicionamiento de los datos multihaz que son colectados. Mientras que el balanceo es el movimiento angular del buque alrededor del eje longitudinal (popa a proa), la escora de una embarcación es una inclinación constante producida por una diferencia de carga, resultando en una desnivelación del eje horizontal transversal. Esta inclinación es un desplazamiento angular hacia una de las bandas del buque, ya sea babor o estribor. El sistema de formación y virado de los múltiples haces de la ecosonda EM120 compensa

dinámicamente los movimientos del buque por balanceo, cabeceo, deriva y guiñada, pero no por su escora, ya que dichas compensaciones se hacen suponiendo que el arreglo transductor se encuentra nivelado horizontalmente (las superficies del arreglo de transductores apuntan hacia abajo cuando el barco se encuentra en reposo). Por lo cual es de esperarse que, si el barco navega escorado, los valores batimétricos multihaz y sus posiciones tengan que corregirse.

El procesado de los datos del crucero SO174-2 en el área de la Provincia Salina de los Domos de Campeche se hizo con el paquete de post-procesamiento *CARAIBES* (Figura 3.7.) de la agencia francesa IFREMER. Este paquete permite construir flujos de procesos hilados para este procesado, desde la importación de los datos en formatos específicos del fabricante, corrección, calibración, visualización, hasta la generación del modelo digital de terreno.

La Tabla 3.2 resume los datos en crudo de los recorridos 20 al 26 (referidos en el Reporte del SO174-2 como *survey*) que son procesados para conocer el relieve batimétrico del área norte de la provincia de los Domos de Campeche.

**Tabla 3.2.** *Surveys* en el área norte de los Domos de Campeche

Nombre	Coordenadas		Fecha	<i>Pings</i>	Sondeos
	Latitud N	Longitud W			
SO174-2_20	21° 33'	92° 40'	29/10/2003	2,582	489,651
	21° 15'	93° 31'			
SO174-2_22	21° 33'	92° 40'	30/10/2003	2,105	396,215
	21° 17'	93° 30'	31/10/2003		
SO174-2_23	22° 01'	93° 04'	31/10/2003	2,299	431,531
	21° 20'	93° 30'			
SO174-2_24	21° 58'	93° 12'	31/10/2003	1,261	238,483
	21° 20'	93° 31'	1/11/2003		
SO174-2_25	22° 05'	92° 55'	1/11/2003	4,360	777,307
	21° 29'	93° 30'	2/11/2003		
SO174-2_26	22° 10'	92° 40'	2/11/2003	1,447	256,057
	21° 50'	93° 31'	3/11/2003		
Total:				14,054	2,589,244

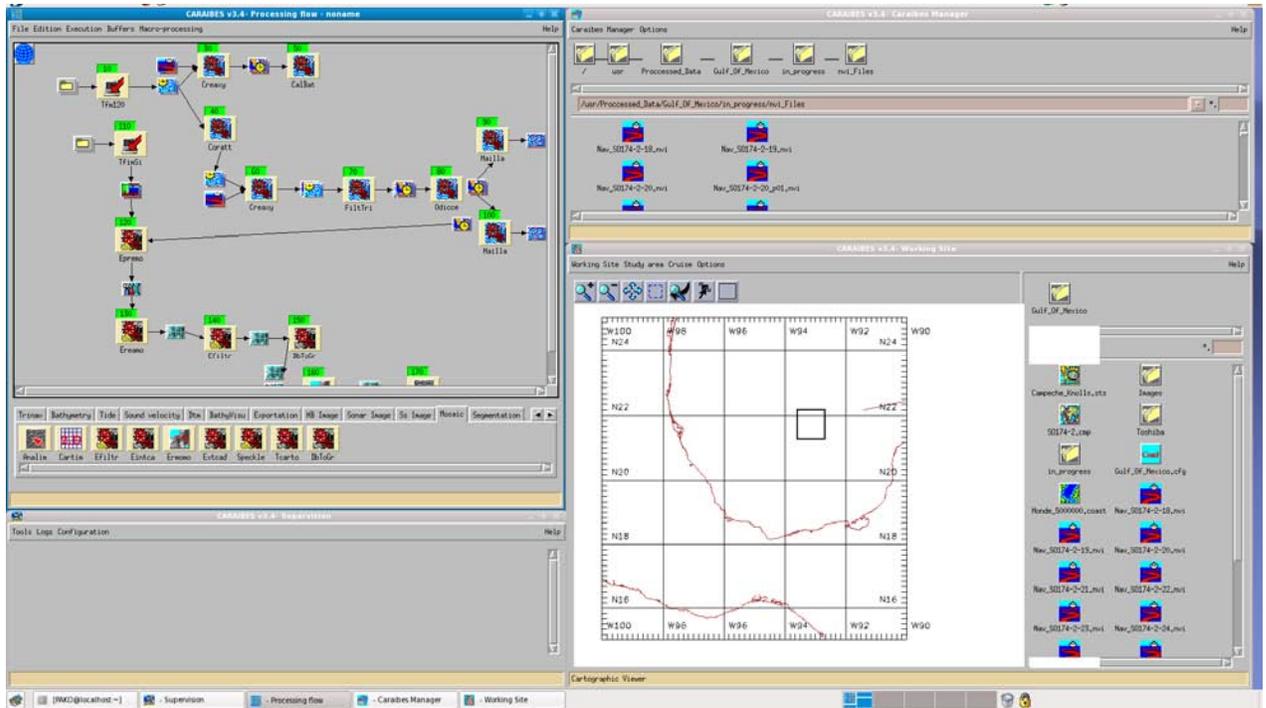


Figura 3.7. Entorno gráfico del CARIBES-PP.

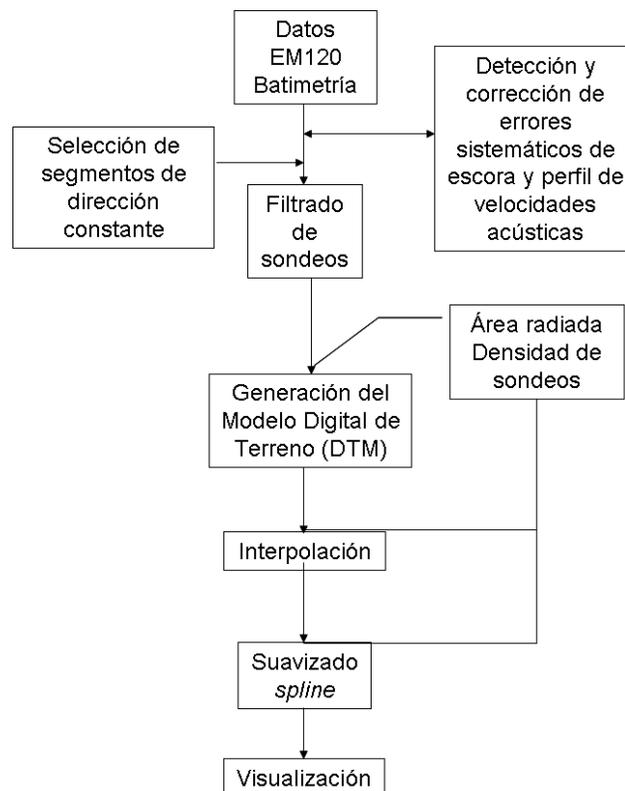


Figura 3.8. Procesamiento general de datos de Batimetría multihaz.

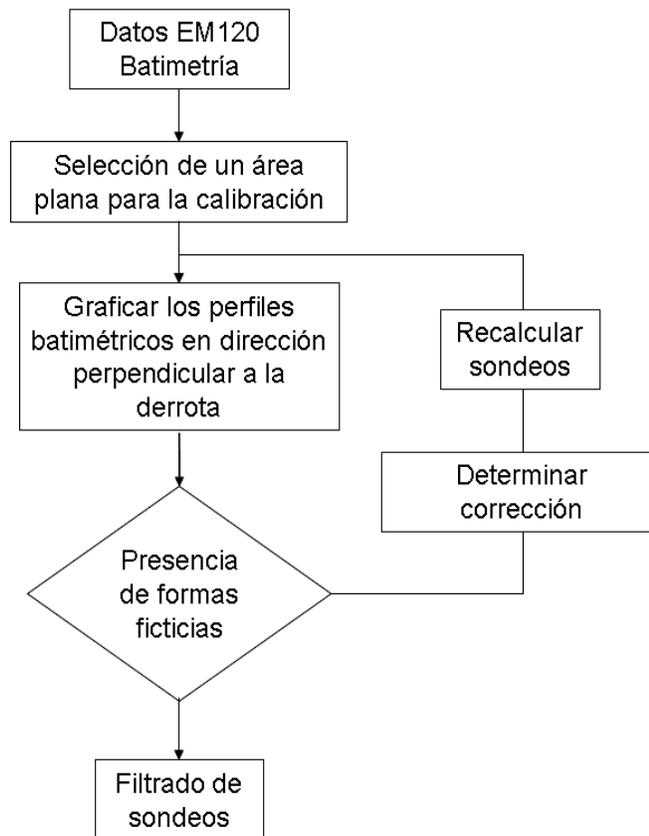


Figura 3.9. Diagrama de flujo para determinación de errores sistemáticos de escora y perfil de velocidades acústicas

### 3.2.1. Correcciones por la Escora de un Buque.

La información obtenida del eco del piso oceánico depende de manera significativa del control preciso de la posición del arreglo de transductores, por lo que las ecosondas multihaz deben ser periódicamente calibradas. Errores en la calibración del arreglo, así como en la compensación por el movimiento del buque, provocan la aparición de formas ficticias en el fondo marino. Existe la necesidad de revisar la existencia de estos errores en los datos obtenidos del relieve batimétrico, como estructuras que aparecen asociadas a la trayectoria del levantamiento, ya sea paralela o perpendicularmente. Generalmente el error de escora produce un valle o una cresta alineada con la dirección del levantamiento en un fondo plano (Figura 3.10). La menor profundidad refleja la banda hacia la que va *escorado*. Para detectar este error se realiza un levantamiento sobre un fondo que se conoce es plano; se registran datos sobre dos o más barridos paralelos, alternados en

sentidos opuestos; esto permite evidenciar de mejor manera, la existencia de valles y crestas productos de la falta de calibración en los transductores [EM120 Operator Manual, 2000; Hughes-Clarke, 2009].

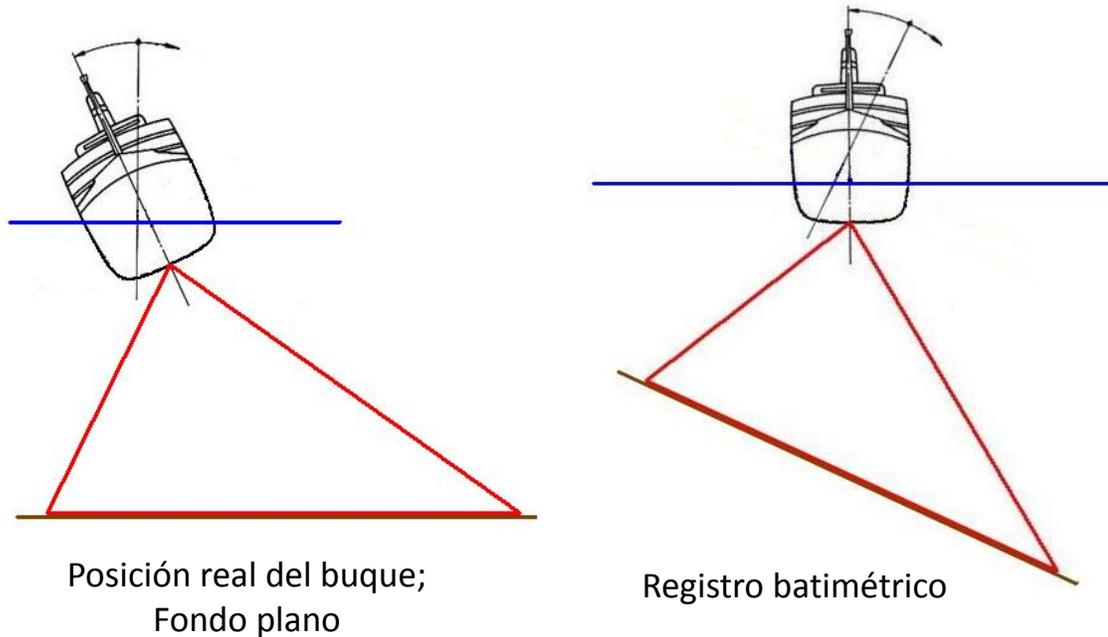


Figura 3.10. Efecto de escora en la batimetría.

Durante la campaña SO174-2 se llevó a cabo inicialmente un levantamiento multihaz (SO174-2\_18) en el área de los domos de la Planicie de Sigsbee [Bohrman and Schenk, 2004]. El levantamiento mostró una batimetría plana con la irrupción ocasional de estructuras dómicas, como lo había descrito Bryant *et ál.* [1991]. La Figura 3.11 muestra parte del levantamiento SO174-2\_18, que consistió de tres líneas paralelas que evidenciaron los efectos de los errores sistemáticos debido a la escora del buque en los datos multihaz de batimetría.

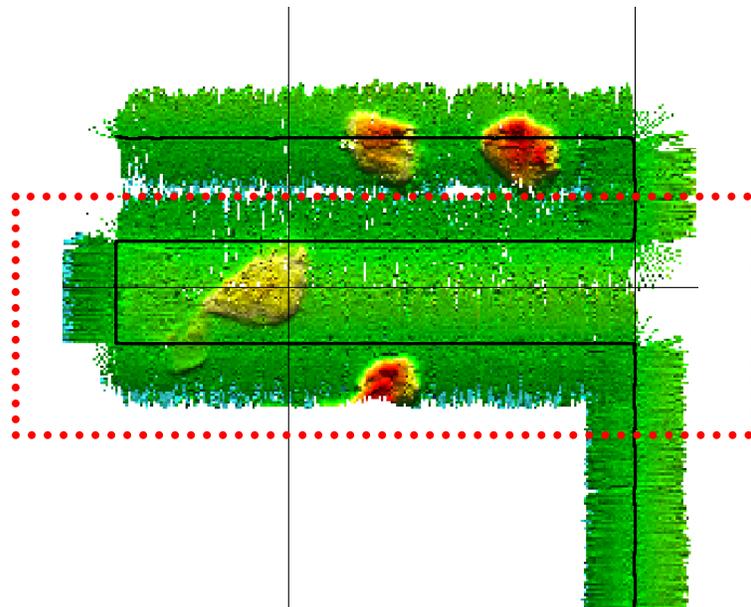
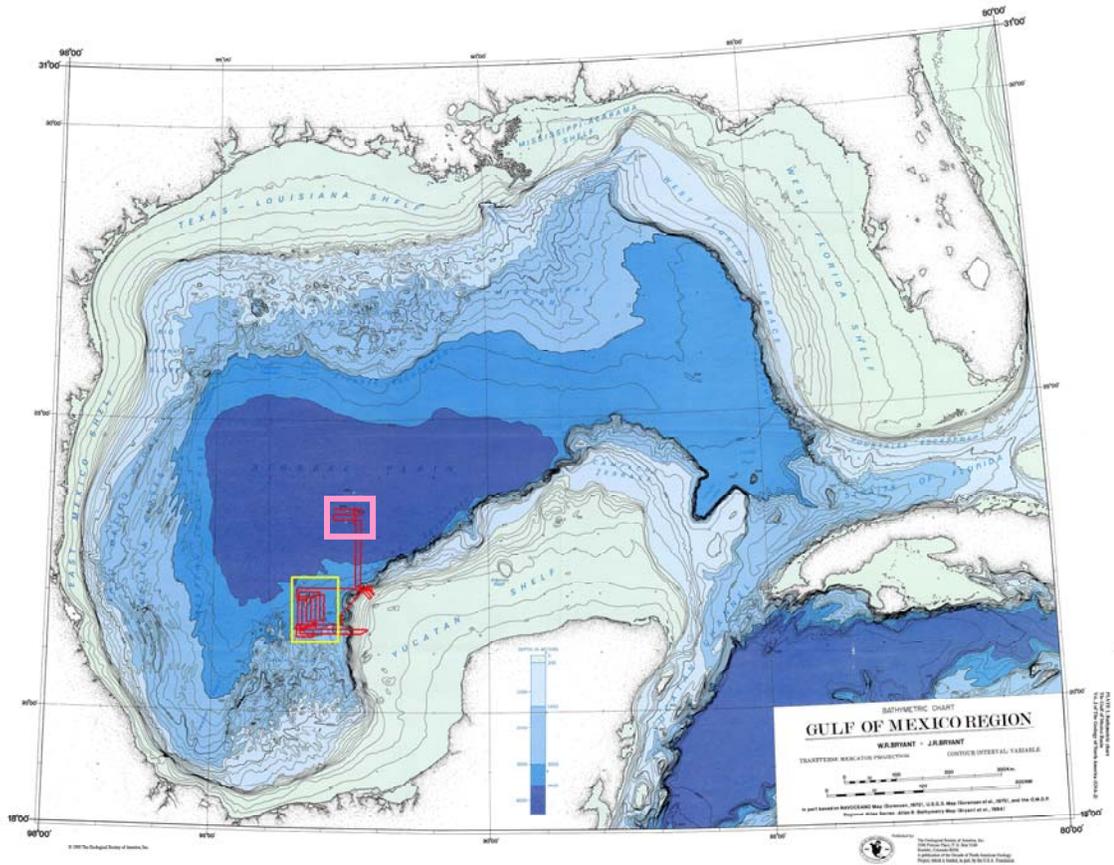


Figura 3.11. Zona de calibración (Survey SO174-2\_18) en la región de los Domos de Sigsbee.

Se usaron los perfiles de las dos líneas E-W más al sur, ya que muestran una mejor área de traslape. Puede notarse en la Figura 3.11 que existen estructuras alineadas con la trayectoria del levantamiento, que evidencian un error en la calibración de la ecosonda. El error de escora era evidente en los datos del ecosonda multihaz EM120 durante la campaña SO174-2 y producía un efecto mayor en la batimetría resultante que el uso inadecuado de los perfiles verticales de velocidad acústicos usados en la campaña [EM120 Operator Manual, 2000]. La Tabla 3.3 presenta los segmentos utilizados en el módulo *CalBat* para determinar los efectos en los datos batimétricos y su corrección. Estos datos se utilizaron para calibrar todos los sondeos del levantamiento batimétrico multihaz durante la campaña SO174-2, en el sector sur del Golfo de México.

Tabla 3.3. Segmentos del *Survey* SO174-2\_18 usados para la calibración en *CalBat*.

Segmento	Lat. Inicial	Lon. Inicial	Lat. Final	Lon. Final
Norte	N 23° 22.5033'	W 92° 21.1090'	N 23° 22.4960'	W 92° 49.0928'
Sur	N 23° 16.9978'	W 92° 49.2949'	N 23° 16.9909'	W 92° 21.1145'

En el post-procesado de los datos del crucero SO174-2, utilizando el módulo *CalBat* de *CARAIBES* se determinó interactivamente el error presente en los datos por efecto de la escora. Se seleccionó un perfil perpendicular a la derrota y se proyectaron los sondeos dentro de un área de calibración de 100 m de ancho a través de los dos *swath* (Figura 3.12). El proceso consiste en llevar el perfil que se observa inclinado, a uno que este plano (Figura 3.12a). Este proceso se llevó a cabo en dos aéreas, una plana y otra con una estructura cómica, para comprobar la validez de la corrección obtenida (Figura 3.12b). Con este método se determinó un error de escora de 0.5° a babor.

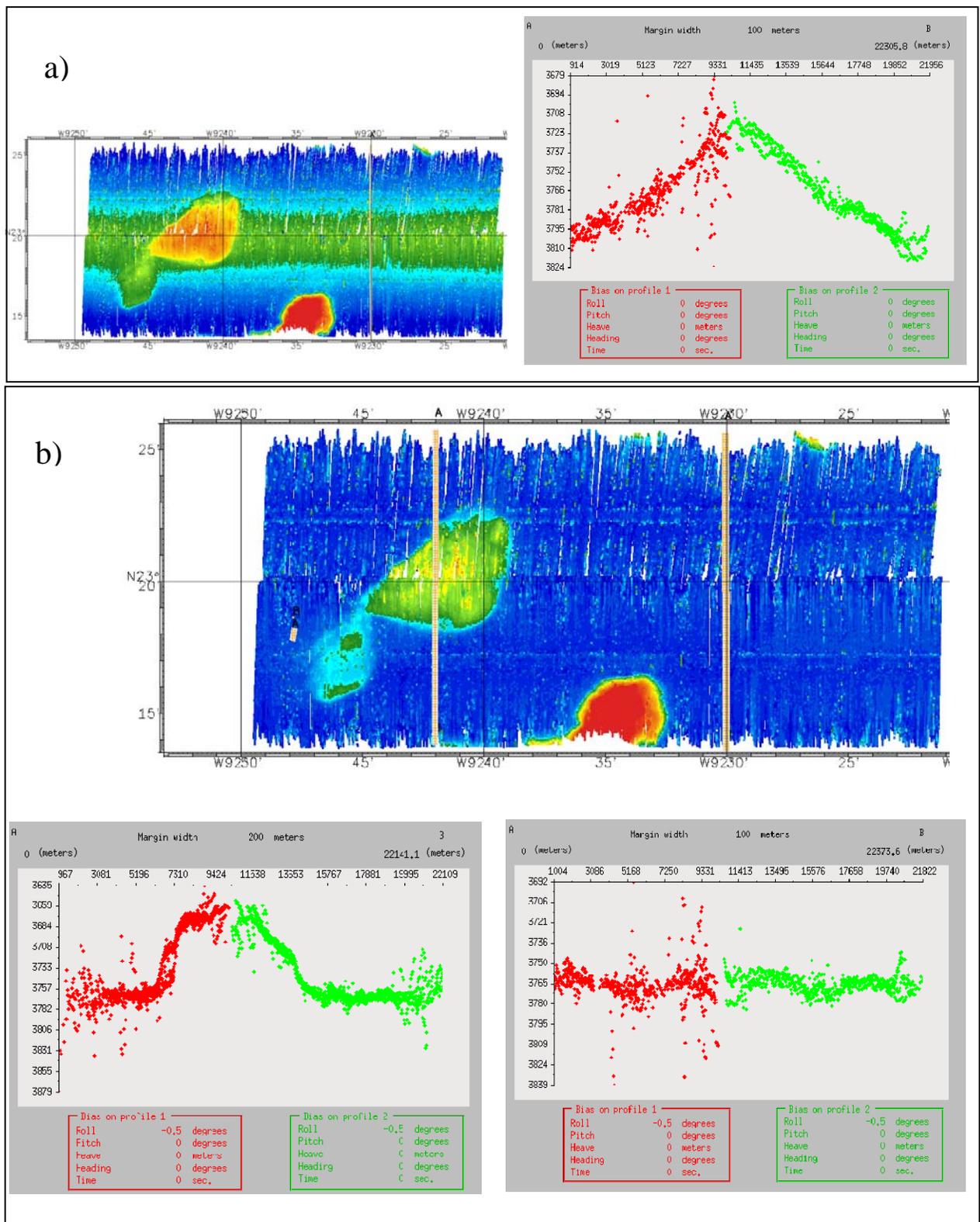
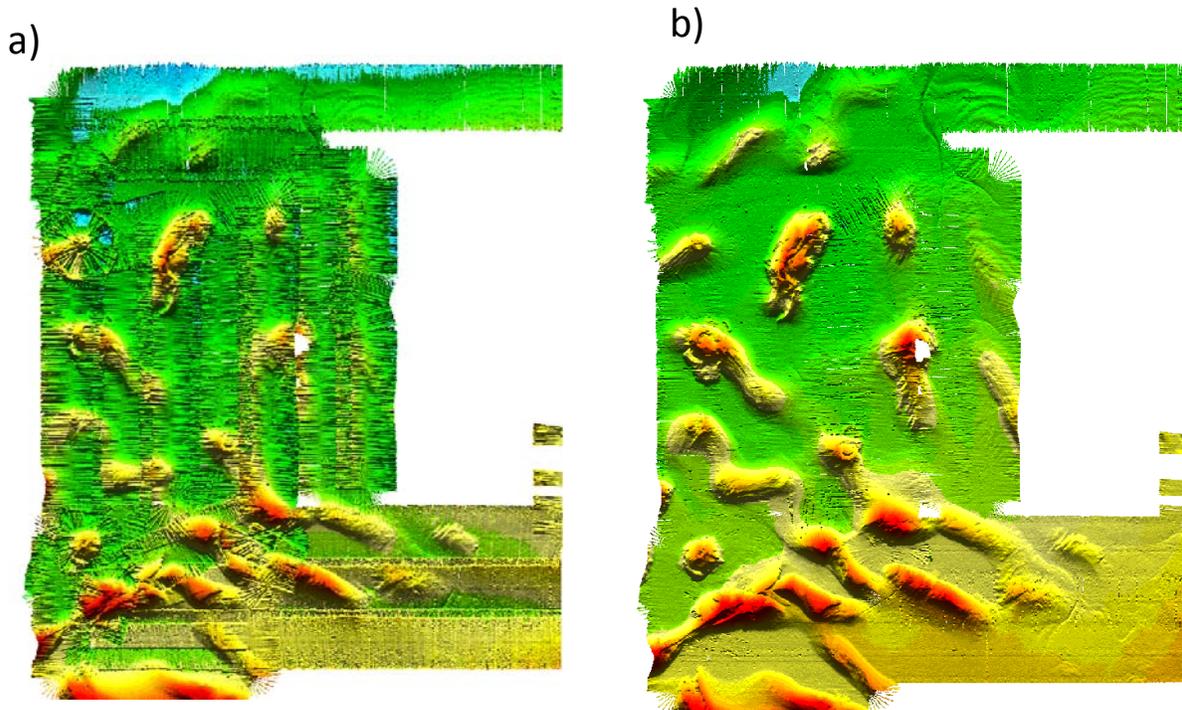


Figura 3.12. Calibración por efecto de escora. a) izquierda: Batimetría de los dos perfiles; derecha: corte transversal del relieve batimétrico; b) batimetría mostrando la corrección. inferior: corte del área de calibración

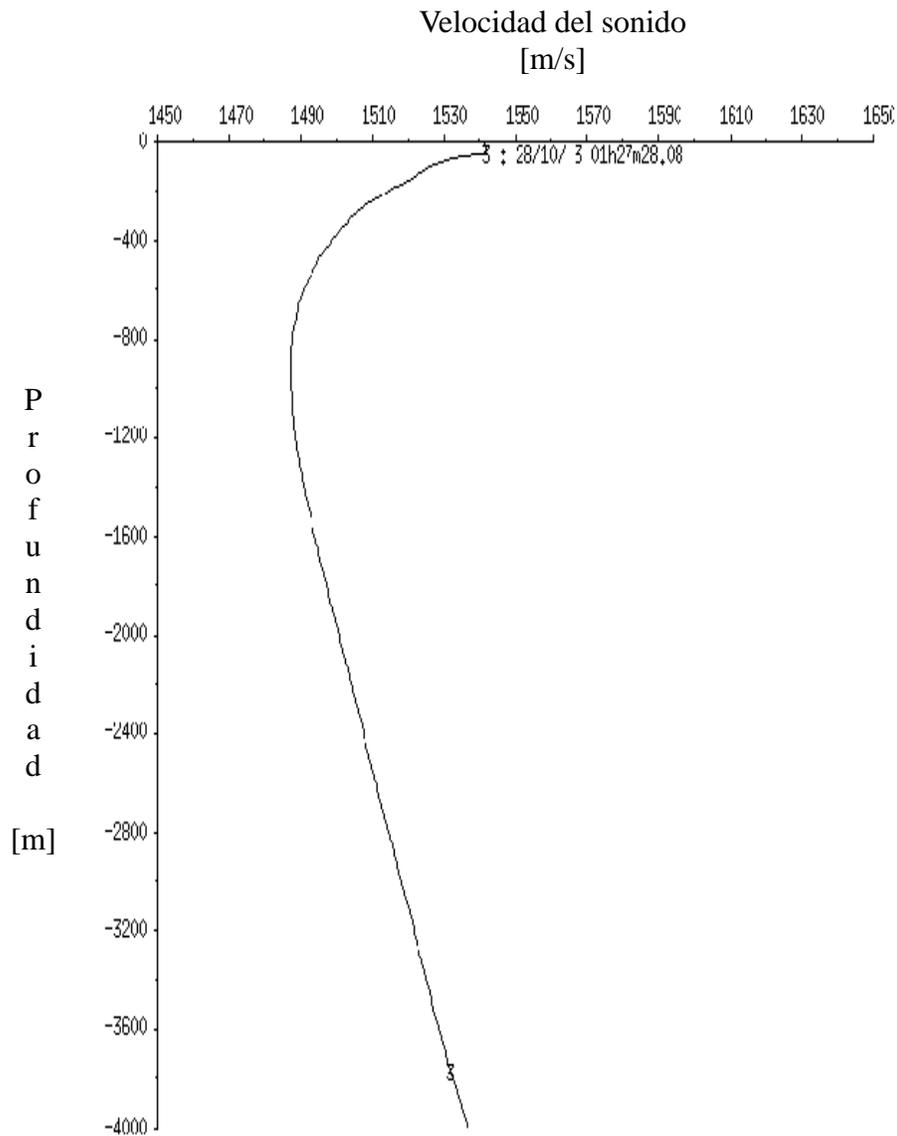
Como resultado por la escora del buque, se re-calcularon todos los sondeos de la campaña SO174-2 con una escora constante de 0.5° a babor. Este proceso se realizó utilizando el módulo *Coratt* en *CARAIBES*. La Figura 3.13 muestra la diferencia del mallado de los datos adquiridos sin corrección por el escoramiento (Figura 3.13a) y el mallado de datos corregidos (Figura 3.13b). Esta figura muestra claramente la diferencia existente en el relieve batimétrico al aplicar la corrección por escora.



*Figura 3.13. Corrección del efecto de escora.*

### **3.2.2. Perfil Vertical de las Velocidades Acústicas**

Es de suma importancia el contar con un perfil de velocidades acústicas adecuado a las variaciones de los parámetros físicos que tiene la columna de agua cuando se realiza el ecosondeo multihaz. El perfil de velocidades acústicas (e.g. Figura 3.14), es usado para definir la geometría del trazado de los rayos para ubicar precisamente las posiciones del eco sobre el lecho marino, así como también calcular las pérdidas por transmisión en la propagación acústica para cada uno de los haces.



*Figura 3.14. Perfil de velocidades usado durante la campaña SO174-2.*

En un fondo plano, el empleo de una distribución de velocidades acústicas adecuada debería reproducir el fondo fielmente. Contar con un perfil de velocidades no adecuada, resultará en estructuras como crestas o valles, alineados a la trayectoria del levantamiento (Figura 3.15). Si el perfil de velocidades acústicas usado presenta velocidades mas bajas, generará un valle (Figura 3.15a); por el contrario, si presenta velocidades mayores, generará una cresta (Figura 3.15b).

