

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTUDIO GEOFÍSICO PARA LA EVALUACIÓN DE
AMENAZAS GEOLÓGICAS EN PERFORACIONES COSTA
AFUERA AL NORTE DE LA PENÍNSULA DE PARAGUANÁ**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Moreno M. Diego A.
para optar al Título de
Ingeniero Geofísico

Caracas, diciembre de 2010

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO GEOFÍSICO PARA LA EVALUACIÓN DE AMENAZAS GEOLÓGICAS EN PERFORACIONES COSTA AFUERA AL NORTE DE LA PENÍNSULA DE PARAGUANÁ

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Antonio Ughi

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Adriana González

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Diego A. Moreno M.
para optar al Título de
Ingeniero Geofísico

Caracas, diciembre de 2010

Caracas, (diciembre, 2010)

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Diego Alfonso Moreno Marrero, titulado:

“Estudio Geofísico para la evaluación de amenazas geológicas en perforaciones costa afuera al norte de la Península de Paraguaná”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero geofísico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Prof. Francisco Bolívar
Jurado

Prof. Jesús Gonzales
Jurado

Prof. Antonio Ughi
Tutor Académico

DEDICATORIA

A Rafael Adolfo Moreno Marrero†
Un ejemplo a seguir

AGRADECIMIENTOS

A mi madre Ana Isabel por su apoyo incondicional que me permitió convertirme en la persona que soy ahora. A mi familia, en especial a mi Padre, a mi Abuela y a mi hermana por su apoyo en momentos de necesidad.

A mis tutores Adriana Gonzalez y Antonio Ughi por su atención y colaboración para realizar este trabajo.

A la empresa Incostas por haberme suministrado los datos y permitido trabajar en sus instalaciones. Al Departamento de Geofísica, en especial a Keyla Quilen y Robert Ayán y al Departamento de Oceanografía, en especial a Gilberto Gonzalez por su atención y colaboración.

A mis compañeros y profesores de la Universidad Central de Venezuela por haberme acompañado a lo largo estos 5 años

A Anne Alejandra por su apoyo en este trabajo y durante los últimos 3 años de la carrera (sin ti hubiera sido más difícil).

Diego A. Moreno M.

**ESTUDIO GEOFÍSICO PARA LA EVALUACIÓN DE AMENAZAS
GEOLÓGICAS EN PERFORACIONES COSTA AFUERA AL NORTE DE LA
PENÍNSULA DE PARAGUANÁ.**

Tutor académico: Prof. Antonio Ughi. Tutor industrial: Ing. Adriana Gonzalez

Palabras clave: amenazas geológicas, geofísica somera, costa afuera, Sísmica de alta resolución.

Resumen: se levantaron 20 km lineales en un área de 1 km², para la caracterización somera simultánea con geofísica monocal que incluye, ecosonda monohaz, perfilador de fondo tipo Pinger y tipo Sparker y Sonar de barrido lateral, posteriormente, se realizó el levantamiento de sísmica multicanal de alta resolución en la misma área y utilizando el mismo diseño de levantamiento. El estudio consistió en el procesamiento e interpretación de los datos adquiridos de sísmica monocal de alta y muy alta resolución y la interpretación de la sísmica multicanal de alta resolución para evaluar la presencia de características geológicas que pudieran representar una amenaza para la instalación de plataformas autoelevadizas tipo *jack-up* y para la perforación, enfocándose en la metodología empleada para realizar esta evaluación. Se contó además con información geotécnica obtenida de una perforación realizada en el sitio; que consiste en el perfil geotécnico de los primeros 45 m del subsuelo y cálculos de capacidad de carga del perfil de suelo. A partir de los mapas generados de batimetría y sonar de barrido lateral se pudo determinar un fondo marino con pendientes muy suaves, menores al 0,5 % y la ausencia de obstáculos, zonas levantadas o depresiones que puedan representar una amenaza para las instalaciones. Se presentaron los análisis de falla en una “matriz de riesgo” en la que se evalúa la eventualidad de ocurrencia de falla según las posibles y de acuerdo a los datos obtenidos; en la que destaca la ausencia de acumulaciones de gas someras que representen una amenaza para perforación y, por otro lado, el perfil de carga del suelo somero y la disposición de estos sedimentos se halló favorable para la ocurrencia de falla por punzonamiento e inestabilidad del subfondo marino.

TABLA DE CONTENIDO

Figura

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN.....	ii
TABLA DE CONTENIDO.....	v
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABLAS	xi
LISTA DE APÉNDICES	xii
CAPÍTULO I.....	1
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.2. Localización del área de estudio	3
1.3. Objetivo General	4
1.4. Objetivos Específicos.....	4
1.5. Justificación.....	4
1.6. Marco Geológico.....	5
1.6.1. Evolución Tectónica de la Cuenca de Falcón	5
1.6.2. Contexto Estructural.....	10
1.6.3. Contexto Estratigráfico	12
1.6.3.1. Formación Paraguaná (Plioceno Temprano) (Tomado del léxico estratigráfico de Venezuela).....	12
CAPÍTULO II	14
2. Marco Teórico	14
2.1. Alcance y utilización de los métodos geofísicos.....	15
2.1.1. Métodos sísmicos.....	15
2.1.1.1. Sísmica analógica o monocanal.....	15
2.1.1.2. Sísmica digital o multicanal.....	22
2.2. Análisis de amenazas geológicas para instalaciones tipo Jack-up.	25

CAPITULO III.....	32
3. Procesamiento e Interpretación	32
3.1. Batimetría (Ecosonda monohaz de doble frecuencia).....	33
3.2. Sonar de Barrido Lateral	40
3.3. Perfilador de fondo tipo Pinger	45
3.4. Perfilador de Fondo Tipo Sparker.....	51
3.5. Sísmica Multicanal.....	56
3.6. Correlación.....	64
CAPITULO IV.....	68
4. Resultados y análisis	68
4.1. Geología local	68
4.2. Identificación de amenazas geológicas	74
CAPITULO V	83
5. Conclusiones y recomendaciones.....	83
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86
APÉNDICES.....	89

LISTA DE FIGURAS

Figura	Pág
Figura 1.1. Croquis de ubicación del área de estudio (modificado de Google Earth ®).....	3
Figura 1.2. Ubicación de los depocentros y áreas positivas en la Cuenca de Falcón y elementos. Modificado de Ghosh (1.997).	8
Figura 1.3. Mapa de fallas activas cuaternarias en la región falconiana. Modificado de Audemard, (2001).....	11
Figura 1.4. Croquis de ubicación de la Formación Paraguaná. (Tomado del léxico estratigráfico de Venezuela).	12
Figura 1.5. Croquis de ubicación del Miembro Amuay. (Tomado del léxico estratigráfico de Venezuela).	13
Figura 1.6. Croquis de ubicación del Miembro El Hato. (Tomado del léxico estratigráfico de Venezuela).	13
Figura 2.1. Unidad de monitoreo de ecosonda monohaz (tomado de Marimatech E-Sea Sound MP35 Brochure).....	16
Figura 2.2. Unidad transductora y unidad transreptora del sonar de barrido lateral.....	17
Figura 2.3. Desempeño de la fuente acústica 3.5 kHz, modelo GeoPulse Pinger Geoacoustics (Modificado de: http://www.geoacoustics.com).....	19
Figura 2.4. Perfil sísmico ejecutado con el empleo simultáneo de tres fuentes acústicas (Souza et al. 2008).	20
Figura 2.5. Foto de la unidad tranceptora y la unidad transductora tipo Pinger (tomado de Geopulse, s/f, Brochure)	21
Figura 2.6. Imagen de sísmica digital multicanal de alta resolución que muestra condiciones estratigráficas y estructurales (tomado de Incostas, 2009).	23
Figura 2.7. Gráfico estadístico de fallas en plataformas tipo jack-up (tomado de Dier. A, et.al, 2004).....	27

Figura 2.8. Gráficos de capacidad de carga vs profundidad que presentan potencial de falla por punzonamiento (Tomado de Dier, A. et. al, 2004).....	28
Figura 2.9. Daños generados a una plataforma tipo jack-up como consecuencia del desnivel abrupto causado por una falla por punzonamiento (tomado de Ocean travellers, hydrographyc center, s/f).	29
Figura 2.10. Plataforma tipo <i>jack-up</i> luego de una explosión. Ttomado de Ocean travellers, hydrographyc center, s/f.....	31
Figura 3.1. Mapa base de la adquisición.....	32
Figura 3.2. Vista de la ventana de procesamiento del programa HYPACK MAX, donde se observa un error en archivo digital.	34
Figura 3.3. Muestra de una sección de los registros de batimetría en papel en la que se observó un error en el registro digital.	35
figura 3.4. Vista de la ventana de procesamiento del programa HYPACK MAX ®. En la que se observa un perfil batimétrico ya corregido.	36
Figura 3.5. Ubicación de los equipos en la embarcación. A: Antena GPS. B: Pinger. C: Ecosonda. D: Sonar de barrido lateral. (modificado de Incostas, 2009)	37
Figura 3.6. Diagrama de cálculo de ubicación de equipos. A: ubicación relativa de la antena GPS. B: ubicación relativa de la ecosonda. β : rumbo de la embarcación.	38
Figura 3.7. Mapa batimétrico. Método de interpolación Kriging, mallado 20X20.....	39
Figura 3.8. Imagen de Sonar de barrido lateral sin procesamiento.....	41
Figura 3.9. Imagen de Sonar de barrido lateral con T.V.G ajustado.....	41
Figura 3.10. Imagen del osciloscopio donde se aprecia el espectro de frecuencia en tiempo del registro de sonar de barrido lateral para un instante determinado.....	42
Figura 3.11. Grabación del mosaico.	43
Figura 3.12. Imagen de mosaico de Sonar de Barrido Lateral con batimetría superpuesta.....	44

Figura 3.13. Registro de Pinger sin procesar.	45
Figura 3.14. Registro de Pinger con la ganancia variante en tiempo ajustada.....	46
Figura 3.15. Ejemplo de ajuste de ganancia variante en tiempo (T.V.G).	46
Figura 3.16. Espectro de amplitud y filtro pasabanda Pinger.	47
Figura 3.17. Registro de Pinger procesado.	47
Figura 3.18. Línea central de Pinger interpretada.	48
Figura 3.19. Zona de apantallamiento.....	50
Figura 3.20. Registro de Sparker sin procesar.	51
Figura 3.21. Registro de Sparker con la ganancia variante en tiempo ajustada.....	52
Figura 3.22. Espectro de amplitud y filtro pasabanda Sparker.	52
Figura 3.23. Registro de Sparker con el filtro aplicado	53
Figura 3.24. Corrección por gamma.	53
Figura 3.25. Sección de Sparker procesada.	53
Figura 3.26. Interpretación de perfilador de fondo tipo Sparker.....	54
Figura 3.27. Línea central atributo de amplitud.....	57
Figura 3.28. Línea central en atributo de fase instantánea.....	58
Figura 3.29. Línea central en atributo de envolvente de amplitud.....	59
Figura 3.30. Línea central en atributo de amplitud interpretada.....	61
Figura 3.31. Gráfico de velocidad vs tiempo doble de viaje.....	62
Figura 3.32. Correlación de la línea central en dirección este-oeste.....	65
Figura 3.33 Correlación de la línea central en dirección norte-sur.....	66
Figura 4.1. Ambientes sedimentarios. Modificado de Holzt T. (2010)	69
Figura 4.2. Nivel eustático de los últimos 100 mil años (modificado de Sea level, 2010).....	69
Figura 4.3 Ambiente sedimentario actual que emula posiblemente el paleo ambiente de los depósitos someros (modificado de Google Earth ®).....	71
Figura 4.4. Superficies del subsuelo somero.....	72
Figura 4.5 Superficies del subsuelo profundo.....	73
Figura 4.6. Mapa isópaco H0- H3 de sedimentos recientes arcillosos.....	75

Figura 4.7. Mapa isópaco H3- H4 (material bioclástico) indicando posibles acumulaciones de gas.....	76
Figura 4.8. Mapa Estructural de H3 (material bioclástico).....	77
Figura 4.9. Secciones de la línea central donde se muestran Paleoderrumbes y zonas susceptibles	78

LISTA DE TABLAS

Figura	Pág
Tabla 2.1. Posibles amenazas para plataformas tipo jack-up y métodos de investigación para su evaluación.....	25
Tabla 3.1 Resolución aproximada para cada paquete estratigráfico interpretado.....	63
Tabla 3.2 Resolución aproximada para cada horizonte interpretado	63
Tabla 4.1 Análisis de existencia de amenazas geológicas	78

LISTA DE APÉNDICES

Figura	Pág
Apéndice 1: Medición de la velocidad de propagación de la onda de sonido en el agua	89
Apéndice 2: Predicciones de Oleaje.....	91
Apéndice 3: Estudio geotécnico.....	93
Apéndice 4: Elementos principales de una plataforma tipo Jack-up	96

CAPÍTULO I

1. Introducción

1.1. Planteamiento del problema

Con miras a atender la demanda nacional de gas, y apuntalar el crecimiento de la industria, principalmente por los requerimientos de los sectores petrolero, eléctrico y petroquímico, así como fomentar el negocio internacional de gas, el Ministerio de Energía y Petróleo (MENPET) ha planteado dentro del Plan Nacional de Gas varios proyectos de desarrollo del potencial gasífero costa afuera. Sin embargo las costas Venezolanas no poseen suficientes estudios de las características del fondo y subfondo marino, necesarios para realizar los análisis de riesgos geológicos y de condiciones de sitio para las actividades de exploración y explotación.

Las compañías petroleras suelen llevar a cabo estudios sísmicos de alta resolución y estudios de sitio, los cuales delimitan posibles obstáculos y peligros de perforación, colocación de tuberías o estructuras en el fondo marino. La experiencia permite reconocer varios peligros a la hora de perforar, entre ellos: paleocanales, estratos débiles, acumulaciones de gas someras y fallas someras. Entre 1955 y 1972 a nivel mundial había una gran explosión en plataformas costa afuera por lo menos una vez al año; ocasionados, principalmente por acumulaciones de gas somero ubicados entre los primeros 200 m de profundidad (zona en la cual no se utiliza protección en la perforación), además estas acumulaciones no pueden ser apreciadas por la sísmica de prospección debido a la banda de frecuencia muy baja que se utiliza (Parkinson 2001).

Por experiencia en la empresa Incostas se manejan estos estudios de identificación de amenazas geológicas como un requerimiento previo en la exploración de campos en costa afuera, de esta forma se caracteriza el fondo marino

de las costas Venezolanas y se disminuye el riesgo durante la exploración/producción.

El siguiente trabajo se enfoca en mostrar la metodología utilizada en la evaluación de amenazas geológicas para perforaciones en costa afuera e instalaciones destinadas para tal fin, mediante la integración de datos geofísicos de alta resolución (sísmica monocanal y sísmica multicanal), junto con perforaciones geotécnicas, para lo que fueron procesados, interpretados y analizados datos adquiridos para tal fin al norte de la Península de Paraguaná.

1.2. Localización del área de estudio

Por razones de confidencialidad no se muestran las coordenadas exactas del área de estudio; sin embargo ésta se encuentra ubicada al nor-noroeste de la Península de Paraguaná (Figura 1.1).

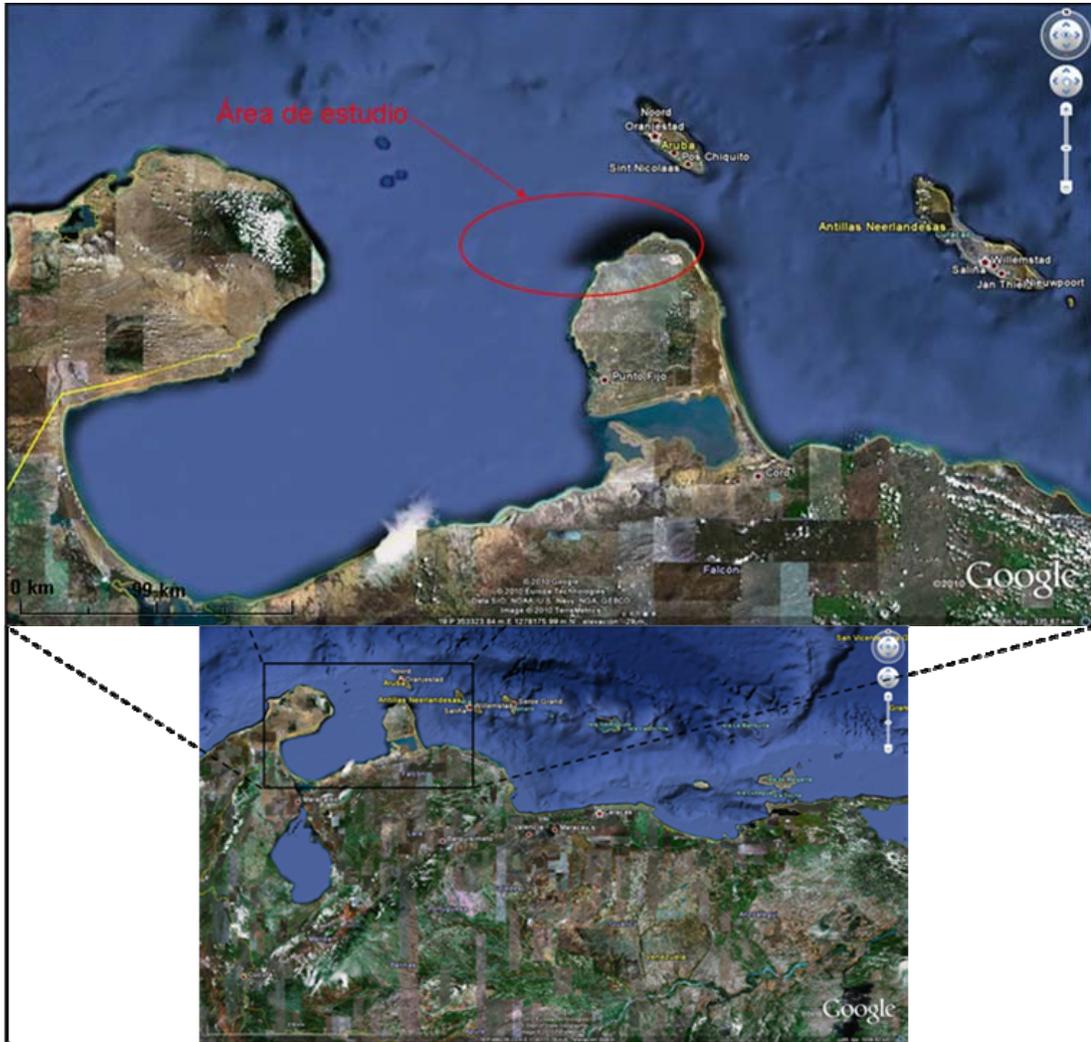


Figura 1.1. Croquis de ubicación del área de estudio (modificado de Google Earth ®)

1.3. Objetivo General

- Evaluar las amenazas geológicas que puedan afectar instalaciones petroleras costa afuera integrando datos geofísicos de alta resolución.

1.4. Objetivos Específicos

- Obtener la morfología del fondo marino.
- Detectar y ubicar posibles obstáculos sobre el fondo marino que representen un riesgo para la exploración del área.
- Integrar datos geofísicos de sísmica de alta resolución.
- Evaluar la aplicabilidad de procesamiento avanzado en la sísmica multicanal.
- Correlacionar datos geofísicos con la perforación geotécnica realizada en el área.
- Identificar las amenazas geológicas, como fallas geológicas, depresiones, diapiros, cambios de pendiente, deslizamientos de tierra, objetos metálicos sobre el fondo, acumulaciones de gas somero, entre otros.

1.5. Justificación

La geofísica marina de alta resolución constituye la principal herramienta utilizada para la evaluación de amenazas geológicas que puedan afectar la integridad de instalaciones y operaciones costa afuera. Los estudios integrados de evaluación de amenazas geológicas en el fondo y subfondo marino permiten prevenir accidentes como explosiones producidas por acumulaciones someras de gas en el subsuelo, así como conocer las propiedades del suelo marino para definir parámetros de construcción que permitan preservar las infraestructuras costa afuera en el tiempo, por un relativo bajo costo.

Adicionalmente, este estudio aporta información para un mejor conocimiento de la configuración estratigráfica y estructural del fondo y subfondo marino de la costa noroeste de Paraguaná, lo que permite definir el comportamiento de la depositación y evolución tectónica más reciente en el norte de la cuenca de Falcón.

La relevancia de este estudio se basa en el desarrollo de la geofísica que, por lo general no son descritos en los estudios de pre y post-grado universitarios en Venezuela, ya que éstos se enfocan en la prospección de hidrocarburos, en consecuencia representa un aprendizaje adicional y ejemplifica este tipo de trabajo como alternativa para generaciones futuras.

1.6. Marco Geológico

1.6.1. Evolución Tectónica de la Cuenca de Falcón

Como resultado directo de la interacción entre las placas Caribe y Suramérica al norte de Venezuela, la región occidental de Falcón presenta una importante complejidad geológica en su configuración estratigráfica-estructural. Los procesos de generación e inversión de lo que fue en un pasado geológico la Cuenca de Falcón, fueron propiciados por la activación de procesos tectónicos y estructurales relacionados con la cercanía de la Placa Caribe y con su paso hacia el este por el límite norte de la placa Suramericana.

En cuanto al mecanismo a partir del cual se generaron los depocentros que permitieron la sedimentación en la zona, parecen existir dos corrientes de pensamiento aceptadas en la actualidad. La primera de ellas establece que la configuración mostrada por la Cuenca de Falcón responde a un régimen distensivo que afectó la zona a partir del Eoceno.

Al respecto, Muessing (1982) postula que los depocentros se originaron por efectos transtensionales relacionados con la acción de fallas transcurrentes como las fallas de Oca y San Sebastián; de la misma manera Macellari (1995) propuso que se originaron debido a desplazamientos asociados a la acción de las fallas transcurrentes dextrales al norte de Venezuela, constituyendo una serie de cuencas *pull-apart* episuturadas; Ghosh y colaboradores (1997) igualmente asocian la generación de la cuenca a la acción de las fallas transcurrentes como la de Oca (dextral) y señala como responsable directo de la activación de estas fallas, el paso hacia el este de la Placa Caribe; y Pindell (1998) también clasificó a la cuenca de Falcón (junto con otras al norte de Venezuela) como cuenca *pull-apart* por el paso de la Placa Caribe y la activación de las fallas derivadas de este movimiento interplaca.

Mientras tanto, Audemard (1995) postula que el evento distensivo es de escala más regional, indicando una fase de rifting generalizada en todo el margen norte de Venezuela, de edad Eoceno Tardío-Oligoceno, correspondiente a la apertura de la Cuenca de Grenada, que a su vez, originó la apertura de la Cuenca de Falcón.

La segunda idea postulada al respecto, por Porras (2002) propone que la cuenca se desarrolló como resultado de un colapso interno detrás de un arco de islas (*back arc*) en un orógeno en flotación que colisionó y se suturó oblicuamente en el extremo norte de la placa suramericana.

En este punto, es importante resaltar que la Cuenca es típica de zonas distensivas, limitadas por fallamientos normales y con depocentros (grábenes) adyacentes a zonas positivas (*horsts*). Estos depocentros fueron variando progresivamente en respuesta al paso de la Placa Caribe hacia el Este. Su evolución en el tiempo geológico y los eventos que derivaron en la configuración actual de Falcón pueden resumirse de la siguiente manera:

Eoceno Tardío: ocurre sedimentación sólo en algunas depresiones o fosas y grábenes fallados, posterior al emplazamiento de las napas de Lara (debido a la continuación de la regresión cretácica). Ghosh, (1997) refiere: se depositan las

formaciones Cerro Misión, Cerro Campana, Esperanza, La Victoria, Mene Grande (de origen turbidítico en áreas restringidas; probablemente relacionado con el inicio de la actividad transcurrente de la Falla de Oca). Se encuentra activa la extensión simétrica de la Cuenca de Grenada hacia el norte y hacia el sur, a través de un rifting, (Audemard, 1995).

Oligoceno: Ghosh (1997) y Mendoza (2005) refieren que en este período se produjo el hundimiento y creación de los depocentros de la Cuenca de Falcón. Primero el Canal Falconiano (Oligoceno Temprano), de dirección Oeste-Este y después en el Oligo-Mioceno Temprano se formó el Surco de Urumaco y la Ensenada de la Vela, en sentido NO-SE. Las áreas emergidas en esta etapa son: Plataforma de Dabajuro y la Plataforma de Churuguara y el Alto de Coro-Paraguaná (Figura 1.2).

Continúa la extensión al norte de Venezuela, proceso que se prolonga hasta el límite Oligoceno-Mioceno Temprano y el estiramiento cortical alcanza el Banco de Saba al norte y la Cuenca de Falcón al sur (Audemard, 1995). Sobre este particular, Muessig (1982) y Ghosh (1997) indican que este adelgazamiento cortical provocó la inyección de magmas alcalinos en la cuenca de Falcón. Por su parte, Macellari (1995) y Ghosh (1997) plantean que para esta época comienza la actividad del fallamiento transcurrente dextral en el Norte de Venezuela, a lo largo del cual se genera la extensión que origina la Cuenca *Pull-Apart*. Las facies depositadas en esta época evolucionaron desde ambientes batiales (en los depocentros) hasta marino somero/ costero/ deltaico (en los flancos de la cuenca).

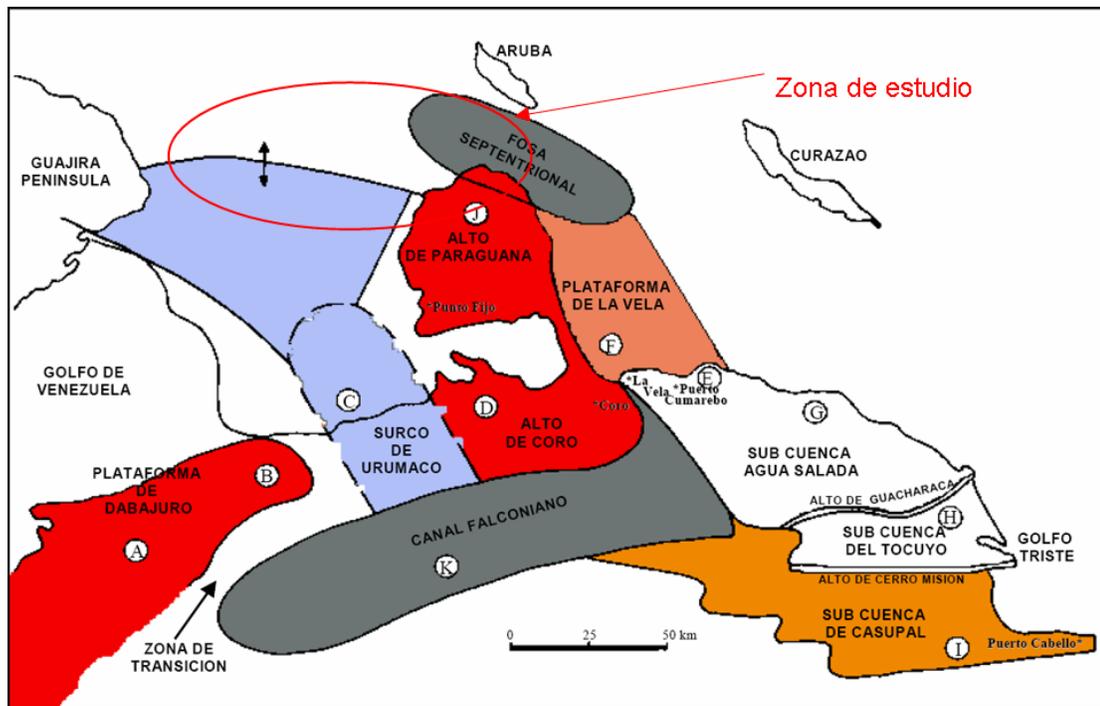


Figura 1.2. Ubicación de los depocentros y áreas positivas en la Cuenca de Falcón y elementos. Modificado de Ghosh (1.997).

Mioceno: el norte de Suramérica comienza a ser afectado por un régimen de esfuerzos compresivos noroeste-sureste a norte-sur, que provocan la orogénesis andina. Ocurre entonces, la inversión parcial de la Cuenca de Falcón; desarrollándose el anticlinorio de Falcón en el Mioceno Temprano. La Cuenca de Falcón dejó de existir como tal para convertirse en un cinturón sedimentario plegado. (Ghosh, 1997; Mendoza, 2005). Así mismo ocurre la instalación de un gran sistema de fallas lateral dextral a lo largo del margen sur de las cuencas Bonaire-Falcón, retomando las zonas debilitadas por la ruptura del Oligoceno y otros accidentes tectónicos en esta época (Audemard, 1995). Debido a la progradación inducida por el levantamiento de la cuenca, la sedimentación se hace más continental en la mayor parte de la misma, quedando restringida la sedimentación marino profunda al norte del anticlinorio y en algunos depocentros al este (Macellari, 1995; Audemard, 1995).

Plioceno: en ese período se cerró totalmente la porción occidental de la Cuenca de Falcón. En la parte basal del Plioceno se depositaron del oeste al este, las formaciones Codore, La Vela y El Veral, que es la más marina, con el mar abierto hacia el este. Con el avance del frente compresivo hacia el Norte se produjo la desestabilización de taludes pre-existentes y la generación de fallas normales lítricas con buzamiento hacia la cuenca, algunas de las cuales terminan en pliegues de tipo pie de talud, alineados en dirección NO-SE formando un cinturón de pliegues paralelos a la costa actual falconiana. (Mendoza, 2005). La migración del anticlinorio hacia el norte también afectó la sedimentación de la cuenca, presentándose depósitos continentales en la Plataforma de Dabajuro y en el sector nororiental y depósitos marinos asociados a la línea de costa actual y a la Península de Paraguaná.

Pleistoceno-Reciente: en este período el margen entre las placas presenta un componente mayormente transcurrente en dirección oeste-este. Estos movimientos generaron estructuras transpresivas. Este tipo de deformación está asociado al movimiento transcurrente de las fallas de Boconó y San Sebastián que afectan la sección pleistocena, (Mendoza, 2005). Durante el Pleistoceno ocurren cuatro o más períodos de glaciación e interglaciación que afectaron principalmente el Hemisferio Norte; de estos periodos glaciales uno de los más representativos es el período Wisconsin (en Venezuela glaciación Mérida II). Las fluctuaciones en el volumen de hielo en el período Wisconsin produjo comparables fluctuaciones en el nivel del mar; esto significa que el nivel de base de cada sistema fluvial varió para adaptarse al nuevo nivel de equilibrio, generándose valles en la plataforma continental. Este autor también indica que de los eventos transgresivos-regresivos que ocurrieron durante el Pleistoceno, el descenso más importante se generó hace 10.000 años (Glaciación Mérida II, Límite Pleistoceno-Holoceno), permitiendo que el nivel del mar alcanzara unos 120 m por debajo del actual (aproximadamente), creando condiciones favorables para el desarrollo de sistemas deltáicos en la plataforma continental, zonas estuarinas y plataformas carbonáticas en varias áreas del Caribe, incluyendo a la península de Paraguaná y zonas aledañas.

1.6.2. Contexto Estructural

Actualmente la región falconiana está sometida a un estado de esfuerzos máximos de dirección NNO-SSE a N-S y un esfuerzo mínimo horizontal en dirección ENE-OSO, con el desarrollo Plio-Cuaternario de seis sistemas de fallas (Figura 1.3) (Mendoza, 2005).

