

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**EVALUACIÓN DE RIESGOS GEOLÓGICOS Y GEOTÉCNICOS EN
UN ÁREA COSTA AFUERA DEL DELTA DEL ORINOCO.**

Presentado Ante la Ilustre
Universidad Central de
Venezuela para optar por el Título
de Ingeniero Geofísico
Por el Br. Néstor Alexander Palacios Aponte

Caracas, noviembre 2001

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DE RIESGOS GEOLÓGICOS Y GEOTÉCNICOS EN UN ÁREA COSTA AFUERA DEL DELTA DEL ORINOCO.

TUTOR ACADÉMICO: Dr. Gustavo Malavé.

TUTOR INDUSTRIAL: MSc. Miguel González.

Presentado Ante la Ilustre
Universidad Central de
Venezuela para optar por el Título
de Ingeniero Geofísico
Por el Br. Néstor Alexander Palacios Aponte

Caracas, noviembre 2001

Caracas, 5 de Noviembre de 2001

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 Néstor Alexander Palacios Aponte, titulado:

“Evaluación de Riesgos Geológicos y Geotécnicos en un área Costa afuera del Delta del Orinoco”

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, los declaran APROBADO.

Prof. Eugenio Gallovich
Jurado

Prof. José Cavada
Jurado

Dr. Gustavo Malavé
Tutor Académico

Msc. Miguel González
Tutor Industrial

DEDICATORIA

A mis padres y a la memoria de mi hermano Abraham “Porque tu sonrisa perdurara por siempre entre nosotros”.....

AGRADECIMIENTOS

A Dios por haberme dado la perseverancia , la salud y la fuerza de voluntad para aceptar las pruebas que nos coloca la vida.

A mi mamá Sonia “China” por darme la vida y por haberme dado todo el amor, el cariño, la comprensión y apoyo para haber terminado mi carrera.

A mi papá por ser la persona que me dio a conocer que la vida no es tan fácil y que todos los días debemos luchar para conseguir lo que deseamos y en el caso de caer levantarnos y seguir a delante.

A mi novia Mayra “mami” por haberme soportado todas mis rabietas, haber sido paciente en todos estos años y por haber estado en el momento más difícil de mi vida.

A mis amigos Manuel, Rodolfo “Carupano” y Jesús “Chucky” por ser esas personas con las cuales uno siempre cuenta en las buenas y en las malas.

A Victoria “Vicky” y Manuel por ser como unos padres para mi y siempre darme el apoyo necesario para salir adelante.

A la familia Del Castillo Valera por adoptarme como un hijo y darme siempre esa sonrisa en el momento de encontrarme con ellos.

A PDVSA-Intevep por permitirme desarrollar mi Trabajo Especial de Grado en sus instalaciones.

A mi tutor Académico Gustavo Malavé el cual siempre estuvo apoyándome para el desarrollo de este trabajo y trato de evitarme los mayores obstáculos al momento de realizar cualquier actividad necesaria.

A mi compañera de tesis Marlene por muchas veces tener que soportar mi mal humor y tener la capacidad de trabajar de una manera armónica y eficiente.

A los muchachos del laboratorio Henry Duque, Henry Zambrano, Jaime y Jhony que siempre me apoyaron para realizar cualquier actividad y no solo eso sino que fueron excelentes personas conmigo.

Al grupo de Tecnología e Infraestructura por sus sabios consejos al momento de realizar una consulta.

A Luis Lugo y Miguel González ya que fueron dos personas que me suministraron todo su apoyo en el procesamiento de la sísmica.

A Moralis y Saba dos muchachas que son excelentes compañeras y personas.

A toda aquella persona que de alguna manera o forma halla colocado su granito de arena para permitir que logrará cumplir mi sueño.

Palacios A., Néstor A.

EVALUACIÓN DE RIESGOS GEOLÓGICOS Y GEOTECNICOS EN UN ÁREA COSTA AFUERA DEL DELTA DEL ORINOCO

Tutor Académico: Dr. Gustavo Malavé. Tutor Industrial: MSc. Miguel González. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 2001, n° pag. 99

Palabras Claves: Plataforma Detana, Bolsones de gas, riesgos geológicos, infraestructuras.

Resumen. El presente estudio tiene como objetivo principal la evaluación de los riesgos geológicos y geotécnicos en un área de 500 Km² aproximados, ubicada costa afuera en el Delta del Orinoco, utilizando para tal fin programas proporcionados por PDVSA-Intevep, Los Teques.

La metodología empleada para este trabajo consta de una técnica de sísmica de alta resolución, la cual busca adquirir datos lo más somero posible mediante el uso de altas frecuencias, con el fin de obtener aquella información la cual se considera riesgosa a la hora de realizar una perforación o la colocación de una infraestructura.

En el área se determinó que la profundidad oscila entre 80 m en la zona noroeste, con una pendiente de 0,5%, hasta 300 m en la zona sureste del área, con una pendiente promedio de 2%. Los sedimentos someros están compuestos de arcillas blandas con intrusiones de arena y presencia de conchas marinas. Así mismo, se determinó el marco estructural que rige a la zona, el cual está formado por un régimen distensivo dominado por fallas normales de crecimiento, lo que permitió integrar la información con la obtenida de la tectónica regional.

Para operaciones exploratorias, así como para la ubicación de infraestructuras, se recomienda tomar las máximas precauciones con respecto a la presencia de reflexiones fuertes en las secciones sísmicas lo que está relacionado con la presencia de posibles bolsones de gas.

Es de hacer notar la importancia que posee la sísmica de alta resolución, ya que permite con mayor seguridad al ubicar las infraestructuras, así como en el momento de realizar la perforación tener las máximas precauciones.

Tabla de Contenidos

	Pag.
Lista de figuras.....	viii
Lista de tablas.....	x
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos y alcances del trabajo.....	2
1.2 Ubicación y extensión del área de estudio.....	3
1.4 Metodología del trabajo.....	3
2.GEOLOGÍA REGIONAL	5
2.1 Síntesis Geológica.....	5
2.2 Historia Geológica.....	6
2.2.1 Mio-Plioceno.....	6
2.2.2 Pleistoceno.....	7
2.2.3 Holoceno.....	7
2.3 Rasgos Estructurales y Tectónicos.....	8
2.4 Neotectónica y Geología Estructural.....	11
2.4.1 Tramo de Los Bajos-El Soldado.....	11
2.4.2 Tectónica Local.....	12
2.5 Estratigrafía somera y sedimentación reciente.....	14
3. ADQUISICIÓN	15
3.1 Consideraciones Teóricas.....	15
3.2 Adquisición de datos sísmicos y geotécnicos en el área del Delta del Orinoco.....	15
3.2.1 Levantamiento Beicip 1982.....	16
3.2.1.1 Descripción del área de estudio.....	16
3.2.1.2 Parámetros de adquisición del Levantamiento.....	19
3.2.1.3 Información geotécnica.....	19
3.2.2 Levantamiento Fugro 2001.....	20
3.2.2.1 Descripción del área de estudio.....	20
4. PROCESAMIENTO	23
4.1. Introducción.....	23
4.2. Fundamentos Teóricos.....	23

4.2.1. Transformada de Fourier.....	23
4.2.2. Teorema de Muestreo.....	24
4.2.3 Fenómeno de Aliasing.....	25
4.3 Descripción de la secuencia para el procesamiento de datos sísmicos.....	26
4.3.1 Secuencia de procesamiento.....	28
4.3.2 Demultiplexado.....	28
4.3.2.1 Carga de Datos	29
4.3.3 Lectura y carga de datos.....	29
4.3.5 Control de calidad de la geometría.....	30
4.3.6 Asignación de la geometría.....	32
4.3.7 Deconvolución.....	32
4.3.7.1 Tipos de Deconvolución	34
4.3.7.1.1 Deconvolución impulsiva (spiking)	34
4.3.7.1.2 Deconvolución predictiva.....	35
4.3.7.2 Parámetros para la Deconvolución	37
4.3.7.3 Análisis de Velocidad	39
4.3.8 Corrección “Normal Moveout (NMO)”.....	40
4.3.9 Apilamiento Bruto.....	40
4.3.9.1 Deconvolución F-X.....	41
5. INTERPRETACIÓN SÍSMICA.....	46
5.1 Interpretación Analógica.....	46
5.1.1 Batimetría.....	46
5.1.2 Espesores de suelos blandos.....	51
5.2 Interpretación Digital.....	55
5.2.1 Introducción.....	55
5.2.2 Metodología detallada y resultados de la interpretación estructural.....	56
5.2.2.1 Revisión de la información y carga de datos.....	56
5.2.2.2 Interpretación de Horizontes	56
5.2.2.3. Metodología de aplicación de atributos.....	59
5.2.2.4 Interpretación estructural.....	63
5.2.2.5 Mapas estructurales.....	66

6. CONSIDERACIONES INGENIERILES PARA LA PERFORACIÓN	
EXPLORATORIA Y CONSTRUCCIONES PERMANENTES.....	70
6.1 Introducción.....	70
6.2 Localización de una infraestructura de perforación móvil.....	70
6.3 Comportamiento del anclaje.....	70
6.4 Penetración del Jack-up	71
6.5 Comportamiento de la placa base.....	71
6.6 Instalación de tuberías.....	72
6.7 Construcciones permanentes.....	72
6.7.1 Pilotes de fundación.....	72
6.7.2 Tuberías.....	73
6.7.3. Riesgos Geológicos.....	74
6.7.3.1. Fallas.....	74
6.7.3.2. Gas.....	74
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	75
7.1 Conclusiones.....	75
7.2 Recomendaciones.....	77
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78
9. APÉNDICES.....	80
9.1 Apéndice A.....	80
9.2. Apéndice B.....	92

Lista de figuras

Figura N°	Pág
1.1 Ubicación del área de estudio.....	3
2.2 Columna estratigráfica características de la zona nororiental (Tomado de Wood, 2000).....	8
3.2 Placa tectónica del Caribe y su interacción con las placas tectónicas vecinas.....	9
2.4 Sistema de falla al noreste de Venezuela.....	10
2.5 Mapa neotectónico de Venezuela, con los principales sistemas de falla.....	10
2.5 Esquema de una falla curva producida por extensión cuyo buzamiento disminuye en profundidad.....	13
3.1. Mapa de Navegación del levantamiento en el Delta del Orinoco realizado por Beicip- CGG en el año 1982.....	17
3.2 Disposición de los equipos geofísicos y del muestreador del fondo marino en el barco.	18
3.3. Área del levantamiento de Fugro-2001.....	21
4.1. Reconstrucción de $f(t)$ mediante los valores discretos tomados cada Δt	24
4.2. Comparación entre dos señales analógicas una original y otra reconstruida.....	25
4.3. Fenómeno de Aliasing.....	26
4.4 Flujoograma de la secuencia del procesamiento.....	27
4.5. Registros obtenidos de los datos de entrada.....	30
4.6. Gráfica en la cual se muestra la graficación de Longitud vs Latitud.....	31
4.7. Gráfica de la cobertura que tienen los CDP en la línea que se están cargadas.....	32
4.8. Registro de los cargados con su geometría.....	32
4.9. Registro con la aplicación de una deconvolución “spiking”.....	36
4.10. Registro con la aplicación de una deconvolución fase cero.....	37
Fig. 4.11. Aplicación de un análisis de velocidad a la LINEA 35 con la aplicación activa de la corrección NMO.....	39
4.12. Sección apilada.....	41
4.13 Sección apilada con deconvolución F-X.....	42
4.14 Prueba de filtros pasabanda.....	44
4.15 Sección con deconvolución FX y filtro pasabanda (8-12.5-180-230) Hz después del apilamiento.....	44
5.1 Registro del ecosonda de la línea 137.....	47

5.2 Mapa batimétrico.....	48
5.3 Área del Delta del Orinoco con la división realizada en el estudio batimétrico (BLOQUE A).....	48
5.4. Área del Delta del Orinoco con la división realizada en el estudio batimétrico (BLOQUE B).....	49
5.5 Mapa morfológico del fondo marino.....	49
5.6. Registro del penetrador de fango que muestra un escarpe del fondo marino y un montículo.....	50
5.7 Registro del sonar de barrido lateral que muestra depresiones y montículos en una imagen bidimensional del fondo marino.....	50
5.8. Registro donde se muestra el gas en la columna de agua.....	51
5.9. Mapa de espesores de sedimentos.....	52
5.10 Registro del penetrador de fango que muestra los sedimentos de la unidad A.....	53
5.11 Registro del penetrador de fango que muestra la parte oeste de la unidad B, cercana al escarpe.....	53
5.12 Registro del penetrador de fango que muestra el acuñamiento de la unidad B hacia el noreste.....	54
5.13 Registro del penetrador de fango que muestra la unidad C.....	54
5.14 Los sedimentos de la unidad D alcanzan un espesor de 40 m.....	55
5.15 Sección sísmica 2D la cual fue utilizada para la interpretación sísmico estructural.....	56
5.16 Se muestra la interpretación de cada una de las líneas para el horizonte 1.....	57
5.17 Se muestra la interpretación de cada una de las líneas para el horizonte 0.5.....	58
5.18 Se muestra la interpretación de cada una de las líneas para el horizonte 2.....	58
5.19 Línea cross-line DOA-35 mostrando los horizontes interpretados.....	59
5.20 Atributo de amplitud aplicado a las líneas 121, 119a y 123.....	60
5.21 Aplicación del atributo frecuencia instantánea a las líneas 10, 14, 119, 119a, 121, 123 y 125.....	60
5.22 Aplicación del atributo reflexión a las líneas 10, 14, 119, 119a, 121, 123 y 125.....	60
5.23 Cubo en perspectiva donde se muestran las máximas amplitudes extraídas del área mediante el atributo de amplitud de poder.....	61
5.24 Cubo de perspectiva donde se muestran las máximas amplitudes extraídas del área interpretada.....	62
5.25 Línea cross-line DOA-35 mostrando fallas interpretadas.....	63

5.26 Cubo para correlacionar las fallas interpretadas.....	64
5.27 Saltos de falla en cada una de las líneas interpretadas.....	65
5.28 Mapa Estructural del Horizonte 1 el cual oscila entre 100-300 ms.....	66
5.29 Mapa Estructural del Horizonte 0.5 el cual oscila entre 200-600 ms.....	66
5.30 Mapa Estructural del Horizonte 2 el cual oscila entre 400-800 ms.....	67
6.1 Mapa de Riesgos del área Delta del Orinoco.....	56
9.6. Sonar de Barrido Lateral EDGETECH 260 TH .SONAR	85
9.2 Registrador del sonar de barrido lateral.....	85
9.3 Monitor con el cual se lleva el control del cañon de aire.....	86
9.4 Disparo del cañon de aire durante la adquisición sísmica.....	87
9.5 Cable del streamer utilizado en el levantamiento Fugro-2001.....	87
9.6 Monitoreo de las trazas a medida que se realiza la adquisición Sísmica.....	89

Lista de tablas

Tabla N°	Pág
1 Frecuencias de los distintos equipos geofísicos.....	91
2 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.....	96

1. INTRODUCCIÓN

El trabajo que se presentó a continuación es el resultado del Trabajo Especial de Grado realizado en PDVSA-Intevep, como requisito académico para obtener el título de Ingeniero Geofísico en la Universidad Central de Venezuela de la República Bolivariana de Venezuela.

El estudio forma parte de un trabajo realizado por PDVSA-Intevep de sísmica de alta resolución y geotécnica marina en un área costa afuera del Delta del Orinoco, con el fin de evaluar los riesgos geológicos y geotécnicos que pudiesen afectar la perforación de pozos y/o la localización de infraestructura (plataformas, tuberías, etc.) en la zona de estudio.

Los estudios de sísmica de alta resolución y geotecnia marina se requieren como complemento de la parte más somera del subfondo marino, que la sísmica convencional no alcanza a definir por los rangos de frecuencia que utiliza. Como resultado de este trabajo se obtiene información acerca de la batimetría, lito-morfología del fondo marino, estratigrafía, paleo-canales, superficies de erosión, presencia de fallas activas, posibles bolsones de gas y cualquier otro rasgo importante que deba tomarse en cuenta, para lograr generar mapas de riesgos en el área de interés.

A partir de la interpretación de la sísmica de alta resolución y de las muestras de los suelos del área, se requiere evaluar los riesgos geológicos y geotécnicos para la ubicación de pozos, plataformas y tuberías en un área costa afuera del Delta del Orinoco.

Esta técnica se aplicó en algunos levantamientos en el pasado, tales como lo fueron el proyecto de estudio regional realizado por McClelland en 1978 en el Delta del Orinoco, también se levantaron áreas en el Golfo de Paria, Golfo Triste y Golfo de Venezuela. Los datos utilizados para realizar esta tesis se adquirieron por Beicip-CGG en el año de 1982 en el Delta del Orinoco. Además, con la reactivación de esta actividad costa afuera, permitió cumplir con los objetivos planteados en esta tesis, como fue la participación activa en el levantamiento de sísmica de alta resolución y geotécnica marina realizado por Fugro-McClelland Marine Geosciences entre los días 22 de junio y 30 de julio en el área del Delta del Orinoco.

Se procesaron e interpretaron 50 líneas sísmicas para generar un mapa estructural somero del área de estudio e integrar toda la información en un mapa de riesgos, que incluirá bolsones de gas en sedimentos someros, fallas activas e inactivas, montículos en el fondo marino, gas en la columna de agua, entre otros.

1.1 Objetivos y alcances del trabajo

- ◆ Validar la información existente mediante registros adquiridos previamente (levantamientos McClelland 1978 y Beicip 1979 y 1981) en la zona.
- ◆ Realizar un nuevo levantamiento sísmico de alta resolución y muestreo geotécnico del fondo marino en el área a evaluar.
- ◆ Efectuar el procesamiento de registros sísmicos analógicos y digitales con PROMAX.
- ◆ Efectuar ensayos geotécnicos a las muestras de suelos adquiridas en el levantamiento actual.
- ◆ Interpretar los registros obtenidos a fin de correlacionar las propiedades acústicas del fondo y subfondo marino con los resultados del muestreo geotécnico mediante el uso de la estación de trabajo.
- ◆ Generar mapas de:
 - Batimetría (profundidades de agua)
 - Espesores de suelos blandos (isópacos).
 - Estructural somero
 - Riesgos geológicos y geotécnicos (fallas activas, morfología del fondo marino, paleo canales, gas superficial y/o cualquier otro rasgo geológico/geotécnico importante).

1.2 Ubicación y extensión del área de estudio

El área de estudio forma parte de la cuenca nororiental de Venezuela. Está ubicada en la plataforma del Delta del Orinoco, costa afuera de Venezuela, a una distancia aproximada de 110 Km de la costa y a 250 Km de Güiría en dirección sureste (Fig. 1.1). El levantamiento sísmico de alta resolución abarca un área de 500 Km² (50 Km x 10 Km), con una separación entre líneas de 1000 y 500 m.

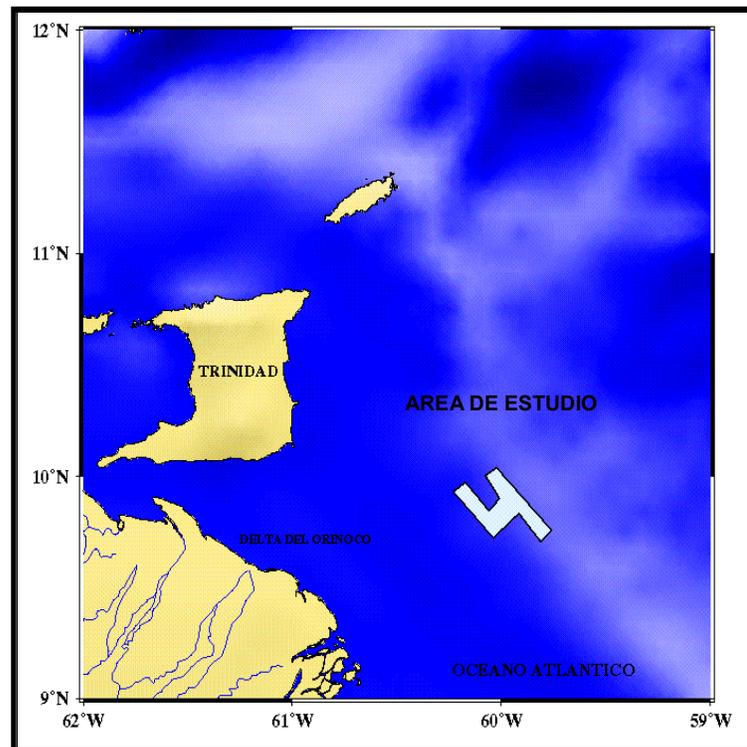


Fig. 1.1 Ubicación del área de estudio.

1.3 Metodología de trabajo

Se realizó una investigación y revisión bibliográfica la cual consistió en determinar los trabajos que se han realizado previamente en el área, así como la disponibilidad de la información y evaluar su uso en la ejecución del proyecto.

Luego se realizó una validación de la información, la cual consiste en revisar los registros obtenidos de levantamientos anteriores en la misma zona y verificar si la interpretación realizada a los mismos es válida.

Como paso siguiente se realizó la adquisición de datos sísmicos y geotécnicos, la cual tiene como objetivo recaudar toda la información mediante la generación de un mallado específico de la zona, de acuerdo con los objetivos de interés, para luego realizar la navegación costa afuera. Así mismo, mediante el uso de diferentes equipos, obtener una serie de datos del fondo y subfondo marino. Es de hacer notar que se trabajó en la misma zona pero con la información adquirida en la campaña de 1982 realizada por Beicip-CGG.

Luego de culminar con la etapa de adquisición sísmica se procedió con el procesamiento de datos sísmicos, el cual se realizó parcialmente en el barco en tiempo real. Este procesamiento en el barco se utilizó solo para determinar la calidad de la señal y posteriormente se realizó el procesamiento final en PDVSA-Intevep.

Además, se realizaron ensayos geotécnicos, los cuales son una serie de ensayos a las muestras de suelo obtenidas, ya que en el barco se efectuaron ensayos rápidos y de reconocimiento visual de las muestras obtenidas con el muestreador en campo. Estas muestras se llevaron al laboratorio para realizarles los ensayos geotécnicos de clasificación de suelos.

Luego de realizar los procesos anteriores se realizó la interpretación analógica y digital de toda la información, para así determinar la parte batimétrica, morfológica, espesores de sedimentos, estructural, así como las posibles zonas gasíferas. Todo esto permitirá evaluar los riesgos geológicos y geotécnicos del área.

Finalmente se presentan los resultados obtenidos de la interpretación y las conclusiones a las cuales se llegaron, así como las recomendaciones necesarias para estudios posteriores.

2. GEOLOGIA REGIONAL

2.1. Síntesis Geológica

A continuación se muestra una síntesis de los aspectos geológicos resaltantes de la zona de estudio. Primero, se describe la tectónica regional del noreste de Venezuela, a fin de entender la orientación de los campos de esfuerzos que originan los diferentes sistemas de fallas que subsisten en la zona. Luego, se comenta sobre el origen de las fallas locales, productos de la continua deposición de sedimentos en áreas cercanas al borde del talud continental. Finalmente, se especifican las características más importantes de la estratigrafía y los eventos geológicos que han afectado la geología del Cuaternario en la zona.

En varios aspectos, tanto geológicos como geográficos, Trinidad constituye la prolongación del noreste venezolano; la cordillera septentrional de Trinidad tiene su equivalente en la Cordillera de la Costa de Venezuela. Las cordilleras central y meridional de Trinidad son una prolongación de la Serranía del Interior de Venezuela.

Sin embargo, movimientos tectónicos ocurridos principalmente en el territorio venezolano afectaron diferencialmente a Trinidad y al Nororiente de Venezuela. Trinidad, localizada en el flanco móvil de la cuenca, sufrió interrupciones y modificaciones de los procesos sedimentarios, mientras que el nororiente venezolano localizado en una zona de mayor estabilidad tectónica, permitió una sedimentación de gran desarrollo regional y continuidad estratigráfica (Wood, 2000).

La zona de interés pertenece a la Cuenca Oriental de Venezuela, la cual queda delimitada al sur por el escudo de Guayana, y al oeste por el arco del Baúl, ambos formados por rocas ígneas, metamórficas y meta sedimentarias, que van desde el Pre-Cámbrico hasta el Triásico –Jurásico y que constituyen también el basamento de la cuenca, cubierto discordantemente por sedimentos del Cretáceo- Cuaternario (Wood, 2000).

Durante el transcurso del Cretáceo, el basamento en forma de peniplanicie fue invadido por un mar epicontinental, generándose la cuenca oriental y el desarrollo gradual del geosinclinal de eje máximo de sedimentación orientado este-oeste. Este eje de máxima sedimentación se desplazó desde su posición, al norte de la actual Península de Paria en el Cretáceo Inferior, hasta la zona central de Anzoátegui y Monagas en el Plioceno.

Actualmente, la sedimentación ocurre principalmente en la desembocadura del Río Orinoco y en el Golfo de Paria debido a las corrientes marinas que se desplazan de este a oeste. La posición del eje de máxima sedimentación durante el desarrollo del geosinclinal controló la sedimentación y naturaleza de los sedimentos, los cuales aumentan de espesor desde el escudo de Guayana en el sur hacia el centro de la Cuenca en el norte. La naturaleza marina de los sedimentos se incrementa de sur a norte y de oeste a este (Wood, 2000)

2.2. Historia Geológica

2.2.1. Mio-Plioceno

A finales del Mioceno comienza una regresión del mar epi-continental y en Venezuela oriental se deposita la formación La Pica en un ambiente marino litoral, probablemente en una zona deltaica correspondiente a una antigua desembocadura del Orinoco. Durante este período, en Trinidad se depositan las formaciones Cruse, Forest y Manzanilla, también en ambientes litorales poco profundos.

La secuencia sedimentaria continúa en el Mioceno Superior–Plioceno, con el depósito de las formaciones Las Piedras y Quiriquire en Venezuela y Monne L’Enfer-Springvale en Trinidad. Las formaciones en Trinidad son características de un ambiente litoral totalmente lagunar, mientras que en Venezuela corresponden casi exclusivamente a depósitos continentales de aguas dulces.

Este período quedó caracterizado por la fase culminativa de orogénesis andina en las Cordilleras Septentrionales con el solevantamiento de la cuenca oriental y su inclinación hacia el Este, lo que motiva que las formaciones Las Piedras-Quiriquire cubran solo la parte oriental de la cuenca y faltan en la parte occidental.

El empuje hacia el sur de las cordilleras septentrionales motiva la formación de los principales sistemas de fallas y la deformación asimétrica de la cuenca Oriental de Venezuela, con un flanco norte muy abrupto y el flanco Sur de suave pendiente. La orogénesis andina, marca significativamente la secuencia sedimentaria de Trinidad, configurando definitivamente el desarrollo de las estructuras preexistentes.

2.2.2. Pleistoceno

Durante el transcurso del Pleistoceno en la cuenca Oriental de Venezuela, se depositaron formaciones deltaicas y lagunares en las zonas de planicie y aluvionales y escombros de falda en las laderas y pie de montañas, características de estas sedimentaciones en la formación Mesa. En el Delta del Amacuro predominó una sedimentación de material fino, muy bien representada por las arcillas laminares de la formación Paria.

En Trinidad, el Pleistoceno quedó representado por la formación Los Cedros, compuesta por depósitos de playas antiguas y niveles aterrizados en los cauces fluviales más importantes y formaciones aluvionales constituidas por intercalaciones de arcillas y gravas, arena fina cuarcífera y depósitos litorales calcáreos (Butenko, 1978).

2.2.3. Holoceno

El final del Pleistoceno, caracterizado por un nivel de mar alrededor de 100 m mas bajo que el actual, marca el comienzo de la transgresión Holocena, interrumpida por tres cortas regresiones. Estas oscilaciones en el nivel del mar quedarían documentadas en la plataforma continental Orinoco–Guayana donde, bajo los sedimentos actuales, se reconocen superficies de erosión o no sedimentación, asociadas a las variaciones del mar. Localmente, estas superficies estarían afectadas por depósitos continentales deltaicos o aluvionales correspondientes a una línea de costa ubicada hacia el noreste de la línea actual.

En el Golfo de Paria, dos de las tres regresiones de la transgresión Holocena pueden reconocerse. La primera regresión no afectó al Golfo, puesto que la transgresión principal no había alcanzado aún el nivel de las Bocas del Dragón y Serpientes. Las superficies de interrupción de la sedimentación marina asociadas a las regresiones, pueden reconocerse a 42 m y 20 m respectivamente bajo el nivel del mar actual, y corresponderían a los niveles máximos alcanzados por la transgresión interrumpida por dos regresiones. Entre la superficie de interrupción de la sedimentación marina asociada a la última regresión y el fondo marino actual existen cerca de 20 m de limo-arcilloso, con características de fango marino atribuido a depósitos del caño Manámo y arrastres de sedimentos del Delta del Orinoco por

la corriente marina predominante del este–noreste. Los sedimentos actuales de la zona costa fuera Delta del Orinoco son muy poco conocidos y fundamentalmente están controlados por las descargas del Río Orinoco y la corriente marina de Guayana (Butenko, 1978) (Fig. 2.1).

