



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISION DE CIENCIAS DE LA TIERRA**

**CONTROL DE CALIDAD DE UN
LEVANTAMIENTO SISMOLÓGICO 3DHD**

**INFORME DE TRABAJO
PROFESIONAL**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO
DE INGENIERA GEOLOGA**

**PRESENTA
SONIA WENDOLIN GUERRA BORJA**

TUTOR:

ING. JAVIER ARELLANO GIL



Ciudad Universitaria

México D.F. 2014

Agradecimientos

A mis padres y hermanos, que me impulsaron a continuar con mis estudios a pesar de todas las adversidades que hemos tenido que librar.

Muy especialmente a mi hermano Manolo Enrique porque siempre me tomo como su ejemplo a seguir y que sé que desde donde quiera que se encuentre se sentirá muy orgulloso de saber que concluí con este proceso.

A mi esposo, que con amor y tolerancia me ha dado alas para continuar desarrollándome profesionalmente y ser mejor cada día.

A mis hijos, que aunque pequeños, son el motor que me impulsa para seguir adelante.

A mis sinodales que me brindaron todo su apoyo y comprensión para realizar este trabajo.

A todas y cada una de las personas que a lo largo de mi vida han estado presentes en las buenas, en las malas y en las peores situaciones.

A todos y cada uno de mis profesores, amigos, amigas, compañeros, compañeras de los cuales no menciono sus nombres por temor a omitir alguno por error, mis más sinceros agradecimientos por estar presentes a lo largo de este camino.

Sonía Guerra.

Í N D I C E

| | |
|--|-----------|
| Resumen..... | 1 |
| Abstract..... | 2 |
| I Introducción..... | 3 |
| I.1 Objetivo..... | 3 |
| I.2 Planeación y parámetros de adquisición..... | 4 |
| I.3 Localización del Levantamiento Sismológico..... | 5 |
| I.4 Logística Operativa..... | 6 |
| I.5 Antecedentes de otros levantamientos sismológicos..... | 8 |
| I.6 Fisiografía..... | 11 |
| I.7 Hidrografía..... | 12 |
| II Marco Geológico..... | 15 |
| II.1 Cinturon Plegado Reforma-Akal..... | 17 |
| II.2 Cuenca Macuspana..... | 18 |
| II.3 Cuenca Comalcalco..... | 18 |
| II.4 Estratigrafía..... | 19 |
| II.5 Geología Estructural..... | 21 |
| II.6 Geología Económica..... | 24 |
| III Pruebas de Monitoreo de vibraciones superficiales y Control de Calidad..... | 27 |
| III.1 Objetivo de las pruebas..... | 27 |
| III.2 Consideraciones Generales..... | 28 |
| III.3 Desarrollo..... | 29 |
| III.4 Resultados..... | 30 |
| III.5 Control de Calidad en las fases de campo..... | 31 |
| III.6 Preplot y Postplot..... | 40 |
| III.7 Apilamiento Final y Atributos Geofísicos..... | 41 |
| IV Procesado de campo..... | 47 |
| IV.1 Control de calidad de la información adquirida..... | 47 |
| IV.2 Atenuación de amplitudes anómalas..... | 50 |
| IV.3 Compensación y calibración de fuentes..... | 52 |
| IV.4 Corrección de efectos asociados a la topografía y a la capa intemperizada.... | 53 |
| IV.5 Estáticas de Refracción..... | 54 |
| IV. 6 Compensación de decaimiento de amplitud, recuperación de amplitud..... | 55 |
| IV.7 Deconvolución consistente con superficie..... | 56 |
| IV.8 Ordenamiento por CMP..... | 57 |
| IV.9 Correcciones Estáticas Residuales consistentes con superficie..... | 58 |
| IV.10 Aplicación del proceso de DMO..... | 59 |
| IV.11 Análisis de velocidades..... | 60 |
| IV.12 Corrección dinámica por NMO..... | 62 |
| IV.13 Migración post-apilamiento en tiempo con el algoritmo de Kichhkoff..... | 62 |
| IV.14 Análisis espectral del cubo sísmico post-apilamiento en tiempo..... | 64 |
| V Conclusiones y Recomendaciones..... | 66 |
| Bibliografía..... | 68 |

RESUMEN

El levantamiento sismológico Samaria-Íride 3DHD se llevó a cabo mediante una brigada sísmica, utilizando el método de reflexión sismológica, con un equipo sismográfico radio telemétrico en la adquisición de fuentes, así como material sismográfico y mini vibradores como fuente generadora de la onda sísmica.

El polígono del levantamiento abarcó los municipios de Cunduacan, Centro y Nacajuca, en el Estado de Tabasco.

Las actividades de la Fase operativa de Control de Calidad, abarcan desde el inicio del levantamiento con la entrega del Diseño Teórico (Preplot) por parte del cliente, la planeación en gabinete y en campo de las estaciones fuentes y receptoras para su reubicación (Post plot) debido a la presencia de obstáculos culturales (casas habitación, poblados, pozos de agua, ductos, pozos petroleros, etc.).

Antes de dar inicio con la Fase de Perforación de fuentes, se deben realizar pruebas de campo para determinar los parámetros de profundidad y carga, así como establecer la Tabla de distancias de seguridad con la que se realizará en el levantamiento.

Una vez iniciadas las Fases de Topografía, Perforación, Cargado de pozos y Observación, el personal de Control de Calidad y Procesado preliminar, es el encargado de verificar que los objetivos geológicos y geofísicos del estudio se cumplan; se realiza un estricto control de la producción realizada diariamente en cada una de las fases para determinar si cumplen o no con los parámetros del levantamiento. Para la Fase de Observación se verifica diariamente que se esté obteniendo una imagen sísmica de calidad de los horizontes de interés.

Dichas actividades se realizan de forma integral interactuando con cada una de las fases operativas tanto en campo como en gabinete, con los que se revisa desde que los puntos tanto Fuentes como Receptoras queden dentro de los rangos de distancia y criterios de desplazamiento establecidos, hasta que cada punto de tiro adquirido, cumpla con la geometría definida y calidad de la información que garanticen el resultado de los objetivos del estudio.

ABSTRACT

The seismic survey Samaria Iride 3DHD was held by a brigade seismic, using the seismic reflection method with a radio telemetry seismographic equipment acquisition sources and seismographic equipment and mini vibrators as a source of seismic wave.

The survey covered the polygon Cunduacan municipalities, Central and Nacajuca, in the State of Tabasco.

The activities of the operational phase of quality control, ranging from the start of the lift with the delivery of Theoretical Design (Preplot) by the client, planning in cabinet and field sources and receiving stations for relocation (Post plot) due to the presence of cultural barriers (dwellings, villages, wells, pipelines, oil wells, etc. .) .

Before starting with Phase Drilling sources, field tests should be performed to determine the depth and load parameters and set the table with the safety distances to be held in the uprising.

Once started Phases of Surveying, Drilling, Observation wells and Loaded, the staff of Quality Control and Processing preliminary, is responsible for verifying that the geological and geophysical study objectives are met; strict control of production on a daily basis in each of the phases to determine whether they comply with the parameters of the survey is carried out. For Phase Observation is being verified daily by obtaining a seismic image quality of the horizons of interest.

Such activities are integrally interacting with each operating in the field and in the cabinet phases, which is reviewed from the point sources as receiving both fall within the ranges of distance and displacement criteria established until each acquired point shooting, meets the defined quality information and to guarantee the result of the study objectives geometry.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la demanda de recursos energéticos principalmente hidrocarburos, ha llevado a la necesidad de re-explorar áreas en las que ya se cuenta con explotación de dichos recursos. Tal es el caso del presente trabajo de exploración, que se ubica sobre el Campo de explotación Samaria-Íride en el Estado de Tabasco.

Como consecuencia de ello, se vuelve más importante la necesidad de aumentar las reservas probadas y determinar áreas para el desarrollo de campos, a la vez que es necesario descifrar la complejidad de las estructuras en las que se encuentran, esto ha dado como resultado que los trabajos de exploración se realicen cada vez con más detalle.

Así mismo, al llevarse a cabo un levantamiento sismológico es imprescindible el cuidado del medio ambiente, respetar tanto la flora, la fauna y los asentamientos urbanos presentes en el área, procurando impactar lo menos posible las condiciones existentes de la zona, así como dar cumplimiento a la normatividad impuesta por las distintas entidades federales y/o municipales.

El resultado obtenido del levantamiento sismológico, en una fase de interpretación más avanzada, tendrá como consecuencia la caracterización de la cuenca sedimentaria, los sedimentos que la constituyen, características estratigráficas y estructurales, ubicar secuencias sedimentarias de interés, proponer localizaciones exploratorias y apoyar en los trabajos de producción.

I.1 OBJETIVO

Realizar la sísmica tridimensional de alta densidad del levantamiento Samaria-Íride 3DHD, que tiene como objetivo identificar y documentar los horizontes productores entre 300 y 1000 metros (aceite extra pesado de 8 API), de 1000 a 1500 metros (aceite extra pesado de 16 API) y horizonte entre 1500 y 2000 metros (aceite ligero). En general es importante iluminar los eventos estructurales y estratigráficos de los Campos Terciarios productores de aceite.

Levantar la sísmica de los campos de interés exploratorio del área de estudio (Figura 1.1), con la finalidad de tener información del subsuelo que permita conocer el sistema petrolero.

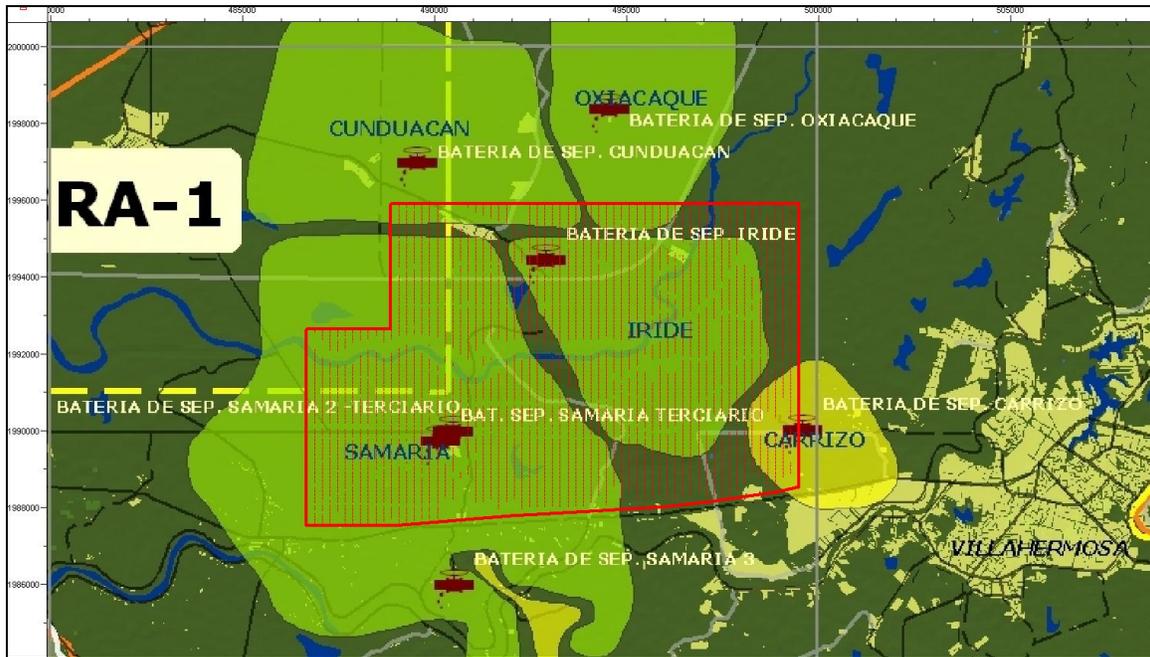


Figura 1.1 Oportunidades Exploratorias.

I.2 PLANEACIÓN Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN

Las actividades del departamento de Control de Calidad y Procesado preliminar inician cuando se reciben los archivos SPS del levantamiento con coordenadas Preplot (Diseño Teórico) y los parámetros de adquisición por parte del cliente, con la planeación previa de gabinete, es decir, considerando el posicionamiento de fuentes y receptores de acuerdo a los radios de exclusión con una distancia de seguridad previa a obstáculos naturales, culturales y sociales, así como zonas pobladas, lagunas y áreas de restricción ambiental. De inmediato se le asigna la numeración adecuada de los puntos Fuentes y Receptores basada en levantamientos anteriores con los que se pudiera integrar a la malla de BIN que se asignará.

Durante la planeación, se realiza una revisión en gabinete del Preplot, considerando elementos de apoyo como cartas topográficas de INEGI, ortomapas, áreas de restricción ambiental y exclusiones de estudios anteriores en el área. En esta etapa, los caminantes y los geofísicos de campo, jugaron un papel muy importante ya que recorrieron las zonas de exclusión en el levantamiento, utilizando sistemas de posicionamiento GPS Garmín para grabar las coordenadas de los obstáculos encontrados, mismos que sirvieron para realizar la programación de desplazamientos puntos de tiro que se encontraban cercanos a obstáculos no visibles en la cartografía u ortomapas. Dicha planeación se realiza creando un Proyecto en un software (Mesa Professional) en el que se ingresan las coordenadas Preplot del diseño del levantamiento, así como las coordenadas de los obstáculos encontrados en campo a los que se les asigna un radio de seguridad que es el que se debe respetar para no dañar las estructuras. Tomando en cuenta los radios de seguridad y las posibles posiciones para la reubicación de las Fuentes, se realiza la planeación de Fuentes con la finalidad de preservar la cobertura que requiere el diseño y garantizar que se cumplan los objetivos. El cliente proporcionó a la compañía los parámetros a utilizar en el levantamiento que a continuación se presentan en la Tabla 1.1.

| SAMARIA - ÍRIDE 3DHD PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN | |
|---|------------------|
| TÉCNICA DEL LEVANTAMIENTO | ORTOGONAL |
| TAMAÑO NATURAL DEL BIN | 12.5 x 12.5 Mts. |
| APILAMIENTO NOMINAL | 176 |
| DIST. ENTRE FUENTES | 25 Mts. |
| DIST. ENTRE LINEAS FUENTE | 200 Mts. |
| SHOTS POR SALVO : | 5 |
| No. FUENTES IMPULSIVA | 15,195 |
| No. FUENTES VIBROS | 4,650 |
| Km2 FUENTES | 95.90 |
| PROFUNDIDAD DE CARGA | 18 MTS |
| AZIMUT LINEA FUENTE | 360° |
| DENSIDAD DE FUENTES/Km2 | 200 |
| DIST. RECEPTORES | 25 Mts. |
| DIST.LINEAS RECEPTORES | 125 Mts. |
| No. RECEPTORAS | 39,300 |
| Km2 RECEPTORAS | 95.90 |
| AZIMUT LINEA RECEPTORA | 90° |
| No. GEOFONOS POR TRAZA | 6 |
| No. DE CANALES POR LÍNEA ACTIVA | 176 |
| No. DE LÍNEAS RECEPTORAS ACTIVAS | 32 |
| TEMPLATE | 5,632 Canales |
| ASPECT RATIO (RELACIÓN DE DIMENSIONES DE TEMPLETA) | 0.88 |
| LONGITUD DE REGISTRO (SEG.) | 8 SEGUNDOS |
| INTERVALO DE MUESTREO | 1 MS |
| GANANCIA | 0 |
| OFFSET CORTO MAXIMO | 17.69 Mts. |
| OFFSET MAXIMO | 2954.76 Mts. |

Tabla 1.1 Parámetros de Adquisición del Levantamiento sismológico Samaria-Íride 3DHD.

I.3 LOCALIZACIÓN DEL LEVANTAMIENTO SISMOLÓGICO

El Levantamiento Sismológico Samaria-Íride 3DHD se encuentra dentro del área de influencia del Activo de Exploración Sur y se localiza al Oeste de la ciudad de Villahermosa, Tabasco (Figura 1.2), entre los municipios de Cunduacan, Centro y Nacajuca, abarcando un área de 95.90 Km², (Figura 1.3).

I.4 LOGISTICA OPERATIVA

Para llevar a cabo las actividades operativas, se debe definir la logística operativa antes de iniciar las actividades en campo. Esta actividad se lleva a cabo en conjunto con la Jefatura de brigada, Control de Calidad y el cliente; tomando en cuenta la cantidad de

Control de Calidad de un Levantamiento Sismológico 3DHD

material con que se contará durante el levantamiento según el contrato, así como la necesidad del cliente en el área de mayor interés y analizando la posible problemática social de la zona.

Tomando en cuenta todo lo anterior, se decidió dividir el área de estudio en 3 Zipper e iniciar por el extremo Noroeste del área de estudio y concluir en la parte Sureste, como se muestra en la Figura 1.4.

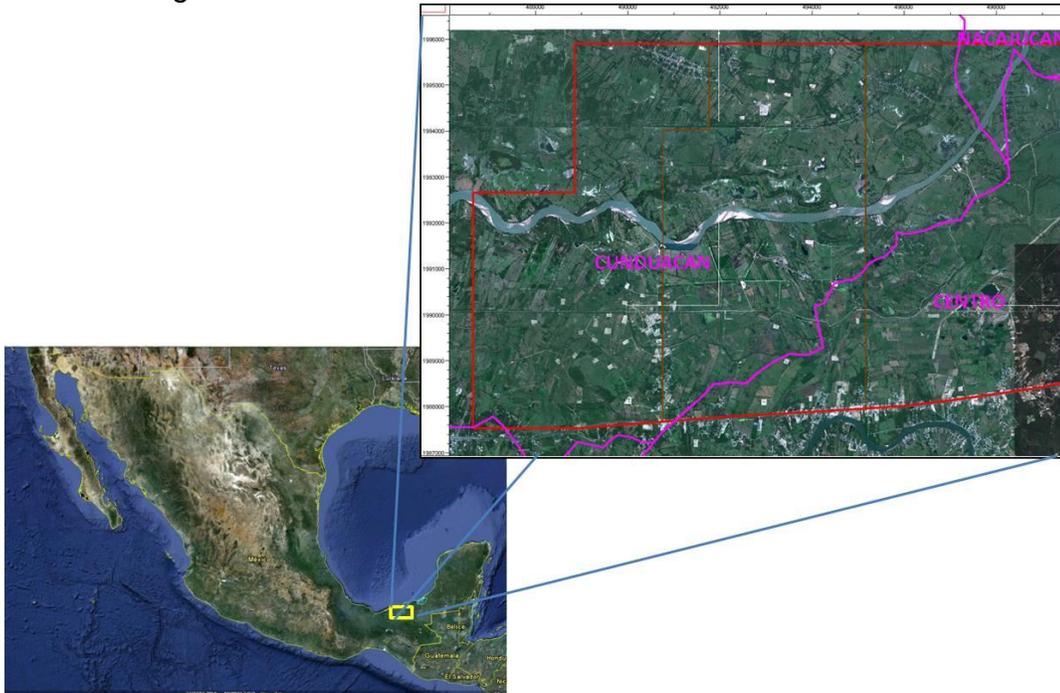


Figura 1.2 Ubicación General del Levantamiento Sismológico Samaria-Íride 3DHD.