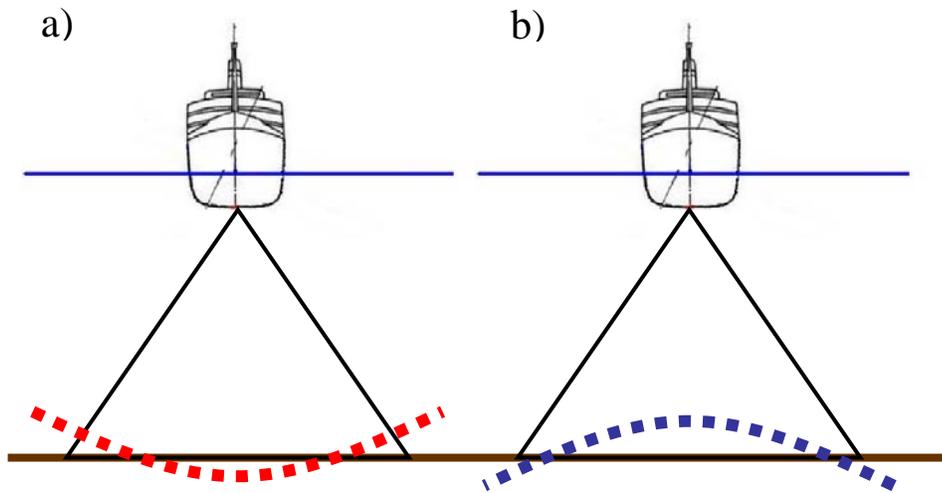


Figura 3.15. Efecto de error en el perfil de velocidades acústicas

Se utilizaron los datos ya corregidos por efecto de escora en el área de prueba - Domos de Sigsbee – para determinar si el perfil de velocidades usado era adecuado (Figura 3.16.), empleando nuevamente el módulo *Calbat*, con un área de calibración de 200 m. La Figura 3.16. muestra que el fondo es plano, ya que en la imagen batimétrica no se aprecia estructura alguna alineada con la trayectoria del levantamiento. Lo anterior nos asegura que el perfil de velocidades acústicas empleado es el adecuado, por lo tanto no hay necesidad de corrección.

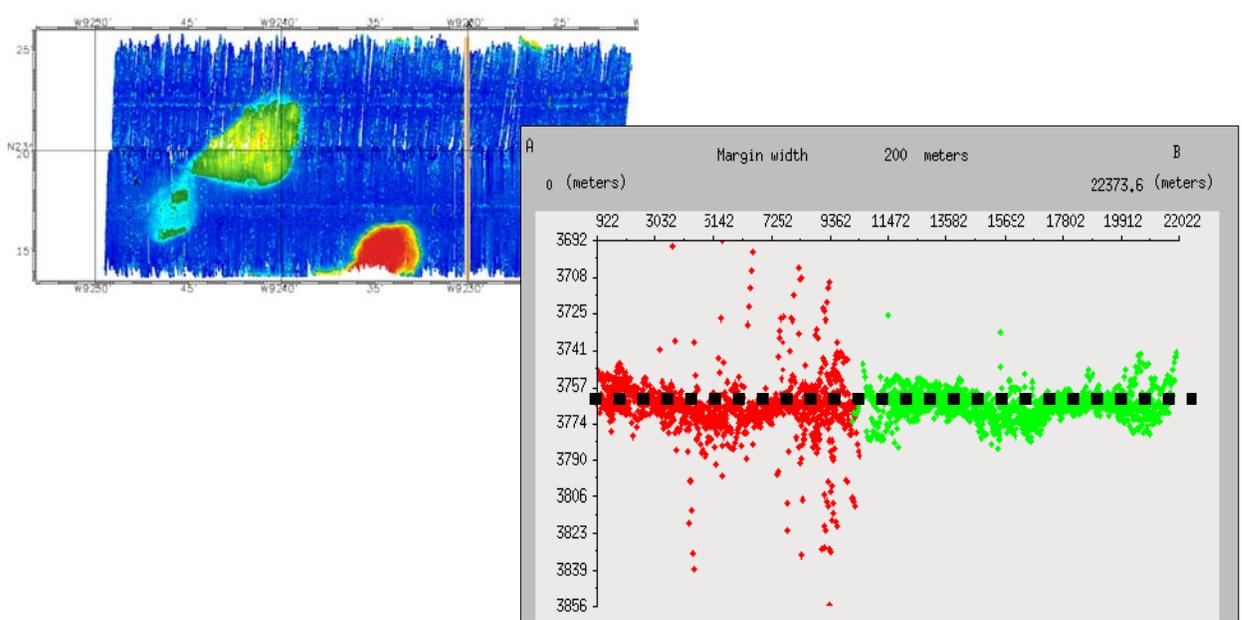


Figura 3.16. Calibración del perfil de velocidades.

### 3.2.3. Extracción de Líneas de Dirección Constante

Los distintos levantamientos (SO174-2\_20 al 26) fueron divididos en segmentos de derroteros con rumbo constante, en preparación para el filtrado automático de sondeos batimétricos e importación de datos de *backscatter*. Cada uno de los segmentos es enlistado en la Tabla 3.4 y resumidos gráficamente en el Anexo D. Estos segmentos (e.g. Figura 3.17) fueron delimitados manualmente usando visualmente las graficas del módulo *Ananav*, el cual permite excluir los datos de las vueltas y trayectos de deriva. En secuencia se extrajeron los datos a fin de crear un archivo individual para cada segmento, utilizando el módulo *Fusmul*.

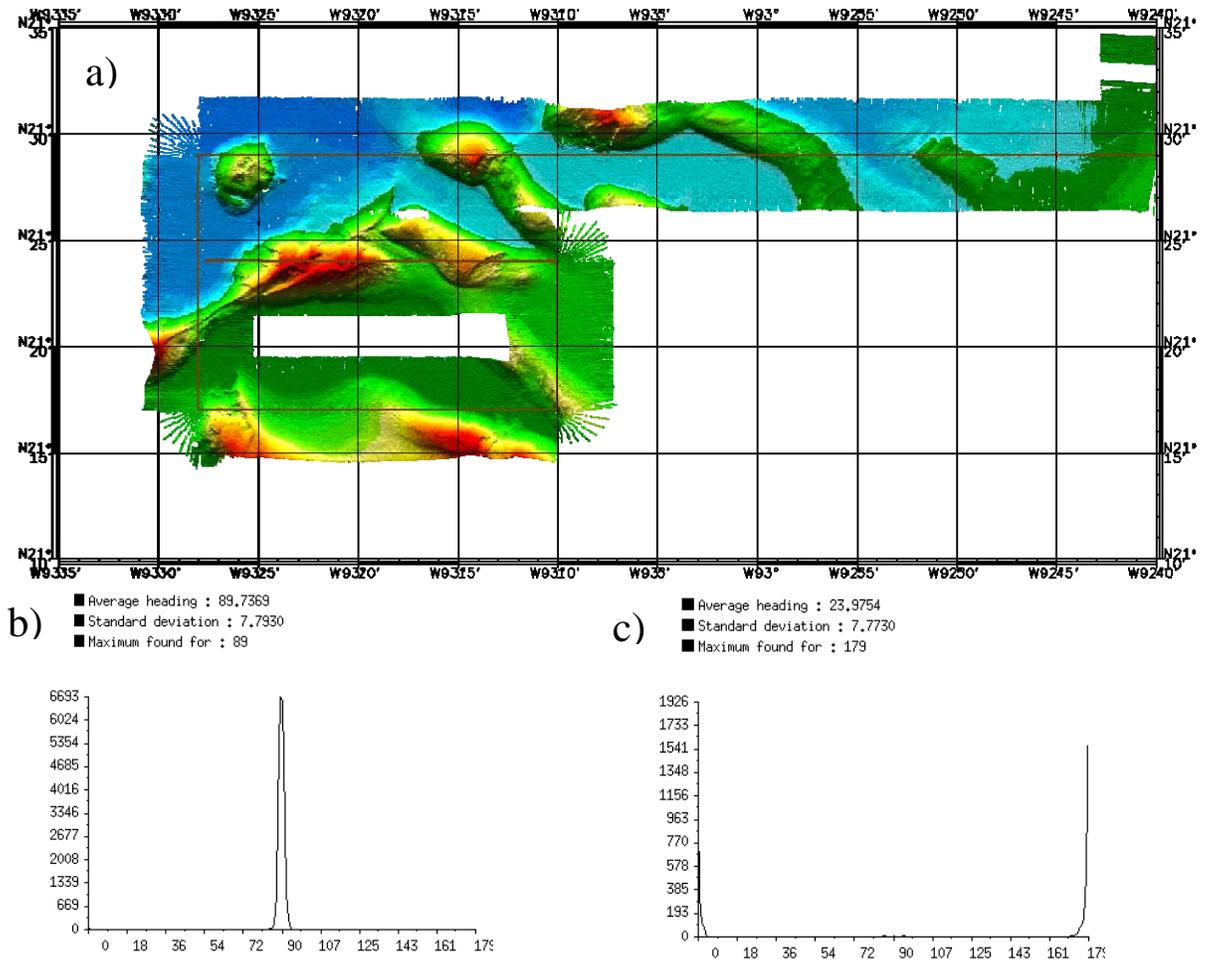


Figura 3.17. Segmentos extraídos para el archivo SO174-2\_20 a) Batimetría en crudo del Survey SO174-2\_20; b) histograma de navegación para líneas horizontales; c) histograma de dirección para líneas verticales

Tabla 3.4. Resumen de los segmentos extraídos.

Survey	Segmento	Dirección
SO174- 2_20	P01	89
	P02	179
	P03	90
	P04	0
	P05	90
SO174- 2_22	P01	161
	P02	90
	P03	90
	P04	18
SO174- 2_23	P01	148
	P02	163
	P03	0
	P04	90
	P05	179
	P06	66
	P07	87
SO174- 2_24	P01	84
	P02	50
	P03	66
	P04	7
	P05	170
	P06	14
	P07	7
	P08	0
	P09	77
	P10	90
SO174- 2_25	P01	79
	P02	179
	P03	90
	P04	0
	P05	60
	P06	80
	P07	90
	P08	0
	P09	21
	P10	13
	P11	163
	P12	179
	P13	90
	P14	0
	P15	90
	P16	173
SO174- 2_26	P01	34
	P02	0
	P03	90

### 3.2.4. Filtrado de Datos

Para el filtrado automático de los datos batimétricos se usó el módulo *FiltTri*. Éste proceso se aplica para cada segmento. El filtrado automático se basó en el algoritmo Delauney-Heights [*CARAIRES-PP manual*, 2008], utilizando una malla irregular que es calculada mediante el método de triangulación Delauney. Con base en esa malla se calcula la profundidad promedio alrededor de cada sondeo, invalidando los sondeos que se desvíen del promedio fuera de una tolerancia definida. Cada segmento fue sometido a un total de 4 iteraciones. En la Tabla 3.5 se resumen los resultados de este procesado. El proceso de filtrado automático es más eficiente en líneas que no presentan cambios de pendiente muy abruptos, por lo que se decidió emplear este tipo de proceso con una tolerancia amplia, para evitar la pérdida de información en áreas de pendiente pronunciada, como lo presentan las estructuras dómicas. Los sondeos válidos de varios segmentos son integrados en archivos denominados *survey*, enlistados también en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Estadísticas por cada segmento antes y después del filtrado automático.

Survey	Segmento	Sondeos Iniciales	Sondeos Inválidos			Sondeos Finales
			Filtrado automático	Filtrado Manual	Filtrado	
SO174-2_20	5	489651	12426	43729	56155	433496
SO174-2_22	4	396215	15952	51902	67854	328361
SO174-2_23	7	431531	15352	57952	73304	358227
SO174-2_24	10	238483	7661	24517	32178	206305
SO174-2_25	16	777307	32934	158329	191263	586044
SO174-2_26	3	256057	11418	25480	36898	219159
Total		2589244	95743 3.70%	361909 13.98%	457652 17.68%	2131592 82.32%

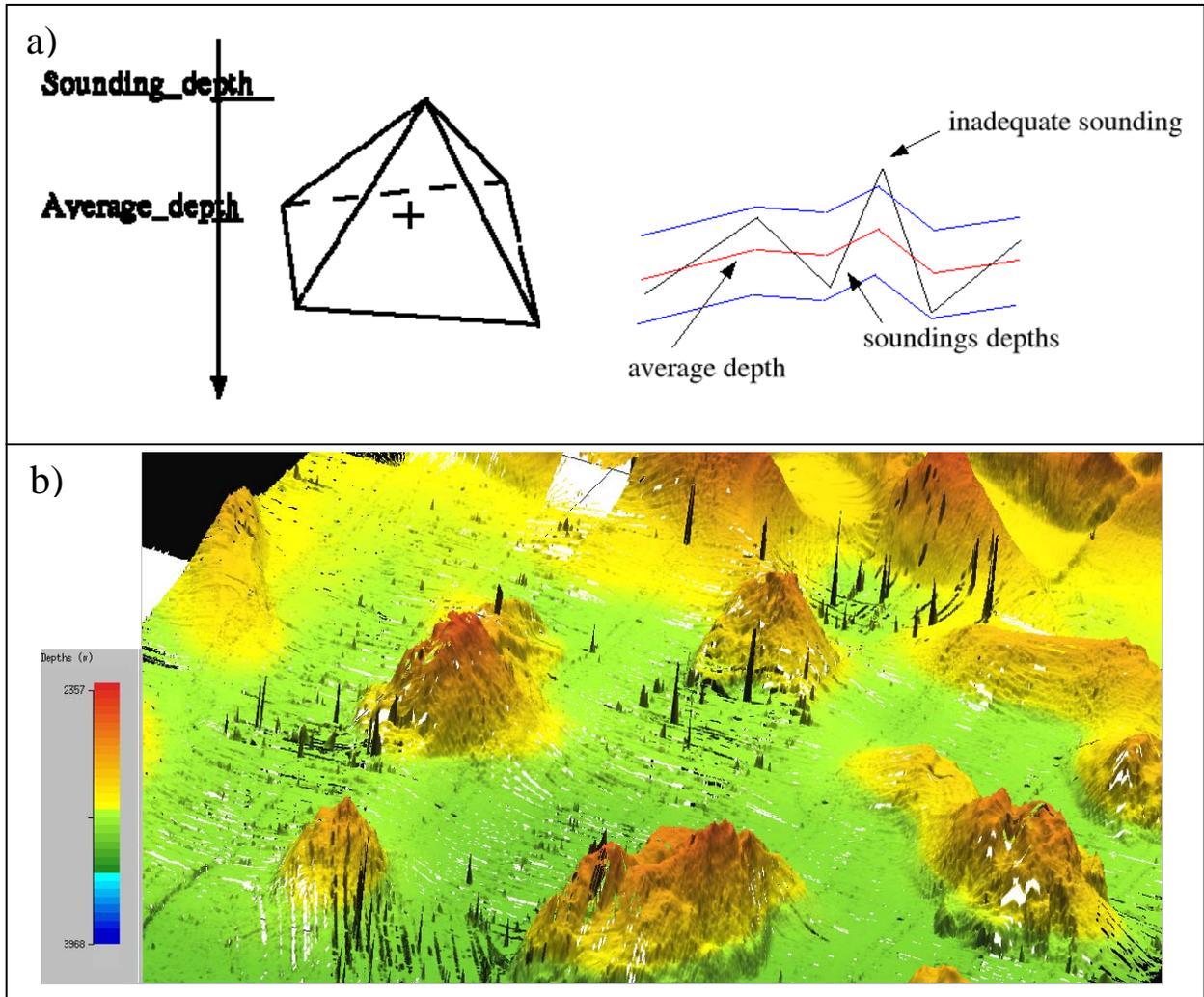


Figura 3.18. Filtrado automático. a) Método Delauney; b) acercamiento de la batimetría sin filtrar.

Para detectar y marcar manualmente los sondeos inadecuados después del filtrado automático, se empleó el módulo *Odicce*. Este módulo nos permite observar los datos en forma de malla y en forma de perfil en un área seleccionada (e.g. Figura 3.19). Basándonos en la vista de perfil y tomando en cuenta la tendencia general de los sondeos (coherencia visual) se seleccionaron e invalidaron los sondeos considerados inadecuados (aquellos que se alejaban de la tendencia general) (Figura 3.20). Este proceso se aplicó para cada uno de los *surveys* (SO174-2\_20 a 26) en una primera aproximación, pero para el tratamiento final se empleó el conjunto de todos los *surveys* que conforman el área de estudio. En resumen,

se invalidaron manualmente 361909 sondeos de los 2589244 sondeos de los datos adquiridos durante la campaña SO174-2 (aproximadamente el 17%).

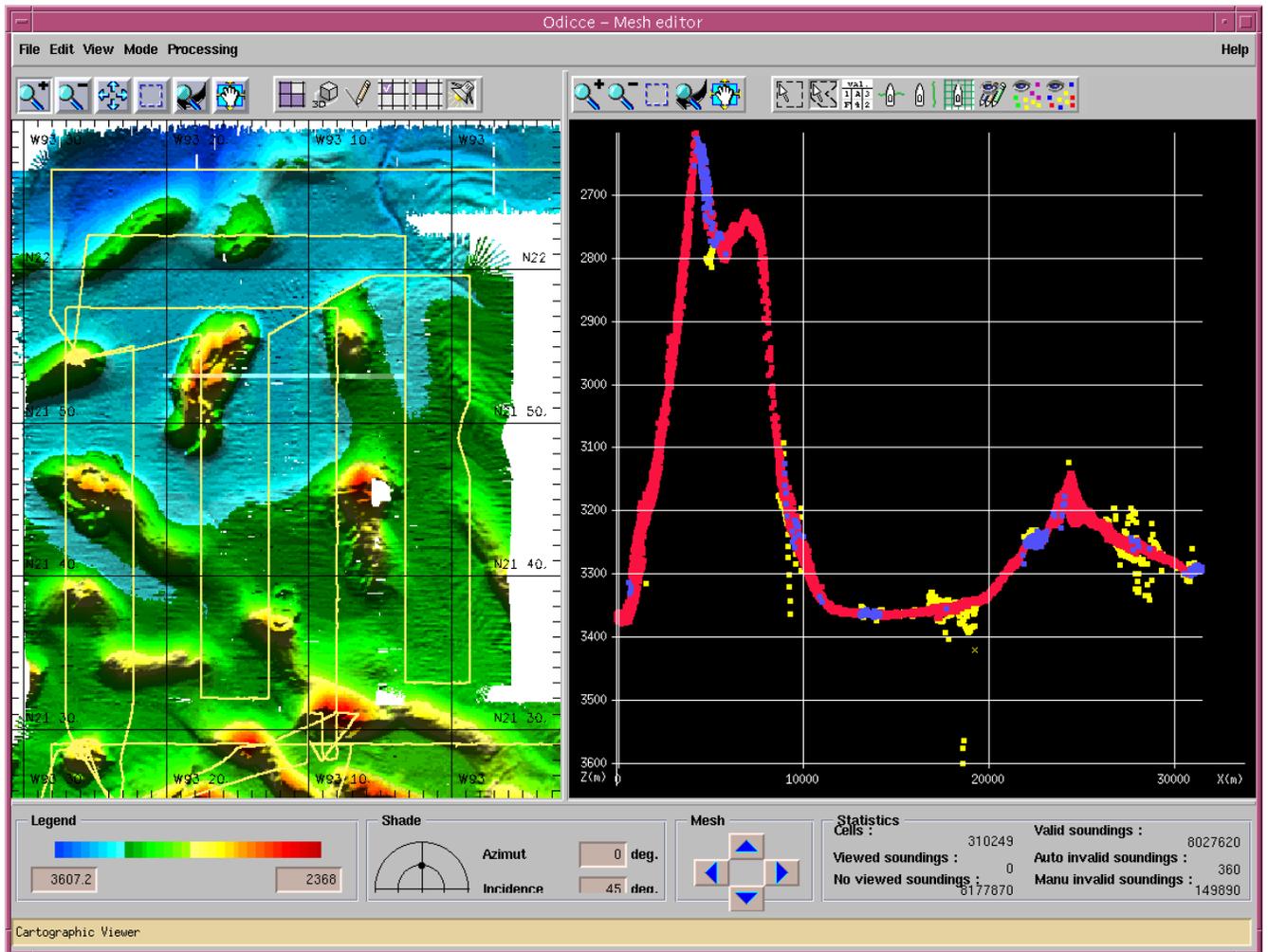


Figura 3.19. Ventanas de Odicce.

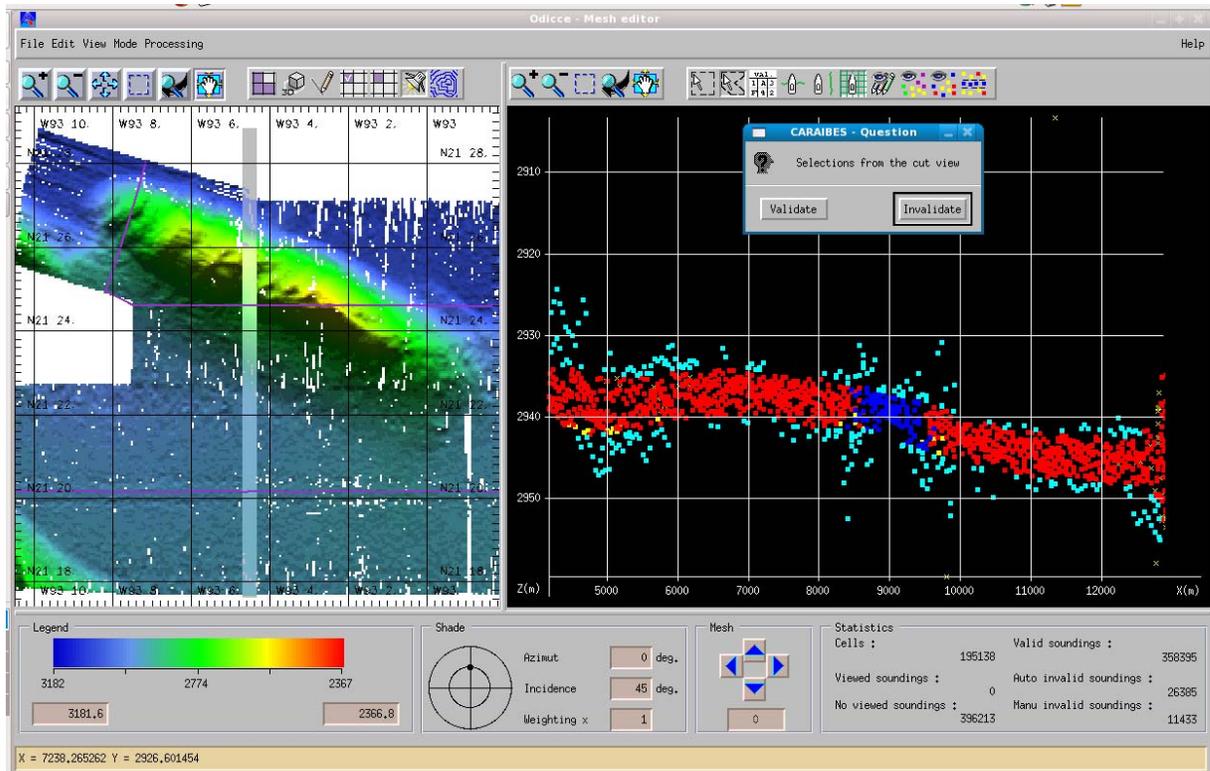


Figura 3.20. Filtrado manual de sondeos en Odicce.

### 3.2.5. Modelo Digital de Terreno

Para la generación del modelo digital de terreno (DTM) es necesario tomar en cuenta algunos aspectos de la adquisición de los datos para definir los parámetros de mallado [de Moustier, 2009; Augustin *et ál.*, 1996; Bourillet *et ál.*, 1996]; por lo que el tamaño de la celda y el área de influencia deben ser congruentes con el muestreo del piso oceánico, definido por: (a) el tamaño de la huella del haz en el fondo o área iluminada acústicamente, (b) posición de cada sondeo, y (c) distancia recorrida entre cada ping o swath, dependiendo del intervalo de disparo y la velocidad del levantamiento. Durante el levantamiento SO174-2 se usó el modo *equidistante* en la ecosonda EM120 [Bohrman and Schenk, 2004], dando como resultado un sondeo por cada 50 m en promedio en el *swath*. Para tomar en cuenta la velocidad del levantamiento: el intervalo entre cada ping es de 15 s, lo que con una velocidad de 10 kn, se tenía un pulso cada 75 m. El área iluminada acústicamente abarca desde un círculo de 30m de diámetro hasta un rectángulo de 200 m por 13 m para los haces a 60° (Tabla 3.1). Esto indica que hay un traslape de áreas iluminadas de 25 m para los haces extremos y ninguno para los haces centrales.

Con base en estos parámetros de adquisición, se utilizaron dos procedimientos para el mallado (Figura 3.21). El primer mallado se hizo con el módulo *Mailla*. Este módulo asigna el promedio aritmético de los sondeos dentro del área de búsqueda al nodo de la malla. El tamaño del área depende del tamaño de la celda y el tipo de vecindario que se escoge (Figura 3.21a). Se utilizó un tamaño de celda de 100 m con base en que se promediarían cuatro sondeos por nodo. Para el segundo mallado se empleó el módulo *Maillp*, en el que calcula el valor en el nodo mediante un promedio ponderado de los sondeos dentro del radio de influencia (Figura 3.21b). En este caso, se usó un espacio entre nodos de 50 m, con un radio de influencia de 100 m, con base en el criterio seguido para el primer mallado.

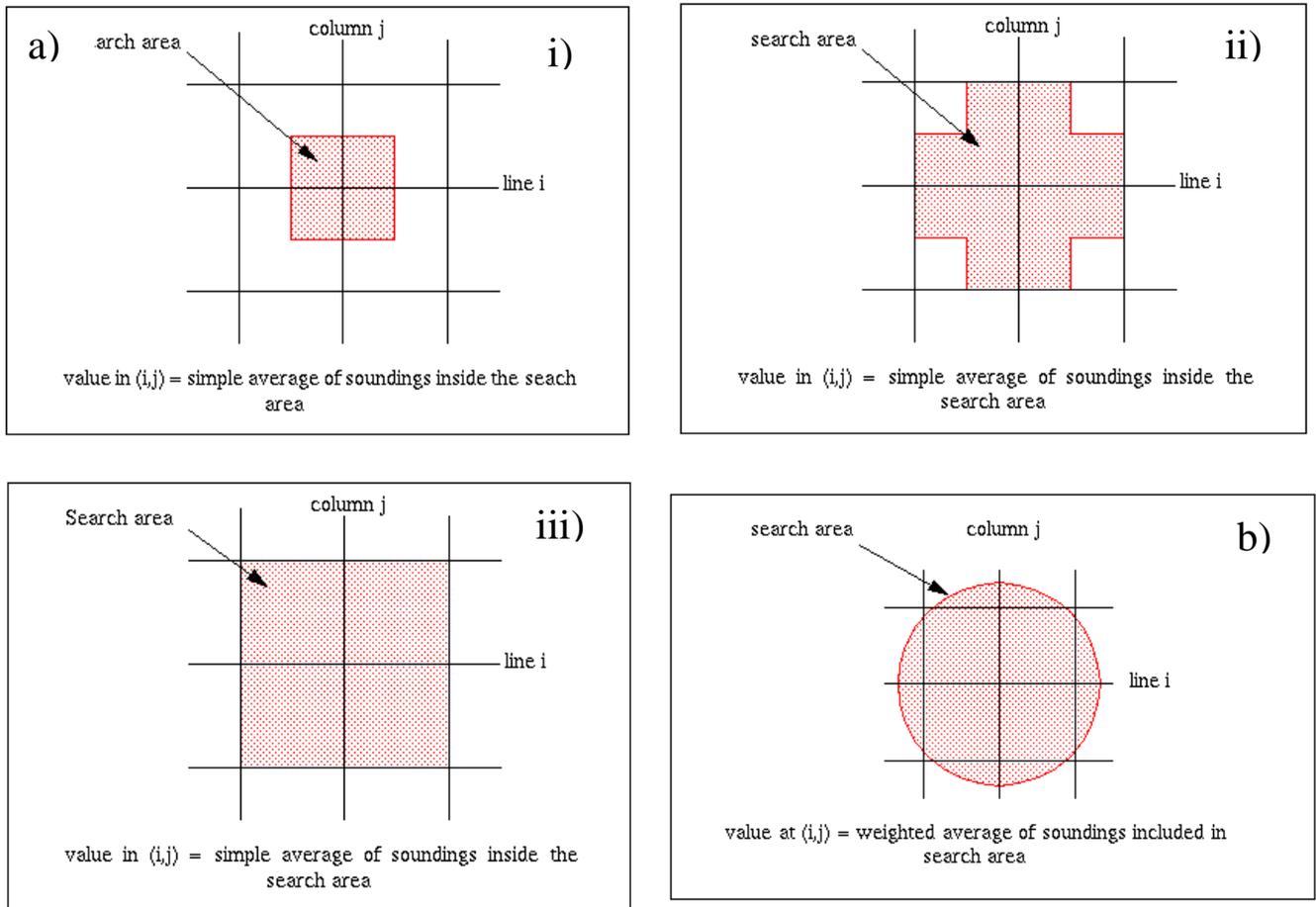


Figura 3.21. Tipos de entornos para los procesos de mallado. (a) Entornos para el módulo *Mailla*: (i) entorno de 1 celda, (ii) entorno de 2 celdas, (iii) entorno de 3 celdas; (b) Entorno para el módulo *Maillp*.

Con el objeto de asignar un valor batimétrico a las celdas vacías se realizó un proceso de interpolación. El valor de la celda vacía se calcula mediante la media de los valores de las celdas en un área definida alrededor de esta. El tamaño del entorno se definió de 5x5 celdas.

Al final del procesado de los datos de batimetría multihaz, el mallado obtenido de los datos filtrados e interpolados es suavizado para eliminar los artefactos que fueron creados durante el pos procesamiento y generación del DTM final del lecho marino. Este suavizado se hace tomando en cuenta que la precisión en los valores de profundidad que pudiera registrar la ecosonda EM120, esperado entre 0.2 % y 0.5 % de precisión en la profundidad [de Moustier, 2000]. El suavizado se realizó usando el módulo *Spline*, el cual implementa un algoritmo de *spline* bicúbica [CARAIBES-PP Manual, 2008]. Se realizaron tres modelos suavizados, teniendo alto, mediano y bajo grado.

### 3.3. Imágenes Acústicas del Lecho Marino

La Figura 3.22 ilustra en secuencia las diferentes etapas que se realizaron para el procesado de los datos de *backscatter* para que fuera integrado un mosaico de imágenes acústicas del lecho marino que sonificó la ecosonda EM120 durante el levantamiento del SO174-2.