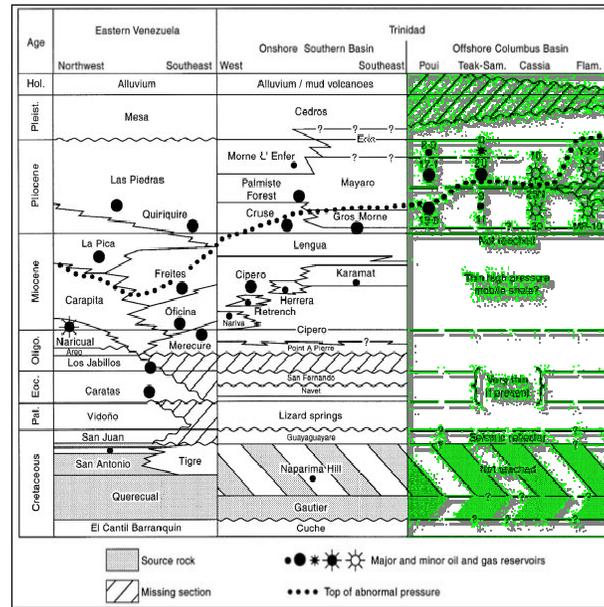


Fig. 2.1 Columna estratigráfica características de la zona nororiental de Venezuela así como de Trinidad y Tobago (Tomado de Wood, 2000)

2.3. Rasgos Estructurales y Tectónicos

2.3.1. Tectónica regional

La región noreste de Venezuela se encuentra en la zona donde se ha propuesto la frontera entre las placas tectónicas del Caribe y Sur América. Este borde de placas aparentemente no está definido por simples sistemas de fallas, sino que ocurre en una zona amplia de deformación que abarca unos 100 Km. de ancho. El movimiento relativo de la placa del Caribe con respecto a la placa Suramericana es del orden de los 2 cm/año y, en general, de oeste a sureste, lo que resulta en movimientos de corteza predominantemente lateral derecho y en fallamientos con deslizamiento lateral a lo largo del borde de placas (Amoco Worldwide Engineering and Construction, 1998) (Fig.2.2).

En Venezuela, la suave componente sureste de convergencia de placas supone una componente compresional subordinada a esfuerzos a lo largo del borde de placas, lo que resulta en un régimen transpresional con fallamiento inverso secundario. El borde entre las placas Caribe-Suramericana, en Venezuela, se caracteriza geológicamente como una zona de cizalla lateral-dextral transpresional distribuida, que tiene al menos 250 Km. de longitud de oeste a este. Las estructuras geológicas de edad Oligoceno que se extienden desde Caracas hasta Trinidad están relacionadas a esta convergencia oblicua de placas. Las fallas inversas y pliegues relativos son de edad generalmente mas joven al este de Trinidad, y se convierten progresivamente en más viejas hacia el oeste.

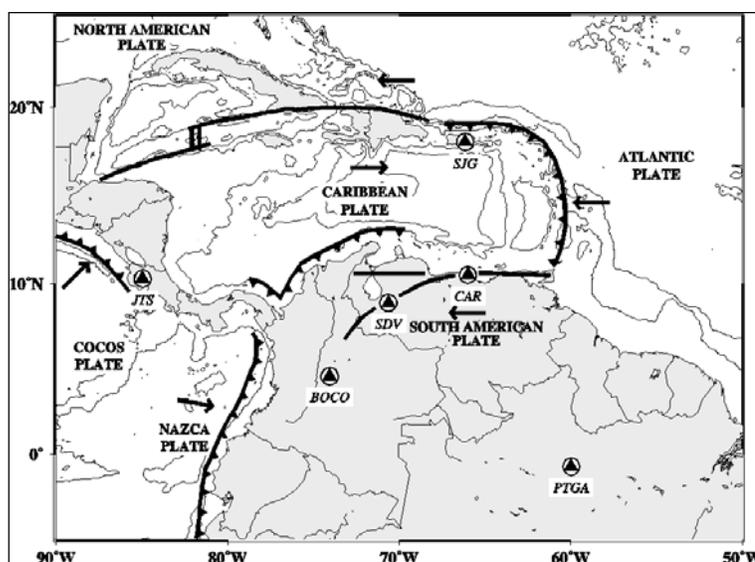


Fig. 2.2 Placa tectónica del Caribe y su interacción con las placas tectónicas vecinas.

La tendencia noroeste de las zonas de fallas de Los Bajos-El Soldado que atraviesan el Golfo de Paria, marca un importante borde estructural en la unión de las placas del Caribe y Suramericana. Al noreste de estas zonas de fallas la corteza del piso del Océano Atlántico es empujada hacia el noroeste y subduce eventualmente por debajo de la placa del Caribe, a lo largo de la zona de subducción de las Antillas (Wood, 2000) (Fig. 2.3).

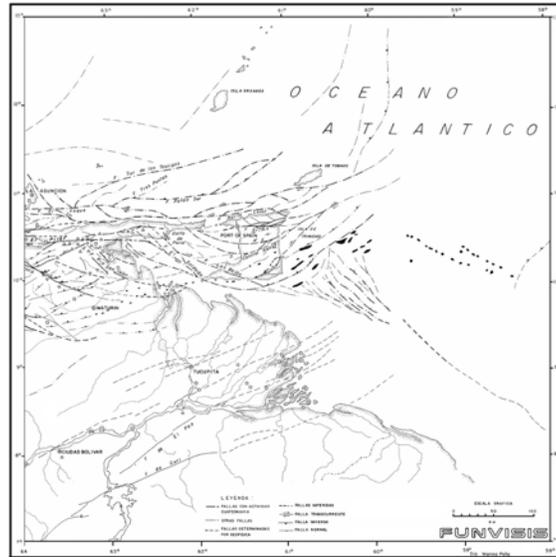


Fig.2.3 Sistema de falla al noreste de Venezuela. Tomado del mapa Neotectónico de Venezuela, realizado por el departamento de Ciencias de la tierra de FUNVISIS

El fallamiento regional de la corteza incluye los sistemas de fallas lateral-dextral mas importantes al noreste de Venezuela, que poseen una tendencia entre este-oeste y noroeste-sureste (Fig.2.4).

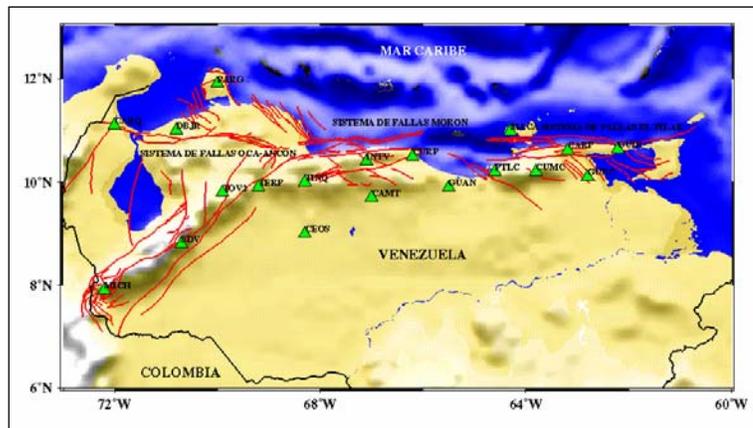


Fig. 2.4 Mapa neotectónico de Venezuela, con los principales sistemas de falla

El deslizamiento de algunas de estas fallas pertenece al Holoceno, las zonas de fallas de deslizamiento lateral más importantes son las de El Pilar, El Soldado, Los Bajos, San Francisco y las zonas de falla de la Costa Norte. Los movimientos y modos de desplazamiento en estas zonas de fallas están gobernados por campos de esfuerzos

transpresionales entre las placas del Caribe y Suramericana. Los movimientos y modos de desplazamiento de fallas secundarias están gobernados por esfuerzos locales, relacionados con la orientación local del rumbo de la falla con respecto al esfuerzo transpresional regional principal.

Las zonas de fallas de Los Bajos-El Soldado son fallas activas de deslizamiento lateral con tendencia noroeste a lo largo del Golfo de Paria. Un desplazamiento total lateral con una tasa de deslizamiento de 7–11 mm por año ha ocurrido a lo largo de ésta y otras zonas de fallas desde el Plioceno tardío. El deslizamiento lateral en estas fallas puede continuar al sur como fallamiento inverso, como ocurre en la falla del Southern Range (el segmento sur de la falla de Los Bajos que corre paralela al borde sur de Trinidad) y a lo largo del Galeota Ridge del sur de Trinidad (Wood, 2000).

Basado en evidencia geológica, la continuación de la zona de fallas de El Pilar en Trinidad no se ha deslizado desde el Plioceno. Sin embargo, en Venezuela la zona de falla desplaza sedimentos del Cuaternario y se considera que es sísmicamente activa. En este sistema de fallas ocurrió el sismo de mayor magnitud sentido en Venezuela en los últimos años: sismo de Cariaco del 9 de julio de 1997 de magnitud Ms 6,9. El movimiento reciente en la zona de fallas del Pilar parece ser transferido a Los Bajos, El Soldado y a las fallas relacionadas con un rumbo noroeste a lo largo del Golfo de Paria. La zona de falla de la Costa Norte ha experimentado 10 Km de diferencia lateral-dextral desde el Cuaternario, y es posible que sea responsable de más del 20% del deslizamiento total a lo largo del borde de placas Caribe - Suramérica (Seismic Hazard Assessment of Terminal de Aguas Profundas (“TAP”) Facility Sites, Northeastern Venezuela, 1998).

2.4. Neotectónica y Geología Estructural

2.4.1. Tramo de los Bajos-El Soldado

Este sistema de fallas tiene una longitud de aproximadamente 130 Km para los Bajos y 90 Km para El Soldado y asegura la unión del sistema El Pilar con la zona de subducción de las Antillas Menores. Este sistema debido a su amortiguación contra el piedemonte meridional de la Península de Paria, determina un amplio frente de

deformaciones por falla, orientadas noroeste-sureste, que afectan tanto a las unidades del Pleistoceno (Río Yoco, entre Soro y Güira) como a los depósitos cuaternarios más jóvenes (pantanos al oeste de Irapa y Yaguaraparo).

Dicho sistema de fallas determina la articulación de juegos de bloques basculados bajo la forma de teclas, que se observan en la morfología y se evidencian además por las inclinaciones anómalas y plegamientos observables en los cortes de la carretera hacia Güiria.

La falla de Los Bajos se evidencia en Trinidad y en la plataforma del Golfo de Paria y se extiende hacia el noroeste desde la península sur-occidental de Trinidad hasta el suroeste de Güiria, donde se asocia a juegos de bloques levantados se evidencian manifestaciones de deformaciones compresivas y extensivas. El desplazamiento lateral dextral a ambos lados de la falla Los Bajos ha sido estimado y se calcula cercano a 8 Km en el Golfo de Paria, pero no ha sido posible estimar el desplazamiento vertical asociado.

La falla de El Soldado se ubica paralelamente y a unos 25 Km al oeste de la traza del sistema de Los Bajos. El desplazamiento lateral dextral de esta falla al parecer es similar al de la falla de Los Bajos, por lo que ambas fallas acumularían un desplazamiento global de 25 Km (González, 2001)

2.4.2. Tectónica Local

En un marco tecno-estratigráfico es posible explicar la compleja relación entre las fallas normales extensivas regionalmente más grandes, diapiros de arcilla móvil y grandes mega secuencias ricas en clásticos, que construyen la arquitectura estratigráfica de la cuenca este de Venezuela.

La extensión regional, asociada a la transpresión oblicua de la placa del Caribe al norte y la placa Sur Americana al sur, crea sitios de debilidad donde los sedimentos progradantes, provenientes del Delta del Orinoco, descargan aumentando la ruptura a lo largo de las fallas normales (Wood, 2000).

El inicio del movimiento en estas fallas de extensión se refleja en la estratigrafía del lado que se deprime. Allí, las unidades estratigráficas más próximas al lado deprimido de la falla, son depósitos marinos profundos cubiertos por una arena marina somera

progradacional, cubierta por otro evento de inundación profundo, que marca la actividad temprana en la falla normal (Wood, 2000).

Una vez que el espacio de acomodo tectónico más cercano a la falla se rellena, la sucesión prograda al este de la próxima falla normal y eventualmente se instala cerca del quiebre de talud deposicional. Estas fallas, una vez iniciadas, bordean el lado próximo de una sola mega secuencia (Fig. 2.5). Ayudadas por la carga del peso de la deposición progresiva de sedimentos, las arcillas móviles se fuerzan hacia el noreste y comienzan a levantarse. El espacio de acomodo se genera mas abajo del borde en la cuenca de la mega secuencia por la arcilla que se retira, y comienza la subsidencia a lo largo de una rampa de despegue.

El crecimiento ocurre a lo largo de los límites de falla próximos mientras los sedimentos del proto Orinoco intentan de llenar espacios de acomodo subsiguientes. El afinamiento estratigráfico también ocurre hacia el diapiro como consecuencia de la rotación progresiva de las capas hacia abajo a lo largo de la superficie del plano de despegue.

La secuencia típica del inicio de una falla y desarrollo de los estratos se ilustra en la Fig.2.5, cuando una falla se activa, muestra crecimiento y concluye en la rampa de despegue a profundidad. El sedimento se acuña hacia el noreste de esa misma falla y comienza la rotación sobre la rampa de despegue, provocando un quiebre del talud y la ubicación hacia tierra de la acumulación de sedimentos del diapiro de arcilla.

Cualquier espacio de acomodo remanente se llena, y hay un corrimiento progresivo hacia el este del fallamiento de extensión, de la ubicación del quiebre del talud y de la retirada lateral de las arcillas.

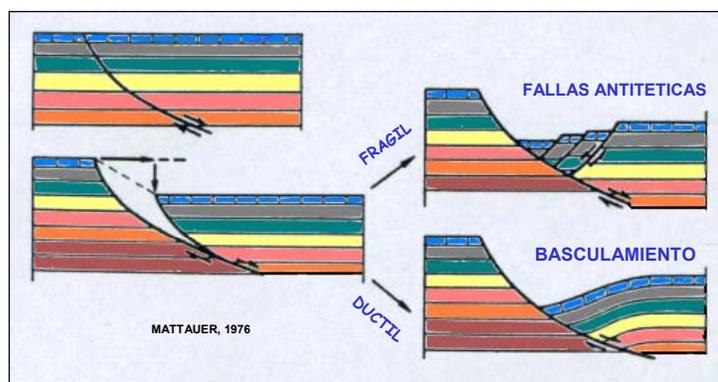


Fig. 2.5 Esquema de una falla curva producida por extensión cuyo buzamiento disminuye en profundidad, falla de Crecimiento: Falla lítrica que corta una superficie activa de sedimentación, Tomado de Martínez 2001

La tectónica por gravedad, a lo largo de una superficie de despegue somera que buza hacia el este-noreste es un factor importante que pudo haber afectado la orientación del tren de dorsales transpresionales noreste-suroeste, así como la de las fallas normales de extensión con orientación noroeste-sureste y menos de 45° con respecto a la zona límite entre placas (producto de esfuerzos transpresionales).

2.5 Estratigrafía somera y sedimentación reciente

La cuenca se rellenó durante el Plioceno y el Pleistoceno con más de 40.000 pies de sedimentos clásticos, proporcionados principalmente por el sistema del Paleo Delta del Orinoco. El delta progradó hacia el este como un delta dominado por corriente y turbulencia durante el Plioceno-Pleistoceno, depositando mega secuencias de sedimentos clásticos terrestres y marinos como una serie de cuñas progradantes hacia las facies de arcilla móvil prepleistocénicas (Butenko, 1978).

La columna sedimentaria de la cuenca consiste principalmente de estratos delgados Pleistocénicos y Pliocénicos suprayacentes a arcillas móviles pre Pliocénicas.

Durante el transcurso del Pleistoceno en la Cuenca Oriental de Venezuela, se depositaron formaciones deltáicas y lagunares en las zonas de planicies y aluvionales y escombros de falda en las laderas y pie de montañas, características de estas depositaciones es la formación Mesa. En el Delta del Amacuro predominó una sedimentación de material fino muy bien representada por las arcillas laminares de la formación Paria (Butenko, 1978).

En Trinidad, el Pleistoceno queda representado por la formación Cedros, compuesta por depósitos de playas antiguas y niveles aterrizados en los cauces fluviales más importantes y formaciones aluvianas constituidas por intercalaciones de arcillas y gravas, arena fina cuarcífera y depósitos litorales calcáreos.

Estas secuencias progradantes extremadamente delgadas se depositaron rápidamente en el holoceno. La tasa de acumulación de sedimentos durante el Plioceno-Pleistoceno está en un rango de 2 a 6 m en mil años. Esta alta tasa de acumulación resulta del alto aporte de sedimentos proto-Orinoco y la rápida generación del espacio de acomodo por extensión tectónica (Wood, 2000).

3. ADQUISICIÓN

3.1. Consideraciones teóricas

La prospección geofísica tiene como objetivo principal inferir las dimensiones y propiedades físicas de las estructuras geológicas que se encuentran por debajo de la superficie. Además de ello, se tiene un objetivo netamente económico, ya que es allí donde se encuentran los grandes yacimientos de minerales, petróleo y gas.

En este proyecto se usó la técnica de sísmica de reflexión de alta resolución, cuyo objetivo fundamental es definir la estratigrafía y los rasgos geológicos con una buena resolución; es decir, se tratan de identificar las capas geológicas someras de poco espesor y de evaluar los riesgos con la mejor precisión posible.

Para cumplir con este propósito, se requiere una fuente de energía que genere ondas acústicas de altas frecuencias; sin embargo, debido a que la absorción aumenta rápidamente con la frecuencia, estas ondas acústicas de longitud de onda corta, no penetran muy profundo el subfondo marino.

Para llevar a cabo este propósito se necesita la utilización de una serie de instrumentos los cuales trabajan de manera simultánea, pero con objetivos diferentes en un área común.

Una vez adquiridos estos datos, se procede al procesamiento e interpretación de la data, para luego generar mapas batimétricos, estructurales, isópacos, de riesgos, etc., para determinar los sitios aptos para la perforación y fundación de plataformas de perforación petroleras o cualquier otra utilidad que se le pueda encontrar a los resultados.

Tal como se mencionó anteriormente, a continuación se presentan las características más importantes del levantamiento realizado por Beicip-CGG en el año de 1982 y el que realizó Fugro en el año 2001.

3.2 Adquisición de datos sísmicos y geotécnicos en el área de Delta del Orinoco

La adquisición de datos tiene como objetivo recopilar toda la información mediante la generación de un mallado específico de la zona, de acuerdo con los objetivos de interés, para luego realizar la navegación costa afuera. Así mismo, mediante el uso de diferentes equipos, se pretende obtener una serie de datos del fondo y subfondo marino, mediante los siguientes equipos: ecosonda, penetrador de fango, sparker multielectrodo, sonar de barrido lateral, sísmica

digital y muestreador. Los equipos utilizados en ambos levantamientos son muy similares, en cuanto a los rangos de frecuencias.

En la adquisición de la sísmica de alta resolución las fuentes utilizadas se ubican bajo la superficie del agua, sujeta al barco que está realizando la adquisición, el cual recorre la zona de tal manera que forma una malla para dar una mayor cobertura del área de interés.

En las investigaciones de prospección marina predomina la reverberación de la capa de agua, causada por la reflexión múltiple de las ondas cuando estas rebotan hacia atrás y hacia delante entre el tope y la base de la capa de agua generando ruido (Saavedra, 1979).

Es de hacer notar que los equipos utilizados en ambos levantamientos son muy similares por lo que se cita la tabla 1, para identificar los parámetros con los cuales trabajaron los equipos durante ambos trabajos de campo. Una explicación detallada de cada uno de estos se presenta en el Apéndice A.

Tabla 1 Equipos geofísicos y frecuencias utilizadas en el levantamientos de Beicip-CGG (1982) y Fugro (2001)

EQUIPO	LEVANTAMIENTO	SISTEMA	FRECUENCIA
Ecosonda	Beicip-CGG (1982)	Elac Laz 17	28 Khz
	Fugro (2001)	Simrad Ea 500	27 Khz
Penetrador de fango	Beicip-CGG (1982)	1036 Ore Acoustic Profiler	3,5 Khz
	Fugro (2001)	Ore 140 Transceiver	3,5 Khz
Sonar de barrido lateral	Beicip-CGG (1982)	EG&G 259-4	105 Khz
	Fugro (2001)	Edgetech 260 th .Sonar	100 Khz
Sparker multielectrodo	Beicip-CGG (1982)	Ege&G 232-A 400-	800 Hz
Sísmica digital	Beicip-CGG (1982)	Miniflexichoc Fhc 50	80-1000 Hz
	Fugro (2001)	Oyo Das-190 pulg ³	20-250 Hz

3.2.1 Levantamiento Beicip 1982

3.2.1.1 Descripción del área de estudio

En este levantamiento se adquirió información a lo largo de 1200 Km de líneas sísmicas de alta resolución, con un total de 100 líneas para toda el área. El área de adquisición comprende

aproximadamente 500 Km². La distancia entre líneas varía entre 2 Km, 1 Km y 500 m entre sí. La longitud de las líneas varía entre 16 Km las más cortas y 25 Km las mas largas (Fig. 3.1).

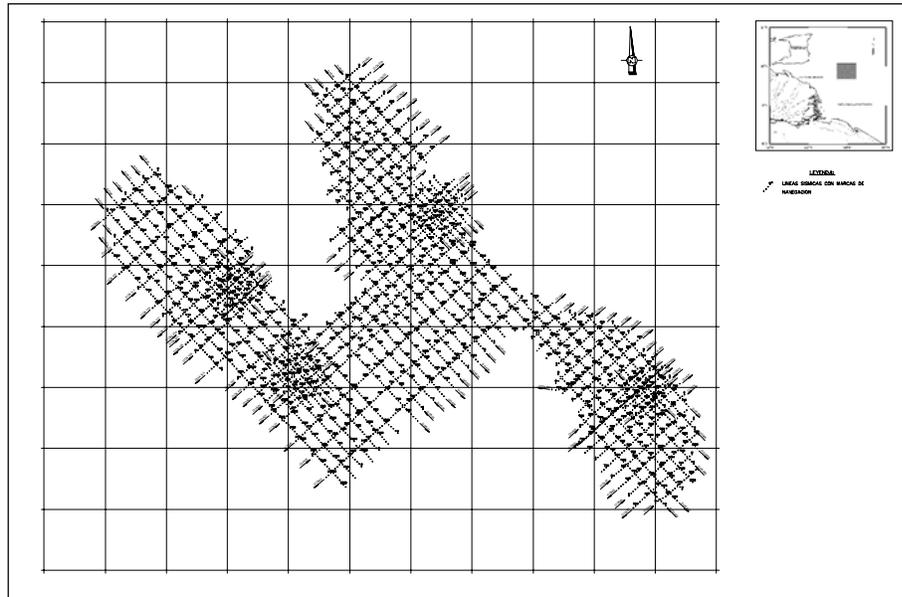


Fig. 3.1. Mapa de Navegación del levantamiento en el Delta del Orinoco realizado por Beicip-CGG en el año 1982. El mapa muestra las líneas con la identificación de cada una y dirección de adquisición.

En sitios específicos hay una distancia entre líneas de 500 m, mientras que en la mayor parte del levantamiento la distancia entre líneas es de 1 Km, ya que en aquellas zonas donde se redujo el espaciamiento entre las líneas de disparo, se buscaba obtener mayor detalle en la información que se adquiriese en esta área.

El mapa final de navegación se logró generar a partir de las coordenadas de cada 20 puntos de tiro, es decir, cada 250 m, lo que nos permitió que se identificaran, la numeración y la dirección de las líneas con la ayuda de un programa de diseño, ya que no se disponía del mapa de navegación de este levantamiento.

Los equipos utilizados en este levantamiento son:

- ◆ Ecosonda ELAC LAZ 17
- ◆ Sonar de barrido lateral EG&G
- ◆ Penetrador de fango ORE
- ◆ Sparker multielectrodo
- ◆ Miniflexichoc FHC 50

La sísmica digital del área de estudio se grabó con un sistema digital multicanal, que utiliza una fuente acústica (Miniflexichoc FHC 50) y un streamer de 12 canales. La longitud activa total del streamer alcanza 300 m, es decir, 25 m de sección activa por cada canal. Cada canal consiste en tres grupos de 16 hidrófonos HC 202 montados en paralelo.

Todos los registradores geofísicos estuvieron conectados con el sistema de posicionamiento ARGO DM54 y cada “fix mark” (intervalo de 125 m, que corresponde a la ubicación de la antena del sistema de posicionamiento) fue marcado en todas las secciones sísmicas (Fig. 3.2).

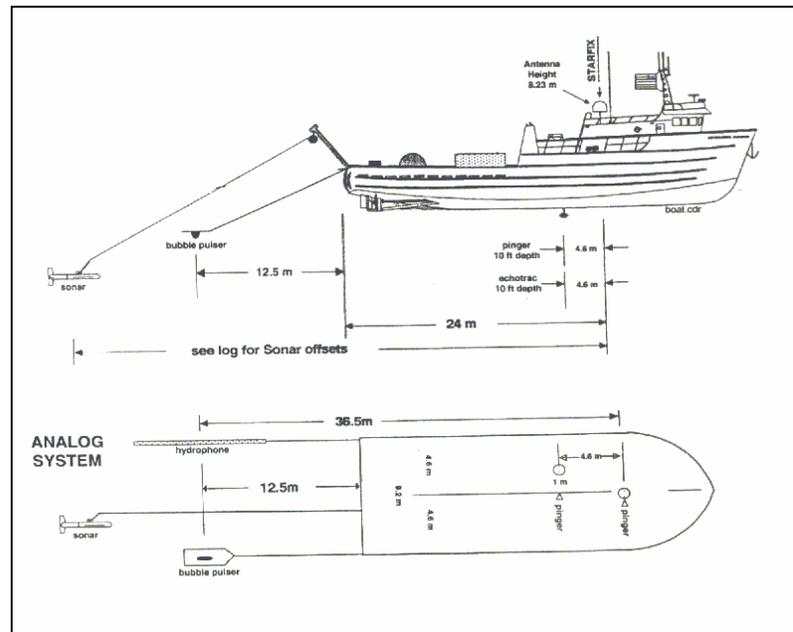


Fig. 3.2 Disposición de los equipos geofísicos y del muestreador del fondo marino en el barco

La navegación del barco se realizó con el MINIGIN (Geophysical Integrated Navigation), el cual es un equipo de navegación integrada que conectado al sistema ARGO DM54 y al programador sísmico permite:

- ◆ El control automático de los datos de navegación
- ◆ La entrada y salida automática de la línea sísmica
- ◆ El disparo de los equipos a distancias iguales
- ◆ La navegación según una ruta preseleccionada
- ◆ La grabación de los datos de navegación
- ◆ La graficación en tiempo real de la ruta del barco
- ◆ La graficación de todas las líneas sísmicas disparadas (Mapa de navegación)

Los mapas se realizaron en el sistema de proyección UTM (Universal Transverse Mercator), Zona 20, Datum “La Canoa PSAD 56”.

3.2.1.2 Parámetros de adquisición del levantamiento

- ◆ Intervalo de muestreo: 0,5 ms
- ◆ Longitud del registro: 1700 ms
- ◆ Frecuencia recuperable: 32 Hz-640 Hz
- ◆ Ganancia automática preamplitud: 64 db
- ◆ Fuente: miniflexichoc
- ◆ Espectro de frecuencias de la fuente: 80 Hz-1000 Hz
- ◆ Profundidad de la fuente: 5 m
- ◆ Distancia entre fuentes: 12,5 m
- ◆ Distancia entre canales: 25 m
- ◆ Número de canales: 12 mas 4 auxiliares
- ◆ Distancia mínima entre fuente y receptor: 89m
- ◆ Distancia máximo entre fuente y receptor: 364 m (275 m + 89 m)
- ◆ Longitud activa: 300 m
- ◆ Cobertura: 1200 %
- ◆ Canal monitor: canal N° 1

3.2.1.3. Información geotécnica

Con el fin de obtener información sobre la naturaleza y las propiedades de los sedimentos superficiales se tomaron 9 muestras del fondo marino. Estas muestras se obtuvieron mediante un muestreador a pistón Kullenberg, de un peso de 500 Kg, equipado con un tubo de 5 m de largo y 8 cm de diámetro.

Las muestras recuperadas se sellaron inmediatamente a bordo del barco. La descripción visual y los ensayos geotécnicos se realizaron en el Laboratorio de Ensayos de Mecánica de Suelos de la Universidad Católica Andrés Bello, Caracas.

Estos ensayos se ejecutaron para obtener los parámetros geotécnicos necesarios para resolver los problemas ingenieriles, entre ellos: el anclaje, las dimensiones de la placa base y la instalación del tubo conductor.

Los ensayos mas importantes realizados son:

- ◆ Humedad
- ◆ Límites de Attenberg
- ◆ Compresión sin confinar
- ◆ Veleta
- ◆ Pasante tamiz N° 200
- ◆ Hidrómetro
- ◆ Solubilidad de carbonatos
- ◆ Materia orgánica

3.2.2. Levantamiento Fugro 2001

La adquisición geofísica conducida por Fugro, en el barco “Universal Surveyor” se realizó durante 45 días entre los meses de junio y julio del presente año. El barco avanzó a una velocidad promedio de 4,5 nudos.

Se operaron simultáneamente todos los equipos geofísicos, tanto analógicos como digitales. La información digital se almacenó en cartuchos 3480, de forma multiplexado grabadas en un formato SEG_D. Luego, se realizó un pre-procesamiento en el cual se cambió el formato de los datos, la información fue demultiplexada, se realizó un análisis de velocidad, corrección NMO y un apilamiento bruto de las líneas sísmicas.

El pre-procesamiento se efectuó con un programa “Focus” de Paradigm. Geophysical, versión 4.3. Estas secciones se utilizaron para conocer los rangos de frecuencias recuperados. De cada línea sísmica se imprimió en papel a bordo del barco, una sección apilada en tiempo real para realizar el control de calidad de los datos

3.2.2.1 Descripción del área de estudio

El área de adquisición comprende 44 km². El arreglo consta de 53 líneas, 37 líneas principales, con orientación noroeste–sureste, espaciadas 250 m entre sí y 16 líneas secundarias

con orientación noreste–suroeste, separadas por una distancia de 500 m. La longitud de las líneas varía entre 4 Km las más cortas y 9 Km las más largas (Fig. 3.3).