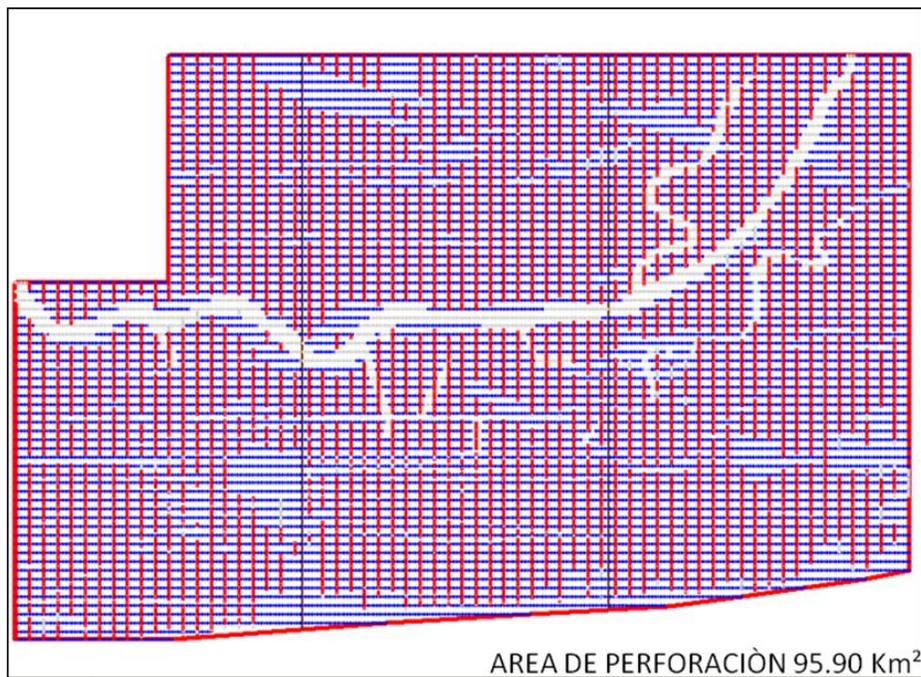


Figura 1.3 Área de operación del levantamiento Sismológico Samaria-Íride 3DHD.

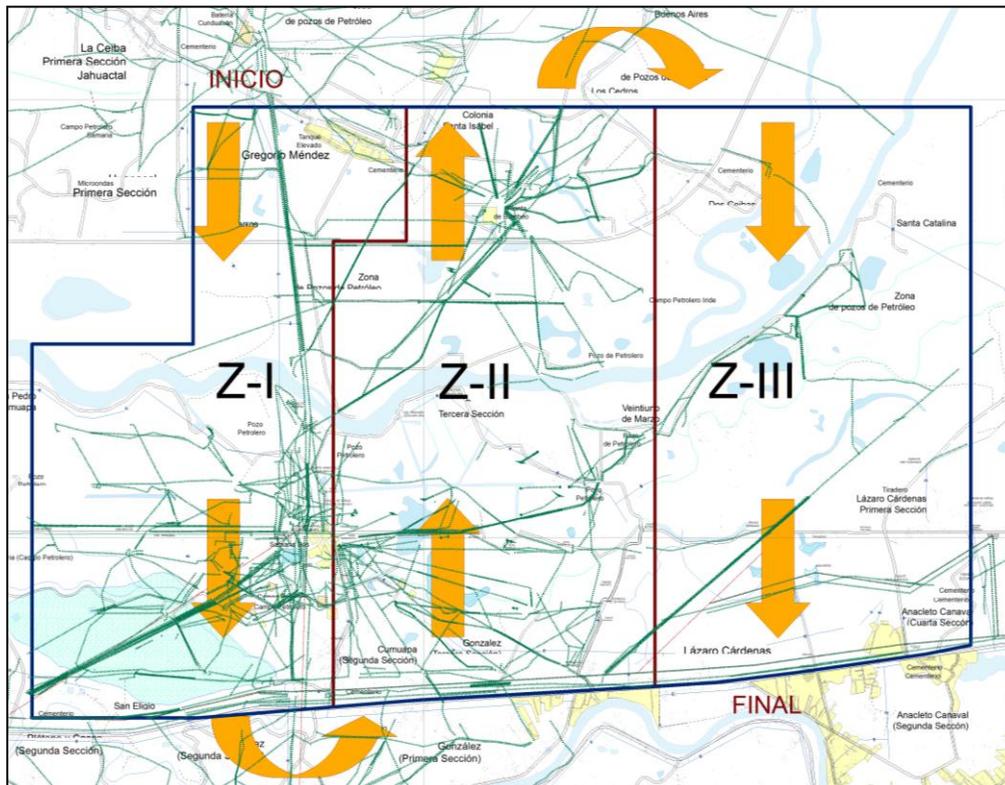


Figura 1.4 Logística operativa del levantamiento Sismológico Samaria-Iríd 3DHD.

I.5 ANTECEDENTES DE OTROS LEVANTAMIENTOS SISMOLÓGICOS

Considerando las posibilidades petrolíferas de los campos, se realizó previamente un levantamiento geofísico de reflexión sísmica 2DHD, que consistió en dos líneas sísmicas bidimensionales; una realizada con material sismográfico cuya orientación fue Norte-Sur y otra línea cuya fuente de impulso fueron vibros, cuya orientación fue Este-Oeste, la que se realizó sobre un camino pavimentado, (ver Figura 1.5).

Así mismo, también se cuenta con información de sísmica 3D realizada en la zona de estudio, misma que se muestra en las Figuras 1.6 a la 1.8, en las que se aprecia que los horizontes de interés muestran buena información.

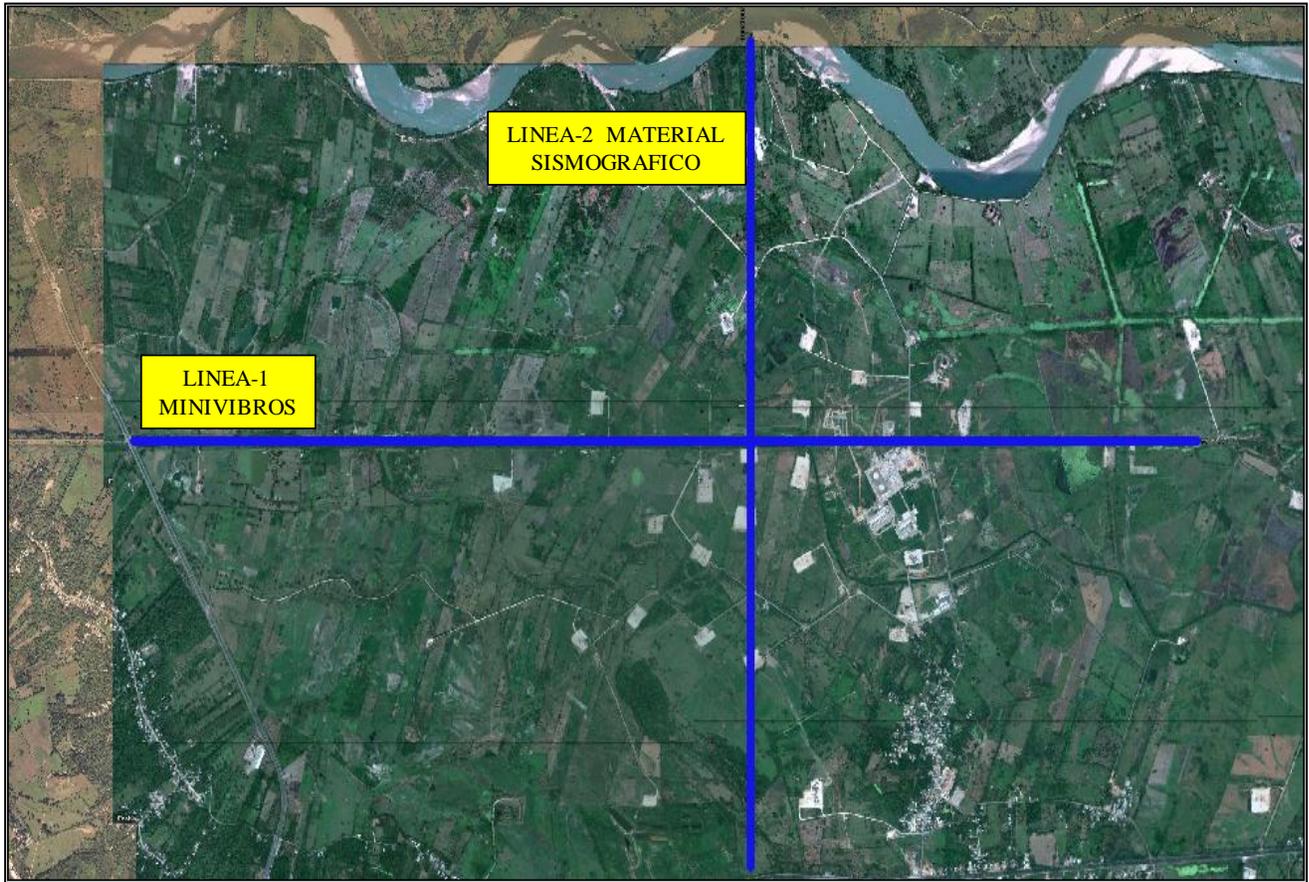


Figura 1.5 Líneas sísmicas 2DHD adquiridas dentro de los campos de interés.

Control de Calidad de un Levantamiento Sismológico 3DHD

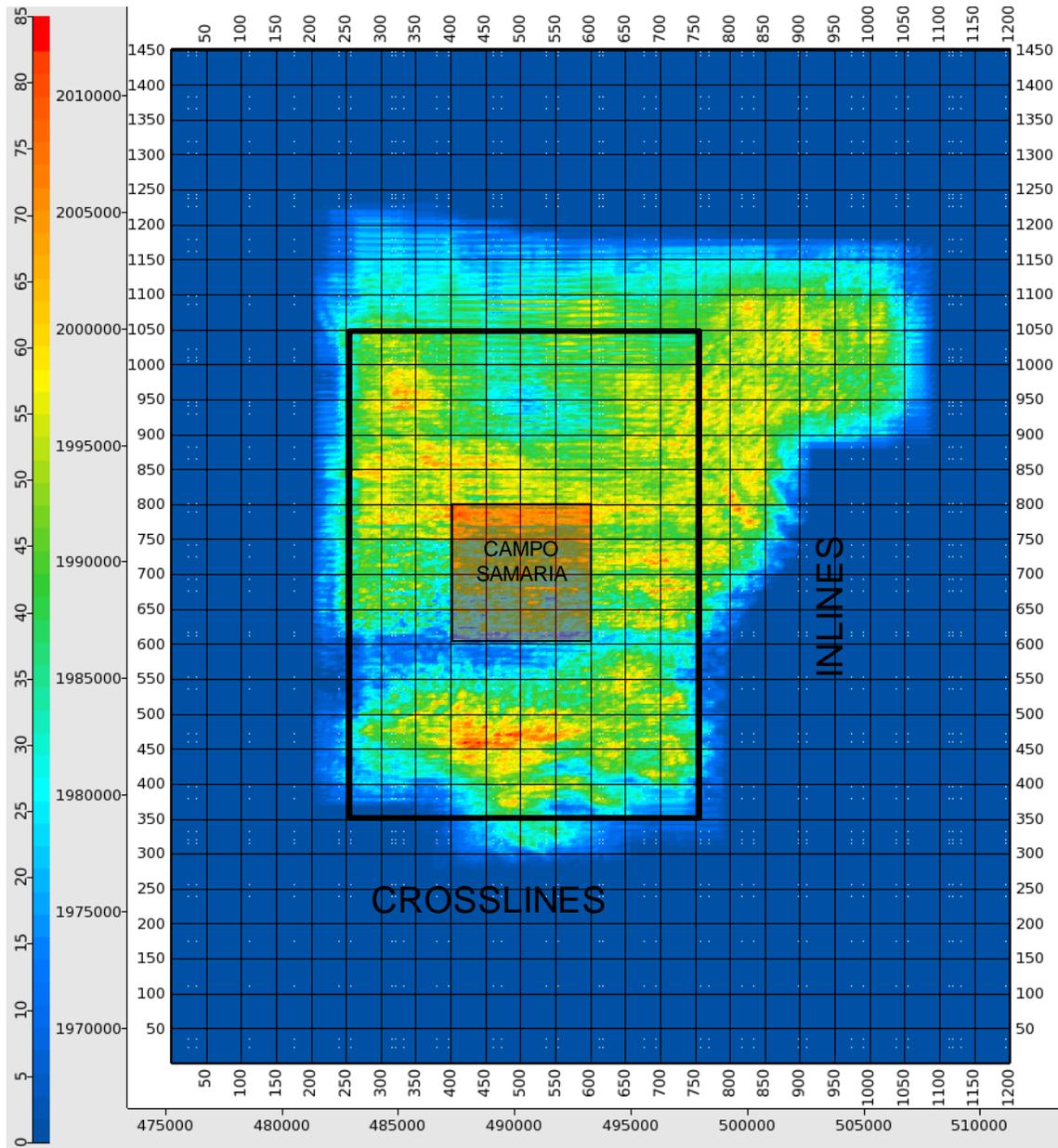


Figura 1.6 Levantamiento sísmológico 3D antecedente en el área de interés.

Control de Calidad de un Levantamiento Sismológico 3DHD

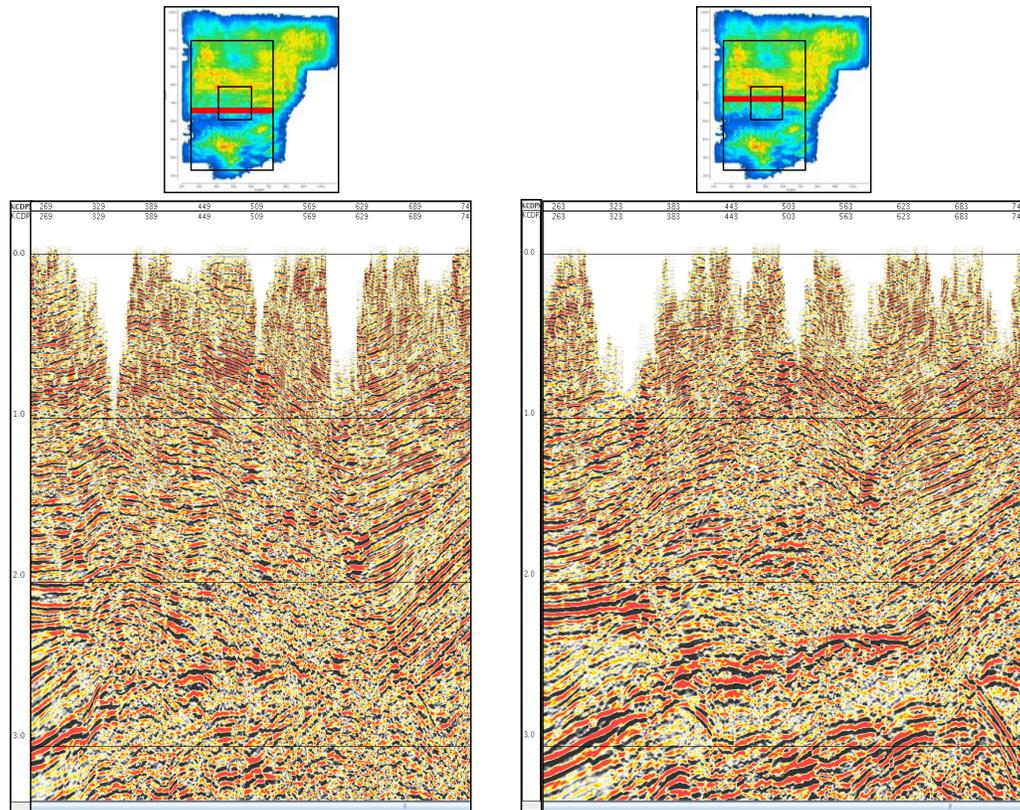


Figura 1.7 Secciones Cross Line del Levantamiento sismológico 3D antecedente en el área de interés.

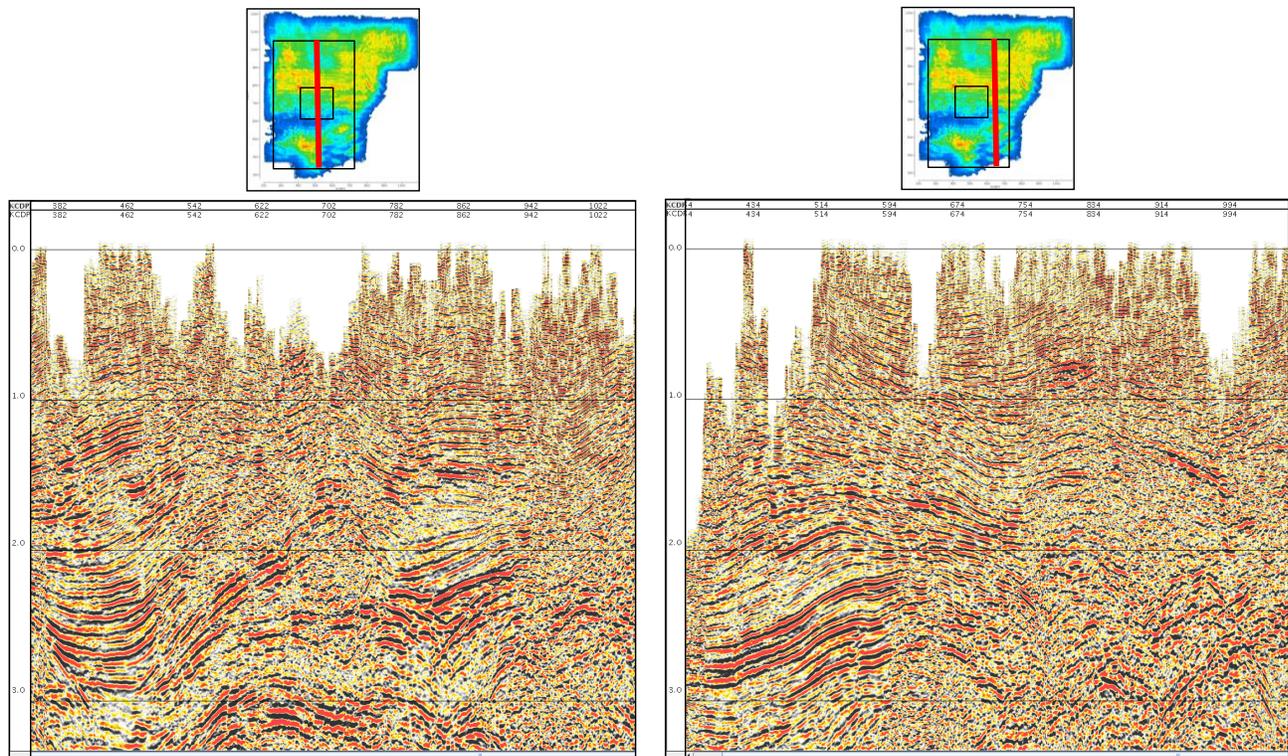


Figura 1.8 Secciones In Line del Levantamiento sismológico 3D antecedente en el área de interés.

I.6 FISIOGRAFIA

Los límites del estado de Tabasco encierran áreas que corresponden a dos provincias fisiográficas: La Llanura Costera del Golfo Sur, que abarca la mayor parte de la Entidad; y la provincia de las Sierras de Chiapas y Guatemala, en pequeñas porciones del Sur (Figura 1.9).



Figura 1.9 Provincias Fisiográficas de la zona estudiada.

I.7 HIDROGRAFÍA

Tabasco es el estado de la República Mexicana que presenta un mayor escurrimiento de agua a lo largo del año, por lo cual, en el estado se extrae menos del 1% del agua disponible al año para consumo humano; la red hidrológica de esta región es la más compleja del país, caracterizándose por entramados sinuosos de corrientes superficiales y una gran densidad de cuerpos de agua. Grandes extensiones de terreno tabasqueño son propensas a sufrir inundaciones durante los meses de crecida, presentándose numerosos cuerpos de agua intermitentes (lagos).