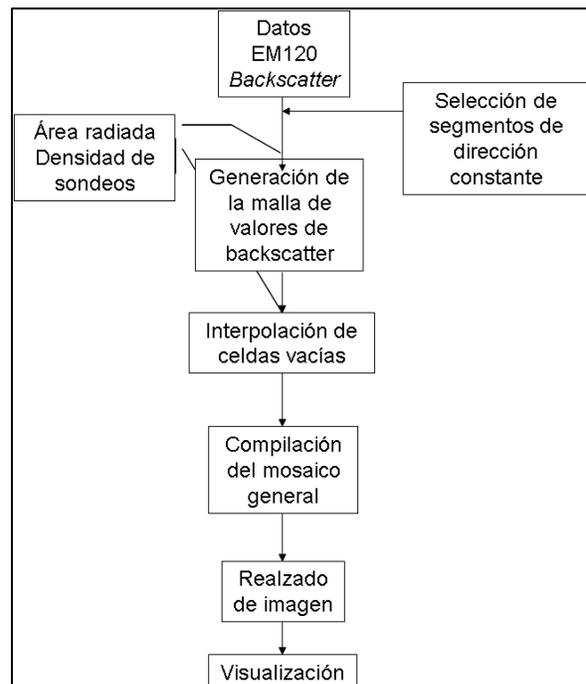


Figura 3.22. Diagrama de flujo del proceso para obtener el mosaico de imágenes acústicas

### 3.3.1. Imágenes Acústicas

Para generar el mosaico de imágenes de acústica, se tomó en cuenta que cada valor reportado de intensidad de backscatter representa el máximo nivel promedio del área iluminada dentro de cada haz [Hammerstad, 2000]. Como se hizo en el proceso de los datos batimétricos, el área iluminada acústicamente varía a lo largo del *swath* [Hughes-Clark, 2009; Bourillet *et ál.*, 1996], siendo aproximadamente cuadrada (~30 m) próxima a la zona del nadir y en forma rectangular alargada, paralela a la dirección de avance (~200 x 13 m, paralela y transversal al *swath*, respectivamente) para el haz mas externo (Tabla 3.1). A partir de esta información, se estableció un tamaño de pixel de 50 m.

Para la creación del mosaico se emplearon dos módulos: *Epremo* y *Ereamo*, generando un mosaico independiente para cada segmento del levantamiento. Estos segmentos corresponden con aquellos extraídos para el filtrado automático de datos batimétricos.

El módulo *Epremo* crea los archivos auxiliares, basándose en el archivo de batimetría y la dirección promedio del segmento. Estos archivos contienen la información necesaria para posicionar correctamente cada píxel en el mosaico. El módulo *Ereamo* tiene como argumentos de entrada el tamaño de la celda (píxel) y los archivos auxiliares generados por *Epremo*. Este módulo crea el mosaico y asigna el valor de backscatter a la celda correspondiente (Figura 3.23). La Figura 3.24 muestra una imagen sin procesar como ejemplo de un segmento del levantamiento.

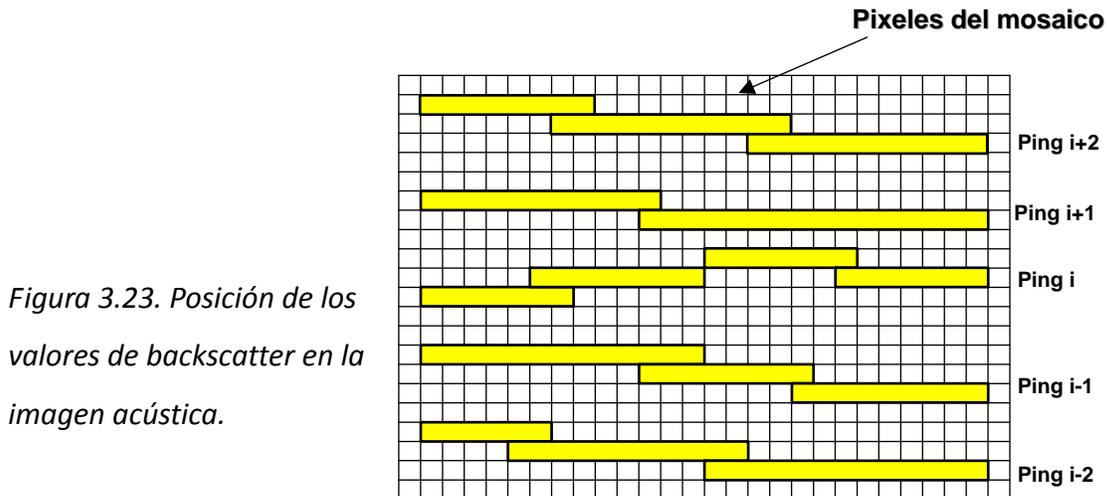
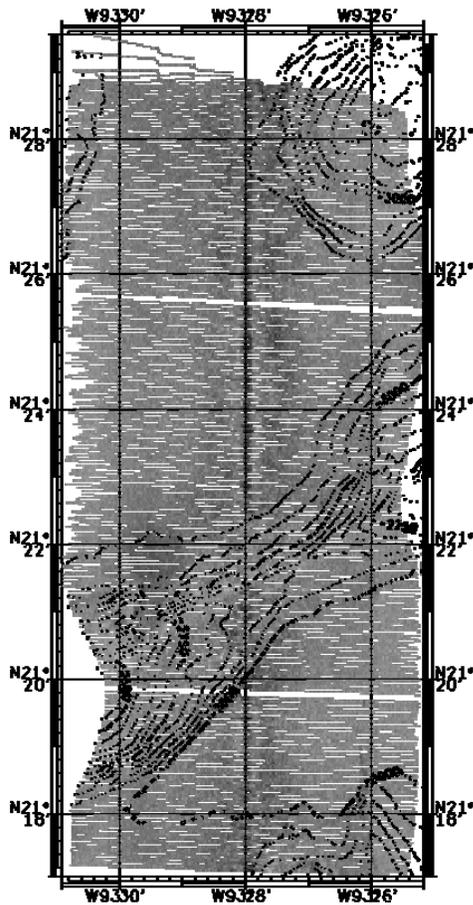


Figura 3.23. Posición de los valores de backscatter en la imagen acústica.



*Figura 3.24. Imagen acústica preliminar para un segmento del survey SO174-2\_20.*

Al generar el mosaico quedarán varias celdas sin valor entre cada *swath*, las cuales serán calculados por interpolación, teniendo en cuenta que el traslape es mayor del 50 %, el centro del haz quedaría dentro del área iluminada por un ping y el siguiente (Figura 3.25). Para definir el tamaño de la celda de interpolación se tomaron en cuenta los mismos parámetros que se utilizaron para definir el tamaño del píxel. Para calcular los valores faltantes en el mosaico, se determinó un tamaño de celda de 4x4 píxeles.

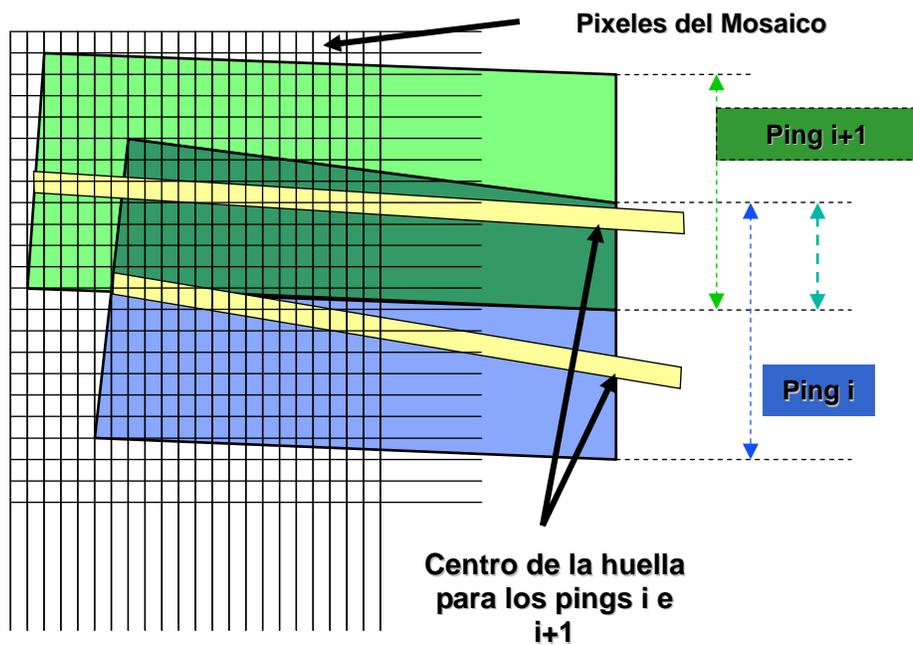


Figura 3.25. Traslape de áreas iluminadas.

El proceso de interpolación se realizó con el módulo *Efiltr*. De este módulo se eligió el método de interpolación de promedio lineal únicamente para los píxeles vacíos. Este método centra el área de búsqueda definida en el píxel vacío y le asigna el valor del promedio lineal de los píxeles con información dentro de la misma (e.g. Figura 3.26).

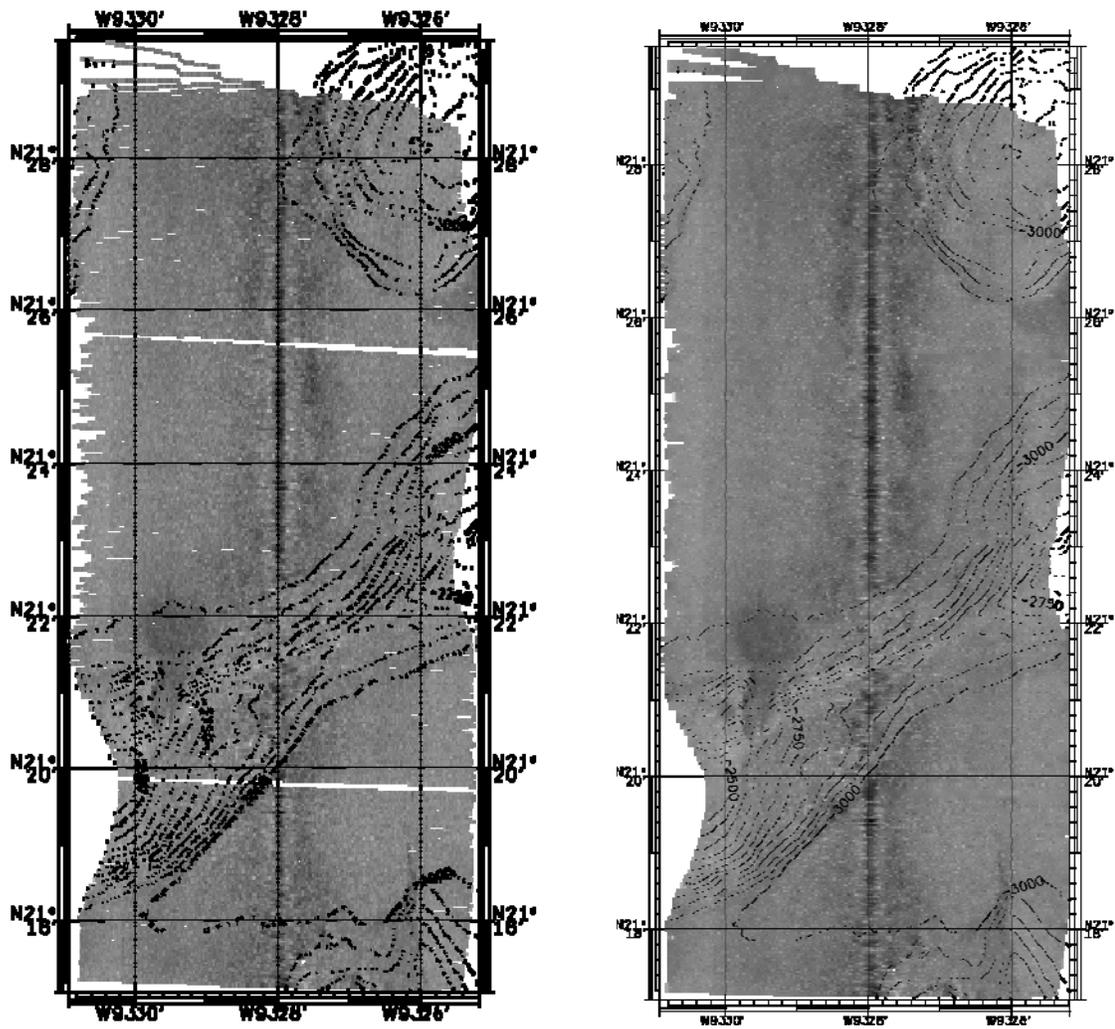
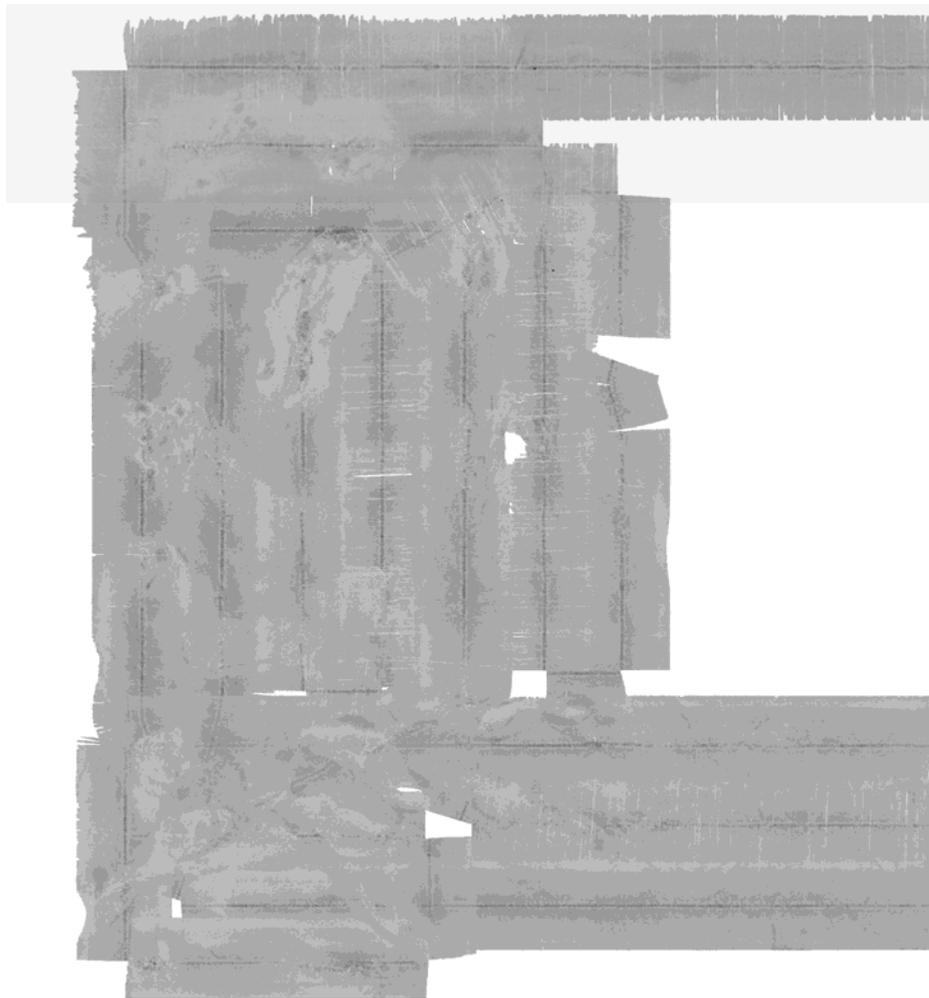


Figura 3.26. Interpolación de la imagen acústica.

### 3.3.2. Compilación del Mosaico Final

Se compilaron las imágenes para cada una de los segmentos en un solo mosaico. Previo a la compilación del mosaico se requirió transformar la escala de valores de los datos de *backscatter* a valores de contraste de intensidad para las imágenes. Esta conversión se realizó con el módulo *dB2Gr* y consiste en cambiar la escala de decibeles (como se registra en la ecosonda) a un valor correspondiente de contraste en la escala de grises (0 – 255).

La compilación de las imágenes transformadas se realizó con el módulo *Ermomo*. Este modulo requiere un archivo de comando auxiliar que contenga: a) los nombres de archivo de los mosaicos a agrupar; b) el tipo de traslape entre ellos y c) la escala de contraste a emplear. Figura 3.27. muestra un ejemplo de esta compilación.

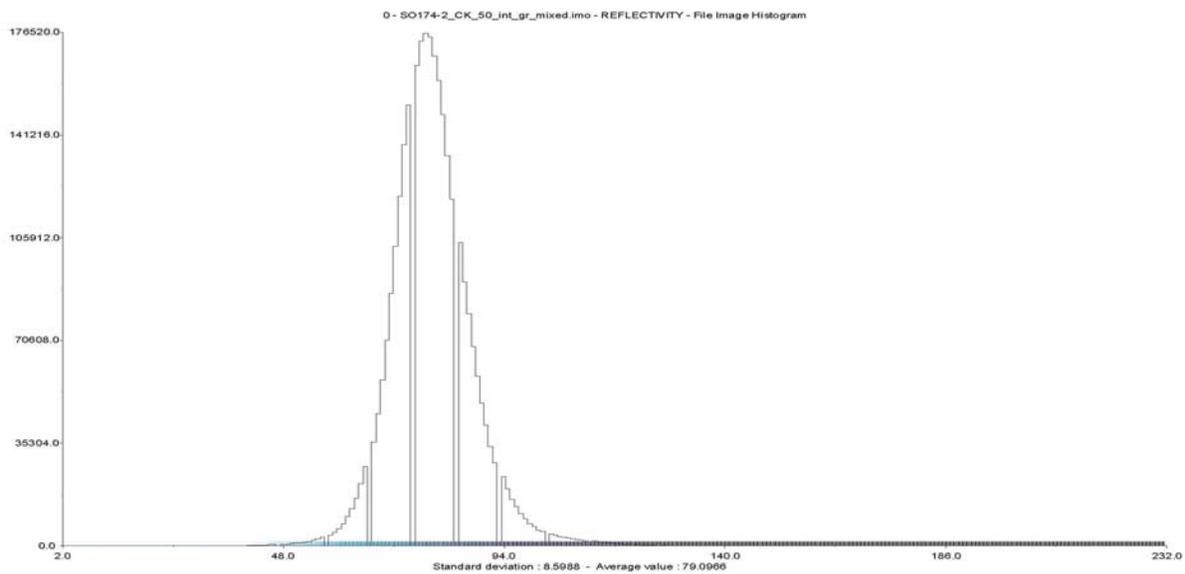


*Figura 3.27. Mosaico de imágenes acústicas.*

A estas imágenes se les podría aplicar un suavizado para minimizar el efecto del ruido de alta frecuencia usando un esquema de media móvil: el valor de la celda es reemplazado por el promedio lineal de los valores dentro de un entorno definido, 4x4 celdas. Se empleó el módulo *Efiltr* con la opción de filtrado para hacer el suavizado del mosaico, pero éste provoca pérdida de resolución en el mosaico.

También para mejorar la imagen acústica se llevo a cabo un realzado de imagen mediante una ecualización de contraste. La ecualización de contraste se realizó a través del módulo *Analim*, con base en el mosaico integrado. El histograma de contraste se obtiene de este mosaico y muestra el comportamiento de los valores de contraste en los datos de

*backscatter* para todo el mosaico. La Figura 3.28 muestra el histograma de la intensidad de backscatter en escala de grises para todo el mosaico. Se observa que presenta una distribución normal, alrededor de 79, en un intervalo aproximado de 50 a 110. La ecualización de contraste permite ajustar la escala de la paleta (en este caso de grises) en el intervalo donde se encuentran la mayoría de los datos, eligiendo de forma manual los límites (Figura 3.29).



*Figura 3.28. Histograma de contraste.*

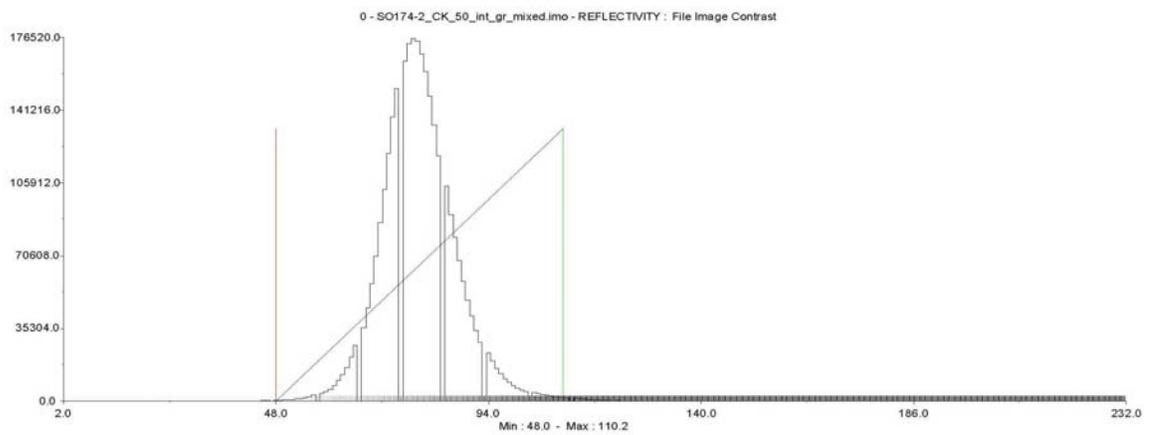
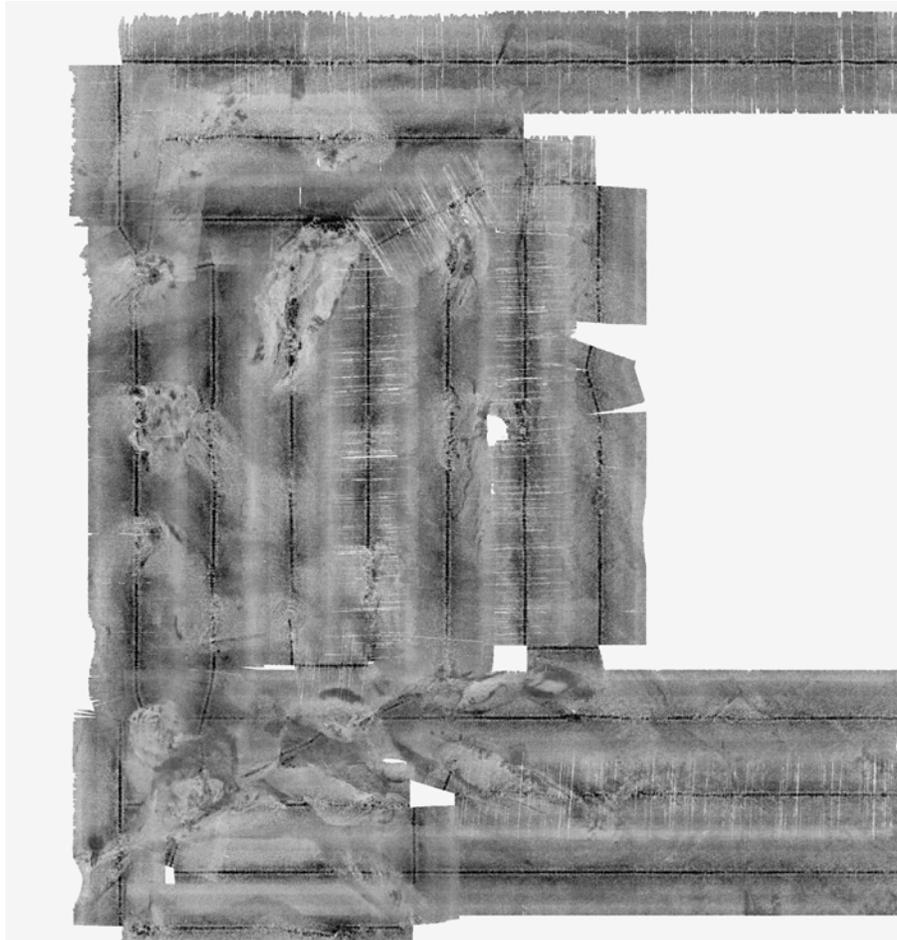


Figura 3.29. Ecuación de contraste.

## 4. RESULTADOS

Los datos de batimetría y *backscatter* registrados con la ecosonda multihaz EM120 durante la campaña SO174-2 en el sector norte de la provincia de los Domos de Campeche, fueron post-procesados para eliminar los efectos de errores sistemáticos, filtrar y obtener un modelo digital de terreno suavizado y un mosaico de imágenes de *backscatter*. Mediante la carta batimétrica de alta resolución y el mosaico de imágenes de *backscatter* del lecho marino se pudieron observar por vez primera características tanto morfológicas, como acústicas de esta región.

### 4.1 Carta Batimétrica

La carta batimétrica de alta resolución (200 m) obtenida del modelo digital de terreno (Figura 4.1.), cubre una superficie de aproximadamente 6,940 km<sup>2</sup>; de los cuales, ~6,000 km<sup>2</sup> (sección Oeste) corresponden a la parte profunda, entre 2,360 m a 3,600 m, de la provincia de los Domos de Campeche, y el resto (sección Este) corresponde parcialmente a lo que se conoce como la cuenca del Cañón de Campeche.

El relieve batimétrico presenta una pendiente general al NNO, hacia la Planicie de Sigsbee. El área menos profunda se encuentra en el sector SE de la carta, y el área de mayor profundidad se localiza en el sector NO de la misma. La morfología del área está dominada por estructuras dómicas aisladas, cordilleras formadas por la sucesión de domos y valles que se forman entre éstas estructuras salinas; lo cual es similar a la morfología que se observa en el talud continental de Texas y Louisiana en el norte del Golfo de México. En la esquina NO del área se observa una cuenca de forma elíptica, flanqueada hacia el S y SE por los domos 1, 2, 3 y 4 (Figura 4.2) y cuyo límite NE no fue cubierto por el levantamiento. En el sector NE (92°05' W, 22°06' N) se observa la desembocadura de una canal que se origina en el SE del área y fluye hasta la planicie en una dirección aproximadamente S-N (Figura 4.2). En el sector NE (recuadro en la Figura 4.2) se observan estructuras lineales, similares a *ripples* o plegamientos. En la Figura 4.2 (área delimitada en azul en la esquina SE) muestra una planicie en el sector SE del área, cuya frontera Oeste y Noreste la conforman el límite sur de las cordilleras salinas (16, 22, 21, 24, y 25).



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

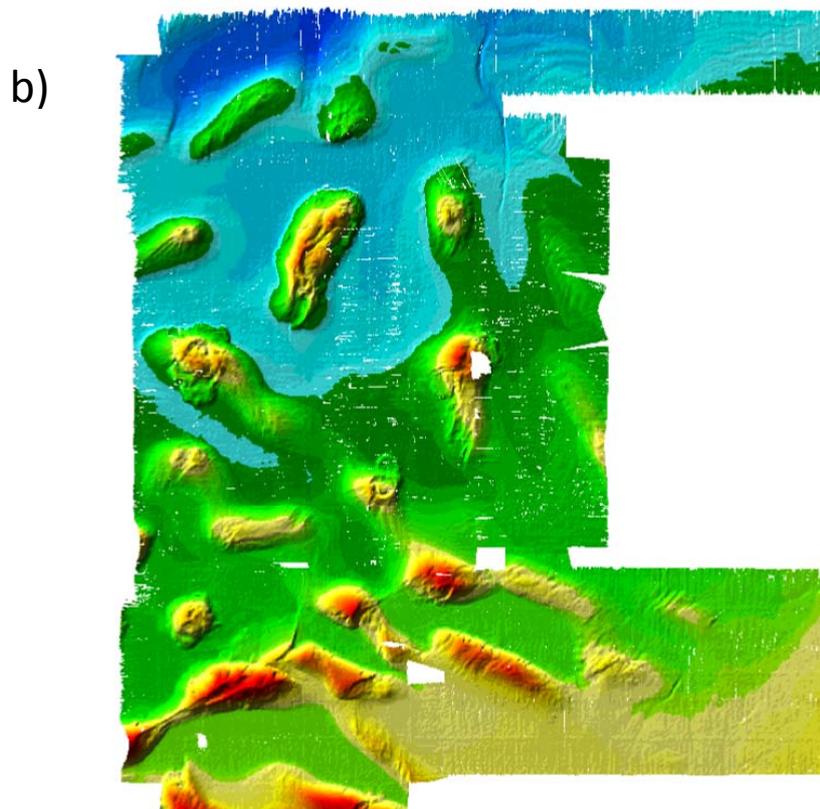
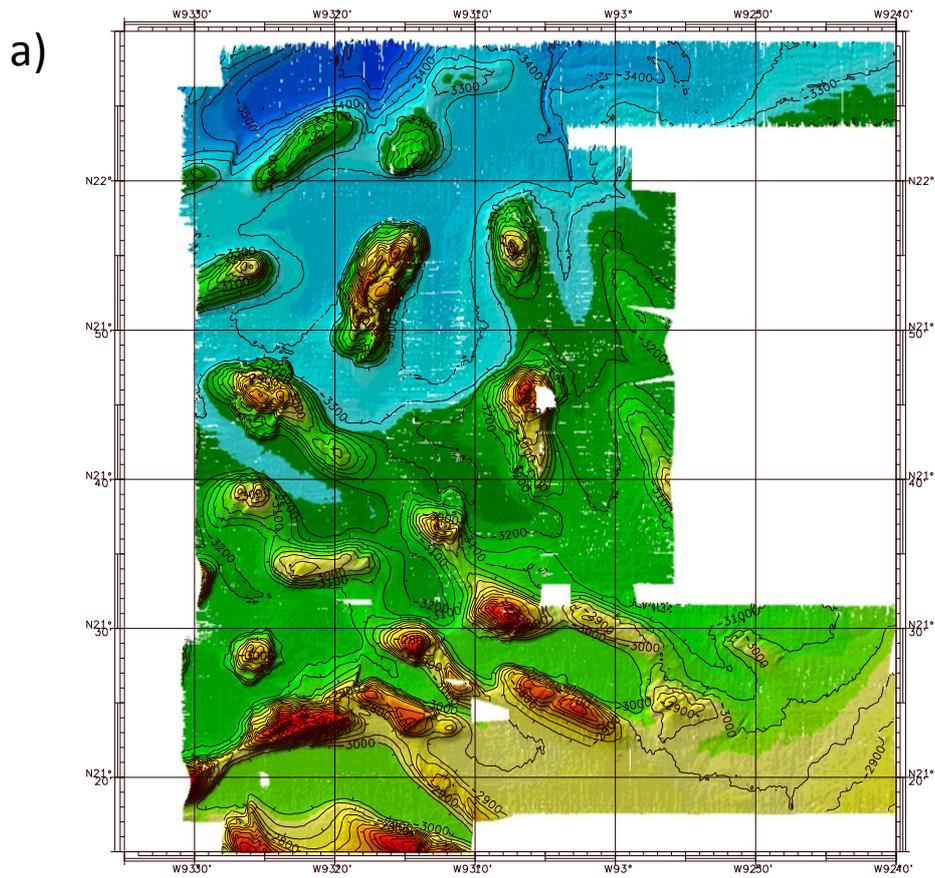
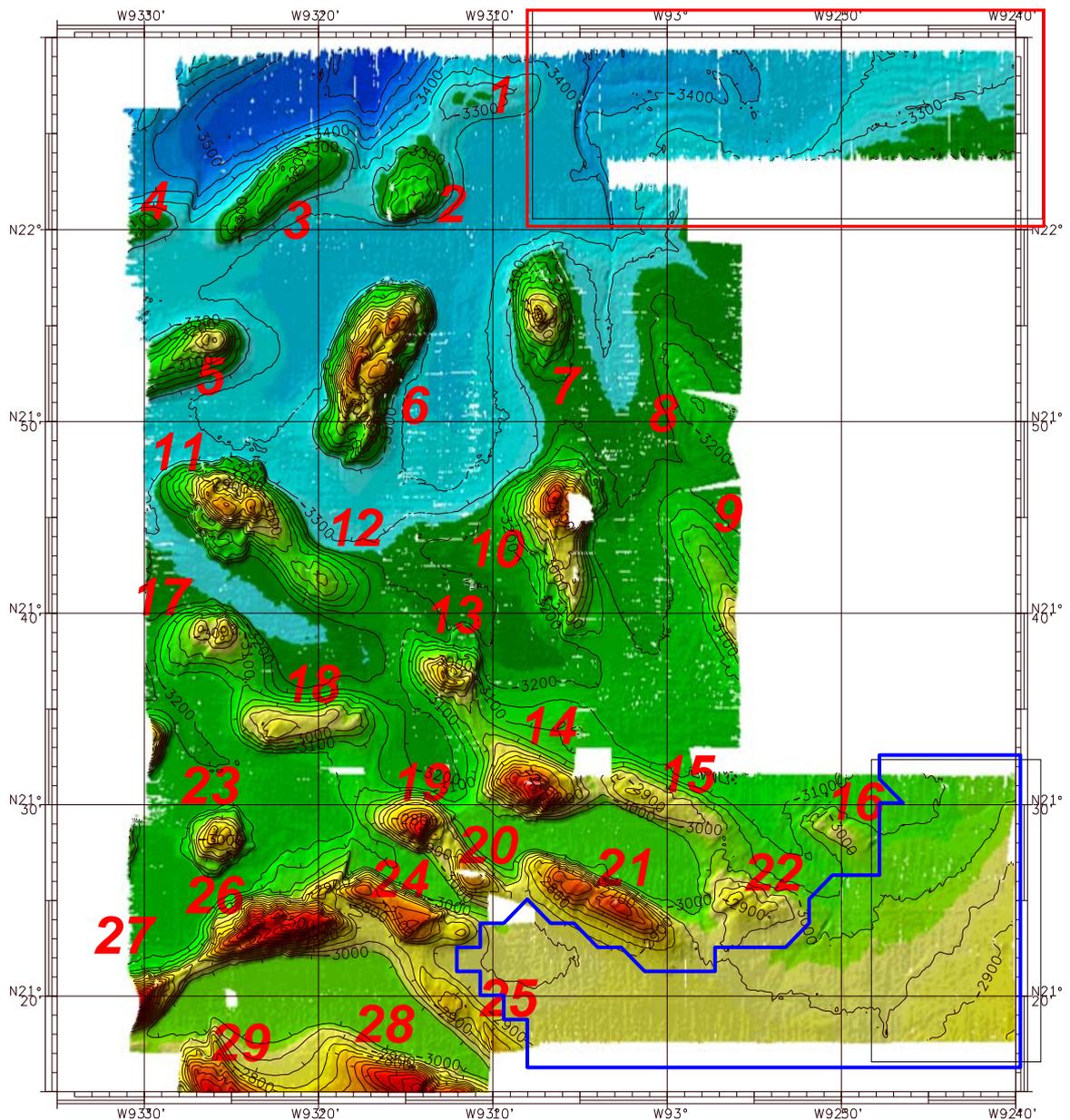