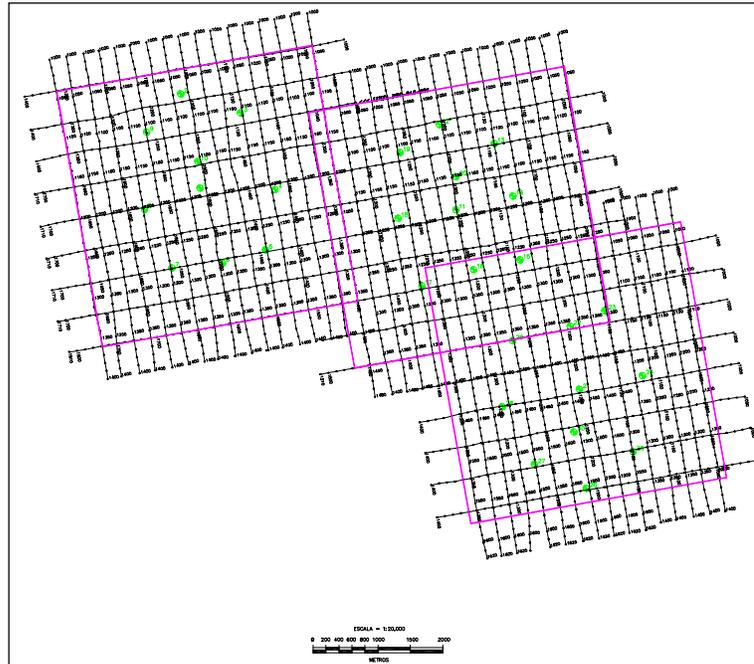


Fig. 3.3. Área del levantamiento de Fugro-2001. Los puntos verdes representan las localizaciones de las muestras geotécnicas. Las líneas están identificadas con su nombre y dirección de recorrido

Los parámetros de adquisición del levantamiento son:

- ◆ Intervalo de muestreo: 1 ms
- ◆ Longitud del registro: 2048 ms
- ◆ Frecuencia recuperable: 20 Hz-250 Hz
- ◆ Número de canales: 24
- ◆ Distancia entre canales: 12,5 m
- ◆ Distancia entre fuentes: 12,5 m
- ◆ Distancia mínima entre fuente y receptor: 41 m
- ◆ Distancia máxima entre fuente y receptor: 75,25m
- ◆ Cobertura: 1200 %
- ◆ Fuente: cañón de aire Soladrea (90 pulg 3 @ 2000 PSI)
- ◆ Formato de los datos: SEGD 8048
- ◆ Tiempo de retraso entre el disparo del cañón y el inicio del sistema digital: 14 ms
- ◆ Canal monitor: Canal N° 2

- ◆ Intervalo en sistemas analógicos: 125 m

Para el muestreo del fondo marino se tomaron 30 núcleos geotécnicos de longitud inferior a 2,5 m y en las localizaciones indicadas por PDVSA-Intevep. Estos puntos de muestreo se determinaron con base en una interpretación preliminar de los registros del equipo penetrador de fango. En general, las muestras se ubicaron originalmente en la intersección o al menos sobre la ruta de una línea de adquisición geofísica.

Se podría afirmar que la penetración del equipo se logró hasta unos 3 m como mínimo, ya que el cabezal del sistema, salía completamente lleno de material del fondo marino. Se logró recuperar entre 2 m y 2,5 m de muestra de sedimentos marinos.

Las muestras recién recuperadas se describieron visualmente y se evaluaron la resistencia al corte sin drenar, utilizando para ello las lecturas de la veleta, y la rigidez del material, medida con la ayuda del penetrómetro.

Posterior al trabajo de campo, las muestras se sometieron a diferentes ensayos de laboratorio para su clasificación geotécnica, con base en:

- ◆ Contenido de humedad
- ◆ Límites de Attenberg
- ◆ Análisis Granulométrico.

Una descripción de estos ensayos se muestra en el Apéndice B.

4. PROCESAMIENTO DE DATOS SISMICOS

4.1. Introducción

El objetivo fundamental del procesamiento de los datos sísmicos es la de mejorar la calidad de los datos adquiridos en campo, así como de disponer de una forma coherente la data de campo y presentarlos de tal manera que el interprete este en capacidad de realizar su trabajo con mayor comodidad y calidad.

4.2. Fundamentos Teóricos

4.2.1. Transformada de Fourier

Permite descomponer una función real en una función suma de senos y cosenos donde cada uno de ellos tiene una amplitud, frecuencia y fase propias.

La misma se puede definir mediante la siguiente expresión matemática:

$$F(\omega) = \int f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (\omega = 2\pi f, \text{ donde } f \text{ es la frecuencia}) \quad (\text{Ec. 1})$$

F (ω) puede ser real o complejo. Si es complejo se puede escribir de la siguiente forma:

$$F(\omega) = A(\omega)xe^{i\Phi(\omega)} \quad (\text{Ec. 2})$$

$$A(\omega) = (X_r^2(\omega) + X_i^2(\omega))^{1/2} \quad X_r(\omega): \text{ parte real} \quad (\text{Ec. 3})$$

$$\Phi(\omega) = \text{ArcTg}(X_i(\omega) / X_r(\omega)) \quad X_i(\omega): \text{ parte imaginaria} \quad (\text{Ec. 4})$$

Las funciones A (ω) y $\Phi(\omega)$ son reales y son respectivamente para f (t) el espectro de amplitud y el espectro de fase.

Si se desea recobrar la f (t) a partir de F (ω) se aplica la transformada inversa de Fourier:

$$F(t) = 1/2\pi \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{i\omega t} d\omega \quad (\text{Ec. 5})$$

Utilidad de la transformada de Fourier en el análisis de datos sísmicos

Las trazas sísmicas son series de tiempo, por lo tanto, pueden ser descritas como una suma de senos y cosenos. Al aplicar la transformada de Fourier podemos obtener información a partir del espectro de Amplitud del contenido de frecuencia de la traza sísmica, lo cual nos dará una resolución de la traza, de la presencia de ruido, etc.

Una vez hecho el análisis de los datos, en el dominio de la frecuencia pueden ser llevados de nuevo al dominio de tiempo mediante la aplicación de la transformada inversa de Fourier.

Es importante mencionar que el cálculo de las series discretas de Fourier se realiza mediante el algoritmo de Cooley y Tukey (1965) conocido como FFT (Transformada rápida de Fourier).

4.2.2. Teorema de Muestreo

Si la transformada de Fourier de una función $f(t)$ es cero por encima de cierta frecuencia f_c , es decir, $F(\omega)=0$ para $\omega > \omega_c$. Entonces $f(t)$ puede ser determinada a partir de sus valores discretos $f_n = f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$ tomados a intervalos constantes

$$\Delta t = 1/(2\pi f_c). \quad (\text{Ec. 6})$$

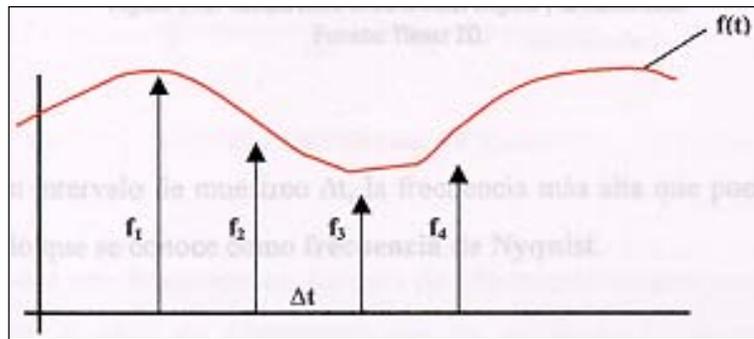


Fig. 4.1. Reconstrucción de $f(t)$ mediante los valores discretos tomados cada Δt , Tomado de Di Giulio, 1999

Entonces $f(t)$ puede ser reconstruida a partir de la siguiente expresión:

$$F(t) = f_n \sum_{-\infty}^{\infty} \text{Sen}(\omega_c t - n\pi) / (\omega_c t - n\pi) \quad (\text{Ec. 7})$$

Se puede decir que los datos registrados o la traza sísmica es una señal digitalizada a un intervalo de muestreo dado, lo que implica que si comparamos la señal analógica original con la reconstruida a partir de la señal digitalizada se observa que en la reconstruida no presenta ciertos detalles que tiene la original (Fig. 4.1). Esto es debido a que durante el muestreo se pierden ciertos componentes de alta frecuencia de la señal original.

Como toda ley tiene su excepción, el incumplimiento de este teorema es debido al fenómeno conocido como "Aliasing". Este fenómeno se caracteriza, en el dominio de la frecuencia, por la presencia de una serie de frecuencias "extrañas" por encima de f_c (frecuencia

de Nyquist). Que aparecen en los datos como frecuencias menores a la de Nyquist. Esto trae como consecuencia la alteración del espectro de la señal con $f > f_c$ (Fig. 4.2)

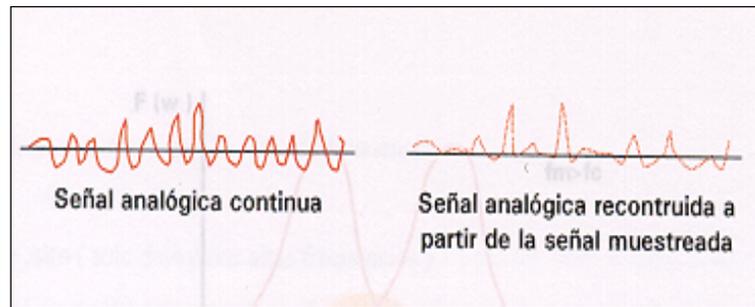


Fig. 4.2. Comparación entre dos señales analógicas una original y otra reconstruida

4.2.3 Fenómeno de Aliasing.

Si una estructura geológica no es suficientemente muestreada se produce el fenómeno de “aliasing”. Este fenómeno será visible en las secciones no migradas y producen, al aplicarse el programa de migración, la creación de eventos falsos y ruido incoherente en las secciones desplegadas.

El efecto de aliasing espacial es similar al de aliasing temporal. En el dominio tiempo para que una componente de frecuencia pueda ser muestreada adecuadamente se deben usar como mínimo dos muestras por período. Toda frecuencia mayor que la inversa de 2 intervalos de muestreo debe ser eliminada por filtros (filtro antialias) para evitar el efecto aliasing. Como se sabe si una componente de frecuencia no es suficientemente muestreada se convertirá en una frecuencia menor, alterando el espectro de la señal de entrada.

Si nos trasladamos al dominio espacio, en vez de períodos y frecuencias se habla de longitudes de onda y números de onda que son sus equivalentes.

Con un tratamiento matemático adecuado del problema se llega a concluir que el intervalo entre grupo de receptores, ΔX , debe cumplir con la siguiente condición para evitar que ocurra el fenómeno de aliasing:

(Ec. 8)

$$\Delta X \leq \frac{V}{4 f_{\text{máx}} \text{sen}\theta}$$

Luego, con el conocimiento de la velocidad V , de la máxima frecuencia a esperar para una reflexión dada, $f_{\text{máx}}$ y del máximo buzamiento a ser esperado en las condiciones más desfavorables, se puede calcular el valor ΔX a ser usado en el prospecto.

Para evitar este fenómeno los equipos de adquisición cuentan con un equipo antialias que no permite el paso de las frecuencias que no satisfagan el teorema de muestreo, generalmente se utiliza un filtro paso bajo cuya frecuencia de corte es $2/3$ frecuencia de Nyquist (Fig. 4.3).

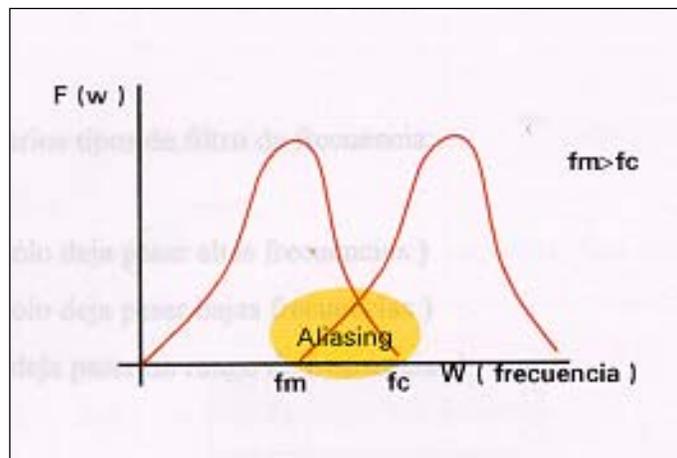


Fig. 4.3. Fenómeno de Aliasing

4.3 Descripción de la secuencia para el procesamiento de datos sísmicos.

El procesamiento de los datos se realizó parcialmente en el barco en tiempo real. Este procesamiento se utilizó solo para determinar la calidad de la señal. Posteriormente se realizó el procesamiento final en las oficinas de la empresa.

A continuación se muestra una breve reseña acerca de la metodología utilizada para el procesamiento de los datos sísmicos de alta resolución.

El programa utilizado para el procesamiento de datos sísmicos correspondientes al área de Delta del Orinoco es el PROMAXTM.

Promax cuenta con tres niveles de organización:

- ◆ Área: Se creó un área con el nombre de "Delta"
- ◆ Línea: Dentro del área Delta 50 líneas determinan el número de parámetros a procesar.
- ◆ Flujo: En este archivo se generaron siete flujos, uno para cada uno de los patrones de adquisición.

Los datos se organizaron de la siguiente manera para realizar el procesamiento:



Fig. 4.4 Flujograma de la secuencia del procesamiento

4.3.1 Secuencia de procesamiento

- ◆ Cambio de formato SEGX a SEG Y
- ◆ Lectura de datos y Demultiplexado
- ◆ Geometría
- ◆ Edición
- ◆ Deconvolución
- ◆ Tipo: Spiking
- ◆ Análisis espectral
- ◆ Ordenamiento por CDP
- ◆ Análisis de velocidades
- ◆ Corrección NMO
- ◆ Filtro de frecuencias
- ◆ Tipo: pasabanda
- ◆ Rango de frecuencias:
- ◆ Ventana de aplicación:
- ◆ Apilamiento
- ◆ Ganancia

4.3.2 Demultiplexado

Los datos grabados en campo están en formato multiplexado, es decir presentan la primera muestra de cada canal una a continuación de la otra; seguidas de las segundas muestras de cada canal una a continuación de la otra y así sucesivamente hasta llegar a las últimas muestras de cada canal. Sin embargo, se requiere que los datos se encuentren en un formato secuencial para ser procesados. En este formato las muestras se separan y se reasignan cronológicamente en sus respectivos canales de grabación. El proceso de colocar los datos multiplexados en una traza secuencial se conoce como demultiplexado .

4.3.2.1 Carga de Datos

Los datos se encontraban en una cinta HR6300 grabados en un formato SEG-X, los cuales fueron pasados a un cartucho de 8 mm por la contratista GEOPROS, Geoprocesos S.A., C.A. con el siguiente título “DOA-35” por ejemplo, en formato SEG-Y.

En definitiva los datos presentan las siguientes características:

- ◆ Tipo: Demultiplexado.
- ◆ Formato: SEG-Y.
- ◆ Muestreo: 0,5 ms.
- ◆ Canales sísmicos: 12 + 4 aux (canales 1, 8, 9,16 son auxiliares).
- ◆ Longitud del registro: 1,7 seg.

4.3.3 Lectura y carga de datos

El cartucho se introdujo en una unidad “exabyte” donde se realizaron las siguientes operaciones:

- ◆ Chequeo del contenido mediante la instrucción dada desde la estación de trabajo.
- ◆ Carga de los datos mediante una cierta instrucción.
- ◆ Cargar los datos en PROMAX mediante el siguiente flujo:

SEGY_IP

SEGY_INPUT (para llevar los datos a la cuenta con la cual se esta trabajando)

Disk Data Output (en este parámetro la data se guarda en un archivo ip)

Disk Data Input (en este parámetro se coloca el archivo ip, el cual es parámetro de entrada para que pueda correr el siguiente paso)

Trace Display (para visualizar los datos brutos adquiridos en campo) (Fig. 4.5)

4.3.4 Asignación de la geometría

Para asignar los datos adquiridos en campo se realizó el siguiente flujo:

GEOM

*2D Marine Geometry Spreadsheet**

Dicho flujo consiste en cargar la base de datos correspondiente al modulo “*2D Marine Geometry Spreadsheet*”.

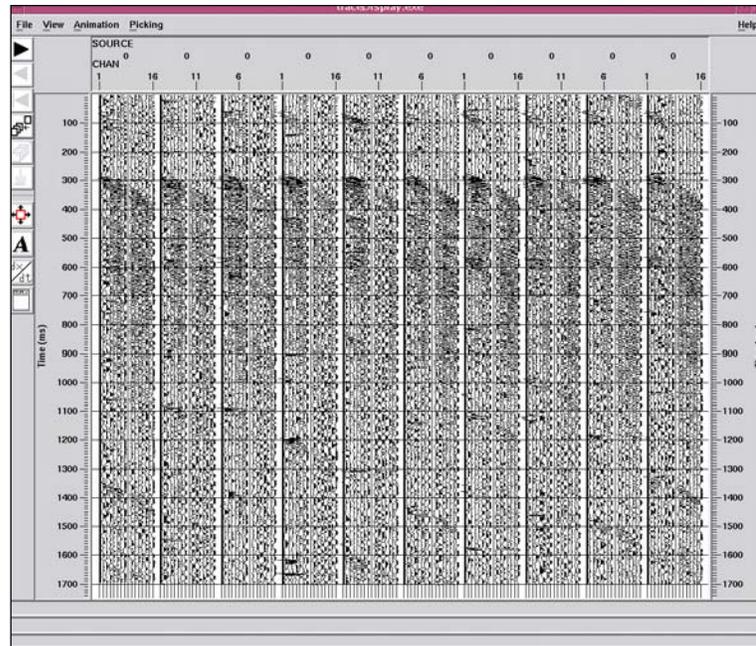


Fig. 4.5. Registros obtenidos de los datos de entrada

4.3.5 Control de calidad de la geometría

Al concluir con la asignación de la geometría se procede a la revisión de la misma, con una serie de gráficas que permiten encontrar algún error que se haya cometido.

Se visualizó la ubicación de los disparos mediante la graficación de las longitudes versus las latitudes, las cuales se comprobó que las mismas están correctas. En este caso se muestra en caso el cual se observó un error en la asignación de un disparo y otro el caso correcto (Fig. 4.6).

Se observó la cobertura de los CDP a lo largo de toda la línea con lo cual se corroboró la existen una de trazas muertas, (Fig. 4.7). Esto se llevó a cabo mediante el uso de la opción database → CDP → FOLD.

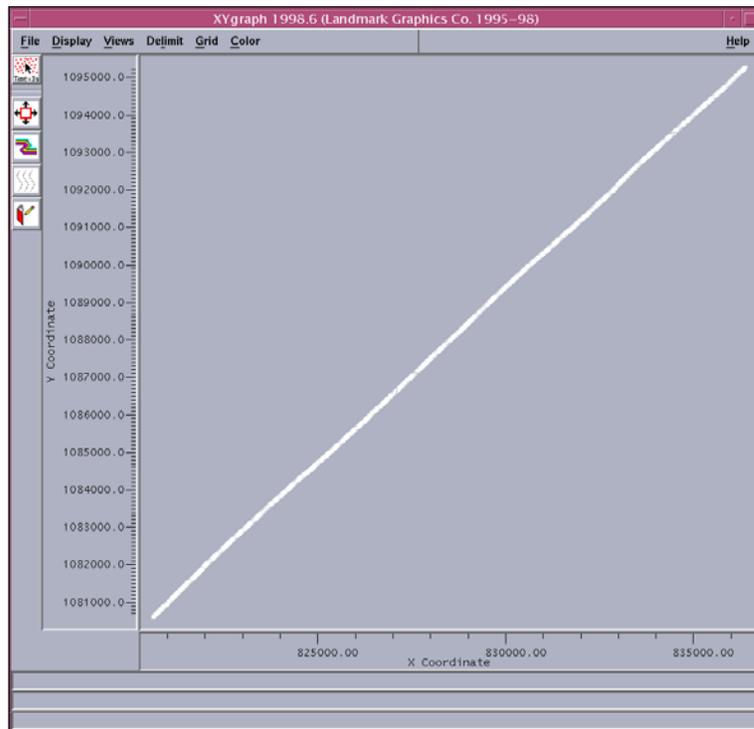


Fig. 4.6. Gráfica en la cual se muestra la graficación de Longitud vs Latitud

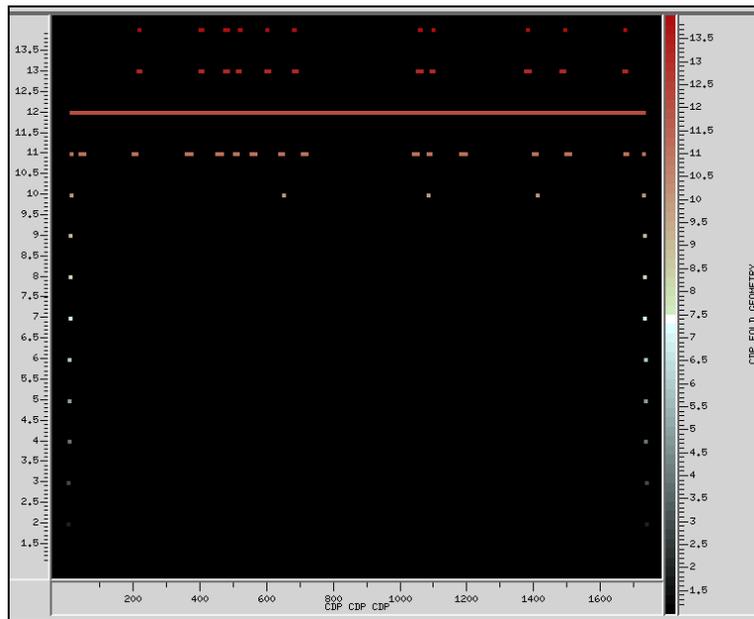


Fig. 4.7. Gráfica de la cobertura que tienen los CDP en la línea que se están cargadas

4.3.6 Asignación de la geometría

Luego se procede a generar el flujo para realizar la asignación de la geometría en los headers de todas las trazas que conforman cada uno de los patrones de adquisición, el cual veremos a continuación:

```
LOAD GEOM
```

```
Disk Data Input
```

```
Trace Header Math
```

```
Inline Geom Header Load
```

```
Disk Data output
```

En este flujo se genero un archivo de salida *aux* el cual se cargó con toda la información de los datos brutos, pero los mismos asignados a la geometría de la línea que se desea procesar (Fig. 4.8).

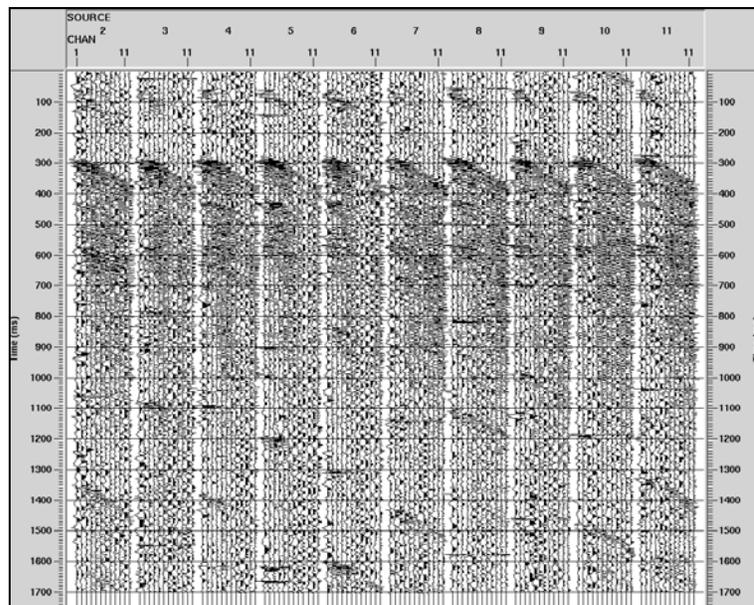


Fig. 4.8. Registro de los cargados con su geometría

4.3.7 Deconvolución

La deconvolución es un proceso matemático que tiene como objetivo atenuar los múltiplos de las ondas reflejadas en cada interfase del subsuelo. Además, permite balancear el espectro de amplitud de la traza sísmica e intenta llevar la forma de la ondícula a un “spike” lo que permite la resolución temporal de los datos sísmicos.

Según el modelo convolucional, la traza sísmica puede modelarse como la superposición de convoluciones sucesivas de la ondícula sísmica con los coeficientes de reflexión en el subsuelo (Yilmaz, 1987). Suposiciones del modelo convolucional:

- ◆ La tierra está hecha de capas horizontales cuya velocidad es constante y la fuente genera ondas planas compresionales que inciden verticalmente sobre éstas.
- ◆ La forma de la ondícula no cambia a medida que la onda se propaga en el subsuelo.
- ◆ La componente de ruido $n(t)$ es cero.
- ◆ La reflectividad es un proceso aleatorio.
- ◆ La ondícula sísmica es conocida o de fase mínima.

El proceso de deconvolución permite mayor precisión en la ubicación de las reflexiones, mediante la compresión de la ondícula sísmica, generando un espectro de frecuencias más uniforme en los datos, al intentar llevar la forma de la ondícula a un “spike” de energía finita y tiempo de duración mínimo (Yilmaz, 1987). También tiene por objeto atenuar múltiples y reverberaciones de las ondas reflejadas en cada interfase del subsuelo.

Para lograr esto el algoritmo comúnmente utilizado es el de Wiener-Levinson, el cual diseña filtros que conviertan la entrada de un sistema lineal a una salida definida por el usuario. La idea básica de este tipo de filtro es lograr que la diferencia entre la salida real y la deseada sea mínima en el sentido cuadrático, y la forma general de la ecuación matricial para un filtro de longitud n es:

$$\begin{pmatrix} r_0 & r_1 & r_2 & \dots & r_{n-1} \\ r_1 & r_0 & r_1 & \dots & r_{n-2} \\ r_2 & r_1 & r_0 & \dots & r_{n-3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n-1} & r_{n-2} & r_{n-3} & \dots & r_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_{n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_0 \\ g_1 \\ g_2 \\ \dots \\ g_{n-1} \end{pmatrix} \quad (\text{Ec.9})$$

donde, r_i = es la autocorrelación de la ondícula de entrada

a_i = es la autocorrelación de los coeficientes del filtro

g_i = es la crosscorrelación de la salida deseada con la ondícula de entrada.

$i = 0, 1, 2, 3, \dots, n-1$

4.3.7.1 Tipos de Deconvolución

4.3.7.1.1 Deconvolución impulsiva (spiking)

Esta deconvolución se basa en convertir cada reflexión primaria en un impulso $\delta(t)$ con una longitud de una muestra de duración y se asume que la señal es de fase mínima. La misma tiende a comprimir la ondícula sísmica alargada por los efectos que encuentra durante su transmisión por la tierra, para convertirla en un pulso o “spike”. Por lo tanto nivela el espectro de amplitud tanto de las componentes de la señal como del ruido sísmico.

Esto se traduce en una disminución de la relación señal/ruido que se soluciona con la aplicación de filtros que eliminen la mayor cantidad de ruido posible. La deconvolución será impulsiva cuando la salida deseada del algoritmo de Wiener-Levinson sea un pulso centrado en cero.

La deconvolución impulsiva es un caso especial de la deconvolución predictiva en la cual $\alpha=1$. Es recomendable aplicar un filtro pasa banda ya que induce ruido de alta frecuencia en los datos.

4.3.7.1.2 Deconvolución predictiva

Este tipo de deconvolución es empleada para reducir las reverberaciones y algunos múltiples de período corto preservando la forma del lóbulo principal de las ondas. Así mismo, se trata del empleo de la información de la primera parte de la traza sísmica, para pronosticar y deconvolucionar la parte posterior de esa traza, para así tratar de preservar la parte principal de la señal reflejada y aplicar la deconvolución a la parte final de esta. Es de hacer notar que este tipo de deconvolución se basa en la suposición de que la serie de reflectividad de la tierra es aleatoria, mientras que los múltiples y reverberaciones no lo son; por lo cual utiliza la autocorrelación de la traza para estudiar la periodicidad de los datos. En este caso, la salida deseada del algoritmo de Wiener-Levinson es una versión avanzada en tiempo de la serie de entrada.

4.3.7.2 Parámetros para la Deconvolución.

Ventana de diseño.

La ventana de diseño en el tiempo en la cual se va a calcular la autocorrelación de las trazas sísmicas para determinar otros parámetros. Generalmente se toma en la parte superior de la sección, ya que es ahí donde la información es más precisa.

Ventana de aplicación.

Es la ventana en tiempo donde se aplica la deconvolución.

Longitud del operador.

Es el intervalo de tiempo que se va a emplear para el cálculo del operador; para este cálculo se seleccionan varios registros a lo largo de toda la línea obteniéndose la autocorrelación de cada traza para analizar la energía reverberante y los posibles múltiples.

En la práctica se toma como longitud del operador el intervalo correspondiente al primer ciclo de la autocorrelación. Se cree que mientras más largo sea el operador su acción será más efectiva pero también el proceso se vuelve más lento. (Yilmaz, 1987).

Distancia predictiva.

La distancia de predicción determina que tanto de la ondícula producida por la fuente (y sus reverberaciones) saldrá de los datos después de la deconvolución. La distancia de predicción de 4 ms es equivalente a tratar de remover la ondícula entera.

Ruido blanco

Es una cantidad de ruido artificial que se agrega a la traza con el fin de evitar posibles inestabilidades al realizar la inversión para calcular el espectro de amplitud del operador de deconvolución. En la práctica, suelen usarse porcentajes de ruido blanco que oscilan entre 0.1 y 1%

En el siguiente flujo el cual fue diseñado para realizar una deconvolución esta organizado de la siguiente manera:

DECON

Disk Data Input

Spike & Noise Burst Edit (Lower)

Spike & Noise Burst Edit (Higher)

Spiking Predictive Decon (Fase Cero)

Spiking Predictive Decon (Predictiva)

Disk Data Output

Trace Display

En este flujo lo que se buscó fue aplicar una deconvolución que fuese capaz de eliminar un spiking generado por la fuente, atenuando el mismo, por lo cual se realizaron dos pruebas con dos módulos de DECON los cuales son:

El primero con fase cero el cual no atenuó del todo el spiking lo que aún se observa la presencia del ruido, ya que se utilizó una distancia del operador de 80 ms, lo que nos hace ver que de aumentar la distancia del operador podíamos correr el riesgo de perder información, ya que estamos trabajando con sísmica de muy alta frecuencia, así mismo no se podían matar trazas ya que eran muy pocas (Fig. 4.9).