La mayor parte de la superficie del estado (75.22%) se localiza en la Región Hidrográfica número 30, o Región del sistema Grijalva-Usumacinta, formada por las cuencas hidrográficas del Grijalva, Usumacinta y de la Laguna de Términos; que en Tabasco ocupan el 41.45%, el 29.24% y el 4.53% respectivamente. Mientras que el 24.78% restante, se encuentra dentro de la Región Hidrográfica número 29 o Región del Coatzacoalcos, formada por dos cuencas: la del Coatzacoalcos y la del Tonalá y lagunas del Carmen y la Machona; siendo ésta última la única que tiene representación en el estado. Ambas regiones están consideradas como las más húmedas del país, en primer y segundo lugares, respectivamente (Figura 1.11).



Figura 1.11 Clasificación de Cuencas Hidrográficas de Tabasco.

- **SISTEMAS LÓTICOS**

El Río Usumacinta es el más caudaloso del país, ocupando el Río Grijalva el segundo lugar a nivel nacional; este sistema incluye innumerables afluentes de mayor o menor importancia, como los ríos Carrizal, Mezcalapa, el sistema San Pedro-San Pablo; así como una gran cantidad de lagunas y albuferas diseminadas por todo el territorio, que se conectan con las corrientes en época de crecida.

Los Ríos Mezcalapa (Grijalva) y Usumacinta, considerados como ríos maduros, forman desembocaduras de carácter deltaico, que consisten en la bifurcación de los escurrimientos en varios canales antes de llegar al mar. Esto ha dado lugar a la formación de un gran número de marismas, pantanos y lagos de fondos someros, los cuales están interconectados por una cantidad considerable de canales que drenan hacia dichas zonas o hacia los brazos activos del Río Mezcalapa, según la época del año.

El volumen medio anual descargado por el sistema Grijalva-Usumacinta al Golfo de México es de 125 mil millones de metros cúbicos; esta cifra representa el 35% del escurrimiento acuífero del país. Otros caudales importantes en la región como las del Río Coatzacoalcos, con afluentes como del Río Tonalá, también llamado Tancochapa en su curso superior, el cual sirve de límite entre Tabasco y Veracruz; el Río González, brazo del Mezcalapa que desemboca al Golfo por la Barra de Chiltepec, en el municipio de Paraíso; y algunos ríos menores en la Chontalpa, formados por el exceso de agua acumulado en los pantanos de la zona.

La corriente principal de esta cuenca nace en la Sierra de Chiapas, a 1,000 m de altitud y en la mayor parte de su recorrido sirve como límite entre Veracruz y Tabasco. Su dirección es generalmente al noroeste y es navegable en la época de crecidas en gran parte de su extensión, lo mismo que sus afluentes.

• SISTEMAS LÉNTICOS

Debido al amplio espectro de condiciones que abarca la clasificación de los cuerpos de agua estancada (desde lagos y lagunas hasta pantanos completamente cubiertos de vegetación), es difícil calcular la proporción del territorio tabasqueño cubierta por agua; sin embargo, se calcula que la mitad de las llanuras aluviales, están sumergidos en mayor o menor grado durante la temporada de lluvias.

El sistema lagunario más importante es el de las lagunas del Carmen y la Machona, en el municipio de Cárdenas; éste comprende varias albuferas de agua salobre, formadas por la acción de la Barra de Santa Anna, la barrera de playa más larga y extensa de Tabasco. En este sistema, desembocan varios ríos menores, como el Naranjeño, de caudal irregular. Los pantanos de mangle son el ecosistema predominante en las riberas de este sistema, creando nichos ecológicos importantes, especialmente para especies de aves migratorias. El área del Levantamiento Sismológico corresponde a una zona llana, de suave declive, como tal, esta surcada por afluentes importantes, los cuales cruzan de SW a NE, de los que destaca el Río Samaria, que está a la altura de la Cd. de Villahermosa, Tabasco (Figura 1.12).

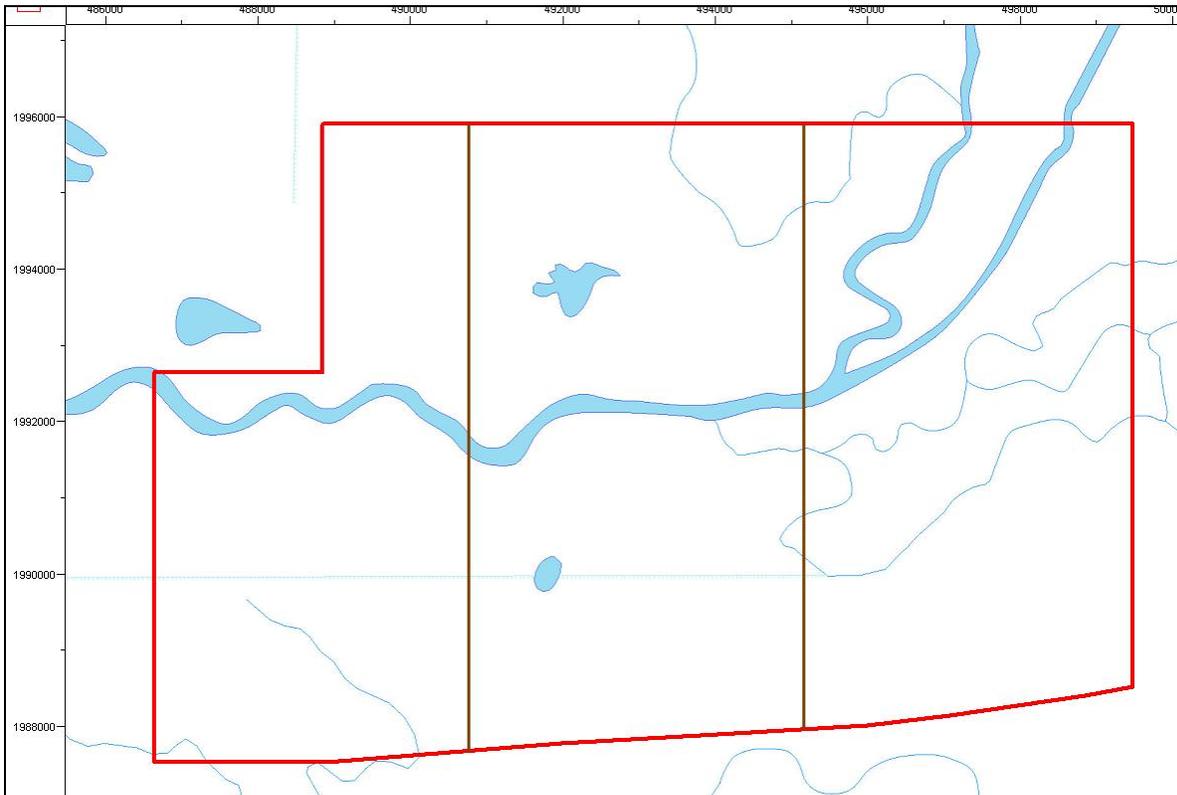


Figura 1.12 Plano con hidrografía del área del Levantamiento Sismológico.

II. MARCO GEOLÓGICO

El Estado de Tabasco comparte con los Estados de Veracruz, Chiapas y Campeche terrenos de la Llanura Costera del Golfo Sur, y con el Estado de Chiapas, los de la provincia denominada Sierras de Chiapas y Guatemala.

El desarrollo histórico-geológico del territorio tabasqueño, está controlado por eventos estratigráficos y estructurales del Mesozoico y Cenozoico, que han dado lugar a las secuencias sedimentarias sobre las que se ha configurado el actual paisaje del estado.

Los factores geológicos que han influido en el modelado del relieve de esta entidad son: el tectonismo en sus fases de extensión, de plegamiento y de dislocación del paquete rocoso, que se manifiesta con afloramientos en las sierras de Chiapas y Guatemala; y el relleno de cuencas marinas y lacustres con aportes de materiales terrestres, transportados por una compleja red de corrientes superficiales, en la Llanura Costera. El límite entre la sierra y la planicie está claramente marcado por un cambio de relieve local, manifiesto por un grueso paquete de calizas competentes, plegadas y fracturadas intensamente. La porción serrana está formada por cordones montañosos orientados hacia el noroeste, separados por valles sinclinales intermontanos angostos, que conservan la misma orientación de las estructuras de plegamiento y dislocación.

La Llanura Costera del Golfo Sur en esta entidad está plenamente desarrollada, con una red de drenaje de grande a mediana densidad, bien integrada, excepto en algunas porciones al sur y sureste de Villahermosa. En esta provincia, que ocupa la mayor parte del Estado de Tabasco, destacan los fenómenos relacionados con depósitos fluviales, lacustres, palustres y litorales. En el Estado de Tabasco las rocas más antiguas que afloran son del Mesozoico (Cretácico Superior), por su constitución litológica indican la existencia de una plataforma donde las aguas someras y tranquilas propiciaron el depósito de sedimentos carbonatados biogénicos.

Los depósitos del Cuaternario son los más extensos en la Llanura Costera del Golfo, entre ellos destacan los palustres, los aluviales, los litorales y los lacustres. Todos éstos se manifiestan como testigos del desarrollo de los ambientes actuales, desde el Plioceno hasta el presente.

En el área de estudio la geología superficial corresponde con depósitos del Cenozoico constituidos por Arenisca-Conglomerado (T_{pl}Q_{pt}Ar-C_{gp}) y algunos depósitos de Aluvión, principalmente arenas a lo largo del Río Samaria que atraviesa de Este a Oeste el área de estudio, (Figuras 2.1 y 2.2).

Desde el punto de vista geológico, el área de estudio abarca: el cinturón plegado de Reforma-Akal y el extremo SW de la Cuenca de Macuspana y Cuenca de Comalcalco, los cuales se describen de forma simplificada a continuación.

Control de Calidad de un Levantamiento Sismológico 3DHD



Figura 2.1 Mapa geológico regional de Tabasco (INEGI, 2009).



Figura 2.2 Geología Superficial Samaria-Irde 3DHD

II.1 CINTURÓN PLEGADO REFORMA-AKAL

El Cinturón Plegado Reforma-Akal (Figura 2.3), se ha considerado como la representación en el subsuelo de las estructuras de la Sierra de Chiapas. Fue llamado el Horst de Villahermosa o el Pilar Tectónico de Reforma-Akal por Meneses de Gyves (1980) y Santiago-Acevedo et al (1984).

El Cinturón Plegado consiste en una serie de estructuras anticlinales y sinclinales de rumbo NW-SE que resultaron de un evento compresivo acaecido en el Mioceno Medio (Serravaliano). Sobre este aparece una gran superficie de desacoplamiento, encima de la cual se encuentra un amplio Sistema Extensional Neógeno de rumbo perpendicular al cinturón plegado.

Ambos eventos, compresivo y extensional parecen haber estado interactuando, ya que en ciertas áreas se observan plegados tanto los sedimentos del Mioceno Superior, como la superficie de desacoplamiento sobre la que resbalan la mayoría de las fallas lítricas normales (Figura 2.4). El proceso orogénico más importante es denominado Orogenia Chiapaneca, la que se caracteriza por desarrollo de pliegues, fallas inversas y fallas de desplegamiento lateral y formación de estructuras salinas (domos, diapiros, etc).

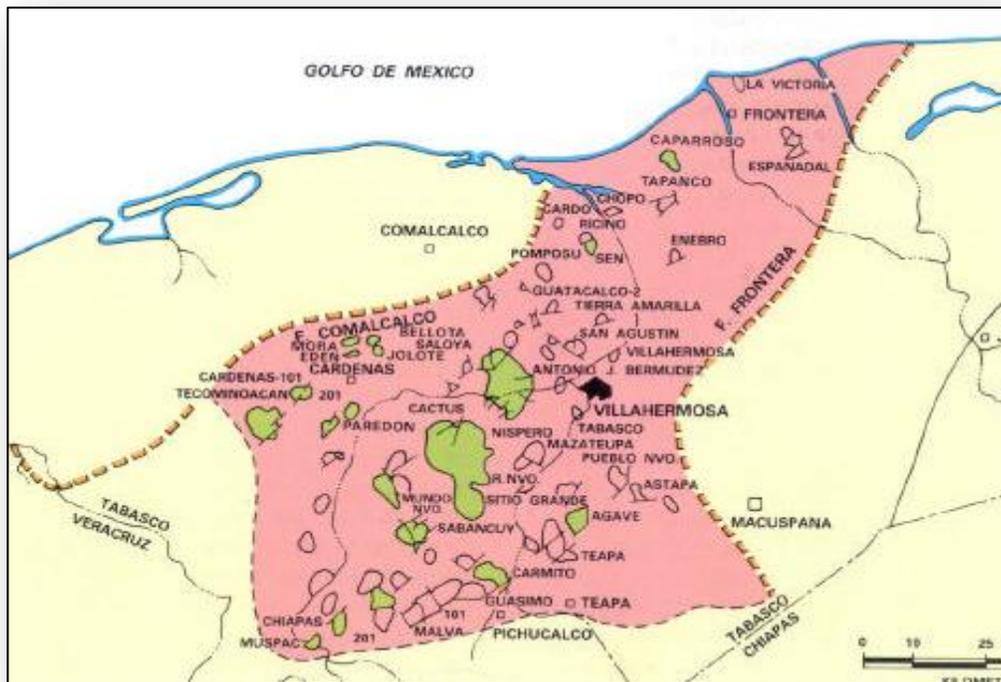


Figura 2.3 Ubicación del Cinturón Plegado de Reforma-Akal, en el sector continental.

II.2 CUENCA DE MACUSPANA

La Cuenca de Macuspana es una gran depresión, cargada con sedimentos cenozoicos, adyacente y paralela a la Plataforma de Yucatán. Su formación está relacionada a un sistema de fallas de crecimiento Neógenas. De estas, la más notoria dentro del área de estudio, corresponde a la Falla Topen-Nispero, que limita la cuenca en su porción suroeste.

Durante el Neógeno, también asociadas con la formación de la Falla Topen-Nispero, las masas de arcillas plásticas comienzan a evolucionar y desplazarse lateralmente hacia el este hasta formar las crestas y domos arcillosos que caracterizan el sector occidental de la Cuenca de Macuspana. Este fenómeno resulta de la carga sedimentaria depositada sobre su bloque bajo de la falla, lo que inicia y alimenta el desplazamiento y evacuación de la arcilla y el resultante crecimiento de las crestas.

II.3 CUENCA DE COMALCALCO

La Cuenca de Comalcalco consiste en una depresión formada durante el Mioceno Superior-Plioceno Inferior, por el efecto combinado de carga de sedimentos terrígenos, fallas de crecimiento y movimientos de sal.

El límite con el Cinturón Plegado de Reforma-Akal lo constituye un sistema de fallas normales, denominadas en conjunto sistema de Fallas de Comalcalco. En contrapartida, las fallas contra-regionales lístricas se explican como rasgos de compensación que se formaron durante la evacuación lateral de la sal (Figura 2.4).

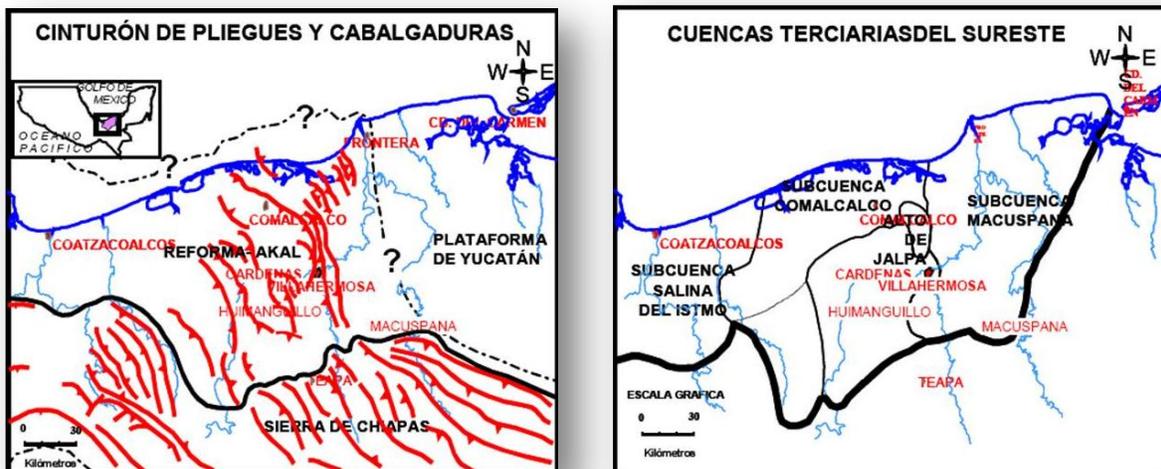


Figura 2.4 Elementos Estructurales del Cinturón Plegado de Reforma-Akal y las subcuencas de Comalcalco y Macuspana.

II.4 ESTRATIGRAFÍA

La apertura del Golfo de México en el Jurásico y la zona de subducción de la Placa de Cocos y del Caribe en el Cenozoico, han interactuado y regido los principales eventos tectónico-sedimentarios que han controlado la estratigrafía del sureste de México. El basamento propuesto para el área se define como un elemento de composición granítica, y que aflora al sur del área, se conoce como Macizo Granítico de Chiapas, su edad es del Permo-Carbonífero.

El primer registro de sedimentación es en el Calloviano, donde ocurren las primeras invasiones marinas en el área, se desarrollaron depósitos evaporíticos principalmente en las zonas de medios grabens. Estos depósitos salinos tienen gran desarrollo en el Golfo de México. El Oxfordiano se caracteriza por depósitos restringidos, constituidos por mudstone de color negro, con presencia de pirita framboidal indicativa de condiciones anóxicas, que paulatinamente evolucionan a una plataforma interna más oxigenada, en medios ambientes de intermarea y supramarea. Los sedimentos se caracterizan por mostrar secuencias evaporíticas con intercalaciones de carpetas de algas, asociadas con anhidrita de tipo Chicken wire y nodular. Condiciones de plataforma carbonatada con desarrollos de bancos oolíticos, caracterizados por la presencia de packstone y grainstone de pellets, oolitas, bioclastos e intraclastos, los procesos diagenéticos posteriores presentan la actual roca del Kimmeridgiano definida como una dolomía microcristalina, que hacia la cima intercala con un mudstone dolomitizado de color gris oscuro finamente laminado.

Durante el Tithoniano se inundó la plataforma y se depositaron rocas de cuenca con fuerte aporte de terrígenos y calizas arcillosas de color gris oscuro a negro, ligeramente dolomitizado con intercalaciones de lutitas calcáreas oscuras con radiolarios y saccocomas, estas condiciones continuaron hasta gran parte del Cretácico Inferior, durante este tiempo al sur del área, da inicio el desarrollo de una plataforma aislada, conocida como Artesa-Mundo Nuevo que prevaleció por lo menos hasta el Cretácico Superior, esta plataforma evoluciona al norte a facies de mar abierto depositándose principalmente calizas arcillosas con bandas de pedernal y margosas.

A finales del Cretácico Superior la plataforma presenta subsidencia, depositándose sólo sedimentos de cuenca con importante aporte de terrígenos, estas condiciones prevalecieron hasta el fin del Cretácico. El Paleógeno es discordante con las rocas mesozoicas en gran parte del área, se caracteriza por depósitos turbidíticos que cambian lateralmente a facies de plataforma externa. El Neógeno está en discordancia paralela y se encuentra representado por lutitas y limonitas. Durante el Mioceno Medio ocurren depósitos de flujos turbidíticos donde se lleva a cabo el depósito de lutitas, areniscas y flujos conglomeráticos. Para el Plioceno se establecen sistemas progradacionales relacionados a un sistema fluviodeltáico.