Figura 4.1. Carta batimétrica de alta resolución: a) carta batimétrica con curvas de nivel; b) relieve batimétrico;

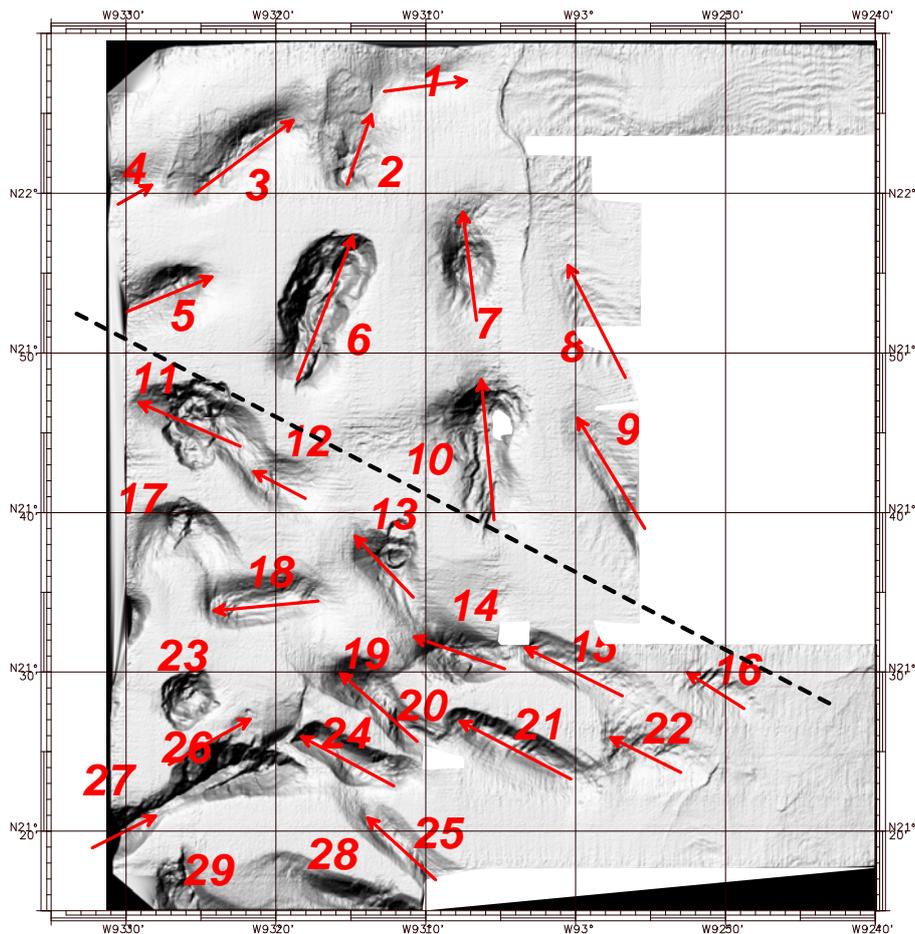


*Figura 4.2. Estructuras mayores del relieve batimétrico. Se muestran los domos numerados, el valle al Sureste y la zona de slump y ripples en el sector Noreste.*

Los domos y las cordilleras tienen una elevación que varía entre 50 m y 800 m sobre el lecho marino de los valles que los rodean. En el sector SO son más comunes las cordilleras de domos sucesivos, mientras que en el sector NO los domos aislados (e.g. domos 5, 6, 7 y 10) son más frecuentes. La mayoría de los domos presentan una forma alargada o elíptica, con una longitud promedio de 14 km y 7 km del eje mayor y eje menor, respectivamente.

La orientación del eje mayor de las estructuras alargadas no es uniforme en toda el área. En el sector norte (Figura 4.3; al norte de la línea punteada) las orientaciones del eje mayor convergen hacia la posición del domo 1. Hacia el Oeste de la longitud 93°10'

W estas orientaciones apuntan hacia el NE (domos 2 al 6), mientras que al Este de la misma presentan una tendencia hacia el NO (domos 7 al 10). En el sector Sur, (al sur de la línea punteada, a partir del domo 11), la orientación del eje mayor de los domos presenta una tendencia al NO (domos 11 al 16, 19 al 22, 24 y 25). Es de notarse que la orientación del eje mayor de los domos 26 y 27 es al NE, discordante con el resto de las estructuras en el área sur.



*Figura 4.3. Orientación de las estructuras dómicas. Se distinguen dos agrupaciones de orientación, Sur y Norte de la línea punteada.*

Existe una conexión batimétrica entre las crestas de los domos sucesivos de las cordilleras a través de collados, los cuales sobresalen del nivel del valle adyacente pero su altura no es comparable con aquella de los domos. Con base en esta conexión entre las estructuras se distinguen 4 cordilleras (Figura 4.4): (i) Cordillera Noroeste, formada por los domos 1, 2, 3 y 4; (ii) Cordilleras Centrales, formadas por los domos 11, 12, 13, 14, 15 y 22 (Superior), y 17, 18, 19, 20 y 21 (Inferior), que se extienden en dirección NO-SE aproximadamente paralelas; y (iii) Cordillera Suroeste, formada por los domos 24, 25, 26 y 27, de forma arqueada hacia el sur.

El alineamiento de las dos cordilleras centrales (Figura 4.4), entre 303° (Superior) y 300° (Inferior), es concordante con la dirección promedio de la orientación (300°) de los domos alargados que las conforman. Los domos 14, 22, 19 y 20 se encuentran desplazados hacia el SO respecto al alineamiento principal (líneas rojas). Los domos 17 y 18, pertenecientes a la cordillera Inferior, tienen orientaciones E-O en discordancia con el alineamiento principal de las cordilleras.

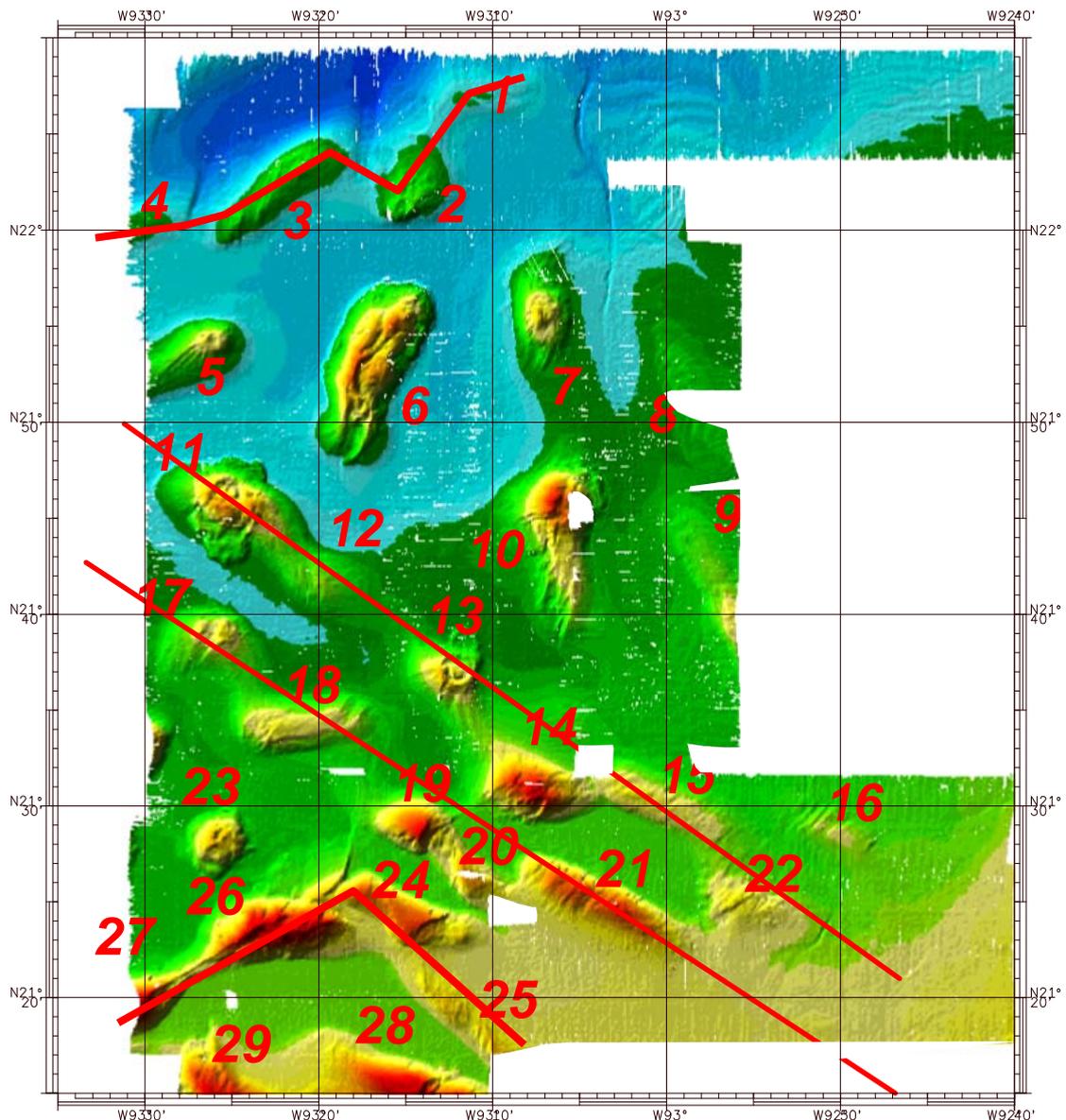
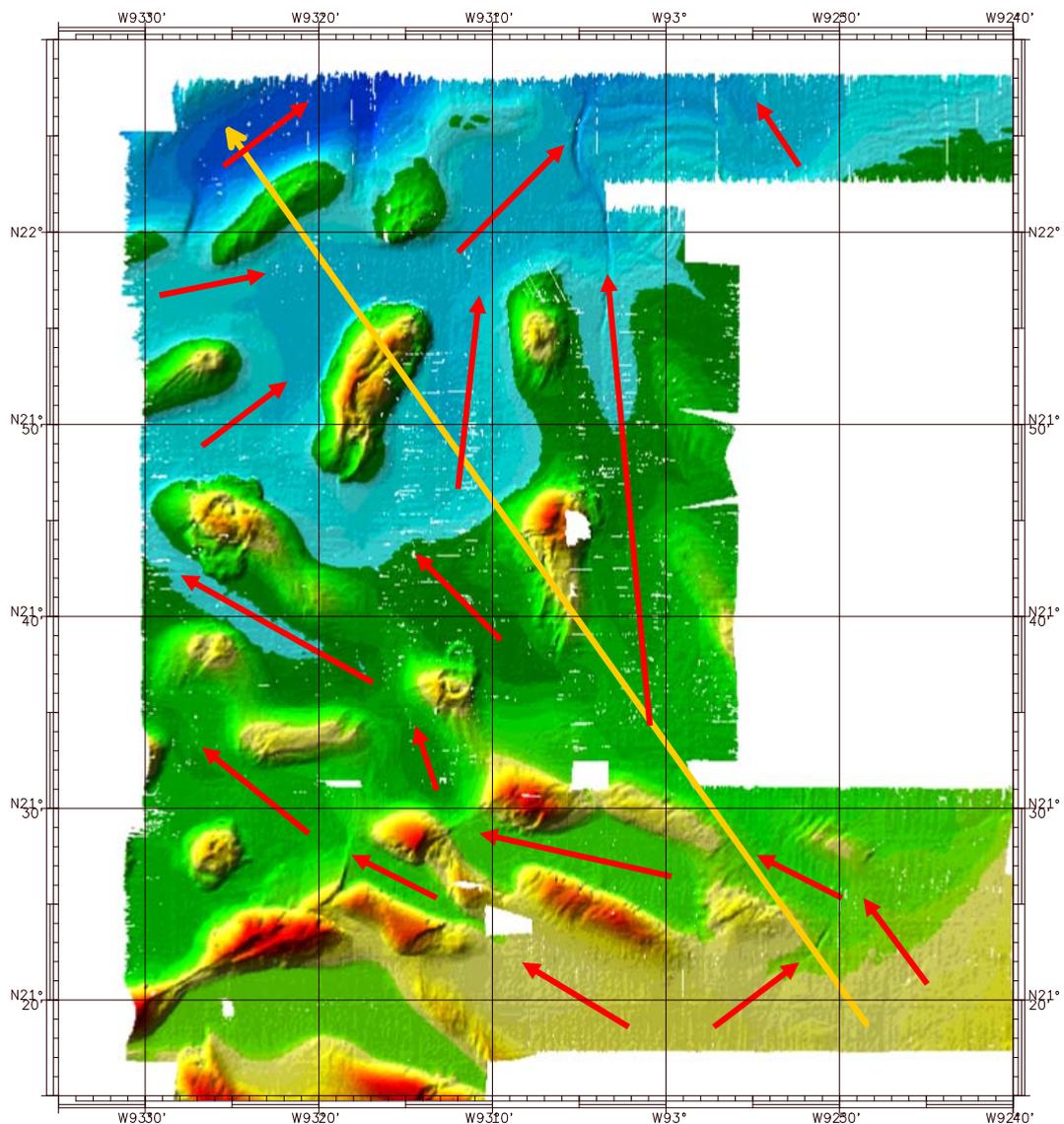


Figura 4.4. Cordilleras de domos sucesivos

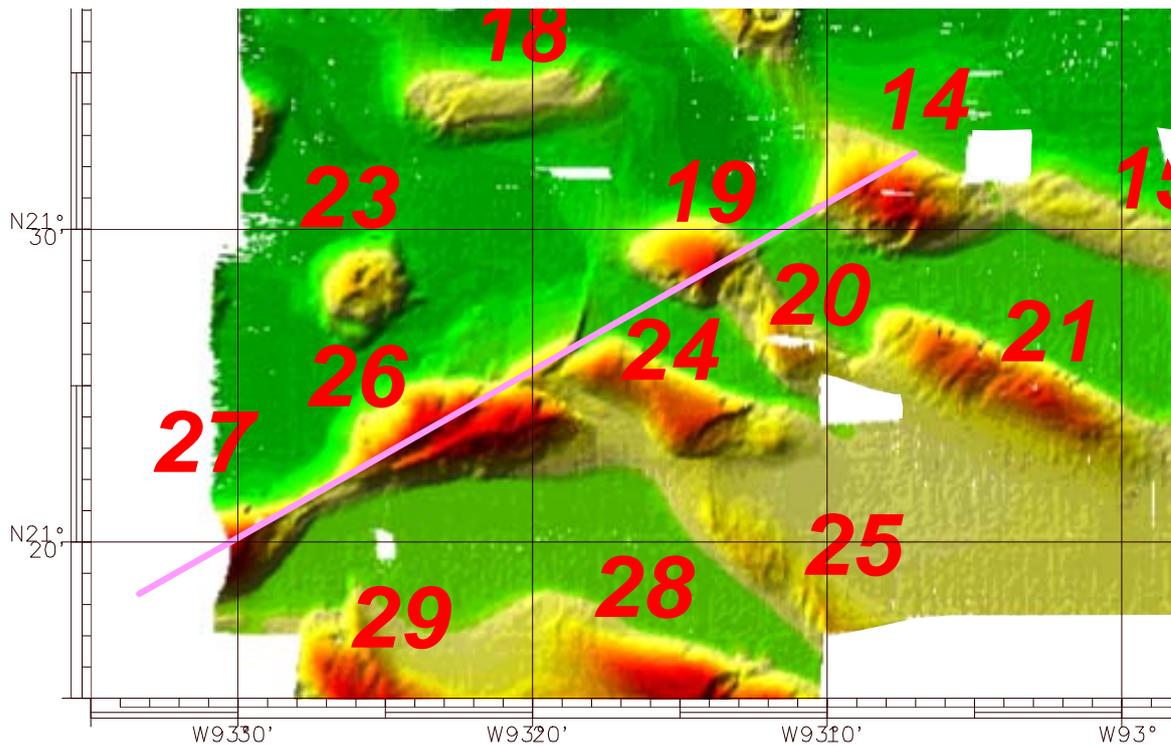
En el sector Norte, donde la densidad de domos es menor y dominan las estructuras aisladas, los valles son más amplias. Por el contrario, los valles son más estrechos en el sector Sur, donde la morfología está dominada por las cordilleras de domos sucesivos. La pendiente de los valles en el sector Sur es hacia el NO, mientras que en el sector

Norte (Figura 4.5, norte de la línea punteada) la pendiente es cambiante, de N a NE, resultado de la presencia de la cordillera noroeste. El valle formado entre las cordilleras Centrales es alargado, tiene una pendiente general hacia la misma dirección de las cordilleras que lo enmarcan y se divide en tres sub-valles que se encuentran limitados por varios saltos batimétricos: entre los domos 13 y 18, entre los domos 14 y 19, y entre los domos 20, 21 y 22. Rodeado por los domos 19, 20 y 24, se forma otro valle limitado por dos saltos batimétricos entre el domo 24 y los domos 19 y 29, pertenecientes a la cordillera Central Inferior. El valle aislado, limitado al Norte por la cordillera Suroeste y al Sur por los domos 28 y 29, presenta un escalón batimétrico respecto de la planicie hacia el Este del domo 25.



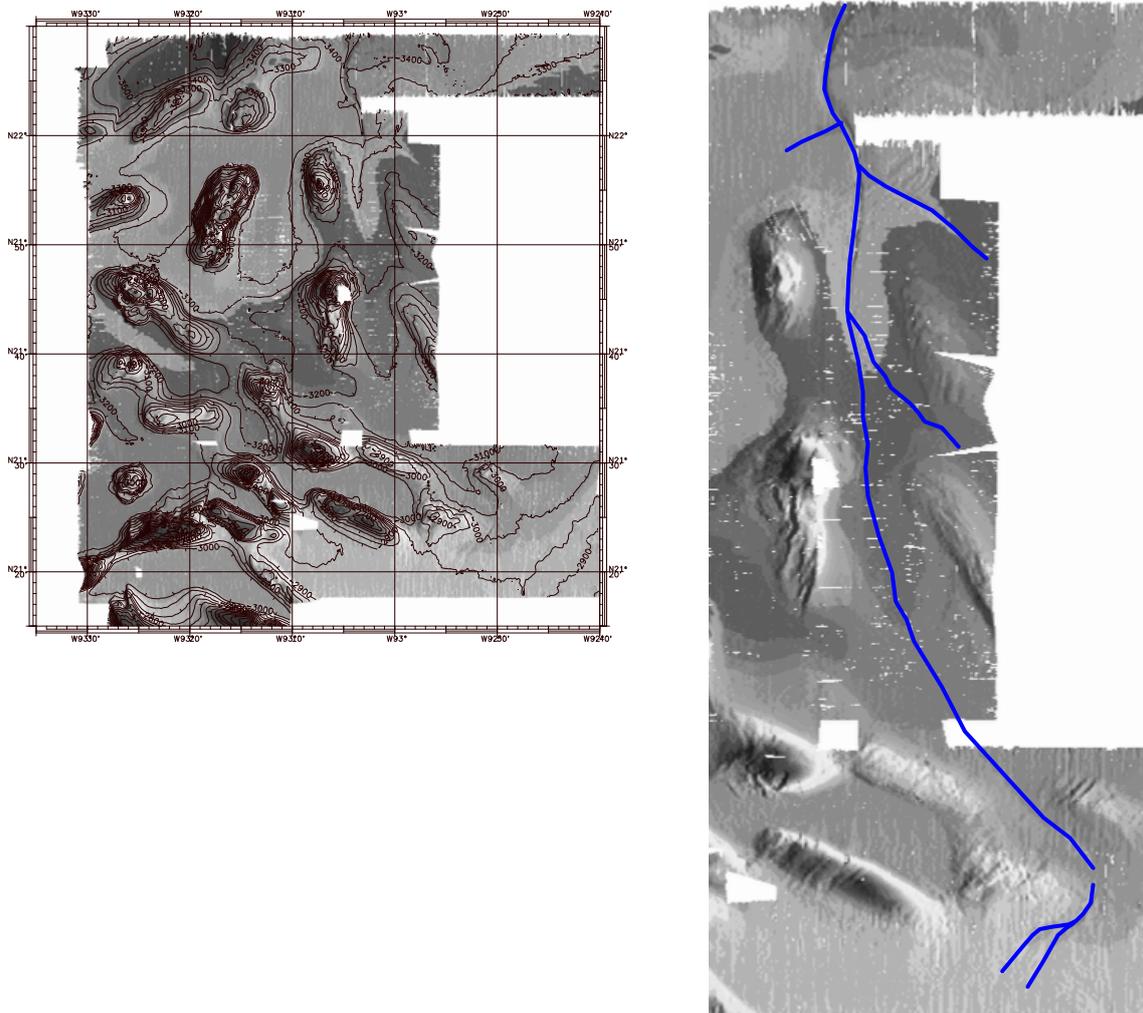
*Figura 4.5. Pendiente en la región Norte de los Domos de Campeche. Se muestra la pendiente general (amarillo) y la de los valles interdómicos (rojo)*

La Figura 4.6 muestra una alineación con rumbo  $60^\circ$ , marcada por un escalón batimétrico, dada por el alineamiento de los ejes mayores de los domos 26 y 27, y los saltos batimétricos que descienden al NO ubicados al norte del cañón entre los domos 24 y 26, y del valle entre los domos 14 y 19. Este lineamiento es discontinuo ya que se observa un cambio de dirección hacia  $15^\circ$  a partir del norte del domo 24, extendiéndose  $\sim 12$  km. Además, se observa que hacia el NE del domo 14 se termina el alineamiento.



*Figura 4.6. Lineamiento con rumbo de  $60^\circ$*

La Figura 4.7 muestra un canal, producto de un torrente submarino que fluye ( 2950 m a 3450 m en profundidad) con una dirección aproximada S-N, cortando el valle entre los domos 8, 9, 7 y 10 y cuya expresión morfológica es mas clara hacia el Norte de  $21^\circ 52' N$ ; Así mismo, se observa un ramal de este canal ubicado al norte del domo 8, que fluye con dirección NO y de las curvas de nivel se infiere un segundo ramal que corta entre los domos 8 y 9. En el sector sur, al SE del domo 22, se presenta otro canal con dirección NE; este canal tiene dos ramales hacia el SO (Figura 4.7).



*Figura 4.7. Canal. El canal fluye de Norte a Sur, hasta desembocar en la planicie de Sigsbee*

En la Figura 4.8 se señalan en los domos 10, 11 y 13 extensiones que sobresalen de sus flancos, así mismo, la cima de estos domos tiene la apariencia de cráter. Estas extensiones forman mesetas en forma de abanico o semicirculares que presentan una pendiente mas suave, siendo las mas extensas aquellas de los domos 11 y 13. En el domo 11 se observan 3 extensiones con forma de abanico, una sobre el flanco Norte y dos sobre el flanco Sur, las cuales se extienden en dirección casi ortogonal al eje de la estructura. De los abanicos en el flanco S, el de mayor altura mide 3.3 x 1.5 km y el de menor altura mide 3.7 x 3.4 km; el abanico en el flanco N del domo 11, se extiende 4.8 x 1.3 km. El domo 13 presenta un abanico en su flanco NE que se extiende en una área de 3.6 x 2.6 km y presenta una depresión en su parte central, teniendo en su borde NE una apariencia de arco. La morfología del domo 6 es la más compleja del área de estudio, observándose una cañada que cruza casi la totalidad de la estructura en la dirección del eje mayor.

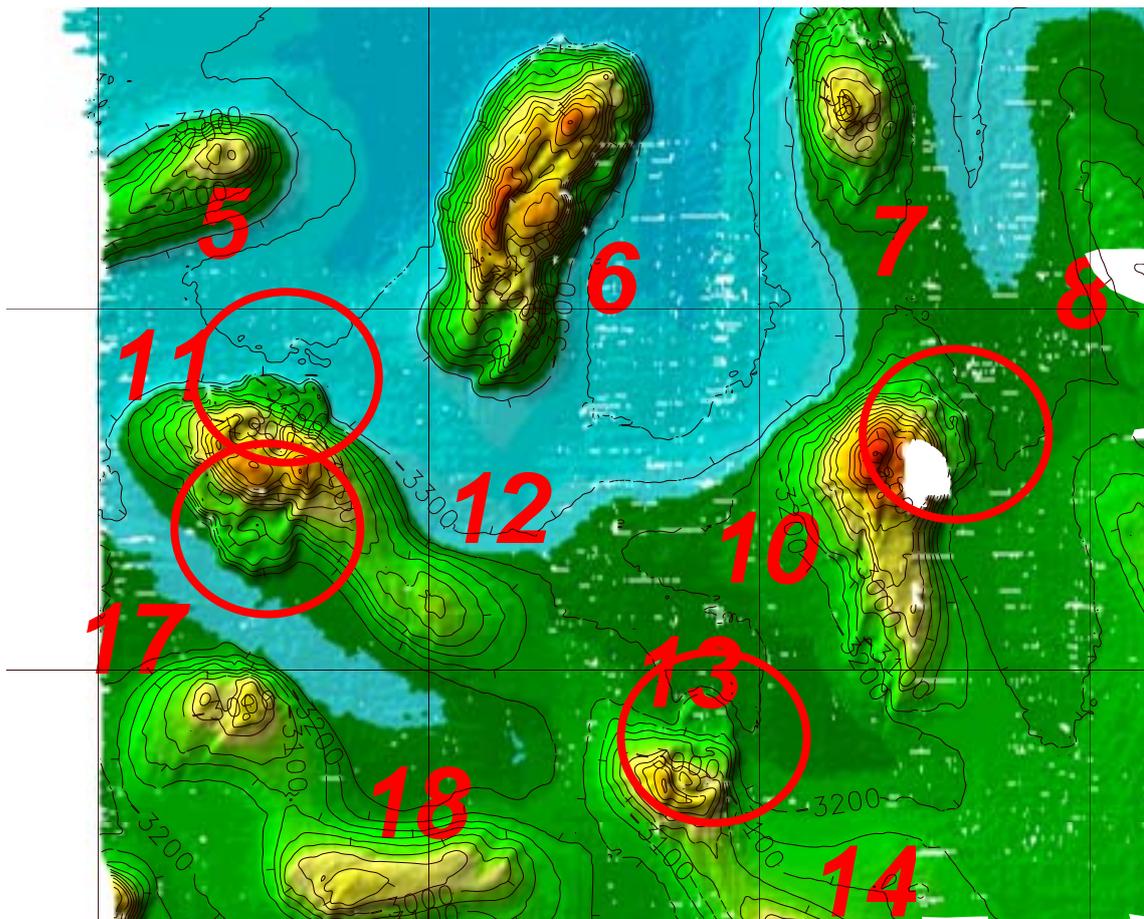


Figura 4.8. Mesetas de los domos 11 (a) y 13 (b)

## 4.2 Mosaico de Imágenes de Backscatter

La Figura 4.9 muestra el mosaico de imágenes de *backscatter* del lecho marino como resultado del procesamiento hecho para esta tesis, cubre la misma superficie que la carta batimétrica (Figura 4.1) con la misma resolución espacial de 200 m (considerando que se requiere de por lo menos 4 píxeles para definir una estructura). Los valores de backscatter registrados por la ecosonda se encuentran entre 50 dB y -64 dB; mostrados en el histograma de contraste en la Figura 3.29. El histograma muestra que estos valores tienen una distribución normal alrededor de -25 dB, agrupándose la mayoría en el intervalo [-40 dB, -5 dB].