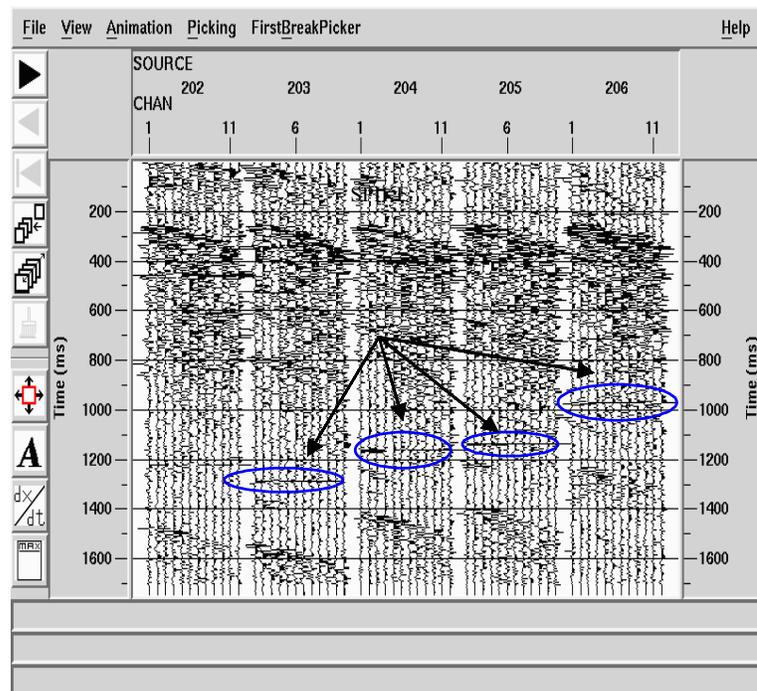


Fig. 4.9. Registro con la aplicación de una deconvolución “spiking”

El segundo caso con una predictiva mejoró en un alto porcentaje ya que se usaron una gran variedad de tamaños y longitudes del operador predictivo, entre los que podemos nombrar 1 ms, 2 ms, 4ms, 6 ms, el cual fue escogido con la misma longitud del operador del caso anterior pero además usa una distancia de predictiva igual a 2ms, lo que nos da una idea de que no se está arriesgando mucha de la información necesaria para el procesamiento de la información, (Fig.

4.10). La misma se aplicó en el CDP para atenuar las reverberaciones especialmente en la parte inferior de los datos sísmicos , así mismo ayudó a quitar parte de la energía de los múltiples.

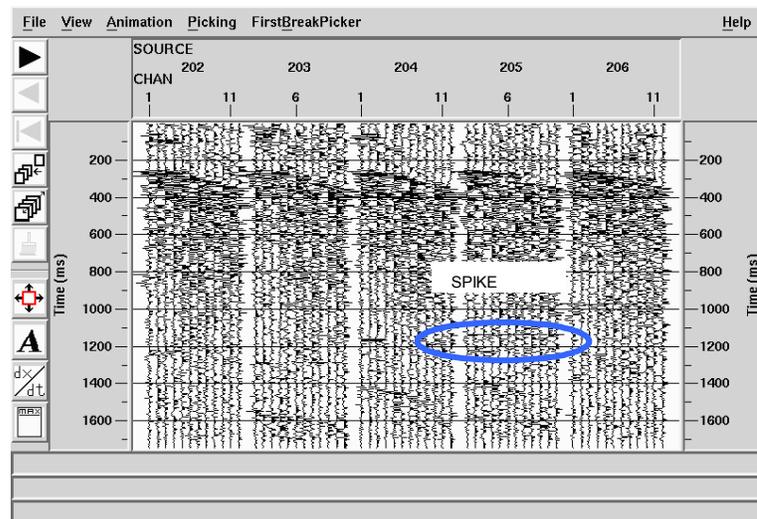


Fig. 4.10. Registro con la aplicación de una deconvolución fase cero.

4.3.7.3 Análisis de Velocidad

Según Yilmaz Ozdogan, 1988, las velocidades que se deducen a partir de los datos adquiridos en este tipo de levantamientos sísmicos son en primer lugar medidas indirectas de la velocidad y en segundo lugar no proporcionan información acerca de la litología del subsuelo en la cual nos encontramos trabajando.

En la sísmica se puede encontrar una variada gama de velocidades tales como:

Velocidad promedio

Velocidad intervalica

Vrms (es un promedio pesado de las velocidades)

Velocidad instantánea

Velocidad de fase

Velocidad de grupo

Velocidad NMO

Velocidad de apilado

Velocidad de migración

Velocidad aparente

En nuestro caso el procesamiento de esta área vamos a utilizar la velocidad del “normal moveout” las cuales están directamente relacionadas con la velocidad de apilamiento así como la velocidad rms.

El siguiente flujo diseñado es el que se encargara de realizar el análisis de velocidad el cual esta conformado de la siguiente manera:

VELANAL

Supergather Formation

Bandpass Filter

Automatic Gain Control

Velocity Analisis Prcompute

Disk Data Output

Disk Data Input

Velocity Analisis (stakvels1)

En el “Supergather Formation” se establece cada cuanto y entre cuantos CDP’s se va a realizar el análisis de velocidad el cual se determinamos mediante la cobertura de los mismos. El rango estará entre los CDP que posean mayor cobertura, así mismo de cuanto en cuanto se incrementan y la cantidad que se combinan.

Así mismo se le aplicó un filtro en fase cero dominado por la frecuencia, ya que se desea observar son las frecuencias mas altas, el mismo posee una banda que va de 5-10-60-70 Hz. lo que corrobora la información antes mencionada. Se le aplicó una ganancia con una longitud del operador de 500 ms para así resaltar los reflectores de interés.

Luego se realizan los piques de las velocidades los cuales se almacenan en una base de datos, en este caso stackvels1, para lo cual se realizo un análisis de semblanza o espectro de velocidades cada 500 metros que garantizan el mejor apilamiento, con tan solo seguir los análisis de semblanzas así como las máximas energías reflejadas en el headers (Fig. 4.11).

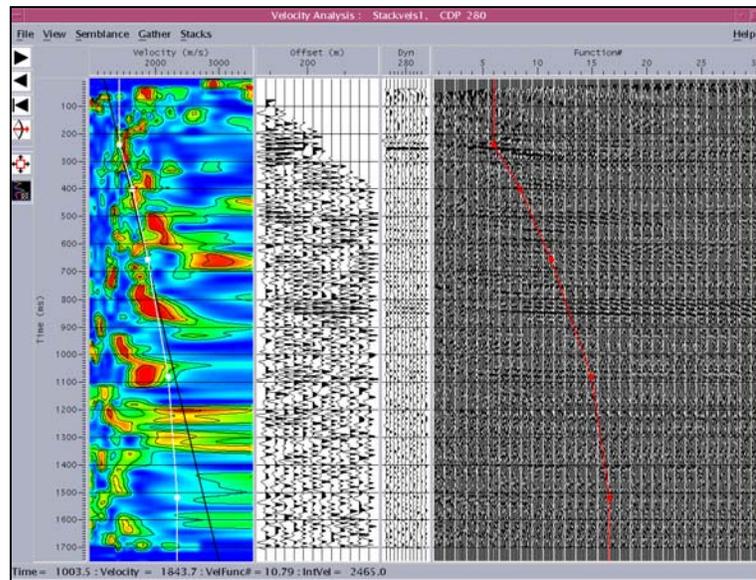


Fig. 4.11. Aplicación de un análisis de velocidad a la LINEA 35 con la aplicación activa de la corrección NMO

Para cada uno de los patrones de adquisición, el análisis de velocidad se realizó cada 80 CDP, es decir cada 800 m con lo cual se definió un rango de velocidades que oscila alrededor de 1490-2000 m/s.

Asimismo, es de hacer notar que la información se observó hasta aproximadamente 1100 ms. De allí en adelante la información que se muestra es muy pobre, es decir presenta escasos reflectores.

4.3.8 Corrección “Normal Moveout (NMO)”

En la figura 4.12 se muestra un modelo de una capa plana, homogénea e isotrópita, en el cual el tiempo de viaje correspondiente a la trayectoria que sigue el rayo sísmico desde que es emitido por la fuente hasta que es captado por el receptor es $t(x)$. Utilizando el teorema de Pitágoras se obtiene que la ecuación del tiempo de viaje en función del offset sea:

$$T_2(x) = t_2(x) + x^2 / V^2 \quad (\text{Ec. 10})$$

En donde x es el “offset” (distancia fuente-receptor), V es la velocidad del medio que se encuentra por encima del reflector, $t(0)$ es el tiempo doble de viaje a lo largo de la distancia MD (tiempo a “offset” cero). En dicho caso el CDP y CMP coinciden en el mismo punto.

De lo anterior se puede concluir que la curva de tiempo doble de viaje como función del “offset” puede aproximarse a una hipérbola.

Se puede definir el NMO como la diferencia de tiempo entre el tiempo de viaje entre el tiempo de viaje correspondiente a un “offset” determinado y tiempo de viaje a cero “offset”. La velocidad con la cual se corrige el NMO es la denominada velocidad NMO.

Para un modelo de capas planas la $V_{nmo} = V$ medio. La corrección NMO está dada por la diferencia de $t(x)$ con $t(0)$:

$$NMO = t(x) - t(0) = t(0) \left\{ 1 + (x / V_{nmo} \times t(0))^2 \right\}^{1/2-1} \quad (\text{Ec. 11})$$

Durante el análisis de velocidad se tomo una opción que permite observar la aplicación de la corrección NORMAL ,MOVEOUT (NMO) en los CDP a partir de las velocidades seleccionadas con la finalidad de evitar la selección de las velocidades que produzcan malas correcciones, lo que induce a un mal apilamiento.

4.3.9 Apilamiento Bruto

Es el proceso mediante el cual se suman las trazas pertenecientes a un punto de reflexión común en profundidad CDP o a un punto medio de reflexión común CMP para generar una sola traza. Al graficar todas las trazas que resultan en este proceso se obtienen una sección sísmica apilada. El apilamiento atenúa el ruido presente en los datos sísmicos produciendo un mejoramiento en la relación señal/ruido

Se diseñó un flujo para la aplicación del apilamiento, conformado de la siguiente anera:

STACK

Disk Data Input (sort 2 pred decon)

Normal Moveout Correction (stackvels1)

CDP/Esemble Stack

Disk Data Output (stack2 pred)

Add Flow Comment

Disk Data Input (Stack2)

F-X Decon

Bandpass Filter

Trace Display (visualizar los datos apilados)

Add Flow Comment

Disk Data Input

Interactive Spectral Analysis

El apilamiento de los datos corregidos por NMO se realizó por punto de reflexión común en profundidad “CDP” mediante el modulo “*CDP/Esemble Stack*” el tipo de apilado seleccionado fue el “*Mean Stack*”.

Luego de esto, el archivo que se cargó con toda esta información se le aplicó un filtro “*F-X Decon*” el cual oscila entre 10-230 Hz. Posteriormente se aplicó un “*Bandpass Filter*”, el cual trabaja con una banda de frecuencias que va 8-12-300-350 con lo se delimitaba en su mayoría la frecuencia deseada.

Es de hacer notar que se realizó una prueba con “*F-X Decon*” permitiendo el paso de hasta 500 Hz lo que permitirá la entrada de mucho ruido, mientras que cuando se utilizó una frecuencia de 230 Hz mejoró la calidad de la data sin perder información (Fig.4.12).

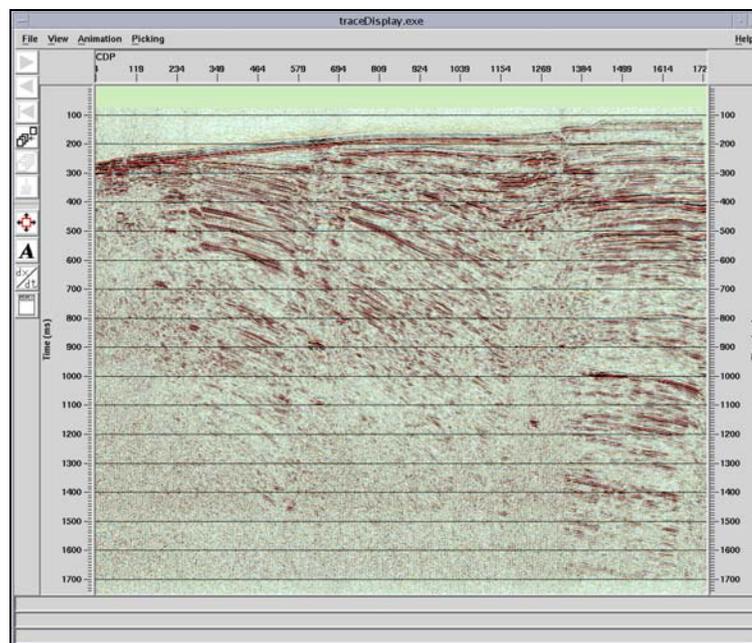


Fig. 4.12. Sección apilada

4.3.9.1 Deconvolución F-X

La deconvolución F-X refuerza la señal y disminuye el ruido aleatorio. Este proceso aplica una Transformada de Fourier a cada traza de la sección apilada. Se aplica un filtro de predicción unitario complejo, de Wiener, en el dominio de la distancia para cada frecuencia en un rango específico, y luego se realiza una transformada inversa sobre cada frecuencia resultante.

Los datos transformados de tiempo y distancia a frecuencia y distancia tienen muestras con componentes reales e imaginarios. Los eventos con buzamientos similares se presentan como una señal sinusoidalmente compleja a lo largo de un corte en frecuencia dado. Esta forma sinusoidal puede ser descrita como $\cos wt + i sen wt$, por lo que la señal es predecible. El proceso de deconvolución F-X consiste en la aplicación de un filtro complejo de predicción, para predecir la señal a partir de una traza, a lo largo de un corte en frecuencia. Clasifica como ruido toda ondícula real diferente a la predicha, y la elimina.

Para reducir el error de predicción el filtro se aplica sobre las trazas en direcciones opuestas y las predicciones resultantes son promediadas.

Luego se utilizó la aplicación de la deconvolución F-X, en los registros para ver la diferencia entre este registro y el que no posee la deconvolución. Los parámetros necesarios para este tipo de deconvolución son los siguientes:

- ◆ Longitud de la ventana: 500 ms.
- ◆ Ventana de solapamiento: 200 ms.
- ◆ Frecuencia más baja a transformar: 10 Hz.
- ◆ Frecuencia más alta a transformar: 750 Hz (Fig.38).

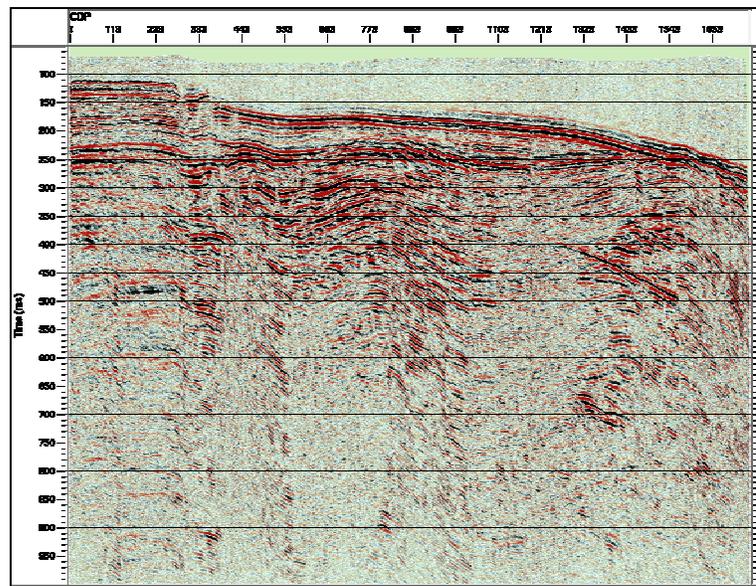


Fig. 4.13 Sección apilada con deconvolución F-X

Para eliminar algunas clases de ruido existe la posibilidad de aplicar filtros de frecuencias, tales como los pasa-bajos, pasa-altos o pasabanda; sin embargo estos filtros necesariamente alteran la señal de interés, de igual forma alteran la forma y la fase de la ondícula (Hernández, 2000).

Para evitar este inconveniente, se realizan pruebas de filtros durante las cuales se toman algunos registros a lo largo de cada línea y se aplican diferentes filtros a cada uno con el fin de distinguir en que rango de frecuencias se observa señal sísmica y bajo que rango se atenúa el ruido. Los filtros aplicados pueden ser variantes o no en el tiempo y también pueden variar espacialmente.

Las pruebas de filtros se realizaron sobre los datos apilados y con deconvolución FX. Se aplicaron cinco filtros pasabanda (o trapezoidal). Cada prueba pudo permitía pasar solo una banda de frecuencias determinada. Estos rangos se determinan con las cuatro frecuencias que delimitan el trapecio de la banda deseada:

- ◆ Pasabanda 1: (8-12.5-200-280) Hz.
- ◆ Pasabanda 2: (8-12.5-180-230) Hz.
- ◆ Pasabanda 3: (8-12.5-150-180) Hz.
- ◆ Pasabanda 5: (8-12.5-110-140) Hz.
- ◆ Pasabanda 6: (8-12.5-60-80) Hz.

En la Fig 4.14 es clara la diferencia entre un filtro y otro. En función de estas pruebas se seleccionó el filtro con banda de frecuencias delimitada por (8-12.5-180-230) Hz. Con este rango de frecuencias se observó mejor continuidad de los reflectores y suficiente definición de los eventos, incluso de los de muy alta resolución. Estas características se muestran claramente en la Fig. 40. Este filtro se aplicó a todas las secciones apiladas. Se prefirió evitar alterar el rango de frecuencias en la información sísmica antes de ser apilada, para preservar en lo posible las altas frecuencias y obtener mayor resolución.

Así mismo, ninguna de las secciones se le aplicó ganancia (AGC) en el apilamiento, ya que el principal objetivo era observar las máximas amplitudes y de aplicarles AGC, se correría el riesgo de perder las amplitudes que sufren las reflexiones primarias, debido a la divergencia esférica entre otros, los cuales son compensados por la ganancia (Fig. 4.15).

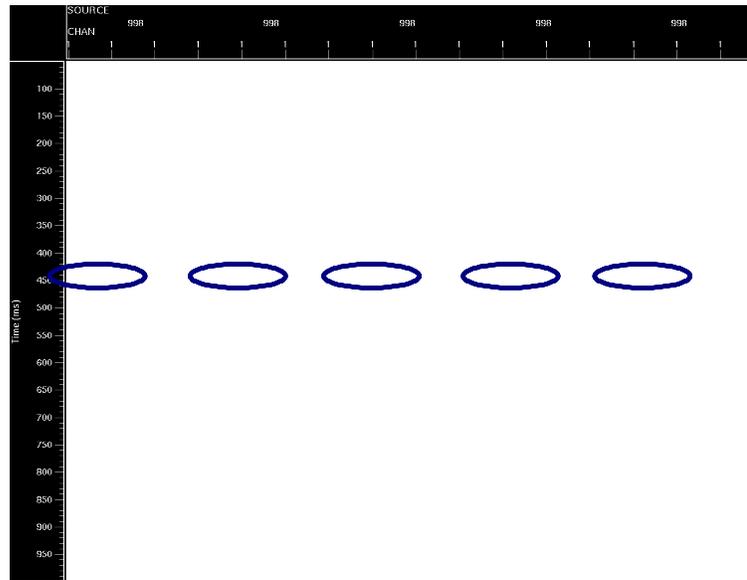


Fig. 4.14 Prueba de filtros pasabanda

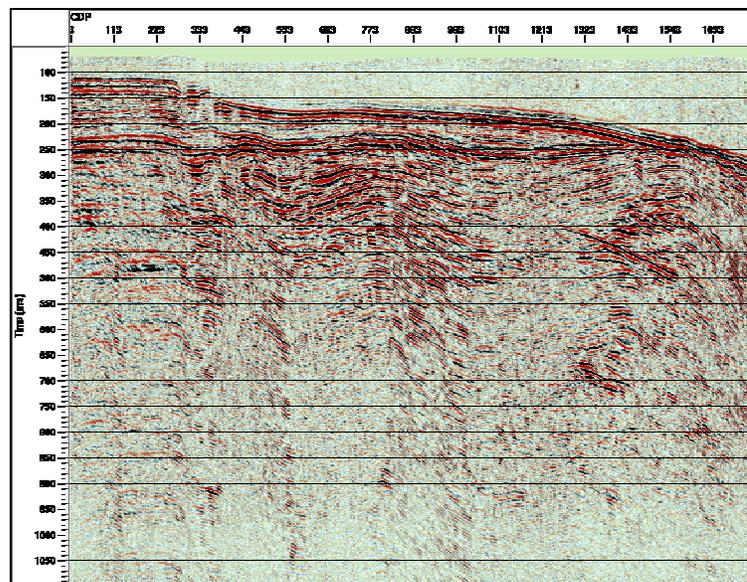


Fig. 4.15 Sección con deconvolución FX y filtro pasabanda (8-12.5-180-230) Hz después del apilamiento. Como se puede observar la calidad de la estructura es muy buena, en esta zona pero existen zonas donde la calidad de la misma es diferente y es posible esto debido a la presencia de posibles enmascaramientos del gas.

Por último se diseñó un flujo de salida el cual se muestra de la siguiente manera:

SEGY_OUT

Disk Data Input

Segy-Output

Este flujo se diseñó con la finalidad de generar los archivos SEG_Y que guardaria los apilamientos de cada una de las líneas con su respectiva información para que así se pueda realizar la interpretación de la data sísmica.

5. INTERPRETACIÓN SÍSMICA

Luego de realizar los procesos anteriores se llega a la sección de interpretación de los diferentes registros sísmicos. Se determinarán la batimetría de la zona, los espesores de suelos blandos, la tendencia estructural de la zona, las posibles zonas gasíferas, mediante el uso de los diferentes registros sísmicos.

5.1 Interpretación Analógica

Primeramente se llevo a cabo mediante la interpretación de los registros del ecosonda, el cual nos permitió obtener la batimetría y morfología de la zona. De igual forma, se interpretaron los registros de los equipos penetrador de fango, sparker y sonar de barrido lateral, los cuales permitieron determinar los espesores de los sedimentos someros.

A continuación se presenta la metodología utilizada, así como los mapas obtenidos en esta primera etapa de la interpretación.

5.1.1 Batimetría

Debido a la topografía irregular del fondo marino y al tamaño de la malla sísmica recorrida, no es posible realizar un mapa batimétrico que permita describir con precisión las profundidades de agua de acuerdo con las variaciones del fondo marino en el área del Delta del Orinoco.

Por tal motivo, se elaboró un mapa que muestra la tendencia regional y las singularidades más importantes de la zona. Las variaciones existentes en el fondo marino se pueden asociar directamente con la naturaleza del mismo, lo que nos indica que este mapa debe trabajarse junto con un mapa lito-morfológico del fondo marino (Fig. 5.2).

Cuando se habla de batimetría se debe tener en cuenta el tipo de registros de los cuales se obtienen los valores para generar los mapas. Por tal motivo, se utilizaron los registros del equipo eco sonda ya que proporciona frecuencias muy altas (28 kHz), lo que permite definir la batimetría y la morfología del fondo marino con precisión.

Los registros del ecosonda poseen un eje horizontal el cual muestra divisiones cada diez puntos de tiro y están etiquetados cada cien divisiones. Las lecturas batimétricas se indican en cada división del eje vertical del registro, como un valor escalado de la profundidad del fondo

marino en metros, corregida de acuerdo con la profundidad de la fuente por debajo del nivel promedio del mar (4,63 m).

A continuación se muestra un registro del ecosonda, donde se resaltan las características antes mencionadas (Fig. 5.1).

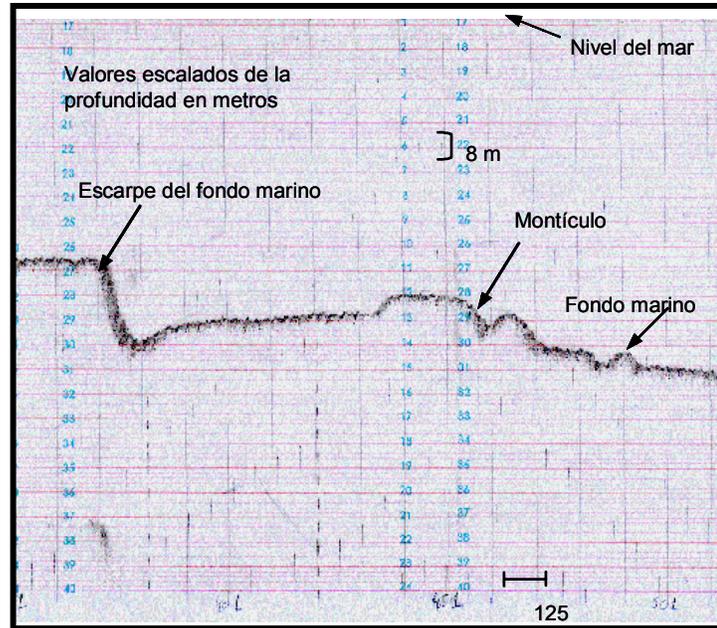


Fig. 5.1 Registro del ecosonda de la línea 137 que muestra un escarpe del fondo marino y otras irregularidades como montículos asociados a dicho escarpe.

Todos estos valores que se presentan en el registro están escalados con respecto a la profundidad del agua. Al multiplicar estos valores por 8, se obtienen los valores reales de profundidad, los cuales se asignaron cada veinte puntos de tiro en todas las líneas sísmicas adquiridas.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el área presenta profundidades de agua que varían desde aproximadamente 80 m en la zona oeste, y profundiza suavemente con una pendiente de 1% hasta un promedio de 290 m de profundidad de agua al este de la zona estudiada (Fig.43).

Estas profundidades disminuyen de una manera uniforme y solamente se interrumpen por algunos altos (montículos) y depresiones (escarpes), los cuales se evidencian en los registros del ecosonda, permitiendo una mejor visualización del fondo marino.

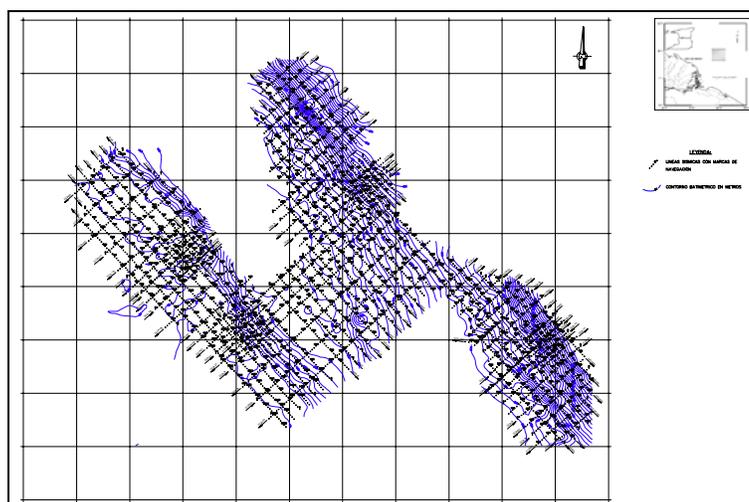


Fig. 5.2 Mapa batimétrico

Para describir con mayor detalle la batimetría de la zona se dividió el área en dos bloques denominados A y B:

El bloque A presenta una tendencia suroeste-noreste, observándose una profundidad promedio de 80 m en la zona suroeste. Esta profundidad es la más somera de toda el área de estudio, y profundiza hacia la parte más noreste hasta una profundidad promedio de 220 m, con una pendiente de 2% (Fig. 5.3).

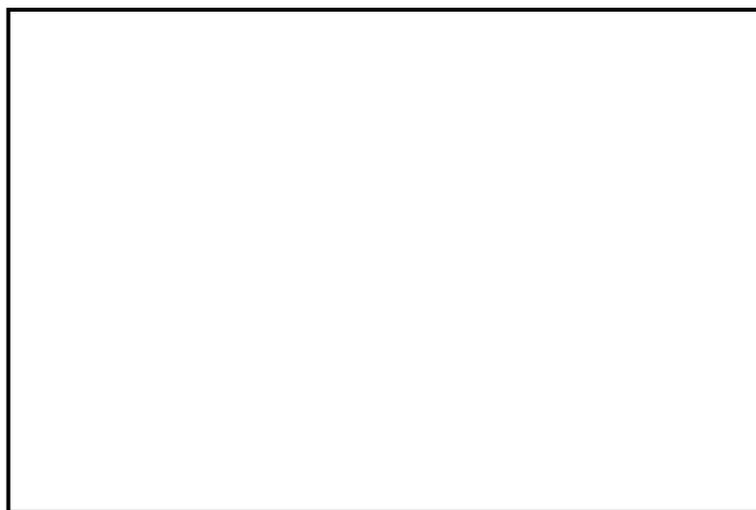


Fig. 5.3 Área del Delta del Orinoco con la división realizada en el estudio batimétrico (BLOQUE A)

El bloque B presenta una tendencia similar a la del bloque A (suroeste-noreste), con una profundidad promedio de 200 m en el suroeste y alcanzando valores de 280 m de profundidad hacia el noreste. Esto evidencia que éste bloque se ubica en la parte más profunda del área

estudiada. La pendiente del fondo marino de este bloque es de aproximadamente 1,25% (Fig. 5.4).



Fig.5.4. Area del Delta del Orinoco con la división realizada en el estudio batimétrico (BLOQUE B)

La morfología en la zona ubicada al oeste del levantamiento se presenta bastante plana, pero luego se evidencia un declive del fondo marino. En la zona central del levantamiento se observa otro cambio en la morfología del fondo marino, pero esta vez mucho mayor que el ligero desnivel que se observó anteriormente, pasando a una zona de profundidad constante con una pendiente de 1% hasta la zona ubicada mas al este donde se observó un fuerte cambio de pendiente de 2% debido a que nos encontramos en el comienzo del talud y en la culminación del delta, (Fig. 5.5).