La columna estratigráfica del área se representa en las figuras 2.5 y 2.6.

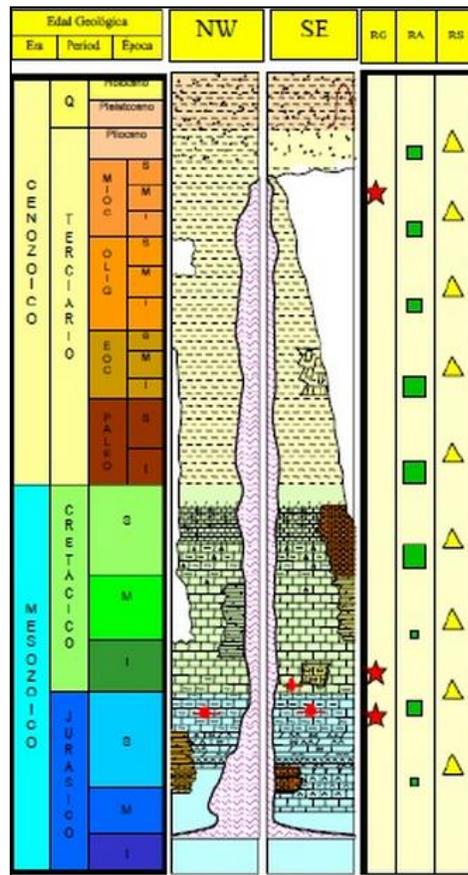


Figura 2.5 Columna estratigráfica general del Sureste de México.

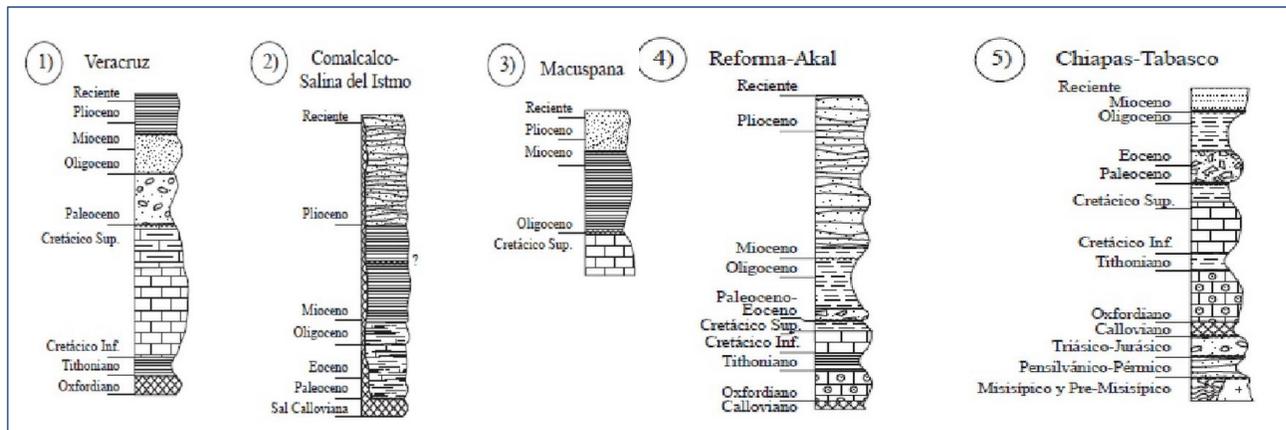


Figura 2.6 Columnas estratigráficas locales del Sureste de México.

II.5 GEOLOGIA ESTRUCTURAL

Con base al conocimiento geológico actual, la Provincia Petrolera Sureste se subdivide en 3 provincias geológicas, cada una con características bien definidas (Figura 2.7).

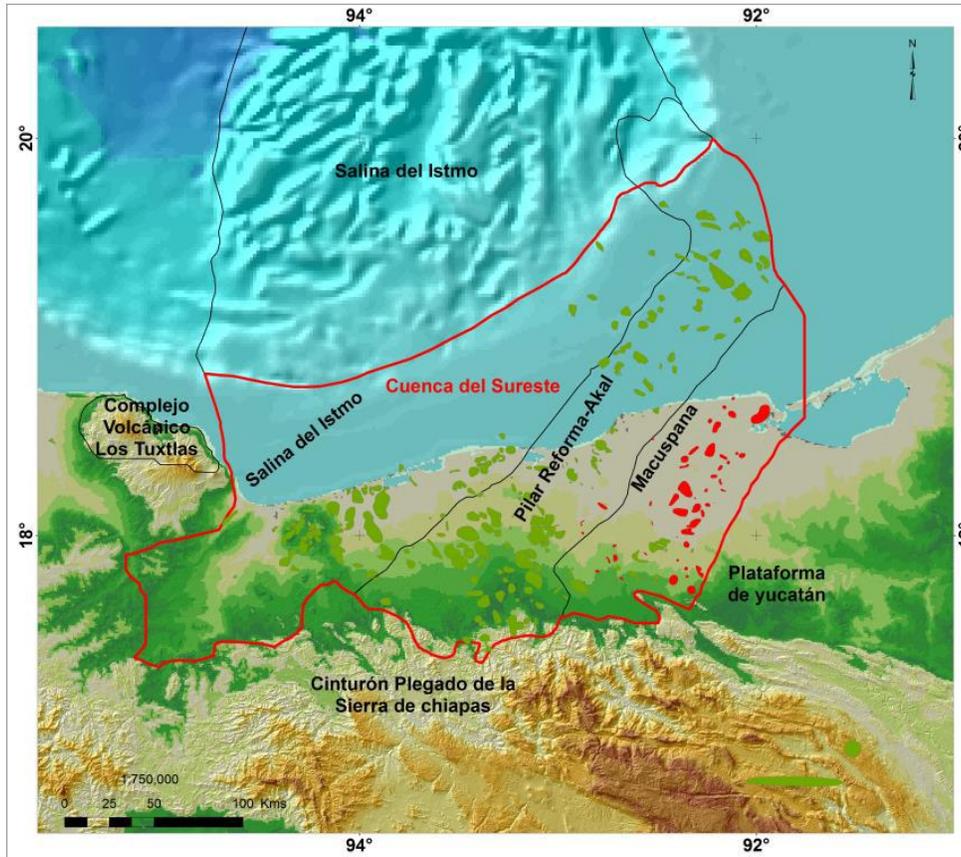


Figura 2.7 Límites geológicos de la Provincia Petrolera Sureste.

1. Salina del Istmo (Figura 2.8), corresponde a la porción sur de la Provincia Salina del Istmo, que abarca desde el frente de la Sierra de Chiapas en el sur hasta la isobata de 500 m al norte, limitando al oeste con la Cuenca de Veracruz y al este con el Pilar de Reforma-Akal. Esta provincia incluye en su porción sureste a la sub-cuenca de Comalcalco, que por su origen asociada a la carga de sedimentos y evacuación de sal. Estructuralmente se caracteriza por diapiros, paredes, lengüetas y toldos de sal que dieron lugar a la formación de cuencas por evacuación de sal, tales como la de Comalcalco, y minicuenas entre los cuerpos salinos. Las rocas mesozoicas y paleógenas están deformadas ya sea por plegamientos y fallamiento con dirección noreste-suroeste y vergencia hacia el noroeste o por rotación de capas en las proximidades de la paredes de los diapiros salinos; mientras que en el Cenozoico se presentan estructuras dómicas asociadas a masas salinas, fallas lítricas con inclinación al noroeste que afectan incluso hasta el Mesozoico y fallas lítricas contra-regionales con inclinación al sureste (Oviedo-Pérez, 1998; Gómez-Cabrera, 2003; Robles-Nolasco et al., 2004; Soto-Cuervo et al., Cruz et al., 2010).

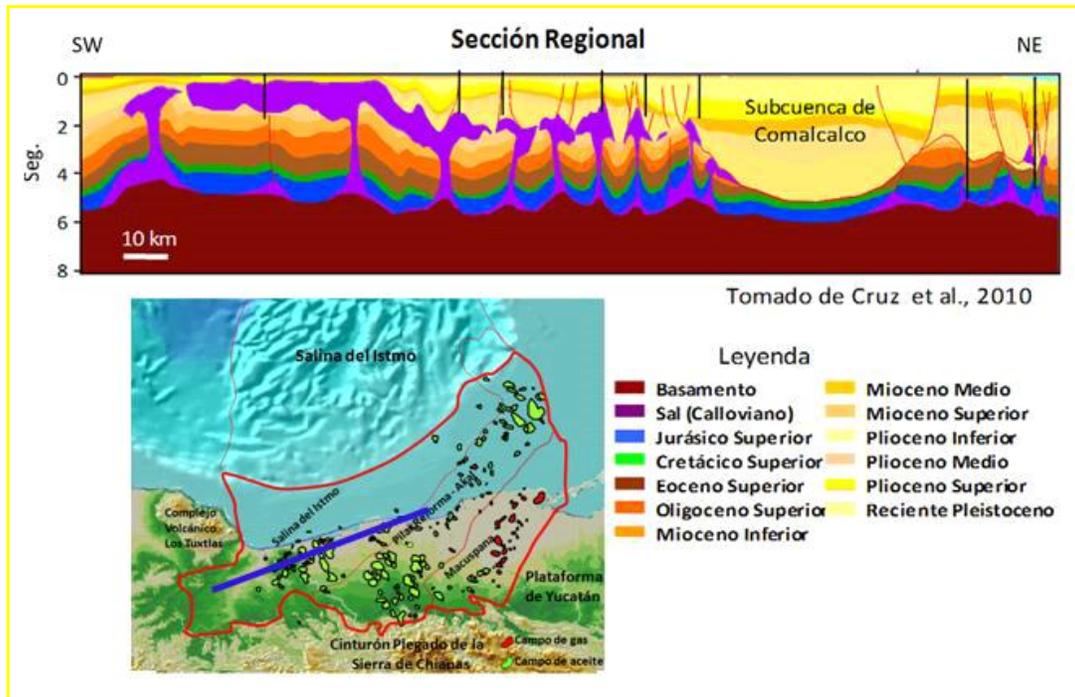


Figura 2.8 Sección estructural tipo de la Provincia Salina del Istmo.

2. Pilar Reforma-Akal (Figura 2.9), está limitado al oeste por el sistema de fallas Comalcalco y al este por el sistema de fallas Frontera, el alineamiento de diapiros arcillosos Amate-Barrancas y la falla Topén – Nispero; limita al sur con el cinturón plegado de la Sierra de Chiapas y al norte con la Plataforma de Yucatán. En el ámbito de esta provincia existen estilos estructurales sobrepuestos: el primero se caracteriza por un estilo de bloques rotados y afallados y salt rollers de edad Jurásico Tardío - Cretácico Temprano y se localiza en el borde oriental marino del pilar; el segundo está relacionado a compresión de la cubierta sedimentaria de edad Mioceno Medio-Tardío y se expresa como una cobijadura en el Alto de Jalpa; el tercero y más importante está representado por pliegues y cabalgaduras orientados noroeste-sureste con vergencia al noreste de edad Mioceno Medio-Tardío, que despegan en horizontes arcillosos y evaporíticos del Oxfordiano y Calloviano, que afectan rocas mesozoicas, del Paleógeno y del Mioceno Temprano-Medio; el cuarto es un sistema de fallas laterales con dirección noroeste-sureste en el límite Oligoceno-Mioceno (Ángeles-Aquino et al., 1994; Aquino et al., 2003; Gonzalez et al., 2004; Martinez-Kemp et al., 2005; Cruz et al., 2010).

3. Macuspana (Figura 2.10), limitada al este-sureste por un sistema de fallas normales que la separa de la Plataforma de Yucatán, destacando la falla Xicalango, al noroeste-oeste por el sistema de fallas Frontera, el alineamiento diapírico de Amate-Barrancas y la falla Topén-Nispero, y al sur por el Cinturón Plegado de Chiapas. Esta subprovincia se caracteriza por fallas lístricas del Mioceno-Plioceno temprano de orientación noreste-suroeste e inclinación al noroeste con anticlinales rollover asociados a la evolución de arcillas del Oligoceno. En la porción marina estas fallas rompen y desplazan al noroeste las rocas del Mesozoico a manera de un sistema de "rift" poniendo en contacto la sal jurásica con sedimentos del Oligoceno. Hacia su borde occidental ocurren fallas lístricas del Plioceno tardío-Pleistoceno con orientación noreste-suroeste e inclinación hacia el sureste y anticlinales elongados y apretados del Plio-Pleistoceno asociados a la inversión de las fallas lístricas del Mioceno (Cruz et al., 2010).

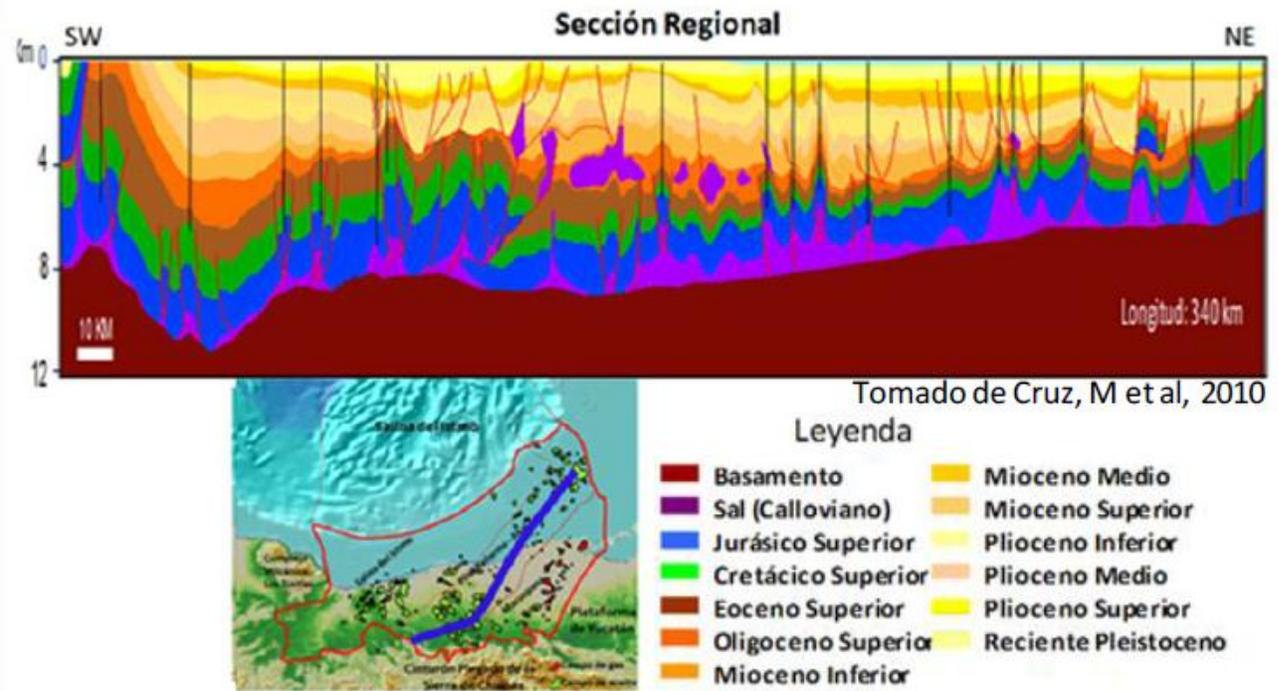


Figura 2.9 Sección estructural tipo de la Provincia Pilar Reforma-Akal.

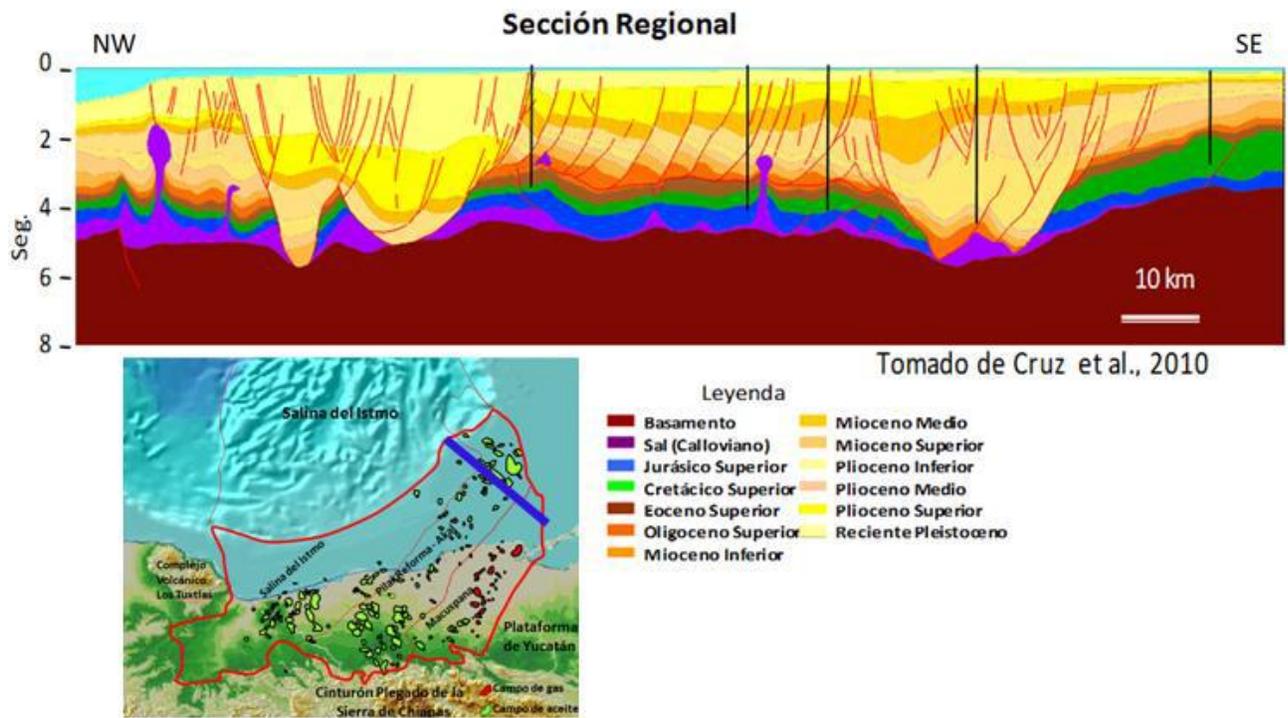


Figura 2.10 Sección estructural tipo de la Provincia Macuspana.

II.6 GEOLOGIA ECONÓMICA

El avance en el conocimiento de los mecanismos de generación, transporte y acumulación de hidrocarburos, así como la definición de elementos de control sedimentario, diagenético, estructural y químico son cruciales para entender la formación y acumulación de hidrocarburos en una secuencia estratigráfica dentro de una Cuenca Sedimentaria.

Actualmente es posible entender las condiciones de presión-volumen-temperatura-composición (PVTX) de los fluidos que se formaron, desde las etapas más tempranas de la generación de hidrocarburos hasta su acumulación.

En las Cuencas del Sureste Mexicano, particularmente en el área de Chiapas-Tabasco, las principales rocas almacenadoras son calizas con diferentes grados de dolomitización debida a fenómenos de interacción agua/roca que originaron buena porosidad secundaria en la que se alojan importantes volúmenes de hidrocarburos.