- a) Fallas dextrales E-O como Falla de Oca-Ancón, Falla de Adícora, etc.
- b) Fallas dextrales NO-SE, como las de Urumaco, Río Seco, Lagarto, La Soledad
- c) Fallas normales NNO-SSE, como las de Costa Oeste de Paraguaná, Cabo San Román, Puerto Escondido, Los Médanos, etc.
- d) Fallas sinestrales N-S a NNE-SSO como Carrizal, El Hatillo.
- e) Fallas inversas ENE-OSO, paralelas al plegamiento regional como las de Guadalupe, Araurima, Matapalo, Chuchure.

El desplazamiento de estas fallas es bajo (< 0.4 mm/a) a excepción del Sistema Oca-Ancón (> 2 mm/a).

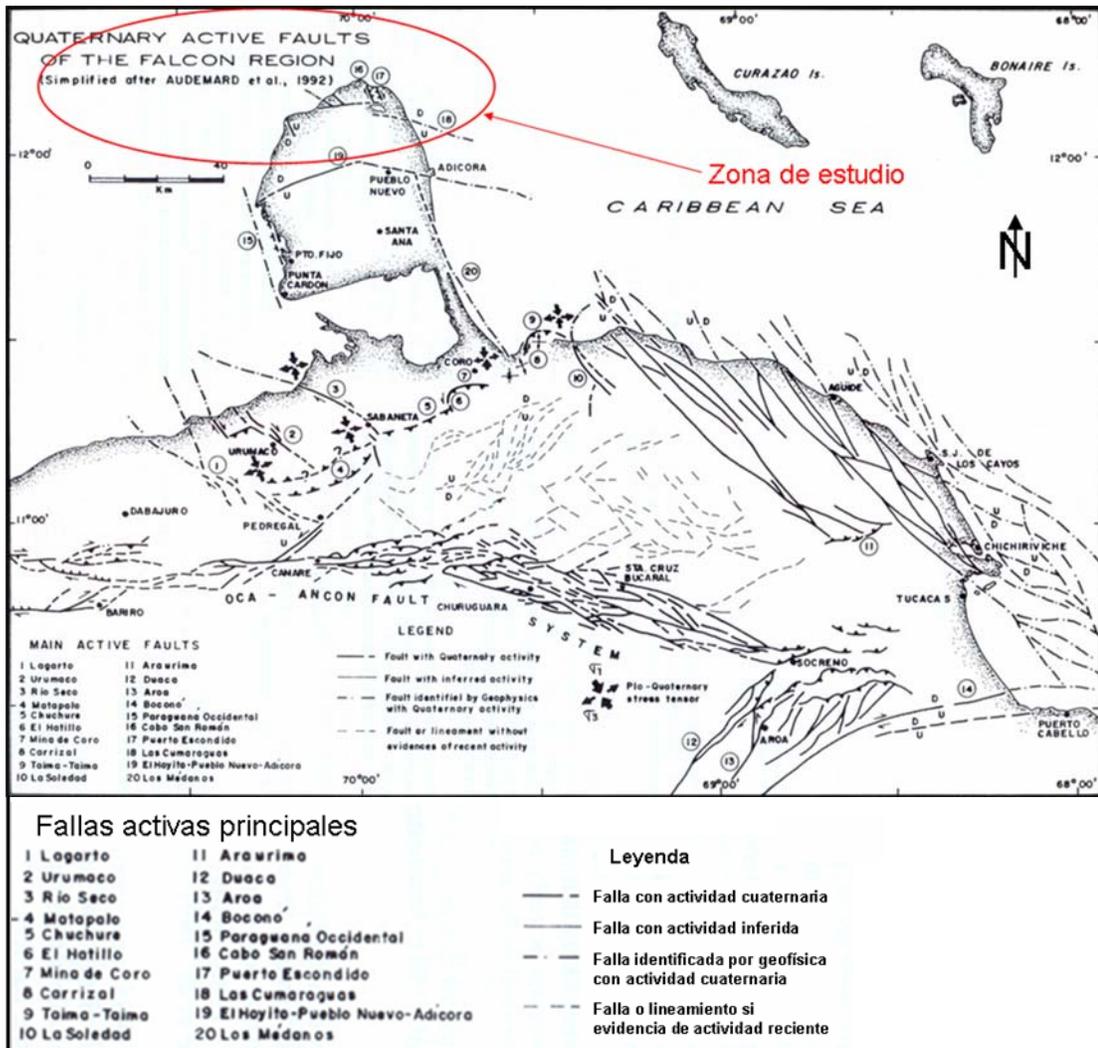


Figura 1.3. Mapa de fallas activas cuaternarias en la región falconiana. Modificado de Audemard, (2001).

1.6.3. Contexto Estratigráfico

En la zona de estudio aflora, principalmente, la Formación Paraguaná la cual es descrita a continuación:

1.6.3.1. Formación Paraguaná (Plioceno Temprano) (Tomado del léxico estratigráfico de Venezuela).

La figura 1.4 muestra un croquis de la ubicación de la Formación Paraguaná en la Península de Paraguaná del Edo. Falcón.

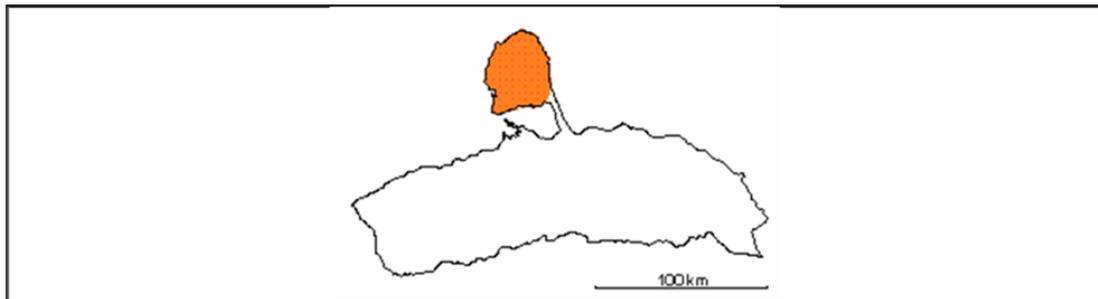


Figura 1.4. Croquis de ubicación de la Formación Paraguaná. (Tomado del léxico estratigráfico de Venezuela).

Descripción litológica: La parte inferior de la Formación Paraguaná (Miembro El Hato, figura 1.6) en las secciones de la costa oeste de la península, como consistentes de intercalaciones de arcillitas y limolitas, friables y fosilíferas, con escasas areniscas, en contactos transicionales. Las arcillitas son grises, microfósilíferas y generalmente calcáreas; las limolitas son amarillentas, arenosas, calcáreas y fosilíferas. Las areniscas son amarillentas, masivas, friables y fosilíferas. La parte superior de la formación (Miembro Amuay, figura 1.5) está representado por un intervalo carbonático, muy fosilífero, en ocasiones con influencia clástica elevada, que forma la cobertura casi total de la superficie de la península de Paraguaná. La unidad es muy variable en sentido areal en cuanto a la variación en las proporciones de siliclásticos, aloquímicos, micrita y cantidad y tipos de fósiles.

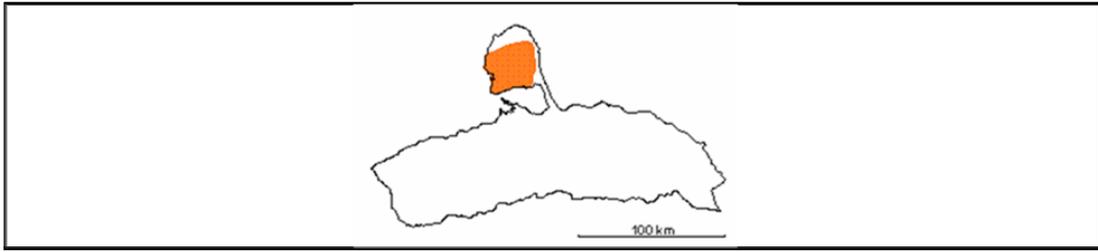


Figura 1.5. Croquis de ubicación del Miembro Amuay. (Tomado del léxico estratigráfico de Venezuela).

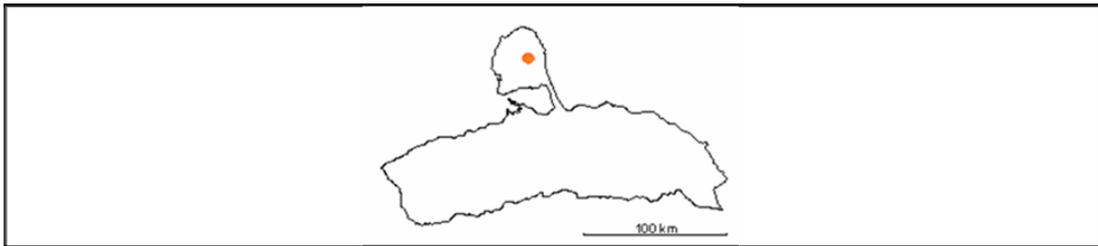


Figura 1.6. Croquis de ubicación del Miembro El Hato. (Tomado del léxico estratigráfico de Venezuela).

Contactos: La base de la Formación Paraguaná no aflora y el contacto entre los miembros El Hato y Amuay es concordante y se encuentra muy bioturbado. El contacto superior está representado por una superficie de erosión. Hacia el noreste de la fila El Alto, está en contacto disconforme con una unidad Pleistocena denominada Conglomerado de El Alto.

Paleoambientes: Para el Miembro El Hato se interpreta un ambiente que varía desde la zona litoral, con bahías asociadas, hasta la plataforma somera, observándose un incremento en la profundidad subiendo en sección. No existen evidencias que indiquen condiciones de profundidad diferentes durante la sedimentación del Miembro Amuay, con la diferencia que dominaron.

CAPÍTULO II

2. Marco Teórico

La evaluación de amenazas geológicas en proyectos costa afuera constituye un pilar fundamental para las actividades de exploración y producción petroleras, entre ellas la colocación de plataformas de perforación tipo *jack-up* o fijas, cabezales de pozos, monoboyas y toda estructura que interactúe con el fondo y subfondo marino por lo que es fundamental conocer la morfología del fondo marino así como la configuración estratigráfica y estructural del subfondo marino. La información geofísica es muy valiosa; y juega un papel análogo a los levantamientos topográficos, las fotografías aéreas, los mapas geológicos y los levantamientos geológicos de superficie en la investigación terrestre; sin embargo es necesario conocer la propiedades geomecánicas del suelo, por lo que deben realizarse también perforaciones geotécnicas en el área de estudio correlacionables con la información geofísica (Parra, 2009).

Son muchas las posibles amenazas geológicas a las que se pueden enfrentar las actividades de desarrollo en zonas costa afuera. En muchos sitios de las costas Venezolanas el fondo marino no es una superficie plana, ya que se conjugan variables geológicas y geotécnicas (tales como altas tasas de sedimentación, emanaciones de gas bio y termogénico, tectónica activa y alta amenaza sísmica, y morfología abrupta del fondo), para dar lugar a diversas amenazas geológicas y geotécnicas tales como: deslizamientos submarinos, volcanes de lodo y gas, *pockmarks* o depresiones debidas a escapes de gas, gas somero presurizado, licuefacción de estratos de material granular suelto, afloramientos de material bioclástico calcáreo, estratos someros subconsolidados, fallas activas, etc. (Parra, 2009). Los levantamientos geofísicos de alta resolución permiten estudiar la morfología del fondo marino, establecer la continuidad lateral de los estratos identificados en la exploración geotécnica, apoyar en la selección de los sitios de implantación de la infraestructura costa afuera e identificar amenazas de origen geológico y geotécnico.

2.1. Alcance y utilización de los métodos geofísicos

Entre los posibles métodos geofísicos que pueden ser empleados en la investigación costa afuera se destacan, indudablemente, el método sísmico, magnetometría, gravimetría, entre otros. Estos son métodos geofísicos también aplicables en la investigación de ambientes litorales, sin embargo los métodos más utilizados son los sísmicos debido a su capacidad resolutive y la de obtención de datos cuantitativos.

2.1.1. Métodos sísmicos.

Parkinson (2001) divide los estudios de sísmica de alta resolución costa afuera en dos grupos, la sísmica analógica o monocanal y la sísmica digital o multicanal de alta resolución, siendo la primera la que cuenta con mayor variedad de instrumentos que son utilizados según la necesidad del estudio y las condiciones del área.

2.1.1.1. Sísmica analógica o monocanal

Souza, L. y Mahiques, M. (2008) proponen una clasificación de los métodos sísmicos analógicos de la siguiente forma, los de investigación de superficie y los de investigación de sub-superficie (haciendo referencia a la superficie del fondo marino).

a) Investigación de superficie

El primer grupo se refiere a la caracterización geológica de las superficies sumergidas y abarca el levantamiento de afloramientos rocosos, formas sedimentarias o estructuras, así como la localización de embarcaciones naufragadas. La delimitación del trazado de tuberías, de canales de navegación y de áreas favorables para la instalación de pilas de descarte, son ejemplos de proyectos en los cuales la prioridad de la investigación es la caracterización de la superficie del fondo marino.

En términos de amenazas geológicas, la caracterización de la naturaleza de los materiales geológicos y la identificación del sentido de las corrientes pueden ser establecidas con técnicas de sismica de superficie.

En este tipo de estudio se utilizan fuentes acústicas que emiten de preferencia señales con espectros de altas frecuencias, superiores generalmente a los 30 kHz. La ecosonda y el sonar de barrido lateral constituyen los principales instrumentos empleados en este grupo.

Ecosonda Monohaz: para la medición de profundidad se empleó una ecosonda monohaz de precisión Marimatech E-Sea Sound MP35 de doble frecuencia (33 y 200 kHz), que genera simultáneamente registro analógico y digital. La precisión de este instrumento es de $\pm 1 \text{ cm} \pm 0,1\%$ a 200 kHz y de $\pm 5 \text{ cm} \pm 0,1\%$ a 33 kHz. El transductor de doble frecuencia empleado es de haz estrecho, con ángulos de cobertura de $\pm 4,5^\circ$ a 200 kHz y de $9,5^\circ$ a 33 kHz. (Marimatech, 2003), (Figura 2.1).



Figura 2.1. Unidad de monitoreo de ecosonda monohaz (tomado de Marimatech E-Sea Sound MP35 Brochure)

Sonar de barrido lateral: se empleó un sonar de barrido lateral (*Side Scan Sonar*) marca GeoAcoustics, doble frecuencia ajustable (100 kHz o 400 kHz). Para este estudio se usó 100 kHz. El sonar de barrido lateral se configuró para obtener un 100% de cobertura y solapamiento en las áreas de levantamiento. El equipo está integrado por dos transductores en un torpedo que va sumergido y se lleva anclado en la popa de la embarcación, una unidad transreceptora (receptor y transmisor) y software para el procesamiento de los registros (GeoPro4 OSX MOS V 3.35), (Figura 2.2).



Figura 2.2. Unidad transductora y unidad transreceptora del sonar de barrido lateral

b) Investigación de sub-superficie

El segundo grupo reúne un conjunto de métodos que tienen por objetivo la investigación del sub-fondo marino, brindando soporte a proyectos en los cuales las informaciones sobre el espesor y arquitectura de la columna sedimentaria o la profundidad del basamento rocoso son datos fundamentales.

La determinación del espesor de las capas sedimentarias teniendo como objetivo cálculos de determinación del volumen de material de dragado y de la

profundidad del basamento rocoso en proyectos de puentes, túneles, ductos, puertos, plataformas y diques, son algunos ejemplos de estudios que exigen informaciones de esta naturaleza. En estos casos, datos que permitan apenas la caracterización geológica de superficie no son suficientes para cubrir las necesidades de los proyectos. En el contexto de estos objetivos se destacan los métodos sísmicos que utilizan fuentes acústicas de tipo pinger, boomer, sparker y chirp, entre otras, que emiten señales acústicas con espectros de frecuencias inferiores a 30 kHz.

La elección del instrumento adecuado para determinada investigación es crucial ya que cada uno de ellos utiliza una fuente acústica distinta que trabaja con una banda de frecuencia diferente, lo cual influye en la resolución del registro así como en la capacidad de penetración de la fuente.

La figura 2.3 ejemplifica los límites de penetración de una fuente acústica del tipo Pinger. En este ejemplo es posible observar la drástica disminución del desempeño de esta fuente con el aumento de la granulometría de los sedimentos del fondo marino (donde la penetración esperada se encuentra en azul y variabilidad posible en rojo), lo que, en principio, desmerita esta fuente acústica para la investigación de depósitos aluvionales o coluvionales, cuando existe la expectativa de que ocurran depósitos de arenas gruesas y gravas con espesor superior a 5-6 m. Muy probablemente, una fuente con estas características no ofrece resultados adecuados en levantamientos costeros cuya finalidad sea la de buscar depósitos arenosos para la recomposición de ambientes litorales erosionados.

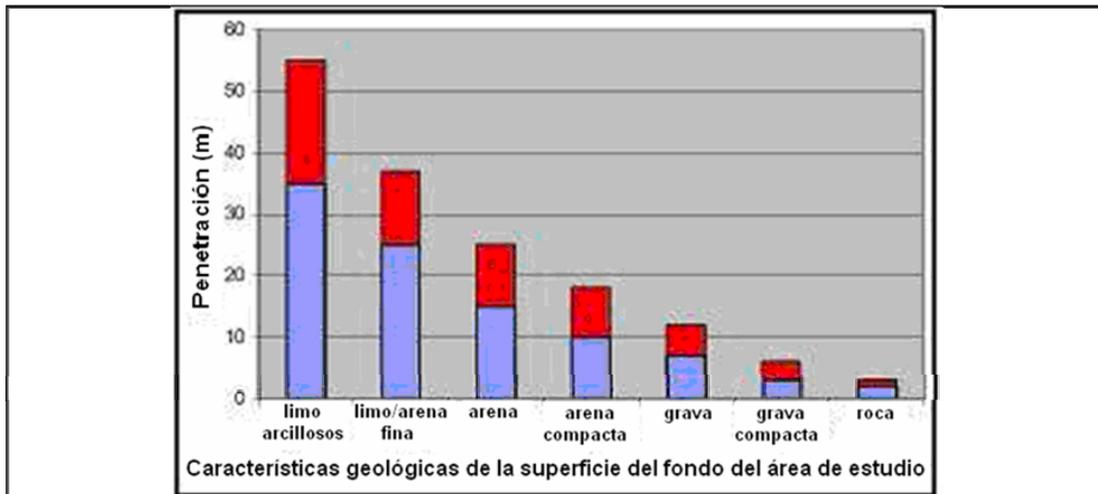


Figura 2.3. Desempeño de la fuente acústica 3.5 kHz, modelo GeoPulse Pinger Geoacoustics (Modificado de: <http://www.geoacoustics.com>).

Fuentes acústicas que emiten señales de frecuencias inferiores a 2 kHz ofrecen un mejor desempeño en la penetración y resultan, por lo tanto, muy importantes para la investigación de depósitos sedimentarios compuestos de arenas y gravas comunes en ambientes litorales de alta energía, con espesores superiores a 8-10 m. Fuentes del tipo boomer, sparker y chirp (de alta potencia) son las más indicadas para alcanzar estos objetivos.

La figura 2.4 ilustra un ejemplo de excelente calidad, de la utilización simultánea de tres fuentes acústicas en un levantamiento geofísico en región costera. Se muestra claramente el desempeño diferenciado de cada una de las tres fuentes acústicas y la importancia de esta diferenciación en el estudio de ambientes sumergidos llanos. El registro “A” tomado con una fuente tipo Pinger (24 kHz); el registro “B” adquirido con una fuente tipo Chirp (2-8 kHz) y el registro “C” adquirido con una fuente tipo Boomer (0,5-2 kHz). Se aprecia el desempeño diferenciado de las fuentes, con relación a la penetración de la señal en los estratos sedimentarios subyacentes, una vez que solamente en el perfil obtenido con el boomer, es posible delinear, con continuidad y extensión, el contorno del basamento rocoso en el área investigada.

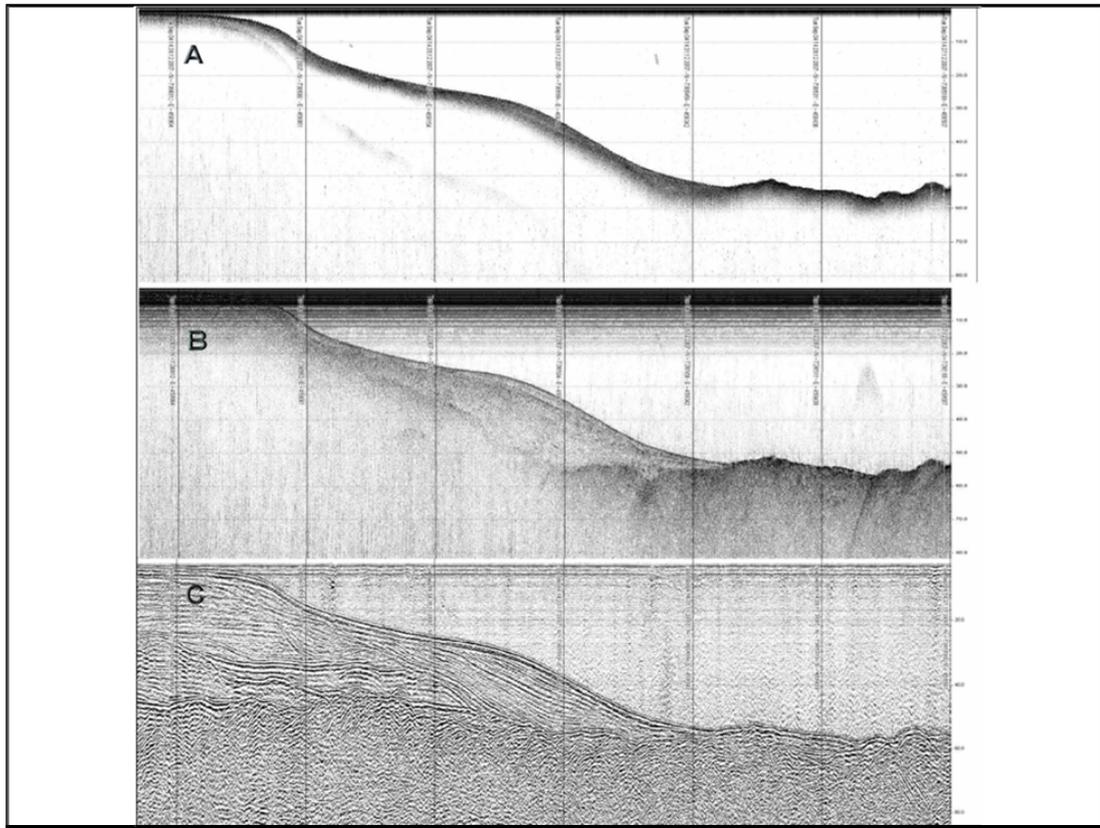


Figura 2.4. Perfil sísmico ejecutado con el empleo simultáneo de tres fuentes acústicas (Souza et al. 2008).

Aunque no existan, por limitaciones físicas, fuentes acústicas que permitan la emisión, a partir de un único módulo, de señales acústicas continuas de 500 Hz a 30 kHz, lo que sería, teóricamente ideal, existen hoy en el mercado internacional, sistemas que permiten administrar la actuación simultánea de varias fuentes acústicas que, al final, resulta en la solución más próxima a lo ideal, frente a las varias demandas involucradas en la investigación de áreas sumergidas llanas, asegurando simultáneamente, resolución y penetración, como es el caso de este estudio en particular en el que se utilizaron distintas fuentes, específicamente la tipo Pinger y la tipo Sparker.

Perfilador de fondo somero tipo Pinger: para las mediciones de geofísica somera se usó un Perfilador de Fondo (*Sub-Bottom Profiler*) marca GeoAcoustics, modelo GeoPulse, tipo Pinger de frecuencia variable (Figura 2.5)

El equipo está integrado por un transductor sumergido que se instala a un lado de la embarcación, una unidad transreceptora (receptor y transmisor interdependientes) y el software para el procesamiento de los registros (GeoPro4 OSX MOS V2 3.35). El transductor transmite un pulso con una frecuencia, (en este caso de 4,5 kHz) el mismo transductor recibe a su vez las señales reflejadas en el fondo marino o lecho fluvial, que luego son transmitidas a la unidad transreceptora y registradas por el software GeoPro4 de forma digital (Geopulse, s/f).



Figura 2.5. Foto de la unidad transreceptora y la unidad transductora tipo Pinger (tomado de Geopulse, s/f, Brochure)

Perfilador de fondo intermedio tipo Sparker: adicionalmente, se empleó un Perfilador de Fondo Tipo Sparker, modelo GeoPulse, marca GeoAcoustics. Este equipo está integrado por una unidad transreceptora, que genera un pulso de potencia ajustable hasta 455 J y rango de frecuencia entre 200 Hz y 2 kHz, que garantiza una penetración de más de 50 m. Esta frecuencia se transmite al arreglo de 20 hidrófonos

que va remolcado aproximadamente a un metro de profundidad por debajo de la superficie del agua.

2.1.1.2. Sísmica digital o multicanal

La adquisición de sísmica digital para estudios de sitio (*site surveys*) es una versión de alta resolución y miniaturizada de la sísmica 2D tradicional. Esta sísmica es empleada principalmente según indica Parkinson (2005), para la búsqueda de acumulaciones de gas someras que no pueden ser detectados por la sísmica monocanal la cual se ve limitada por la profundidad a la que se encuentra el primer múltiple del fondo marino el cual es imposible de remover a diferencia de la sísmica multicanal. Utilizando la técnica de identificación de puntos brillantes (*bright spots*), es posible detectar las amenazas que representan las acumulaciones de gas someras. Parkinson (2005) señala además que una aseveración realista sobre la capacidad del estudio según muchas empresas que trabajan en esta área, es que una acumulación de gas de 5 m de espesor y 200 m de diámetro debería ser detectable a 1000 m por debajo del fondo marino. También es importante destacar, que ningún estudio, por muy sofisticados que sean los sistemas utilizados, puede garantizar que todas las acumulaciones de gas serán identificadas. Siempre existirá alguna limitación en cuanto a la resolución e interpretación de los datos sísmicos, lo que demuestra que estos estudios, por muy útiles que puedan ser, no son infalibles.

La sísmica multicanal de alta resolución en estudios de sitio además de ser utilizada para ubicar acumulaciones de gas, también es utilizada para el estudio sismoestratigráfico en unos 2 - 3 s de tiempo doble de viaje, además del modelado estructural de fallas geológicas recientes, que pueden representar información relevante a la hora de perforar.

A continuación se presentan algunas imágenes donde se ejemplifica el uso de la sísmica multicanal para la evaluación de amenazas geológicas en estudios realizados por INCOSTAS (Figura 2.6).

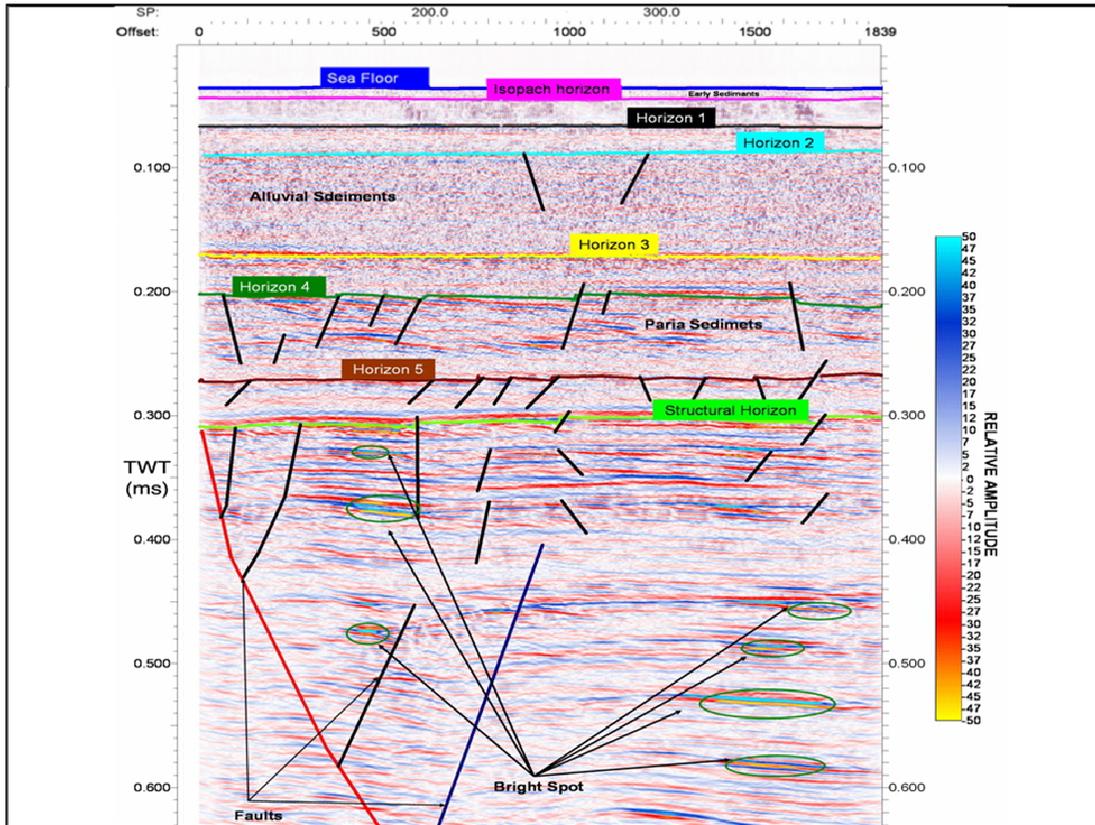


Figura 2.6. Imagen de sísmica digital multicanal de alta resolución que muestra condiciones estratigráficas y estructurales (tomado de Incostas, 2009).

Ahora bien, la efectividad de los estudios de sísmica multicanal de alta resolución depende de un conjunto de factores. Estos incluyen la penetración del pulso sísmico, precisión vertical y horizontal, y la capacidad del sistema de adquisición utilizado. La penetración está determinada por la potencia y frecuencia de la fuente sísmica utilizada, en conjunto con otros factores, como el tiempo, interferencia sísmica, largo de *streamer*, número de canales, etc. En términos de penetración, las propiedades de absorción de los estratos juegan un papel fundamental. La absorción del pulso sísmico típica está alrededor de los 0.2 dB por

longitud de onda. Si no más de 20 dB en la pérdida de la señal es tolerada, entonces señales de 50 Hz penetraran 2000 m por debajo del fondo marino, señales de 100 Hz penetrarán 1000 m, señales de 500 Hz penetrarán 180 m y señales de 200 Hz penetrarán solo 45 m por debajo del fondo marino (Parkinson, 2001).

Entre los equipos utilizados en la adquisición multicanal están los siguientes: El sistema de grabación digital contiene al menos 48 canales (a intervalos de 12,5 m), capaz de grabar digitalmente bajo parámetros aceptables (IBM 3590E cartucho compatible). Además se utilizaron estabilizadores de profundidad del *Streamer* marca Sercel modelo Digicourse. La fuente sísmica remolcada será un cañón de aire de 30 cm³ y con un espectro de frecuencia efectivo entre 0 y 256 Hz marca Sercel modelo Mini GI Gun, utilizado comúnmente para este tipo de estudios. El Software de Control de calidad a bordo también es proveído por Sercel junto con el sistema de adquisición.