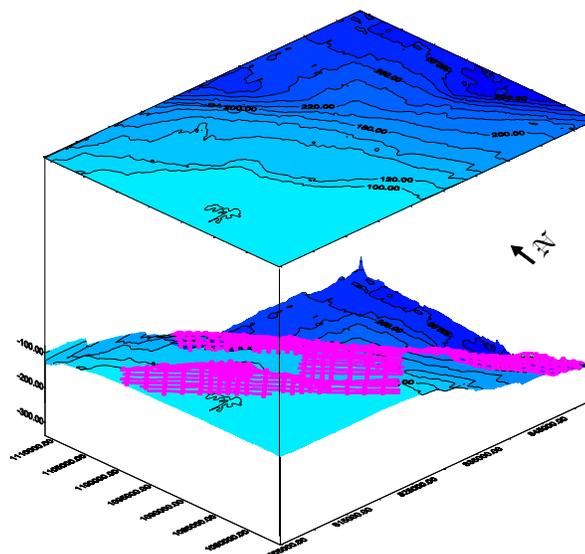


Fig. 5.5 Mapa morfológico del fondo marino

Morfológicamente, se observan escarpes importantes que afectan la superficie del fondo marino y atraviesan el área en dirección noroeste–sureste. Estos escarpes están asociados con la presencia de fallas activas en la zona, de las cuales se dará una información más clara con la interpretación de los registros del penetrador de fango (Fig. 5.6).

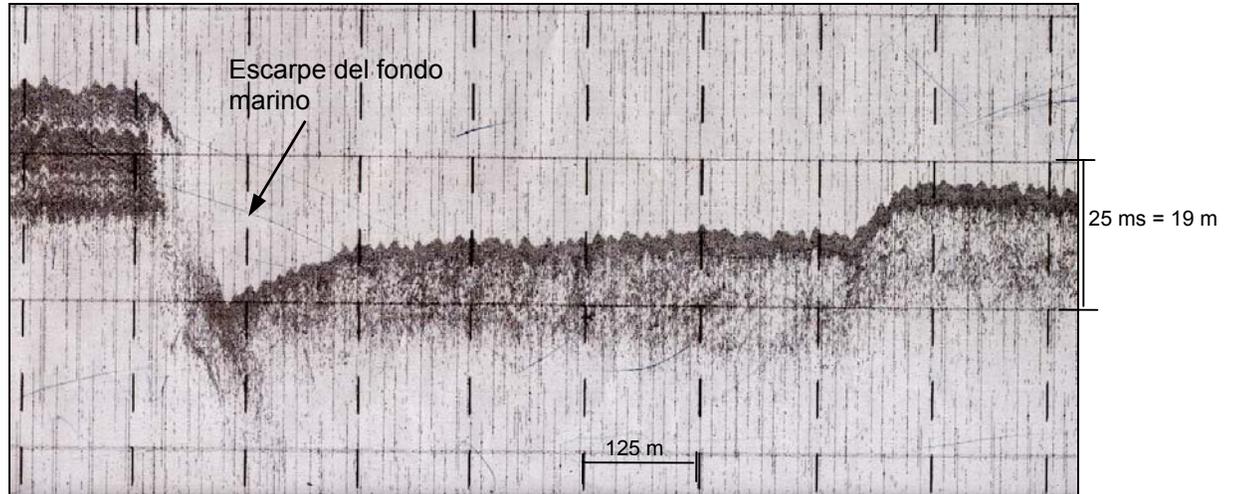


Fig. 5.6. Registro del penetrador de fango que muestra un escarpe del fondo marino y un montículo.

También se utilizaron los registros del sonar de barrido lateral para verificar la ausencia de obras humanas en el fondo marino y realizar un seguimiento de la tendencia de los escapes, así como la de corroborar de una manera exacta la morfología del fondo marino (Fig. 5.7).

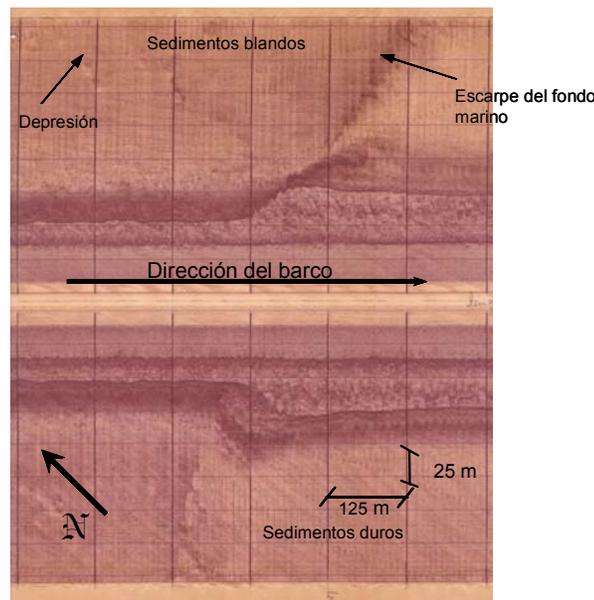


Fig. 5.7 Registro del sonar de barrido lateral que muestra depresiones y montículos en una imagen bidimensional del fondo marino. La diferencia de colores entre el lado izquierdo y el derecho de la imagen, delimita dos tipos de sedimentos debido a un escarpe del fondo marino

Es conveniente destacar además la presencia de anomalías de gas en la columna de agua en algunos sectores del area de estudio (Fig. 5.8).

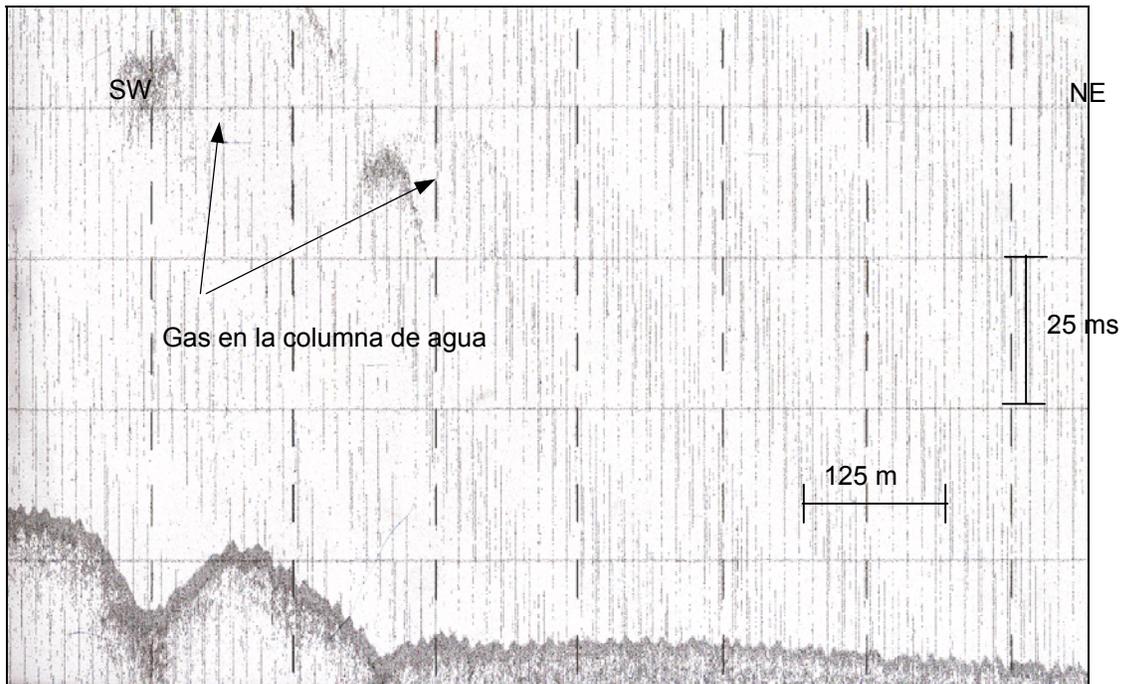


Fig. 5.8. Registro donde se muestra el gas en la columna de agua

Los resultados de este mapa batimétrico se compararon con los obtenidos en un estudio realizado por McClelland, 1978 y Fugro, 2001 en el área del Delta del Orinoco, se observó que puede realizarse la integración de la data de ambos levantamientos, ya que la comparación de ambos mapas batimétricos dio como resultado que la interpolación realizada en la zona de estudio coincide con la información regional. Esto indica que la integración de los datos obtenidos es valedera y permite un sistema de control de calidad de ambos mapas.

5.1.2 Espesores de suelos blandos

La distribución de los sedimentos del fondo marino en el área del Delta del Orinoco se estudió mediante los registros del penetrador de fango, debido a que no se contó con muestras de sedimentos del fondo marino en el área de estudio (Fig.5.9).

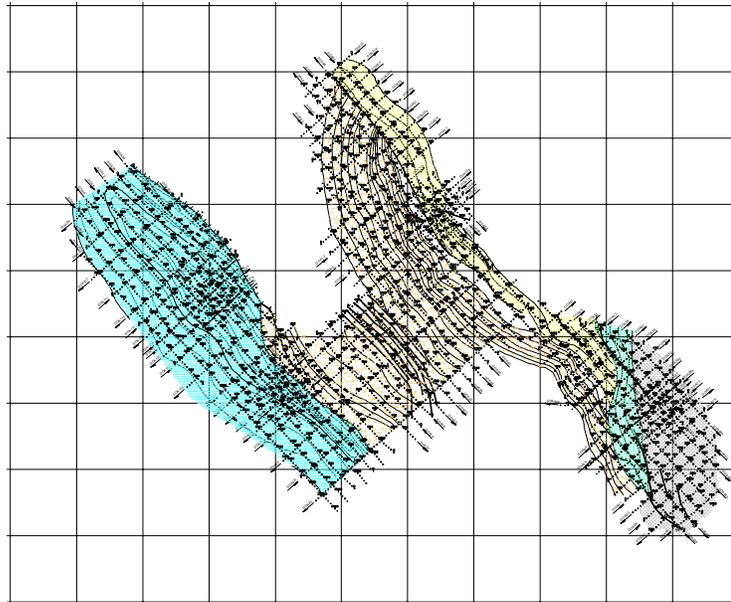


Fig. 5.9. Mapa de espesores de sedimentos

Con este equipo se obtiene una definición superior a 1 m en los sedimentos blandos superficiales existentes en el fondo marino, mientras que en sedimentos compactados toda la energía es reflejada por el fondo marino. Si se logra penetración en los sedimentos, en estos registros es posible observar fallas activas, paleocanales, y burbujas de gas en la columna de agua.

La definición aplicada a dichos sedimentos superficiales se refiere exclusivamente a aquellos suelos acústicamente transparentes a las frecuencias de este equipo (3,5 kHz) y, que por lo general, corresponden a materiales sueltos de consistencia blanda a medianamente densa. En consecuencia, la energía acústica transmitida hacia el fondo y subfondo marino se refleja mayormente en un estrato más duro subyacente a dichos sedimentos superficiales.

El análisis del carácter acústico de los sedimentos someros permitió definir cuatro zonas A, B, C y D, las cuales corresponden a diferentes consistencias del suelo (Fig. 5.9)

La zona A, ubicada en el lado oeste del área, se extiende con un espesor que varía entre los 20 m en el extremo oeste y tiene su límite a nivel de la zona de escarpe, que se define en el mapa batimétrico, con un espesor de 5 m. En la figura 5.10 se muestra un registro correspondiente a esta unidad de sedimentos.

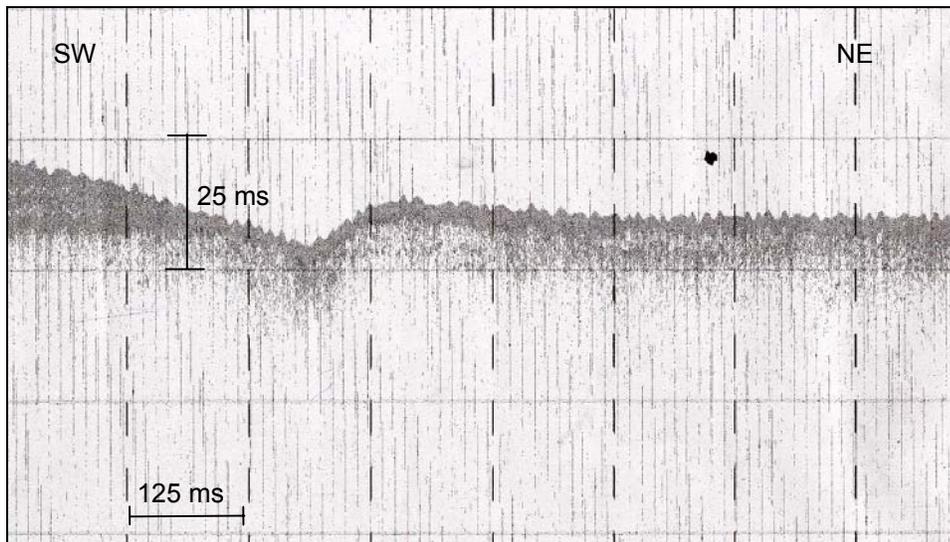


Fig. 5.10 Registro del penetrador de fango que muestra los sedimentos de la unidad A

La zona B, se encuentra en el centro del área de estudio. Está limitada por los dos escarpes regionales y presenta sedimentos estratificados levemente plegados por fuerzas compresivas o por las progadaciones sufridas en el área. El espesor de estos sedimentos, en la parte oeste de la zona, donde se trunca con el escarpe es de 60 m y disminuyen hasta la isópaca cero, la cual muestra una dirección noroeste-sureste, paralela a la dirección del escarpe ubicado en la parte este de la zona (Fig. 5.11 y 5.12).

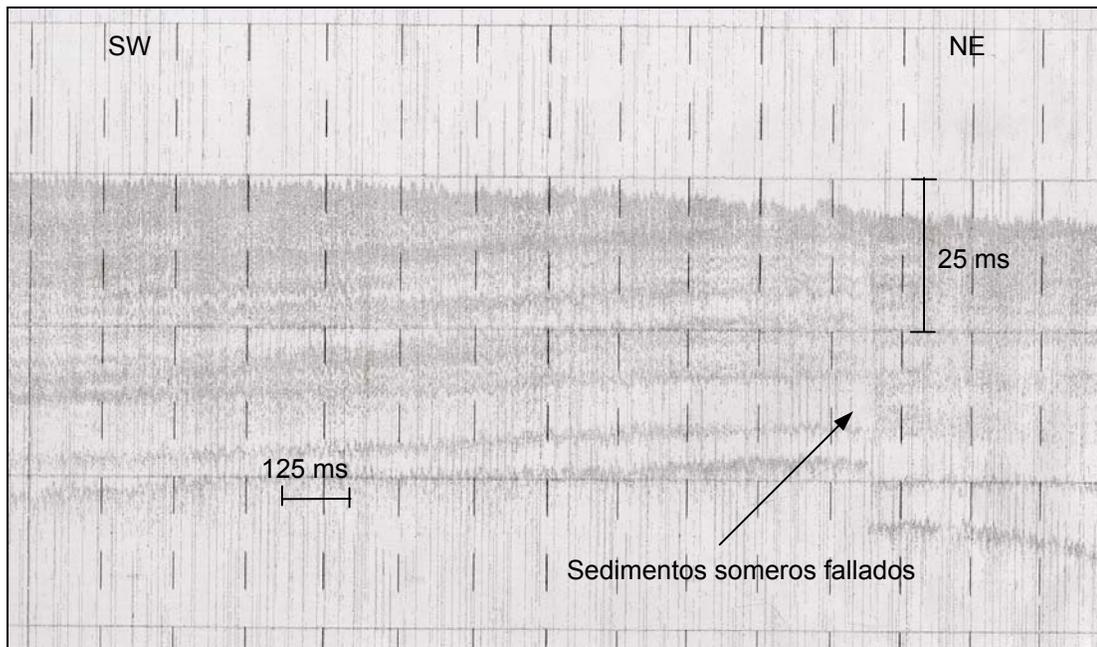


Fig. 5.11 Registro del penetrador de fango que muestra la parte oeste de la unidad B, cercana al escarpe.

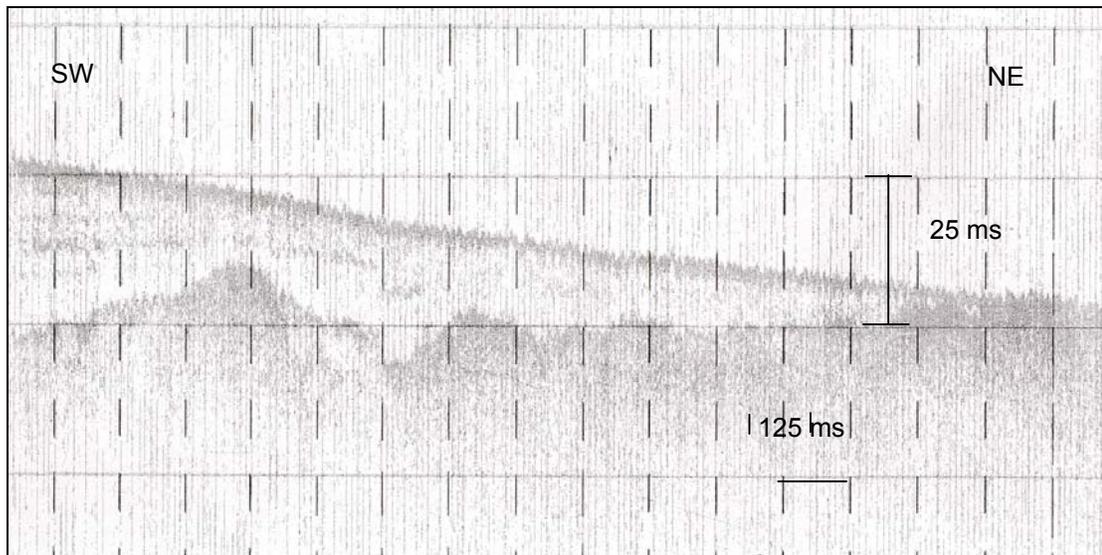


Fig. 5.12 Registro del penetrador de fango que muestra el acúñamiento de la unidad B hacia el noreste. La zona C, ubicada al este del área de estudio, se caracteriza por sedimentos superficiales producidos por deslizamientos desde la zona de escarpe y por la deposición por rebose sobre la cresta del talud. Estos sedimentos se acúan hacia el oeste contra el escarpe definido en el mapa batimétrico. El espesor mínimo de la cuña es de 10 m y se pudo medir un espesor máximo de 25 m (Fig. 5.13). Como se observa en el registro la parte sureste es afectada por deslizamientos que hacen discontinuo la presencia de dichos sedimentos.

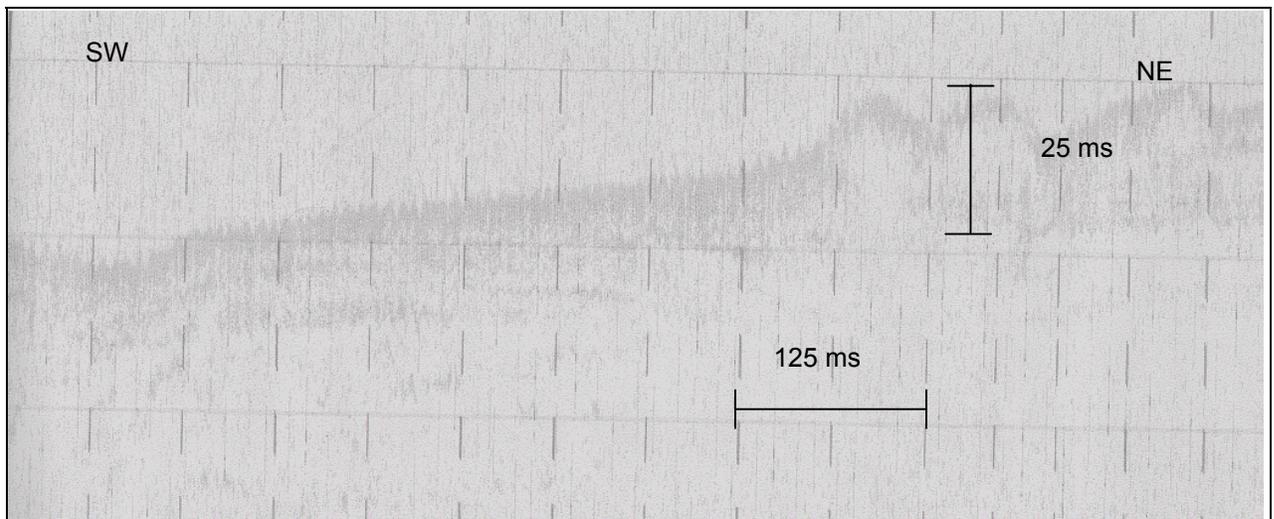


Fig. 5.13 Registro del penetrador de fango que muestra la unidad C

La zona D, ubicada en la parte sureste del área de estudio, se observa al principio del talud donde los sedimentos alcanzan un espesor aproximado de 40 m. Debido a que ésta es la zona de mayor profundidad del área de estudio y se observa el brusco cambio de pendiente (Fig. 5.14).

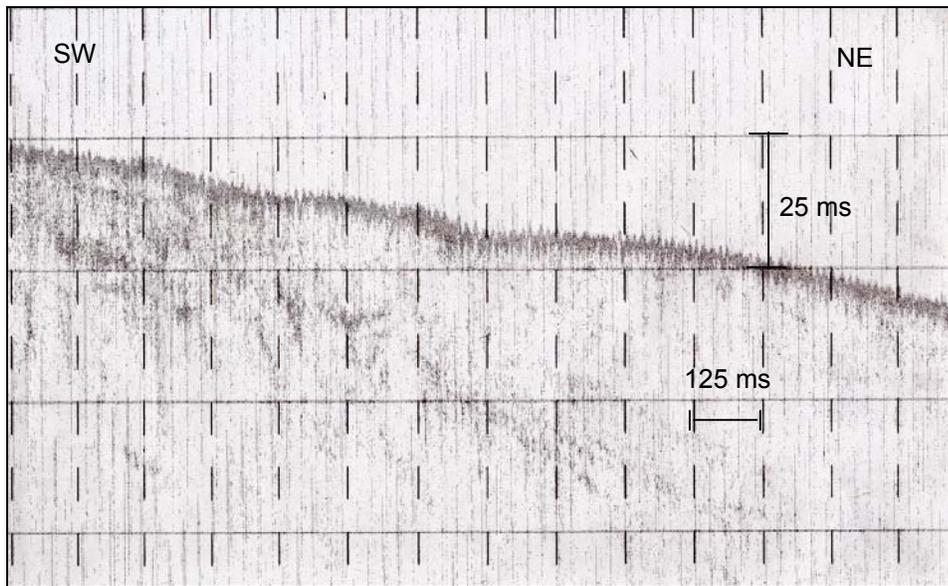


Fig. 5.14 Los sedimentos de la unidad D alcanzan un espesor de 40 m

Por último, es de hacer notar la presencia de una cuña de sedimentos la cual se manifiesta en esta zona con un espesor máximo de 10 m, que no se pudo delimitar por la ausencia de información.

5.2 Interpretación Digital

5.2.1 Introducción

La interpretación sísmica de datos 2D es la interpretación más convencional, ya que el volumen de datos que se maneja es mucho menor que en caso de un 3D, lo que disminuye las posibilidades de visualización de las estructuras debido a que la resolución es mucho menor. Es decir, esta última etapa tiene como objetivo principal dar un significado geológico a toda esta información, para así ser capaz de definir el marco estructural y estratigráfico de la zona en el caso de existir perforaciones, y definir posibles bolsones de gas.

La interpretación se realizó en una sección sísmica 2D del Delta del Orinoco específicamente entre las líneas (2-38) y las líneas (21-43 y 99-139) con un área aproximada de 250 Km² (Fig. 5.15).

Fig. 5.15 Sección sísmica 2D la cual fue utilizada para la interpretación sísmico estructural

5.2.2 Metodología detallada y resultados de la interpretación estructural

Con la finalidad de definir el marco estructural del área Delta del Orinoco, se realizó la interpretación 2D de 3 reflectores sísmicos denominados horizonte 1, horizonte 0,5 y horizonte 2, correspondientes al fondo marino, la cuña más resaltante de la zona y el horizonte mas profundo.

5.2.2.1 Revisión de la información y carga de datos

Se procedió a verificar que los datos tales como las coordenadas, disparos, etc., estuviesen correctamente cargados. En la figura 56 se muestra el mapa base utilizado en la interpretación del proyecto Delta del Orinoco 2D.

5.2.2.2 Interpretación de Horizontes

Los cortes de los horizontes se realizó con la aplicación Seiswork 2D de LANDMARK, en la opción *autodip* la cual los lleva automáticamente por la amplitud indicada para cada uno. Esto se aplicó en las zonas donde el horizonte presenta una buena continuidad, en caso contrario y en las cercanas a las fallas, se uso la opción *mode point*.

La interpretación se realizó en todas las líneas en las direcciones *inline* y *crossline* respectivamente (Fig. 5.16).

- ◆ Horizonte 1: mínimo
- ◆ Horizonte 0.5: mínimo
- ◆ Horizonte 2: mínimo

El horizonte 1, el más superficial, se identificó en toda el área ya que es el del fondo marino y cuyas profundidades oscilan entre 100 y 120 ms en tiempo doble Fig. 5.16.

El horizonte 0,5 se identificó en gran parte del área, ya que seguramente este reflector este asociado a una antigua superficie de erosión o no sedimentación, producto de las variaciones del nivel del mar ocurridas en esa época. Las profundidades de este horizonte son muy variantes, ya que puede ir de 500 ms hasta 100 ms en la zona más sureste ya que este horizonte no sigue el acuñaamiento más regional existente en el área (Fig. 5.17).

El horizonte 2, se identificó en toda el área y se puede considerar el más profundo. Tiene una profundidad promedio de 600 ms en tiempo doble y este horizonte fue afectado el acuñaamiento que esta sufriendo el área (Fig. 5.18).

En las zonas donde no se pudo mantener el seguimiento del horizonte como consecuencia de la presencia de gas así como de la resolución de la sísmica o a los contactos litológicos presentes se hace necesaria la interpretación de una inline.

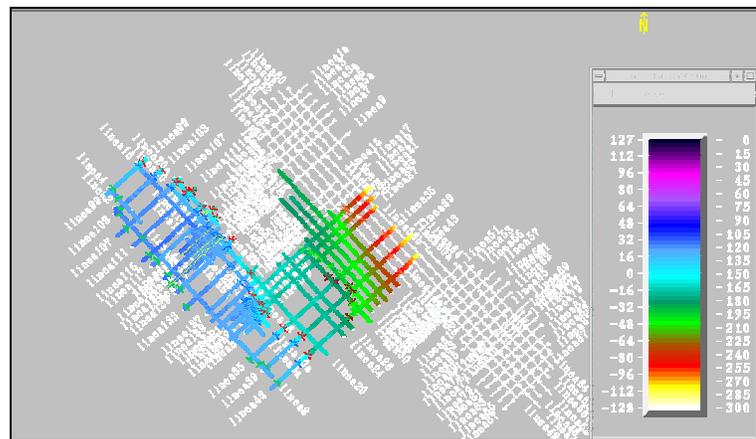


Fig. 5.16 Se muestra la interpretación de cada una de las líneas para el horizonte 1

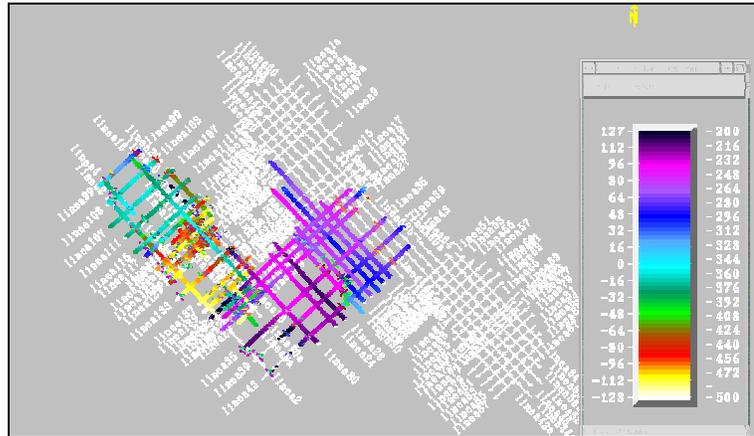


Fig. 5.17 Se muestra la interpretación de cada una de las líneas para el horizonte 0.5

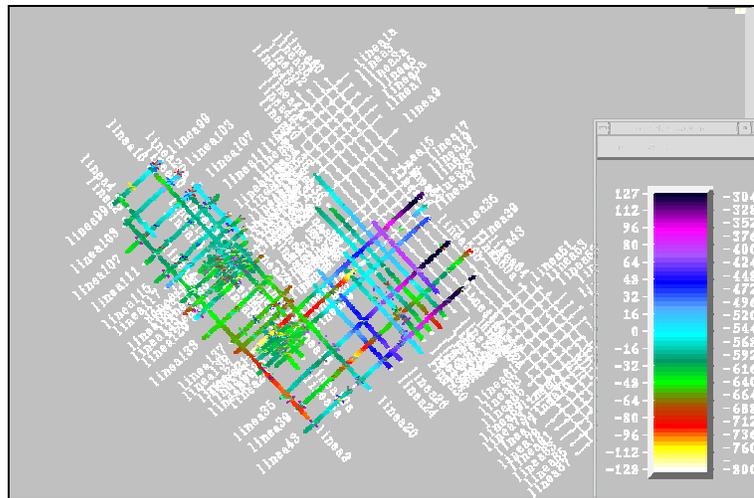


Fig.5.18 Se muestra la interpretación de cada una de las líneas para el horizonte 2

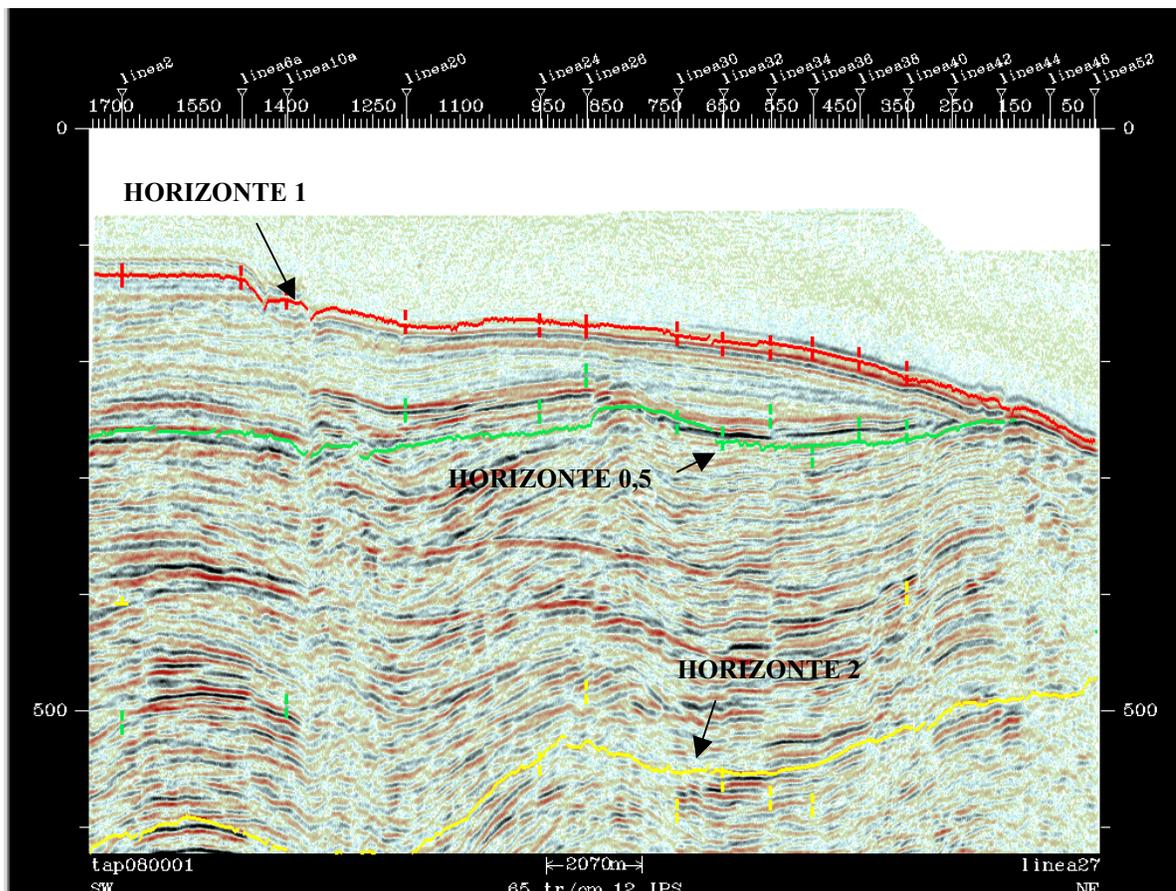


Fig. 5.19 Línea cross-line DOA-35 mostrando los horizontes interpretados

5.2.2.3.2 Metodología de aplicación de atributos

Además de la interpretación de las fallas, se calcularon atributos de amplitud, tales como intensidad de reflexión, amplitud de poder y cuadratura de amplitud, entre otros, los cuales ayudaron a la definición de los puntos brillantes en el área de estudio, en este caso se muestra en la Fig. 5.20, 5.21 y 5.22, se muestran los atributos que presentarán mejores resultados.