En la Figura 2.11 se presenta la distribución de los campos petroleros en el Sureste de México, así como una sección geológica regional del área construida con base en la reinterpretación de un perfil sísmico.

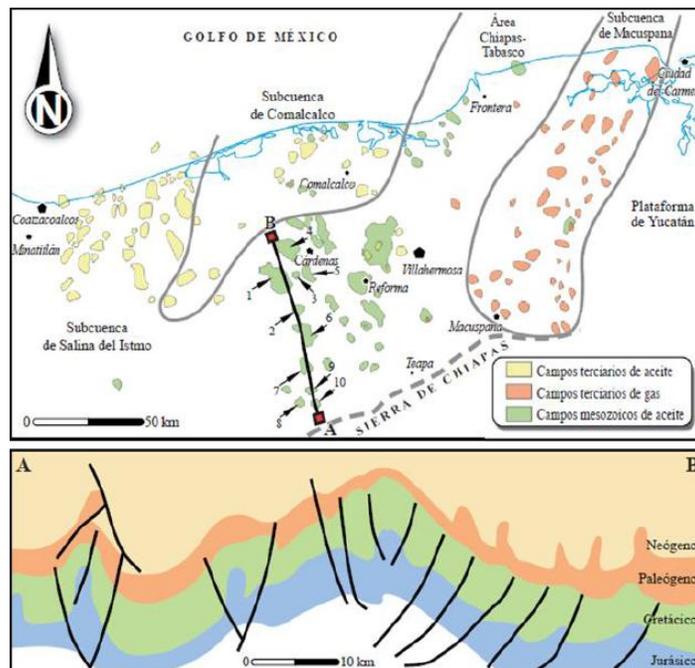


Figura 2.11 Mapa de la Porción continental de las Cuencas del Sureste, con la distribución de campos petroleros y una sección geológica representativa (Chavez-Valois et al, 2004).

En la Provincia Petrolera del Sureste se han reconocido sistemas petroleros asociados a cuatro niveles generadores principales: Oxfordiano, Tithoniano, Cretácico Inferior y Mioceno Inferior (Mello et al., 1994, Guzmán et al., 1995, Romero et al., 2000, Clara et al., 2006). Estratigráficamente la roca generadora del Oxfordiano Tardío presenta facies de carbonatos ricos en materia orgánica que contiene una mezcla de kerógeno tipo I y II, el cual bajo condiciones de madurez, a cargado a las rocas almacenadoras del

Oxfordiano Temprano en la porción marina. La segunda roca generadora corresponde al Tithoniano que es la de mayor importancia; está constituido por calizas arcillosas y lutitas calcáreas ricas en materia orgánica que contienen un kerógeno de tipo II y IIS en caso de contener azufre. De acuerdo con su evolución térmica, que varía de inmadura a sobremadura en una dirección de noreste a suroeste por diferencias de sepultamiento, esta roca generadora carga rocas almacenadoras del Kimmeridgiano, Tithoniano, Cretácico, Eoceno y Mioceno-Plioceno. Un tercer nivel generador se ha relacionado al Cretácico Inferior con un Kerógeno tipo I-II y que en condiciones de madurez ha contribuido con hidrocarburos a las rocas almacenadoras del Cretácico en el sector de la plataforma aislada Artesa-Mundo Nuevo; finalmente se tiene una cuarta roca generadora en la Cuenca de Macuspana, constituida por lutitas del Mioceno Inferior con kerógeno tipo II y III, las cuales han generado gas y condensado en zonas con mayor gradiente geotérmico y mayor sepultamiento, que son almacenados en secuencias siliciclásticas del Mioceno Medio-Superior y Plioceno y que en ocasiones llegan a tener mezclas de aportes del Tithoniano. En la parte norte de esta cuenca se tiene mínima presencia de gas biogénico.

Para el área de estudio la **Roca Generadora** corresponde a la roca del Jurásico Superior Tithoniano antes descrito. Este sistema petrolero es el más importante, donde se han recuperado mayores volúmenes de hidrocarburos.

La **Roca almacenadora** del Cretácico Inferior está constituida por mudstone-wackestone bentoníticos y arcillosos, fracturados, con foraminíferos, bioclastos e intraclastos, en ocasiones dolomitizados y mudstone-wackestone con cuarzo terrígeno e intercalaciones de lutitas limosas de color negro. La porosidad varía de 2 a 8% con espesores de 25 a 700 m. Son calizas depositadas en ambientes marinos de plataforma, talud y cuenca; la porosidad y productividad, están gobernadas principalmente por los procesos de dolomitización y fracturamiento que las han afectado a lo largo de su historia de diagénesis.

La roca almacén del Cretácico (Albiano), está constituida por mudstone-wackestone de foraminíferos y dolomías microcristalinas, fracturadas, con laminaciones y estilolitas y en el Cenomaniano por mudstone-wackestone arcilloso, fracturado, con intercalaciones de lutita arenosa y limosa con abundantes foraminíferos planctónicos. La porosidad varía de 2 a 8% llegando a ser hasta 16%; los espesores varían de 25 a 500 m. Las rocas del Albiano-Cenomaniano corresponden principalmente a depósitos de ambientes de plataforma, talud y cuenca.

La roca almacenadora del Cretácico Superior está representada por una brecha calcárea dolomitizada, que varía de color gris claro, café claro a crema, en partes bentonítica con exoclastos que varían de 0.2 a 25 cm, los cuales están constituidos de mudstone café a crema dolomitizado, en partes cretoso, intercalado con mudstone-wackestone café claro de bioclastos e intraclastos en una matriz calcáreo-bentonítica dolomitizada total o parcialmente, con una porosidad entre 4 a 24% y un espesor neto promedio de 250 m. Existen 18 campos cuyas rocas almacenadoras son del Cretácico Superior, la mayoría corresponden a depósitos de talud y cuenca aunque existen algunos campos relacionados con ambientes de plataforma.

La **Roca Sello** para este sistema petrolero corresponde a las litofacies que se encuentran representadas en su mayor parte por mudstone-wackestone altamente arcillosos, mudstone arcilloso con intercalaciones de lutita, y dolomías arcillosas cripto y microcristalinas que se encuentran intercaladas con mudstone dolomítico y/o recristalizado. En general, los espesores de los sellos se encuentran entre 3 y 38 m, siendo el Albiano el que presenta los espesores más grandes de aproximadamente 38 m distribuidos principalmente en la parte oeste de la provincia. Para el Cretácico Superior la roca sello la constituyen lutitas bentoníticas y margas del Paleoceno Inferior, con un espesor que varía de 40 a 90 m.

Las **Trampas** en las que se encuentran los yacimientos del Jurásico y las del Cretácico tienen una estrecha relación con la paleogeografía y la diagénesis, ya que la primera determina la amplitud y forma de los plegamientos en la porción limítrofe con el Cinturón Plegado de Chiapas, mientras que la segunda controla el sistema poroso y la permeabilidad. Durante la compresión originada por el proceso orogénico del Mioceno que afectó a la Provincia Petrolera Sureste, el plegamiento formó trampas con las siguientes características:

- Pliegues amplios cabalgados e imbricaciones en brechas calcáreas de talud de la cima del Cretácico. Figura 2.12.
- Domos fragmentados por abultamientos de sal en calizas clásticas de Plataforma y brechas.
- Pliegues amplios, en ocasiones fusiformes, afallados en uno u ambos flancos, orientados NW-SE, en calizas dolomitizadas y fracturas de talud y cuenca.
- Pliegues angostos, afallados en sus flancos de relieve alto, con orientación NNW-SSE, en calizas de plataforma.
- Pliegues angostos afallados en uno o ambos flancos en calizas y dolomías de cuenca fracturadas.

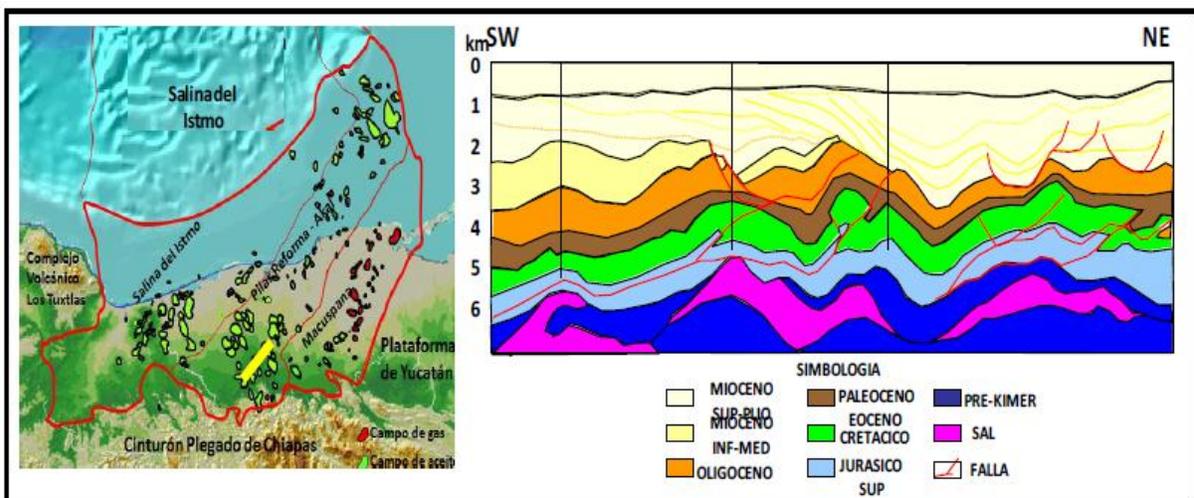


Figura 2.12 Mapa de localización y sección sísmica interpretada de trampas típicas del Cretácico. Se observan pliegues por expulsión y pliegues amplios afallados en uno o ambos lados y domos fragmentados por inflación de sal.

III. PRUEBAS DE MONITOREO DE VIBRACIONES SUPERFICIALES Y CONTROL DE CALIDAD

III.1 OBJETIVO DE LAS PRUEBAS

Establecer las distancias mínimas de seguridad que se aplicaran en el desarrollo del levantamiento sismológico Samaria-Íride 3DHD y dar cumplimiento al contrato de acuerdo a lo estipulado con el cliente; considerando la planeación de puntos de tiro con respecto a los diferentes obstáculos que se ubican dentro del polígono de diseño, mediante la obtención de mediciones que nos permitan establecer las distancias mínimas de seguridad que se utilizarán en el desarrollo del Levantamiento Sismológico presente, observando que las amplitudes de vibración estén por debajo de las máximas permisibles de acuerdo a la NOM-026-SESH-2007 y que garanticen el cumplimiento de los objetivos petroleros sin dañar la infraestructura existente en el área, utilizando los acelerógrafos NOMIS SEISMOGRAPHS. Para llevar a cabo los trabajos de exploración sísmica se requiere y se manipula una gran cantidad de equipo, el cual es desplegado en amplias extensiones de terreno en donde se presenta interacción con las comunidades. Por lo anterior fue necesario normar esta actividad para que se lleve de acuerdo a prácticas y procedimientos técnicos que aseguren un clima armónico durante su ejecución, para prevenir y controlar los posibles daños a las infraestructuras existentes en el área de estudio.

Para alcanzar estos objetivos en agosto de 2007 se expidió la Norma Oficial Mexicana **NOM-026-SESH-2007**, la cual establece los requerimientos que se deben cumplir durante la planificación, el diseño, la ejecución y abandono del área de trabajo de un estudio de prospección sismológica petrolera, donde se especifican las amplitudes máximas permisibles de vibración que garantizan el cumplimiento de los objetivos petroleros sin dañar la infraestructura existente en el área. A continuación podemos apreciar los valores de vibración permitidos y establecidos en la Norma (Figuras 3.1 y 3.2).

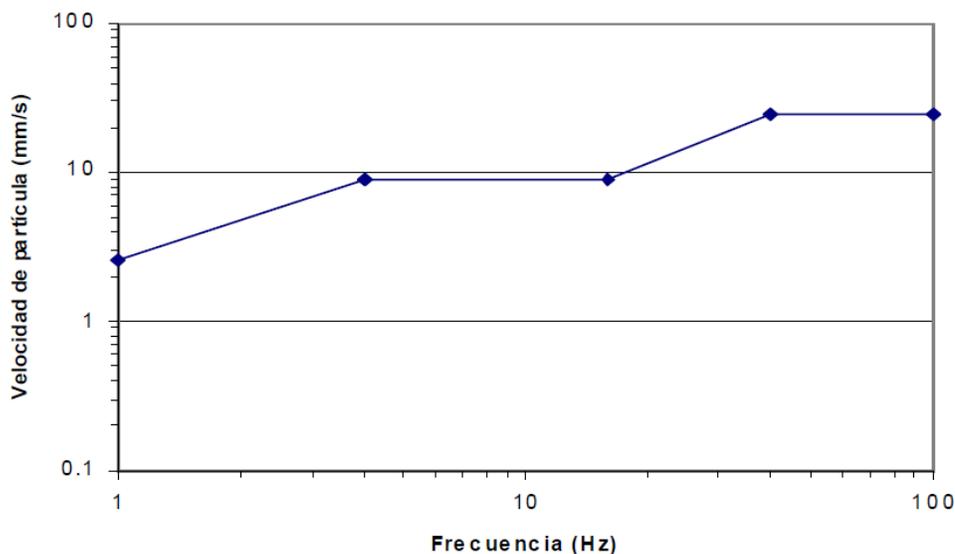


Figura 3.1 Curva Límite de referencia de la NOM-026SESH-2007.

| Frecuencia (Hz) | Velocidad de partícula (mm/s) |
|-----------------|-------------------------------|
| 1-4 | 2.54 - 9 |
| 4-16 | 9 |
| 16-40 | 9 - 25 |
| 40-100 | 25 |

Figura 3.2 Especificaciones de velocidades permitidas por la NOM-026SESH-2007.

III.2 CONSIDERACIONES GENERALES

Para llevar a cabo el monitoreo de vibraciones fue necesario utilizar 3 acelerógrafos de adquisición de la marca NOMIS SEISMOGRAPHS (Fotografía 1). Cada equipo cuenta con un sensor multicomponente de pantano (Fotografía 2) y el software proporcionado por el fabricante para el procesamiento de los datos (Figura 3.3).



Fotografía 1. Equipo de adquisición.



Fotografía 2. Sensor multicomponente.

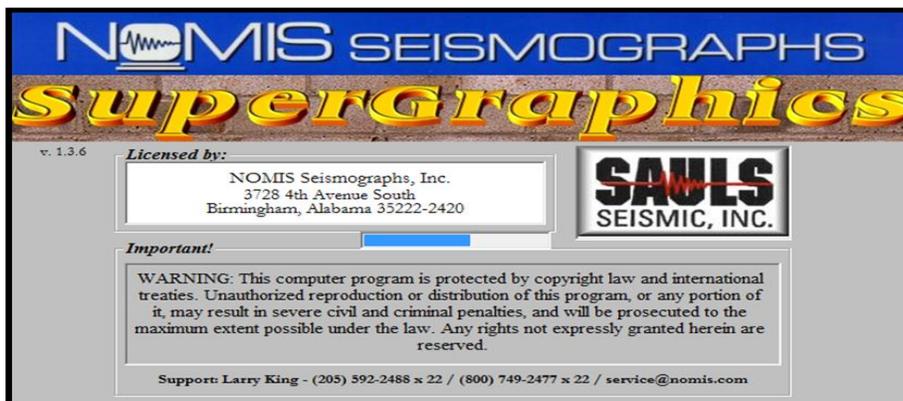


Figura 3.3 Software de procesamiento de datos.

De acuerdo a lo establecido en la metodología de trabajo se revisó el funcionamiento y sincronización de los equipos de adquisición, en fecha y hora (Fotografía 3).



Fotografía 3. Sincronización de NOMIS en fecha y hora.

III.3 DESARROLLO

Para realizar las pruebas, se diseñó un arreglo de 9 puntos de tiro en 3 líneas paralelas entre sí, siendo 3 puntos de tiro por cada línea. El diseño e identificación de las fuentes es como se muestra en la Figura 3.4.

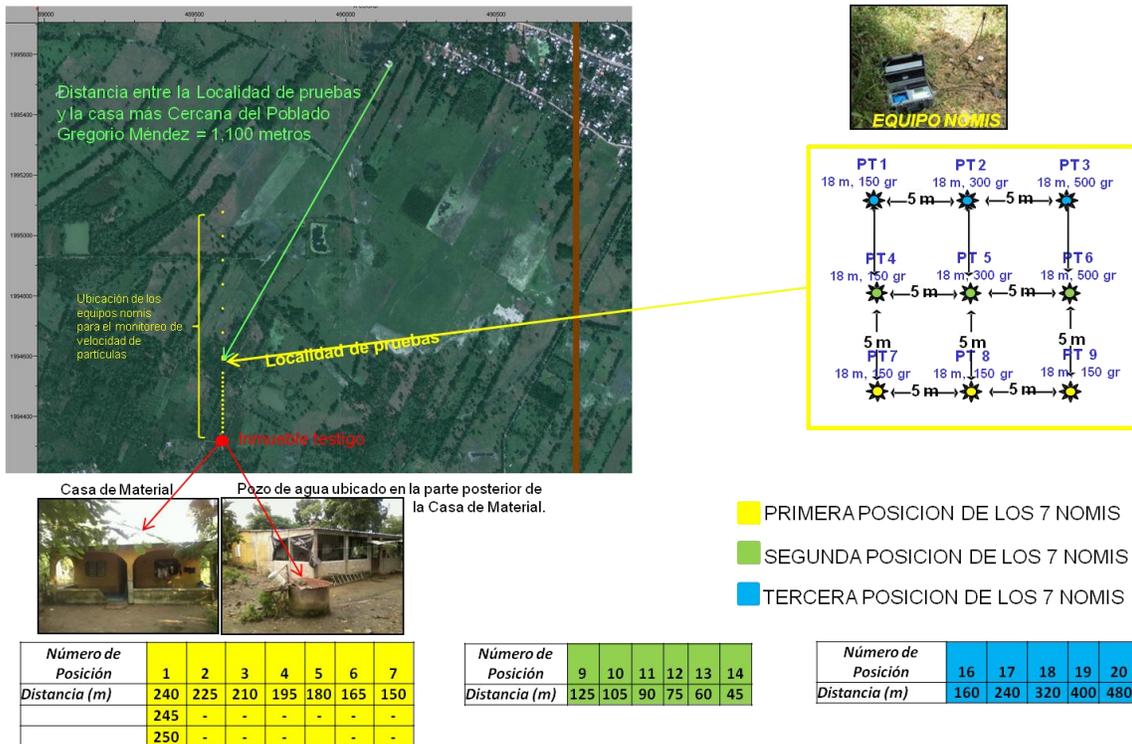


Figura 3.4 Diseño de distribución de Fuentes.

Las pruebas se realizaron con un inmueble testigo, por lo que se invitó a las autoridades de la zona y a un notario para tener documentado todo lo realizado en la pruebas; los puntos de tiro se detonaron en 3 series para dar tiempo de posicionar los NOMIS en la siguiente fase. Los 9 puntos de tiro tenían cargas de 150, 300 y 500 grs, todos unitarios.

III.4 RESULTADOS

Después de haber analizado los registros de velocidad de partícula y los diferentes gráficos, se puede concluir que con distancias mayores a los 10 metros (en algunos casos con distancias cercanas hasta de 20 metros) y considerando una carga de 0.500 Kg, se garantiza la seguridad de los inmuebles y construcciones de material ubicados en la proximidad de la zona de pruebas de campo. Con esto se está dando cumplimiento a lo establecido en la norma NOM-026-SESH-2007.