2.2. Análisis de amenazas geológicas para instalaciones tipo Jack-up.

Bennet. W (1994), propone una lista que clasifica las posibles amenazas geológicas que pudieran encontrarse al momento de realizar perforaciones costa afuera utilizando plataformas de perforación de tipo *Jack-up*, basado en experiencias previas en las que plataformas de este tipo han fallado y se ha estudiado su causa, además sugiere el método de investigación necesario para estudiar la presencia de una amenaza geológica. Dicha clasificación se presenta a continuación:

Tabla 2.1. Posibles amenazas para plataformas tipo jack-up y métodos de investigación para su evaluación

Amenaza	Método de evaluación
Problemas de instalación	<ul style="list-style-type: none">• Estudio batimétrico.
Punzonamiento	<ul style="list-style-type: none">• Estudio de sísmica somero.• Toma de muestras del suelo y otros análisis geotécnicos.
Falla de fundaciones por cargas excepcionales de tormentas.	<ul style="list-style-type: none">• Estudio de sísmica somero.• Toma de muestras de suelo y otros análisis geotécnicos.
Falla por deslizamiento	<ul style="list-style-type: none">• Estudio de sísmica somero.• Toma de muestras de suelo y otros análisis geotécnicos.
Socavación del fondo marino	<ul style="list-style-type: none">• Estudio batimétrico.• Toma de muestras de la superficie del fondo marino y mediciones de corrientes a este nivel.

Amenaza	Método de evaluación
Inestabilidad del fondo marino (<i>mudslides, seabed slides</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Sonar de barrido lateral y estudio de sísmica somero. • Toma de muestras del suelo y otros análisis geotécnicos.
Acumulaciones de gas someras	<ul style="list-style-type: none"> • Estudio de sísmica multicanal con análisis de atributos.
Fallas geológicas	<ul style="list-style-type: none"> • Estudio de sísmica somero. • Estudio de sísmica multicanal.
Objetos sumergidos (tuberías, barcos hundidos, escombros)	<ul style="list-style-type: none"> • Sonar de barrido lateral. • Inspección realizada por buzos.
Depresiones locales, arrecifes, rocas	<ul style="list-style-type: none"> • Sonar de barrido lateral. • Inspección realizada por buzos.
Bases atrapadas en lodo	<ul style="list-style-type: none"> • Datos geotécnicos
Huellas dejadas por otros Jack-up (<i>foot prints</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Investigar actividades previas en la zona

La figura 2.7 muestra un gráfico estadístico de las causas que han producido fallas en las instalaciones de *Jack-up* estudiadas por Dier. A et.al (2004).

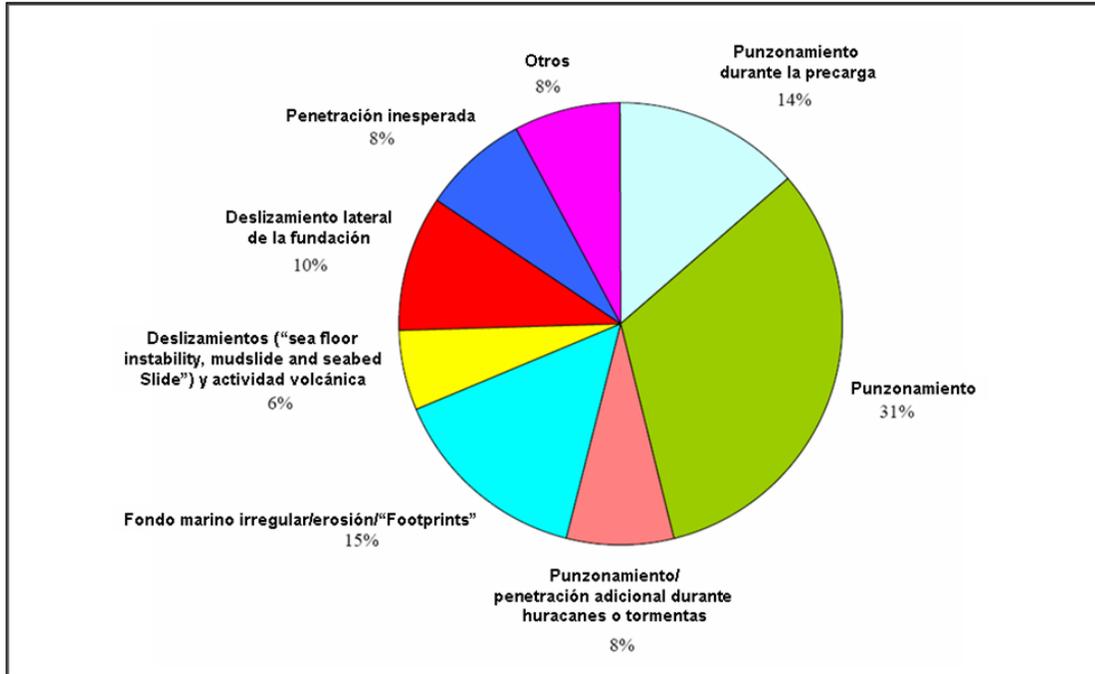


Figura 2.7. Gráfico estadístico de fallas en plataformas tipo jack-up (tomado de Dier. A, et.al, 2004)

En el gráfico de la figura 2.7 se advierte que la falla por punzonamiento es la más frecuente y constituye alrededor del 53% de los casos recopilados por Dier. A et al. (2004). A continuación se describe en que consiste este tipo de falla además de algunos de los más comunes y más importantes según Dier. A, et al, (2004):

Falla por punzonamiento: después del asentamiento inicial de las bases de la plataforma en el lecho marino y la precarga de éstas, a menos que se trate de arcilla muy dura o arena, el *spudcan* (Apéndice 4) penetrará la superficie del suelo. Esta penetración seguirá mientras que la operación de precarga continúe hasta alcanzar el equilibrio entre la capacidad del suelo y la carga impuesta.

Por lo general las profundidades de penetración en arenas son pequeñas, pero en las arcillas blandas, tales como las del delta del Mississippi, la profundidad de penetración se han registrado hasta 55m. En condiciones normales se esperaría que la resistencia del suelo aumente con la profundidad, permitiendo que las bases de las plataformas autoelevadizas (*jack-up*) se estabilicen; sin embargo, existen casos donde se encuentran estratos de alta resistencia relativa que suprayacen estratos menos resistentes, esto genera que el perfil de capacidad de carga del suelo presente una zona de inestabilidad en donde se genera la falla por punzonamiento (Figura 2.8).

La falla por punzonamiento se genera cuando el perfil de capacidad de carga tiene un incremento puntual como consecuencia de un estrato de mayor resistencia relativa que sea subyacido por suelos de menor resistencia. La figura 2.8, muestra a la izquierda dos perfiles de capacidad de carga que ejemplifican los casos en los que podría ocurrir esta falla (línea continua y línea punteada), y a la derecha muestra un ejemplo de falla por punzonamiento en un caso en el que la carga aumentó producto de una tormenta, donde V_p representa la carga a la cual el *Spudcan* se estabilizó y V_s la carga adicional producida por la tormenta provocando un aumento considerable en la profundidad de la plataforma autoelevadiza. La figura 2.9 muestra una fotografía de una plataforma luego de la ocurrencia de falla por punzonamiento.

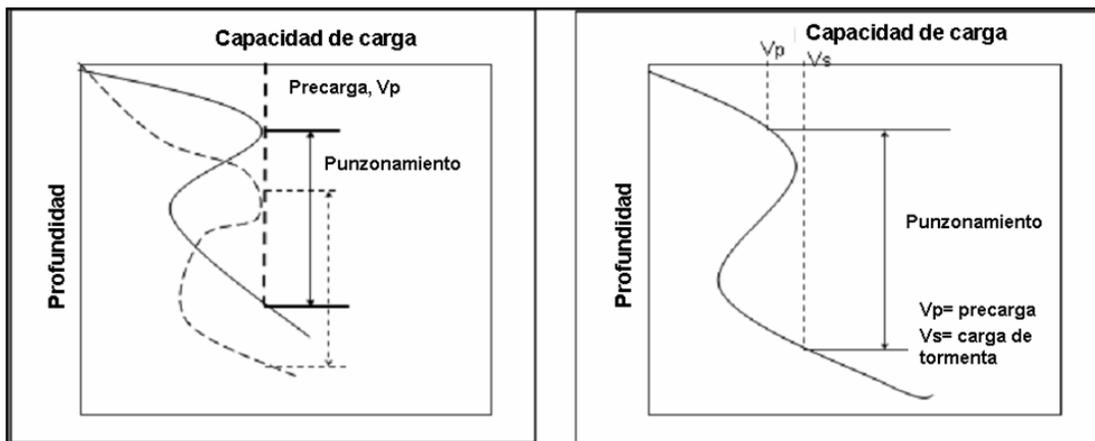


Figura 2.8. Gráficos de capacidad de carga vs profundidad que presentan potencial de falla por punzonamiento (Tomado de Dier, A. et. al, 2004).



Figura 2.9. Daños generados a una plataforma tipo jack-up como consecuencia del desnivel abrupto causado por una falla por punzonamiento (tomado de Ocean travellers, hydrographyc center, s/f).

Falla por deslizamiento: los *spudcans* podrían moverse horizontalmente en caso de no existir suficiente resistencia lateral cuando la carga en esta dirección aumenta, normalmente por causas ambientales. Este deslizamiento podría resultar en la falla por completo de la plataforma ya que la carga es redistribuida sobre otras bases que se sobrecargan y son empujadas a mayores profundidades bajo esfuerzos combinados. Estas fallas suelen ocurrir principalmente sobre fondos arenosos donde la penetración del *spudcan* es mínima. En las arcillas, la penetración es mayor por lo que es improbable que ocurran este tipo de fallas. También es conveniente destacar que esto puede ocurrir durante la instalación sobre todo si se encuentran *foot-prints* de plataformas previas.

Socavación del fondo marino: se trata de la remoción de los sedimentos del fondo marino por corrientes y oleaje. Esto puede ocurrir por procesos geológicos naturales o puede ser causado por componentes de las estructuras que interrumpen el régimen natural de las corrientes por encima del fondo marino, ocasionando la disminución de la capacidad portante del suelo y aumentando el riesgo de punzonamiento.

Inestabilidad del fondo marino (*mudslides, seabed slides*): esto puede ser causado por diversos factores que interactúan o actúan independientemente. Las fallas mas comunes son movimientos de masa a gran escala conocidos como *mudslides* y *seafloor failure* que son desplazamientos de tierra a nivel del fondo y subfondo marino a través de planos de debilidad, y pueden provocar esfuerzos verticales y horizontales significativos sobre las bases del *jack-up* así como reducir la capacidad portante del suelo.

Estos fenómenos suelen ser causados por presión de oleaje, que en casos de ser significativa en niveles cercanos al fondo marino lo hace susceptible incluso en pendientes suaves. También terremotos pueden inducir este tipo de fallas en pendientes que, bajo condiciones normales son estables. Otras causas podrían ser el propio peso del suelo, hidratos, acumulaciones de gas somero, fallas geológicas entre otros procesos geológicos.

Huellas dejadas por otros *Jack Up* (*foot prints*): la zona donde se desea fundar la estructura puede haber estado ocupada por otra estructura similar, dejando depresiones cuyas dimensiones y profundidad van a depender de la penetración que hayan tenido las bases de esa estructura y el tipo de *spudcan* que hayan utilizado.

El suelo perturbado por la estructura previa podría ocasionar la penetración diferencial de cada una de las bases del *Jack-up*, además la cercanía de estas depresiones a las bases podrían causar el deslizamiento de las mismas hacia las depresiones, causando daños severos la estructura.

Acumulaciones de gas someras: generalmente están formadas de gas biogénico o petrogénico en el agua intersticial de los suelos poco profundos. *In situ*, el gas podría ser gaseoso o enlazados con agua para formar un sólido, conocido como hidrato (dependiendo de las condiciones presión y temperatura).

Estas acumulaciones de gas podrían provocar comportamientos impredecibles en las fundaciones debido a depresiones en el fondo marino provocadas por acumulaciones debajo del *spudcan*, por otro lado reducen la capacidad de carga del suelo y representan una amenaza para los estudios geotécnicos y perforaciones someras que podrían resultar en explosiones. Además, la migración hacia la superficie de estos gases durante la perforación a través de las paredes del hoyo podría causar licuefacción del suelo con resultados catastróficos. La figura 2.11 muestra una plataforma en llamas luego de una explosión provocada por una acumulación de gas no identificada.



Figura 2.10. Plataforma tipo *jack-up* luego de una explosión. Ttomado de Ocean travellers, hydrographyc center, s/f.

Objetos sumergidos: existen una gran variedad de objetos que podrían conseguirse en el fondo marino y que podrían interferir con la ubicación de la plataforma, entre ellos podemos nombrar: tuberías, naufragios, anclas, cables, objetos arrojados (de plataformas adyacentes por ejemplo), artillería y rocas transportadas por glaciares.

CAPITULO III

3. Procesamiento e Interpretación

Este capítulo se enfoca en mostrar los pasos empleados para el procesamiento de la sísmica monocanal y el criterio utilizado en la interpretación de la sísmica monocanal y muticanal, además de la integración entre la información geofísica y geológica.

La figura 3.1 la planificación de la adquisición de las líneas sísmicas utilizando cada uno de los métodos descritos a continuación.

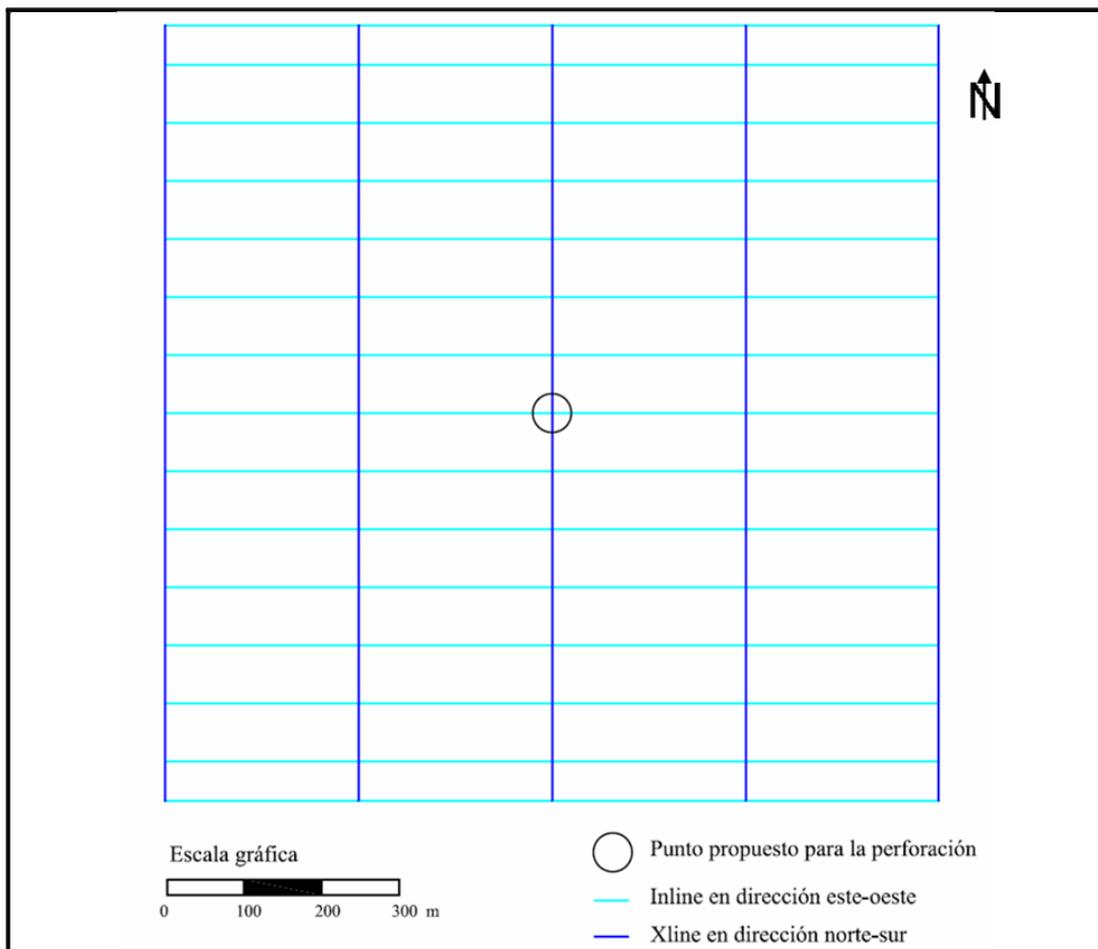


Figura 3.1. Mapa base de la adquisición

3.1. Batimetría (Ecosonda monohaz de doble frecuencia)

Un total de 20 km lineales de datos provenientes de la adquisición con ecosonda monohaz fueron empleados para la generación del mapa batimétrico. Los pasos específicos seguidos durante el procesamiento son listados y descritos a continuación:

1. Revisión de los datos y corrección de los errores en registros digitales: los datos adquiridos en campo generan un registro impreso en rollos de papel y un archivo de datos crudos en digital en formato PRN (texto delimitado por tabulaciones). Dependiendo de las profundidades registradas, el tipo de fondo marino, la presencia de vegetación, entre otras cosas, la sensibilidad y/o la frecuencia de adquisición del equipo debe ser ajustada para detectar correctamente la información digital. En ocasiones el registro digital puede contener errores por lo que es necesaria la revisión de los registros impresos con el propósito de corregir las secciones digitales que contienen información errada. La figura 3.2 muestra un archivo de tipo digital de una línea adquirida en este estudio en el que se tuvieron que realizar correcciones de este tipo.

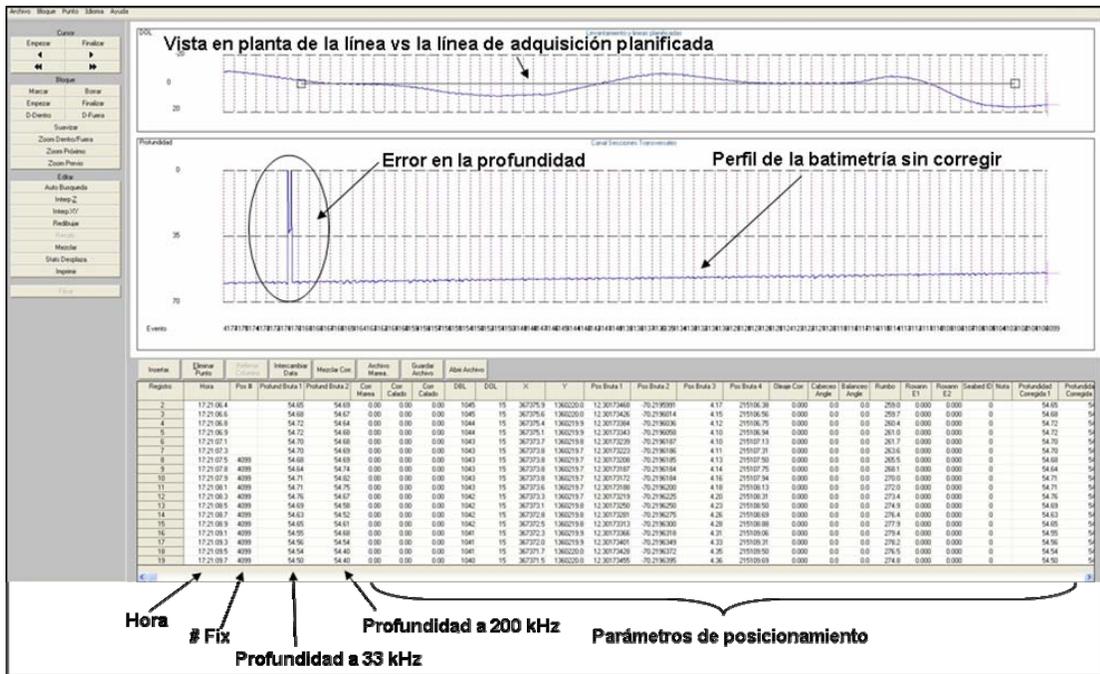


Figura 3.2. Vista de la ventana de procesamiento del programa HYPACK MAX, donde se observa un error en archivo digital.

El error observado en la lectura batimétrica se encuentra entre los *fixes* 169 y 170. Conocidos los *fixes* es posible identificar el evento en los registros impresos en papel para corroborar la profundidad registrada digitalmente.

El registro impreso (Figura 3.3) muestra que el perfil batimétrico no presenta saltos abruptos; al contrario, las profundidades continúan con la misma tendencia, observándose únicamente un evento en el que las profundidades se registran alrededor de los 0 m. Para corregir el error, las profundidades correctas son medidas sobre los registros en papel para luego corregir directamente el archivo de texto digital, transcribiendo de esta manera cada profundidad en la sección que presenta el error para así obtener finalmente la línea corregida como se observa en la figura 3.4.

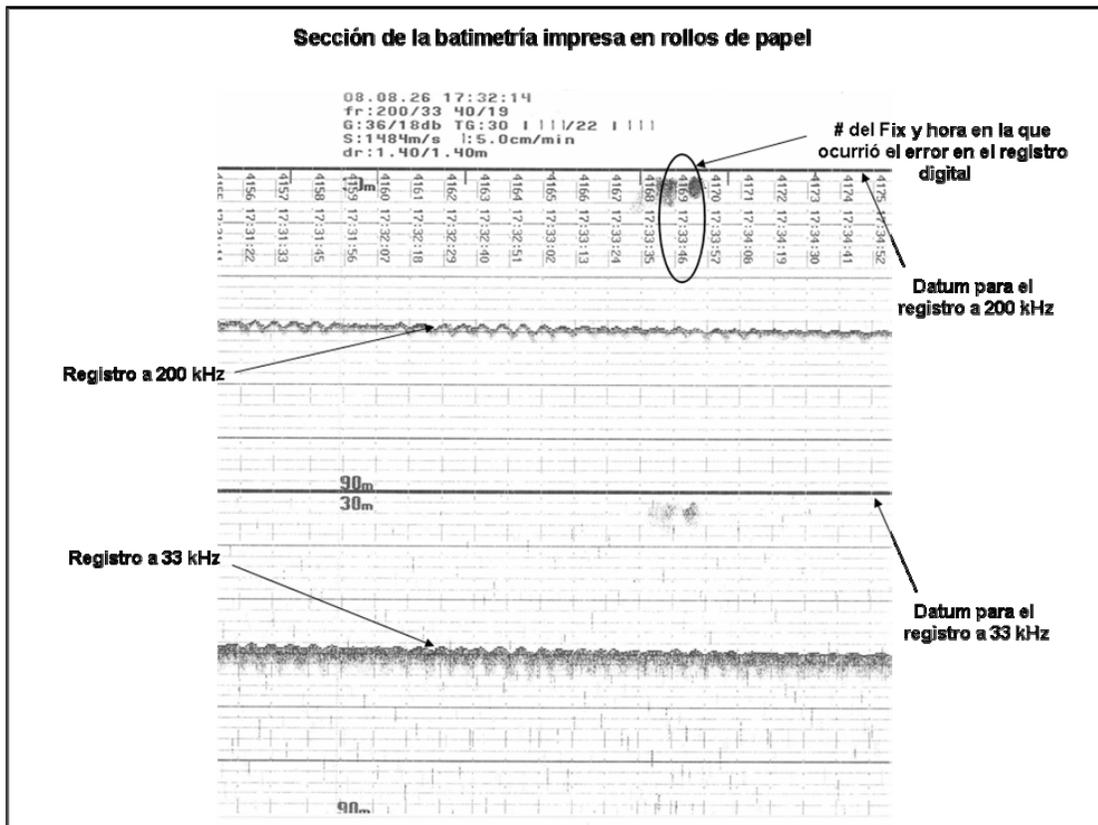


Figura 3.3. Muestra de una sección de los registros de batimetría en papel en la que se observó un error en el registro digital.

La figura 3.3 muestra los registros adquiridos simultáneamente a frecuencias de 33 kHz y a 200 kHz (baja y alta frecuencia). Los registros obtenidos operando en alta frecuencia permiten obtener una mayor resolución; sin embargo, la señal es atenuada en presencia de *fluff* (sedimentos en suspensión) y fondos con vegetación muy densa entre otros factores, por lo que en algunos casos es necesario también el registro obtenido a una frecuencia de 33 kHz que en general se encuentra menos afectado por los efectos de *pitch and roll*, obteniendo mayor penetración y permitiendo sondear a mayores profundidades y en cualquier tipo de fondo sacrificando un poco la resolución. Los registros de baja frecuencia permiten corregir las profundidades anómalas en los registros de alta frecuencia, en este estudio se empleó también este recurso para realizar correcciones de las profundidades en los registros digitales.

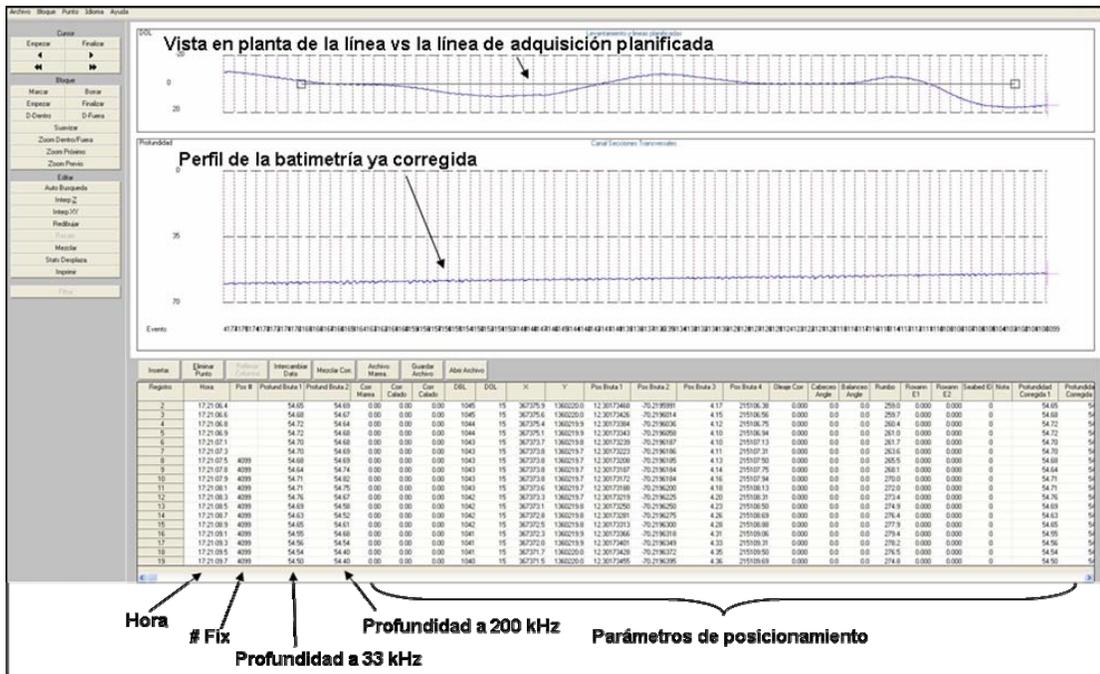


figura 3.4. Vista de la ventana de procesamiento del programa HYPACK MAX ®. En la que se observa un perfil batimétrico ya corregido.

2. Corrección por desplazamiento: posterior a la corrección de errores en los registros batimétricos se procede a realizar la corrección de la posición de los datos. En vista de que la antena de posicionamiento (GPS) no se encuentra exactamente en la misma posición en la que se ubicó la ecosonda (Figura 3.5) debe corregirse para obtener la posición absoluta de los datos batimétricos. Ésta corrección es de tipo geométrica y genera una diferencia en la coordenada norte y una diferencia en la coordenada este, las diferencias van a depender de la distancia medida en la dirección babor-estribor del barco entre la ecosonda y la antena de posicionamiento la cual es constante, la distancia medida en la dirección proa-popa la cual también es constante y para el caso es cero, y el rumbo del barco para cada instante de medición el cual si es variable y es un dato que se presenta en los parámetros de posicionamiento de los archivos originales de la batimetría.

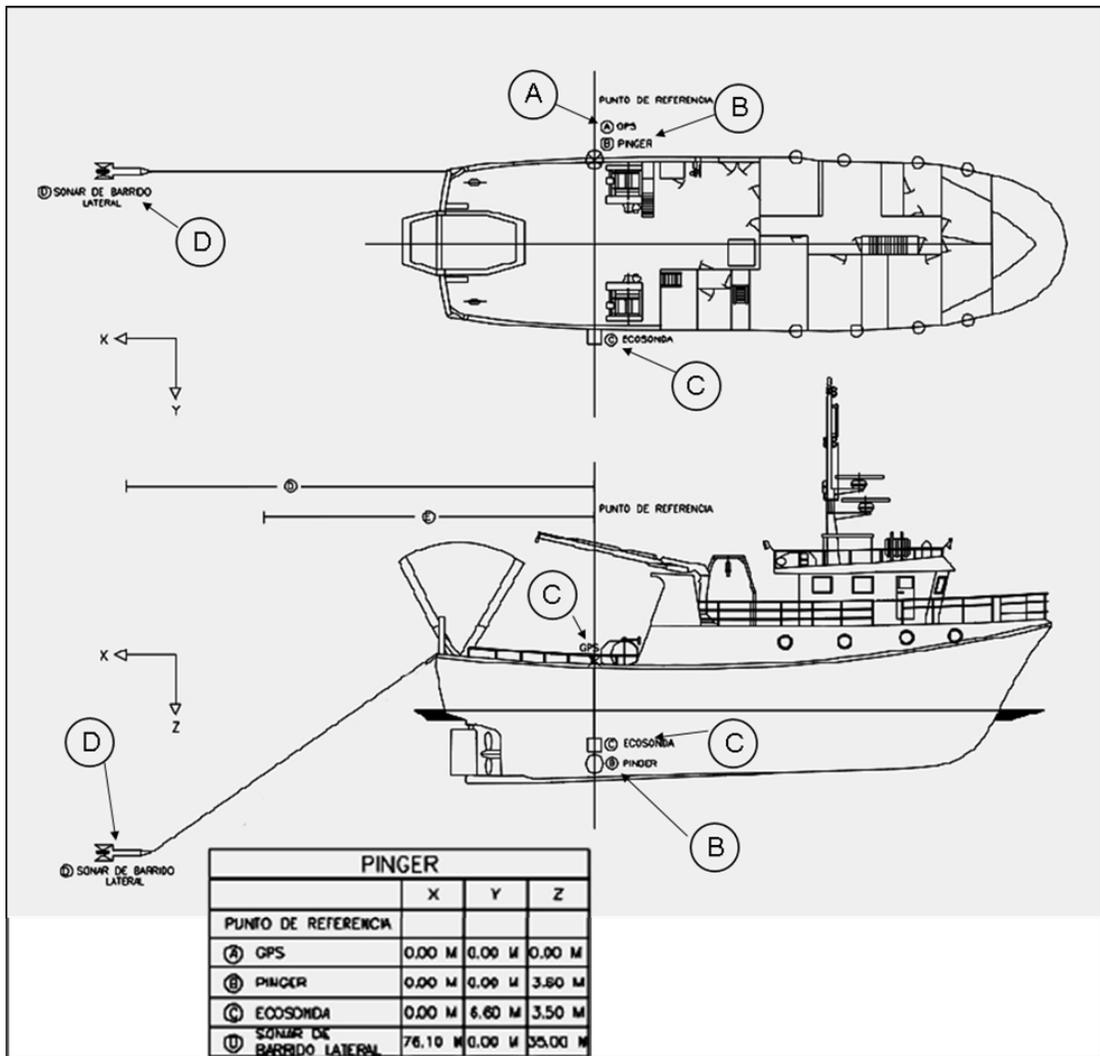


Figura 3.5. Ubicación de los equipos en la embarcación. A: Antena GPS. B: Pinger. C: Ecosonda. D: Sonar de barrido lateral. (modificado de Incostas, 2009)

Para facilitar el cálculo de la posición se vacían los datos en una hoja de cálculo y se resuelve el problema trigonométrico de la siguiente forma:

Observando el diagrama mostrado en la figura 3.6 se puede deducir lo siguiente:

$$\Delta h = AB * \text{Sen}(\beta - 90) \quad (3.1)$$

$$\Delta v = AB * \text{Cos}(\beta - 90) \quad (3.2)$$

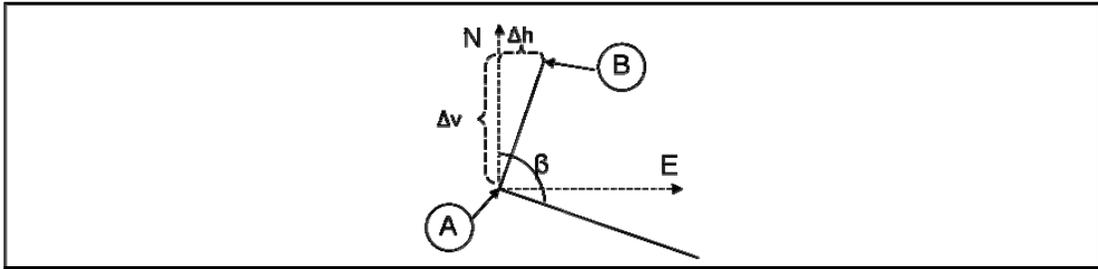


Figura 3.6. Diagrama de cálculo de ubicación de equipos. A: ubicación relativa de la antena GPS. B: ubicación relativa de la ecosonda. β : rumbo de la embarcación.