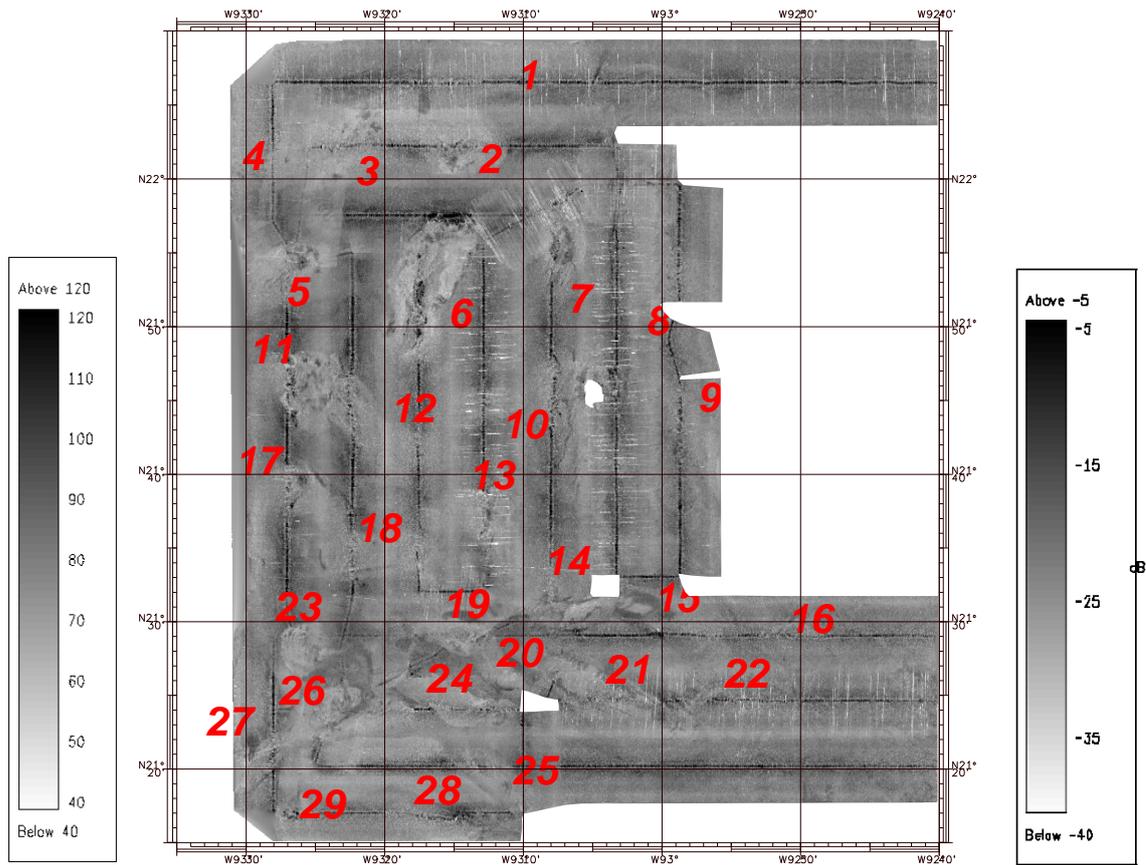


Figura 4.9. Mosaico de Imágenes de Backscatter, mostrando las dos escalas, tanto en dB (derecha), como Gr (izquierda).

A lo largo de todo el mosaico se registran alineaciones de zonas de muy alta intensidad de backscatter ( $> -5$  dB), que cubren 0.5 km en la región central del *swath* (nadir) (Figura 4.10.a y 4.10.c). Estas alineaciones se aprecian de manera mas clara en las regiones de pendiente muy suave en los sectores SE y NE del área de estudio y en los valles formados entre las estructuras dómicas; esta zona de alta intensidad se vuelve muy tenue hasta desaparecer sobre la mayoría de los domos.

En las regiones de los valles entre los domos y planicies de muy baja pendiente se observa que en general los valores de backscatter disminuyen en función de la distancia del nadir; así mismo, en el sector SE se observan bandas paralelas a la derrota que muestran saltos en el nivel de *backscatter* (Figura 4.10.a y 4.10.c). En la región del traslape, entre los *swaths* de los distintos segmentos que conforman el mosaico, los valores de *backscatter* son generalmente mas bajos (Figura 4.10.c), lo que se muestra como una zona mas clara entre los alineamientos que definen la región del nadir y produciendo una textura producto de la orientación de los barridos.

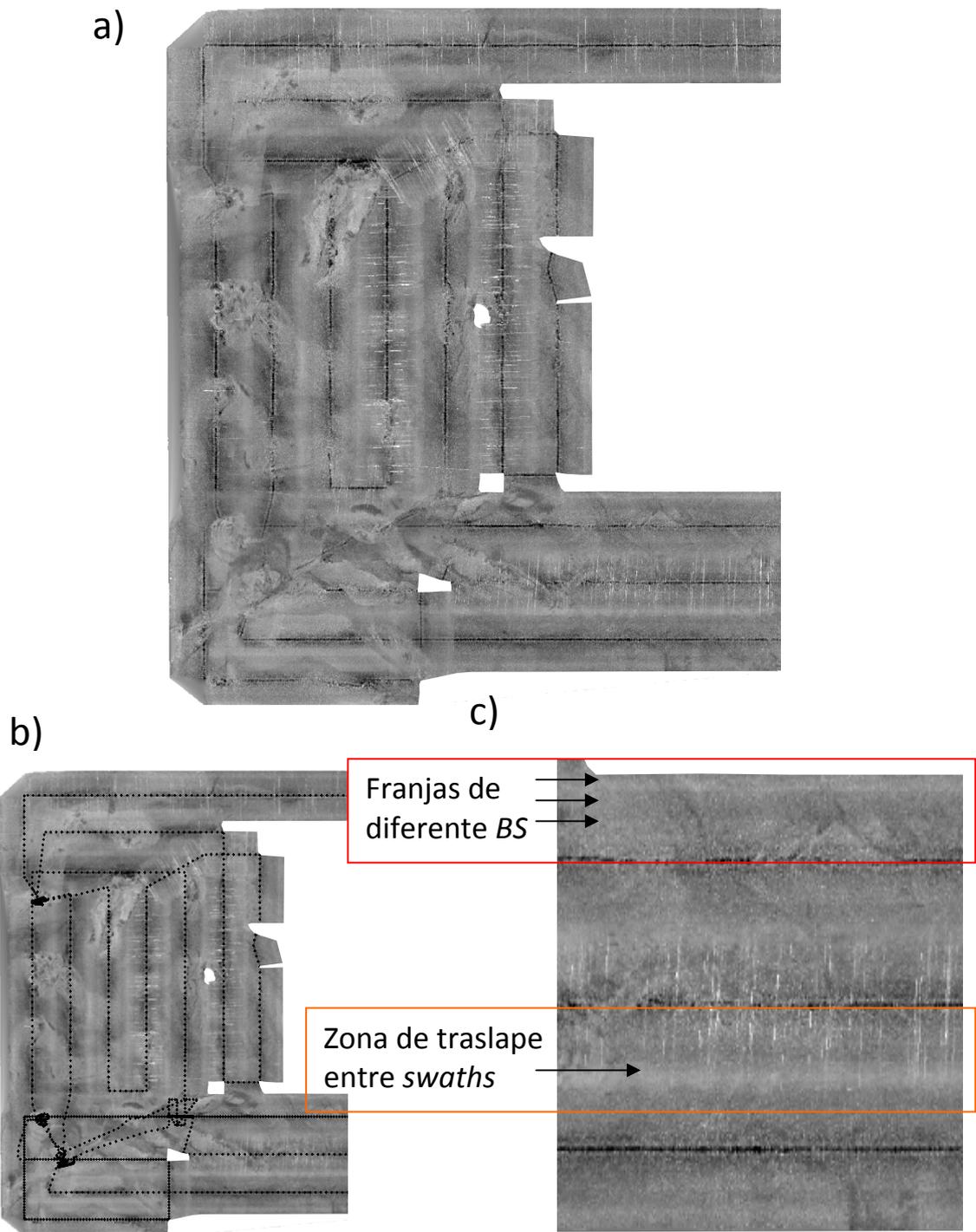


Figura 4.10. Artefactos en la imagen acústica. a) Imagen acústica; b) Derrota (línea punteada) sobre la imagen acústica; y c) Ejemplo del Sector SE del área, mostrando las franjas de bajo BS y área de traslape entre swaths.

Los valores de *BS* son por lo general más bajos sobre los domos; sin embargo, no en todos los casos se revela la morfología del domo de la imagen acústica (e.g. Figura 4.11). En la Figura 4.12. – color azul - se observa que algunos domos presentan zonas de alto *BS* en su cima (e.g. domos: 5, 6, 7, 10, 11, 13, 15, 17); aunque la mayoría de la zonas de alto *BS* se observan en los flancos de los domos (Figura 4.12. morado). Estas zonas de alto *BS* comienzan desde donde se levanta la estructura sobre el valle. La imagen en la Figura 4.12 (color azul) muestra que los domos 5, 6, 7 y 10, tiene zonas alargadas de alto backscatter, aproximadamente lineales, que corresponden a filos o cañadas que descienden de la cima de la estructura.

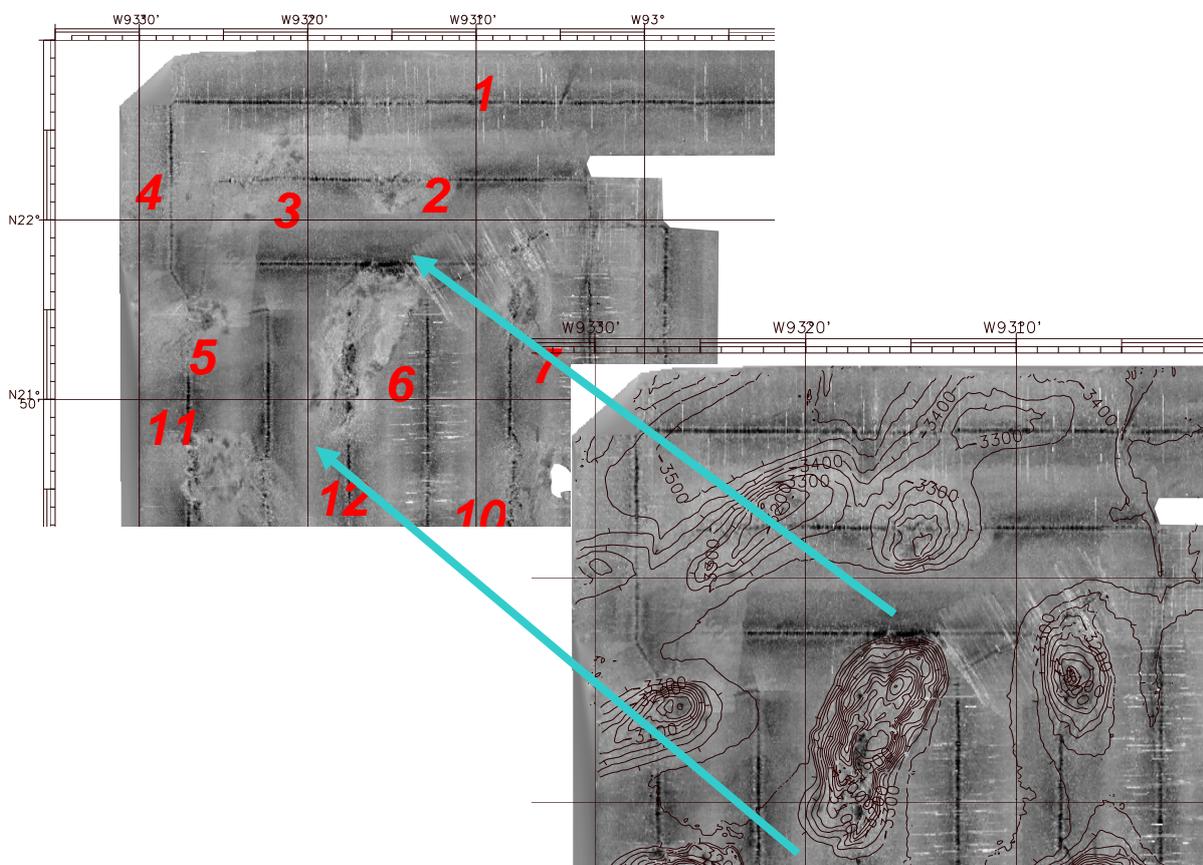


Figura 4.11. Ejemplo de la imagen acústica que revela la morfología (sector NO)

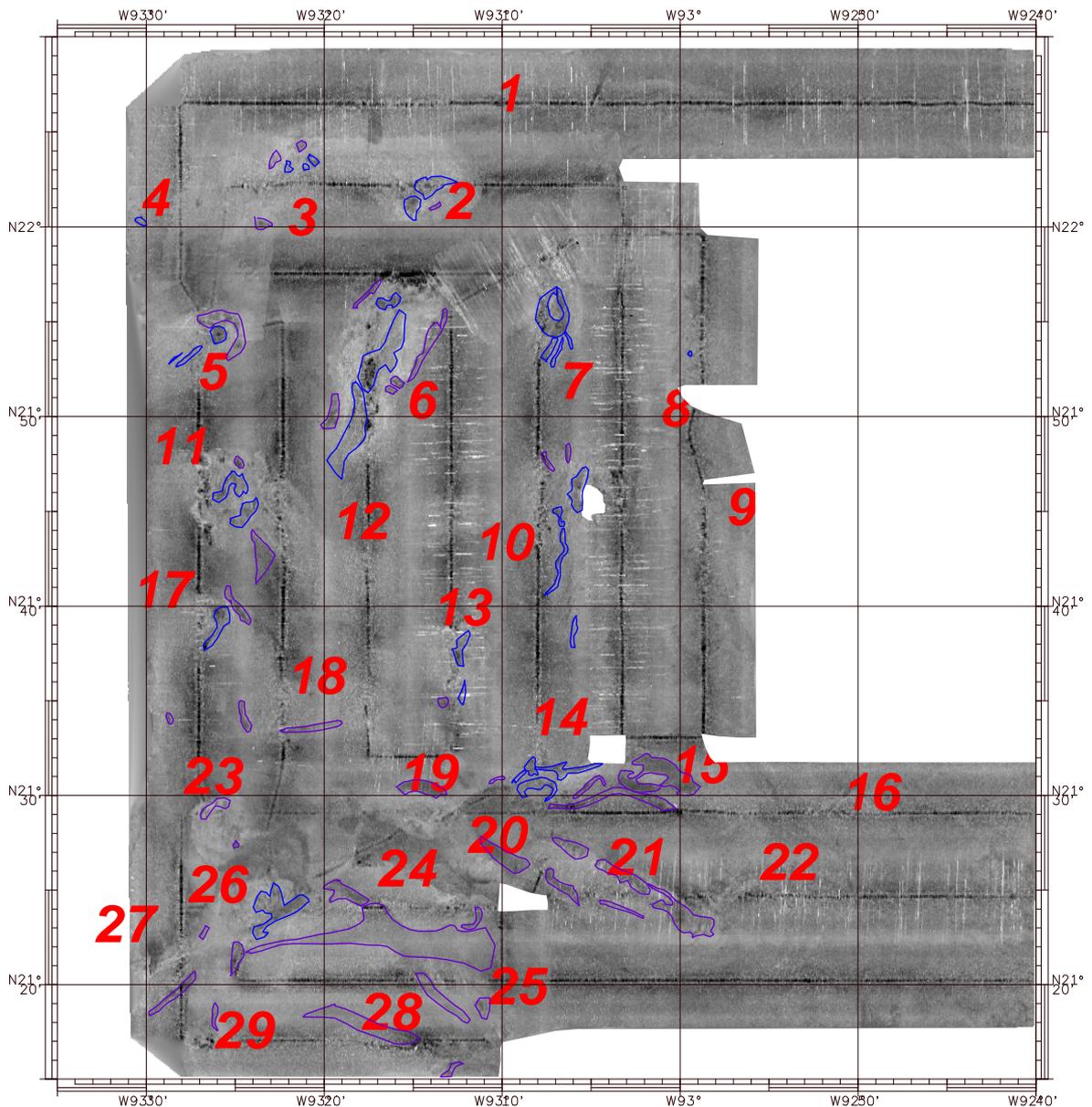


Figura 4.12. Zonas de alto BS de cimas (azul) y flancos (morado).

La Figura 4.13 muestra zonas de alto *backscatter* que no se asocian a la presencia de domos. Estas zonas son generalmente de menor dimensión y tienen una forma irregular. Algunas de estas zonas se encuentran asociadas al relieve batimétrico, como son: (a) en el sector NO, a las cañadas formadas por los domos 2 y 3, y 3 y 4, que bajan hacia la depresión; (b) al NO del domo 26, la desembocadura hacia el valle que se forma entre los domos 25 y 26, observándose una zona de alto *backscatter* en forma de pluma o abanico, que se extiende 6 km hacia el NO y 10 km en dirección NE y en el flanco NO de los domos 26 y 27 se observan dos zonas, respectivamente, que se extienden desde la cima hasta la base del domo y hasta 2 km en forma de abanico sobre el valle (Figura

4.13. áreas encerradas en negro). Adicionalmente, se registran zonas de alto *backscatter* que se encuentran en valles o zonas sin relieve batimétrico notable (Figura 4.14): (i) en el valle entre los domos 14, 15, 20, 21 y 22; (ii) en la planicie al Sur del domo 21; (iii) en el sector SE del área de estudio (Cañón de Campeche) y al Norte del domo 16; y en el sector NE.

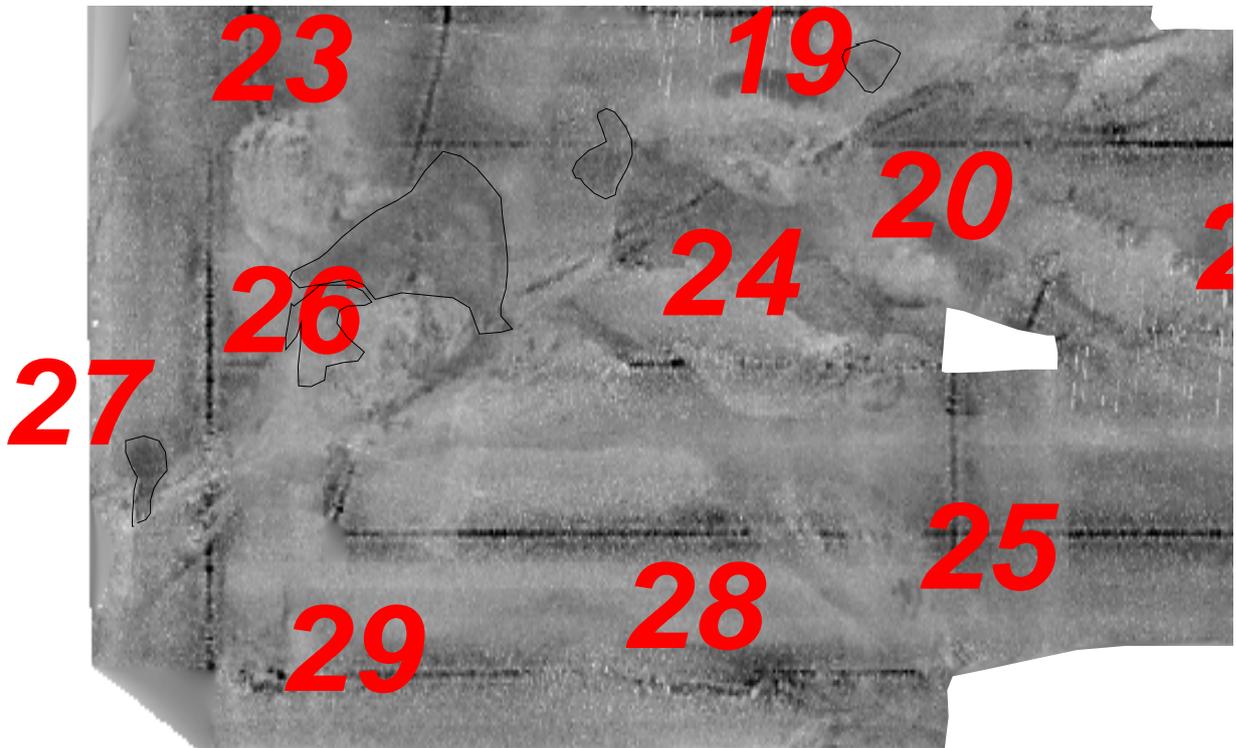


Figura 4.13. Ejemplos de zonas de alto BS asociadas a posibles aludes

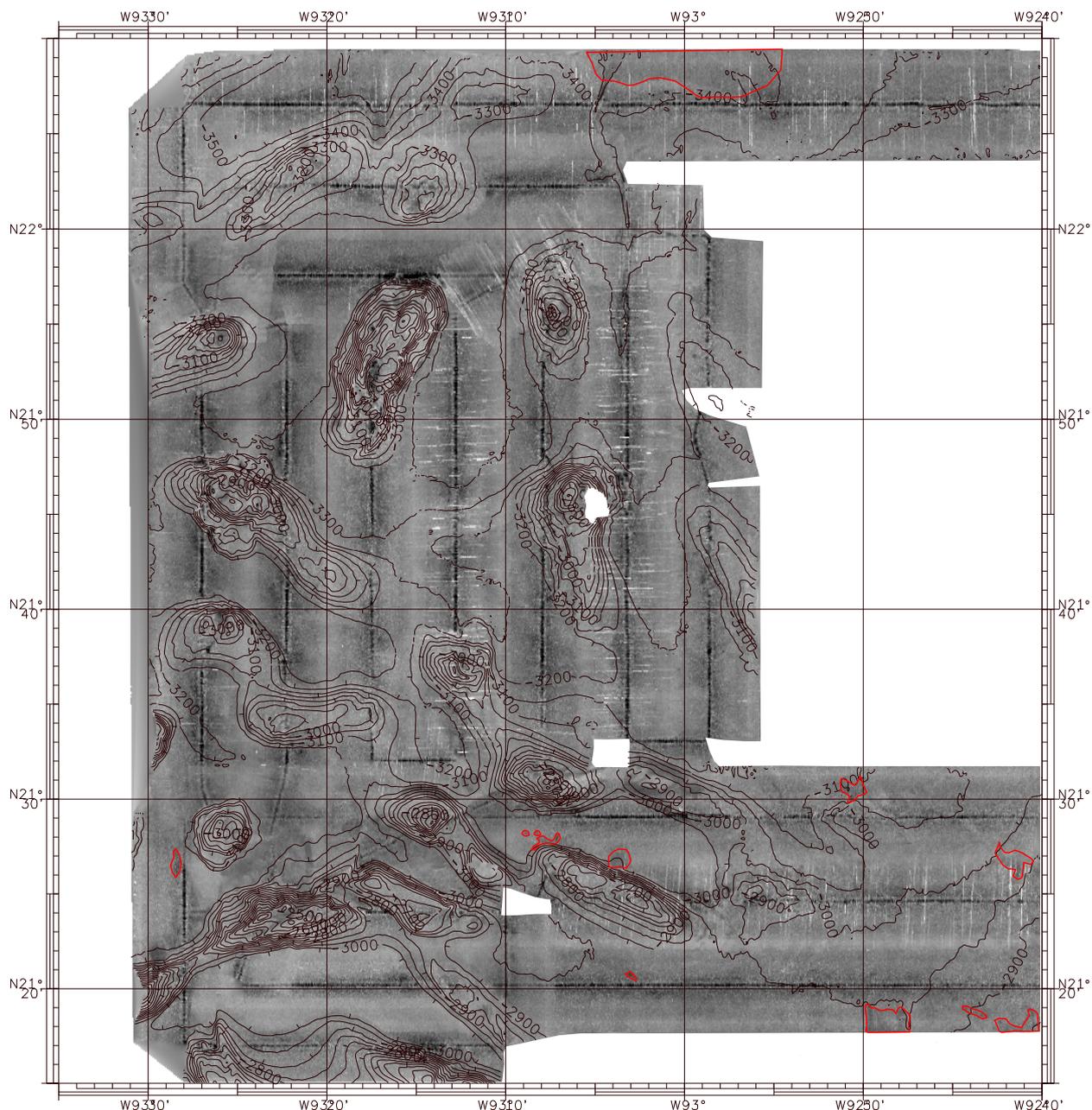
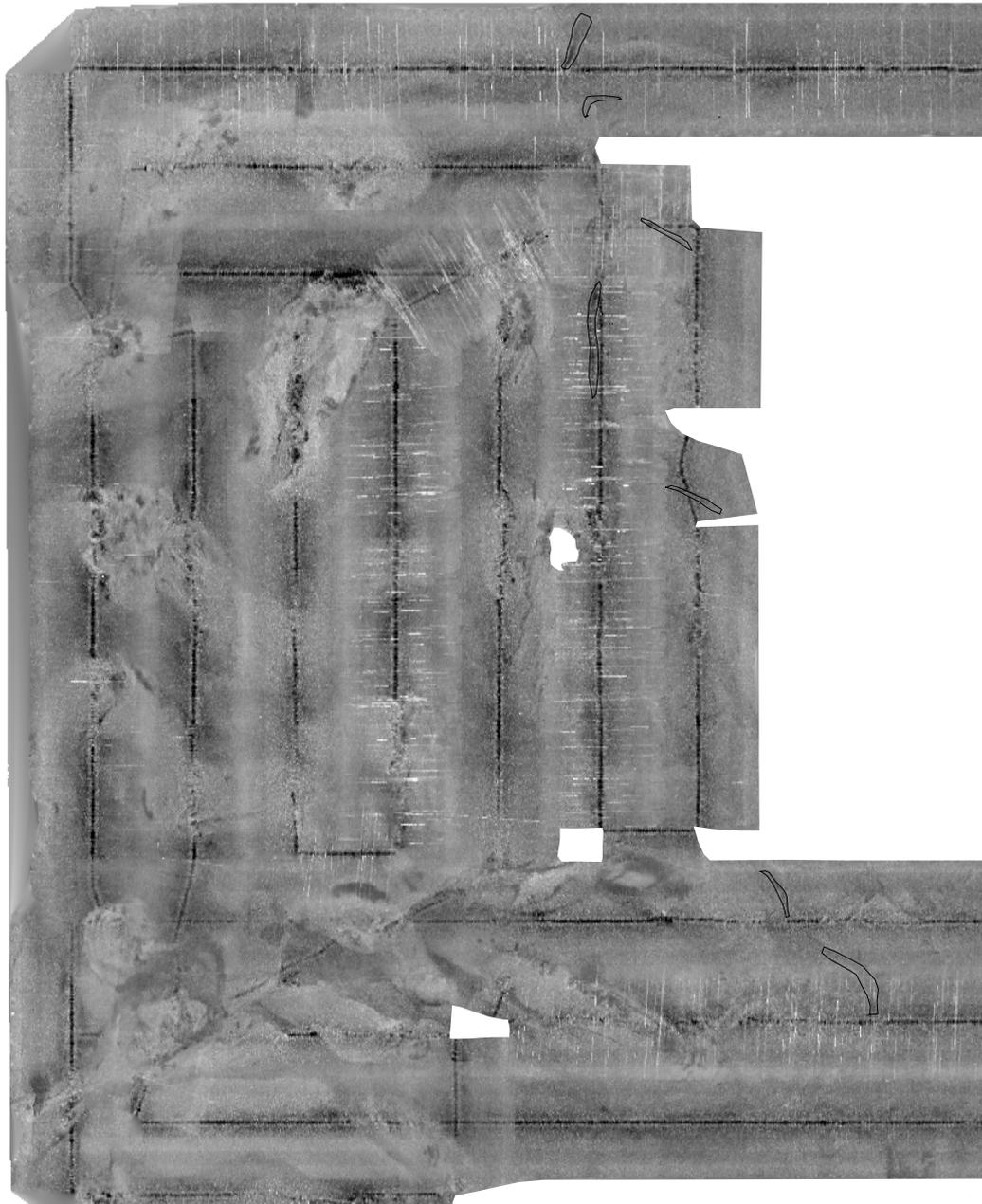


Figura 4.14. Zonas de alto backscatter en valles, o planicies

En la Figura 4.15, se observa zonas de valores altos de *backscatter* que concuerdan con la posición del canal o río submarino observado en la carta batimétrica, que se presentan en segmentos aislados. Por ejemplo, entre los domos 7 y 8 se pierde en el nivel de *BS* del valle y la región del nadir y en el sector Norte ( $93^{\circ}05'W$ ,  $22^{\circ}05'N$ ) se observa una zona de alto *BS* de forma triangular que corresponde con la desembocadura de este canal en la planicie.



*Figura 4.15. Zonas de alto BS asociadas a canales*

En las imágenes de la Figura 4.16. se observan dos zonas de bajo *backscatter* en la que no están asociadas a la presencia de domos: la primera se localiza al SO del domo 23 (Figura 4.16.a), midiendo 4 x 2.6 km; la segunda en el sector Norte de forma alargada en dirección E-O (Figura 4.16.b), midiendo 11 x 1 km.

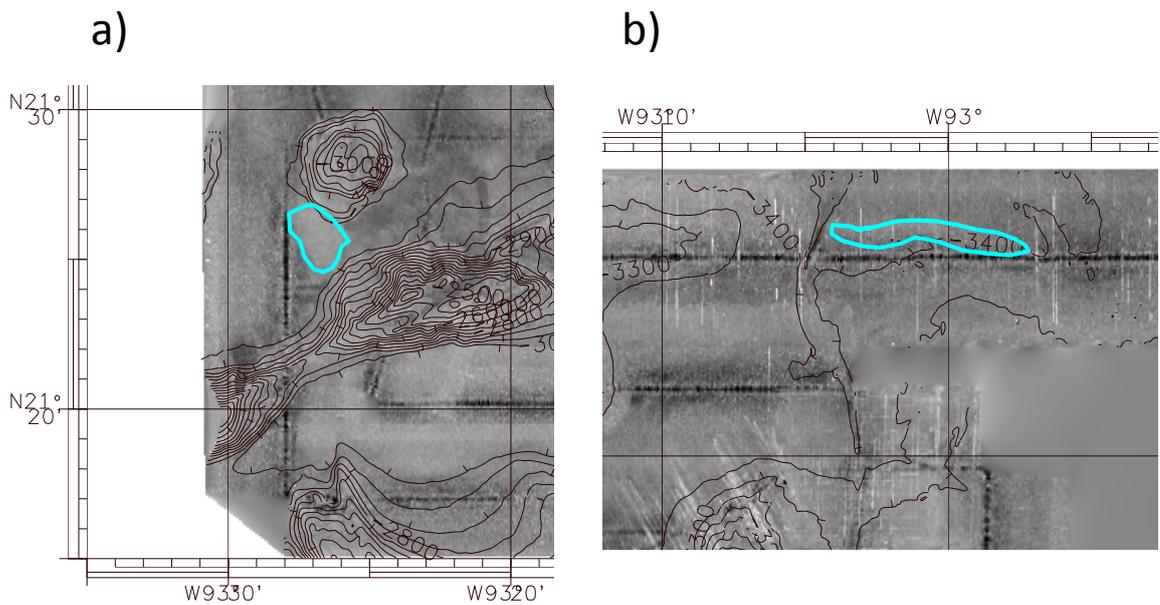


Figura 4.16. Zonas de bajo BS no asociadas a alguna estructura dómica.

### 4.3. Análisis de Resultados

La imagen acústica obtenida del procesado de los datos de la ecosonda multihaz EM120, muestra cambios en las características acústicas a lo largo de toda el área Norte de los Domos de Campeche. Se puede reconocer la presencia de efectos de adquisición como son: a) zona de muy alto BS ( $> -5$  dB) correspondiente con la región del nadir en zonas de pendiente muy suave; ésta se debe a una inadecuada compensación del BS especular; b) en zonas de pendiente muy suave se observa una disminución de la intensidad de BS desde la región del nadir hacia los extremos del *swath*, esto puede deberse a que la compensación por efecto de Lambert no es adecuada; c) se aprecian también bandas paralelas a la derrota donde el nivel medio de BS cambia (Figura 4.10), posiblemente relacionadas con: i) distintas frecuencias para cada sector transmitido; y/o ii) diferencias en la función de ganancia TVG para ese sector. Al mismo tiempo se observan cambios en las características acústicas que se relacionan directamente con las estructuras dómicas y el relieve batimétrico.