Durante la adquisición de datos sísmicos se continuó con el monitoreo de vibraciones para ratificar que los niveles de velocidad de partícula estén debajo del rango establecido en la Norma NOM-026-SESH-2007 y en caso contrario tomar las medidas que sean necesarias para cumplir con esta. A continuación se muestra en la Tabla 3.1 las distancias mínimas de seguridad propuesta.

| DISTANCIAS DE SEGURIDAD PROPUESTA PARA SAMARIA-IRIDE 3DHD | | | |
|---|--------------------|-------|-------|
| TIPO DE OBSTÁCULO | DISTANCIA (metros) | | |
| | 500 g | 300 g | 150 g |
| Terracerías | 20 | 20 | 10 |
| Gasoducto Fuera de Servicio | 20 | 20 | 20 |
| Gasoducto/Oleoducto con Ø entre 6" y 12" | 20 | 20 | 20 |
| Gasoducto/Oleoducto Mayores de 12" de Ø | 20 | 20 | 20 |
| Arroyos | 40 | 30 | 20 |
| Batería Petrolera | 100 | 60 | 40 |
| Bebedero (Concreto) | 100 | 60 | 40 |
| Carretera Pavimentada | 100 | 60 | 40 |
| Casa de Material | 100 | 60 | 40 |
| Compuertas de concreto | 100 | 60 | 40 |
| Estanque Piscícola (Natural) | 100 | 60 | 40 |
| Estanque Piscícola (Concreto) | 100 | 60 | 40 |
| Jagüey | 100 | 60 | 40 |
| Línea Eléctrica de Baja Tensión | 100 | 60 | 40 |
| Línea Eléctrica de Alta Tensión | 100 | 60 | 40 |
| Pileta | 100 | 60 | 40 |
| Pozo Petrolero y Tuberías menores de 6" Ø | 100 | 60 | 40 |
| Pozo de Agua con Anillos | 100 | 60 | 40 |
| Presas Naturales | 100 | 60 | 40 |
| Puentes de Concreto | 100 | 60 | 40 |
| Ríos | 100 | 60 | 40 |
| Tapón o Compuerta de Presa (Concreto) | 100 | 60 | 40 |
| Embarcadero de Ganado (Concreto) | 100 | 60 | 40 |

Tabla 3.1 Distancias mínimas de seguridad obtenida de la zona de pruebas.

La anterior tabla cumple y garantiza el cumplimiento de la Norma NOM 026-SESH-2007 y está con un margen superior del 36 % de las distancias mínimas de seguridad obtenida en la zona de pruebas de campo. Aunado a esto en algunas zonas densamente pobladas o en zonas con antecedentes de reclamos por daños a inmuebles de estudios pasados, se tiene una tabla alterna que se contempla aumentar la distancia mínima de seguridad o disminuir la carga óptima a una distancia superior a 120 metros para las casas y zonas pobladas, (ver la tabla 3.2).

| LEVANTAMIENTO SISMOLÓGICO SAMARIA-IRIDE 3DHD | | | |
|---|---------------------------|----------------|----------------|
| DISTANCIAS MÍNIMAS DE SEGURIDAD A PUNTOS DE TIRO | | | |
| TIPO DE OBSTÁCULO | CARGA | | |
| | 500 gr. | 300 gr. | 150 gr. |
| | DISTANCIA (metros) | | |
| Batería Petrolera | 100 | 60 | 40 |
| Pozo Petrolero y Tuberías menores de 6" Ø | 100 | 60 | 40 |
| Gasoducto Fuera de Servicio | 20 | 20 | 20 |
| Gasoducto/Oleoducto con Ø entre 6" y 12" | 20 | 20 | 20 |
| Gasoducto/Oleoducto Mayores de 12" de Ø | 20 | 20 | 20 |
| Casa de Material | 120 | 120 | 120 |
| Casa de Madera con piso de concreto | 120 | 120 | 120 |
| casa de Madera sin piso de concreto | 100 | 60 | 60 |
| Pozo de Agua con Anillos | 100 | 60 | 40 |
| Pileta | 100 | 60 | 40 |
| Puentes de Concreto | 100 | 60 | 40 |
| Tapón, Compuerta de Presa o elementos de Concreto | 100 | 60 | 40 |
| Bebedero (Concreto) | 100 | 60 | 40 |
| Embarcadero de Ganado (Concreto) | 100 | 60 | 40 |
| Jagüey | 100 | 60 | 40 |
| Presa Natural | 100 | 60 | 40 |
| Ríos | 100 | 60 | 40 |
| Arroyos | 40 | 30 | 20 |
| Estanque Piscícola (Natural) | 100 | 60 | 40 |
| Estanque Piscícola (Concreto) | 100 | 60 | 40 |
| Línea Eléctrica de Baja Tensión | 100 | 60 | 40 |
| Línea Eléctrica de Alta Tensión | 100 | 60 | 40 |

Tabla 3.2 Distancias mínimas de seguridad alterna para zonas urbanas con antecedentes conflictivos.

III.5 CONTROL DE CALIDAD EN LAS FASES DE CAMPO

a) TOPOGRAFÍA.

El control de calidad de los puntos fuentes y receptoras, posicionados por el departamento de Topografía, mediante el sistema GPS o RTK, se realizó para corroborar que éstos, cumplan con las distancias mínimas de seguridad tomando en cuenta las normas dictadas por SEMARNAT, NOM-026-SESH-2007, INAH.

La Tabla de distancias mínimas de seguridad fue establecida en conjunto por personal de Control de Calidad, Arqueología, Ecología y Personal Técnico de PEP mediante el análisis de los datos obtenidos de estudios anteriores y pozos comparativos en partes del estudio con mayor presencia de obstáculos naturales o culturales.

En el caso de presentarse algún obstáculo éstos deberán cumplir con los criterios de desplazamiento predeterminados por PEP y COMESA, con la finalidad de evitar repetir trayectorias en la señal sísmica y verificar la contribución de las nuevas posiciones en el apilamiento. A continuación en la Figura 3.5 se muestra la Logística operativa inicial así como el Preplot de Fuentes y Receptoras.

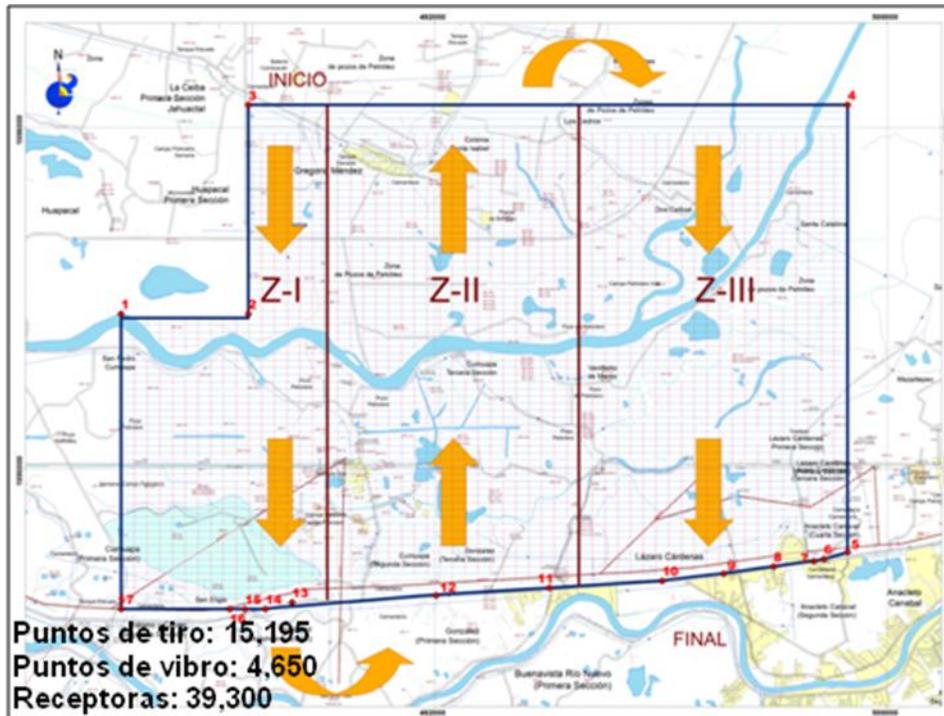


Figura 3.5 Preplot y Logística inicial del levantamiento Samaria-Íride 3DHD.

Ésta información previamente analizada, fue ingresada a la base de datos de Control de Calidad, donde se llevó un registro de cada punto fuente y receptor.

Los desplazamientos de los puntos se realizaron por diversas causas siendo las predominantes: casas, ductos, pozos de agua, piletas, montículos y permisos de servidumbre de paso negado.

Al término del levantamiento se adquirieron 12,096 Pts y del volumen de Pts hubo un faltante de 3,099 Pts que no se lograron ubicar por diversos obstáculos culturales o sociales; de los Pvs se adquirió 5,224.

Durante el estudio se realizaron varias propuestas de reforzamiento de FOLD, por lo que cabe la pena particularizar la de fuente alterna de energía (Pvs) ya que en un inicio los parámetros eran de 25 metros entre cada uno de ellos pero se analizó dejando al final 12.5 metros entre cada uno de ellos; para esto se inició con la revisión en campo de las zonas que presentaban caminos de acceso en las zonas con bajo cubrimiento de FOLD debido a la baja o nula posición de PTs para hacer una planeación de Puntos Vibrados y hacer su análisis de atributos sísmicos. Paralelamente se realizaron algunos registros de prueba para definir los parámetros óptimos de la fuente alterna de vibradores, que nos permitieran cubrir las áreas de bajo apilamiento en zonas con gran cantidad de obstáculos culturales, que garantizaron la continuidad de los horizontes a nivel objetivo conservando Offset máximos de 2,954.76 m utilizando 2 VIBRADORES IVI-47, de 35,000 lb; de su análisis se obtuvo la siguiente configuración de parámetros:

1. TIPO DE BARRIDO: LINEAL
2. FRECUENCIAS DE BARRIDO: 10 – 120 Hz.
3. LONGITUD DE BARRIDO: 12 SEGUNDOS
4. NUMERO DE BARRIDOS: 2

5. LONGITUD DE TAPER: 300 MILISEGUNDOS
6. DRIVE LEVEL: 80 %

La cantidad total de Pvs adquiridos es de 5,224. A continuación se presenta el indicador de desplazamiento de Fuentes en la Figura 3.6.

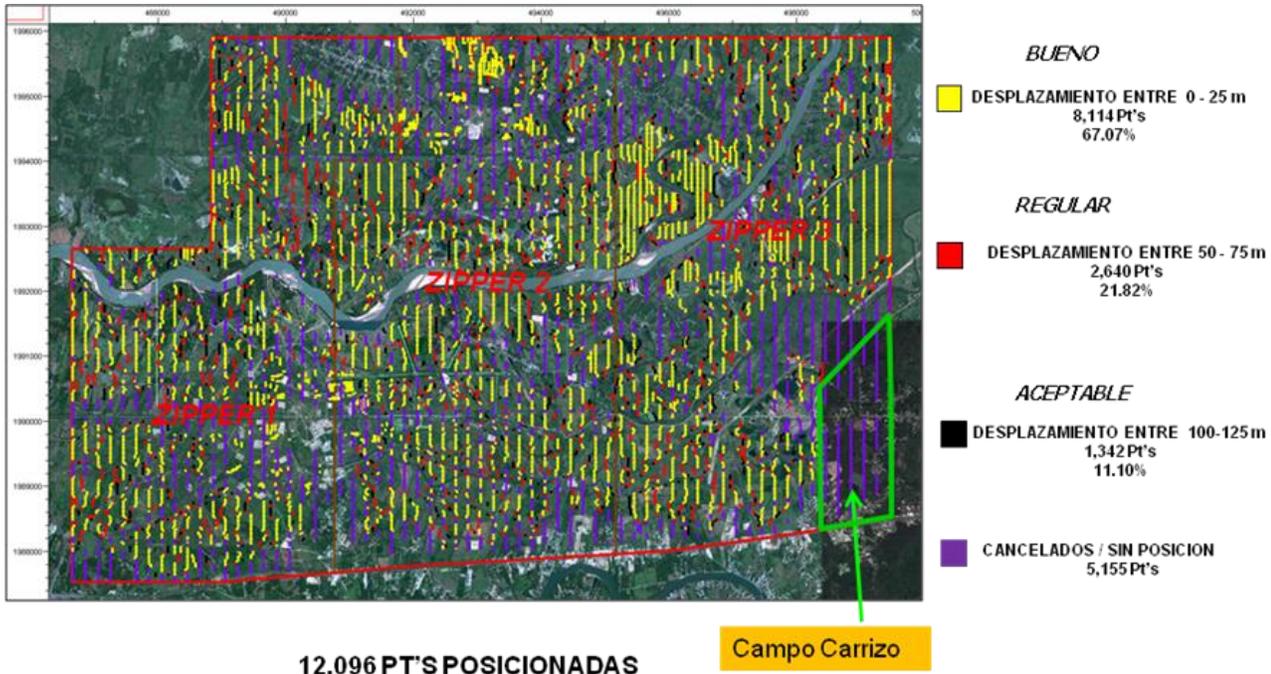


Figura 3.6 Indicador de desplazamiento del levantamiento Samaria-Íride 3DHD.

a.1) CRITERIOS DE DESPLAZAMIENTO

Para realizar el desplazamiento de estaciones fuente y/o receptores se consideró siempre el tipo de obstáculo, sus dimensiones, características y distancia de seguridad e incluso la litología; todo lo anterior con la finalidad de evitar conflictos sociales, riesgo de daño a personas, instalaciones o estructuras civiles.

Para llevar a cabo esta tarea se contó con el apoyo de ortomapas; además se realizaron reconocimientos físicos con grupos de scouting de control de calidad quienes identificaron y referenciaron los obstáculos encontrados en el área de trabajo, para posteriormente vaciar y validar esta información en las bases de datos, la cual tuvo gran utilidad al momento de programar y verificar el posicionamiento de cada estación. Los analistas de diseño generaron los atributos geofísicos para garantizar la preservación de offsets, azimut y apilamiento de acuerdo al diseño original.

El principal criterio para la recuperación de puntos de tiro consistió en desplazarlos en cantidades que fueran múltiplos de 25 m y hasta una distancia máxima de 100 m. Al efectuar la recuperación de estaciones siempre se trató de mantenerlos lo más cercano posible a su posición original sin repetir posiciones de compensación, esto significa que dos estaciones diferentes no podrían tener la misma ubicación. A continuación, en la Figura 3.7 se muestra el ejemplo de las posibles posiciones para desplazar un punto de tiro.

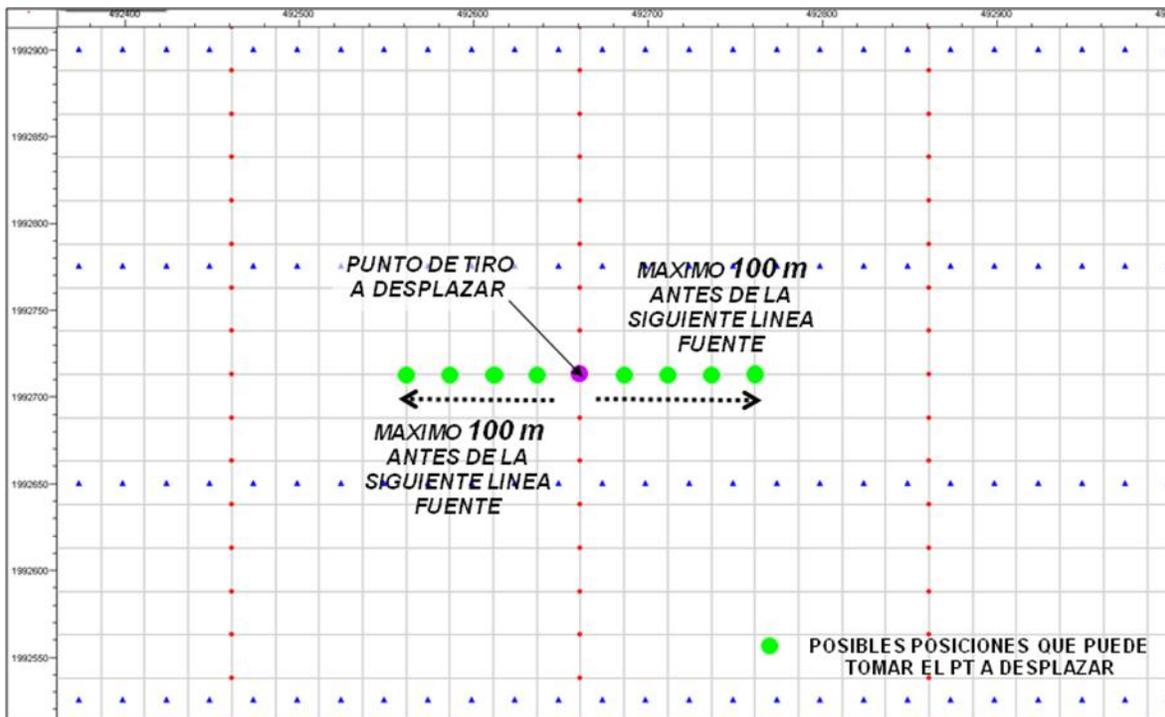


Figura 3.7 Desplazamiento de estaciones Fuentes.

El desplazamiento de estaciones receptoras se realizará en dirección perpendicular al rumbo de las líneas receptoras; considerando que las estaciones se moverán metro a metro, colocándolas de tal forma que la línea quede lo más suave posible bordeando la zona de exclusión.

El máximo desplazamiento de las estaciones receptoras no debe de exceder la mitad de la distancia que existe entre dos líneas receptoras. Para los casos donde la distancia de desplazamiento sea mayor a 62.5 m, se realizaran con la autorización del departamento de Control de Calidad y Procesado. En la Figura 3.8 se muestra el ejemplo de desplazamiento para Receptoras.