De esta forma la coordenada este de la ecosonda es la coordenada este de la antena GPS mas Δh y la coordenada norte es la coordenada norte de la antena GPS mas Δv .

3. Corrección por mareas y suavizado del oleaje: para realizar la corrección por mareas fueron utilizadas predicciones de marea de la zona de estudio para las fechas en que fue realizada la adquisición de los datos, la amplitud de la marea para cada instante fue restado o sumado al valor batimétrico adquirido en ese momento de tal forma de que los datos estén referidos al mismo datum vertical.

Por otro lado, el suavizado del oleaje se realiza por línea debido a que su efecto sobre los registros varía según las condiciones de sondeo, por ejemplo, el oleaje varía según la dirección del viento, del rumbo de la embarcación durante la adquisición de cada línea, (si este es a favor del oleaje los datos tienen un comportamiento distinto a los datos adquiridos con el rumbo de la embarcación en contra de el oleaje), entre otras cosas.

4. Generación del mapa batimétrico: a partir de los datos adquiridos y procesados se generó un mapa batimétrico del área de estudio utilizando el software Surfer 9 ®. Fue necesario la aplicación de un filtro Gaussiano a la interpolación para suavizar las isóbatas y evitar la reproducción de las líneas de adquisición. El método de interpolación utilizado fue Kriging en un mallado de 20X20 m (Figura 3.7).

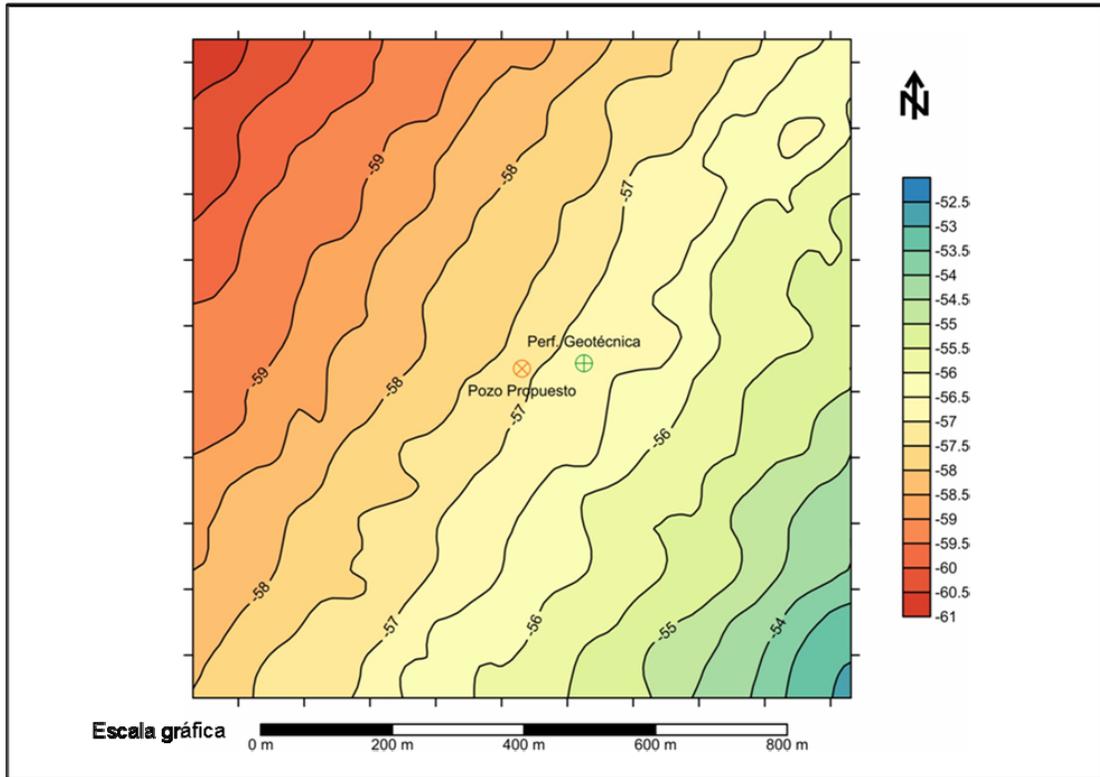


Figura 3.7. Mapa batimétrico. Método de interpolación Kriging, mallado 20X20.

Al inspeccionar la figura 3.7 se puede observar que las líneas isóbatas tienen una dirección aproximada N40°E delimitando profundidades entre 53 m hacia el sureste y 60,5 m hacia el noroeste con pendientes muy suaves (alrededor de 0,5%) en dirección aproximada de S50°E.

3.2. Sonar de Barrido Lateral

Con el propósito de observar los cambios de reflectividad del fondo marino, a partir de los registros de Sonar de barrido lateral se generó un mosaico. Este permite desplegar todos los registros en una imagen que cubre el área de estudio utilizando el software GeoPro4 OSX MOS V2 3.35®. Siguiendo la secuencia de procesamiento siguiente:

1. Ajustar la ganancia variante en tiempo: al observar cada uno de los registros de sonar de barrido lateral se determinó la necesidad de aplicar una compensación por pérdida de ganancia. En la figura 3.8 se muestra un registro de sonar de barrido lateral en el que puede observarse que las amplitudes cercanas al fondo (que se encuentran más cerca del instrumento) son mayores y que esta amplitud disminuye gradualmente a medida que se aleja la señal. Esto es corregido ajustando la ganancia variante en tiempo (Time Variant Gain o TVG), permitiendo ajustar la curva hasta lograr un registro más uniforme y más ajustado a lo esperado (Figura 3.9).

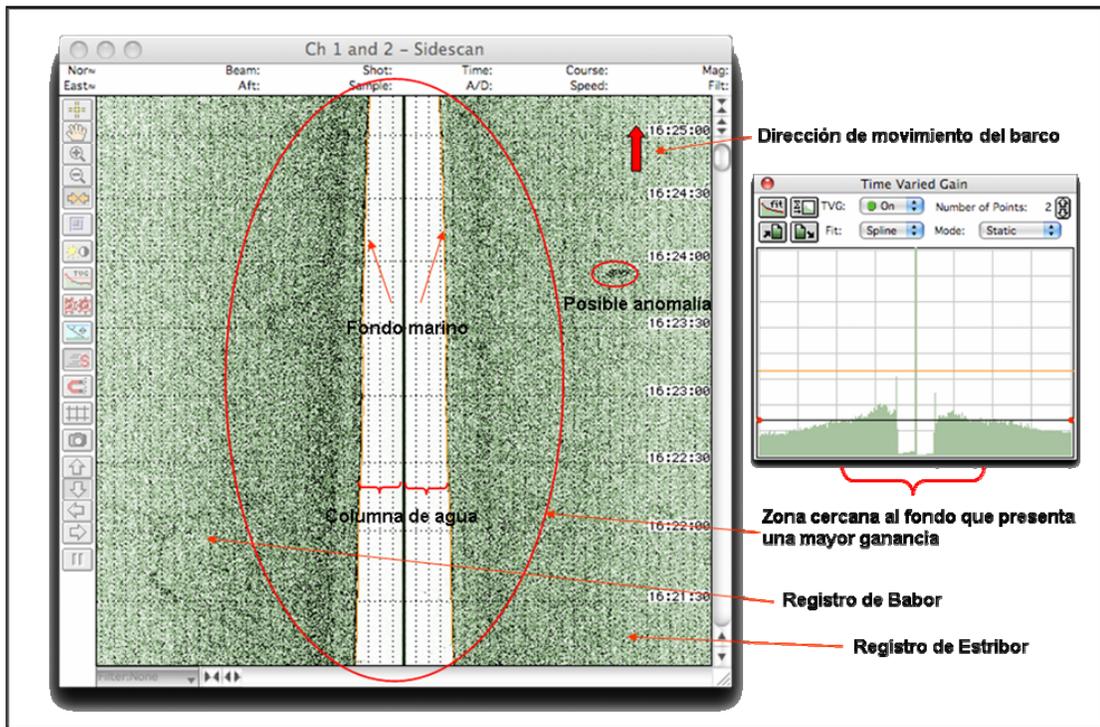


Figura 3.8. Imagen de Sonar de barrido lateral sin procesamiento.

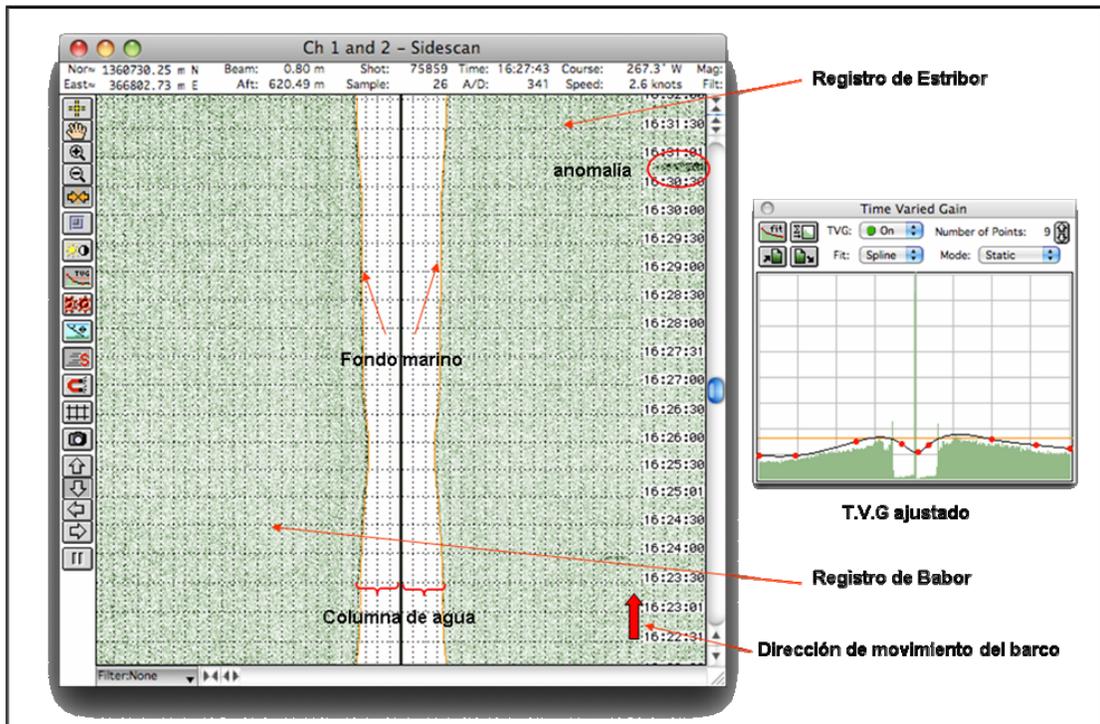


Figura 3.9. Imagen de Sonar de barrido lateral con T.V.G ajustado.

2. Corrección por inclinación: una vez determinada una curva que se ajuste uniformemente a todos los registros se procede a seleccionar el fondo para que la corrección por inclinación se realice correctamente, para facilitar esta tarea se selecciona el fondo en el osciloscopio, como se aprecia en la figura 3.10. En esta corrección el programa convierte el registro de tiempo a distancia, además de que elimina el efecto de la columna de agua entre el instrumento y el fondo, por lo que es necesario introducirle la velocidad del agua medida en campo, y que para el caso es 1547 m/s (Apéndice 1).

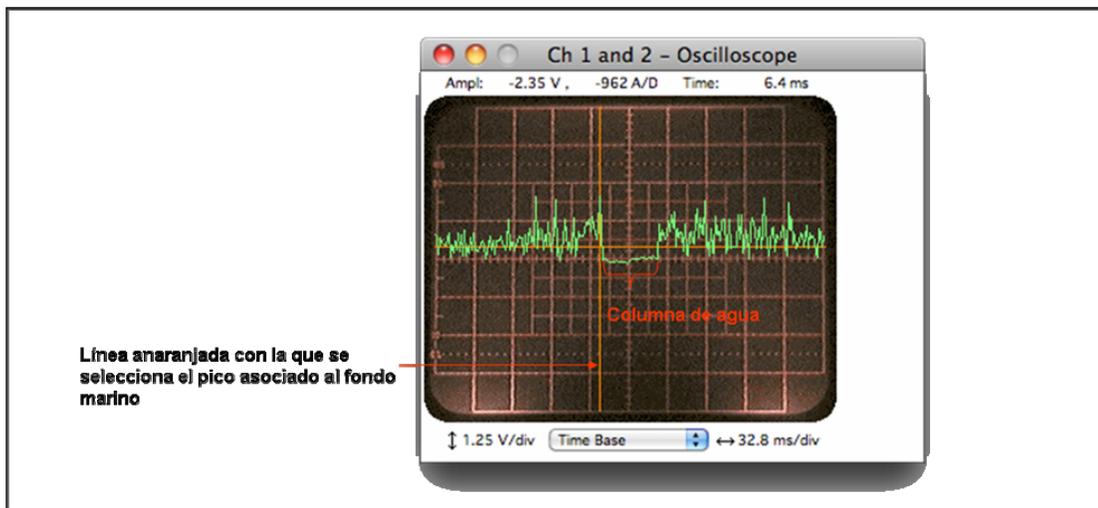


Figura 3.10. Imagen del osciloscopio donde se aprecia el espectro de frecuencia en tiempo del registro de sonar de barrido lateral para un instante determinado.

3. **Grabación del mosaico:** uno por uno son reproducidos todos los registros de sonar de barrido lateral, mientras es grabado simultáneamente el mosaico (Figura 3.11). Debe ajustarse en el programa antes de reproducir cada línea la distancia entre la embarcación y el transductor (*layback*, ver figura 3.4) para obtener una imagen georeferenciada en este proceso.

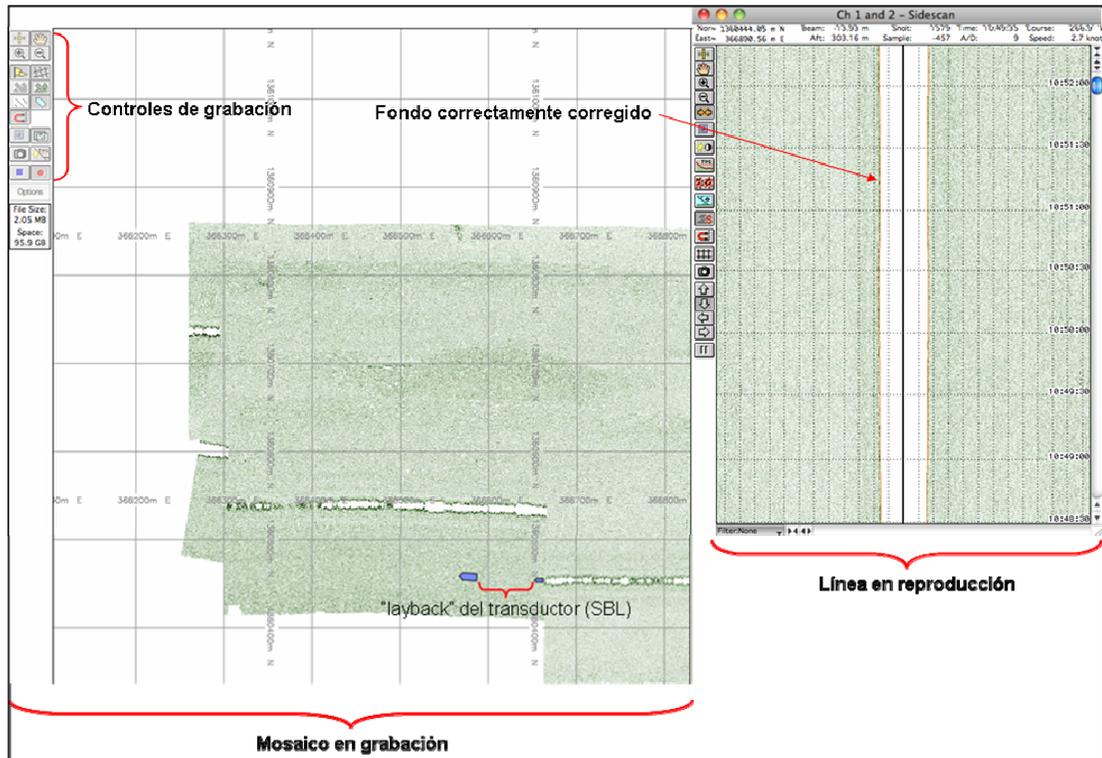


Figura 3.11. Grabación del mosaico.

4. Interpretación del Sonar de barrido Lateral: la figura 3.12 presenta el mosaico del sonar de barrido lateral junto con las isóbatas con la intención de mostrar alguna relación entre la profundidad/morfología del fondo marino y la reflectividad de los sedimentos, en caso de que existiera. Se puede observar que la reflectividad es bastante uniforme y no presenta variaciones importantes, salvo algunas identificadas hacia el este del área de estudio que se interpretan como de origen instrumental o de procesamiento y no a variaciones de reflectividad del fondo marino. De igual manera tampoco se identifican obstáculos como tuberías o escombros en la zona de estudio. En consecuencia la reflectividad del fondo marino y la batimetría se relacionan, indicando que la zona se caracteriza por un fondo marino plano, regular y de reflectividad uniforme.

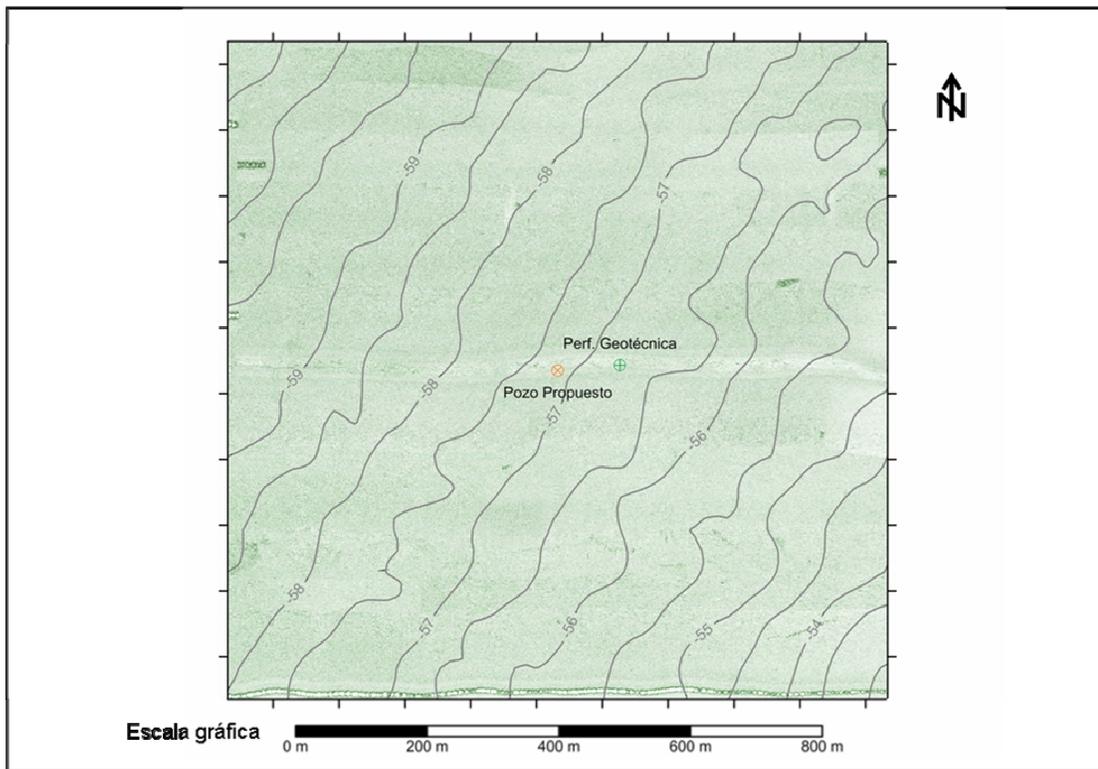


Figura 3.12. Imagen de mosaico de Sonar de Barrido Lateral con batimetría superpuesta.

3.3. Perfilador de fondo tipo Pinger

A continuación se explica el procesamiento que se aplicó para los 20 km de líneas adquiridas con Pinger, utilizando el software GeoPro4 OSX MOS V2 3.35®. Siguiendo la secuencia de procesamiento a continuación.

1. Ajustar la ganancia variante en tiempo (TVG): al examinar cada uno de los registros del perfilador de subfondo tipo Pinger se determinó la necesidad de aplicar una compensación por pérdida de ganancia, la figura 3.13 muestra un registro de Pinger en el que puede observarse que las amplitudes cercanas al fondo (que se encuentran más cerca del instrumento) son mayores y que esta amplitud disminuye gradualmente a medida que se aleja la señal (divergencia esférica, atenuación de la señal).

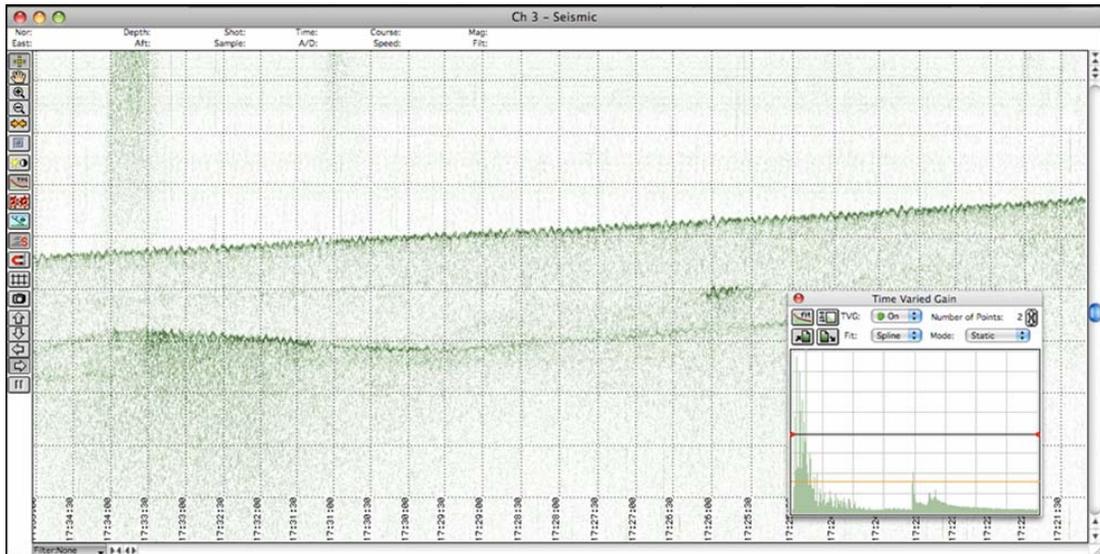


Figura 3.13. Registro de Pinger sin procesar.

Esto es corregido al ajustar la ganancia variante en tiempo (Time Varied Gain o TVG), al modificar la curva hasta lograr un registro más uniforme y ajustado a lo esperado como se muestra en la figura 3.14.

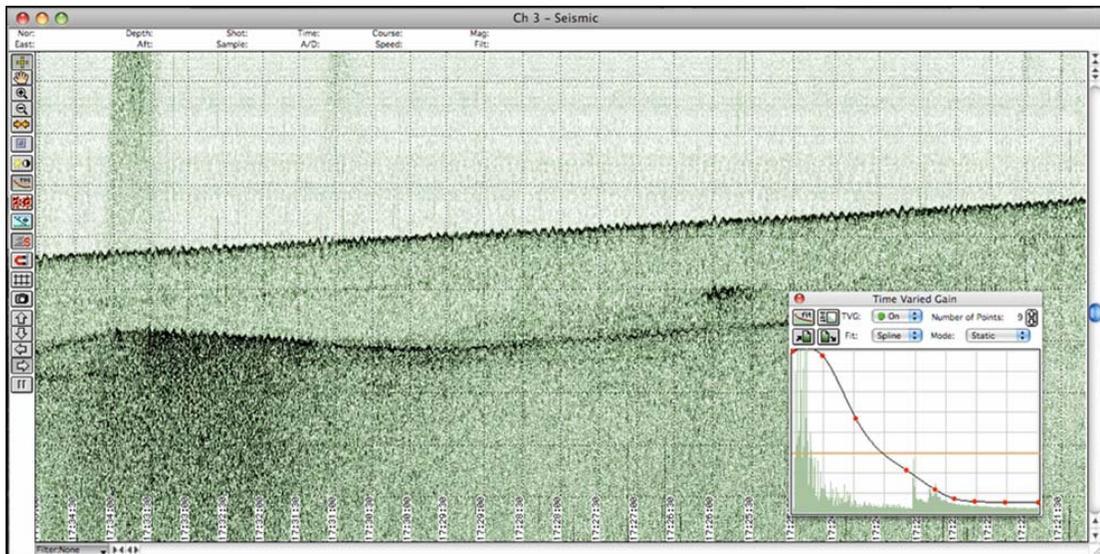


Figura 3.14. Registro de Pinger con la ganancia variante en tiempo ajustada.

En la figura 3.15 se muestra un ejemplo del ajuste de un TVG en el cual se observa en negro la curva de control de ganancia variable; que aumenta la ganancia del registro mientras mas cerca se encuentre del espectro de amplitud. En naranja se observa la barra de nivel de ganancia, o ganancia general.

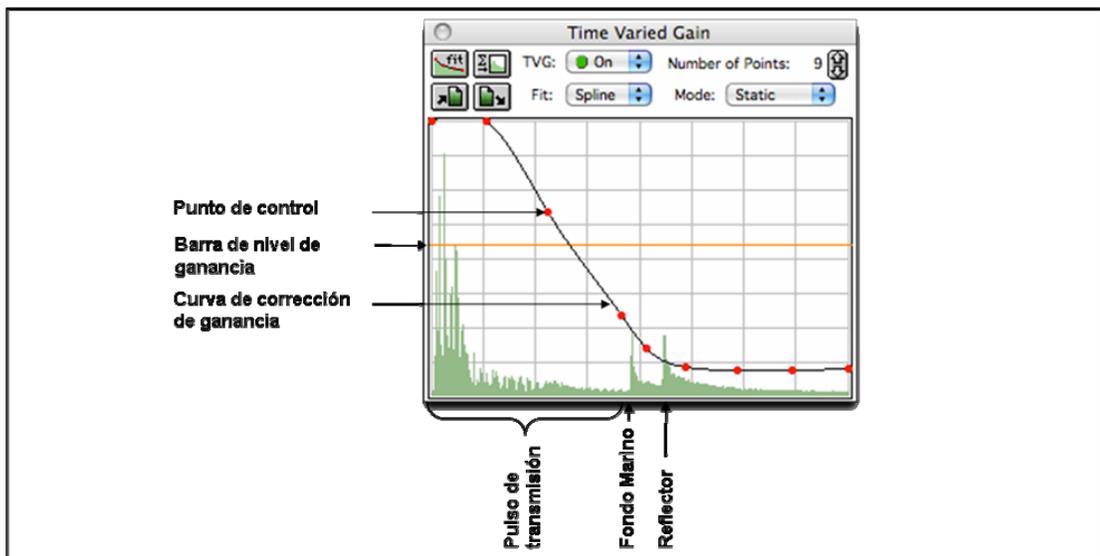


Figura 3.15. Ejemplo de ajuste de ganancia variante en tiempo (T.V.G).

2. Aplicación de filtros de frecuencia: para atenuar el ruido producido por el pulso de transmisión, electrónicos y otros ruidos de baja frecuencia (como el motor de la embarcación) se aplicó un filtro pasabanda con frecuencias de paso entre 1900 Hz y 4463 Hz. La figura 3.16 muestra a la izquierda el espectro de amplitud de un registro, a la derecha se muestra la frecuencia de paso alta (1900 Hz) y la frecuencia de paso bajo (4463 Hz) en el módulo de filtro digital. La figura 3.17 muestra un registro de perfilador de fondo tipo Pinger como producto final del procesamiento después de la aplicación del filtro digital.

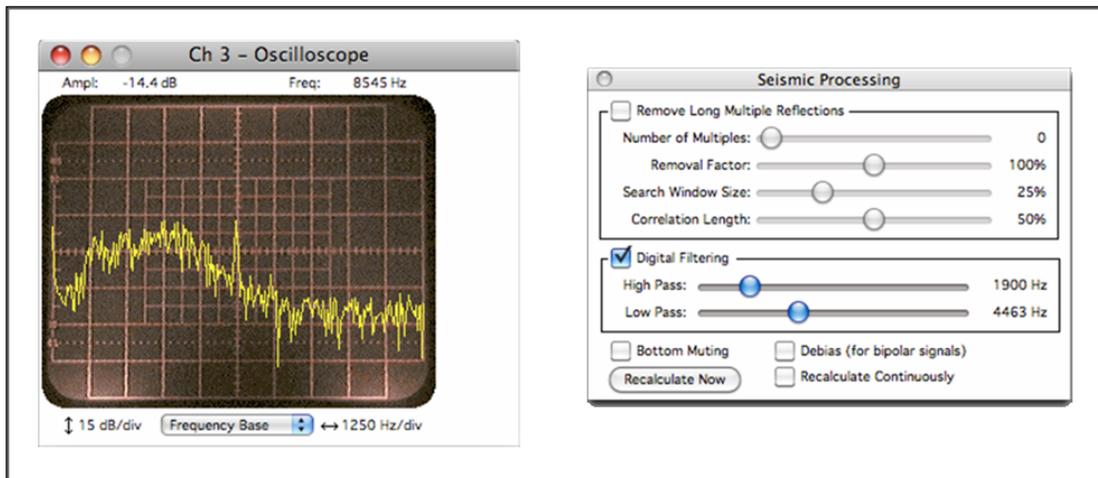


Figura 3.16. Espectro de amplitud y filtro pasabanda Pinger.