La intensidad total de BS del lecho marino está compuesta por fenómenos dispersivos tanto superficiales como en el volumen de sedimento, cuya contribución relativa depende del ángulo de incidencia, la frecuencia del pulso y las propiedades

físicas del lecho marino. Las contribuciones superficiales a la intensidad total de *backscatter* del lecho marino aumentan directamente con la rugosidad de la superficie, así como con el contraste de impedancias acústicas entre los medios; adicionalmente, las contribuciones de volumen dependen, además de la porción de la energía transmitida al subsuelo, de la presencia de heterogeneidades y estructuras dentro del mismo. De este modo, la existencia de: a) cambios en la compactación de los sedimentos y/o tipo de sedimento; b) estructuras superficiales que modifiquen la rugosidad; c) diversos fluidos que saturan los sedimentos; y d) estructuras por debajo de la superficie del lecho marino, se ven reflejados en la imagen acústica. Cabe destacar que la resolución acústica del piso marino, obtenida con la ecosonda EM120 en el área de estudio, no permite separar las distintas componentes del campo retrodispersado.

## 5. INTERPRETACIÓN

### 5.1. Morfología

La morfología del relieve del lecho marino refleja que el grosor de los depósitos de evaporitas disminuye hacia el Norte, de la provincia de los Domos de Campeche a los Domos de Sigsbee; teniendo una mayor cantidad de sal en el sur de la provincia salina de los Domos de Campeche la expresión superficial de las estructuras salinas es mas abundante. El flujo de estos cuerpos halinos sigue direcciones controladas estructuralmente (fallas y fracturas), así como por variaciones laterales en la carga sedimentaria; mientras que la morfología de los domos obedece tanto a la geometría del cuerpo salino que asciende, como a la sedimentación.

En esta región, las variaciones laterales en la sedimentación son poco usuales, por lo que la forma de los domos puede ser resultado de cuerpos salinos alargados que se originaron a lo largo de fallas. El alineamiento de las orientaciones de los domos de las cordilleras Noroeste, Central y Suroeste, así como la presencia de collados que unen a los domos (Figura 4.4), puede deberse a la presencia de un “salt ridge” a lo largo de una falla, del cual se desprendieron diferentes diapiros. Los saltos batimétricos entre los domos 13 y 18, 14 y 19 y 21 y 22, así como los cañones que se forman entre los mismos, sugieren que las masas de sal que dan origen a estas cordilleras son independientes en la parte somera.

La forma de cráter observada en la cima de los domos 11 y 13, así como las grandes cañadas que se observan en los domos 5, 6, 7, 17 y 18, pueden deberse a la expresión superficial de fallas normales (“*growth faults*”) debida al crecimiento de la estructura salina. La aparición de estas fallas está relacionada con la reactivación del flujo salino de la estructura. Las estructuras en forma de abanico que sobresalen de los flancos de los domos 10, 11 y 13 pueden deberse a deslizamientos de material provocado por inestabilidades producidas por reactivación de la tectónica salina en estos domos. Los domos cuyos flancos presentan pendientes abruptas representan estructuras que se han elevado rápidamente sobre el promedio de la superficie del lecho marino en un tiempo reciente, ya que la sedimentación observada presenta muy poco suavizado. La cañada que divide al domo 6 puede ser debida a una falla de crecimiento (*growth fault*)



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

debido al ascenso del cuerpo salino que le dio origen. Aunque no se aprecian deslizamientos significativos en los flancos de esta estructura.

El alineamiento observado de las orientaciones de los domos 26 y 27, el salto batimétrico entre los domos 14 y 19 y la diferencia en nivel del valle al S de la Cordillera Suroeste (Figura 4.6), respecto del valle al Norte de la misma, sugieren la presencia de una falla cuyo rumbo concuerda con la alineación.

La presencia de las estructuras de *ripples* y plegamientos en el sector noreste (Figura 4.2. recuadro rojo), puede asociarse a las partes distales de deslizamientos que ocurren en el Escarpe de Campeche.

## **5.2. Backscatter**

En la provincia de los Domos de Campeche, de la misma manera que sucede en el talud de Texas y Louisiana, el sistema petrolero regional tiene una fuerte relación con la presencia de estructuras salinas. Estos hidrocarburos migran a través de sistemas de fallas que genera el crecimiento de estos domos hasta filtrarse a través del lecho marino, en donde pueden generar un ecosistema asociado, como formación de hidratos de metano, mineralización de carbonatos o derrames de asfaltos (chapopoterías submarinas). Previo a la campaña SO174 se había reconocido la presencia de estas ventilas de hidrocarburos en la provincia de los Domos de Campeche zona a través de fotos satelitales. En el domo 5, las zonas de alto *backscatter* en la cima corresponden con derrames de asfaltos [Macdonald *et ál.*, 2004; Bohrmann and Schenck, 2004; Canet *et ál.*, 2004]. La mayoría de las contribuciones de *backscatter* de volumen en el subsuelo muy cerca del lecho marino, posiblemente están asociadas con la filtración de hidrocarburos. Las zonas de alto *backscatter* ubicadas en los flancos de algunos de los domos, pueden ser producto de contribuciones superficiales debido a derrames asfálticos que posteriormente consolidaría carbonatos sólidos. Las dos zonas de alto BS que se observan hacia el norte de los saltos batimétricos, en asociación con la falla entre los domos 14, 19 y 24, al igual que las zonas de alto BS de los flancos de los domos, pueden deberse a la formación de carbonatos o hidratos de gas asociados a filtraciones de hidrocarburos a lo largo de debilidades estructurales ocasionadas por esta falla.

La zona de bajo *backscatter* en el sector sur del área de estudio (Figura 4.16, inferior; 93°27' W, 21°25' N) puede señalar una región de filtración de gas en el lecho marino, cuyas características no permiten la formación de hidratos de gas, carbonatación o un ecosistema asociado. Estas filtraciones alteran el sedimento, saturándolo de gas, lo que lo hace acústicamente más suave, por lo que la intensidad de *backscatter* decrece.

Las zonas pequeñas de alto *backscatter* observadas, no asociadas a la presencia de domos en las regiones de pendiente suave, pueden ser sitios donde se ha producido carbonatación o formación de hidratos de gas asociados a la filtración de hidrocarburos que provienen de fallas más profundas.

Las zonas de alto BS en el sector norte (93°00'W, 22°09'N) y en el sector sur (92°48'W, 21°18'N) se encuentran localizadas dentro de subcuencas en las cuales los sedimentos tienen diferente grado de compactación, proporcionando una superficie acústicamente más dura. La presencia de zonas de alto BS en la cima de algunos domos puede deberse a la exposición de sedimentos mejor consolidados por fallas de crecimiento en domos reactivados (domos 6, 8, 11, 13) o a la exposición de las capas salinas.

## 6. CONCLUSIONES

La campaña oceanográfica SO174-2 obtuvo por primera vez datos de ecosonda multihaz que se usaron para obtener una carta batimétrica y un mosaico de intensidad de *backscatter* de alta resolución espacial en el sector norte de la provincia salina de los Domos de Campeche.

La carta batimétrica permite reconocer en el relieve del lecho marino de este sector, varias de las estructuras dómicas relacionadas al movimiento de las evaporitas a través de los sedimentos, además de rasgos morfológicos como aludes, planicies, canales, *ripples* y plegamientos.

En el relieve de algunos domos se observan estructuras que indican la reactivación del proceso de diapirismo. La forma de los domos y las relaciones entre ellos revelan la existencia de sistemas de debilidades estructurales en su superficie.

El modelo digital de terreno presenta un artefacto de textura producto de la adquisición con la ecosonda, que se presenta en forma de ondículas perpendiculares a la derrota.

De las imágenes de BS, se reconocieron zonas de alto BS que pudieran estar asociadas a los procesos de formación de hidratos de gas, formación de carbonatos o derrames de asfalto. También se reconocieron zonas de bajo BS que pudieran estar asociadas al proceso de filtración de gas que satura el sedimento. La presencia de estas filtraciones en toda el área puede ser promisoria para prospección de hidrocarburos someros por parte de la industria petrolera.

Una limitante encontrada en este trabajo es que los datos de la ecosonda multihaz EM120 recolectados durante la campaña SO174-2, no permiten conocer la contribución relativa de cada una de las fuentes de BS a la intensidad total. Las correcciones de roll y perfil de velocidad acústica se aplicaron exclusivamente a los datos batimétricos, pero no a los datos de BS. Las imágenes de BS están afectadas por las diferentes frecuencias que transmite la ecosonda EM120, así como la función de ganancia TVG.



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## BIBLIOGRAFÍA

Anónimo. *EM Series Datagram Formats, Format Description*. Kongsberg Maritime, Norway, Rev 1, 2006.

Anónimo. *EM120 Multibeam Echosounder Operator Manual; Base Version*. Kongsberg Maritime, Norway, 2000.

Anónimo. *EM120 Multibeam Echosounder Product Description*. Kongsberg Maritime, Norway, 1999.

Anónimo. *Multibeam Sonar Theory of Operation*. L3 Communications, SeaBeam Instruments, Massachusetts, 103 p.

Augustin, J. M., Le Suave, R., Lurton, X., Voisset, M., Dugueley, S. and Satra, C., 1996. *Contribution of the Multibeam Acoustic Imagery to the Exploration of the Sea Bottom*. Marine Geophysical Researches 18, 459 – 486.

Bartholomä, A., 2006. *Acoustic bottom detection and seabed classification in the German Bight, southern North Sea*. Geo-Marine Letters 26, 177–184.

Beyer, A., Chakraborty, B., and Schenke H. W., 2007. *Seafloor classification of the mound and channel provinces of the Porcupine Seabight: an application of the multibeam angular backscatter data*. International Journal of Earth Science (Geol Rundsch) 96, 11–20.

Beyer, A., Rathlau, R. and Schenke, H. W., 2005. *Multibeam bathymetry of the Håkon Mosby Mud Volcano*. Marine Geophysical Researches 26, 61–75.

Blackington, J. G., 1991. *Bathymetric resolution, precision and accuracy considerations for swath bathymetry mapping SONAR systems*. IEEE Oceans '91, 550-557.

Bohrmann, G. and Schenck, S. (eds.), 2004. *RV Sonne Cruise Report SO174-2*. GEOMAR Report 117, Kiel.

Bourillet, J. F., Edy, C., Rambert, F., Jatra, C., and Loubrieu, B., 1996. *Swath Mapping System Processing: Bathymetry and Cartography*. Marine Geophysical Researches 18, 487 – 506.

Brown, C. J. and Blondel, P., 2008. *Developments in the application of multibeam sonar backscatter for seafloor habitat mapping*. Applied Acoustics.

Bryant, W.R., Lugo, C., Cordova, C., Salvador, A., 1991. *Gulf of Mexico Basin: Physiography and Bathymetry*. En: Salvador, A. (ed). *The Geology of North America, Vol. J: The Gulf of Mexico Basin*. Geological Society of America, p. 13-30.

Clay, C.S. and H. Medwin, 1997. *Fundamentals of Acoustical Oceanography*. Academic Press, USA, 1998, 712 p.

Canet, C., Prol-Ledesma, R. M., Escobar-Briones, E., Mortera-Gutiérrez, C., Lozano-Santa



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Cruz, R., Linares, C., Cienfuegos, E. y Morales-Puente, P., 2006. *Mineralogical and geochemical characterization of hydrocarbon seep sediments from the Gulf of Mexico*. Marine and Petroleum Geology 23, 605–619.

de Moustier, C., 1986. *Beyond bathymetry: Mapping acoustic backscattering from the deep seafloor with Sea Beam*. Journal of the Acoustical Society of America 79, 317 -331.

de Moustier, C., 2001. *Field Evaluation of Sounding Accuracy in Deep Water Multibeam Swath Bathymetry*. IEEE Oceans Conference and Exhibition, Honolulu, Hawaii, USA, Vol. 3, p.1761-1765.

de Moustier, C. and Matsumoto, H., 1993. *Seafloor acoustic remote sensing with multibeam echo sounder and bathymetric sidescan sonar systems*. Marine Geophysical Researches 15, 27 – 42.

de Moustier, C. and Alexandrou, D., 1991. *Angular Dependence of 12-kHz Seafloor Acoustic Backscatter*. Journal of the Acoustical Society of America 90, 522-531.

de Moustier, C., 2009. *Lecture Notes for the Multibeam SONAR Training Course No. 49*. The Hydrographical Society of America, Norfolk, 2009.

Ewing, T.E., 1991. *Gulf of Mexico Basin: Structural Framework*. En: Salvador, A. (ed). *The Geology of North America, Vol. J: The Gulf of Mexico Basin*. Geological Society of America, p. 31-52.

Fonseca, L. y Mayer, L., 2007. *Remote estimation of surficial seafloor properties through the application Angular Range Analysis to multibeam sonar data*. Marine Geophysical Researches 28, 119–126.

Glenn, F.M., 1970. *Introducing an operational multi-beam array sonar*. International Hydrographic Review 47, 35-39.

Gardner, J.V., Beaudoin, J.D., Hughes Clarke, J.E., and Dartnell, P., 2003. *Multibeam Mapping of Selected Areas of the Outer Continental Shelf, Northwestern Gulf of Mexico-- Data, Images, and GIS*. U.S. Geological Survey Open-File Report 02-411

Hammerstad, E., 2000. *EM Technical Note: Backscattering and Seabed Image Reflectivity*; Kongsberg Maritime.

Hughes-Clarke, J., 2009. *Lecture Notes for the Multibeam SONAR Training Course No. 49*. The Hydrographical Society of America, Norfolk, 2009.

Jackson, D. R. and Richardson, M. D., 2007. *High-Frequency Seafloor Acoustics; Monograph Series on Underwater Acoustics*. Springer, New York, 616 p.

Kleiner, A., Anderson, B. and Gee, L., 1999. *A Synergistic combination of Technologies: Multibeam Bathymetry, Acoustic Reflectivity, Gravity, and Magnetics in the Deepwater Gulf of Mexico*. Offshore Technology Conference 1999.

- Konyukhov, A. I., 2008. *Geological structure, evolution stages, and petroliferous complexes of the Gulf of Mexico Basin*. *Lithology and Mineral Resources* 43, 380–393.
- Kuperman, W.A. and Roux, P., 2006. *Underwater Acoustics*. en: Rossing, T. D. (Ed), *Springer Handbook of Acoustics*. Springer, New York, 2006, pp. 149-204
- Lehodey P. and Grandperrin, R., 1996. *Swath Mapping of the Seafloor and its Application to Deep-bottom Fisheries in New Caledonia*. *Marine Geophysical Researches* 18, 449 – 458.
- Lingsch, S.C., 1992. *Acoustic Imagery Using a Multibeam Bathymetric System*. *IEEE Oceans* 92, 288-293.
- Lyons, A. P., Anderson, A. L. and Dwan, F. S., 1994. *Acoustic scattering from the seafloor: Modeling and data Comparison*. *Journal of the Acoustical Society of America* 95, 2241 – 2451.
- MacDonald, I.R., Bohrmann, G., Escobar, E., Abegg, F., Blanchon, P., Blinova, V., Brückmann, W., Drews, M., Eisenhauer, A., Han, X., Heeschen, K., Meier, F., Mortera, C., Naehr, T., Orcutt, B., Bernard, B., Brooks, J. and de Farago, M., 2004. *Asphalt Volcanism and Chemosynthetic Life in the Campeche Knolls, Gulf of Mexico*. *Science* 304, 999-1002;
- Mayer, L. A., 2006. *Frontiers in seafloor mapping and visualization*. *Marine Geophysical Researches* 27, 7–17.
- Naehr, T.H., Birgel, D., Bohrmann G., MacDonald, I.R., and Kasten, S., 2009. *Biogeochemical controls on authigenic carbonate formation at the Chapopote "asphalt volcano", Bay of Campeche*. *Chemical Geology* 266, 390–402.
- Nelson, T.H., 1991. *Gulf of Mexico Basin: Salt Tectonics and Listric-normal Faulting*. En: Salvador, A. (ed). *The Geology of North America, Vol. J: The Gulf of Mexico Basin*. Geological Society of America, p. 73-90
- Orange, D.L., Angell, M. and Lapp, D., 1999, *Applications of multibeam mapping to exploration and production: Detecting seeps, mapping geohazards, and managing data overload with GIS*. *The Leading Edge* 18, 495-501.
- Organización Hidrográfica Internacional (OHI), 2005. *Manual de Hidrografía*. Bureau Hidrográfico Internacional, Mónaco, 1ª Edición (2005), 546 p.
- Pindell, J. and Kennan, L., 2001. *Kinematic Evolution of the Gulf of Mexico and Caribbean*. GCSSEPM, Tulsa, *in press*.
- Renard, V. and Allenou, J.P., 1979. *SEABEAM, multibeam echo sounding on Jean Charcot*. *International Hydrographic Review*, 56, 35-67.
- Rossing, T.D., 2006. *A Brief History of Acoustics*. en: Rossing, T. D. (Ed), *Springer Handbook of Acoustics*. Springer, New York, 2006, pp. 9-24.

Sager, W.W., MacDonald, I.R. and Hou, R., 2003. *Geophysical signatures of mud mounds at hydrocarbon seeps on the Louisiana continental slope, northern Gulf of Mexico*. Marine Geology 198, p. 97-132.

Salvador, A., 1991. *Gulf of Mexico Basin: Origin and Development of the Gulf of Mexico Basin*. En: Salvador, A. (ed). *The Geology of North America, Vol. J: The Gulf of Mexico Basin*, Geological Society of America, p. 389-444.

Schmahl, G.P., Hickerson, E.L., Weaver, D.C. and Gardner, J.V., 2003. *High-resolution multibeam mapping and habitat characterization of topographic features in the northwestern Gulf of Mexico*. Proceedings of US Hydro 2003 Conference, THSOA.

Silva, A.J., Baxter, C.D.P., LaRosa, P.T. and Bryant, W.R., 2004. *Investigation of mass wasting on the continental slope and rise*. Marine Geology 203, 355-366.

Stewart, R. H., 2006. *Introduction to Physical Oceanography*. Texas A & M University, 2006.

Szuman, M., Berndt, C., Jacobs, C. and Best, A., 2006. *Seabed characterization through a range of high-resolution acoustic systems – a case study offshore Oman*. Marine Geophysical Researches 27, 167–180.

Warren, J.K., 2006 *Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons*. Springer-Verlag, Germany, *Capítulo 6*, pp. 375-454.

Wheeler, A.J., Beyer, A., Freiwald, A., de Haas, H., Huvenne, V. A. I., Kozachenko, M., Roy, K. Olu-Le, and Opderbecke, J., 2007. *Morphology and environment of cold-water coral carbonate mounds on the NW European margin*. Int. Journal of Earth Science (Geol Rundsch) 96, 37–56.

Wille, P. C., 2005. *Sound Images of the Ocean in Research and Monitoring*. Springer-Verlag, Germany, 2005, 471 p.

Zanbark, A., 2006. *Structural Features and Hydrocarbon-Bearing Potential of Gulf of Mexico Continental Slopes Adjacent to the United States*. Oceanology 46, pp. 557–563.

**ANEXO A. CARTA BATIMÉTRICA E IMAGEN DE *BACKSCATTER* DEL ÁREA NORTE DE LOS DOMOS DE CAMPECHE, GOLFO DE MÉXICO**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

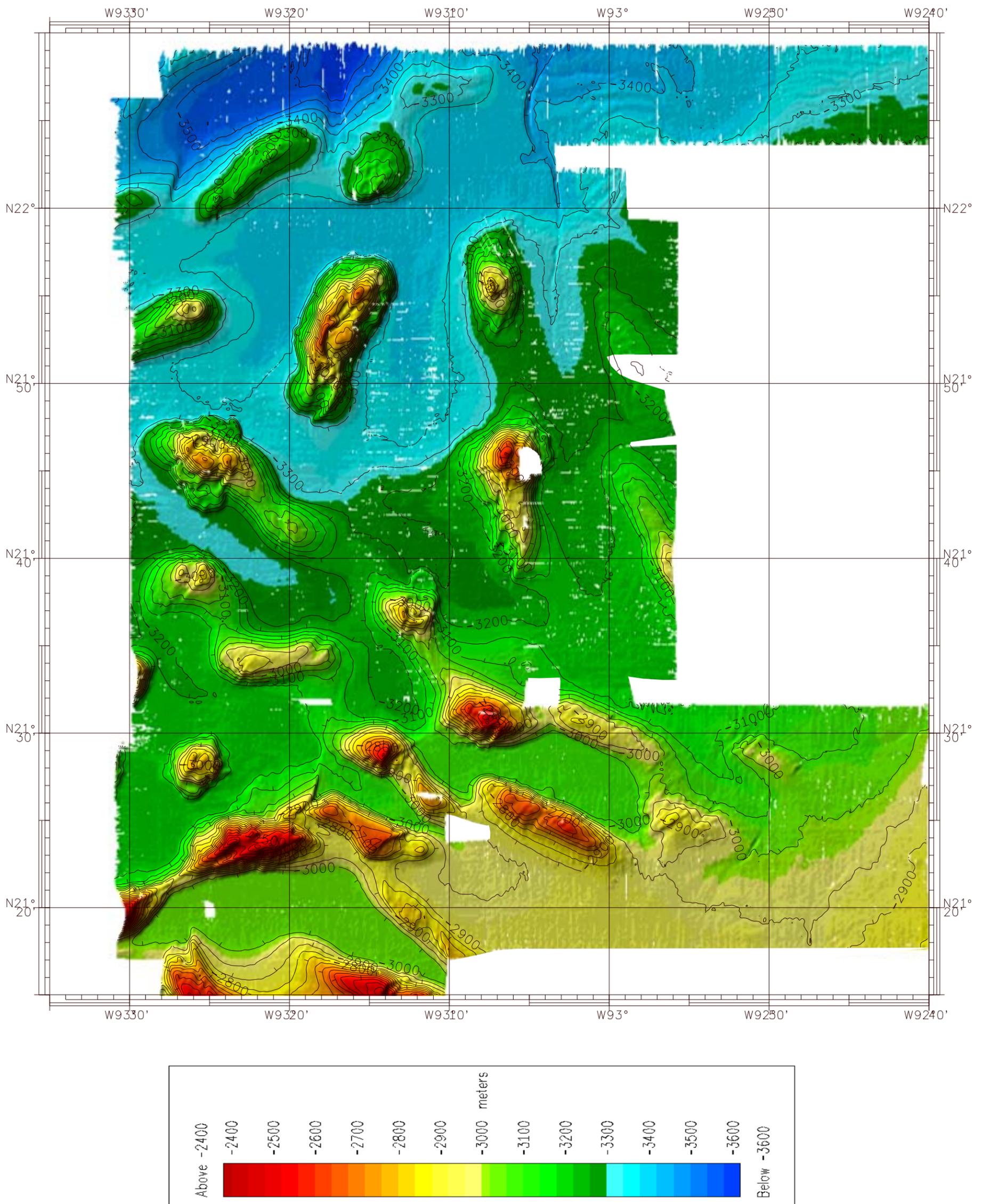


Figura A.1. Carta batimétrica de la región Norte de los Doms de Campeche, Sonda de Campeche, Golfo de México

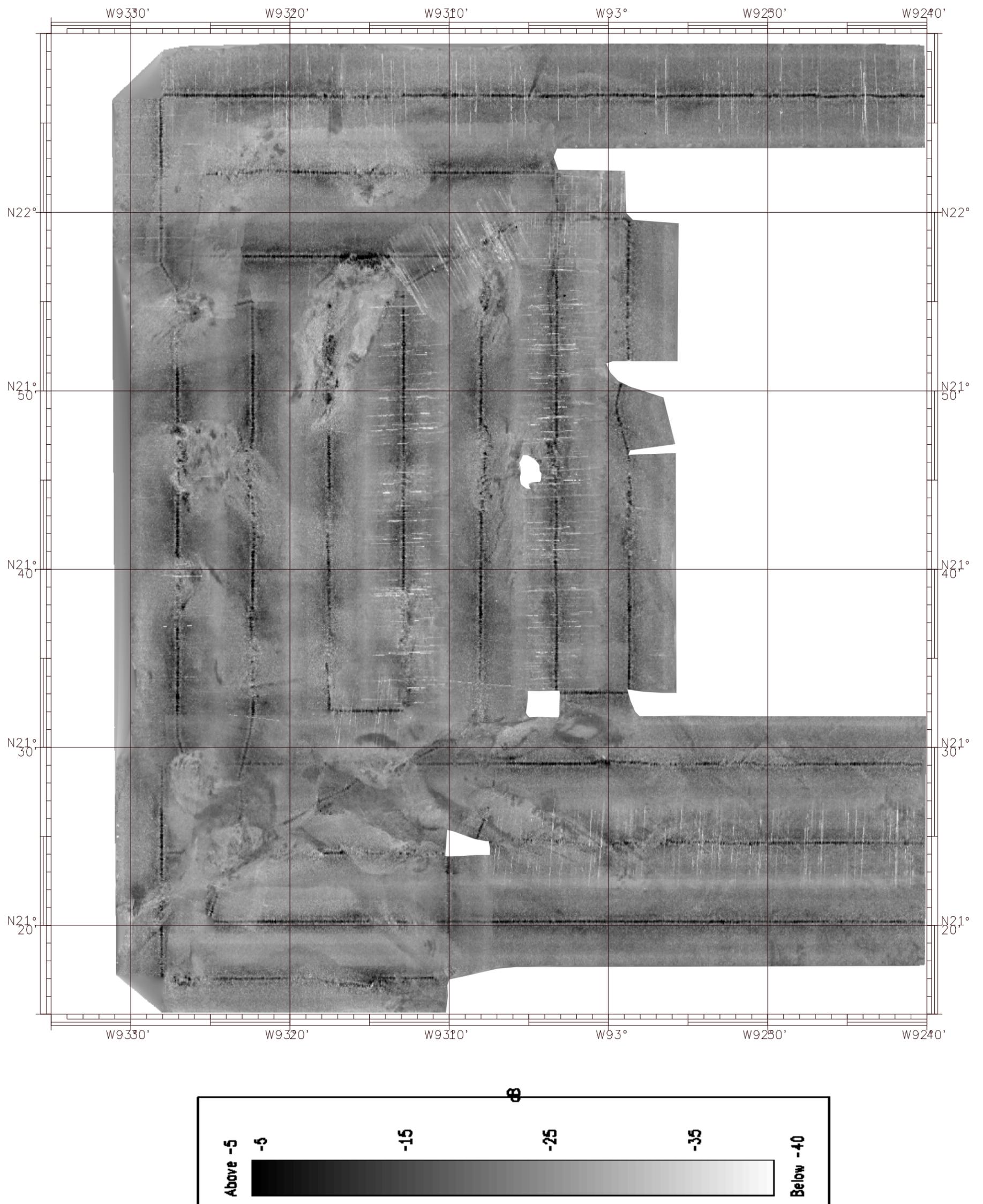


Figura A.2. Mosaico de Imágenes acústicas del lecho marino de la región Norte de los Domos de Campeche, Sonda de Campeche, Golfo de México

## ANEXO B. Descripción de muestras y núcleos recolectados en el área Norte de los Domos de Campeche

En el área Norte de los Domos de Campeche se muestrearon dos de los domos mapeados, el CK 2155 y CK 2124 (nombrados así por la latitud de la cima). Estas muestras incluyen núcleos (MUC 15, MUC 16, MUC 17 y MAC 8) muestras de agarre (TVG 5 y TVG 6) y series de fotos de OFOS. La Figura A.3. presenta las posiciones de los núcleos y muestras de agarre recolectadas en estos dos domos.

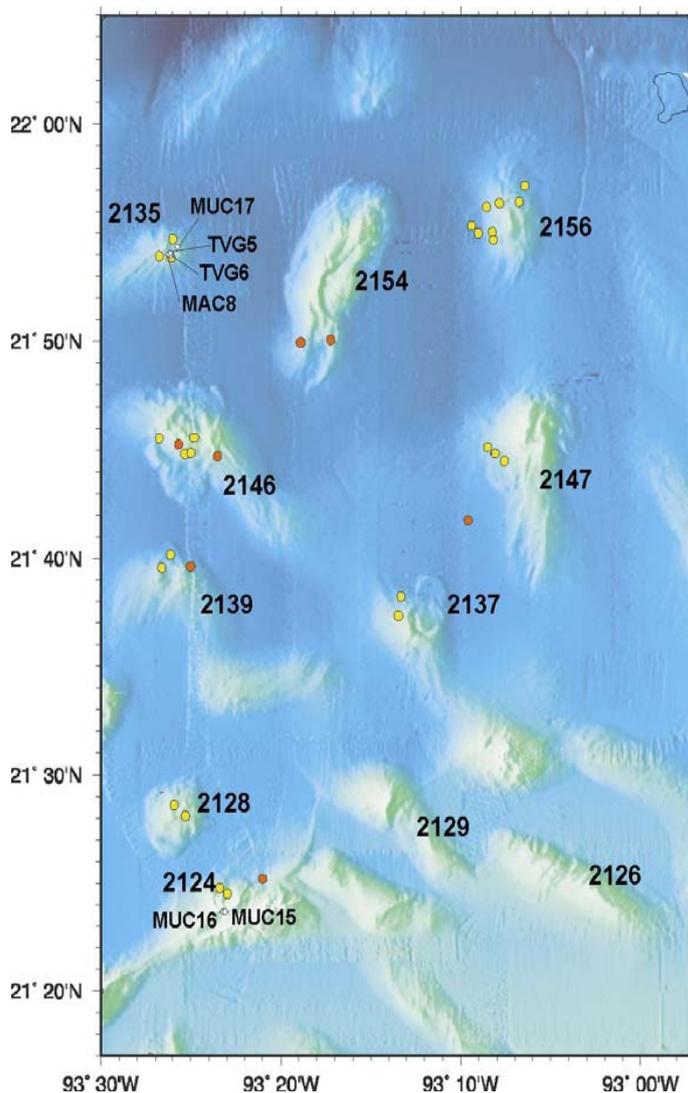


Figura A.3. Batimetría del área norte de los Domos de Campeche. Se muestra la localización de los núcleos y muestras de agarre en los domos CK2124 y CK2153

La Tabla A.1. resume los resultados de las muestras de agarre. Estas fueron tomadas en el domo CK2153 o Chapopote [Bohrmann and Schenck, 2004]. Se recuperaron trozos de asfalto, así como hidratos de gas.

Tabla A.1

No. Instr.	No. Est.	Area	Lat. / Long.	Profundidad (m)	Recuperación
TVG 5	136	CK 2155	21°53.94/93°26.15	2915	Trozos de asfalto
TVG 6	140	CK 2155	21°54.00/93°26.4	2902	GH, carbonatos, lodo, petróleo

En la estación 136 (TVG5) se recuperaron trozos de asfalto cubiertos por cieno - compuesto de nanofósiles - pegajoso y de color gris claro y sedimento fino de color marrón.

En la estación 140 (TVG6) se recolectaron muestras de sedimento alterado, aceitoso y con presencia de disociación de hidrato de gas activa. Los núcleos contenían trozos de carbonatos porosos. Además se obtuvieron muestras embotelladas de: hidratos de gas con abundante sedimento, hidrato aceitoso, aceite viscoso con sedimento y sedimento con hidrato en disociación.