Las secciones sísmicas del sistema digital multicanal muestran en algunos casos una reflexión de alta amplitud (“bright spots”) que puede estar asociada a bolsones de gas. Otros factores además del gas que producen los puntos brillantes son intrusiones ígneas, carbonatos, lignitos o arenas húmedas

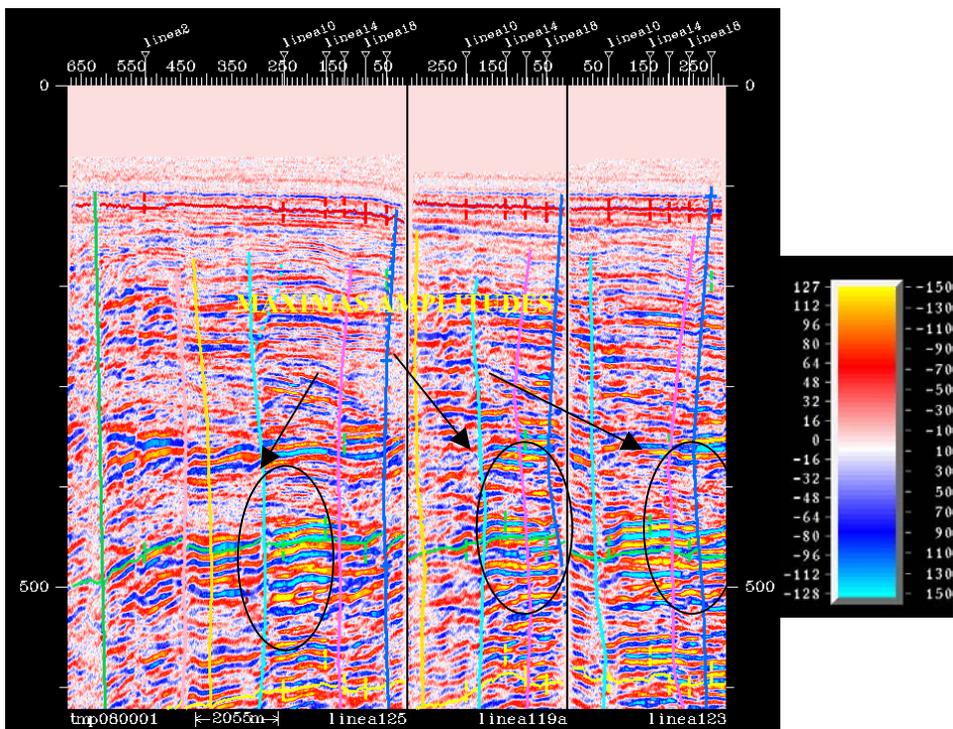


Fig.5.20 Atributo de amplitud aplicado a las líneas 121, 119a y 123. Mostrando claramente las máximas amplitudes, o puntos brillantes, los cuales nos indican la presencia de gas.

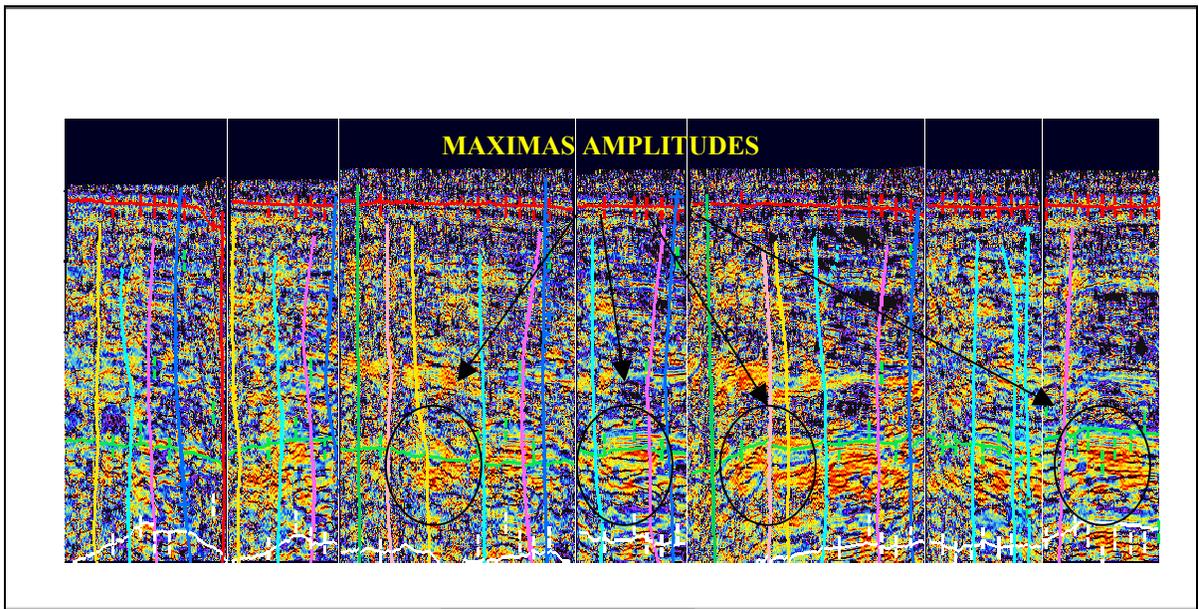


Fig.5.21 Aplicación del atributo frecuencia instantánea a las líneas 10, 14, 119, 119a, 121, 123 y 125. Mostrando claramente las máximas amplitudes, o puntos brillantes, los cuales nos indican la presencia de gas.

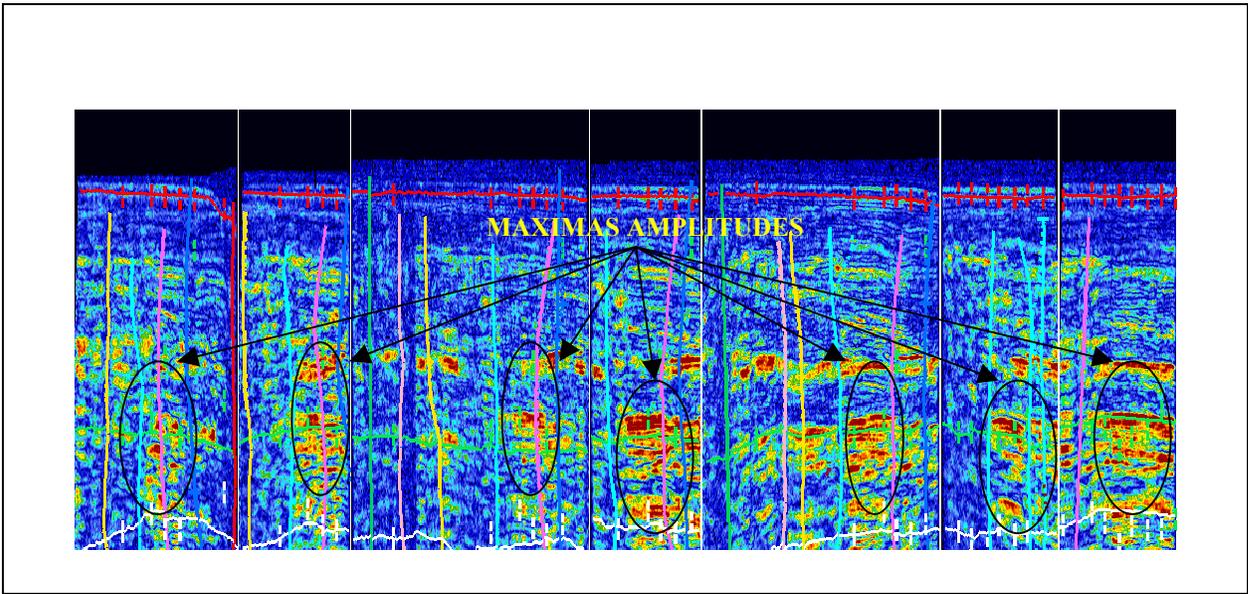


Fig. 5.22 Aplicación del atributo reflection strain a las líneas 10, 14, 119, 119a, 121, 123 y 125. Mostrando claramente las máximas amplitudes, o puntos brillantes, los cuales nos indican la presencia de gas.

Es importante resaltar que la sísmica fue cargada en 8 bits, lo que ocasiona una pérdida muy alta en el rango dinámico de las amplitudes, que se pueda decir es que se puede utilizar como ejercicio académico.

A continuación se muestran las figuras los cubos en perspectiva que muestran las zonas donde existe la presencia de gas y además se puede identificar que ambos atributos coinciden en el área resaltada:

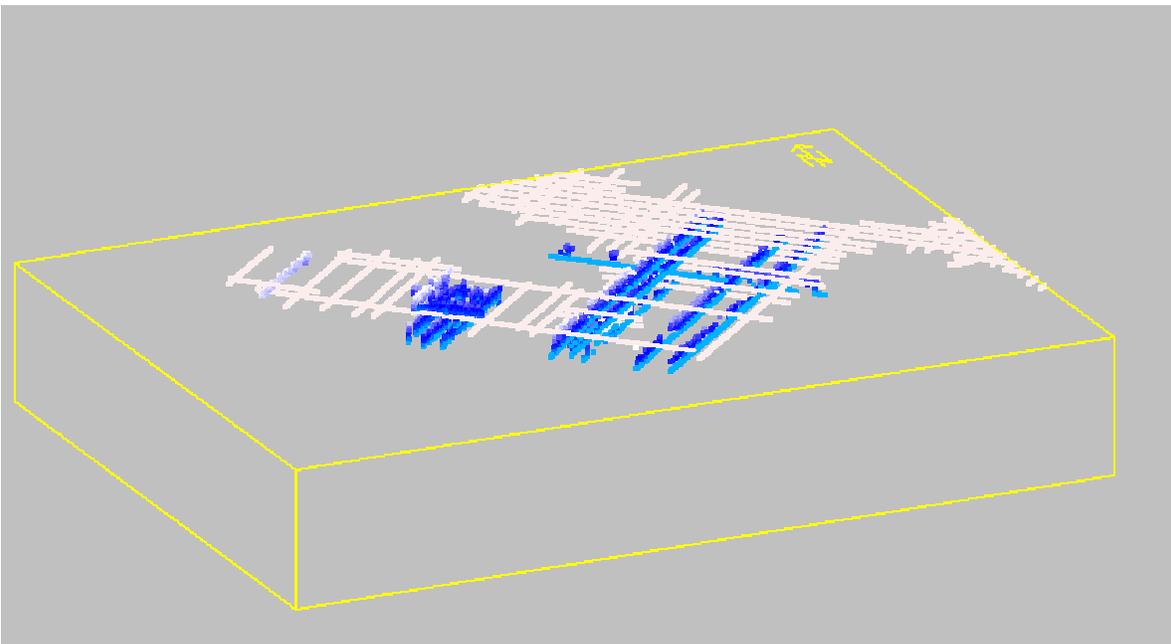


Fig. 5.23 Cubo en perspectiva donde se muestran las máximas amplitudes extraídas del área mediante el atributo de amplitud de poder.

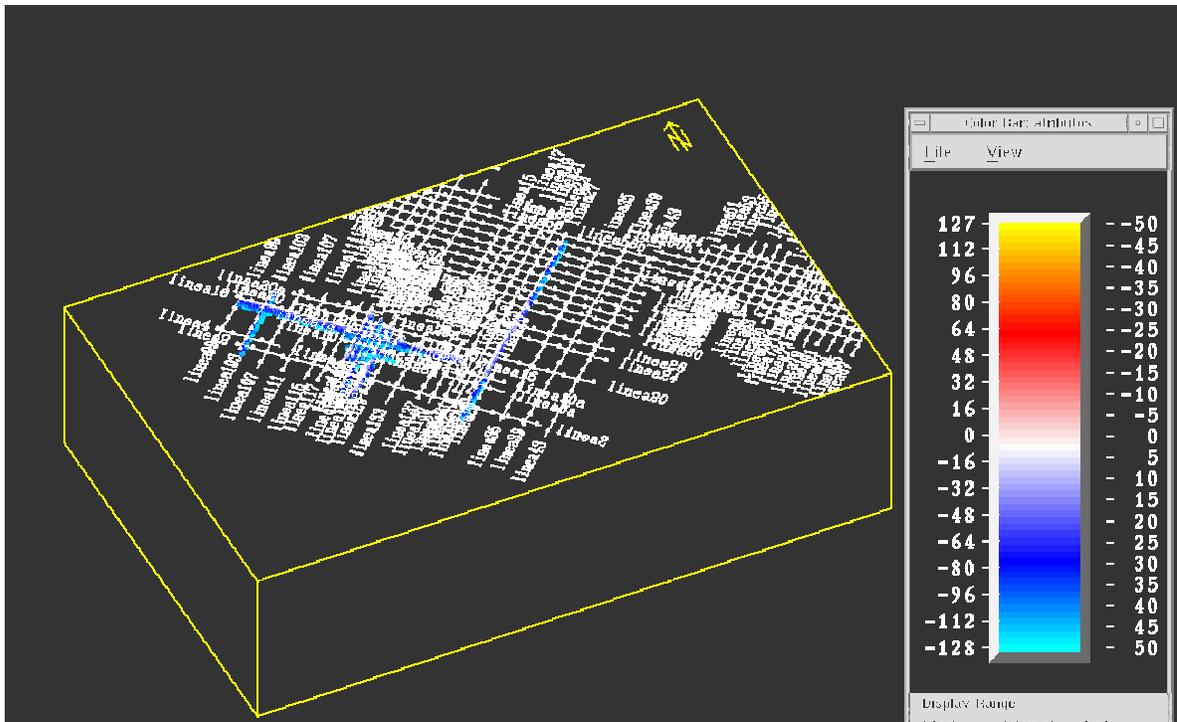


Fig. 5.24 Cubo de perspectiva donde se muestran las maximas amplitudes extraidas del area interpretada.

5.2.2.4 Interpretación estructural

Para la interpretación de las fallas se utilizó el régimen tectónico y los atributos sísmicos de amplitudes.

En las secciones sísmicas digitales se corroboró la existencia de fallas asociadas a los escarpes que se observaron en primera instancia en los registros analógicos. Así mismo, se observaron otras fallas que pueden considerarse inactivas y de acuerdo con la profundidad a la cual se encontraban, no se lograron identificar en los registros analógicos.

Además, se observó que las fallas están dominadas por un régimen extensivo, lo que nos origina la presencia de una serie de fallas normales y de despegue, así como una serie de fallas en echelon que son características de este tipo de regimenes, lo cual se puede asociar al régimen estructural que afecta la zona, Fig. 5.25, el cual fue claramente explicado en el capítulo II.

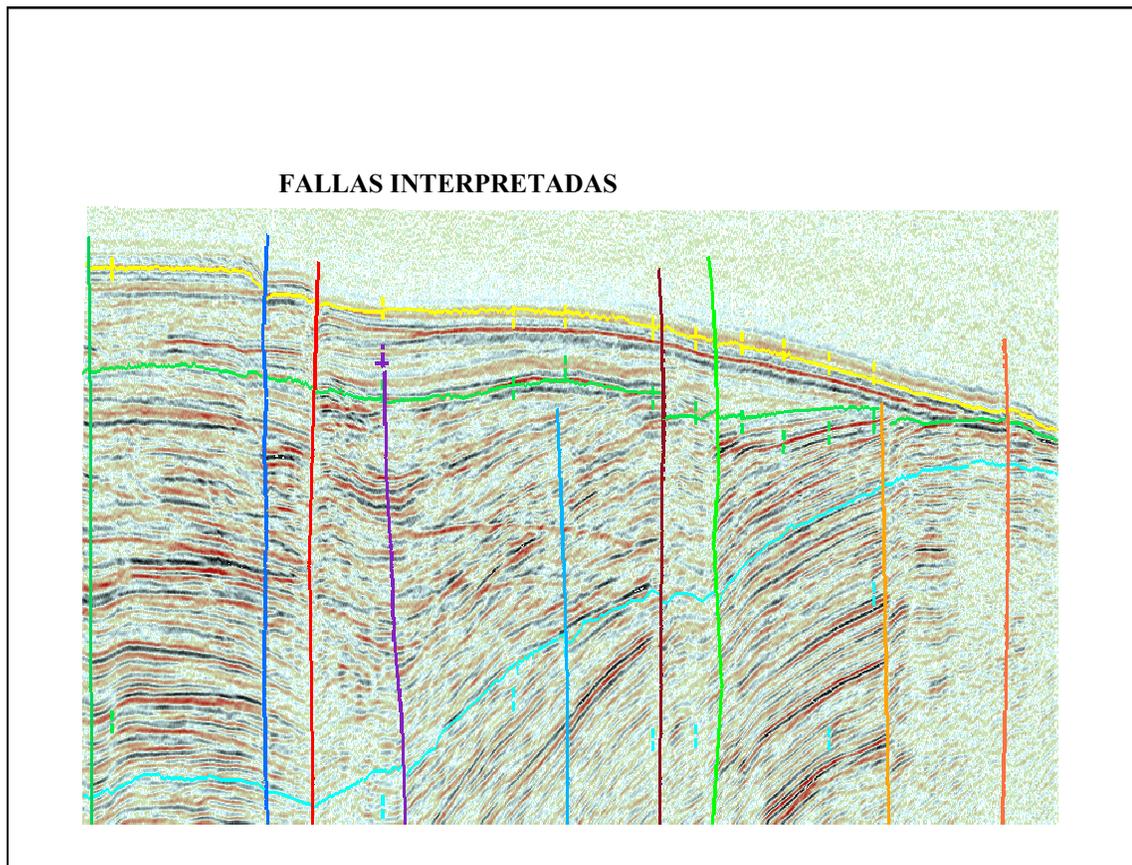


Fig. 5.25 Línea cross-line DOA-35 mostrando fallas interpretadas

Se utilizó un cubo en perspectiva el cual, nos permitió observar si la correlación de las fallas es la ideal, (Fig.5.26)

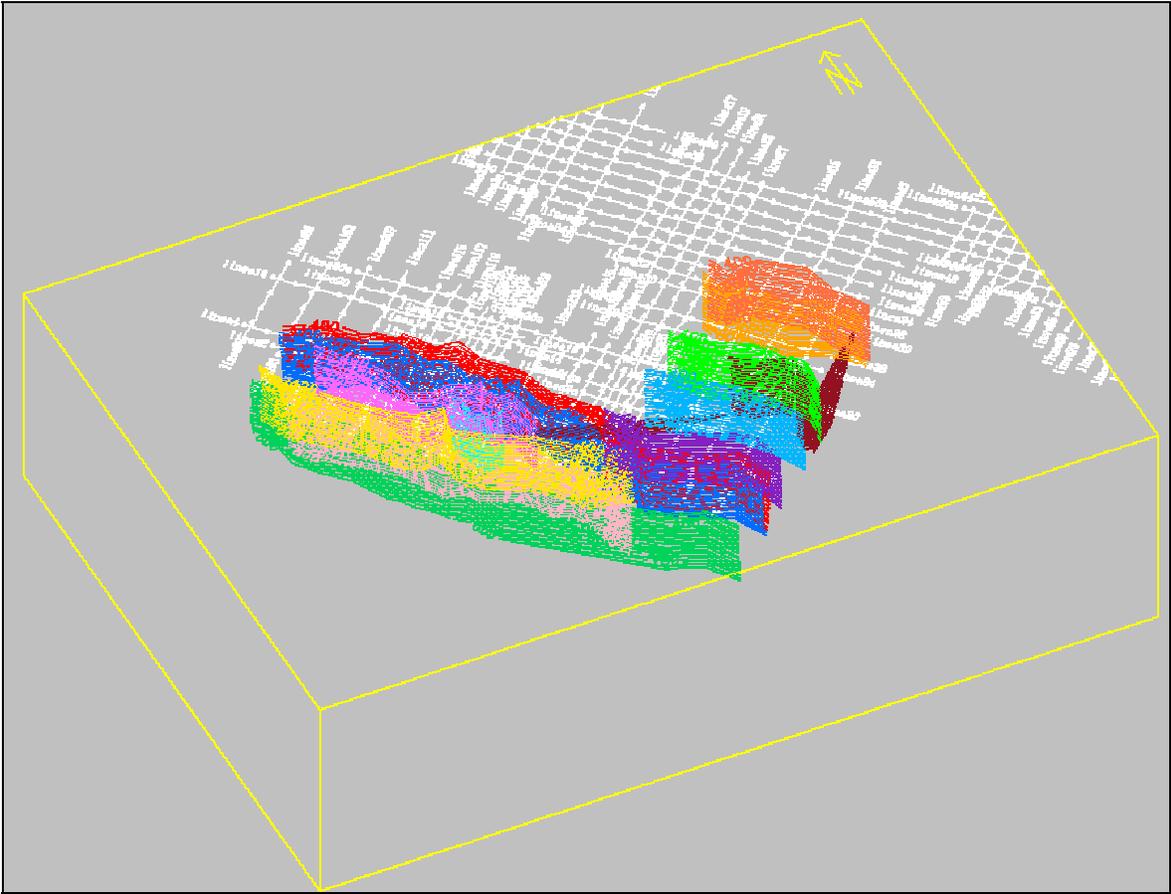


Fig. 5.26 Cubo para correlacionar las fallas interpretadas

Luego se calcularon los saltos de falla (fault heaves), lo que permitió generar los polígonos de falla, que son los datos necesarios y principales para generar los mapas de superficie (Fig. 5.27).

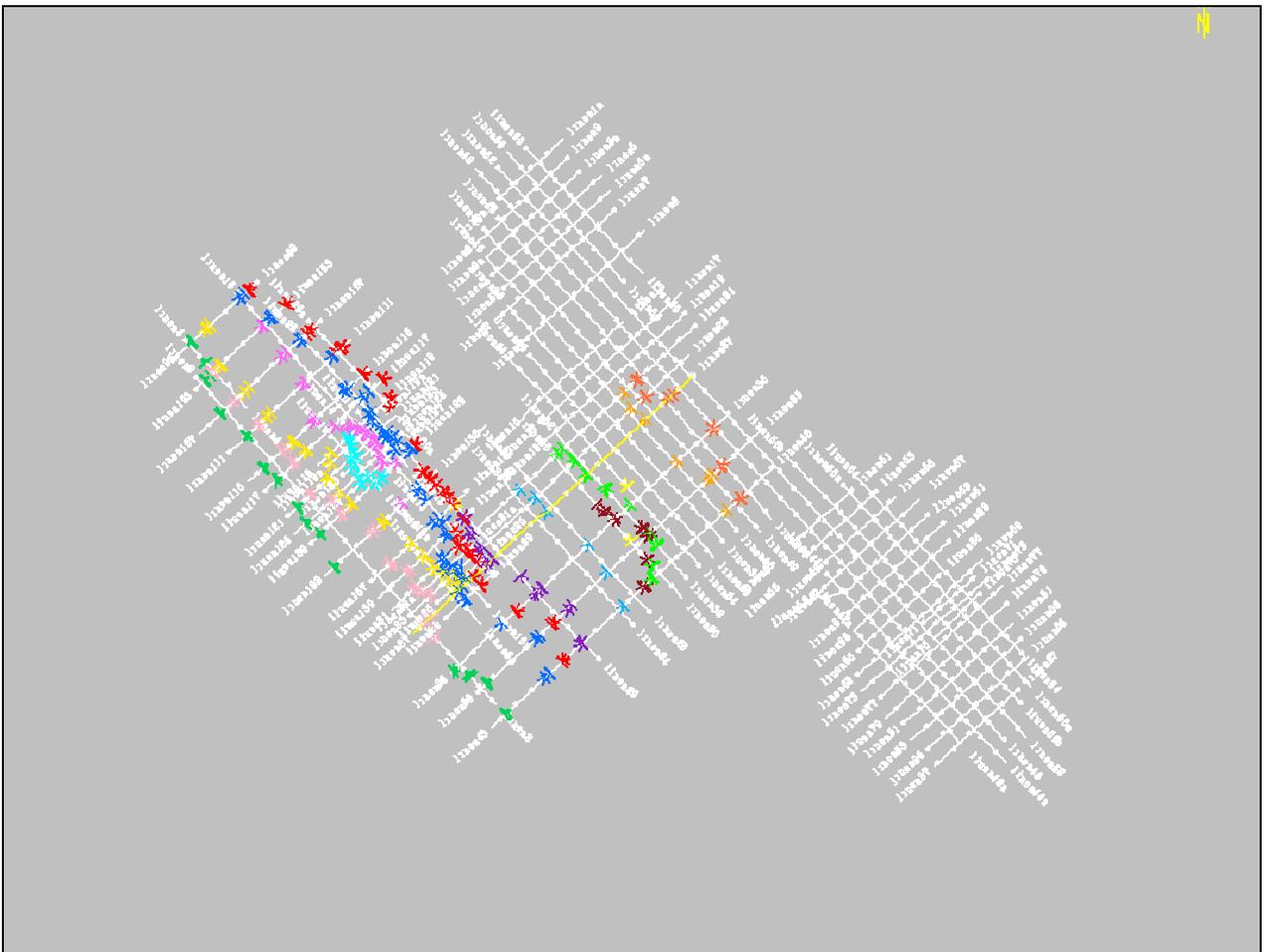


Fig. 5.27 Saltos de falla en cada una de las líneas interpretadas

5.2.2.5 Mapas estructurales

Los mapas estructurales se generaron en la estación de trabajo Seiswork 2D de LANDMARK bajo la opción de *Map it*, con las consideraciones necesarias para generar el mapa, por ejemplo el horizonte sobre el cual se va a trabajar, los polígonos de falla sobre los cuales se van generar los mapas, entre otros.