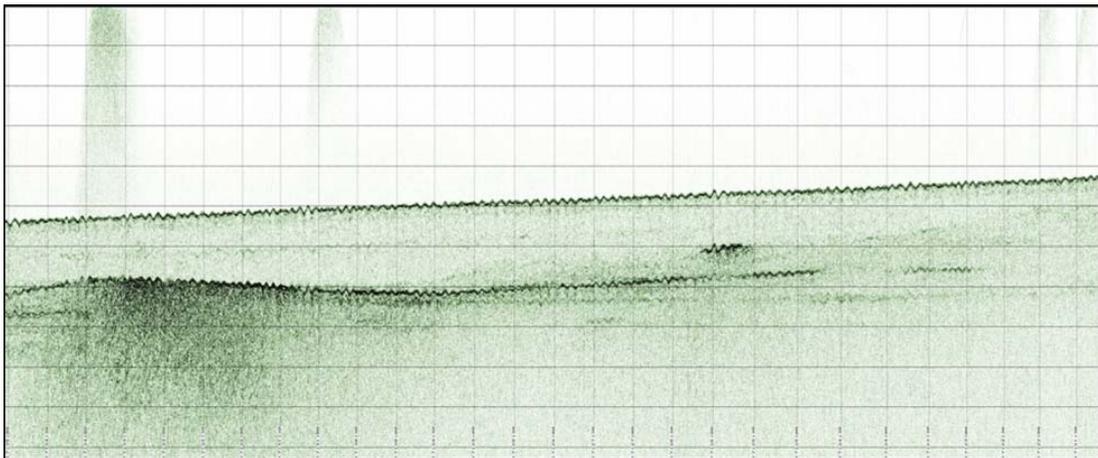


Figura 3.17. Registro de Pinger procesado.

3. Transformación a profundidad e interpretación: finalmente se introduce al software una velocidad promedio (velocidad medida en campo: 1549 m/s, apéndice 1) que es computada por el mismo para obtener la sección en profundidad. Posteriormente se establece una escala gráfica adecuada para la exportación de las imágenes para su interpretación (Figura 3.18).

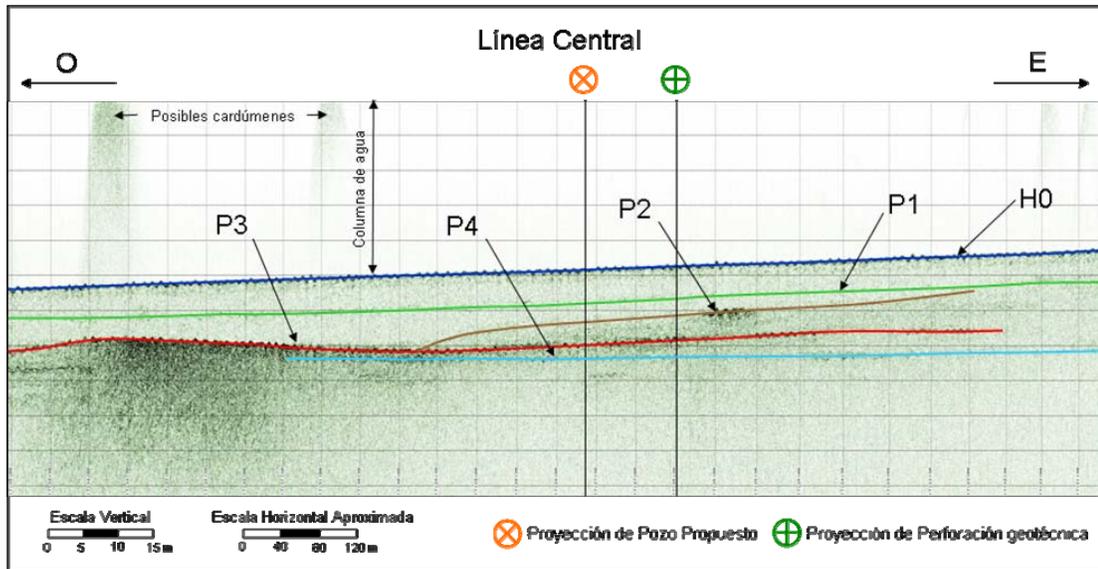


Figura 3.18. Línea central de Pinger interpretada.

Los registros del perfilador de fondo tipo Pinger permiten identificar 5 horizontes los cuáles son descritos a continuación:

H0: horizonte con alta reflectividad debido al contraste de impedancia entre los sedimentos depositados en el fondo marino y la columna de agua, identificándolo como el fondo marino. Es de gran importancia ya que se trata de una superficie común y observable en cada uno de los métodos utilizados en este trabajo, lo que lo convierte en una referencia para la correlación.

P1: horizonte subparalelo al fondo marino que presenta una reflectividad relativamente baja lo que sugiere un ligero cambio de facies en sedimentos recientemente depositados.

P2: este horizonte posee una reflectividad un poco mayor al horizonte anterior, sugiriendo una granulometría más gruesa. No se observa en toda la extensión del área de estudio, y presenta un acuñamiento hacia el oeste contra P3.

P3: este horizonte es el más característico de los registros, se encuentra más somero hacia el noroeste del área de estudio y presenta la mayor reflectividad de los registros la cual disminuye hacia el este, lo que pudiera sugerir un cambio lateral de facies.

P4: horizonte subparalelo al fondo marino que presenta una reflectividad relativamente alta, el cual es “apantallado” en algunas secciones por un evento que será descrito a continuación.

En la figura 3.19 se ven señaladas zonas en la que la reflectividad de los estratos suprayacentes crean un efecto dispersivo de la señal, mostrando zonas con amplitudes altas que enmascaran a otros reflectores que podrían encontrarse a mayor profundidad, este comportamiento en ocasiones se debe a acumulaciones de gas somero de origen biogénico a baja presión o acumulaciones locales de material orgánico (suelos orgánicos).

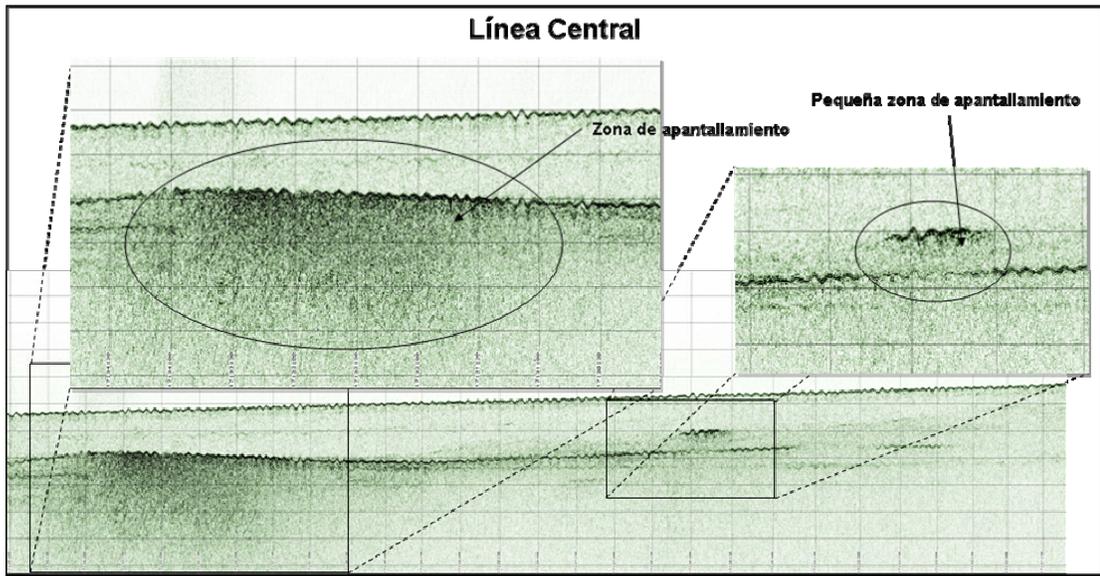


Figura 3.19. Zona de apantallamiento.

La alta frecuencia que utiliza el instrumento permite obtener registros de muy alta resolución; sin embargo, la penetración del mismo se ve comprometida. Para este caso el instrumento nos permitió observar reflectores hasta aproximadamente 15 m por debajo del fondo marino.

3.4. Perfilador de Fondo Tipo Sparker

A continuación se explica la secuencia de procesamiento que se aplicó para los 20 km de líneas adquiridas con el perfilador de fondo tipo Sparker utilizando el software GeoPro4 OSX MOS V2 3.35®. Siguiendo la secuencia de procesamiento mostrada a continuación.

1. Ajustar la ganancia variante en tiempo: al estudiar cada uno de los registros del perfilador de subfondo tipo Sparker se determinó la necesidad de aplicar una compensación por pérdida de ganancia, la figura 3.20 muestra un registro de Sparker en el que puede observarse que las amplitudes cercanas al fondo (que se encuentran mas cerca del instrumento) son mayores y que esta amplitud disminuye gradualmente a medida que se aleja la señal (divergencia esférica, atenuación de la señal).

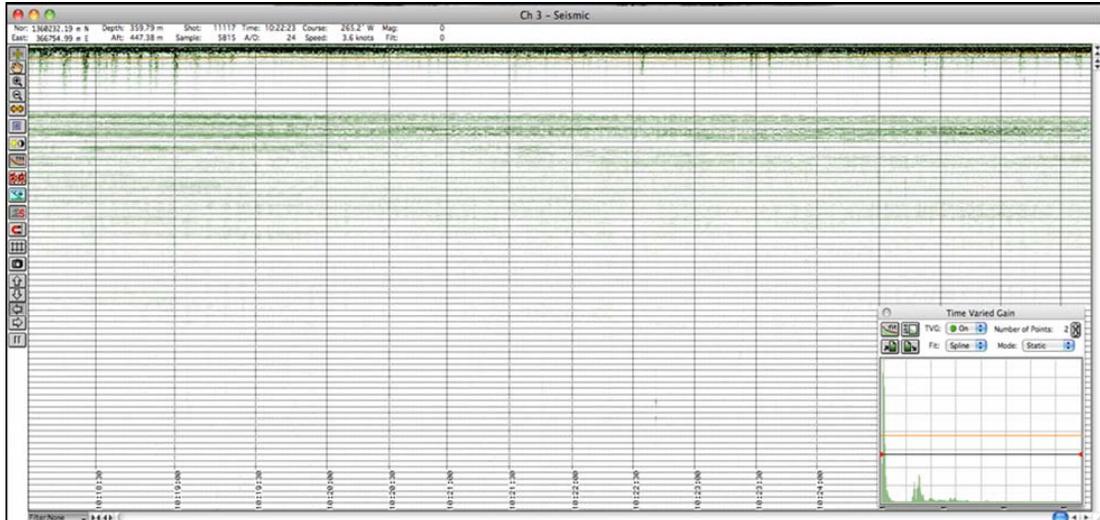


Figura 3.20. Registro de Sparker sin procesar.

Esto es corregido ajustando la ganancia variante en tiempo (Time Varied Gain o TVG), permitiendo ajustar la curva hasta lograr un registro más uniforme y acorde con la realidad como se muestra en la figura 3.21.

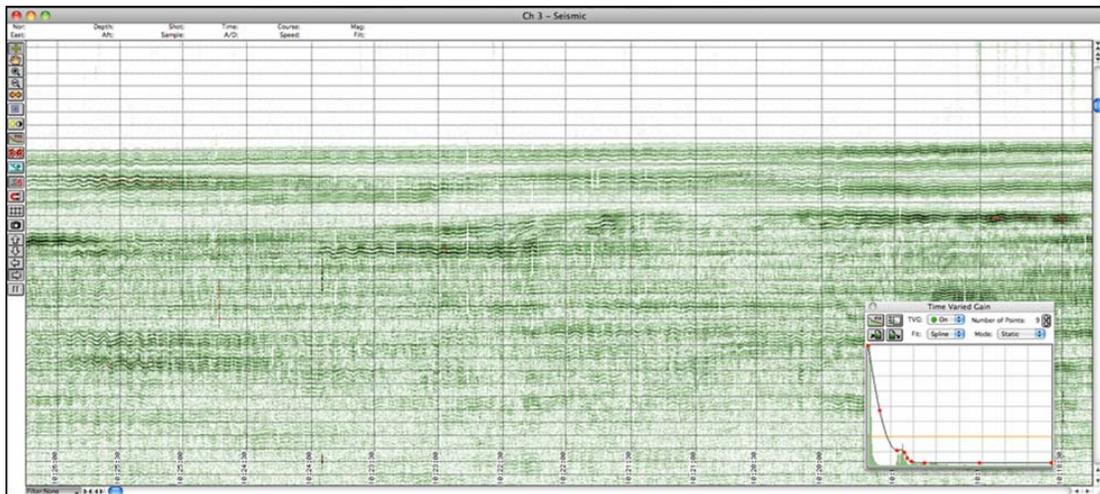


Figura 3.21. Registro de Sparker con la ganancia variante en tiempo ajustada.

2. Aplicación de filtros de frecuencia y Gamma: para atenuar el ruido producido por el pulso de transmisión, electrónicos y otros ruidos de baja frecuencia se aplicó un filtro pasabanda con frecuencias de paso entre 181 Hz y 731 Hz. La figura 3.22 muestra a la izquierda el espectro de amplitud de un registro, y a la derecha se muestra la frecuencia de paso alto (181Hz) y la frecuencia de paso bajo (731 Hz) en el módulo de filtro digital. La figura 3.23 muestra un registro de Sparker luego de la aplicación del filtro.

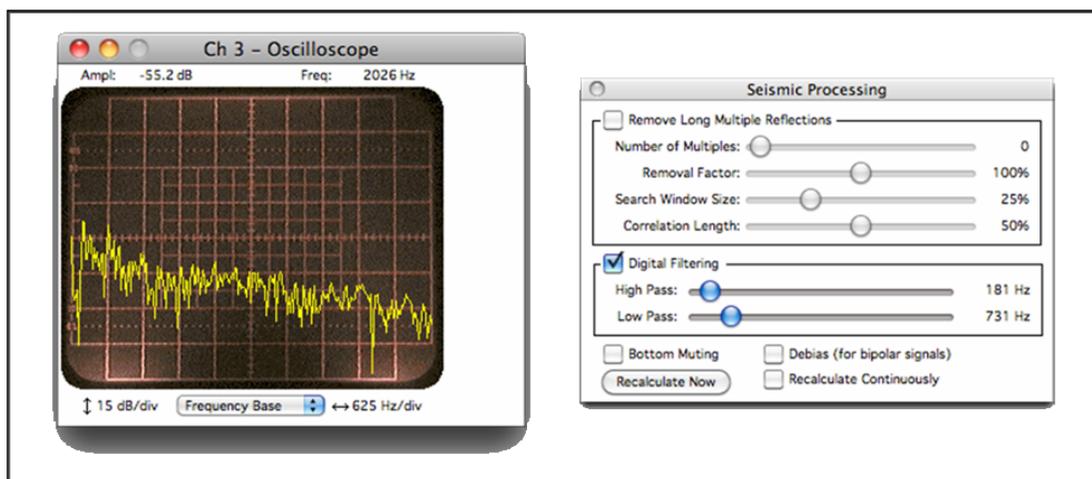


Figura 3.22. Espectro de amplitud y filtro pasabanda Sparker.

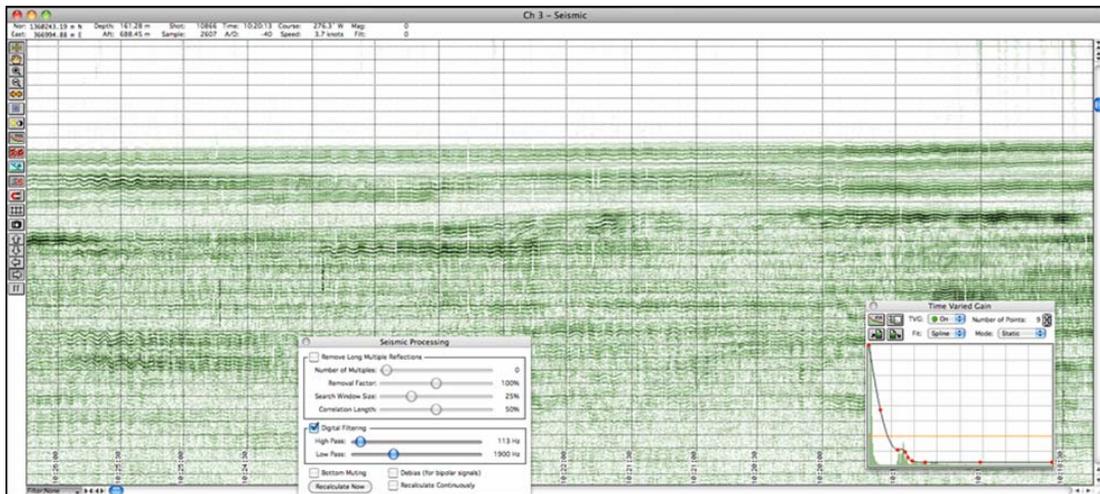


Figura 3.23. Registro de Sparker con el filtro aplicado

Finalmente para un mejoramiento de la imagen se realiza una corrección por gamma (Figura 3.24), y finalmente obtener el registro ya procesado (Figura 3.25).

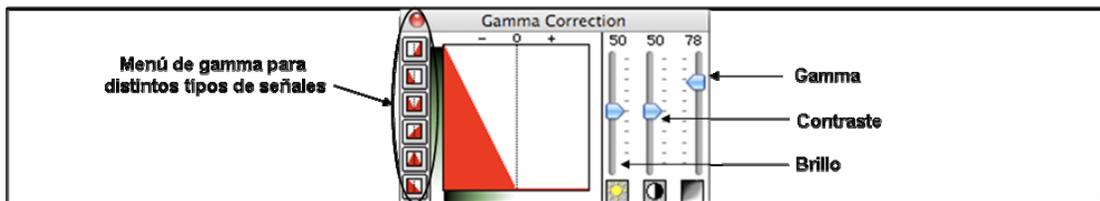


Figura 3.24. Corrección por gamma.

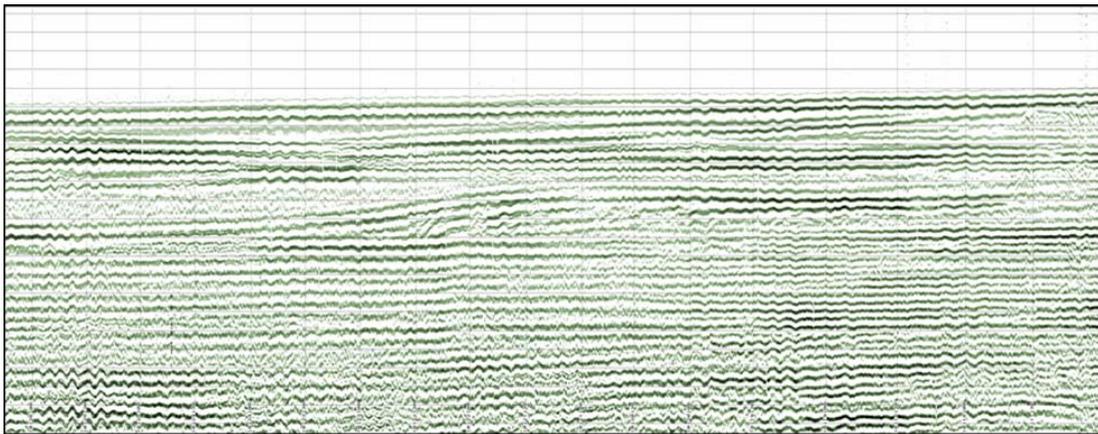


Figura 3.25. Sección de Sparker procesada.

3. Transformación a profundidad e interpretación: finalmente se le introduce una velocidad promedio, que en este caso fue la medida en campo de la columna de agua (1549 m/s, Apéndice 1). que es computada por el software y permite obtener la sección en profundidad, luego se establece una escala gráfica adecuada para la exportación de las imágenes para su interpretación. (Figura 3.26)

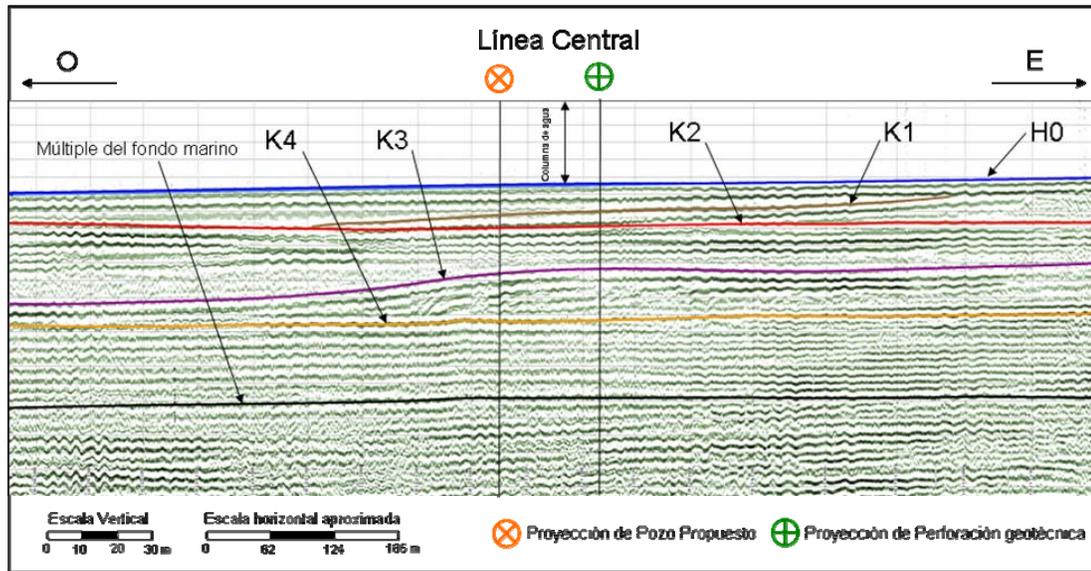


Figura 3.26. Interpretación de perfilador de fondo tipo Sparker

Los registros del perfilador de fondo tipo Sparker permitieron identificar 5 horizontes, además del múltiple del fondo marino los cuáles serán descritos a continuación:

H0: horizonte con alta reflectividad debido al contraste de impedancia entre los sedimentos depositados en el fondo marino y la columna de agua, identificándolo como el fondo marino. Es de gran importancia ya que se trata de una superficie común y observable en cada uno de los métodos utilizados en este trabajo, lo que lo convierte en una referencia para la correlación.

K1: horizonte que se observa hacia el este del área de estudio y se acuña contra K2 hacia el oeste.

K2: este horizonte es irregular y marca la base de una unidad de sedimentos recientemente depositados. Se encuentra más somero hacia el noroeste del área de estudio, y muestra un ligero cambio de reflectividad hacia el este lo que pudiera sugerir un cambio lateral de facies.

K3: este horizonte tiene características de superficie de inundación muy localizada escala ya que se observan pequeñas progradaciones infrayacentes.

K4: horizonte que marca la base del paquete de progradaciones y que forma parte de una serie de reflectores subparalelos al fondo marino.

Finalmente se observa el múltiple del fondo marino.

3.5. Sísmica Multicanal

A continuación se explican los pasos realizados en la interpretación de la sísmica multicanal utilizando el software Kingdom® de SMT siguiendo la secuencia de procesamiento mostrada a continuación.

1. Identificación de discontinuidades: en principio se observaron todas las líneas en búsqueda de discontinuidades en los reflectores que pudieran indicar rasgos estructurales o estratigráficos regionales.

La figura 3.27 presenta una línea que resume el comportamiento de los reflectores en el área de estudio, la imagen muestra que no existen discontinuidades de tipo estructural; sin embargo, si es posible observar reflectores con discontinuidades que describen pequeñas progradaciones, (A: se observan *downlaps*) al igual que se observa un reflector que cubre a los anteriores y que podría constituir una superficie de inundación.

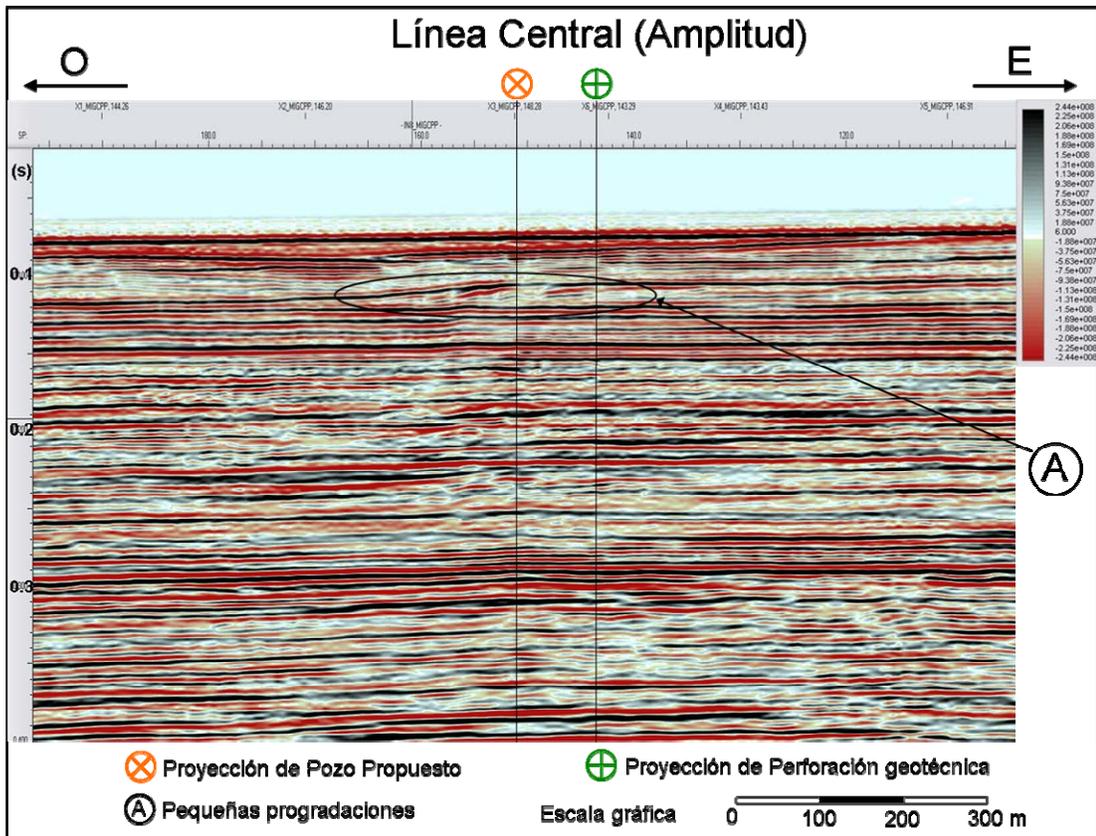


Figura 3.27. Línea central atributo de amplitud.

Fue aplicado el atributo de fase instantánea el cual se utilizó para detectar la continuidad de los reflectores. Además, debido a que no presenta ningún tipo de información de amplitud, todos los eventos son representados lo que permite observar algunos reflectores con mayor facilidad como el caso de las terminaciones en *Onlap* mostradas en la figura 3.28.

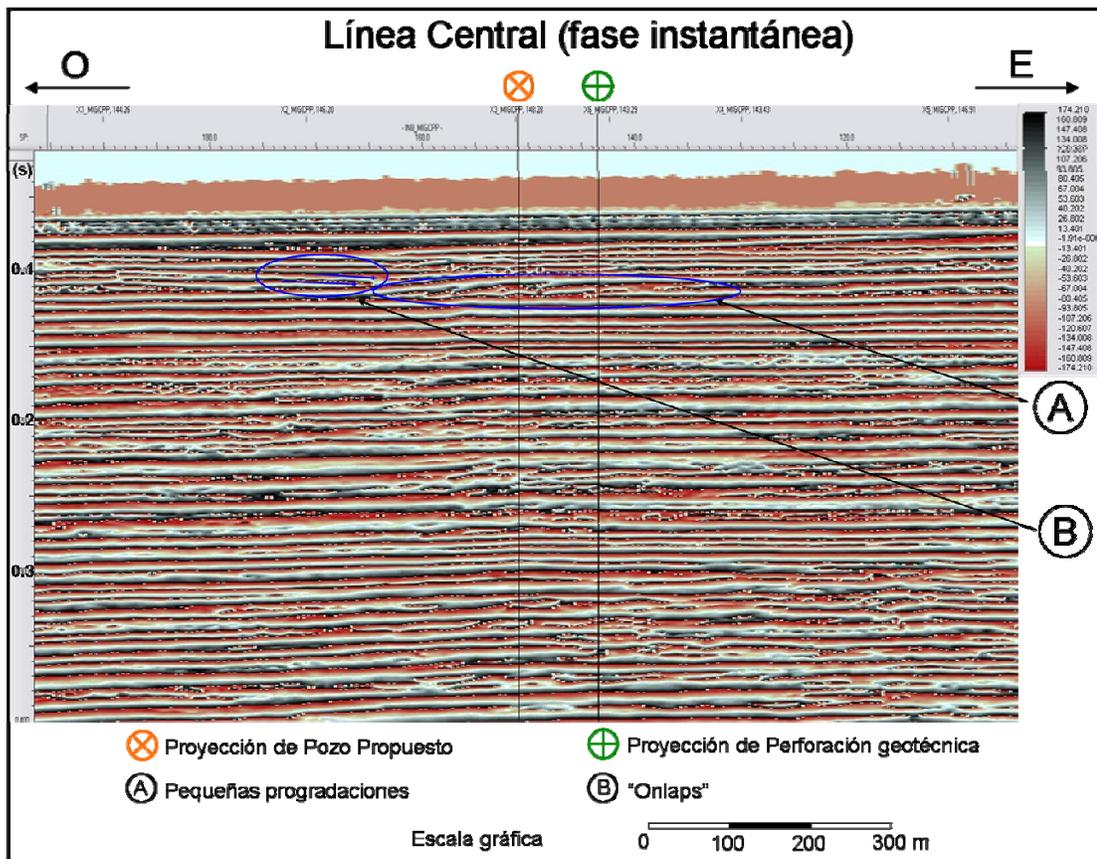


Figura 3.28. Línea central en atributo de fase instantánea.

A partir de este punto se empiezan a definir las primeras unidades litoestratigráficas como lo es una unidad de progradaciones, con su tope y su base y la unidad suprayacente de sedimentos recientemente depositados. Además se puede observar la tendencia de estratos inmediatamente infrayacentes a la base de las progradaciones, estos se presentan como planares y muy continuos los mas someros, mientras a medida que se profundiza los horizontes empiezan a presentar características discontinuas que podrían deberse a pequeños derrumbes o estructuras lenticulares.

2. Identificación de anomalías de amplitud: la identificación de anomalías de amplitud es fundamental para el reconocimiento de acumulaciones de gas. El atributo sísmico de envolvente de amplitud realza los cambios de reflectividad de los

3. Definición de unidades litológicas: en vista de lo observado se determinaron unidades litológicas definidas por los siguientes horizontes (Figura 3.30):

H0: horizonte con alta reflectividad debido al contraste de impedancia entre los sedimentos depositados en el fondo marino y la columna de agua, identificándolo como el fondo marino. Es de gran importancia ya que se trata de una superficie común y observable en cada uno de los métodos utilizados en este trabajo, lo que lo convierte en una referencia para la correlación.

M1: horizonte que dadas sus características define una superficie de inundación y es la base de una unidad de sedimentos recientemente depositados y el tope de pequeñas progradaciones.

M2: horizonte plano, base de pequeñas progradaciones y el último horizonte depositado en forma planar de una serie de estratos infrayacentes con estas características.

M3: horizonte plano de marcada reflectividad que indica un cambio litológico abrupto y que da paso a horizontes infrayacentes con características también planares pero con ligeras discontinuidades y variaciones de amplitud que indican cambios litológicos laterales debidos, posiblemente a pequeños derrumbes, lentes, entre otros.

M4: horizonte que marca un contraste de impedancia fuerte que podría definir una disconformidad o paraconformidad.