En la tabla A.2 se muestran los sitios de muestreo TV-MUC. Se recuperaron 3 núcleos en el domo CK2124 y 4 núcleos en el domo CK2153 (Chapopote)

Tabla A.2

No. Instr.	No. Est.	Area	Lat. / Long.	Profundidad (m)	Recuperación
TVMUC 15	132	CK 2124	21°23.69/93°23.24	2461	No recuperados
TVMUC 16	133	CK 2124	21°23.67/93°23.10	2470	3 núcleos
TVMUC 17	139	CK 2155	21°54.37/93°25.75	2929	4 núcleos

En la estación 133 (MUC16) los núcleos se recolectaron cerca de un parche de material marrón con aspecto de piel; en el área había abundantes marcas de caracoles, algunos depósitos irregulares de carbonatos y conchas. El sedimento en los primeros 5cm presentó un color marrón claro, que gradualmente cambió hacia un cieno pegajoso de color gris. Se detectó un olor ligeramente sulfúrico en el final del núcleo.

En la estación 139 (MUC17) se encontró sedimento con apariencia similar al recolectado en MUC 16, no se observó parche de material marrón con textura de piel. Adyacente al sitio de recolección se encontró un área de pequeños (<1cm de relieve) domos blancos, posiblemente un “tapete” blanco. La superficie del sedimento en los núcleos presentó una colección dispersa de microorganismos: filamentos de color gris/blanco de 1mm-2mm de largo, y algunos cilíndricos de 1mm-2mm de diámetro, de color gris claro. Al igual que con la muestra del sitio MUC16, se detectó un olor sulfúrico en la base del núcleo.

Tabla A.3.

Instrumento	Estación	Área	Posición en el fondo (°N, °W)	Profundidad (m)	Descripción
MAC 8	141	CK 2155	21°54.08; 93°26.14	2929	Arcilla muy fina, gran adherencia.

En el sitio CK2153 se encontraron trozos de bitumen inmersos en el sedimento bentónico típico. La capa superficial era suave y de color café claro, con alto contenido de agua – rico en materia orgánica. La arcilla encontrada a mayor profundidad presentó capas de color gris, un menor contenido de agua y era más rígida. Mediante los estudios químicos se notó que la oxidación alcanzó los primeros 10cm bajo la superficie, y se confirmó la presencia de hidratos de gas. [Bohrmann and Shenck, 2004].

Tabla A.4, Carbonatos autigénicos recuperados del domo CK2153

Loc./Est.	Descripción	Notas
CK 2155, TVG 6	Carbonato masivo color grisáceo, piezas grandes, 30-60x20-30x30-40cm, poroso, cavidades rellenas con petróleo, abundantes detritos de conchas y clastos de lodo. Mal cementado.	Gris oscuro, GH presente.

Tabla A.5; muestras analizadas mediante el equipo de tomografía computarizada

No. Est.	No. Instr.	No. Submuestra	Area	Descripción	No. Particiones
136	TVG-5		Chapopote	Asfalto (chapopote)	220
				Conchas	38
				Conchas 2	39
140	TVG-6	1	Chapopote	GH	58
		2		GH	71
		3		GH	61
		4		GH	47
		4/1		GH	33
		6		GH	59
		7		GH	42
GH: Hidrato de Gas (Gas Hydrate)					

## **ANEXO C. Ecosonda KONGSBERG-SIMRAD EM120 a bordo del RV SONNE**

### **Generalidades de la Ecosonda KONGSBERG-SIMRAD EM120**

La ecosonda KONGSBERG-SIMRAD EM120 montada a bordo del RV SONNE, es una ecosonda multihaz con frecuencia nominal de 12 KHz, sector de cobertura angular de 150° y disponibilidad de 191 haces – 95 para babor, 95 para estribor y 1 haz central – por pulso.

La cobertura (swath width) que puede obtenerse en un fondo plano es de aproximadamente seis veces la profundidad. El tamaño del sector de cobertura angular y el ángulo de enfoque de cada haz pueden ser variados automáticamente con la profundidad de acuerdo con la cobertura alcanzable. Esto maximiza el número de haces útiles. Existe la posibilidad de elegir entre una configuración de haces equidistante - la huella acústica constante – o equiángula – espaciamiento angular constante entre haces.

### **Unidades principales del sistema EM120 de Kongsberg-Simrad (Figura A.4.)**

1. Arreglo de transductores de transmisión (con TX Junction Box)
2. Arreglo de transductores de recepción
3. Unidad Transceiver
4. Unidad de preamplificado – Preamplificador
5. Estación de trabajo del Operador
6. Unidad de Posicionamiento (GPS)
7. Unidad de movimiento del Buque (Actitud - Attitude)
8. Sensor de velocidad acústica

### **Arreglo de Transductores**

El arreglo de los transductores de la EM120 es lineal en una configuración de Cruz Mills, con unidades separadas para transmisión y recepción. Para el caso del RV Sonne, el arreglo está configurado para un sector combinado de 2° x 2°.

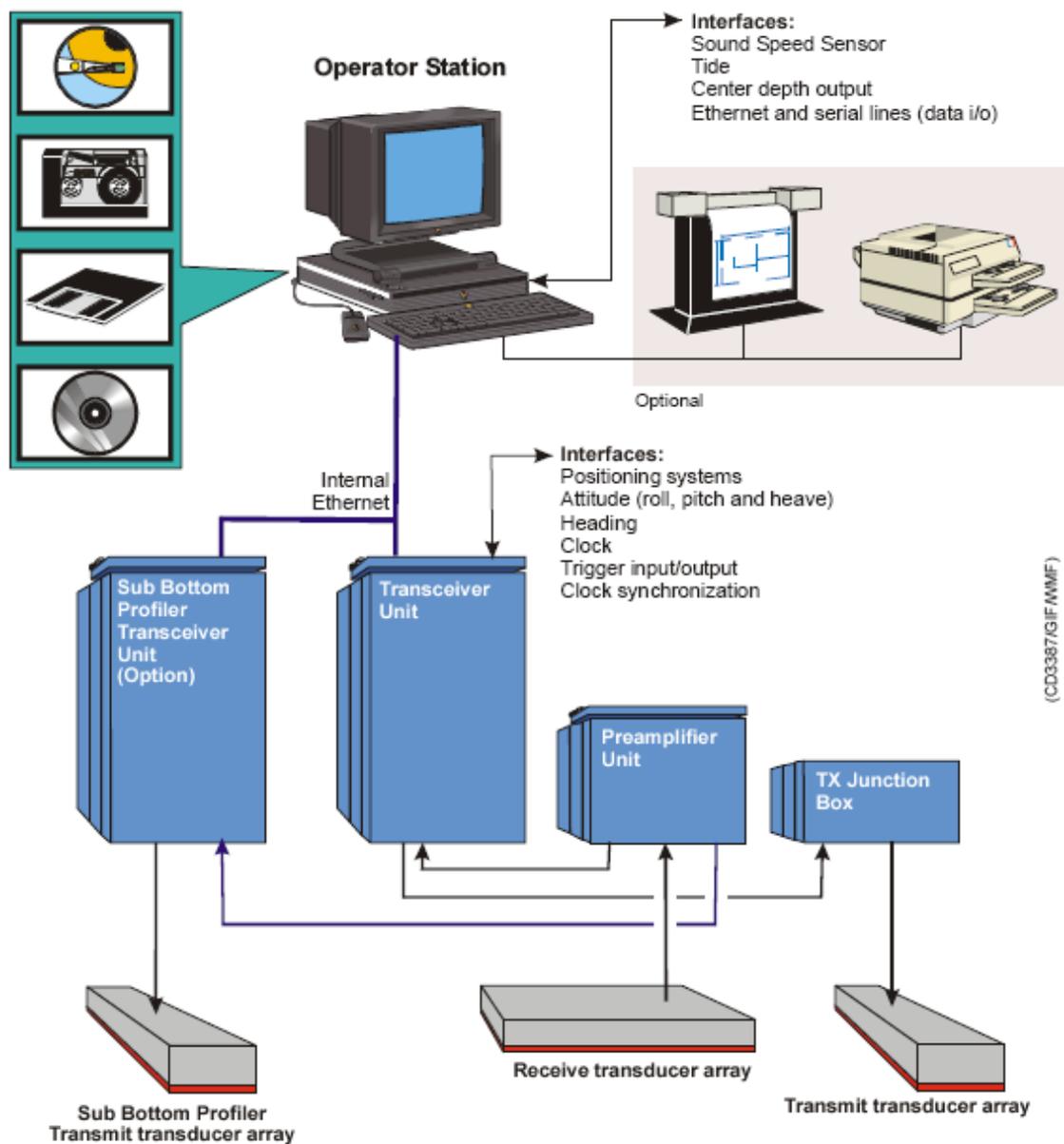


Figura A.4. Módulos que componen el sistema EM120)

### Arreglo Transmisor

El arreglo transmisor EM120 a bordo del RV SONNE consiste en 24 módulos. Cada uno contiene 18 elementos ordenados en filas de 6 elementos. Cada uno de éstos se conecta individualmente al transmisor en la Unidad Transceiver a través del TX Junction Box. Esto permite operarlo con una amplitud y fase únicas a modo de formar los sectores de transmisión requeridos con viraje individual.

### Arreglo Receptor

El arreglo receptor EM120 a bordo del RV SONNE esta formado por 8 módulos. Cada uno de éstos posee 8 elementos transductores que están individualmente conectados al correspondiente preamplificador en la unidad de preamplificado. Esto permite asignarle a cada uno un peso único de amplitud y fase para formar los haces de recepción requeridos.



Figura A.5. Vista de la quilla del RV SONNE, mostrando la góndola donde está montada la ecosonda EM120. superior: vista hacia proa; inferior: vista hacia popa.

## **Unidad Transceiver**

Esta unidad contiene los elementos electrónicos para la transmisión y recepción, procesadores para construcción de haces, detección de fondo y control de los parámetros de ganancia, intervalo de pulsos y ángulos de transmisión. Tiene interfaces serie para las unidades externas como: actitud del buque (cabeceo, balanceo, guiñada, rumbo, deriva), posición del buque y reloj externo. La unidad Transceiver se ubica en un gabinete que se monta a la pared, el cual incluye elementos que minimizan la vibración.

### **Transmisión y recepción acústica**

El sector acústico - abanico - de transmisión es de 150° en dirección transversal (across track) y 2° en la dirección longitudinal (along track). Está dividido en varios sectores individuales, con virado activo independiente de acuerdo con el balanceo, cabeceo y guiñada del buque, lo que permite un muestreo acústico uniforme y cobertura de 100% del fondo marino.

Los sectores están codificados en frecuencias (11.25 hasta 12.60 kHz) que se transmiten secuencialmente en cada pulso. El intervalo entre pulsos está limitado principalmente por el tiempo de retorno acústico en la columna de agua, hasta un máximo de 5 Hz.

La recepción de la señal acústica se realiza en 191 sectores de 20° en la dirección along track y 2° en la dirección across track. Estos sectores se forman electrónicamente y también tienen viraje activo independiente.

En la Figura A.6. se muestra esquemáticamente la técnica cross-beam.

Cuando se calcula la posición y profundidad de cada sondeo se toma en cuenta el viraje del sector, refracción por el perfil de velocidades acústicas en la columna de agua y movimiento del buque. La duración del pulso e intervalo de muestreo son variables, de acuerdo con la profundidad, para una mejor resolución.

### **Multiplexor de transmisión TX Junction Box**

Esta unidad funciona como interfaz de enrutamiento para facilitar la instalación del cable del arreglo transductor de transmisión.

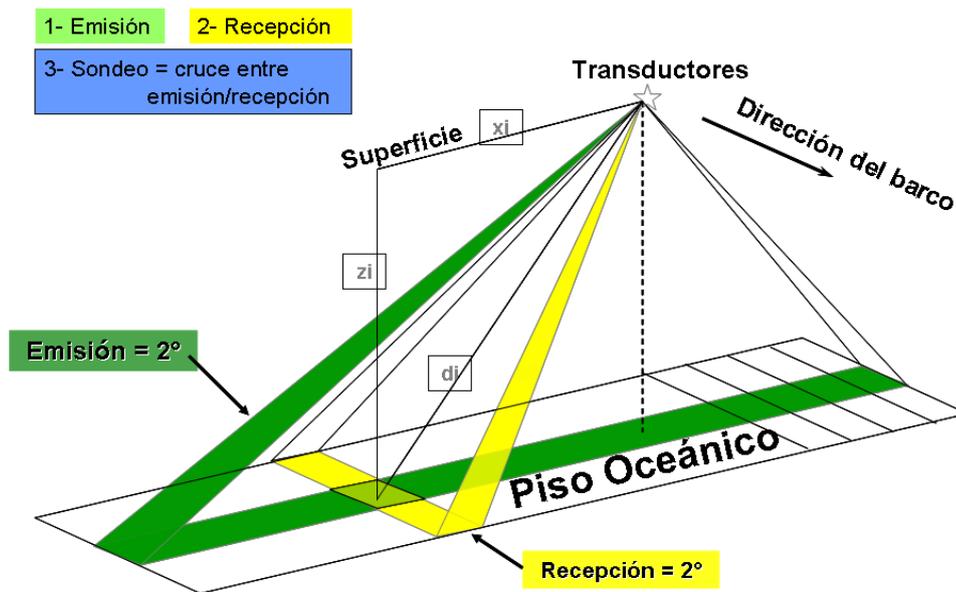


Figura A.6. Técnica Cross-beam

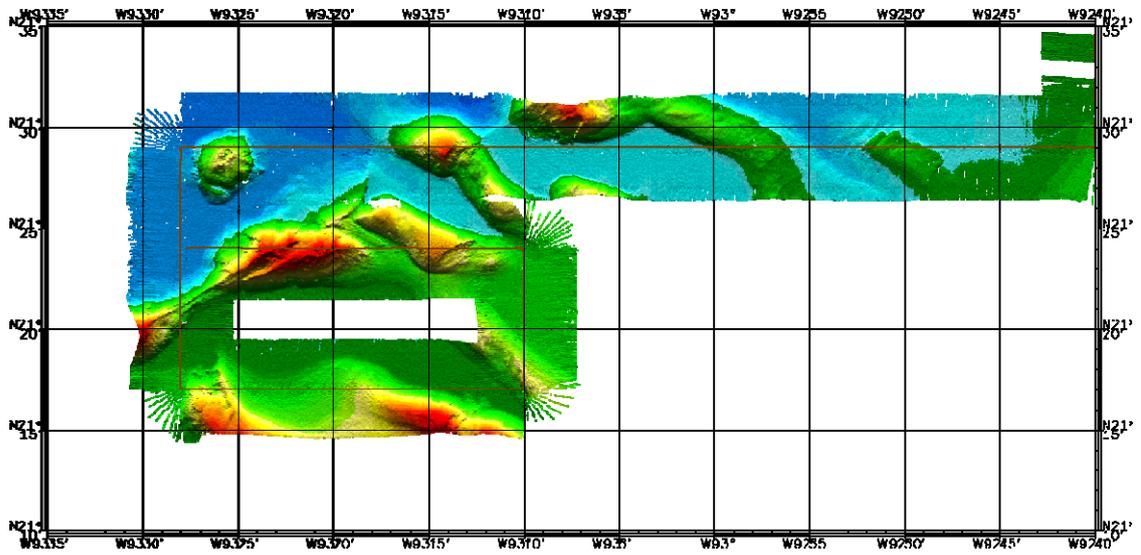
De Moustier [2001] reporta que la resolución vertical de esta ecosonda disminuye conforme aumenta el ángulo del haz, desde 0.2% para los haces centrales hasta 0.6% para los haces externos en una configuración de transmisión de 150°, independientemente de la resolución horizontal y de los instrumentos de registro de movimiento del buque.

Hammerstad, [2000] expone las bases del cálculo del valor de la intensidad de backscatter usado en las ecosondas multihaz Kongsberg-Simrad (incluyendo la EM120). Se emplea un promedio corrido para cada haz y se usa el máximo nivel promedio como representativo del coeficiente de reflectividad, BS. Este valor está basado en la suposición de un piso plano y que sigue la Ley de Lambert; esto toma en cuenta la variación con el ángulo de incidencia [de Moustier and Alexandrou, 1991] De modo que estos valores pueden ser usados para fines de clasificación acústica del piso marino [Hammerstad, 2000]

La resolución espacial está limitada principalmente al tamaño de la huella acústica del haz en el lecho marino. El área iluminada acústicamente por cada haz aumenta con la profundidad y el ángulo de inclinación; por ende, la resolución disminuye conforme aumenta la profundidad y hacia los extremos del *swath*. Cada sondeo representa un promedio acústico de la porción del lecho marino que queda dentro del área iluminada.

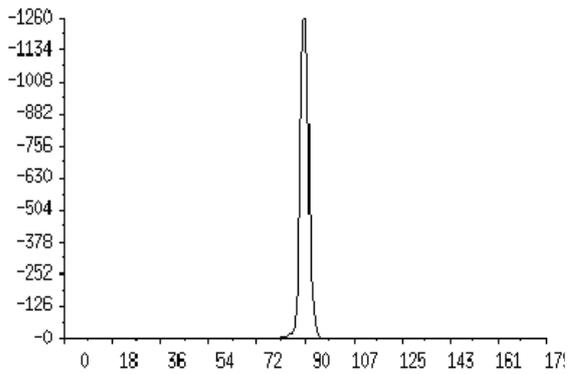
# ANEXO D. Segmentos extraídos de cada SURVEY

SURVEY SO174-2\_20

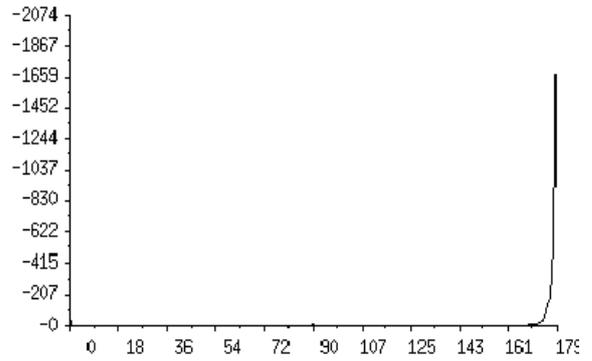


- Average heading : 89.7788
- Standard deviation : 6.1312
- Maximum found for : 90

- Average heading : 166.2870
- Standard deviation : 37.2903
- Maximum found for : 179

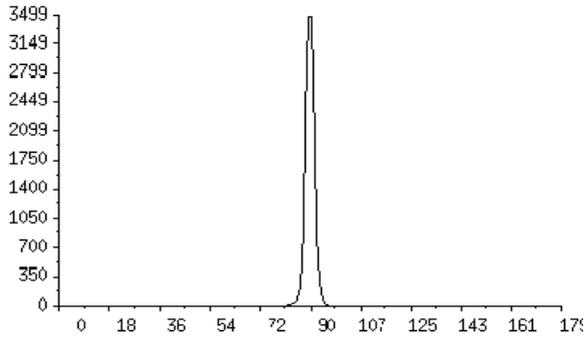


Segmento 1, 90°



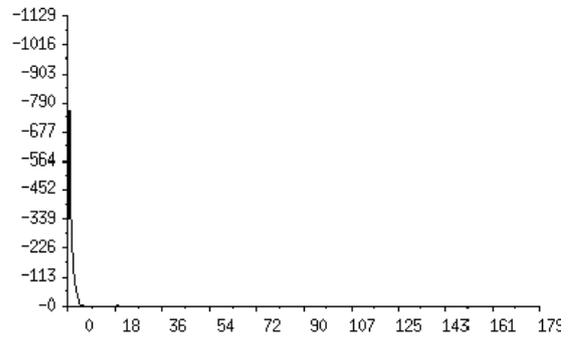
Segmento 2, 179°

■ Average heading : 89.7548  
■ Standard deviation : 6.4211  
■ Maximum found for : 89



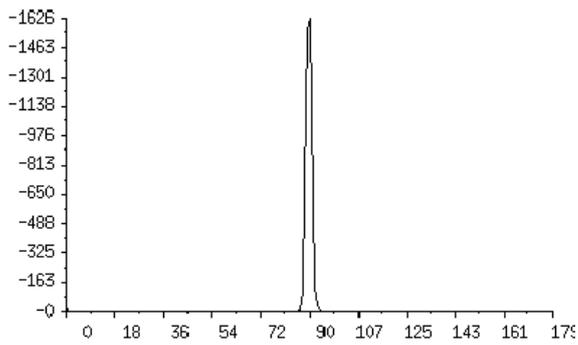
Segmento 3, 89°

■ Average heading : 8.7432  
■ Standard deviation : 31.5069  
■ Maximum found for : 0



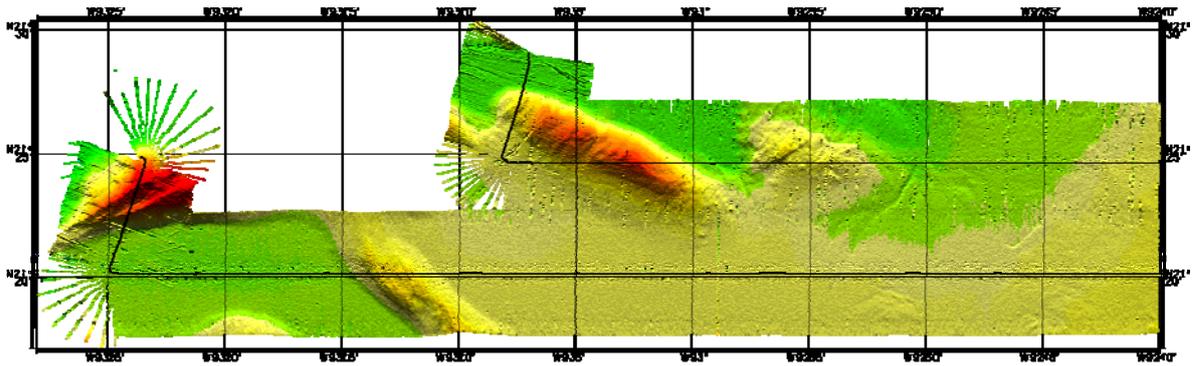
Segmento 4, 0°

■ Average heading : 89.5572  
■ Standard deviation : 12.2981  
■ Maximum found for : 90

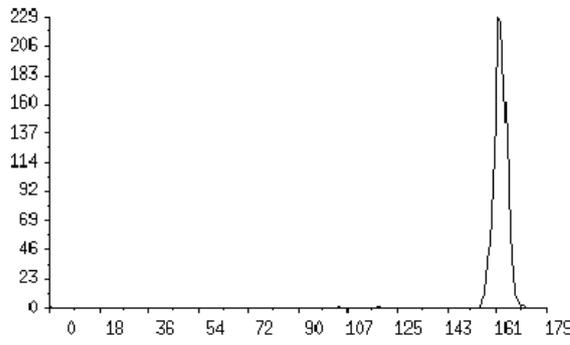


Segmento 5, 90°

SURVEY SO174-2\_22

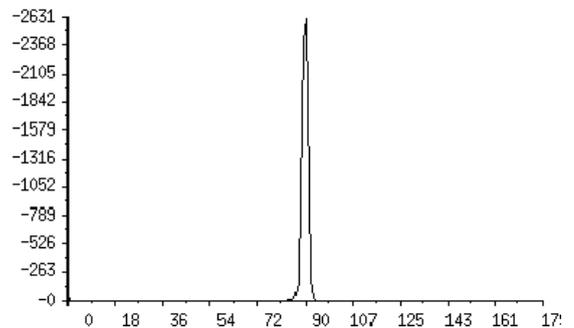


■ Average heading : 161,4272  
 ■ Standard deviation : 13,9580  
 ■ Maximum found for : 162



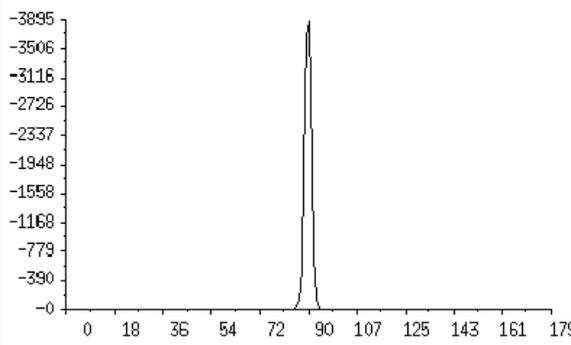
Segmento 1, 162°

■ Average heading ; 89,2681  
 ■ Standard deviation ; 11,2275  
 ■ Maximum found for : 90



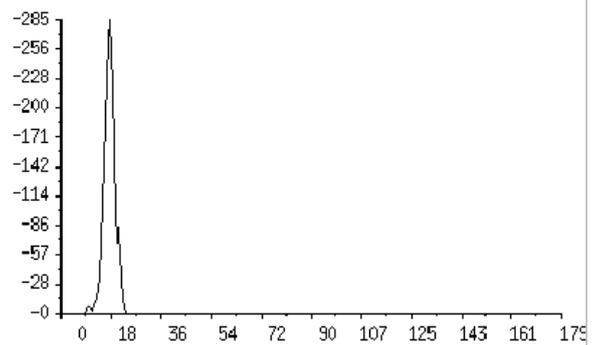
Segmento 2, 90°

■ Average heading ; 90,0493  
 ■ Standard deviation ; 2,9553  
 ■ Maximum found for : 90



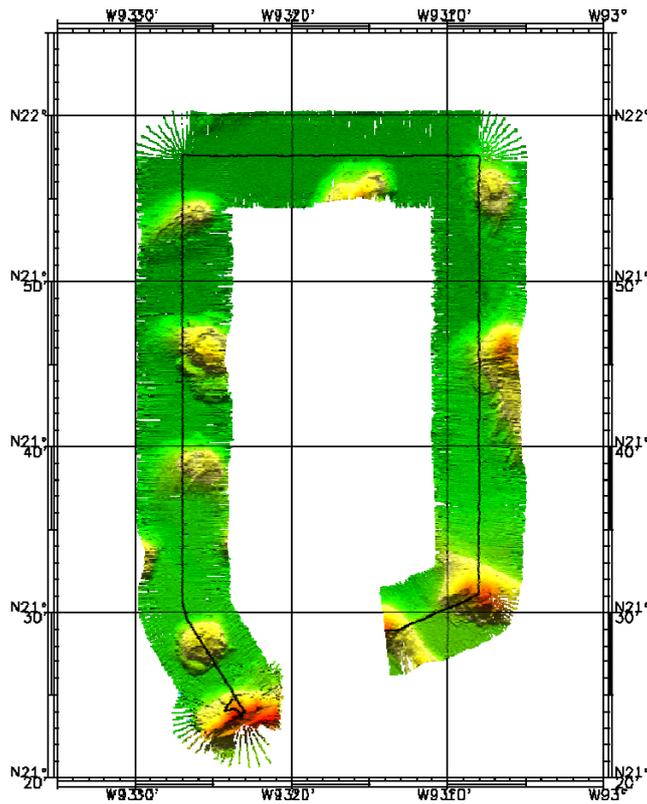
Segmento 3, 90°

■ Average heading : 18,0095  
 ■ Standard deviation : 2,0832  
 ■ Maximum found for : 18

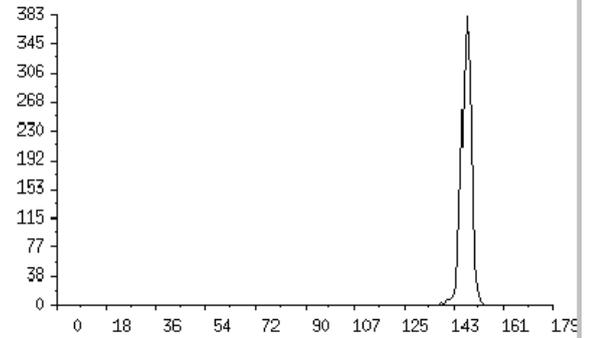


Segmento 4, 18°

SURVEY SO174-2\_23

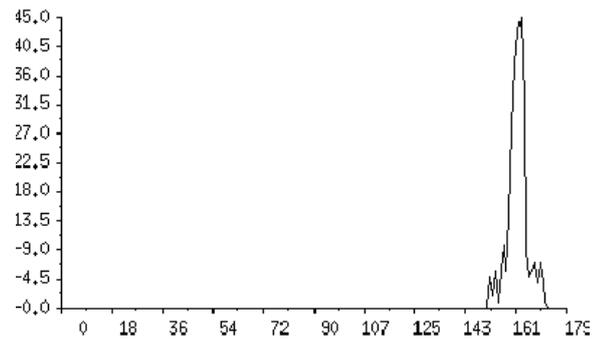


- Average heading : 148,2912
- Standard deviation : 1,9721
- Maximum found for : 148



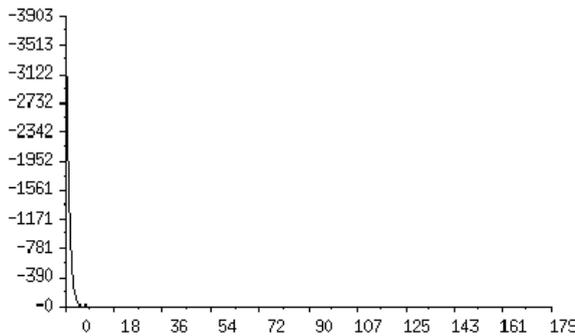
Segmento 1, 148°

- Average heading : 162,4729
- Standard deviation : 3,6779
- Maximum found for : 163



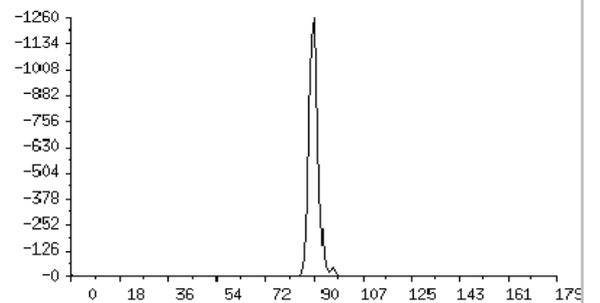
Segmento 2, 163°

- Average heading : 2,5253
- Standard deviation : 12,0421
- Maximum found for : 0



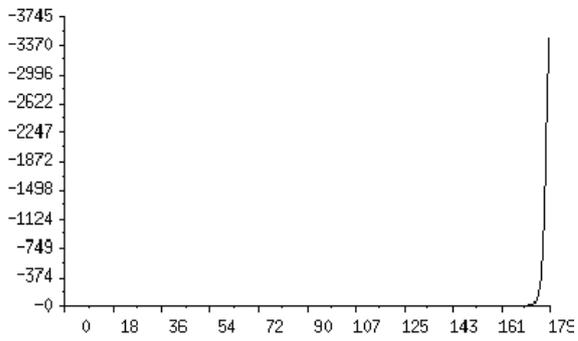
Segmento 3, 0°

- Average heading : 89,7875
- Standard deviation : 10,7643
- Maximum found for : 90



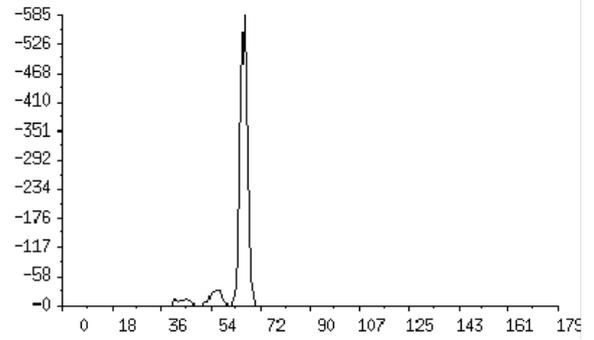
Segmento 4, 90°

- Average heading : 178.3474
- Standard deviation : 5.9569
- Maximum found for : 179