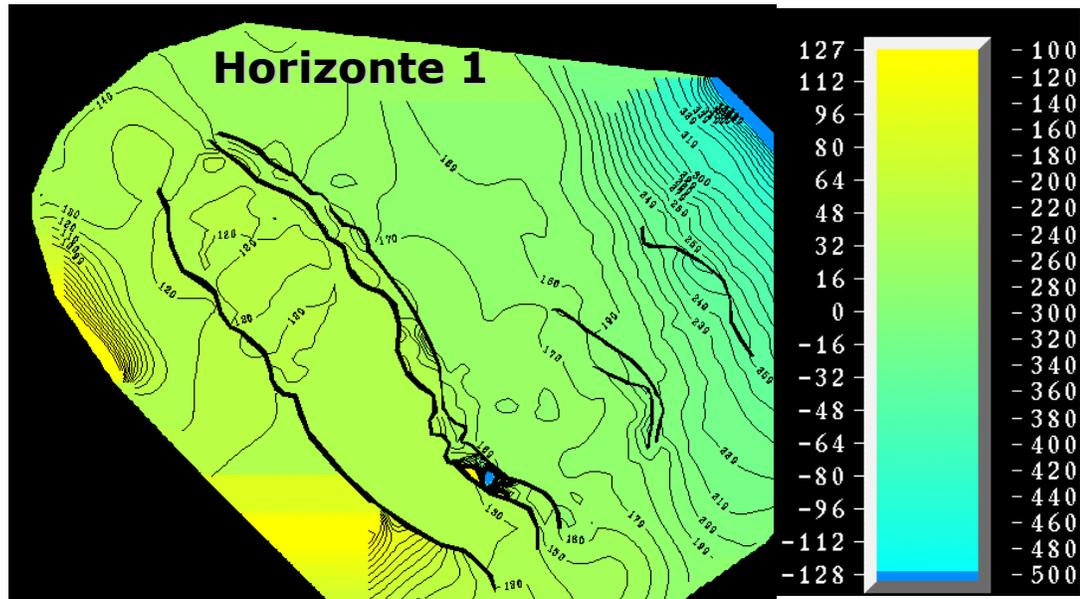


Fig. 5.28 Mapa Estructural del Horizonte 1 el cual oscila entre 100-300 ms

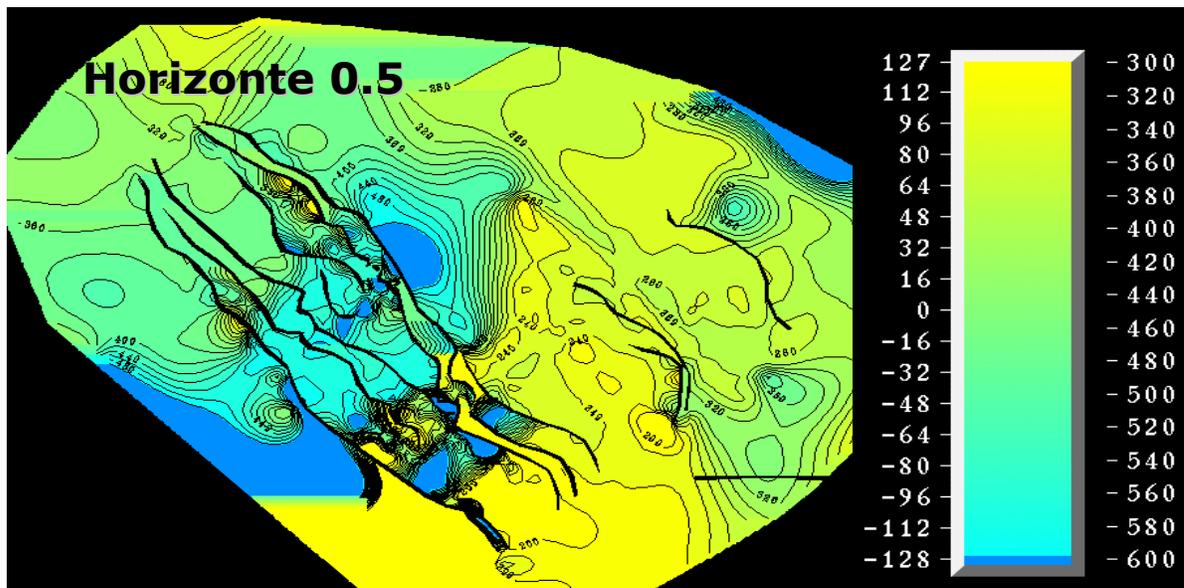


Fig. 5.29. Mapa Estructural del Horizonte 0.5 el cual oscila entre 200-600 ms

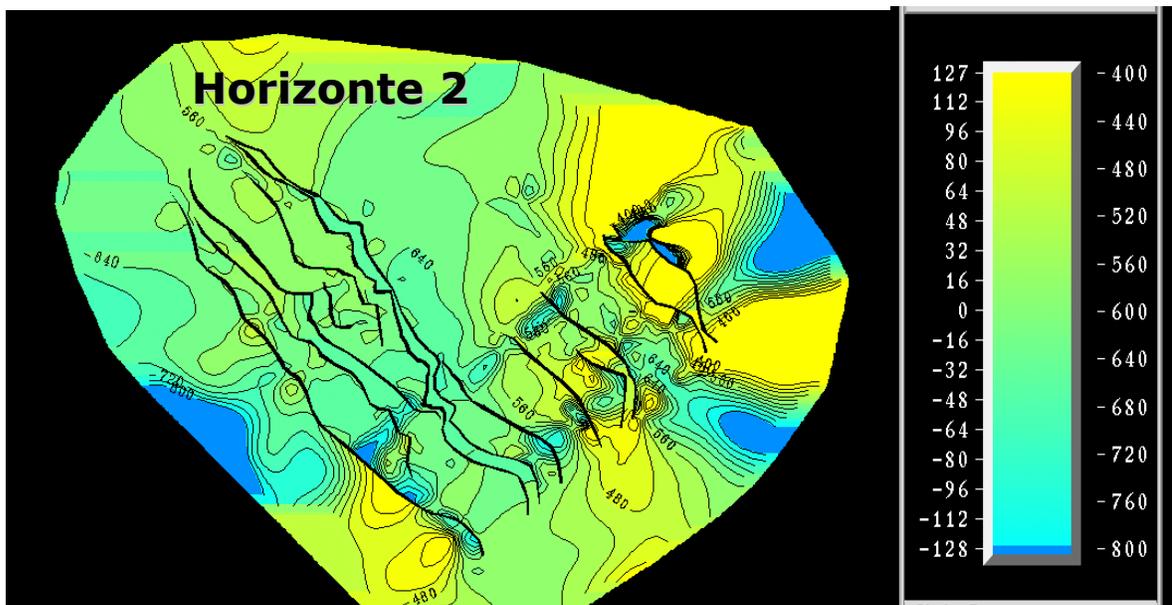


Fig. 5.30 Mapa Estructural del Horizonte 2el cual oscila entre 400-800 ms

Se obtuvieron tres mapas estructurales en tiempo, correspondientes a los horizontes interpretados “horizonte 1”, “horizonte 0,5” y “horizonte 2”. En estos mapas se observa un buzamiento suave hacia el S-E.

Mapa A (Fondo Marino): en este mapa se manifiestan las fallas activas que afectan el área de estudio. En total se identificaron 6 fallas activas, las cuales delimitan el área. En la parte oeste del área se evidencia la presencia de una falla inversa, luego unos 6 Km. mas al este se presentan dos fallas, una falla normal de despegue y la otra la respectiva antitética la cual es ocasionada por los constantes esfuerzos extensivos a los cuales está sometida la zona y a un ligero cambio de pendiente que se origina en esta área.

Hacia la parte central existe la manifestación de tres fallas normales, las cuales se ven afectadas por los esfuerzos extensivos, así como por el cambio de ambiente sedimentario que es originado en esta zona ya que se pasa de un ambiente de delta al comienzo del talud, lo que nos origina un fuerte cambio en la pendiente que se puede asociar a la presencia de fallas normales (Fig. 5.28).

Mapa B (acuñamiento de la estructura): en este mapa se observan las mismas fallas activas, con la particularidad que a medida que van profundizando, su buzamiento es muy vertical, a excepción de la falla de despegue que a medida que profundiza cambia su buzamiento.

Además de ello se observó la presencia de cuatro fallas inactivas en la parte oeste del área, las cuales presentan deslizamientos normales como respuesta de las fallas activas que están

actuando en esta área con un buzamiento y desplazamiento mínimo afectadas en su mayoría por los constantes esfuerzos extensivos característicos de la zona.

En la parte central del área se manifiesta la presencia un área que puede ser asociada la presencia de paleocanales, la cual está delimitada por una serie de fallas normales.

Es de hacer notar que dos de las inactivas presentes en la parte oeste del área, entranpan la zona de gas de mayor importancia en el área (Fig. 5.29).

Mapa C (horizonte profundo) en este mapa el comportamiento de las fallas se mantiene en el área, con la única diferencia de la presencia de dos fallas normales inactivas en la parte central debido al cambio de ambiente depositacional el cual se ve afectado en esta área.

Específicamente en el área central de la zona, existen seis fallas normales que nos indican la gran influencia del sistema de esfuerzos que se manifiesta en el área. En general pero específicamente en esta zona, se manifiesta el cambio de ambiente de delta a talud (Fig. 5.30).

En general, las conclusiones estarán orientadas a un modelo en el cual existen seis fallas activas regionales en el fondo marino, con fallamientos a los lados y manteniendo el buzamiento de las otras fallas en respuesta a los fallamientos principales. Siendo el mismo consistente con la bibliografía consultada, la cual se manifiesta en su mayoría en el Cuaternario con la presencia de progadaciones y eventos depositacionales que son afectados por la gran actividad erosional y a la geodinámica característica del Delta del Orinoco.

6. CONSIDERACIONES INGENIERILES PARA LA PERFORACIÓN EXPLORATORIA Y CONSTRUCCIONES PERMANENTES

6.1 Introducción

El presente estudio es una amplia investigación para establecer la geología total y las condiciones geotécnicas en un área del Delta del Orinoco, e intentar usarlo directamente en el diseño y construcción de ubicaciones específicas costa afuera. Es importante hacer notar que existen sitios específicos para las investigaciones geotécnicas y que se respaldan con la recuperación de núcleos para obtener una información detallada del suelo, sobre el cual se piensa realizar las perforaciones o la colocación de infraestructura.

6.2 Localización de una infraestructura de perforación móvil

Cuando se habla de infraestructuras móviles estamos hablando del tipo flotante o jack-up, las cuales son características para usarse para la perforación.

Los jack-up u otras estructuras de superficie derivan su soporte desde el fondo marino, y requiere una mayor investigación y medidas de las propiedades del fondo marino.

6.3 Comportamiento del anclaje

El anclaje deriva estos soportes del piso oceánico para penetrar algo de la profundidad por debajo de la capa pantanosa cuando es dragado y cuando actúa de manera similar para un apoyo somero sobre las fuerzas de levantamiento. Un sedimento somero muy suave puede permitir la penetración pero no provee suficiente resistencia al anclaje.

La grabación acústica y tiros de pruebas indican que la porción oeste del área de estudio está cubierta con suaves y recientes sedimentos del prodelta (Fig. 6.1). El problema de anclaje debe ser encontrado donde las capas de sedimentos prodelta es mayor a 10 m, en donde las anclas deben penetrar a una profundidad por debajo del fondo marino antes de poder obtener una capacidad de agarre suficiente y necesitan estar provistos con un largo alcance y distancia de agarre. Otro potencial problema con el anclado es la pobre penetración en área donde el fondo marino es duro.

Para desarrollar una adecuada penetración del anclaje probablemente en suelos con sedimentos rígidos, suelos arcillosos se puede requerir el uso de los esfuerzos de anclajes.

Las tres áreas donde posiblemente existan problemas de anclajes pueden ser encontradas, áreas de sedimentos suaves, arcillas duras y posibles zonas coralinas.

6.4 Penetración del Jack-up

Un estimado cuantitativo de la pata de penetración del jack-up puede solo ser obtenido después de mediciones a las condiciones del fondo marino mediante los ensayos de laboratorio que se realizan a los núcleos recuperados, hasta la zona de posible penetración y la influencia de las patas y la configuración de la misma así como la manera de recuperarla (McClelland, 1979).

Se pueden presentar dos problemas para la colocación de los jack-up como lo son la excesiva penetración debajo del fondo marino como en zonas de sedimentos muy suaves.

Así los posibles declives en la superficie irregular del fondo marino.

Una penetración de las patas puede ocurrir donde las propiedades de piso oceánico cambian significativamente sobre distancias horizontales.

6.5 Comportamiento de la placa base:

Una placa base se ubica en el fondo marino para proveer la reentrada y el soporte para la tubería de perforación durante las operaciones iniciales del barco de perforación y la semisumergible. La placa base soportando un apoyo somero y puede ser diseñado en una forma similar (McClelland, 1979).

Dos posibles problemas se pueden presentar para la colocación de las placas base:

- ◆ Son la excesiva penetración debajo del fondo marino como en la zona de sedimentos suaves.
- ◆ Soporte desigual en una superficie irregular del fondo marino.

Los declives del fondo marino son generalmente pequeños exceptuando a los escarpes. La excesiva penetración de una placa base debe ocurrir donde los suaves sedimentos prodelta son superiores a 5 metros.

6.6 Instalación de tuberías

Una tubería conductora es usualmente instalada durante las operaciones para el cañoneo principal guiado por un martillo, excepto para áreas de coral u otro material duro y mucha arcilla consolidada. El cañonear sería muy factible en la mayor parte del área de estudio.

Si la tubería conductora necesita estar instalada en área de material duro, el conductor debe haber estado instalado en un hoyo de perforación de mayor tamaño. En áreas de arcillas dura, cañoneo ser muy lento y puede encontrarse anticipado por una pre-perforación de guía. (McClelland, 1979)

6.7 Construcciones permanentes

La infraestructura permanente involucra tuberías y plataformas de perforación y producción. En la región del Delta del Orinoco se ha propuesto la instalación de estructuras de metal convencionales, soportadas por fundaciones profundas con pilotes de extremos abiertos, el cual constituiría el diseño de plataforma más económico para esta región (McClelland, 1979). En la mayor parte del área de estudio, la instalación de los pilotes de fundación es factible.

Otras estructuras, como plataformas de gravedad y torres atirantadas son alternativas necesarias cuando las estructuras convencionales no son económicamente factibles

6.7.1 Pilotes de fundación

Los sedimentos en regiones deltaicas generalmente son apropiados para la instalación de pilotes hincados. Podrían presentarse problemas, para el hincado de pilotes de fundación, en áreas de arrecifes enterrados y en áreas con arena superficial. Los arrecifes de coral son materiales muy duros, lo cual dificultaría el hincado, sin embargo podría implementarse la rotación para la instalación de pilotes. Las áreas con material granular están propensas a socavación si existieran corrientes cercanas al fondo marino, suficientemente fuertes, lo que reduciría la capacidad lateral del pilote.

La zona de arena superficial corresponde con la unidad A del mapa de espesores de sedimentos someros, que se encuentra en la parte oeste del área. Por otra parte, al sureste del área de estudio posiblemente existan sedimentos duros en el fondo marino, esta zona corresponde a la unidad sin definición de sedimentos someros en el mapa de espesores.

6.7.2 Tuberías

Una vez que comienza la producción de hidrocarburos, se desarrolla el tendido de tuberías. Si las tuberías atraviesan áreas de potencial inestabilidad del fondo marino podrían romperse o estar sujetas a movimientos laterales. Las áreas de riesgo en este caso incluyen las zonas de depresión del fondo marino, pendientes altas a lo largo de los escarpes del fondo marino, y áreas de deslizamientos submarinos.

Por otra parte, la instalación de tuberías se dificulta en áreas de sedimentos muy blandos por la excesiva penetración de éstas por debajo del fondo marino.

En el mapa de riesgos se muestran los escarpes y la zona de sedimentos muy blandos. El escarpe que presenta un salto mayor es el del lado oeste, mientras que la mayor pendiente del fondo marino se encuentra del lado este. En la parte sureste existe una zona de sedimentos blandos, que podrían estar asociados a corrientes de turbidez, y que representan un riesgo por la inestabilidad que presentan.

Por último se generó en el área de estudio para tener una mejor relación con respecto al tipo de infraestructura que se desea colocar o el tipo de actividad que se desea llevar a cabo (Fig. 6.1).

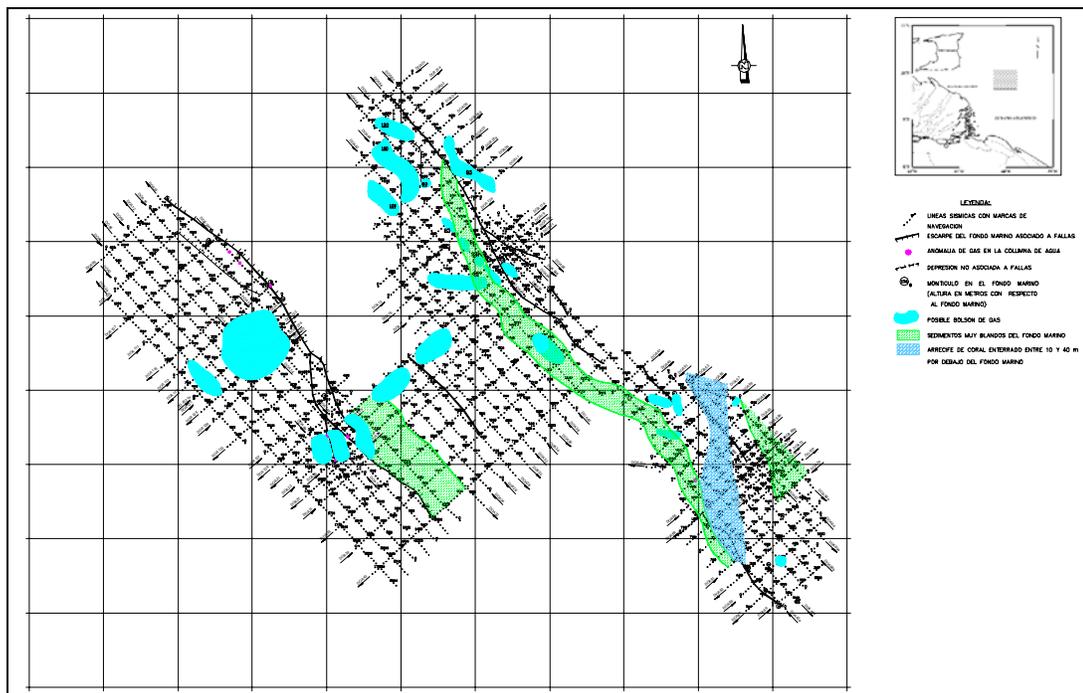


Fig. 6.1 Mapa de Riesgos del área Delta del Orinoco

6.7.3. Riesgos Geológicos

El estudio de sismica de alta resolución realizado en área del Delta del Orinoco ha permitido identificar la presencia de varias condiciones geológicas que pueden constituir un riesgo e imponer una cierta limitación para las operaciones de perforación en mencionado sitio. Estos rasgos geológicos principalmente están asociados con la presencia de gas en el subsuelo y, en menor grado, con las fallas. Antes de comenzar a definir con detalle lo señalado anteriormente, es conveniente señalar que la batimetría y la morfología del fondo marino no muestran ningún riesgo importante que pueda afectar las operaciones.

6.7.3.1. Fallas

De las fallas identificadas en el sitio de estudio y que se señalan en el mapa estructural es conveniente destacar dos de ellas; una, ubicada en el extremo suroeste y la cual presenta el salto vertical más relevante 17 m; y la otra, en el extremo este, la cual alcanza la superficie del fondo marino con un desnivel de 8 m, indicando su reciente actividad.

Favorablemente, estas dos fallas se encuentran a una distancia aproximada de 2,1 Km del sitio de perforación, por lo que no representan ningún riesgo directo, de importancia en las operaciones.

6.7.3.2. Gas

Tal como fue indicado con anterioridad los reflectores identificados en las secciones sísmicas aparecen perturbados por reflexiones fuertes. Estas reflexiones posiblemente están asociados con la presencia de bolsones de gas causando una baja importante en la impedancia acústica del subsuelo. Se extiende por todo el sitio de estudio y a diferentes profundidades tomando en consideración esto último, se logran identificar 20 unidades gasíferas.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos y luego de realizar cada una de las etapas mencionadas durante todo el trabajo especial de grado, se pueden considerar diferentes riesgos geológicos y geotécnicos presentes en la zona:

- ◆ Las profundidades de agua presentes en el área son de 82 m en la zona oeste y de 310 m hacia la zona este del área de estudio, representado por curvas de nivel cada 20 m utilizando una velocidad promedio del agua de 1550 m/s para la conversión de tiempo a profundidad.
- ◆ La pendiente promedio que se manifiesta en el área es de $0,4^\circ$, ya que en esta zona se encuentra en el final del delta, debido a que se dirige hacia la zona este del área donde se encuentra con una pendiente promedio de 1° , lo que indica que es el comienzo del talud.
- ◆ Se observa que las manifestaciones de acuñamiento son producto de las constantes progadaciones a las que ha sido sometida el área, y es por ello que se observa la acumulación de otro tipo de sedimentos en el área.
- ◆ Las muestras obtenidas con el muestreador del fondo marino hasta tres metros indican que esta constituido principalmente de arcillas blandas.
- ◆ Los espesores de sedimentos sueltos varían entre 0 y 60 m en el área de estudio. Se observa una marcada diferenciación entre los tipos de sedimentos a partir de las zonas de escarpe. Los mayores espesores de sedimentos sueltos se encuentran entre los escarpes regionales. Esta es la zona central del área y se considera de mayor riesgo para la ubicación de plataformas autoelevadizas, debido a que las bases tendrían que penetrar un mayor espesor de sedimentos hasta obtener suficiente estabilidad.
- ◆ Existen sedimentos de consistencia muy blanda en una banda cercana al escarpe oeste. En esta zona, las estructuras posadas en el fondo marino como anclas, placa base y tuberías podrían penetrar excesivamente, dificultando las operaciones.
- ◆ La presencia de arrecifes de coral en la parte sureste del área, enterrados a profundidades entre 10 y 40 m por debajo del fondo marino, podrían limitar la penetración de pilotes y del tubo conductor
- ◆ Existen fallas normales (de crecimiento), consideradas activas por presentar manifestaciones superficiales que alcanzan escarpes del fondo marino de hasta 30 m de desnivel, donde existe

el predominio del sistema distensivo. Las fallas más extensas presentan un rumbo noroeste-sureste. Éste es uno de los sistemas de fallas presentes en la región nororiental de Venezuela, en las edades recientes (Cuaternario) mientras que otras fallas menos regionales presentan un rumbo norte-sur.

- ◆ Las fallas activas son determinantes para estudiar los asentamientos diferenciales de infraestructura, que requieren de fundaciones posadas en el fondo marino. Además pueden causar esfuerzos anormales en tendidos de tuberías.
- ◆ Existen numerosas fallas que no tienen manifestación superficial. Las fallas inactivas representan riesgos de menor grado, pero deben considerarse para la ubicación del sitio de perforación, ya que al atravesarse un plano de falla podrían ocurrir pérdidas de circulación de barro.
- ◆ Se obtuvieron veinte bolsones de gas con una extensión aproximada de 50 Km,. De los bolsones identificados existen dos que son los mas resaltantes, en el area interpretada se encuentra en la parte noroeste del área de estudio, la cual es más resaltante y la otra es una que se manifiesta a lo largo de toda la parte central y hacia la parte suroeste del área prácticamente paralela a la zona anterior.
- ◆ El riesgo identificado en el área de estudio lo constituye la presencia de reflexiones fuertes en las secciones sísmicas, las cuales en su mayoría están asociadas a la presencia de bolsones de gas. Conociendo el peligro que pueden ocasionar estos bolsones en la perforación y la ubicación de infraestructura, es recomendable buscar la ubicación mas hacia la parte noroeste del área y en el caso de no existir la posibilidad de movilizar la ubicación tomar las máximas precauciones posibles para realizar cualquier tipo de operación. Es por ello que debe estudiarse la ubicación de estructuras fijas (plataformas), mediante la integración de la información entre la sísmica profunda y la de alta resolución, ubicando el pozo en una línea sísmica profunda para definir el objetivo final integrada con una línea sísmica de alta resolución para estudiar las condiciones someras en el mismo lugar.
- ◆ En muchos casos, estos riesgos no imposibilitan el desarrollo de las operaciones o la construcción de infraestructura petrolera, pero si representan las consideraciones a tomar en cuenta en el diseño y ubicación de la infraestructura.

7.2 Recomendaciones

- ◆ Realizar un reprocesamiento de los datos con la aplicación de remuestreo de la sísmica de 0.5 ms a 1 ms debido a que es una limitante para los paquetes de interpretación.
- ◆ Aplicarle AVO a la sísmica para determinar con mayor precisión los bolsones de gas.
- ◆ Cargar la sísmica en 16 bit debido a que es la resolución óptima para no perder información en las amplitudes sísmicas.
- ◆ Tratar de integrar a este tipo de información sísmica información petrofísica, para tener un mejor amarre de la sísmica con la estratigrafía presente en la zona.
- ◆ Es recomendable tener precaución al realizar fundaciones en la zona sureste del área ya que el cambio de pendiente que se manifiesta es muy brusco.
- ◆ Realizar estudios estratigráficos del área para tener una información exacta de la edad geológica que pertenecen las formaciones del área.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ◆ Amoco Worldwide engineering and construction (1998), Seismic Hazard Assesment of Terminal de Aguas Profundas (“TAP”) Facility Sites, Northeastern Venezuela,).
- ◆ ASTM (1991), Standard Test Method for Classifiction of Soils for Engineering Purposes, Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02.
- ◆ DISEÑO DE PRESAS PEQUEÑAS, (1991).
- ◆ Funvisis (1994), Estudio neotectónico y de geología de fallas activas de la región nororiental de Venezuela, Volumen 1, Proyecto Intevep 92-175.
- ◆ Fugro Gulf, Inc. (1980), Geotechnical Investigation Boring 1, Delta del Orinoco, offshore Venezuela.
- ◆ Fugro Gulf, Inc. (1980), Geotechnical Investigation Boring 3, Delta del Orinoco, offshore Venezuela.
- ◆ Hernández Casado Jaume, 2000, Solución de problemas de estática en la costa oriental del Lago de Maracaibo, Universidad Simón Bolívar.
- ◆ Malavé, G. (1999), Sísmica marina de alta resolución.
- ◆ McClelland Engineers, Geotechnical Consultants, (1978), Interpretation and assesment of shallow geologic conditions, Orinoco regional survey areas, offshore Orinoco Delta, Venezuela.
- ◆ PDVSA-Intevep (1982), Riesgos geológicos y cosideraciones geotécnicos del sitio específico Loran-1, Delta del Orinoco. Informe Técnico preparado por la División de Exploración y Producción de ingeniería general, Sección Costa Afuera, Unidad Geofisica y Geotecnia.
- ◆ PDVSA-Intevep (1982), Riesgos geológicos y cosideraciones geotécnicos del sitio específico Cocuina-1, Delta del Orinoco. Informe Técnico preparado por la División de Exploración y Producción de ingeniería general, Sección Costa Afuera, Unidad Geofisica y Geotecnia.
- ◆ Perez, O. J. y Y. P. Aggarwarl (1981), Present-Day Tectonics of the Southeastern Caribbean and Northeastern Venezuela, Journal of Geophysics Research, Vol. 86, N° B11, pp 10791-10804.
- ◆ Perez, O. J. (1998), Seismological Report on the Mw=6.8 strong shock of july 1997 in Cariaco, Northeastern Venezuela, Society of America, Vol 88, N° 3, pp 874-879.
- ◆ Russo et al. (1993), Seismicity and Tectonics of the Southeastern Caribbean Journal of Geophysics Research, Vol. 98, N° B8, pp 14299-14319.

- ◆ Saavedra, J (1978), Perfilaje de poca penetración y Alta Resolución en el Subsuelo marino. Sísmica de Reflexión.
- ◆ UCAB, Laboratorios (1982), Ensayos físicos y químicos sobre muestras de suelo. Programa costa afuera, Plataforma continental, sitio específico DOA.
- ◆ Ugas, C. (1985), Ensayos de laboratorio en Mecánica de suelos.
- ◆ Stone, D. (1994), Designing Surveys in two and three dimensions, Society of Exploration Geophysycist.
- ◆ Wood L. J. (2000), Chronostratigraphy and tectonostratigraphy of the Columbus Basin, eatern offshore Trinidad. AAPG Bulletin. Vol. 84, N° 12, pp 1905-1928.
- ◆ Yilmaz, O. (1987), Seismic Data Processing, series: Investigation in Geophysics. Vol 2. Society of Exploration Geophysicist.

9. APÉNDICES

9.1 Apéndice A

Descripción de los equipos geofísicos y del muestreador

A continuación se describen los equipos geofísicos y el muestreador utilizados por BEICIP-CGG en el levantamiento que cubre el sitio de estudio.

Sistemas Acústicos:

Todos los equipos acústicos (sísmicos) usados operan bajo el principio de que la energía sísmica transmitida, al incidir sobre una interfase acústica, es reflejada parcialmente por ella. Una interfase acústica se define por un contraste entre las propiedades acústicas de dos medios. Tal contraste depende de la impedancia de los materiales ($Z = \rho \cdot V$; ρ densidad del material y V = velocidad de propagación de las ondas longitudinales del material) a ambos lados de la interfase.

Las reflexiones de la energía sísmica sobre estas interfases acústicas son graficadas con el fin de obtener una sección o perfil sísmico. Generalmente, estas interfases corresponden a interfases físicas, como: discontinuidades, fallas, cambios de naturaleza de los sedimentos, zonas gasíferas, burbujas de gas en la columna de agua, etc. Las secciones sísmicas no permiten identificar directamente la naturaleza de los sedimentos, pero permiten identificar los rasgos geológicos resaltantes y ayudan a la determinación de la naturaleza de los materiales. Por ejemplo, una reflexión de alta amplitud (“bright spots”) que aparece en los perfiles, puede estar asociada con bolsones de gas. Con el sistema sonar de barrido lateral, toda la energía transmitida es reflejada por una sola interfase: el fondo marino. Generalmente, la energía emitida por el ecosonda también es reflejada totalmente por el fondo marino; aunque, en casos muy favorables (sedimentos muy blandos), se logra una pequeña penetración bajo el lecho marino. Con los sistemas de frecuencia mas bajos (*penetrador de fango, sparker multielectrodo, miniflexichoc*), una parte de la energía transmitida penetra bajo el fondo marino y se pueden detectar varias interfases. En este caso, la energía acústica se propaga desde el fondo marino hasta la próxima interfase donde el proceso de reflexión se repite. La parte de energía que se transmite hacia las siguientes interfases es reducida en una proporción correspondiente a la parte reflejada. La reflectividad de una interfase depende del contraste de

impedancia acústica entre los dos materiales. Así, el límite entre una capa de arcilla muy blanda con impedancia acústica baja y una capa de arena cementada con impedancia acústica muy alta produce un reflector fuerte. A medida que la energía se transmite en el subsuelo una parte de ella es absorbida por los medios atravesados, hasta que las reflexiones no se pueden distinguir de las otras señales recibidas, por ejemplo: el ruido circundante. El límite de penetración depende de muchos factores, entre tantos: el número de interfases, la reflectividad, las frecuencias, la energía inicial transmitida.