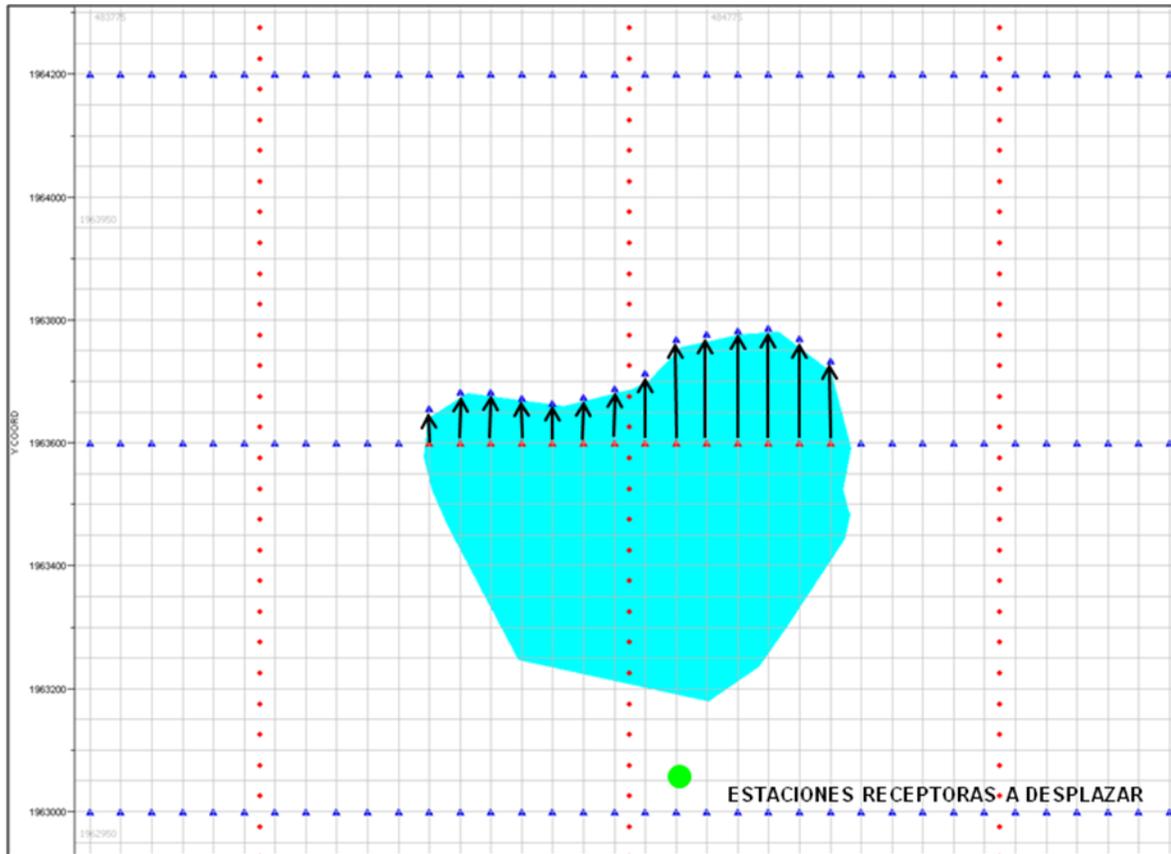


Figura 3.8 Desplazamiento de estaciones Receptoras.

b) PERFORACIÓN Y CARGADO DE POZOS

Los parámetros óptimos empleados de perforación y cantidad de carga por pozo para el Levantamiento Sismológico Samaria-Íride 3DHD son de un (1) pozo unitario a 18 metros de profundidad y carga de 0.500 Kg. En lugares en los que la cantidad de obstáculos fue considerable se emplearon cargas de .300 y .150 Kg. de explosivo Geoprime, bajando el radio de seguridad al obstáculo para evitar la cancelación de la Fuente. Siempre se tomaron en cuenta los antecedentes de estudios sísmicos y respaldado por la prueba del monitoreo de vibraciones superficiales.

Para el cargado de los pozos, el departamento de control de calidad, en coordinación con el área de Perforación y Carga Pozos PEP, proporcionó diariamente el programa de carga, considerando la logística y avance de Observación, así como las áreas de mayor complejidad para mantener un número determinado de puntos de tiro que antecedan a la observación.

Para éste levantamiento se determinó como carga optima 0.500 kg por pozo unitario; se manejaron cargas bajas en zonas que representaron una densidad considerada de población, una infraestructura con riesgo de fractura y se tomó como consideración la recomendación de algún inmueble por parte de propietario y en estos caso se cargo con 0.300 y 0.150 Kg por cada pozo unitario. En la Figura 3.9 se presenta la distribución de la carga.

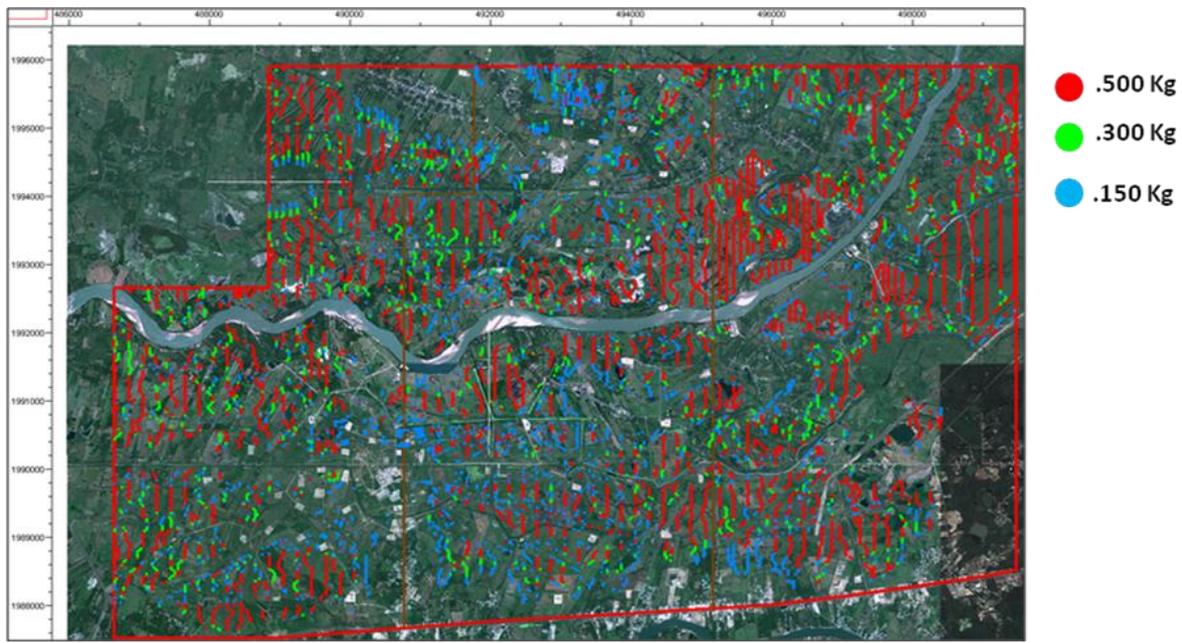


Figura 3.9 Plano final de distribución de cargas. Carga Óptima 0.500 Kg.

En el programa de cargado de pozos se incluye la posición real del punto de tiro, el número de swath y zipper y la carga programada. Por último la cantidad de puntos de tiro programados en el día y el material de explosivo y fulminantes requerido.

Los reportes provenientes de campo de Perforación y Cargado de pozos se recibieron diariamente; la información de los mismos fue ingresada a la base de datos y se verificó la cantidad de explosivo y fulminante utilizado, así como la profundidad a la cual fue depositada para confirmar la litología o corte reportado por perforación y tener el control en el momento de adquisición; en la Figura 3.10 se muestra el Plano del lecho sobre el cual quedo depositada la carga.

Los datos controlados en la base de datos fueron, fechas de perforación y cargado, litología, la existencia de ademe, cantidad de cartuchos (caña de dinamita), tipo de explosivo, cantidad de fulminante utilizado y el grupo de trabajo que realizó la actividad.

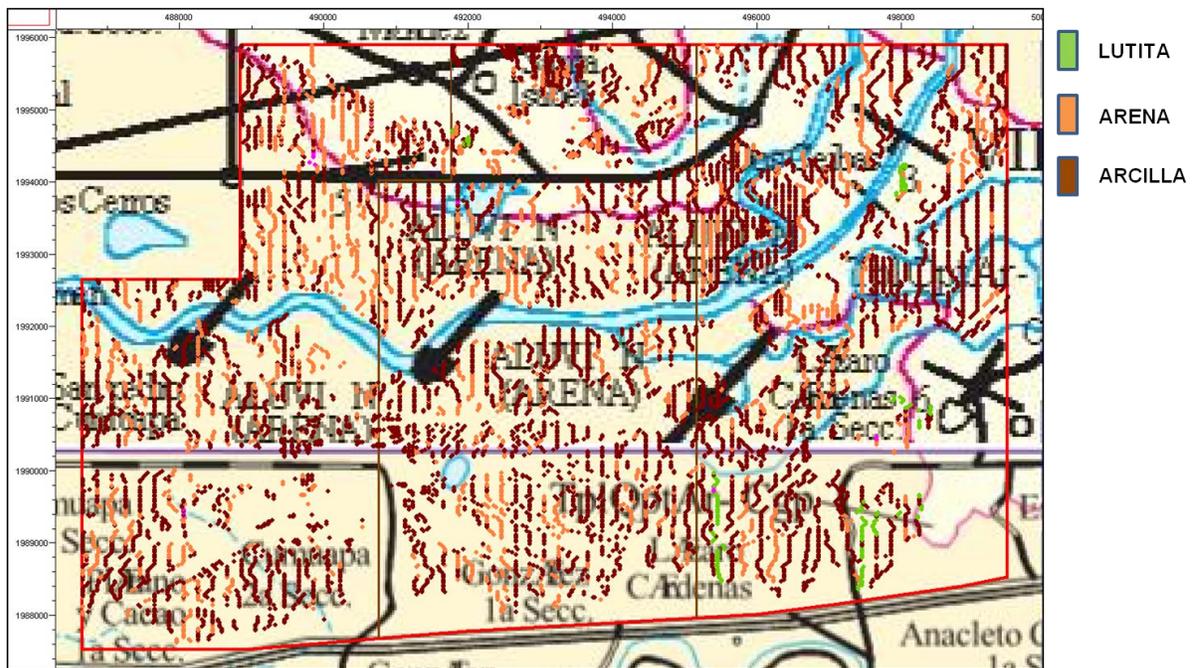


Figura 3.10 Plano final de lecho de carga.

c) OBSERVACIÓN

Como procedimiento del control de calidad de los sensores, al inicio de la fase de grabación se realizaron las pruebas instrumentales sobre el material de grabación, RAU's y sensores. Durante la fase de adquisición se verificó la calidad del plantado, mantenimiento y rotación que se dan a las cajas y ristas de geófonos.

El geofísico de campo, coordinado con personal técnico de campo fueron los encargados de supervisar el plantado de geófonos, orientando al personal obrero sobre la importancia de colocarlos de manera correcta para conseguir un buen acople con el terreno. El análisis de los registros sísmicos en gabinete se realiza desde el software VISTA y KELMAN revisando la calidad de información (relación SEÑAL-RUIDO), niveles de ruido y sus causas, trazas muertas, además verificando que la geometría de los disparos sea la correcta. En la figura 3.11 se presenta el plano de respuesta sísmica de todo el estudio.

En la figura 3.12 se muestra el plano final de adquisición convencional con un total de 12,096 Pts Versus el Preplot de 15,195 Pts, la diferencia se debió a zonas pobladas, predios de permiso negado o por las lagunas presentes y exclusión en campo carrizo.

Control de Calidad de un Levantamiento Sismológico 3DHD



Figura 3.11 Plano final de Respuesta Sísmica adquirido.

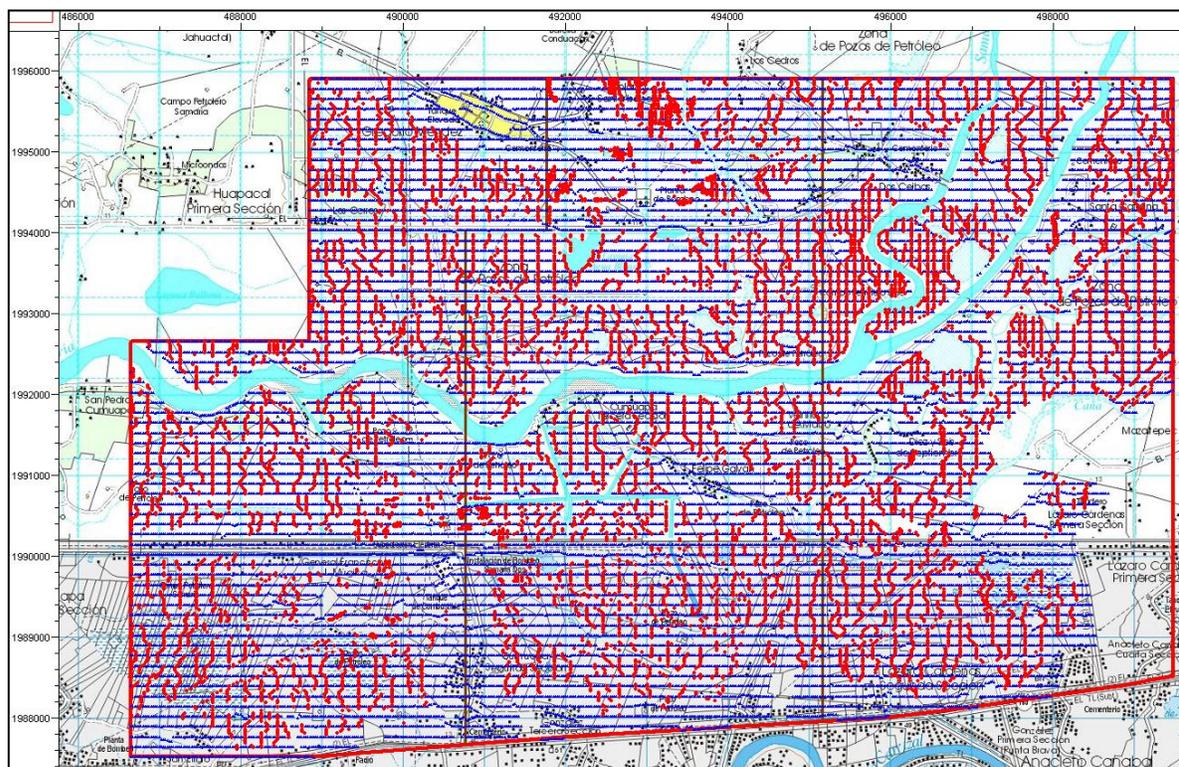


Figura 3.12 Plano final de POSPLOT de Pts adquiridos.

c.1) SCRIPT FILE Y/O TEMPLATE

Para la adquisición de los puntos de tiro, el departamento de control de calidad, apoyándose en el software **MESA**© proporcionó al personal de Observación en el sismógrafo, los archivos SPS (script o programa de tiro), en los cuales está contenida la geometría o arreglo geométrico (template) a utilizar para cada punto de tiro. Una vez que se detona un punto de tiro, en el sismógrafo se adquiere la información y se genera un archivo en el mismo formato SPS, el cual es cargado a la base de datos **HERA** para su actualización diaria al finalizar las operaciones. Se hace un control de calidad al comparar los arreglos geométricos observados contra los planeados y se verifica que no haya diferencias; en caso de existir alguna, se analiza para comprobar que no afecte a la cobertura o que no se repitan trayectorias ya que de lo contrario se tendría que repetir el tiro. Cuando la diferencia no es significativa y la cobertura no es afectada, se verifica que el script utilizado sea anotado en el reporte de observador.

Se reciben también los reportes de observador y el reporte de comentarios de problemas que se hayan tenido dentro del área que abarca el tendido utilizado durante el día.

Se agregó a la base de datos la siguiente información: fecha de observación, hora de observación, número de FILE utilizado en su grabación, número de cartucho SEG-D de campo, tiempo vertical y el arreglo utilizado para cada punto de tiro.

Con la información de campo en la base de datos **Hera**, se tienen los atributos necesarios para elaborar los archivos en formato SPS, mismo que posteriormente se entregó a procesado preliminar para su revisión de geometría en la adquisición. Una descripción de los SPS (Shell Processing Support) se proporciona a continuación:

SPS R.- Contiene coordenadas (UTM), elevaciones de las estaciones receptoras y posible versión de coordenadas (índice) de cada estación receptora que interviene en el disparo seleccionado.

SPS S.- Contiene información del punto fuente y sus coordenadas, la hora en que se observa y tiempo vertical.

SPS X.- Contiene la geometría con que se observa cada punto asociado al punto fuente seleccionado, el número de fila o FILE, cartucho que lo contiene y hace referencia al index de receptora que le aplique a cada arreglo.

Los arreglos generados se vuelven a cargar en el software Mesa© para comprobar su correcta asignación, posición de puntos de tiro y receptoras y geometría de las líneas.

Los archivos con formato SPS son proporcionados diariamente a la sección de procesado para que éste verifique la geometría de los puntos observados con la adquisición. En caso de existir alguna anomalía se corrige ya sea en campo o con la asignación de index como es el caso de una tramo de línea receptora desplazada de último momento por falta de permiso y se modifica en la base de datos HERA para actualizar la información. En caso de tener un desplazamiento se notifica a topografía para su correcto posicionamiento en campo y se procede a actualizar los datos.

En el presente levantamiento se trabajó con un solo tipo de arreglo geométrico, que fue simétrico y centrado al punto, de 32 líneas cada una con 176 estaciones receptoras haciendo un total de 5,632 canales en todo el arreglo o template, en los extremos del levantamiento se trabajo con tendidos Roll-On Roll-Off y por consecuencia el número de canales fue menor (Figura 3.13).

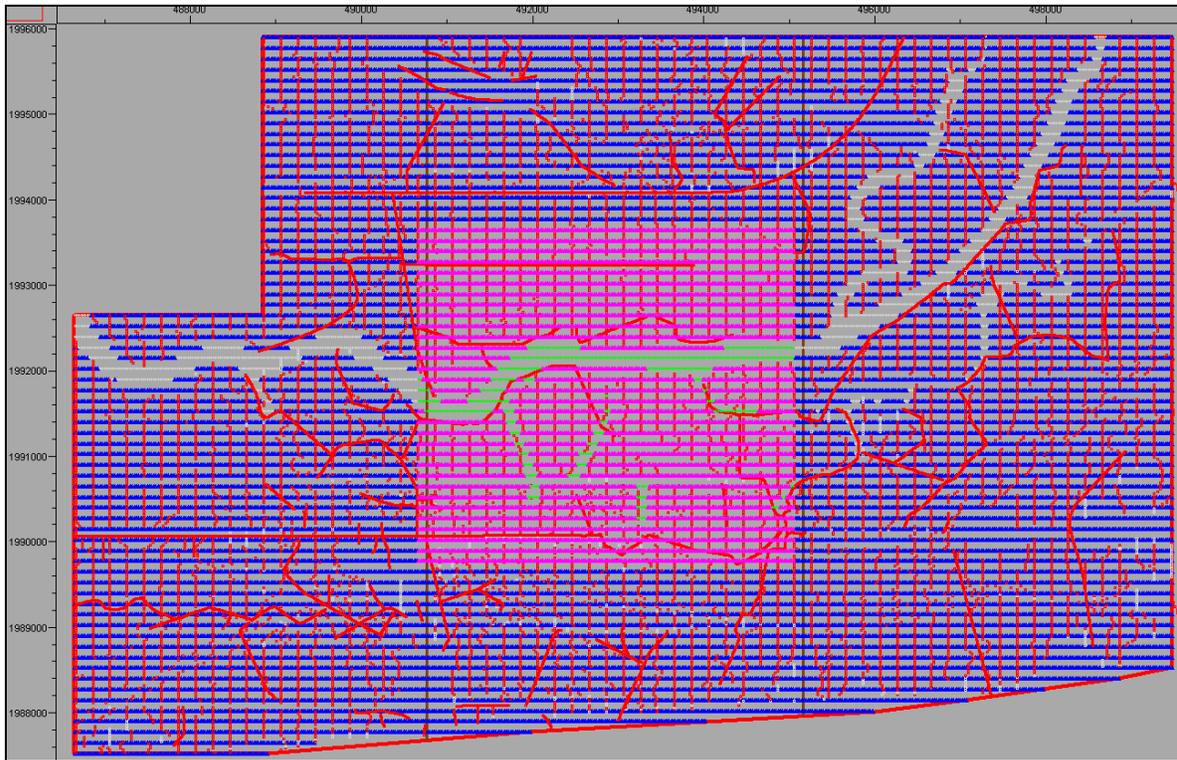


Figura 3.13 Arreglo geométrico o Template utilizado para los puntos de tiro.

III.6 PREPLOT Y POSTPLOT

Del volumen de obra del levantamiento sismológico Samaria-Íride 3DHD se adquirió 12,096 puntos de tiro y 5,224 Pvs.