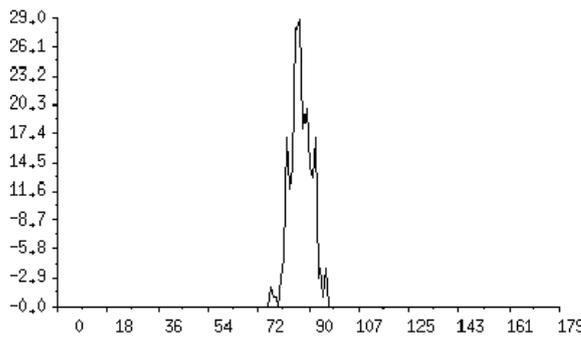
Segmento 5, 179°

- Average heading : 64.3550
- Standard deviation : 5.4253
- Maximum found for : 66

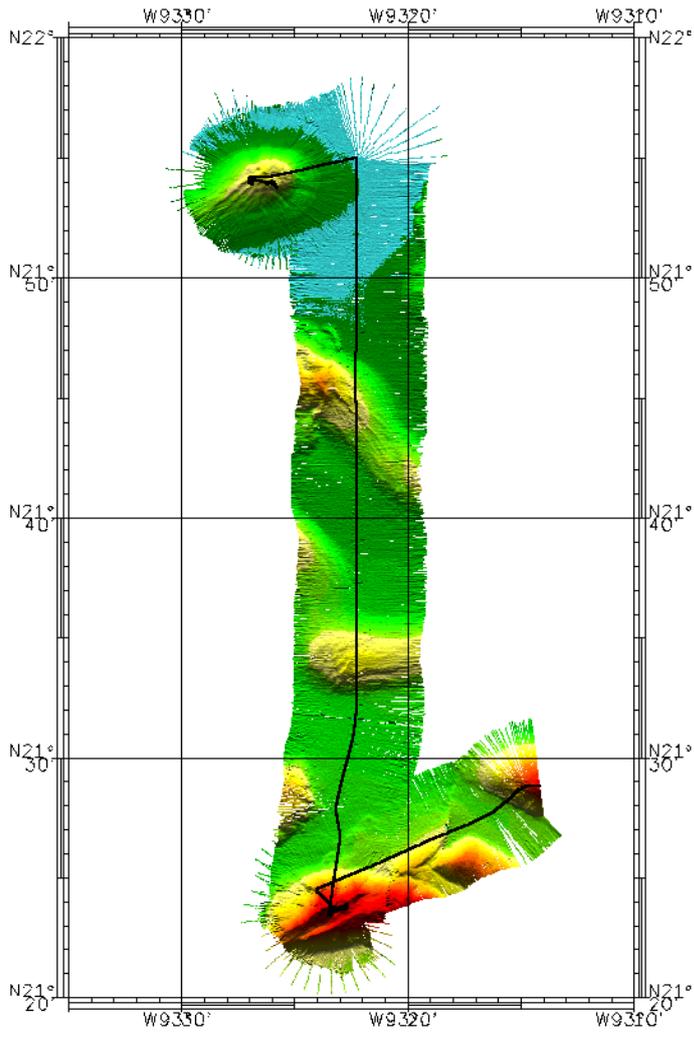


Segmento 6, 66°

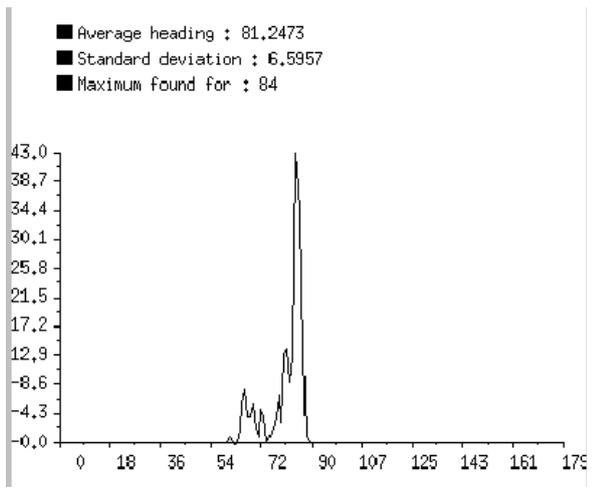
- Average heading : 87.3982
- Standard deviation : 3.6766
- Maximum found for : 87



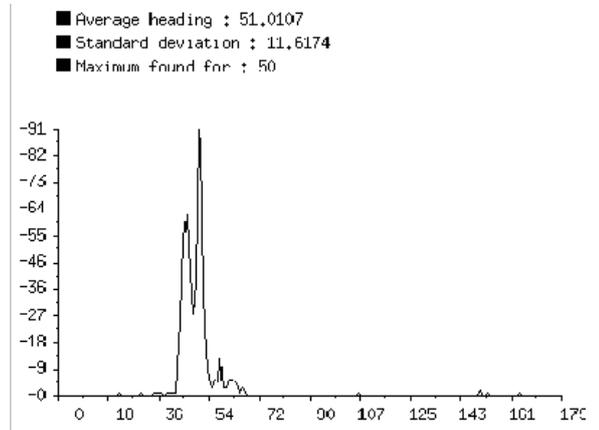
Segmento 7, 87°



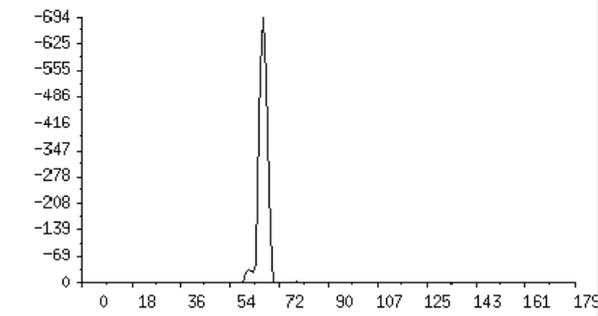
**SURVEY SO174-2\_24**



**Segmento 1, 84°**

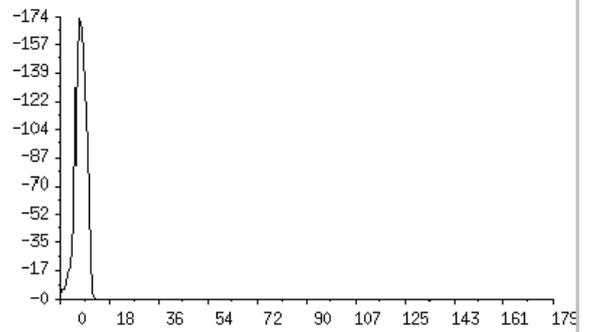


- Average heading : 66,2249
- Standard deviation : 3,0929
- Maximum found for : 66

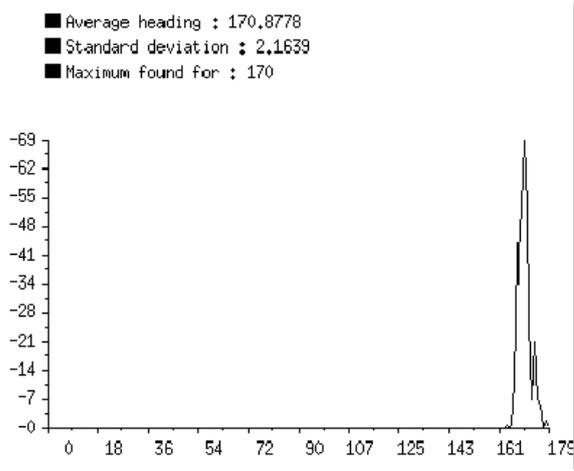


**Segmento 3, 66°**

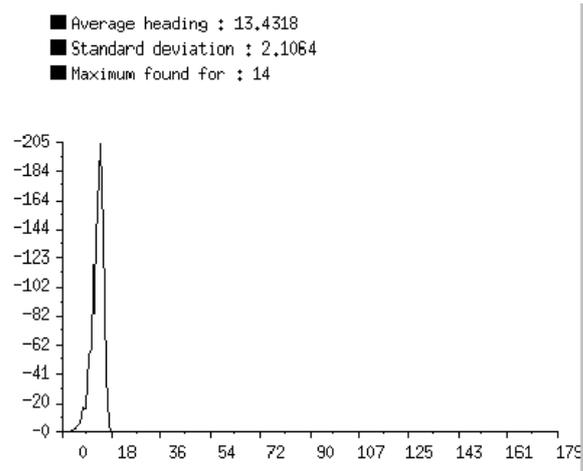
- Average heading : 7,9983
- Standard deviation : 1,9424
- Maximum found for : 7



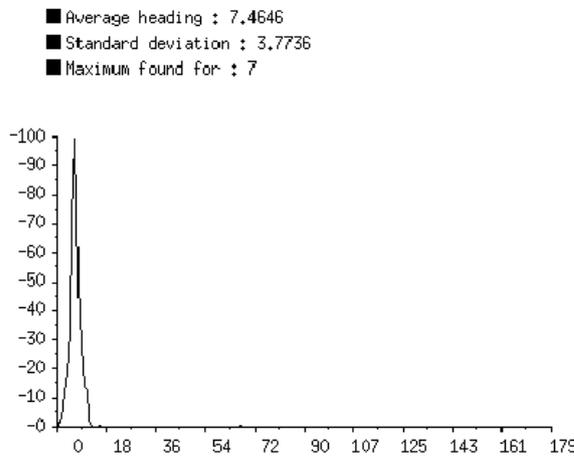
**Segmento 4, 7°**



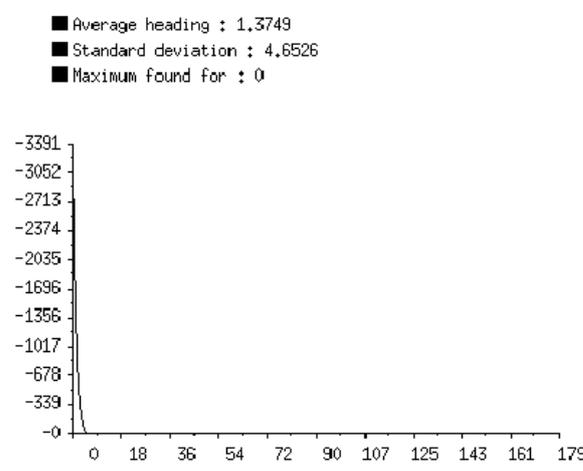
Segmento 5, 170



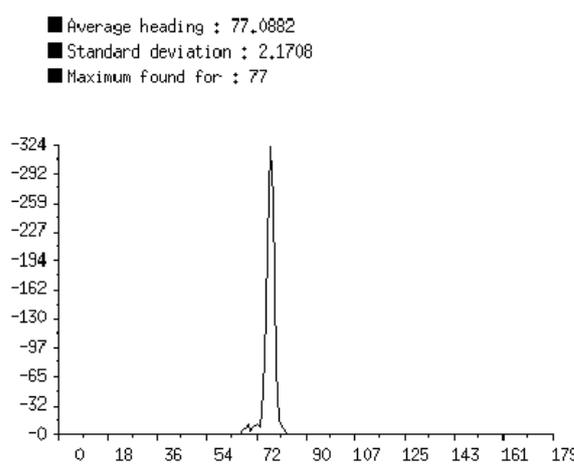
Segmento 6, 14°



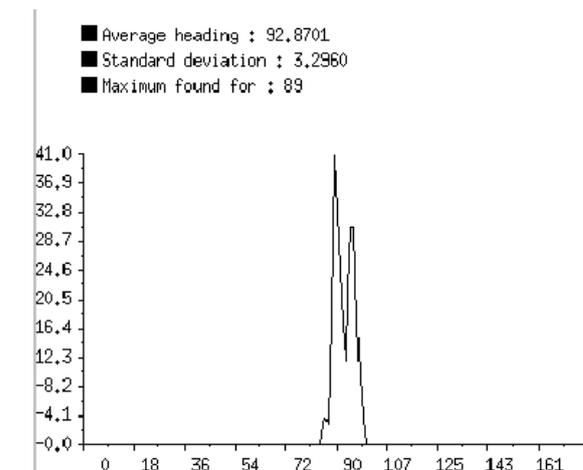
Segmento 7, 7°



Segmento 8, 0°

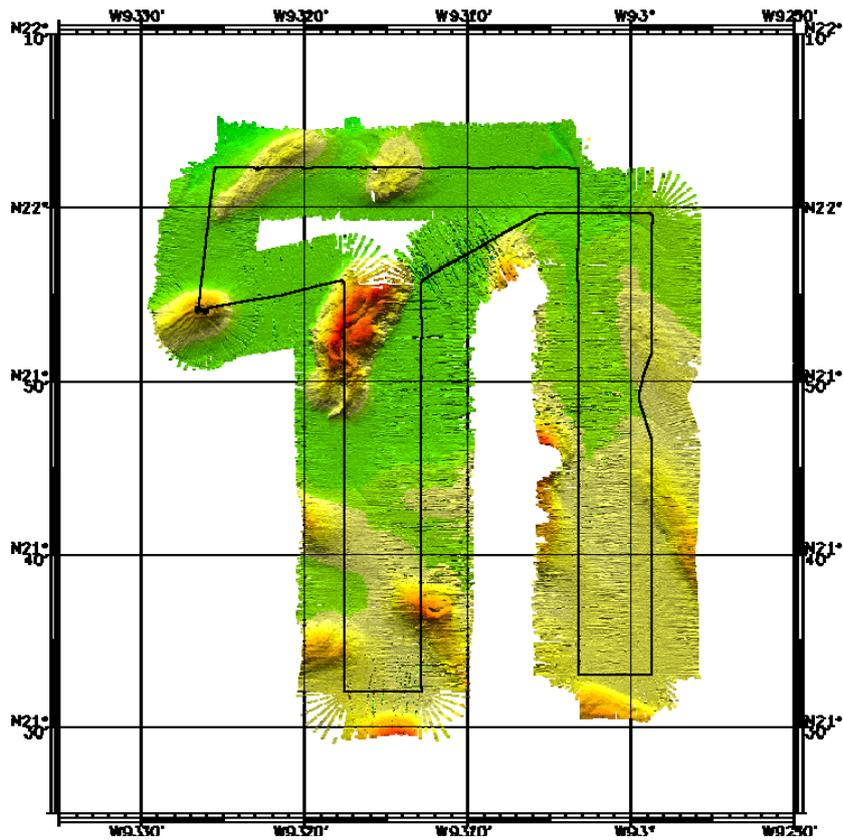


Segmento 9, 77°



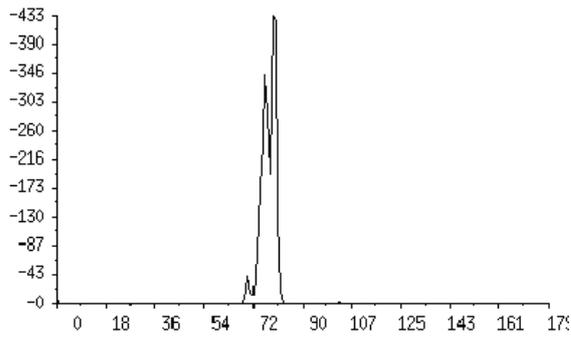
Segmento 10, 89°

SURVEY SO174-2\_25

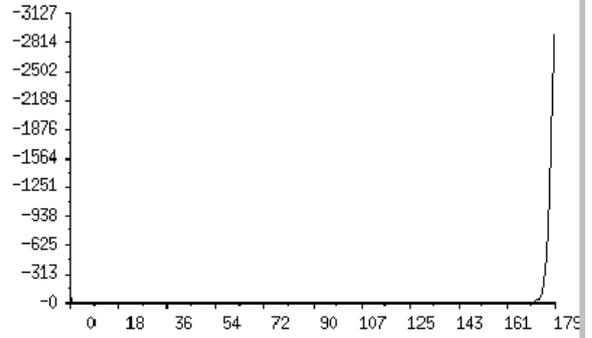


■ Average heading : 77.6410  
 ■ Standard deviation : 7.1917  
 ■ Maximum found for : 79

■ Average heading : 171.1805  
 ■ Standard deviation : 30.5548  
 ■ Maximum found for : 179

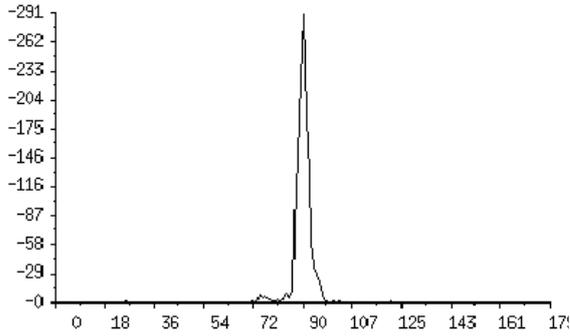


Segmento 1, 79°



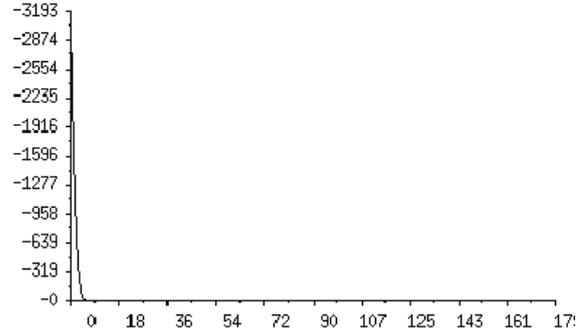
Segmento 2, 179°

■ Average heading : 90,2138  
 ■ Standard deviation : 7,0827  
 ■ Maximum found for : 90



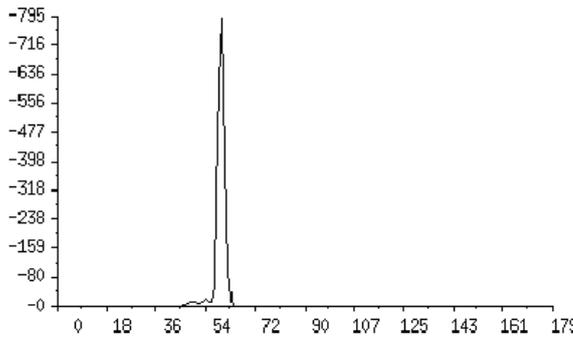
Segmento 3, 90°

■ Average heading : 1,7153  
 ■ Standard deviation : 6,5501  
 ■ Maximum found for : 0



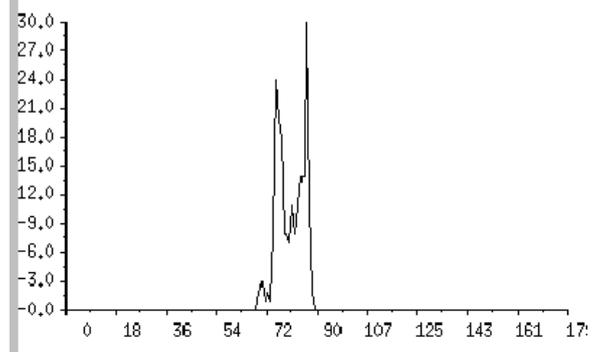
Segmento 4, 0°

■ Average heading : 59,7374  
 ■ Standard deviation : 2,6899  
 ■ Maximum found for : 60



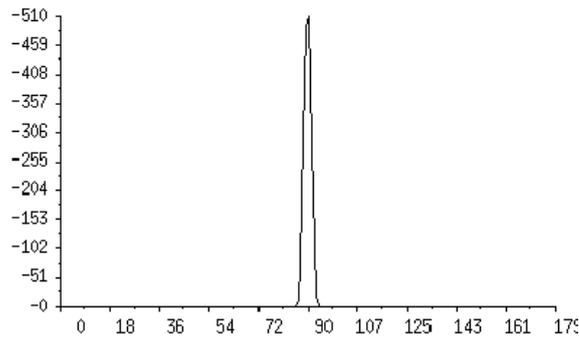
Segmento 5, 60°

■ Average heading : 80,7770  
 ■ Standard deviation : 4,8082  
 ■ Maximum found for : 86



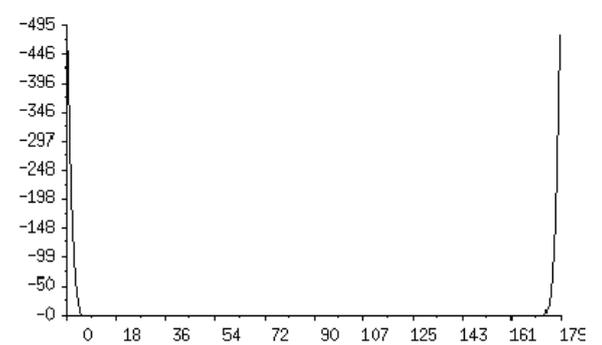
Segmento 6, 86°

■ Average heading : 90,0541  
 ■ Standard deviation : 1,3377  
 ■ Maximum found for : 90



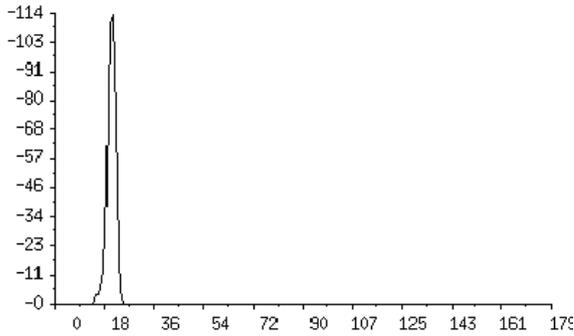
Segmento 7, 90°

■ Average heading : 3,9280  
 ■ Standard deviation : 1,5572  
 ■ Maximum found for : 0



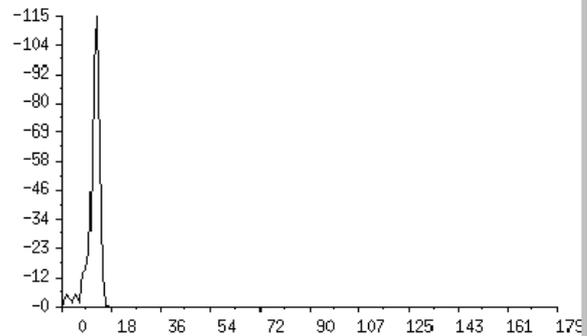
Segmento 8, 0°

■ Average heading : 20,9881  
 ■ Standard deviation : 1,4755  
 ■ Maximum found for : 21



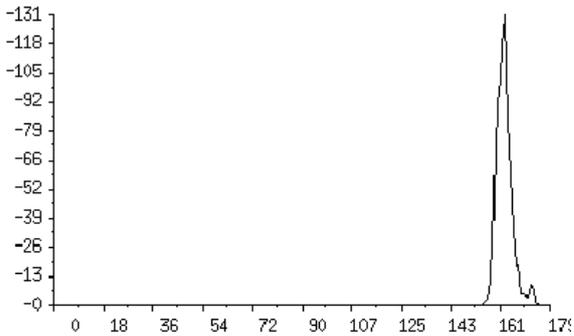
Segmento 9, 21°

■ Average heading : 12,2758  
 ■ Standard deviation : 2,4829  
 ■ Maximum found for : 13



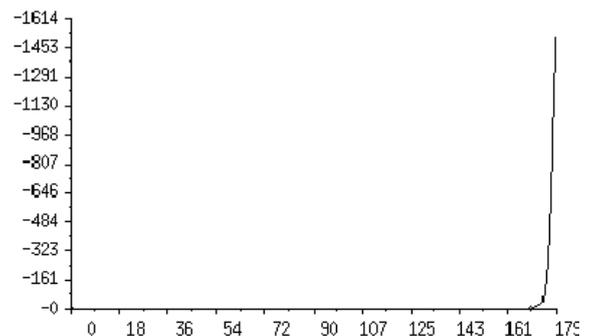
Segmento 10, 13°

■ Average heading : 163,3626  
 ■ Standard deviation : 2,9440  
 ■ Maximum found for : 163



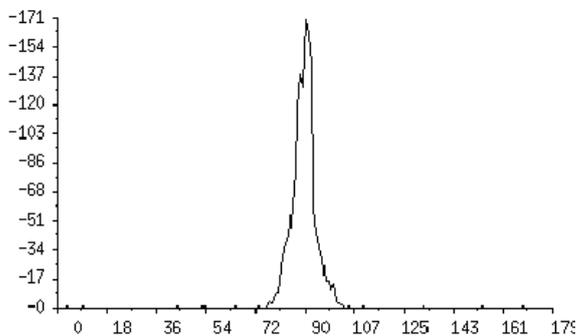
Segmento 11, 163°

■ Average heading : 175,7416  
 ■ Standard deviation : 18,9070  
 ■ Maximum found for : 179



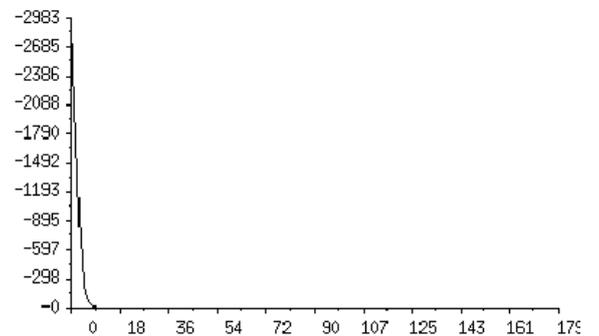
Segmento 12, 179°

■ Average heading : 89,7805  
 ■ Standard deviation : 6,7182  
 ■ Maximum found for : 90



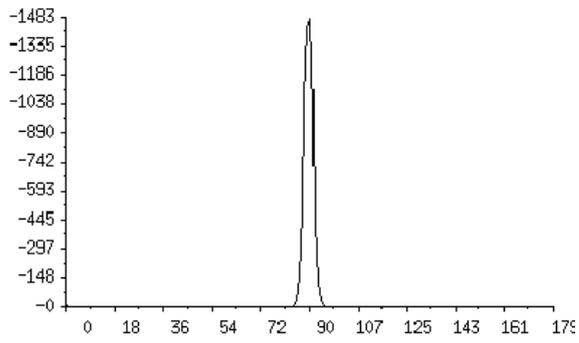
Segmento 13, 79°

■ Average heading : 4,4054  
 ■ Standard deviation : 17,8794  
 ■ Maximum found for : 0



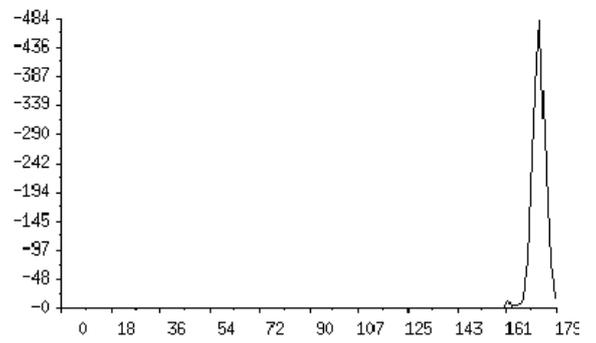
Segmento 14, 179°

■ Average heading : 89.7448  
■ Standard deviation : 8.6341  
■ Maximum found for : 90



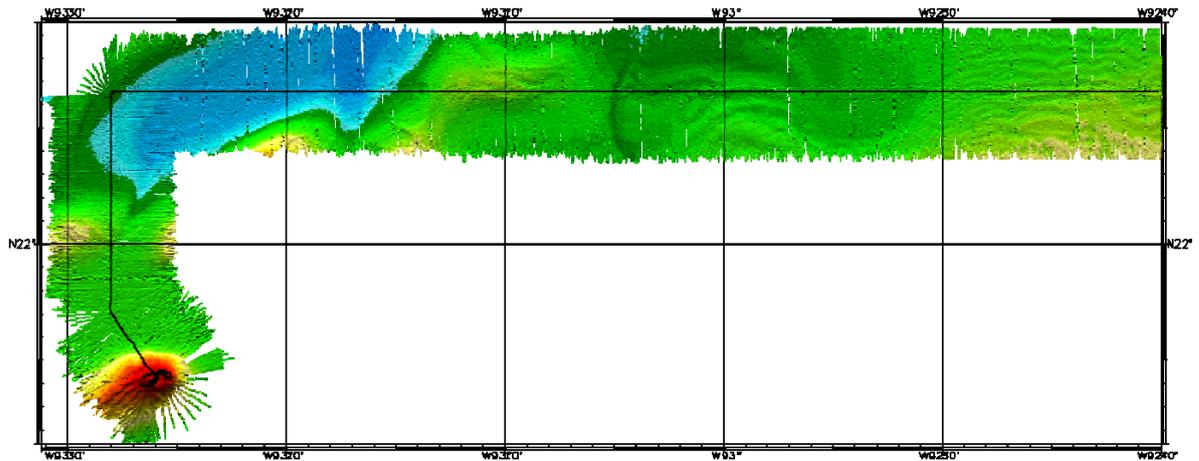
Segmento 15, 79°

■ Average heading : 172.8825  
■ Standard deviation : 7.9605  
■ Maximum found for : 173

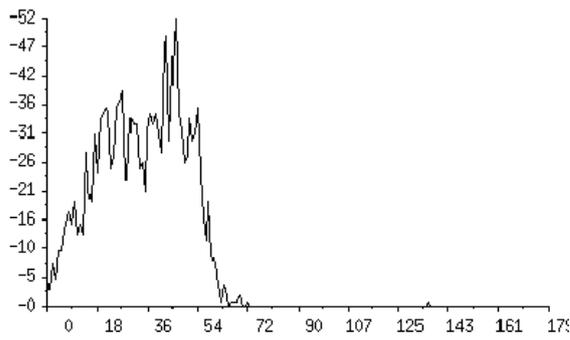


Segmento 16, 179°

SURVEY SO174-2\_26

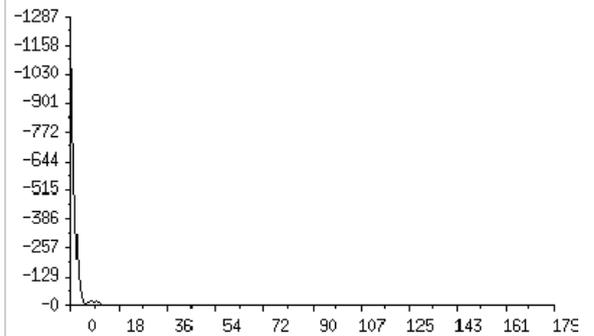


■ Average heading : 34.2185  
 ■ Standard deviation : 15.1521  
 ■ Maximum found for : 46



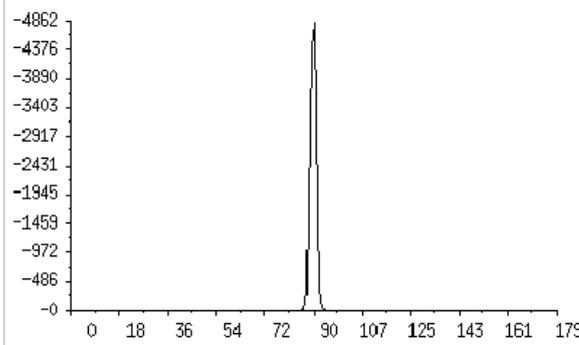
Segmento 1, 46°

■ Average heading : 1.8236  
 ■ Standard deviation : 5.8493  
 ■ Maximum found for : 0



Segmento 2, 0°

■ Average heading : 89.9719  
 ■ Standard deviation : 2.5000  
 ■ Maximum found for : 90



Segmento 3, 90°