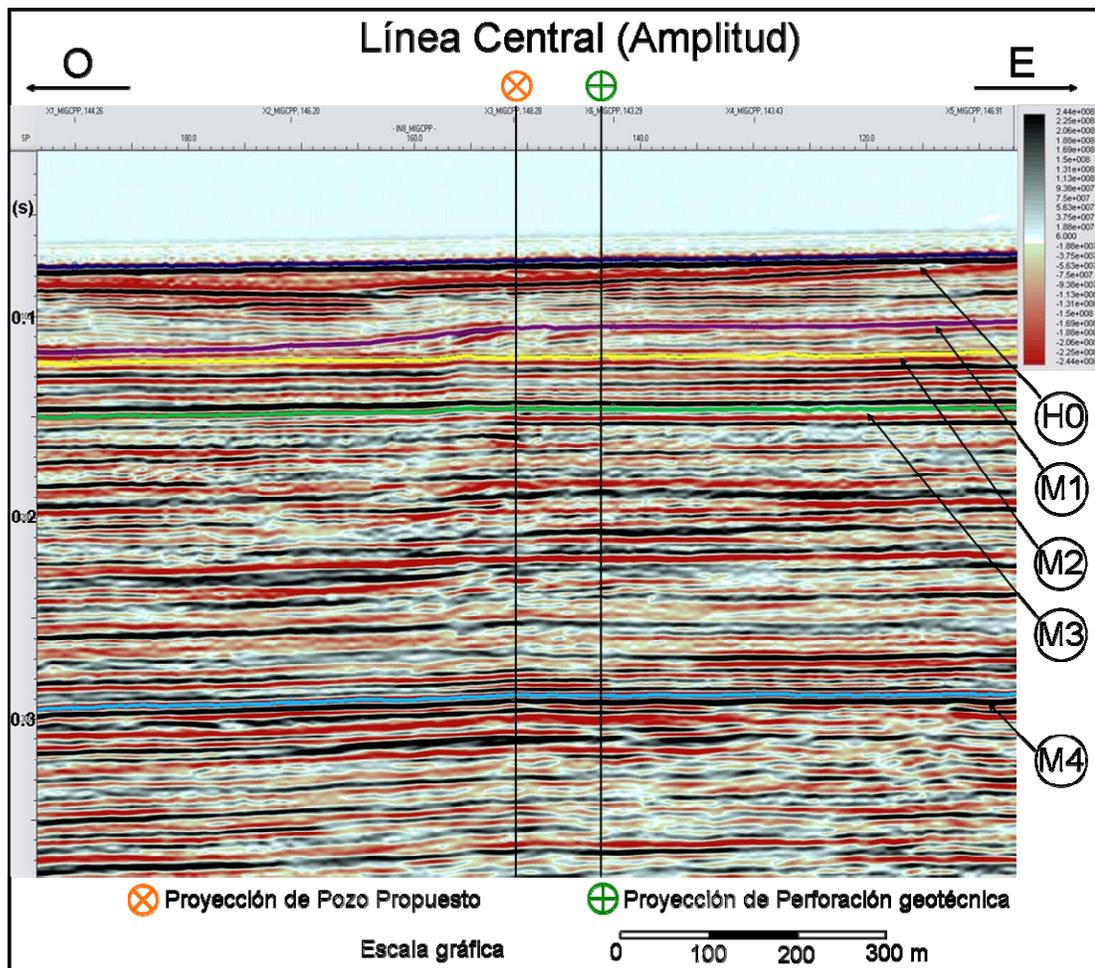


Figura 3.30. Línea central en atributo de amplitud interpretada

4. Inversión a profundidad: en vista de que en la zona no se cuenta con un perfil vertical de velocidades (*VSP*) que permita el amarre con la sísmica para una correcta conversión a profundidad, las velocidades utilizadas para realizar esta tarea fueron tomadas de las velocidades utilizadas en el procesamiento (Velocidades sísmicas RMS).

Estas velocidades fueron organizadas en un hoja de Microsoft EXCEL en pares de velocidad y tiempo doble de viaje, a partir de lo cual se generó un gráfico Velocidad vs Tiempo del cual se extrae una línea de tendencia como se observa en la figura 3.31.

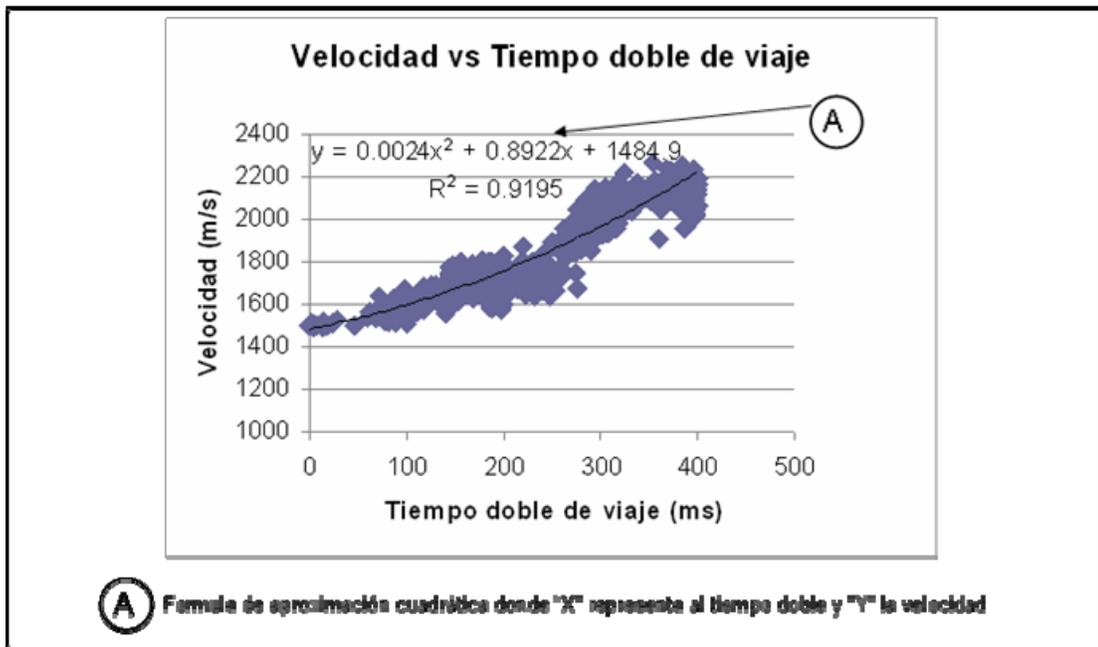


Figura 3.31. Gráfico de velocidad vs tiempo doble de viaje

A: fórmula de aproximación cuadrática donde "X" representa al tiempo doble y "Y" la velocidad

Los horizontes interpretados fueron exportados en tiempo doble en formato PRN. Se calculan isócronos restando cada horizonte con su inmediato horizonte suprayacente para obtener el tiempo doble en cada paquete estratigráfico. Estos tiempos al ser multiplicados por una velocidad promedio permiten obtener isópacos. La velocidad promedio se calcula de la siguiente manera:

Primero se obtienen las velocidades en cada horizonte vaciando sus tiempos en la fórmula "A" que se observa en la figura 3.30. De esta forma, promediando las velocidades de un horizonte suprayacente con su inmediato infrayacente, se obtiene una velocidad promedio para ese paquete estratigráfico.

Una vez obtenidos los isópacos (H0-M1, M1-M2, M2-M3 y M3-M4) se calcula la profundidad de cada reflector. Para el caso de la profundidad de H0 que

corresponde al fondo marino se utilizó el valor obtenido en la batimetría, la profundidad de M1 fue calculada sumando el isópaco H0-M1 y la batimetría, la profundidad de M2 se calculó sumando la profundidad de M1 con el isópaco M1-M2, la profundidad de M3 se calculó sumando la profundidad de M2 con el isópaco M2-M3 y la profundidad de M4 se calculó sumando la profundidad de M3 con el isópaco M3-M4, de esta forma se obtiene la profundidad de cada reflector interpretado referenciados al nivel medio del mar.

Para tener una aproximación de la precisión de los datos se calculó la resolución para distintas ventanas de tiempo delimitadas por los horizontes interpretados

Tabla 3.1 Resolución aproximada para cada paquete estratigráfico interpretado

Paquete	Velocidad prom (m/s)	Frecuencia dominante (Hz)	Resolución aprox (m)
H0-M1	1667 43	125	3 17
M1-M2	1619 92	167 6	2 16
M2-M3	1649 03	140 6	2 93
M3-M4	1608 70	136 7	3 31
H0-M4	1690 62	133	3 95

Tabla 3.2 Resolución aproximada para cada horizonte interpretado

Horizonte	Velocidad prom (m/s)	frecuencia dominante (Hz)	resolución aprox (m)
H0	1662 96	125 0	3 13
M1	1611 92	166 2	2 58
M2	1627 92	167 6	2 17
M3	1670 14	125 0	3 34
M4	1947 26	125 0	3 69

Como se puede observar, la resolución obtenida en la adquisición de los datos es bastante buena y muy superior a la obtenida en estudios de prospección de hidrocarburos ya que el objetivo es somero y detallado.

3.6. Correlación

Para llevar a cabo la correlación fue tomada en cuenta la profundidad obtenida para cada horizonte de cada uno de los métodos geofísicos utilizados, con la intención de unificar éstos en una misma nomenclatura y relacionarlos con las interfases litológicas observadas en la perforación geotécnica.

El datum vertical de la columna estratigráfica es 58,19 m por debajo del nivel medio del mar, mientras la profundidad medida por la batimetría en este punto es de 56,81 m por debajo del nivel medio del mar, encontrándose el datum geotécnico 1,38 m más profundo. Esto se debe a que la profundidad medida en la perforación es la aquella a la cual el taladro perforador encontró suficiente resistencia de tal forma que fuese posible la recuperación de muestras para su análisis, de ninguna forma se pone en duda la precisión de la ecosonda y esto es tomado en cuenta en las correlaciones mostradas en la figura 3.32 y la figura 3.33, en las que fue ajustado el datum geotécnico 1,38 m por debajo del fondo detectado por la sísmica.

La figura 3.32 y la figura 3.33 muestran la correlación entre cada método de investigación del subfondo marino empleado (sísmica monocanal y sísmica multicanal) y la perforación geotécnica en las líneas centrales adquiridas en las direcciones E-O y N-S respectivamente.

La figura 3.32 muestra la correlación en la dirección E-O, en la que se observa a la derecha las líneas interpretadas y a la izquierda la columna estratigráfica y una tabla comparativa entre las profundidades obtenidas con cada método. Y la figura 3.33 muestra la correlación en la dirección N-S, en la que se aprecia a la derecha las líneas interpretadas y a la izquierda la columna estratigráfica y una tabla comparativa entre las profundidades obtenidas con cada método.

Correlación Línea Central dirección este-oeste

Tabla de comparación de espesores de horizontes interpretados

Horizonte	Prof. Geotécnia (m)	Prof. Geotécnia (dat geof, m)	Prof. Pinger (m)	Prof. Sparker (m)	Prof. M.Canal (m)	Geofísica vs geotécnia (m)	Nueva nomenclatura
Ho	0	1.38	0	n/a	n/a	-1.38	H0
P1	1	2.38	4	n/a	n/a	1.62	H1
P2	7	8.38	7.02	n/a	n/a	-1.36	H2
P3	9	10.38	10.33	n/a	n/a	-0.05	H3
P4	12	13.38	12.8	n/a	n/a	-0.58	H4
K1	7	8.38	n/a	8.44	n/a	0.06	H2
K2	9	10.38	n/a	10.87	n/a	0.49	H3
K3	25	26.38	n/a	25.12	n/a	-1.26	H5
K4	35	36.38	n/a	40.34	n/a	3.96	H6
M1	25	26.38	n/a	n/a	26.72	0.34	H5
M2	35	36.38	n/a	n/a	37.8	1.42	H6
M3	n/a	n/a	n/a	n/a	59.24	n/a	H7
M4	n/a	n/a	n/a	n/a	187.28	n/a	H8

Columna estratigráfica obtenida en la perforación geotécnica

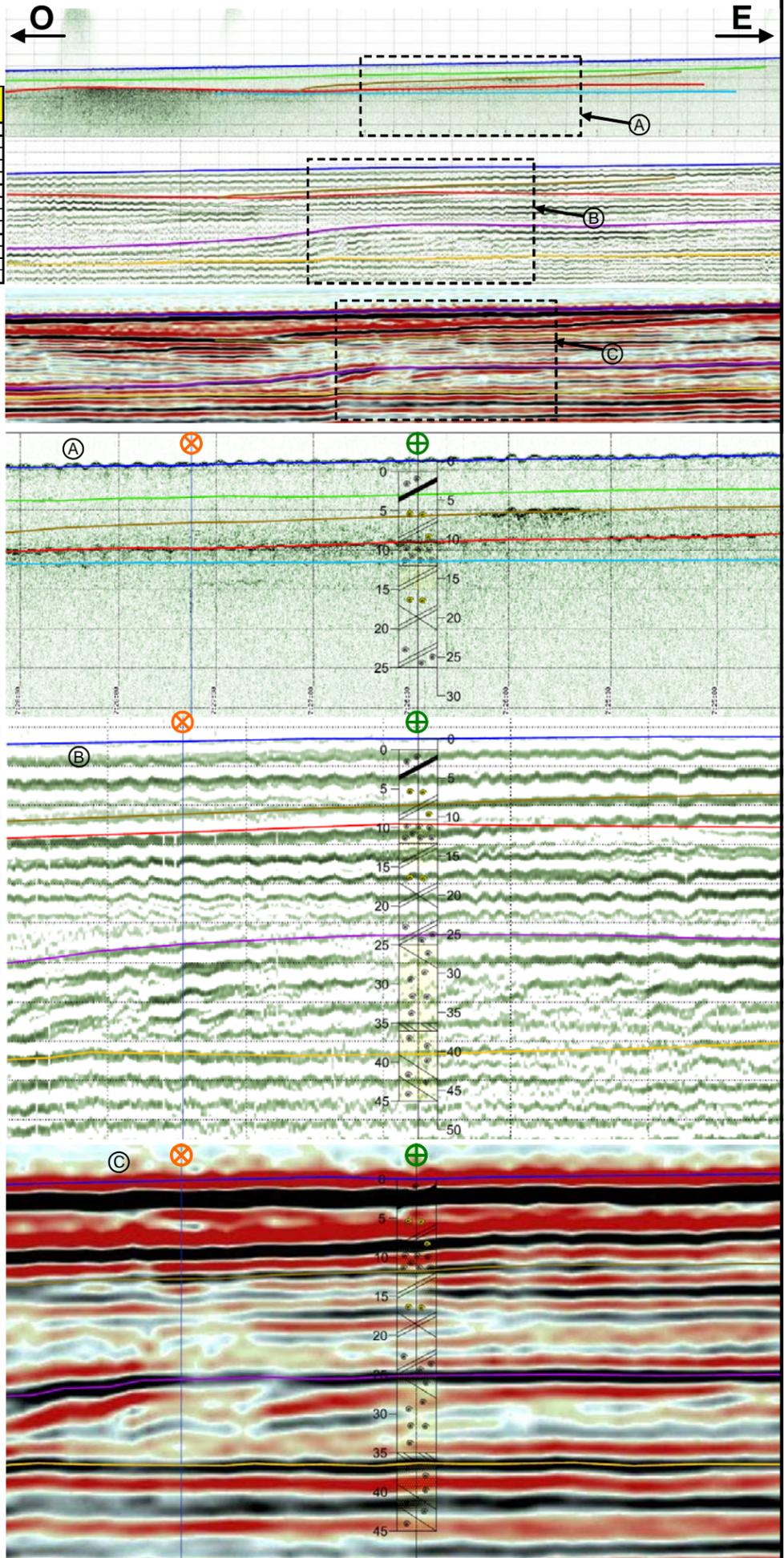
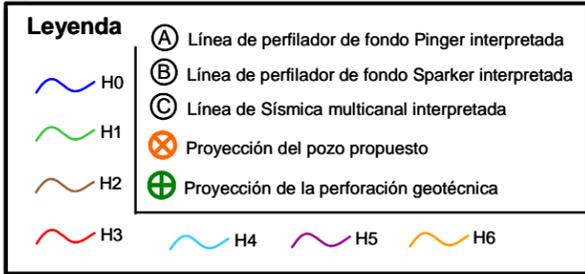
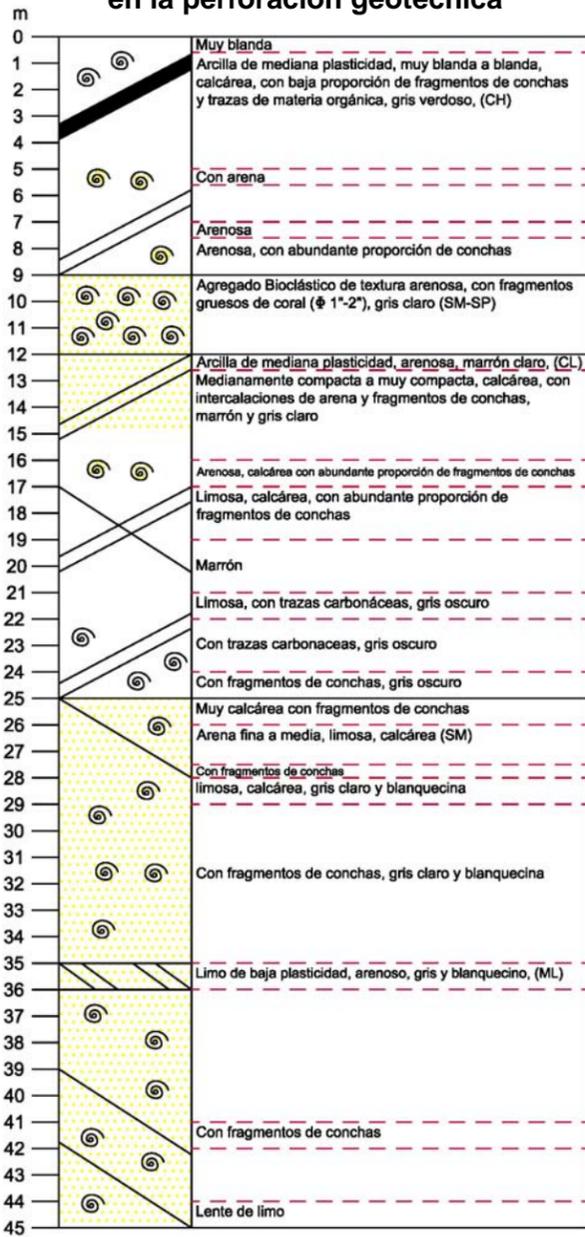


Figura 3.32. Correlación de la línea central en dirección este-oeste

Correlación Línea Central dirección norte sur

Tabla de comparación de espesores de horizontes interpretados

Horizonte	Prof. Geotécnica (m)	Prof. Geotécnica (dat geof. m)	Prof. Pinger (m)	Prof. Sparker (m)	Prof. M.Canal (m)	Geofísica vs geotecnia (m)	Nueva nomenclatura
Ho	0	1.38	0	n/a	n/a	-1.38	H0
P1	1	2.38	4	n/a	n/a	1.62	H1
P2	7	8.38	7.77	n/a	n/a	-0.61	H2
P3	9	10.38	10.56	n/a	n/a	0.18	H3
P4	12	13.38	12.41	n/a	n/a	-0.97	H4
K1	7	8.38	n/a	7.9	n/a	-0.48	H2
K2	9	10.38	n/a	9.62	n/a	-0.76	H3
K3	25	26.38	n/a	23.74	n/a	-2.64	H5
K4	35	36.38	n/a	39.25	n/a	2.87	H6
M1	25	26.38	n/a	n/a	26.7	0.32	H5
M2	35	36.38	n/a	n/a	37.3	0.92	H6
M3	n/a	n/a	n/a	n/a	59.1	n/a	H7
M4	n/a	n/a	n/a	n/a	187.7	n/a	H8

Columna estratigráfica obtenida en la perforación geotécnica

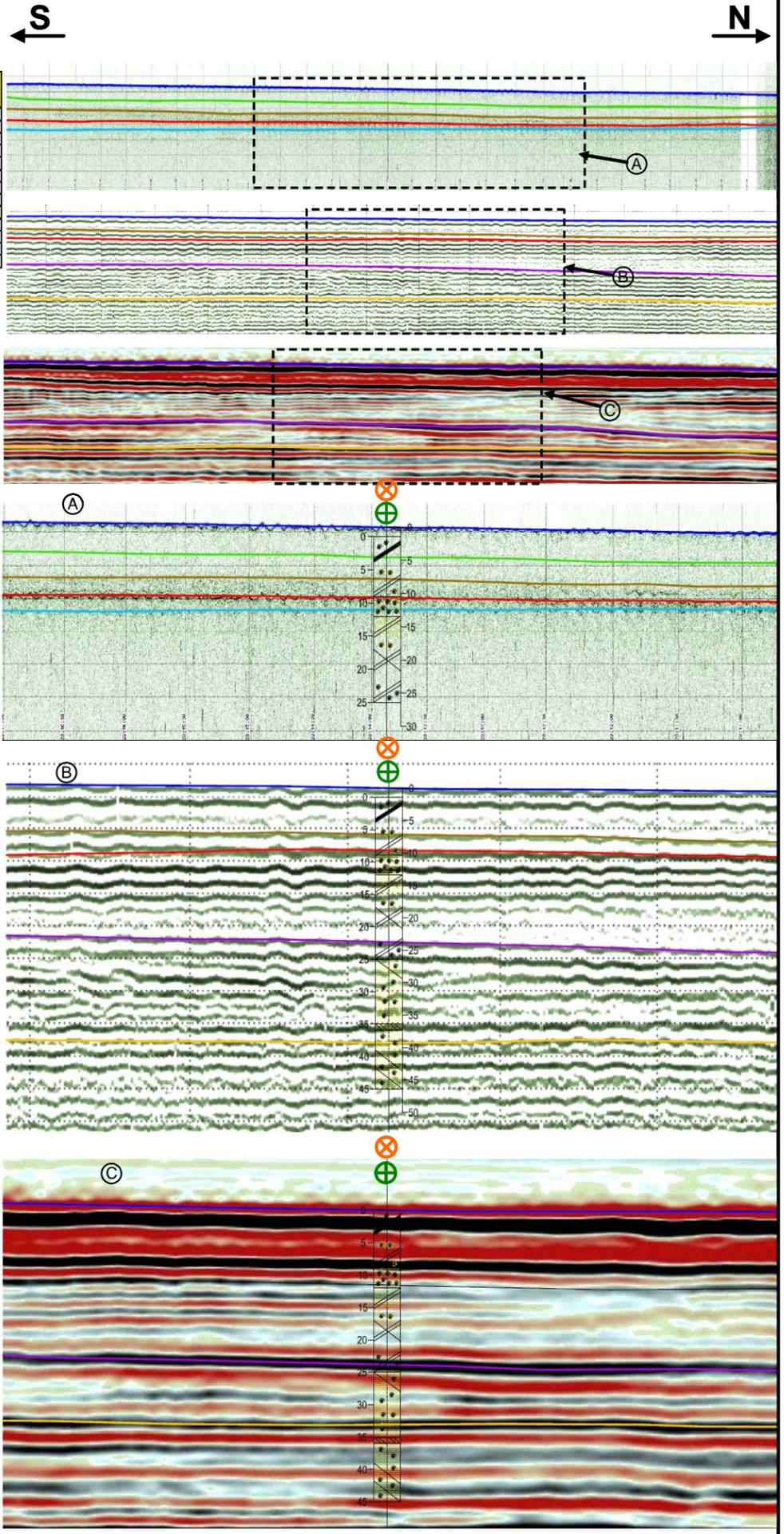
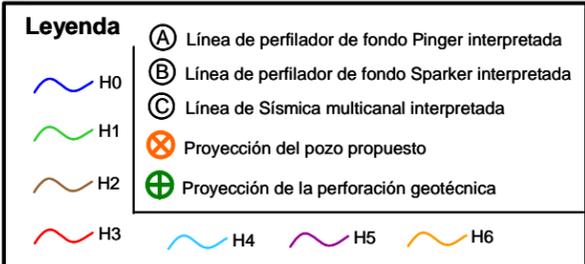
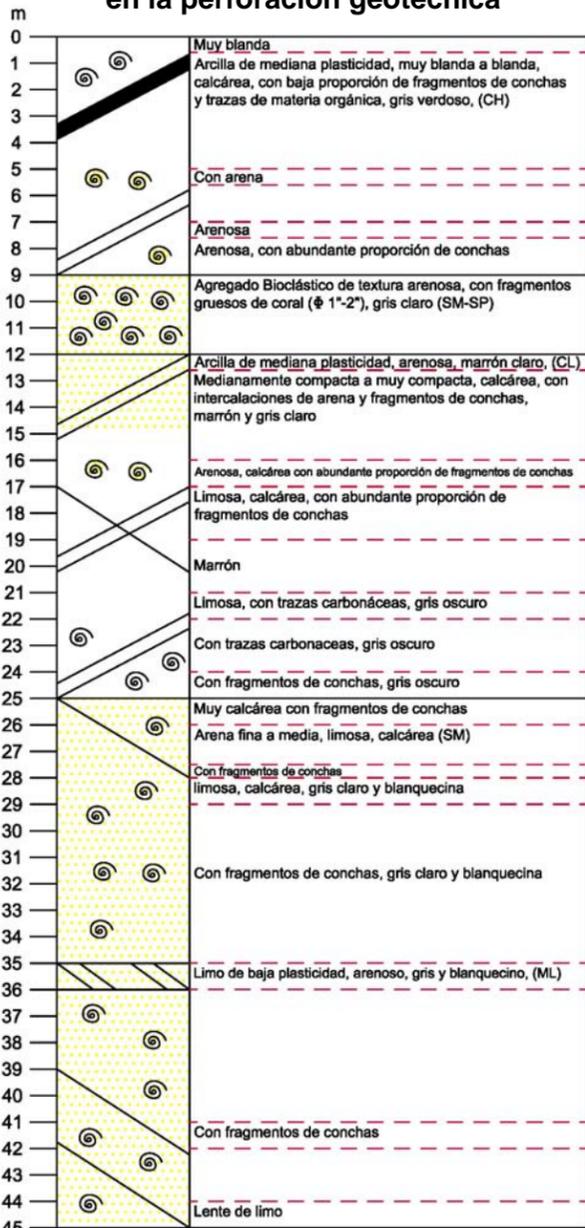


Figura 3.33 Correlación de la línea central en dirección norte-sur

Finalmente se definieron 8 horizontes para el área de estudio:

H0: fondo marino.

H1: ligero contraste de impedancia entre arcillas de alta plasticidad y media plasticidad.

H2: ligero contraste de impedancia entre arcilla de media plasticidad y arcilla arenosa.

H3: contraste de impedancia fuerte entre sedimentos finos y sedimentos granulares de origen bioclástico.

H4: contraste de impedancia fuerte entre material bioclástico de textura arenosa y arcillas compactas.

H5: pequeña superficie de inundación marcada por el contraste de impedancia entre arcillas compactas y arenas de grano fino.

H6: base de las progradaciones que marca el contraste de impedancia entre las arenas suprayacentes y una delgada capa de limo.

H7: base de una serie de intercalaciones de arena con un marcado contraste de impedancia del cual no se tiene información geológica.

H8: base de secuencia sedimentaria con características planares y posiblemente represente una paraconformidad o disconformidad.

CAPITULO IV

4. Resultados y análisis

En éste capítulo se mostrará la geología local inferida a partir de la integración de la información estratigráfica obtenida y la información geofísica interpretada para el área de estudio. Además se mostrarán los resultados y análisis de amenazas geológicas para la perforación en el área de estudio, a partir de la interpretación realizada en el capítulo III.

4.1. Geología local

La información geofísica adquirida permite darle continuidad lateral al perfil estratigráfico obtenido y, de esta manera determinar la disposición areal de los sedimentos depositados e inferir el sistema de depositación del área.

La alta concentración de conchas a lo largo del perfil geológico (Apéndice 3) permite suponer que la depositación fue en un ambiente cercano a la costa (transicional), similar al mostrado con una elipse roja en la figura 4.1. La presencia de materia orgánica y depósitos arcillosos supone un ambiente de baja energía, mientras el material bioclástico puede ser explicado por la proximidad de arrecifes coralinos y el aumento abrupto del nivel del mar como consecuencia de la desglaciación post-Winsconsin (Mérida II, figura 4.2), la cuál parece haber expuesto las capas ubicadas entre los 10 y los 25 m del perfil estratigráfico ya que presentan un índice de consolidación mayor a uno ($OCR > 1$), el cuál indica que los suelos están sobreconsolidados, característica indicativa de exposición subaerea (Apéndice 3).

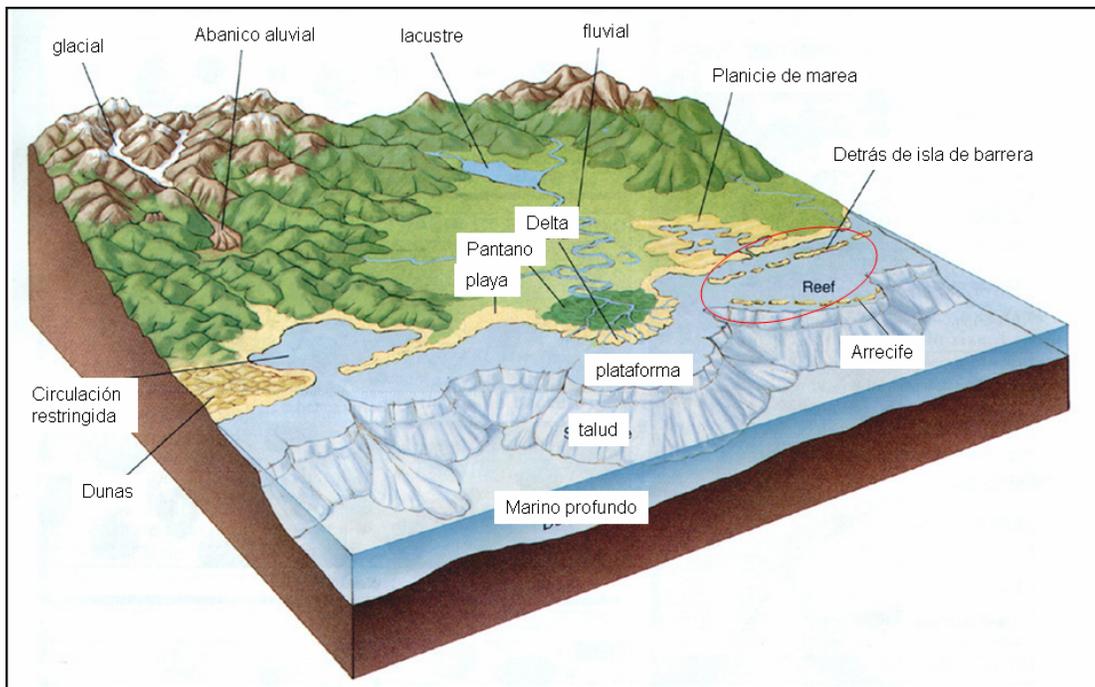


Figura 4.1. Ambientes sedimentarios. Modificado de Holzt T. (2010)

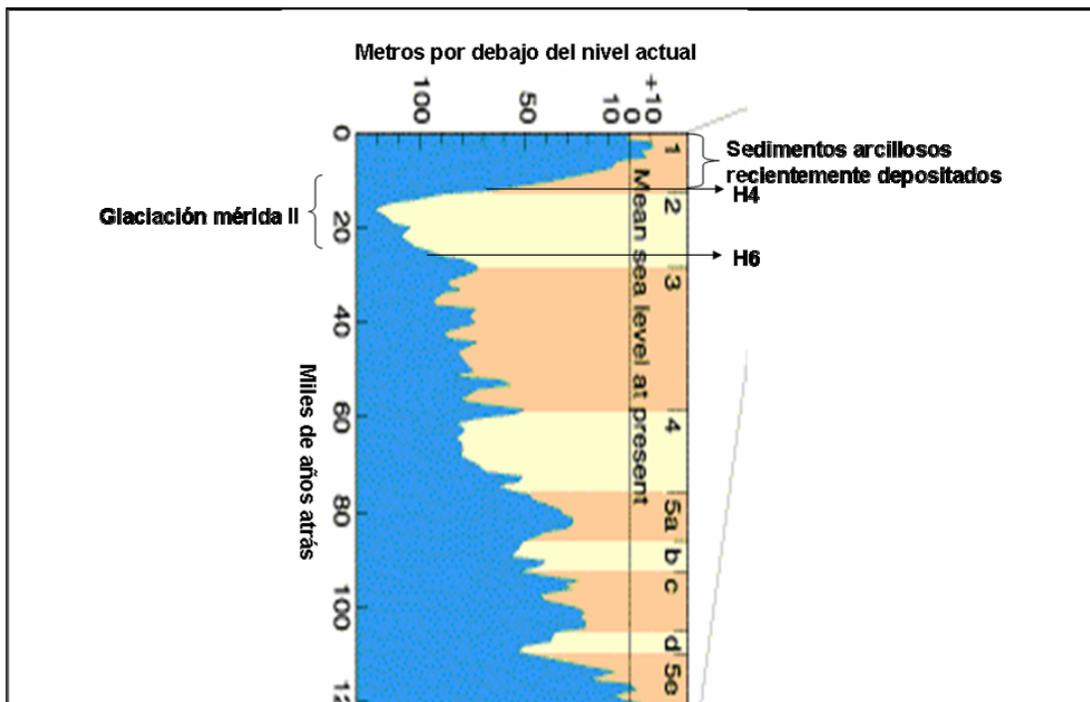


Figura 4.2. Nivel eustático de los últimos 100 mil años (modificado de Sea level, 2010)

Por otro lado las progradaciones muy localizadas (Figura 4.4) pueden ser consecuencia de la desembocadura de un río en las zonas protegidas por las islas de barrera. La figura 4.3 muestra una imagen de la costa actual del norte de la Península de Paraguaná que sugiere la posible situación en la que se depositaron los sedimentos entre los 9 m y los 40 m por debajo del fondo marino. En esta figura es posible observar la descarga fluvial que podría generar progradaciones locales en el área parcialmente protegida por la isla de barrera, la cual a su vez mantiene un nivel bajo de energía que permite la depositación de materia orgánica.