El registro sísmico se grafica en base al tiempo de propagación de la energía desde la fuente a la interfase y, luego, hasta el receptor. Al conocer las velocidades de propagación de las ondas en los materiales atravesados, se pueden calcular las profundidades hasta cada interfase. La velocidad de propagación de las ondas sísmicas es compleja y depende de las propiedades acústicas de los materiales; sin embargo, esta velocidad aumenta generalmente con la velocidad del medio y, por lo tanto, las escalas de los perfiles sísmicos no son lineales.

Como lo indica su nombre, en sísmica de alta resolución se trata de definir la estratigrafía y los rasgos geológicos con una muy buena resolución, es decir, se pretende identificar las capas con muy poco espesor y determinar los rasgos geológicos con la mayor precisión posible. Para cumplir con tal propósito, se necesita un fuente de energía que transmita ondas de longitud de onda corta, o sea de alta frecuencia.

Sin embargo, la absorción de las ondas acústicas aumenta muy rápidamente con la frecuencia, lo que significa que las ondas de frecuencias altas no penetran muy profundo bajo el fondo marino. Así, un equipo de frecuencias muy altas como el ecosonda (28 Khz.) generalmente no logra penetrar, pero permite definir la batimetría con una buena precisión. Con el equipo penetrador de fango (3.5 Khz.), se obtiene una definición superior a 1m en los sedimentos blandos superficiales existentes en el fondo marino, mientras que en sedimentos compactados toda la energía es reflejada por el fondo marino.

En estos estudios, con propósitos de ingeniería, se intenta generalmente obtener la máxima penetración con la mayor resolución (definición) posible. Por lo tanto, se deben utilizar varios equipos, algunos que permitan obtener una muy buena resolución, pero con una penetración limitada, y otros con una mayor penetración, pero con una definición inferior. Además, se trata de obtener no solo una información vertical, sino también, una información

horizontal, y es por eso que se utiliza el sonar de barrido lateral que provee una imagen acústica del fondo marino.

Las muestras obtenidas del fondo marino son ensayadas para generar los parámetros geotécnicos necesarios para resolver los problemas ingenieriles, tal como: el anclaje, la dimensión de la placa base y la instalación de tuberías.

Todos los equipos geofísicos que se describen en este apéndice fueron disparados simultáneamente en cada línea del levantamiento sísmico.

Posicionamiento:

El posicionamiento y el mapa de navegación de post-plot . El sistema de navegación principal usado para posicionar el M/V Universal Surveyor fue el GPS diferencial de área amplia (WADGPS), utilizando STARTFIX. El sistema STARTFIX consiste en un receptor de cuatro canales, una unidad de procesamiento de la señal, un reloj de celsio y un sistema computarizado. Los controles remotos CRT están localizados en la casa piloto y en el cuarto de instrumentos geofísicos.

STARTFIX es un satélite de posicionamiento de alta exactitud y sistema de transmisión de mensajes que recibe y escoge señales continuas transmitidas por satélites de telecomunicaciones que orbitan en el espacio. La exactitud del STARTFIX es menor a 5 metros

El sistema de navegación secundario fue una unidad de posicionamiento global diferencial (DGPS 4000). Su propósito era actualizar y verificar el sistema STARTFIX durante operaciones de campo y nunca se uso como sistema principal de navegación.

Ecosonda

El sistema ecosonda genera un haz de rayos que debido a sus altas frecuencias y los pequeños ángulos del haz, permite definir la batimetría de una zona con una precisión superior al 1% de la profundidad total del agua.

Este compuesto de un registrador y con una unidad transreceptora incorporada y un transductor montado en la parte central y más baja que la quilla del barco. La unidad transreceptora genera la energía de alta frecuencia que se transmite al transductor en forma de un pulso de una cierta longitud y amplitud. Las señales reflejadas por el fondo marino son recibidas por el mismo transductor y graficadas con el registrador.

La velocidad promedio usada durante la adquisición se determino a partir de las mediciones del velocímetro recolectadas antes de comenzar el trabajo de adquisición. Se uso una velocidad promedio de 1540 m/s y se aplico una deriva promedio del barco de 3.05 m a todos los registros. Las lecturas del ecosonda fueron grabadas digitalmente y simultaneas con la corrección de navegación.

Penetrador de Fango

El sistema de perfilaje del subfondo marino se uso para investigar las condiciones geológicas y estratigráficas someras en el área de adquisición. El sistema opera enviando pulsos acústicos en la columna de agua y los ecos reflejados del fondo marino y las capas estratificadas del subfondo marino son recibidas por el transductor sumergida a cierta profundidad para evitar problemas de calibración, ver figuras 79 y 80. El transductor es montado sobre un guinche ubicado en el casco del barco y se desciende manualmente para su uso. El ángulo de penetración y reflexión depende de las propiedades del material del fondo y subfondo marino, la potencia de salida y la frecuencia utilizada. Las señales reflejadas se reciben por el mismo transductor acústico usado para la transmisión. El tiempo de viaje de la señal es grabado y se puede usar para calcular la profundidad del agua y la profundidad de eventos bajo la superficie. Una velocidad sónica asumida de 1550 m/s se uso para calcular profundidades por debajo del fondo marino hasta observarse características del subfondo. La data obtenida del perfilaje del subfondo marino se desplegó a una escala de resolución óptima del fondo marino que caracteriza la geología somera.

Sparker Multielectrodo

Permite obtener una penetración de hasta 60 m por debajo del fondo marino con una resolución de 0,5 m.

El sparker multielectrodo esta compuesto por varios electrodos (entre 100 y 200) montado en un marco metálico. La descarga de energía eléctrica (50-3000 W.seg) entre los electrodos ioniza el agua del entorno produciendo burbujas de vapor que se expanden hasta que la presión hidrostática las contrarresta. Esta expansión produce un pulso acústico que se propaga en el agua y bajo el fondo marino.

Las señales reflejadas son recibidas por un hidrófono de ocho elementos sumergidos a una profundidad de 1 m debajo de la superficie del agua. Este hidrófono es especialmente diseñado para altas frecuencias (filtros analógicos); las señales son graficadas mediante un registro gráfico.

Sonar de Barrido Lateral

El sistema sonar de barrido lateral se utiliza para obtener una imagen acústica bidimensional del fondo marino así como para ayudar a identificar y mapear las características del mismo (burbujas de gas en la columna de agua, topografía, etc.). Este sistema fue también usado para ayudar a clarificar los materiales de fondo marino *sobre* la oscuridad y textura de la imagen. El sistema corrige por el rango de slant y por la velocidad del barco tal que la data es presentada con una cercanía verdadera al plano isométrico o a la vista del mapa. El tamaño, forma y localización de algunas características del piso oceánico u objeto puede ser medido directamente. El sonar de barrido lateral compuesto de un “pez” (tow fish) que consta de transductores, se remolca desde un winche en el barco usando un cable coaxial de acero y un registrador grafico. La altura apropiada del “pez” se ubica entre 25 y 30 m (10 a 15% del rango) por encima del fondo marino es mantenido a lo largo de la dirección del cable de arrastre dentro o fuera (Fig. 9.1 y 9.2).



Fig. 9.1. Sonar de Barrido Lateral EDGETECH 260TH.SONAR

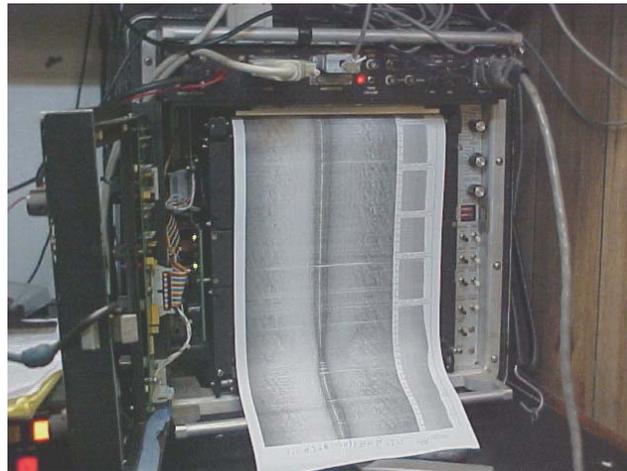


Fig. 9.2 Registrador del sonar de barrido lateral

Sistema sísmico digital multicanal

El propósito del sistema digital multiacanal es obtener una penetración hasta o dos segundos bajo el fondo marino, con una resolución de 5 a 7 metros en las capas superficiales y una resolución promedio de 10 a 15 metros en las capas más profundas es sistema consiste en:

- ◆ Una fuente de energía acústica Miniflexichoc 50.
- ◆ Un streamer de doce canales.
- ◆ Un grabador digital HR 6300.

- ◆ Un sistema de ampliamiento automático en tiempo real “CDP 2400”.
- ◆ Dos registradores gráficos para monitor.

El programador también manda la orden de grabación al grabador digital HR6300.

Las señales recibidas por el streamer de doce canales son grabadas digitalmente en cintas magnéticas en forma multiplexada. Al mismo tiempo se grafica la información de un canal en un registrador analógico. La información recibida a través del HR6300 se utiliza para hacer un apilamiento automático en tiempo real que, luego, se grafica como monitor en un registrador.

Fuente de energía acústica Miniflexihoc

La fuente esta montada en un catamarán arrastrado detrás del barco. El principio que rige la emisión de las ondas acústicas es una implosión. Mediante una planta hidráulica, las dos placas que constituyen la fuente son separadas antes del disparo. Al soltar el sistema de bloqueo, las dos placas vuelven a su posición inicial y el llenado por el agua de la cavitación generada, produce un pulso de alta repetibilidad, que constituye la señal acústica. El pulso emitido es de alta energía y con un ancho espectro de frecuencia; además este pulso no es afectado por el problema de burbuja lo que resulta en una señal clara y repetitiva. El espectro de frecuencia depende de la presión hidrostática que se ejerce sobre las placas, es decir de la profundidad de inmersión de la fuente: mientras más profunda es la fuente, mas se desplaza el espectro hacia las frecuencias bajas. El catamarán esta equipado con un sistema que permite conocer y controlar la inmersión de la fuente (Fig. 9.3 y 9.4).



Fig. 9.3 Monitor con el cual se lleva el control del cañon de aire



Fig. 9.4 Disparo del cañon de aire durante la adquisición sísmica

Streamer:

Las señales reflejadas son recibidas por un streamer de doce canales arrastrado generalmente, a la misma profundidad que la fuente. El streamer está diseñado especialmente para alta resolución, es decir, para recibir frecuencias altas. La longitud activa total de streamer alcanza 300 m., o sea 25 m. de sección activa por cada canal (12). Cada canal consiste en tres grupos de 16 hidrófonos HC 202 montados en paralelos. Simultáneamente, se utiliza un streamer monocanal para grabar la señal original del FHC 50 (Fig.9.5)



Fig. 9.5 Cable del streamer utilizado en el levantamiento Fugro-2001

Grabador digital HR6300

La información recibida por el streamer es grabada en cintas magnéticas, en forma digital multiplexada, a través del grabador digital HR6300. Este equipo con control de ganancia a punto flotante instantáneo permite grabar hasta 24 canales (mas 4 auxiliares) con una tasa de muestreo que va de 1/8 ms a 4 ms según el número de canales. En este levantamiento, se utilizaron doce canales con una tasa de muestreo de 1/2 ms y una longitud de grabación de 1,75 seg. El rango dinámico del HR6300 es de 108 db. El formato de grabación utiliza doce bits para la información y tres bits para la ganancia. Los filtros en frecuencia utilizados durante este estudio son 32 Hz - 64 Hz.

Apilamiento automático en tiempo real CPD2400

El sistema "CPD2400" está conectado con el HR6300 para efectuar un apilamiento en tiempo real de los datos sísmicos. La información apilada se graba en forma digital en cintas magnéticas de 1/2" (1600 bpi). El sistema utiliza una mini computadora Hewlett-Packard Hp 21-13 y permite apilar hasta 24 trazas con una traza de muestreo de un metro. El resultado obtenido corresponde al apilamiento bruto, generalmente realizado en un centro de procesamiento y las cintas se pueden utilizar directamente para efectuar cualquier procesamiento posterior.

Monitores

Con el fin de controlar a bordo la calidad de la información sísmica obtenida, se grafica una de las doce trazas en un registrador y la sección apilada en un registrador gráfico, además, se utiliza una cámara para controlar la adquisición de datos de cada una de las doce trazas, así como también para efectuar las pruebas del nivel de ruido (Fig. 9.6).



Fig. 9.6 Monitoreo de las trazas a medida que se realiza la adquisición Sísmica

Muestreador del fondo marino

Con el fin de obtener información sobre la naturaleza y las propiedades geotécnicas de los sedimentos superficiales, se tomaron muestras del fondo marino. El equipo utilizado es un muestreador a pistón, de un peso de 300 Kg., equipado con un tubo de 5 m de largo y 8 cm. de diámetro (Fig. 9.7).



Fig. 9.7 Muestreador utilizado en el levantamiento Fugro-2001, con un peso aproximado de 300 kg

Las muestras recuperadas fueron selladas inmediatamente a bordo del barco. La descripción visual y los ensayos geotécnicos fueron realizados en el laboratorio de ensayos de materiales de la Universidad Católica Andrés Bello, Caracas.

Una descripción de dichos equipos se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1 Frecuencias de los distintos equipos geofísicos

EQUIPO	SISTEMA	FRECUENCIA	AÑO
FATOMETRO	ELAC LAZ 17	28 Khz.	1982
	SIMRAD EA 500	27 Khz.	2001
PENETRADOR DE FANGO	1036 ORE ACOUSTIC PROFILER	3,5 Khz.	1982
	ORE 140 TRANSCEIVER	3,5 Khz.	2001
SONAR DE BARRIDO LATERAL	EG&G 259-4	105 Khz.	1982
	EDGETECH 260 TH .SONAR	100 Khz.	2001
SPARKER MULTIELECTRODO	EGE&G 232-A 400-	800 Hz	1982
			2001
SISMICA DIGITAL	MINIFLEXICHOC FHC 50	80-1000 Hz	1982
	OYO DAS-190PULG^3	20-250 Hz	2001
MUESTREADOR	KULLENBERG	500 Kg.	1982
		275 Kg.	2001

9.2. Apéndice B

Origen de los suelos y geotécnia

Las rocas en cuanto a su origen se clasifican en tres grandes grupos:

Rocas ígneas o eruptivas: Se forman por el enfriamiento y cristalización del magma fundido, procedente de la corteza terrestre, cuando es arrojado al exterior.

Rocas sedimentarias: Están formadas por la sedimentación de los productos ocasionados por la descomposición de las rocas ígneas que, arrastradas por el agua, se fueron depositando en zonas determinadas.

Rocas metamórficas: Proviene de rocas sedimentarias sujetas a la acción de ciertos agentes: grandes presiones, elevadas temperaturas, etc (Ugas, 1985).

Existen diferentes puntos de vista para clasificar los mismos elementos por ejemplo el ingeniero civil clasifica los materiales que constituyen la corteza terrestre en dos categorías:

Suelo: Es todo agregado natural de partículas minerales, separables por medios mecánicos de poca intensidad, que se origina de la desintegración mecánica y/o descomposición química de las rocas.

Roca: Es un agregado de minerales unidos por fuerzas cohesivas poderosas y permanentes, que solo pueden ser excavados mediante el uso de taladros, explosivos u otros métodos de fuerza bruta. (Ugas, 1985)

Para el geólogo el término “roca” se aplica a todo el material que constituye la corteza terrestre. En ocasiones se ha definido roca al material de origen geológico con una resistencia a compresión igual o mayor que 15 Kg/cm^2 ; asin embargo no existe una línea divisoria definida entre suelo y roca. (Ugas, 1985)

Caracterización Geotécnica

La caracterización geotécnica de un suelo es la determinación de sus propiedades mecánicas, físicas y en algunos casos químicas, con miras a su utilización en grandes obras civiles, dicha caracterización puede ser de tipo convencional o especial según sea la necesidad.

La caracterización convencional consta de una descripción visual de muestras de suelo, cálculo de humedad óptima y densidad seca máxima del material, propiedades índices del suelo límite líquido y límite plástico, gravedad específica, granulometría y clasificación del suelo por alguno de los sistemas de clasificación existentes.

Por su parte la caracterización geotécnica especial, además de contar con la información convencional, puede tener datos como: cohesión, resistencia al corte, erosión, expansión, corte directo, triaxial, ángulo de fricción, capacidad portante y otros.

Resulta de mucha utilidad en los trabajos de campo el poder identificar un suelo por medio del olfato, vista y tacto.

Olfato: La descomposición de la materia orgánica que contiene un suelo le da un olor característico el cual se intensifica con el calor. Si el suelo es inorgánico, en estado húmedo generalmente tiene un olor terroso o característico como las arcillas y en estado seco no poseen ningún olor (Ugas, 1985).

Vista: En forma visual es posible reconocer o distinguir un suelo de otro, debido a diferencias de:

Color: oscuros (orgánicos) o claros (inorgánicos); *tamaño:* gruesos o finos, *forma:* angular, redondeada o sub-redondeada.

Tacto: Frotando una pequeña cantidad de suelo entre los dedos podemos notar la sensación que nos produce esto determina su textura: arenosa, suave, aspera, granular, esponjosa, etc.

Los nombres que reciben los granos que componen un suelo dependen de su tamaño y sus propiedades. Se distinguen así principalmente cuatro componentes:

- Gravas
- Arenas
- Limos y Arcillas.

GRAVA Y ARENA: Son suelos de grano grueso identificado visualmente como partículas mayores de 5 a 6 mm. (1/4") y menores de 70 a 80 mm. (3") para las gravas, y para las arenas se considera menos de 5 a 6 mm. (1/4") hasta las que pueden distinguirse individualmente a simple vista.

LIMO Y ARCILLA: Son suelo de grano fino y sus partículas no se identifican visualmente sino mediante pruebas ejecutadas manualmente; para ello se quitan a mano las partículas gruesas ($d > 2$ mm.) que interfieran con las pruebas. Estas son fundamentalmente las siguientes:

- ◆ Prueba de la dilatancia.
- ◆ Resistencia a compresión o resistencia al quebramiento en estado seco.

◆ Tenacidad.

Existen además otras características que permiten clasificar mejor un suelo.

PLASTICIDAD: Es la propiedad del suelo de cambiar su forma si se le aplica una fuerza sin recuperación elástica, sin cambio sensible de volumen y conservando la nueva forma adquirida. En base a las pruebas de dilatancia, resistencia a compresión y tenacidad se puede describir la plasticidad.

GRADACION: Depende de la cantidad de los diferentes tamaños de granos presentes en el suelo. En el campo se estima visualmente si un suelo está bien o mal gradado. Las gradaciones típicas de los suelos son:

Bien gradado: Cuando todos los tamaños de partículas desde las más pequeñas hasta las más grandes, se encuentran presente en proporciones semejantes.

Mal gradado: 1) **Uniforme:** La mayoría de sus partículas son de igual tamaño.
Desuniforme o salteada: Ausencia de uno o más tamaños intermedios.

BRILLO: Es una prueba complementaria para reconocer la presencia de arcilla. Con una espátula secciona una muestra ligeramente húmeda de arcilla; si aparece una superficie brillante el material es arcilla de alta plasticidad, en caso contrario puede ser una arcilla de baja plasticidad o un limo (Ugas, 1985).

SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACION DE SUELOS

Este sistema toma en cuenta las propiedades técnicas de los suelos, es descriptivo y fácil de asociar a los suelos reales, y tiene la flexibilidad necesaria para adaptarse al campo y al laboratorio. Probablemente su mayor ventaja es que los suelos se pueden clasificar fácilmente con un examen visual y manual, sin necesidad de pruebas de laboratorio. El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos se basa en el tamaño de las partículas, las proporciones de diferentes tamaños y las características de los granos muy finos (Diseño de Presas Pequeñas, 1991).

El sistema unificado de clasificación de suelos se basa en la identificación del tipo y el predominio de sus elementos, considerando el tamaño de granos, granulometría, plasticidad y comprensibilidad. Clasifica los suelos en tres grandes divisiones:

Suelos de grano grueso: Son aquellos que más de la mitad (en peso) de las partículas son visibles a simple vista, excluyendo a los granos de diámetro mayor que 3" (76mm.). Sin embargo, donde se observe cantidad apreciable de cantos rodados, piedras y guijarros

(fragmentos de rocas redondeadas o semi-redondeadas de dimensiones mayores a tres pulgadas, y hasta doce pulgadas o más), deberá estimarse en porcentaje de dicho material independientemente de la descripción de diámetro menor que tres pulgadas.

Suelos de grano fino: Son aquellos en los cuales más de la mitad (en peso) de las partículas son tan finos que no pueden ser distinguidas a simple vista.

Suelos con proporción elevada de materia orgánica (turbosos): Son aquellos que contienen cantidad significativa de materia orgánica. Es conveniente señalar aquí que los suelos de grano grueso o de grano grueso o de grano fino pueden contener materia orgánica.

Los suelos altamente orgánicos pueden ser reconocidos rápidamente por la presencia de raíces podridas, hojas, hierbas y otras materias vegetales fibrosas en varios estados de descomposición. Estando húmedo tienen un color marrón oscuro, gris muy oscuro o negros y una sensación blanda esponjosa. Si las muestras son frescas, pueden notarse un olor distintivo de materia orgánica descompuesta.

En el campo, la identificación se hace por examen visual de los granos gruesos y por medio de pruebas manuales sencillas para los suelos o fracciones de grano fino. En el laboratorio se pueden utilizar las curvas granulométricas y los límites Attenberg.

Clasificación de campo

Las muestras representativas de suelo se clasifican primero en material de grano grueso o fino, estimando si puede distinguirse a simple vista el 50% en peso de las partículas en forma separadas. Los suelos que contengan mas del 50% de partículas menores que las que a simple vista se pueden distinguir son suelos de grano fino. Si en el suelo predominan las partículas gruesas, se clasifican como grava o arena, estimando si el 50% o más por peso de los granos gruesos son mayores o menores de un cuarto de pulgada.

Clasificación de laboratorio

Generalmente se ejecuta en muestras representativas de los suelos se someten a extensas pruebas y para verificar las clasificaciones de campo.

La curva granulométrica se usa para clasificar el suelo como de grano grueso o de grano fino. De grano grueso, en grava o arena por tamaño, usando el criterio del 50%. Dentro de los grupos de la grava o de la arena, los suelos que contienen menos del 5% que pase por la criba n° 200 se consideran “limpias”, luego se clasifican como bien o mal graduadas por sus coeficientes de uniformidad y curvatura. Para que una grava limpia este bien graduada deba

tener al mismo tiempo un coeficiente de uniformidad $C_u > 4$, y un coeficiente de curvatura C_c entre 1 y 3, de otra manera se clasifica como mal graduadas (GP). Una arena limpia que tenga $C_u > 6$ y C_c entre 1 y 3 es una arena bien graduada de lo contrario es una arena mal graduada.

Parámetros del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

Grava (G), de 3” al retenido en el tamiz # 4.

Arena (S), Del pasante en el tamiz # 4 al retenido en el tamiz # 200.

En el "Sistema Unificado de Clasificación de Suelos" no se hace ninguna distinción entre limo y arcilla, por lo que el pasante del tamiz # 200 será limo o arcilla, por lo que se distinguirán según su comportamiento.

El material orgánico (O), es con frecuencia un componente del suelo, pero no tiene un tamaño de los granos que sea específico. Se distingue por la composición de las partículas y no por su tamaño, que puede variar desde coloidal de dimensiones moleculares hasta fragmentos fibrosos de material vegetal parcialmente descompuesta de varias pulgadas de longitud.

Tabla 2 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

Material	Características	Tamaño
Grava (G)	Gruesa	De 3 " a 3/4 "
Grava (G)	Fina	De 3/4" al Tamiz # 4
Arena (S)	Gruesa	Del Tamiz # 4 al Tamiz # 10
Arena (S)	Media	Del Tamiz # 10 al Tamiz # 40
Arena (S)	Fina	Del Tamiz # 40 al Tamiz # 200
Limo o Arcilla	-----	Pasante del Tamiz # 200

El sistema de clasificación usado en la investigación fue el "Sistema Unificado de Clasificación de Suelos". La representación gráfica de la distribución granulométrica, se estimará siempre que se cuente con suficiente número de puntos, antes de usar representación numérica en tablas.

Características técnicas de los grupos de suelos

Densidad máxima del material seco

Los valores de la densidad del material seco máximo Proctor y la proporción óptima de agua se basan en pruebas a muestras compactadas a la densidad seca del proctor con la proporción óptima de agua.

El valor de la relación de huecos, e_0 , es la relación de porción de volumen de la masa del suelo ocupada por el aire y el agua, al volumen de los granos del suelo.

Permeabilidad

Al movimiento del agua se le llama filtración su medida se llama permeabilidad y el factor que relaciona la permeabilidad a las condiciones unitarias se llama coeficiente de permeabilidad, que representan un a descarga a través del área unitaria con la pendiente hidráulica unitaria.

En muchos depósitos de suelos la permeabilidad en una dirección paralela a los planos de estratificación puede ser 100 o hasta 1000 veces mayor que la permeabilidad en ángulo recto a los mismos planos. La permeabilidad en algunos suelos es muy sensible a los pequeños cambios de densidad, proporción de agua o granulometría.

Generalmente, se suele llamar impermeables a los suelos con permeabilidad menores de 1 pie/año, impermeables; los de permeabilidad entre 1 y 100 pies/año, semipermeables; y con permeabilidades mayores que 100 pies/año, permeables.

Compresibilidad

El fenómeno de la compresibilidad esta asociado a los cambios de volumen de los huecos y solo en muy pequeña proporción con cambios de las partículas sólidas. Si los huecos están en gran parte lleno de aire, la adición de una carga sobre la masa del suelo resultará en compresión casi inmediatamente; por otro lado, si los huecos están casi o completamente llenos de agua, se producirá muy poca o ninguna compresión inmediatamente después de la compresión de la aplicación de la carga, y solamente al drenar el agua de la masa podrá consolidarse el suelo.

Resistencia al corte

Se dan tres valores diferentes para los grupos de suelos bajo estos encabezados: C_0 , S_{sat} y tanto los valores de C_0 y de $\tan \Phi$ son la intersección del eje vertical y la pendiente,

respectivamente, de la envolvente de resistencia de Mohr sobre una base de resistencia efectiva.

La envolvente de resistencia de Mohr se obtiene probando varias muestras en suelo herméticamente empacadas. A la densidad máxima del material seco de Proctor y a la humedad óptima, en una máquina para determinar esfuerzos triaxiales, en la que se miden las presiones desarrolladas en el agua intersticial durante la prueba. Los esfuerzos efectivos se obtienen restando la presión intersticial de la muestra del esfuerzo aplicado por la máquina. No se permite drenaje durante las pruebas; por lo mismo, algunas veces se les llama pruebas rápidas sin consolidación. El valor C_{sat} se obtuvo preparando una muestra a la densidad máxima del material seco de Proctor y a la humedad óptima, saturándola, aplicándole una fuerza de corte hasta que falle para obtener el círculo pequeño mostrado en la Fig. 88. El valor C_{sat} es la intersección en el eje vertical de una línea tangente al círculo que tiene una inclinación.

Estos valores de la resistencia de corte son aplicables a la ecuación de Coulomb:

Donde:

$$S = C + (\sigma - \nu) \cdot \tan \phi$$

S: resistencia al corte por unidad de área

ν : presión intersticial

ϕ : presión normal aplicada

$\tan \phi$: como antes se definió

C: C_0 o C_{sat} según la humedad del suelo. DISEÑO DE PRESAS PEQUEÑAS (1991):

Agua en los suelos/Índices de consistencia:

Una masa típica de suelos está compuesta por tres elementos: granos, aire, y agua. En los suelos que consisten principalmente en granos finos, la cantidad de agua presente en los intersticios tiene un efecto importante en las propiedades de los mismos. En los suelos se pueden apreciar tres grados principales de consistencia:

Estado Líquido: Es el estado en que el suelo se encuentra en estado de suspensión y/o se comporta como un fluido viscoso.

Estado Plástico: En el que el suelo se puede deformar rápidamente o moldearse sin que rebote elásticamente, cambie de volumen, se agriete o desmorone.

Estado Sólido: En el que el suelo se agrieta si se deforma y presenta el rebote elástico.

Al describir estos estados de los suelos se acostumbra considerar solamente la fracción de suelo menor que el tamaño de las mayas del tamiz # 40 (límite superior de componente fino de arena Diseño de Presas Pequeñas (1991):

Para esta fracción de suelo la proporción de agua en porcentaje de peso seco al que la masa de suelo pasa del estado líquido al estado plástico se llama límite líquido (*LL*). Igualmente, la proporción de agua del suelo en los linderos entre el estado plástico y el estado sólido se llama límite plástico (*LP*). La diferencia entre el límite líquido y el límite plástico corresponde a la variación de proporciones de agua dentro de las cuales el suelo es plástico. A esta diferencia de proporción de agua se le llama índice de plasticidad (*IP*). Los suelos eminentemente plásticos tiene índices plásticos elevados. En los suelos que no son plásticos el límite líquido y el límite plástico es igual y el índice de plasticidad es igual a cero

Estos límites, llamados de consistencia, son los "límites de Atterberg", (apellido de un hombre de ciencia sueco), se usan en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos como base para diferenciar entre los materiales de plasticidad apreciable (arcillas) y los materiales pocos o no plásticos (limos). Las proporciones de los granos de diferentes tamaños y los límites de consistencia que tiene un suelo, pueden determinarse con precisión haciendo pruebas de laboratorio.