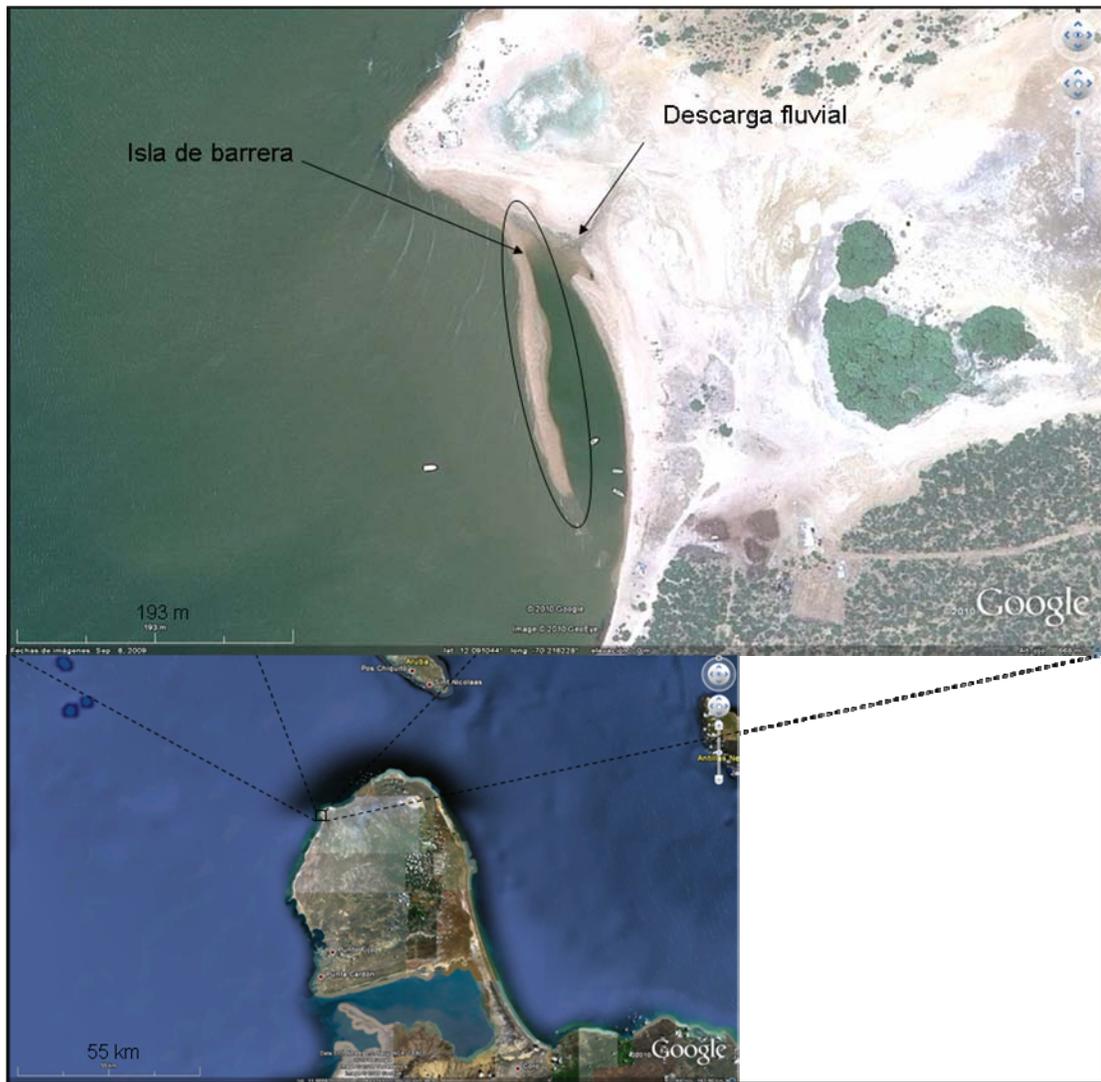


Figura 4.3 Ambiente sedimentario actual que emula posiblemente el paleo ambiente de los depósitos someros (modificado de Google Earth ©)

Mientras los reflectores planares infrayacentes (Figura 4.5) pueden ser relacionados con un ambiente de plataforma interna depositados posiblemente antes del momento cumbre de la glaciación Merida II.

Infrayacentes a este paquete de estratos planares se encuentran reflectores también planos posibles estructuras lenticulares que podrían estar relacionadas con la Formación Paraguaná descrita anteriormente.

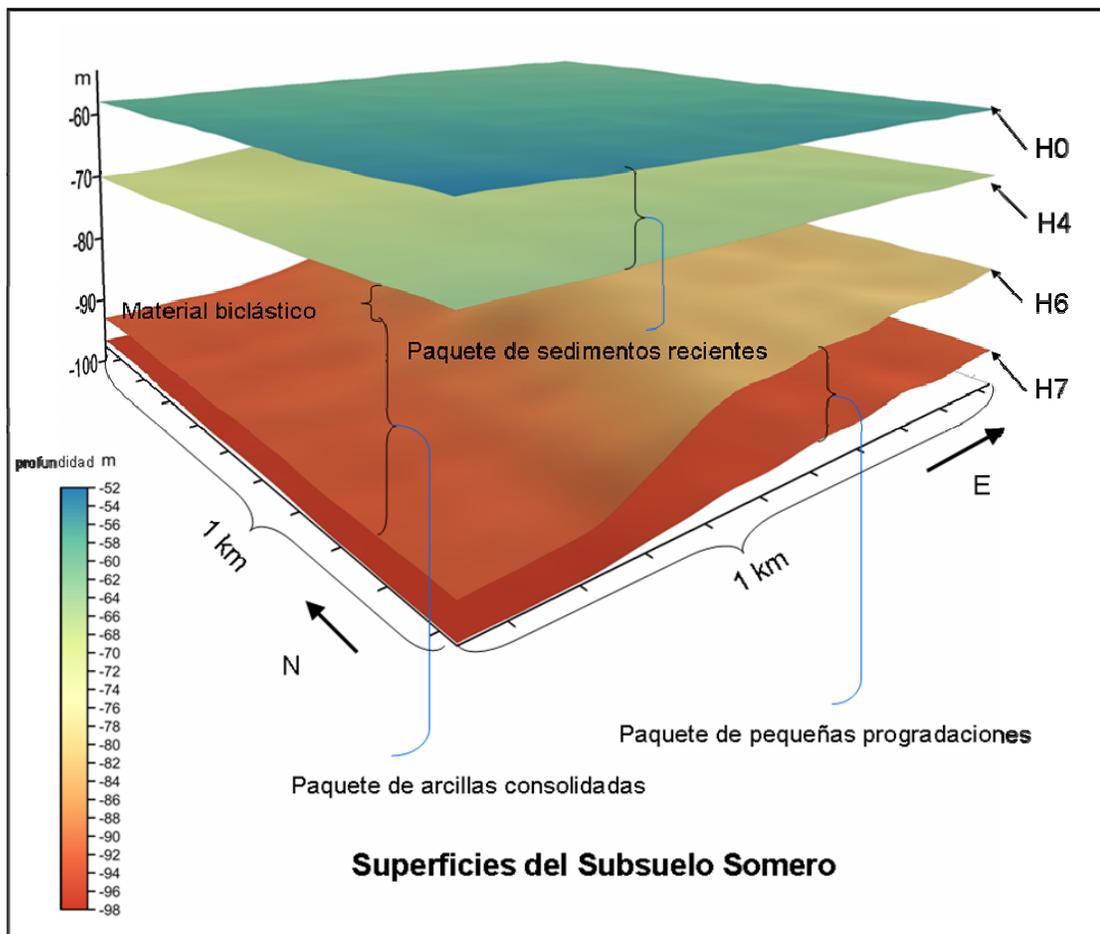


Figura 4.4. Superficies del subsuelo somero.

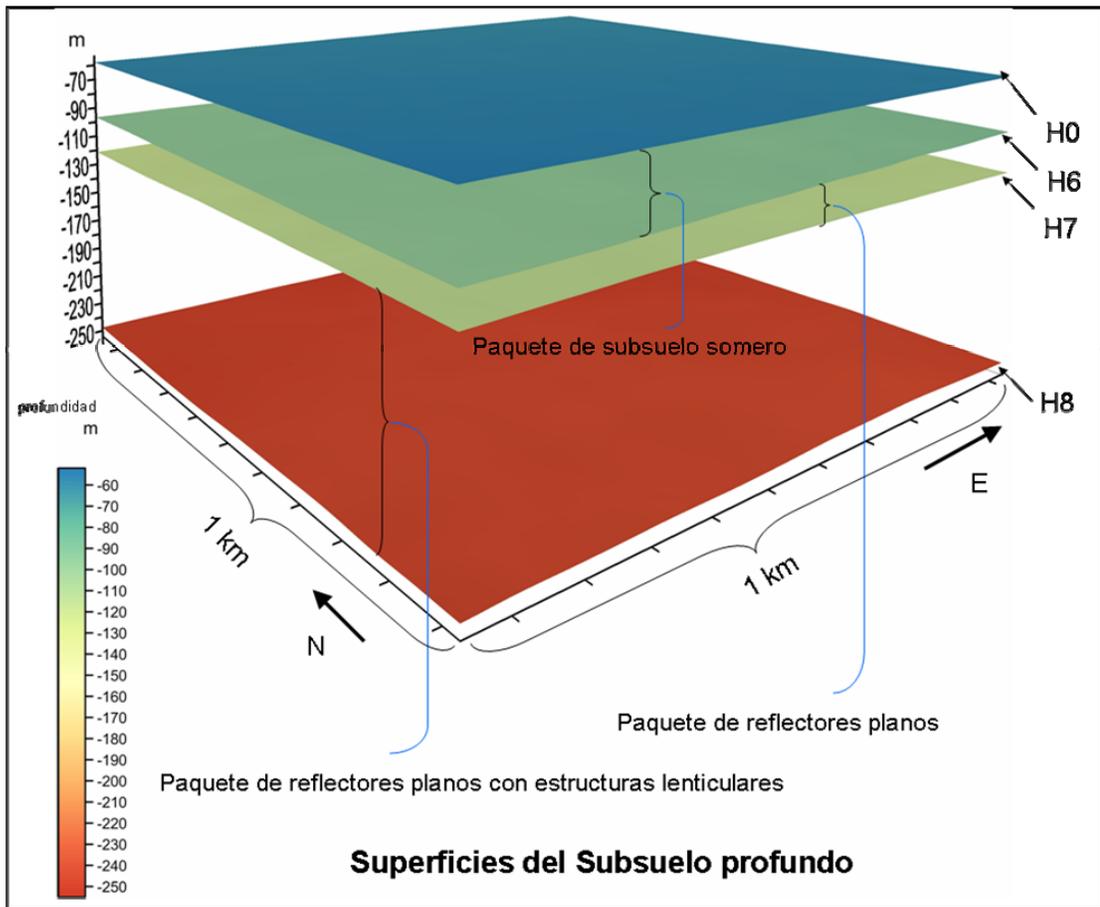


Figura 4.5 Superficies del subsuelo profundo

4.2. Identificación de amenazas geológicas

El apéndice 3 muestra el cálculo de penetración del *spudcan* en un perfil del subsuelo con las mismas propiedades mecánicas observadas en la perforación geotécnica realizada. La figura A3.2 muestra la carga soportada por el perfil geológico y la carga máxima generada por cada base de la plataforma en su fase de precarga. Los *spudcan* aparentemente no atravesarán la capa arcillosa más somera, sin embargo es necesario obtener los espesores de estos estratos someros en la extensión del área de estudio para analizar el comportamiento de las bases de la plataforma en el punto propuesto para la perforación dado que el perfil de capacidad de carga del subsuelo es favorable para que ocurra una falla por punzonamiento.

Las tablas comparativas de profundidad observadas en la figura 3.32 y la figura 3.33 muestran, como se esperaba, la mayor resolución del perfilador de fondo tipo Pinger, además fue el único capaz de detectar el horizonte interpretado como H4, muy importante para el análisis de falla por punzonamiento, por lo que los mapas mostrados a continuación fueron elaborados a partir de los datos exportados de las líneas de Pinger.

La figura 4.6 muestra los espesores de la capa de sedimentos recientemente depositados caracterizados por ser arcillosos, estos espesores se mantienen uniformes hacia la esquina noroeste alrededor de 10 m, disminuyen hacia el nor-este presentando los espesores mínimos hacia el este de 8 m y aumentan hacia el sur alcanzando espesores de 12,2 m. Mientras el espesor de estos sedimentos alrededor de la ubicación propuesta para el pozo es de 10,7 m aproximadamente.

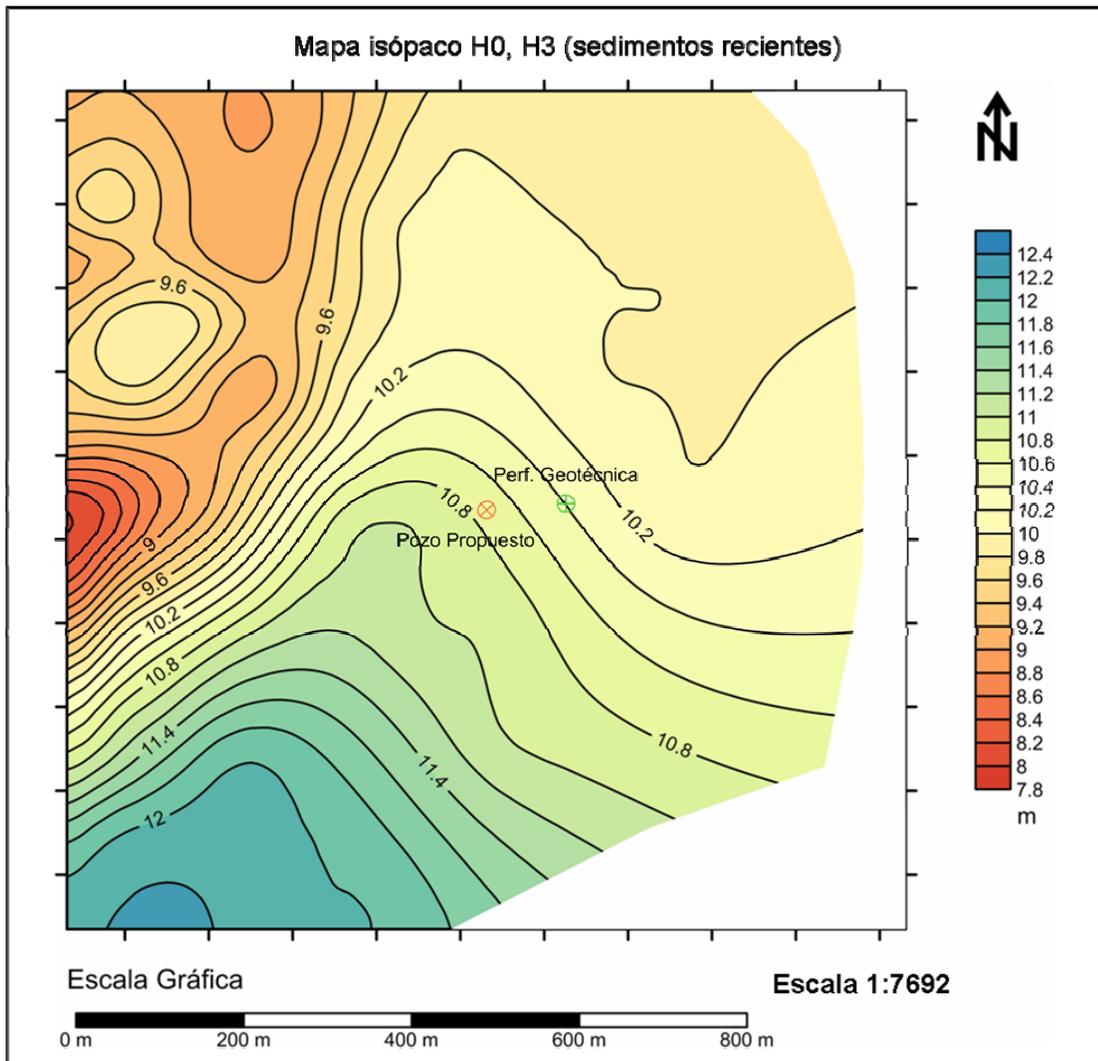


Figura 4.6. Mapa isópaco H0- H3 de sedimentos recientes arcillosos.

La figura 4.7 muestra el mapa de espesores del material bioclástico el cual disminuye hacia el este y presenta un máximo alrededor de 3,8 m en la esquina nor-oeste, en la cual se observó una posible presencia de materia orgánica con gas asociado en la capa suprayacente (Figura 3.19). También se observaron máximos relativos al sur-oeste de 3,4 m y al nor-oeste de 2,4 m, este último pudiera estar asociado a una acumulación de gas de origen biogénico. Por otro lado también se aprecia una posible acumulación de gas en la capa suprayacente a aproximadamente 120 m de la ubicación propuesta para la perforación, mientras el espesor observado

en esta capa de material bioclástico para esta ubicación es de casi 2 m aproximadamente.

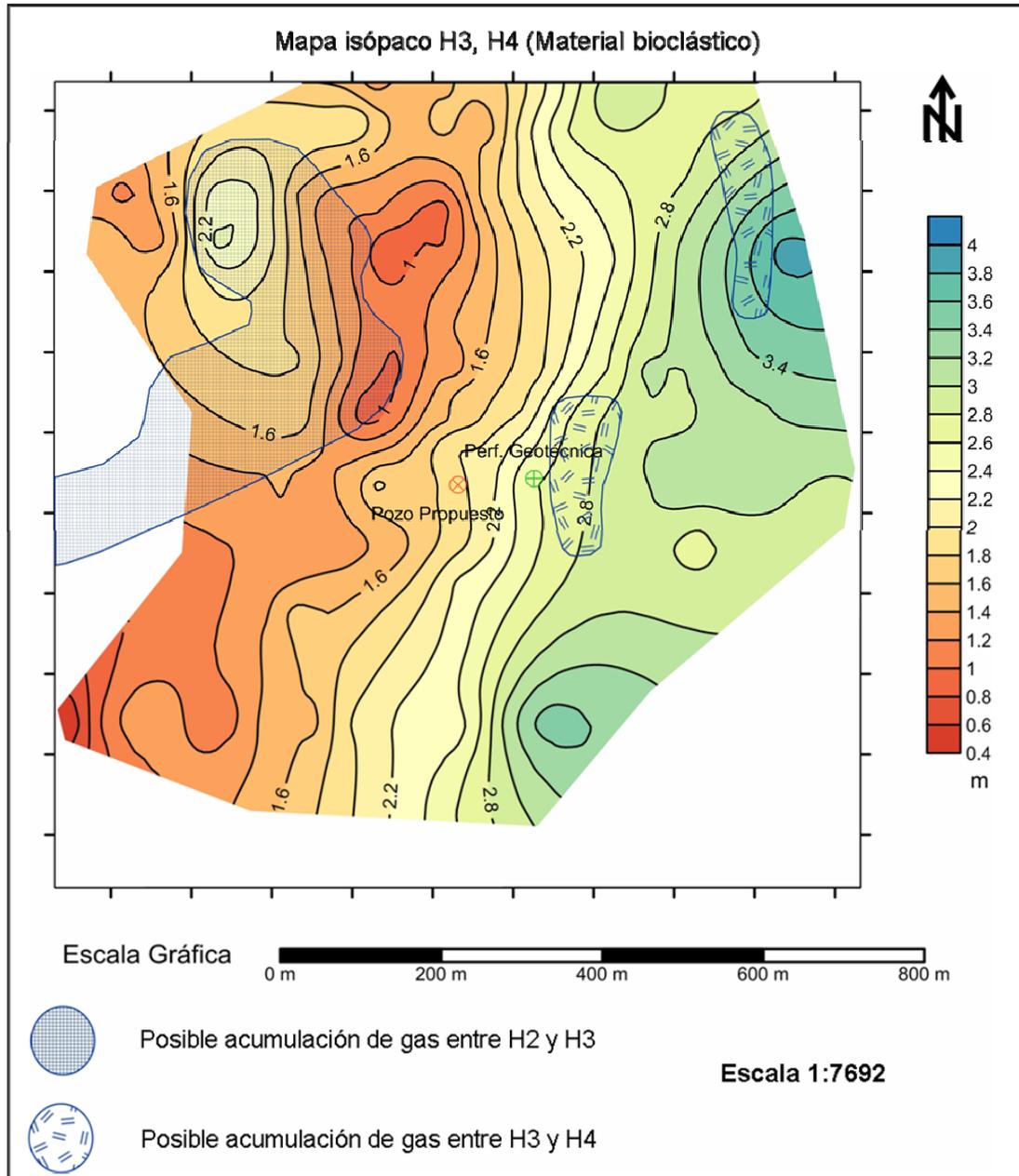


Figura 4.7. Mapa isópaco H3- H4 (material bioclástico) indicando posibles acumulaciones de gas.

La figura 4.8 muestra el mapa resultante de la resta del mapa batimétrico (Figura 3.7) y el mapa isópaco H0- H3 obteniendo las profundidades medidas desde

el nivel medio del mar hasta el horizonte H3 interpretado como material bioclástico. Se observa que la orientación de los contornos es norte- sur y con profundidades aumentando hacia el este, mientras la profundidad observada para la ubicación propuesta para el pozo es de 68 m por debajo del nivel medio del mar.

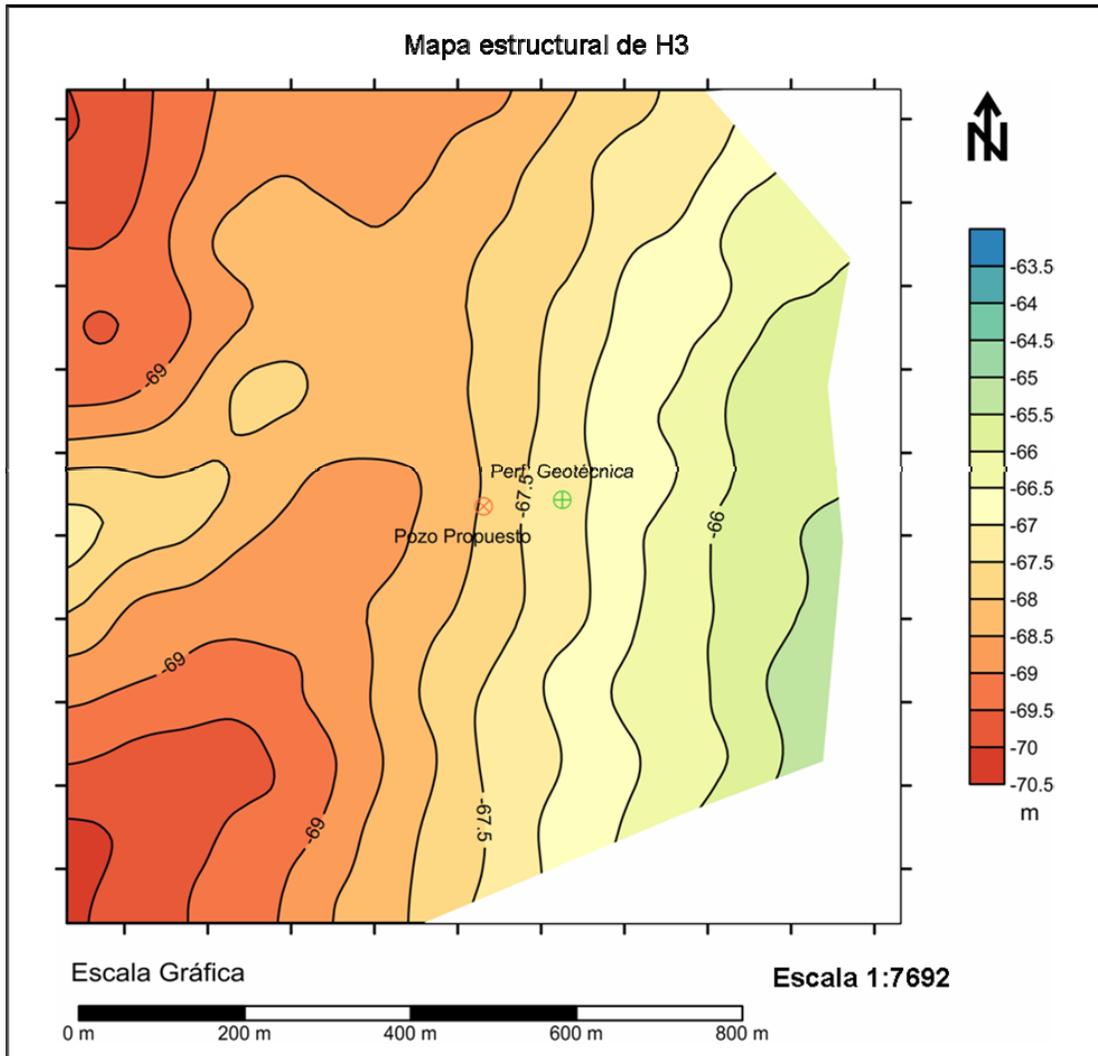


Figura 4.8. Mapa Estructural de H3 (material bioclástico).

La figura 4.9 muestra secciones de perfiles realizados con el perfilador de fondo tipo Sparker (izquierda) el perfilador de fondo tipo Pinger (derecha) en la que se observan eventos anteriores de derrumbes y zonas someras que son susceptibles a este tipo de situaciones de derrumbes o deslizamientos.

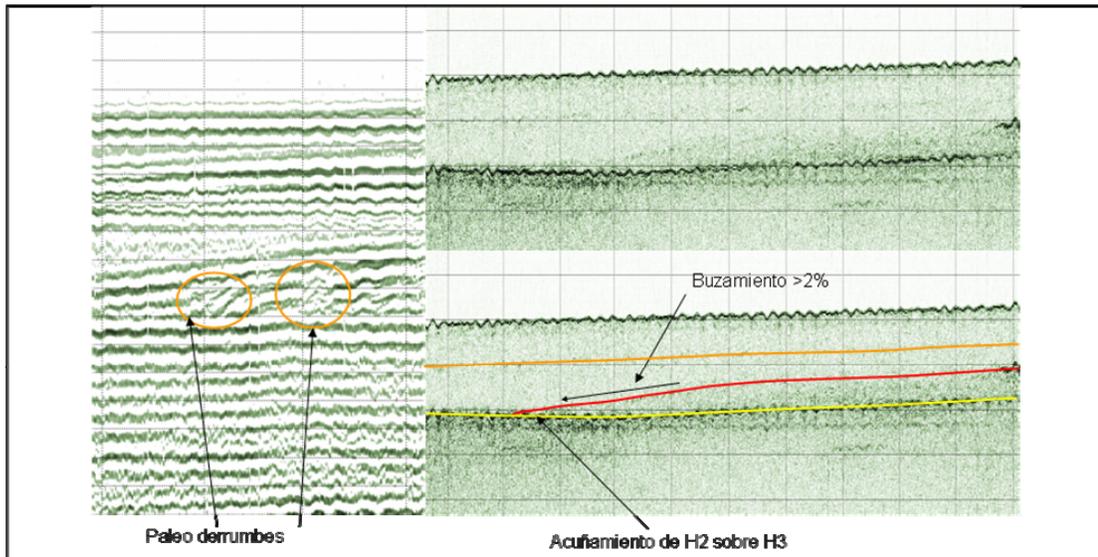


Figura 4.9. Secciones de la línea central donde se muestran Paleoderrumbes y zonas susceptibles

La tabla 4.1 muestra el análisis de amenazas geológicas realizado a partir de la información disponible.

Tabla 4.1 Análisis de existencia de amenazas geológicas

Amenaza	Análisis
Problemas de instalación	La figura 3.7 muestra un perfil batimétrico con pendientes muy suaves y en una sola dirección por lo que es poco probable que se presenten problemas de instalación.
Punzonamiento	Los cálculos de capacidad de carga mostrados en el apéndice 3 muestran un perfil favorable para que ocurra este

Amenaza	Análisis
	<p>tipo de falla. Adicionalmente los cálculos están hechos para un espesor de material bioclástico de 3 m, mientras el espesor registrado para el punto propuesto para la perforación es aproximadamente 2 m (Figura 4.7).</p> <p>Por otra parte la capacidad de carga de el estrato arenoso es menor al calculado ya que este cálculo fue hecho para arenas siliciclásticas, las cuáles muestran una mayor capacidad de carga con respecto a las bioclásticas. Bajo la carga máxima de la precarga del <i>jack-up</i> no se espera que el <i>spudcan</i> toque esta capa sin embargo podría hacerlo bajo cargas excepcionales durante la operación de <i>jack-up</i>. En zonas donde el material presenta menores espesores de material bioclástico y de la capa de sedimentos recientes (ver y figura 4.6 y figura 4.7 y sus descripciones), la posibilidad de que ocurra falla por punzonamiento aumenta.</p>
<p>Falla de fundaciones por cargas excepcionales de tormentas.</p>	<p>Los datos de oleaje que se conocen de la zona provienen de estudios realizados por hidromet (1977) (Apéndice 2), los cuales muestran amplitudes de oleaje cotidiano menores a 1 m y mayores a 3,30 m en ocasiones debido a mar de fondo y en el paso de la Mona. Mientras el oleaje registrado por huracanes durante el período estudiado no superó 2,12 m, Estas dos últimas amplitudes se consideran moderadas y es improbable que sean capaces de ocasionar cargas excepcionales que produzcan fallas en las fundaciones.</p>
<p>Falla por deslizamiento</p>	<p>Lamentablemente no se cuenta con información suficiente para estimar las cargas laterales sobre el <i>jack-up</i> y sus bases, (como corrientes, empuje del viento, entre otros); sin</p>

Amenaza	Análisis
	<p>embargo, el espesor de sedimentos recientes constituido principalmente por arcillas aseguran una penetración considerable de las bases del <i>jack-up</i>, por lo que se podría indicar la improbabilidad de que ocurra una falla de este tipo.</p>
<p>Socavación del fondo marino</p>	<p>Lamentablemente no se cuentan con mediciones de corrientes al nivel del fondo marino; sin embargo, los sedimentos recientemente depositados son suelos cohesivos y pueden presentar resistencia a ser socavados, además esta capa presenta un espesor considerable (Figura 4.6) y en caso de ocurrir una pequeña socavación posiblemente no represente un problema por falla.</p>
<p>Inestabilidad del fondo marino (<i>mudslides, seabed slides</i>)</p>	<p>La figura 4.9 muestra el acuñamiento del horizonte H2 sobre H3 presentado pendientes mayores al 1 %, además, la figura 4.9 (derecha) muestra el punto en el que se podría generar la falla por deslizamiento, la cual resulta probable dada la configuración del subsuelo somero ya mencionada y hace vulnerable la estructura a sismos de poca magnitud que pudieran favorecer el deslizamiento. En el paquete de arenas progradantes se observan posibles derrumbes previos (Figura 4.9, izquierda), lo que indica pudiese existir también una amenaza aunque en menor proporción ya que se encuentra a mayor profundidad y se trata de arena con alto coeficiente de fricción.</p>
<p>Acumulaciones de gas someras</p>	<p>La sísmica multicanal adquirida en la zona de estudio no muestra evidencia aparente de acumulaciones de gas en los</p>

Amenaza	Análisis
	<p>primeros 200 m, al no observarse anomalías de amplitud importantes de fase negativa asociadas a posibles trampas estructurales o estratigráficas, podría indicarse la ausencia de acumulaciones de gas.</p> <p>Por otro lado la sísmica monocanal (Pinger) presenta zonas en las que se observa una dispersión de la señal que podría indicar presencia de acumulaciones de materia orgánica con gas biogénico asociado (Figura 4.7), lo que podría representar un riesgo para las bases de la plataforma si es fundada sobre éstas acumulaciones. En vista de que el lugar propuesto para la perforación se encuentra aproximadamente a 100 m de la posible acumulación de gas más cercana y que además la disposición de los estratos H2 y H3 que son los que podrían contener acumulaciones de gas (Figura 3.32 y Figura 3.33) favorece la migración de estos gases en dirección opuesta al punto propuesto para la perforación; estas acumulaciones podrían no representar amenaza para la fundación de la plataforma.</p>
Fallas geológicas	La sísmica multicanal no evidenció la presencia de fallas geológicas, la sísmica monocanal por su parte tampoco evidencia ningún tipo de falla geológica somera.
Objetos sumergidos (tuberías, barcos hundidos, escombros)	La imagen obtenida mediante el sonar de barrido lateral (Figura 3.12) no evidencia la presencia de ningún objeto sobre la superficie del fondo marino.
Depresiones locales, arrecifes, rocas	La imagen obtenida mediante el sonar de barrido lateral (Figura 3.12) presenta un fondo marino de reflectividad

Amenaza	Análisis
	uniforme y que no presenta anomalías importantes y puntuales de depresiones arrecifes o rocas.
Bases atrapadas en lodo	La arcilla blanda a muy blanda presente en el fondo marino tiene un espesor de aproximadamente 10 m. Se estima que los <i>spudcan</i> penetrarán completamente este estrato y se considera que no habrá problema para su remoción del sitio, una vez finalizada la perforación, asumiendo que el sistema de <i>jetting</i> funcione apropiadamente.
Huellas dejadas por otros <i>Jack-up</i> (“foot prints”)	El área de estudio es una zona en exploración y no presenta huellas dejadas por otros <i>jack-up</i> , además la imagen obtenida con el Sonar de barrido lateral (Figura 3.12) no evidencia depresiones que podrían ser asociadas con <i>footprints</i> .

CAPITULO V

5. Conclusiones y recomendaciones

- El área se ubica en una zona sísmicamente activa y las secciones sísmicas permitieron identificar derrumbes o deslizamientos a profundidades entre 25 y 30 m por debajo del fondo marino (Figura 4.9, derecha), por lo que fallas de este tipo podrían ocurrir en zonas determinadas como susceptibles (Figura 4.9, izquierda). Se recomiendan estudios y cálculos posteriores para prevenir este tipo de falla.

- Existe amenaza de falla por punzonamiento durante la operación del *jack-up* por lo que se recomienda tomar previsiones.

- No existen acumulaciones de gas someras que puedan poner en peligro la integridad de la plataforma, por otro lado los primeros 200 m de la columna estratigráfica tampoco presentan estructuras que indiquen la presencia de acumulaciones de gas que representen amenaza de explosiones durante la perforación del pozo.

- La pendiente aproximada del fondo marino es muy suave (0,5%) por lo que este factor no resulta una amenaza para la instalación de las estructuras, además califica a la superficie del fondo marino como estable, descartando fallas debidas a inestabilidad como *mudslides* y *seabed slides*.

- El subsuelo somero estudiado no presenta ningún tipo de falla geológica que pueda representar una amenaza para la estructura o la perforación.

- No se espera el socavamiento del fondo marino debido a la naturaleza cohesiva del mismo; sin embargo en vista de que no se cuenta con mediciones de corrientes, se

recomienda la inspección periódica hecha por buzos y equipos ROV (vehículos submarinos controlados a distancia).

- Se considera poco probable una falla por deslizamiento durante la instalación de la plataforma; sin embargo se recomienda la adquisición de datos oceanográficos y meteorológicos que permitan obtener el empuje horizontal sobre las bases de la estructura y de esta forma cuantificar este tipo de amenaza, tomando en cuenta que los esfuerzos horizontales máximos ocurren durante la etapa de operación del *Jack-up*.

- De acuerdo a los datos de sísmica de superficie obtenidos (sonar de barrido lateral y ecosonda monohaz), se puede asegurar la ausencia de objetos sumergidos que representen una amenaza para la instalación de la plataforma autoelevadiza tipo *Jack-up*.

- La sedimentación en el área de estudio es propia de ambientes transicionales y se encuentra fuertemente influenciada por la desglaciación post-Winsconsin.

- La metodología empleada en la evaluación de amenazas geológicas para perforaciones en costa afuera ha demostrado ser efectiva. Los métodos sísmicos monocanal de superficie han permitido estudiar el fondo marino, los métodos sísmicos de subsuperficie nos han permitido conocer el subfondo marino y extender los estudios geotécnicos mediante su correlación, mientras la técnica empleada en la búsqueda de acumulaciones de gas en la sísmica multicanal resulto ser precisa.

- Se recomienda realizar estudios someros más regionales para definir con mayor precisión los ambientes depositacionales y la historia geológica del subsuelo somero.

- Se recomienda actualizar los estudios de oleaje y presentar detalladamente el régimen del mismo en la zona estudiada para determinar con mayor precisión la amenaza que podría representar este factor.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Audemard, F. (1995), La cuenca terciaria de Falcón, Venezuela Noroccidental: Síntesis estratigrafía, génesis e inversión tectónica, Funvisis, Caracas.

Audemard, F. (2001), Quaternary Tectonics and present stress tensor of the inverted northern Falcon basin, north western Venezuela, Journal of Structural Geology 23.

Bennett, W. Guideline for site specific assessment of mobile jack- up units, Society of Naval Architects and naval engineers, New Jersey.

Deiros, D. Sackett, D. Malavé, G (2002), Estudio de las condiciones geológicas someras, fondo marino y su impacto potencial sobre el desarrollo de la explotación de gas natural en la plataforma deltana, Congreso Venezolano de Geofísica, Caracas.

Dier, A. Carroll, B. Abolfathi, S. Guidelines for jack- up rigs with particular reference to foundation integrity, Platinum Blue House, Egham.

Geoacústics (s/f), Sonar de barrido lateral doble frecuencia, [http://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/5E7B46196A54A727C12576FD0028A59A/\\$file/Side-Scan-Sonar-ficha-tecnica.pdf?OpenElement](http://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/5E7B46196A54A727C12576FD0028A59A/$file/Side-Scan-Sonar-ficha-tecnica.pdf?OpenElement), consultado:22/6/2010

Geoacústics (s/f), Pinger Subottom profiler, [http://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/D1084BB7DD0FD21DC12574C0003E01EA/\\$file/GeoPulse_Profiler.pdf?OpenElement](http://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/D1084BB7DD0FD21DC12574C0003E01EA/$file/GeoPulse_Profiler.pdf?OpenElement), consulta: 22/6/2010.

Ghosh S. Pestman P. Meléndez L. Truskowski I. Zambrano E. (1997), Evolución tectonoestratigráfica y Sistemas Petrolíferos de la Cuenca de Falcón, Venezuela

Noroccidental. Memorias del VIII Congreso Geológico Venezolano, Sociedad Venezolana de Geólogos. Caracas.

Hidromet (1977), Estimación del régimen del oleaje en las costas Venezolanas, Instituto Nacional de Puertos, Caracas.

Holz T. (2010), How the earth writes its record, an introduction to paleoclimatology, <http://www.geol.umd.edu/sgc/lectures/paleoclimate.html>, consultado el 05 Noviembre de 2010.

Incostas (2009), Investigación geofísica en el bloque Cardón III, Golfo de Venezuela, informe técnico.

Macellari, C. (1995), Cenozoic Sedimentation of the southwestern of the Caribbean pull apart basin, Venezuela and Colombia, Petroleum basins of South America: AAPG memoir 62 p. 757-780

Marimatech (s/f), Survey Eco sounder, <http://www.marimatech.com/pdf/0317-0045-E-Sea-Sound-MP-35-REV-E-High.pdf>, consultado: 22/6/2010.

Mendoza, V (2005). Geología de Venezuela, Tomo II, Rocas Sedimentarias: Geología de Falcón. Escuela de Ciencias de la Tierra, Universidad de Oriente. Ciudad Bolívar.

Muesig, K. (1982), Structure and Cenozoic tectonics of the Falcon Basin, Venezuela, and adjacent areas, Geological Society of America, Memoir 162, Houston.

Oceantravellers, hydrographic services (S/F), http://www.oceantraveller.co.uk/page_1158190535102.html, Consultado el 25 de Octubre de 2010.

Parkinson, R (2001), “High Resolution Site Survey”, Londres, Spon Press.

Parra, J (2009), Experiencias en Exploración Geotécnica Costa Afuera en Venezuela, Caracas, Conferencia 50 Aniversario Sociedad Venezolana de Geotecnia “Estado de la Práctica” en Honor a Gustavo Luís Pérez Guerra.

Porras, L. (2002), Evolución Tectónica y estilos estructurales de la región costa afuera de las Cuencas de Falcón y Bonaire. VII Simposio Bolivariano de Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas, Caracas, Venezuela.

Rey, O. et Al, Formación Paraguaná, Lexico Estratigráfico de Venezuela, Petroleos deVenezuela, <http://www.pdvsa.com/lexico/p19w.htm>, Consultado el 5 de julio de 2010

Sea level (s/f), en *Wikipedia, la enciclopedia libre*, recuperado el 2 de noviembre de 2010 a las 17:20 de http://en.wikipedia.org/wiki/File:Sea_level_temp_140ky.gif.

Souza,L. Mahiques,M. (2008), Geofísica marina aplicada al estudio de los riesgos geológicos litorales, San Pablo, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo.

Stanotex S/F, Avo seismic Structures program, tomado de <http://www.stanotex.com/avo.htm> el 15 de julio de 2010.

APÉNDICES

Apéndice 1: Medición de la velocidad de propagación de la onda de sonido en el agua

La ecosonda es un equipo que registra la reflexión de un pulso acústico de alta frecuencia en el fondo marino. Conocer la velocidad del sonido de la columna de agua es fundamental para que el software de la ecosonda pueda convertir esos tiempos de reflexión a profundidades batimétricas.

La velocidad del sonido en el agua puede variar de un lugar a otro dependiendo principalmente de la salinidad y la temperatura. En vista de que el proceso de medición de la salinidad es tedioso para realizarlo en actividades de campo y requiere ensayos de laboratorio, existe un procedimiento denominado “Calibración con plancha” (*bar check*) y que fue el utilizado durante la adquisición de los datos de este estudio.

El procedimiento de “calibración con plancha” consiste en crear un falso fondo utilizando una plancha de acero que está diseñada para mantenerse horizontal al ser sumergida desde la borda de la embarcación mediante un cable debidamente graduado y marcado en metros.

La plancha es colocada debajo del transductor de la ecosonda a una profundidad conocida, dadas las marcas en el cable que sujeta la plancha, entonces se realizan mediciones con la ecosonda mientras se gradúa la velocidad hasta que el valor de profundidad medido coincida con la profundidad del falso fondo. Este proceso se repite con la plancha a distintas profundidades para obtener una mayor precisión, hasta obtener finalmente una velocidad de onda acústica promedio en la columna de agua.

La velocidad resultante de este ensayo fue la utilizada en este estudio para convertir a profundidad los registros de sismica monocal, ya que no se posee información de velocidades del subfondo marino; sin embargo, las variaciones en la profundidad obtenidas con un rango de velocidades esperadas para el subfondo marino no supera las decenas de centímetros, ajustandose a la resolución que se puede alcanzar con estos instrumentos, por lo que la utilización de la velocidad de propagación de la onda acústica en el agua para este fin resulta razonable de acuerdo a un estudio realizado por Ayan (2009).

La figura A1.1 muestra un registro impreso de una calibración con plancha realizada en campo en la que se hicieron pruebas a 6 m, 8 m, 10 m y 12 m

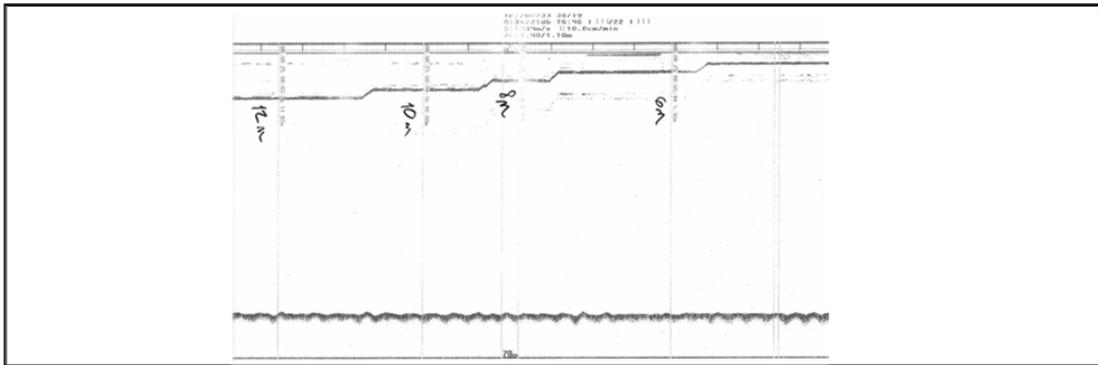


Figura A1.1 registro impreso de la calibración con plancha o *Bar check*

En ocasiones, el fuerte oleaje imposibilita ejecutar este método, en cuyo caso podría emplearse un instrumento llamado sonda perfiladora de velocidades, la cual básicamente cumple el mismo principio, emite una onda acústica que se refleja en una placa fija a pocos centímetros del transductor, ésta capta las reflexiones lo que permite calcular la velocidad de propagación de la onda acústica en el agua. En casos en que la columna de agua es muy grande, superando los 100 m, se podrían encontrar variaciones verticales de velocidad importantes, para estos casos este instrumento resulta muy útil.

Apéndice 2: Predicciones de Oleaje

Hidromet (1977), para el tramo de costa que comprende la zona de estudio, en referencia al régimen de oleaje comenta lo siguiente.

Oleaje Cotidiano: la protección natural que presentan estas costas al oleaje cotidiano de Este, origina en un 94,35% del tiempo total el oleaje no incida directamente sobre las costas. El oleaje incidente mas frecuente presenta alturas entre 0,5 m y 0,9 m, con una frecuencia de apenas un 2,23 % del tiempo total; Pero en líneas generales, sin tomar en cuenta el ángulo de procedencia, el oleaje tiende a ser menor a 0,3 m de altura.

Con respecto a la **persistencia del oleaje**, se tiene que para duraciones mayores a 24 h y alturas de 0,4 m, 0,7 m, 1 m, y 1,3 m, corresponden respectivamente los siguientes porcentajes: 1,42 %, 0,98 %, 0,71 %, 0,36 % del tiempo total. La persistencia mayor del oleaje es de 60 h, con un porcentaje muy pequeño de 0,08% para las alturas mencionadas.

Los **mares de fondo** pueden afectar esta zona solo en casos muy especiales cuando el oleaje presenta una buena orientación a través del paso de la mona con un ángulo de incidencia de aproximadamente 24°, se observan alturas mayores de 3,3 m producidas por estos mares de fondo ocasionales. Durante los diez años estudiados (entre el 1° de enero de 1960 y el 31 de diciembre de 1969), se detectaron 9 situaciones de mar de fondo y se estimó una frecuencia de retorno de 25 años para un oleaje aproximado de 3.8 m.

Oleaje generado por huracanes: los resultados finales del cálculo del oleaje generado por los huracanes Anna y Flora son los siguientes:

Huracán Anna:

Altura del oleaje= 2,12 m

Periodo del oleaje= 11,9 s

Decaimiento= 150 millas nauticas

Duración del oleaje= 0,7 h

Fecha =20/21 de Julio de 1961

Huracán Flora:

Altura del oleaje= 2,12 m

Periodo del oleaje= 13,8 s

Decaimiento= 260 millas nauticas

Duración del oleaje= 1,8 h

Fecha = 01/02 de Octubre de 1963

Apéndice 3: Estudio geotécnico

La figura A3.1 muestra los resultados obtenidos de la perforación geotécnica en el sitio de estudio. A la izquierda la columna estratigráfica y a la derecha los resultados de los ensayos aplicados a las muestras obtenidas en la perforación. En general se observan 4 paquetes principales (de tope a base): Arcillas recientemente depositadas de 9 m de espesor, de alta plasticidad en lo más somero y arenosa y de plasticidad media hacia la base. Le infrayace un paquete de material bioclástico de textura arenosa y alto coeficiente de fricción (3 m de espesor), seguido de arcillas de plasticidad media. Finalmente hacia la base de la perforación se encuentra un paquete compuesto de arenas silíceas con un alto coeficiente de fricción.

En la figura A3.2 se muestra el gráfico de capacidad de carga para el perfil de suelo observado en la perforación geotécnica. Se presentan dos escenarios de cálculo asociados con: i) una cota superior de la resistencia al corte no drenada es asociada con la mediana de los valores de resistencia pico y ii) una cota inferior asociada con la mediana de los valores estimados de la **resistencia en estado crítico**. Las dos líneas mostradas permiten estimar la incertidumbre en la estimación de la penetración del *spudcan*.

De acuerdo al perfil geotécnico la máxima precarga por unidad de área que puede aplicar el *spudcan* es del orden de 400 kPa. Esto implica una penetración del *spudcan* de $8 \pm 0,5$ m. Se recomienda aplicar la máxima precarga, para garantizar un empotramiento mínimo dentro de la arena suelta que garantice a su vez una resistencia lateral mayor, La resistencia lateral se estimó, para el nivel de carga de servicio correspondiente, aproximadamente a $2/3$ de la sollicitación máxima de precarga, 267 kPa. Los resultados de la resistencia estimada al deslizamiento varían entre 11,39 y 17,14 MN para los rangos de resistencia al corte evaluados (crítico y pico).

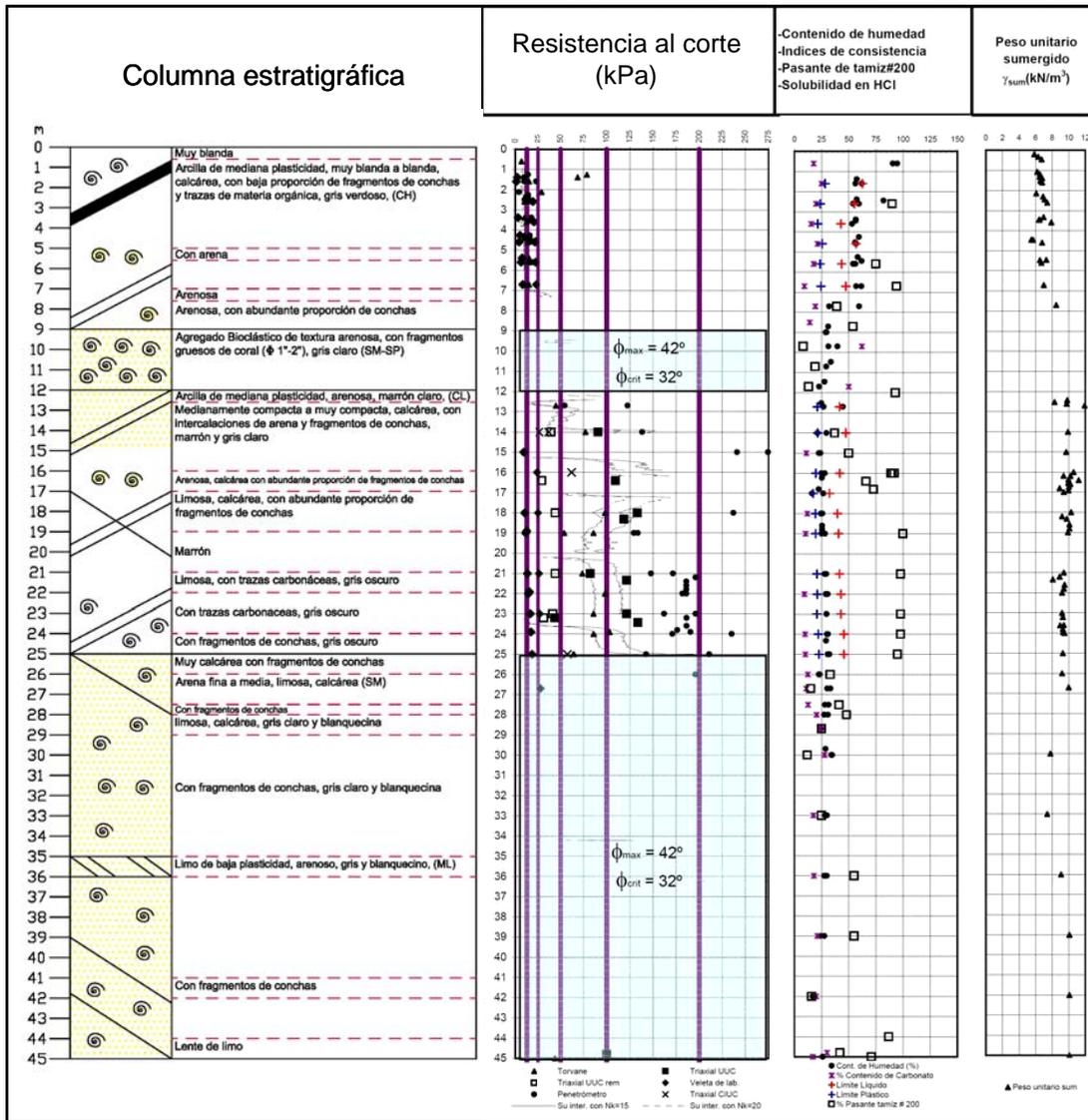


Figura A3.1 Estudio geotécnico, resultado de ensayos geomecánicos

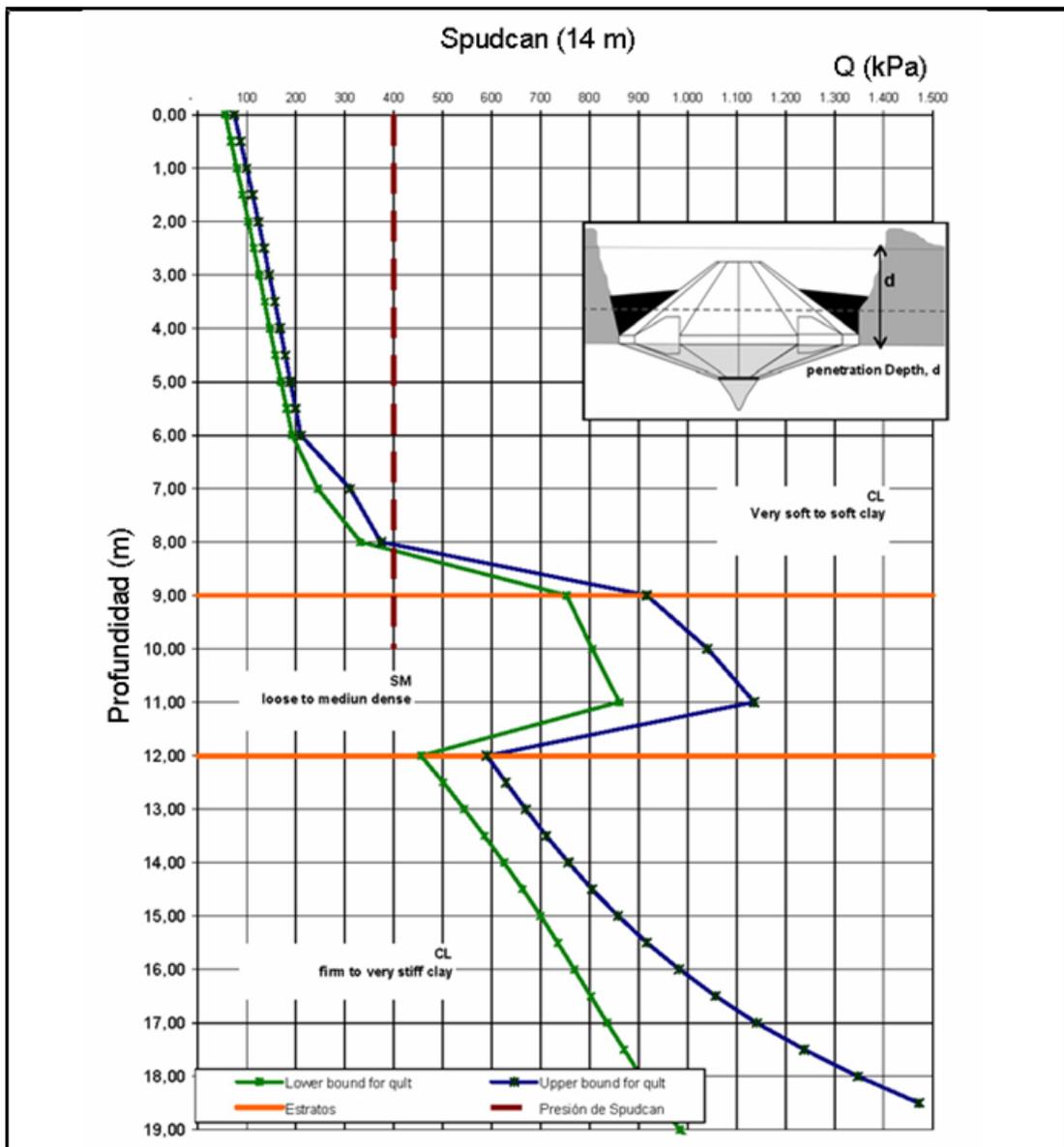


Figura A3.2 Estudio geotécnico, cálculo de capacidades de carga

Apéndice 4: Elementos principales de una plataforma tipo Jack-up

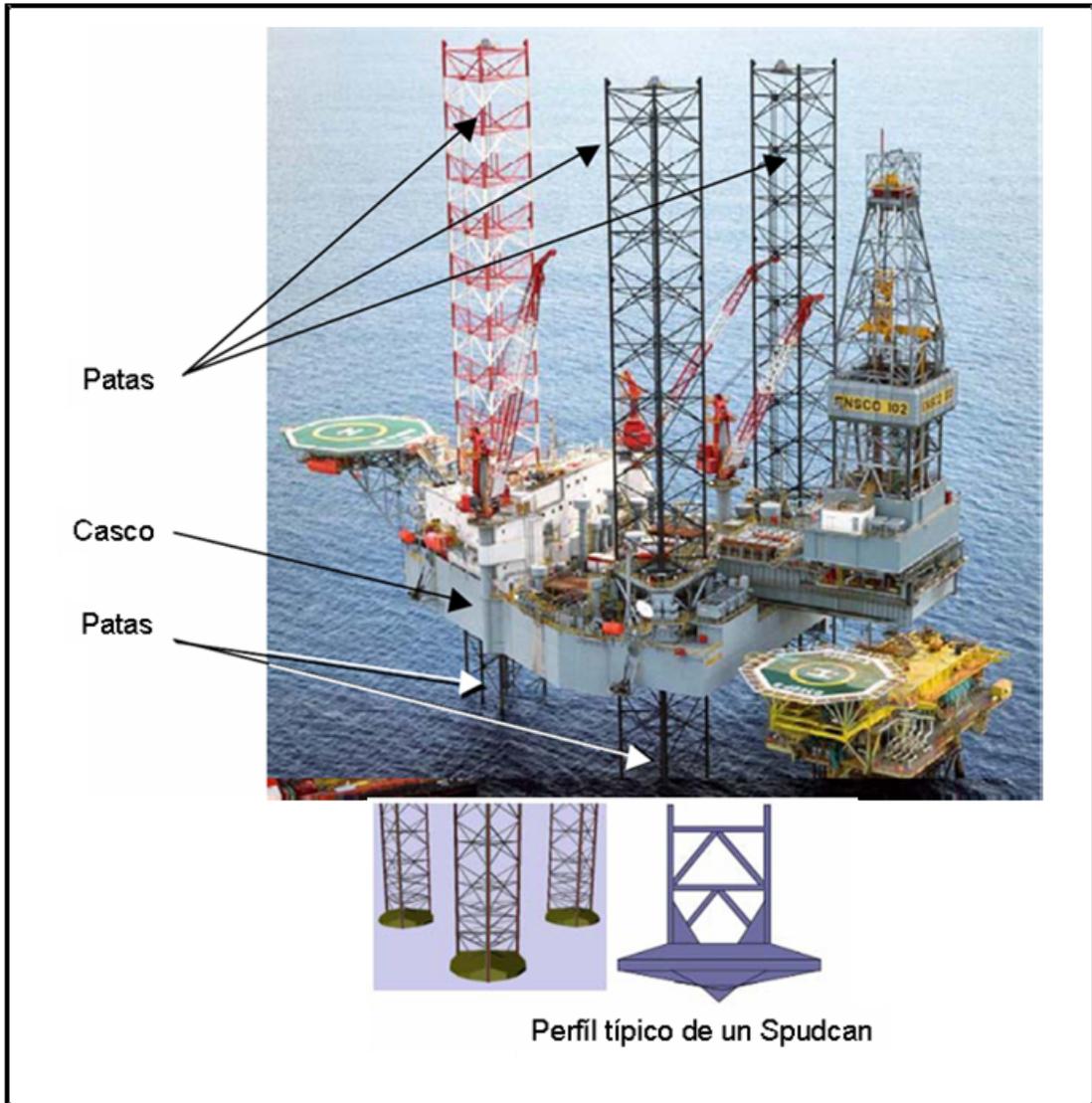


Figura A4.1 Partes más importantes de una plataforma auto elevadiza tipo *Jack-up*