El volumen de obra planeada de Pts en diseño no se cumplió de manera satisfactoria, debido a la gran cantidad de obstáculos y problemas de carácter social en distintos sectores del estudio, sin embargo, esto no afectó en forma significativa.

En la Figura 3.14, se muestran los planos de fuentes y receptoras en preplot y postplot, en los cuales se puede apreciar que las líneas no son continuas debido a la planeación previa realizada del Preplot inicial, de tal manera que el postplot final, solo se vio afectado por desplazamientos de puntos de tiro en Inline. Los desplazamientos en estaciones receptoras fueron en áreas donde no fue posible el tendido debido a la negación de permisos, pero en los cuales se hizo una propuesta de desplazamiento misma que fue autorizada por el cliente, para que no se viera afectada la cobertura, logrando también que no se perjudicara las estrategias operativas de gestión.

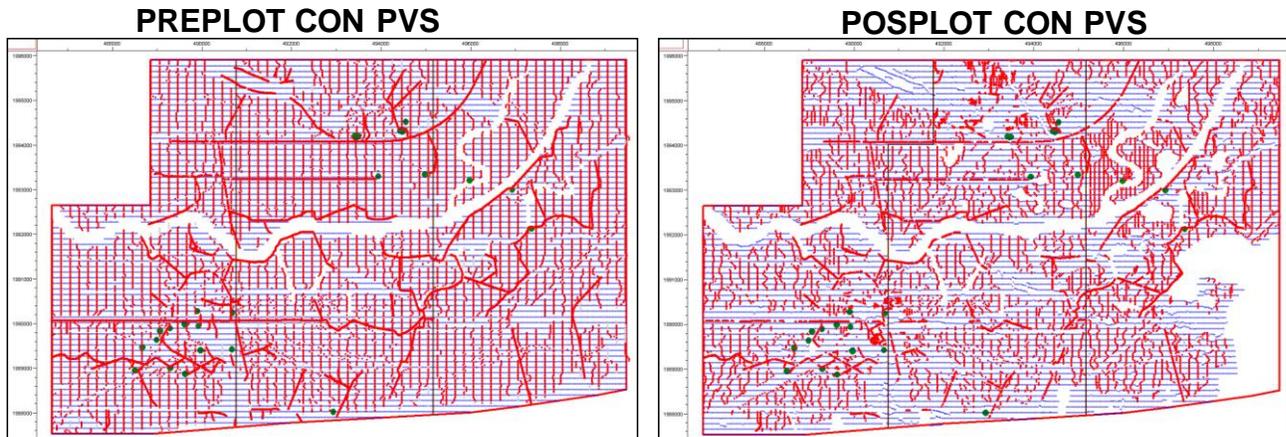


Figura 3.14 Preplot y Postplot.

III.7 APILAMIENTO FINAL Y ATRIBUTOS GEOFISICOS

El apilamiento final del área de levantamiento Samaria-Íride 3DHD, tiene una cobertura nominal de 176, pero se obtuvo un apilamiento mayor al nominal por la adición de los Pvs a 12.5 m como se puede observar en la Figura 3.15.

El apilamiento fue influenciado por los desplazamientos de fuentes, con un porcentaje de fuentes desplazadas de 32.92% debido a los distintos obstáculos presentes en el área, en su mayoría obstáculos de índole cultural, sin embargo, el apilamiento se monitoreo con especial atención en la ventanas de interés las cuales son de profundidad somera. Durante el posicionamiento de los puntos fuentes y receptores, se verificó que existiera un apilamiento conveniente en el área de los campos de interés.

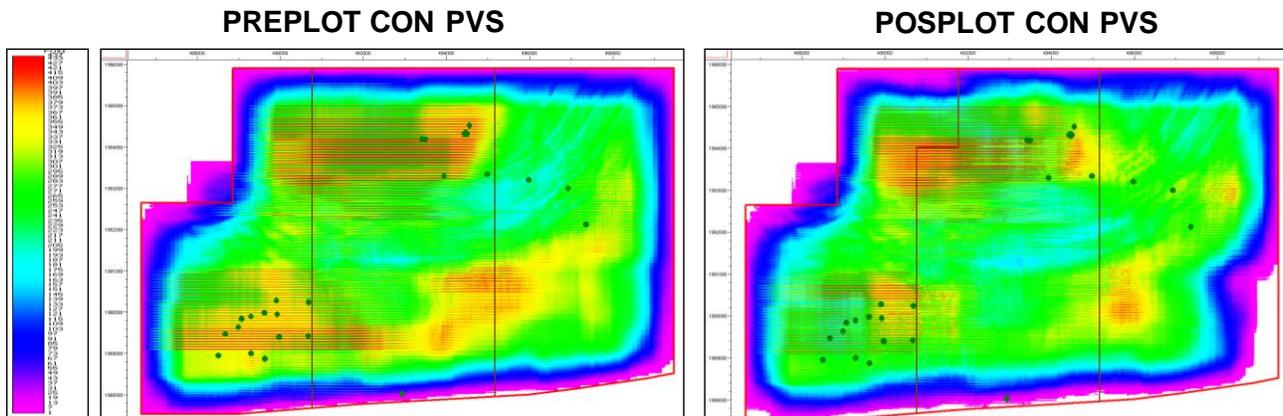


Figura 3.15 Planos de apilamiento Full-Fold Preplot y Posplot Final de Pts y Pvs.

a) Planos de Apilamiento a diferentes rangos de Offsets

A continuación se presentan las figuras 3.16 correspondientes al apilamiento considerando la distribución de offset de 0 a 500 m.

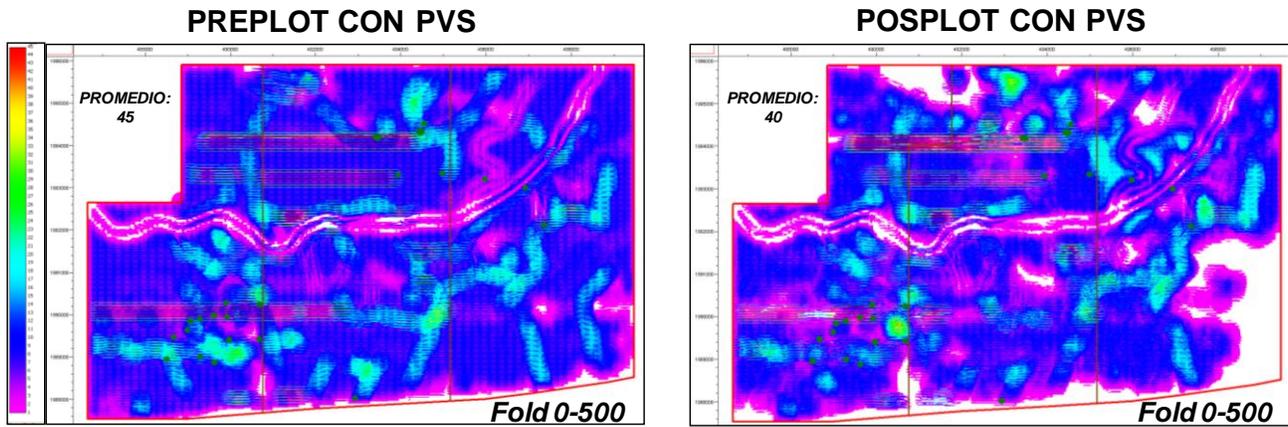


Figura 3.16 Planos de apilamiento en rango de offset 0-500 m Preplot y Posplot Final.

Las figuras 3.17 corresponden al apilamiento considerando la distribución de offset de 0 a 1000 m.

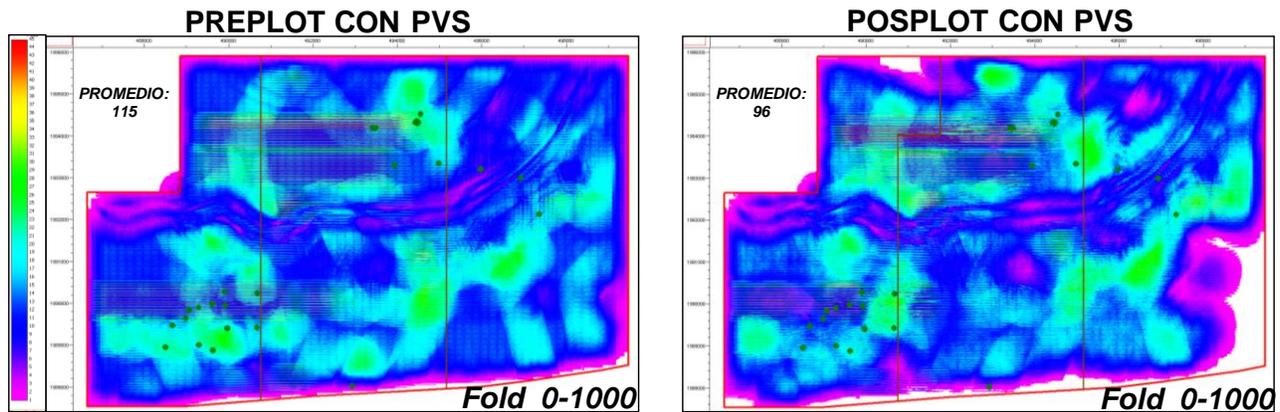


Figura 3.17 Planos de apilamiento en rango de offset 0-1000 m Preplot y Posplot Final.

Las figuras 3.18 corresponden al apilamiento considerando la distribución de offset de 0 a 1500 m.

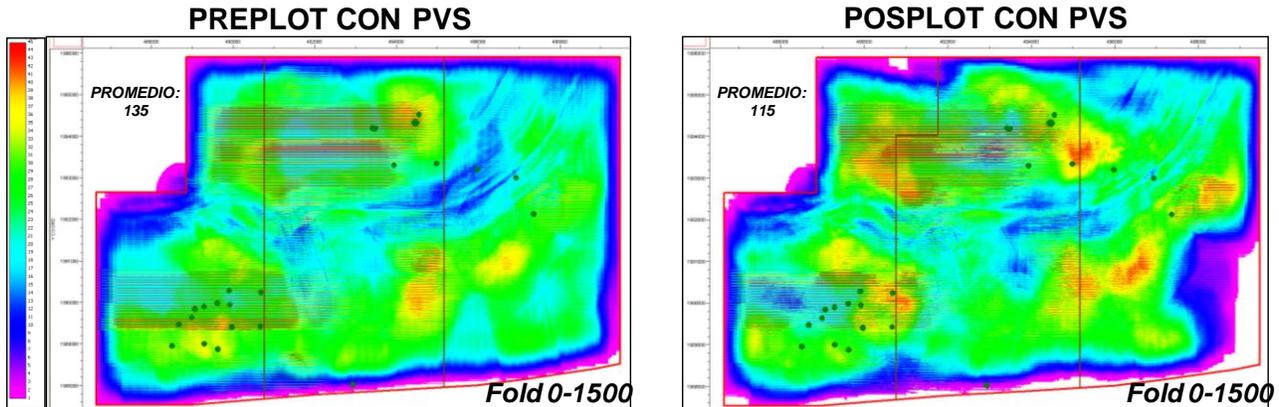


Figura 3.18 Planos de apilamiento en rango de offset 0-1500 m Preplot y Posplot Final.

Las figuras 3.19 corresponden al apilamiento considerando la distribución de offset de 0 a 2000 m.

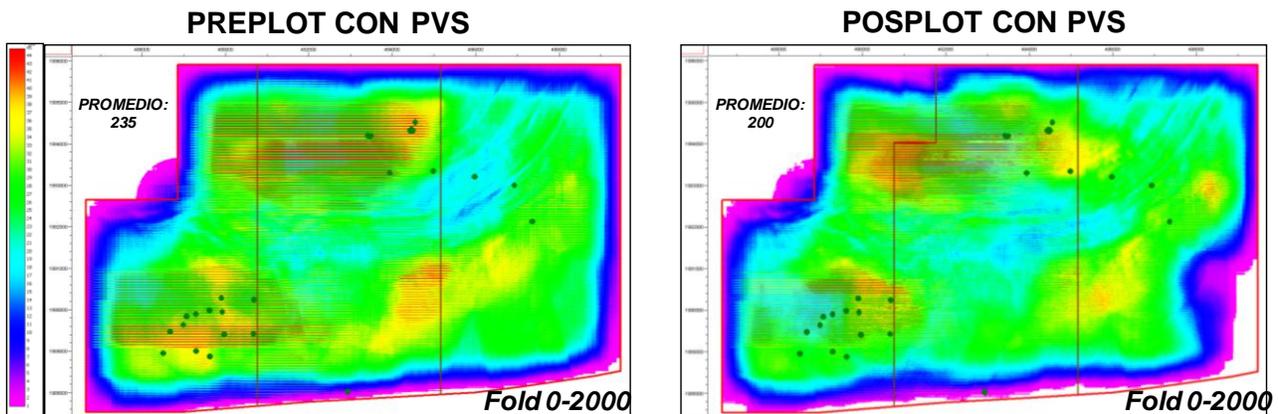


Figura 3.19 Planos de apilamiento en rango de offset 0-2000 m Preplot y Posplot Final.

b) Distribución de offsets y azimuts

Durante la planeación de los desplazamientos de estaciones fuentes y receptoras, se cuidó el comportamiento de la distribución de Offset y Azimut, de tal manera que no perjudicaran de forma significativa el procesamiento de la información sísmica adquirida.

En las Figuras 3.20 y 3.21, se muestra la distribución de Offset vs Azimut Preplot y Postplot respectivamente, mediante el diagrama de Bin Rose, mostrando un porcentaje promedio de número de trazas adquiridas entre offset de 1000 y 7500 metros. Los Offsets más lejanos que son representados en los círculos más grandes, son Offsets con valores

Control de Calidad de un Levantamiento Sismológico 3DHD

mayores a 7500 (postplot) y son ocasionados por los bordes del levantamiento y algunos

PT que se dispararon por cuestiones de bloqueos con un templete no centrado al punto, generando así Offsets más largos del calculado por diseño.

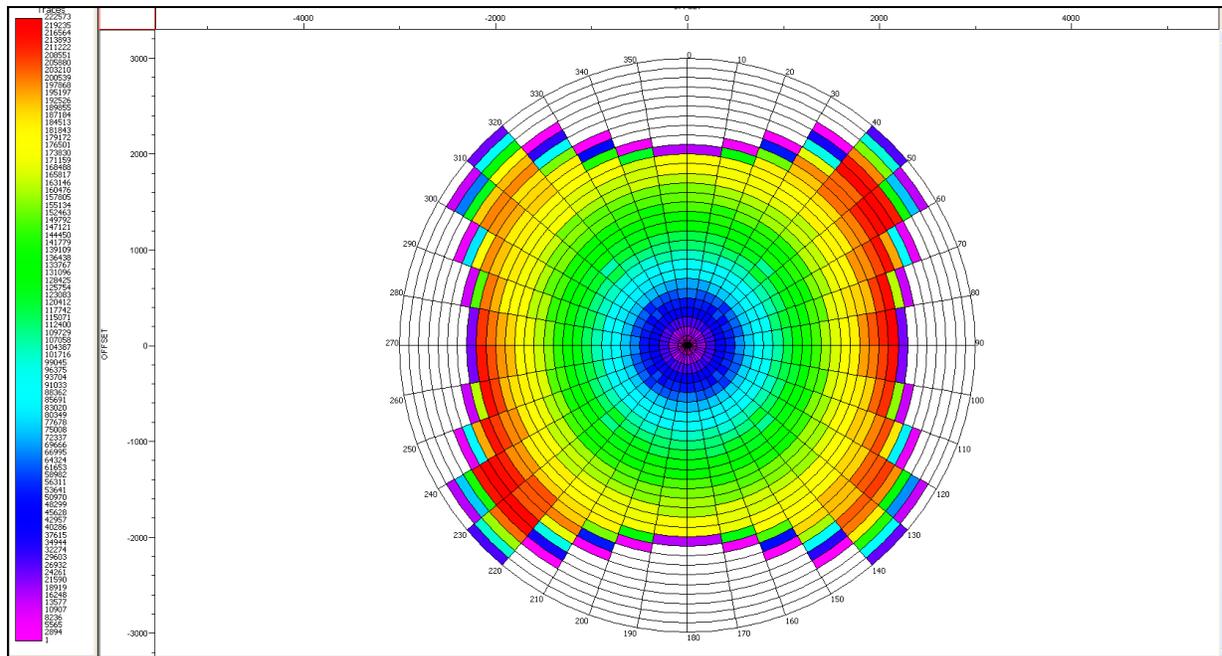


Figura 3.20 Distribución de offset Vs Azimut Preplot.

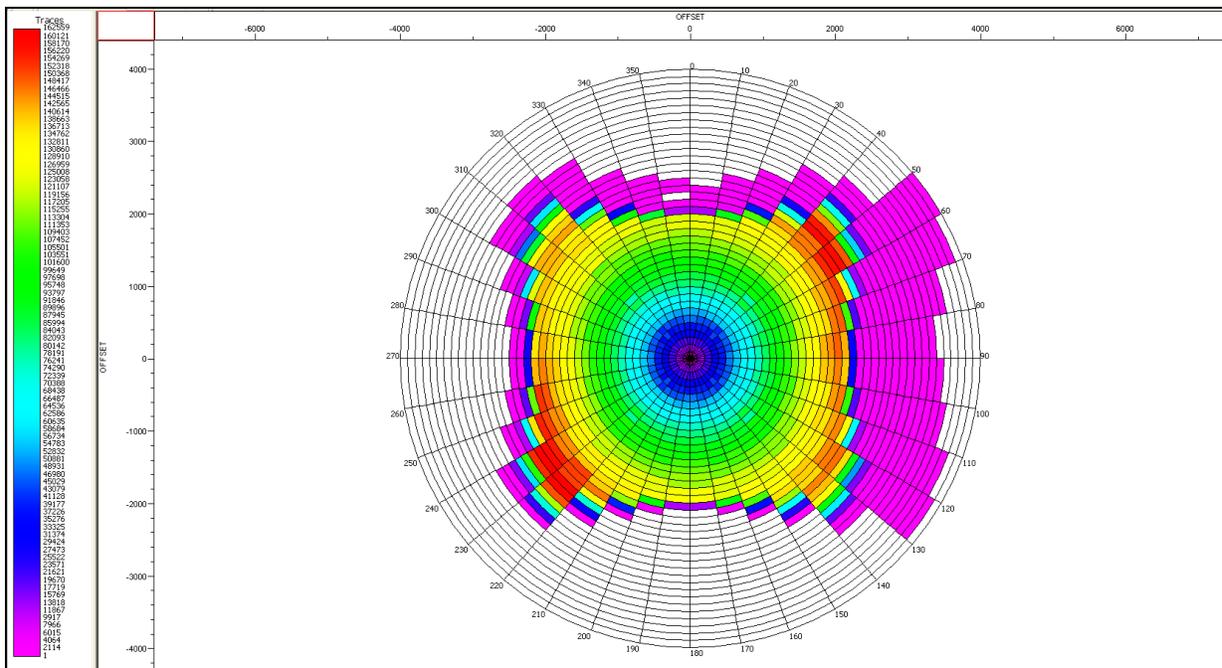


Figura 3.21 Distribución de offset Vs Azimut Posplot.

c) Diversidad de Offsets

En las Figuras 3.22 y 3.23, se muestra la diversidad de Offsets, Preplot y Postplot del levantamiento; como se puede observar la distribución es homogénea hasta los offsets a 3,000 metros y algunos Pt que se dispararon por cuestiones de problemas con algunas comunidades con un templete no centrado al punto y generando así Offsets más largos de lo calculado por diseño.

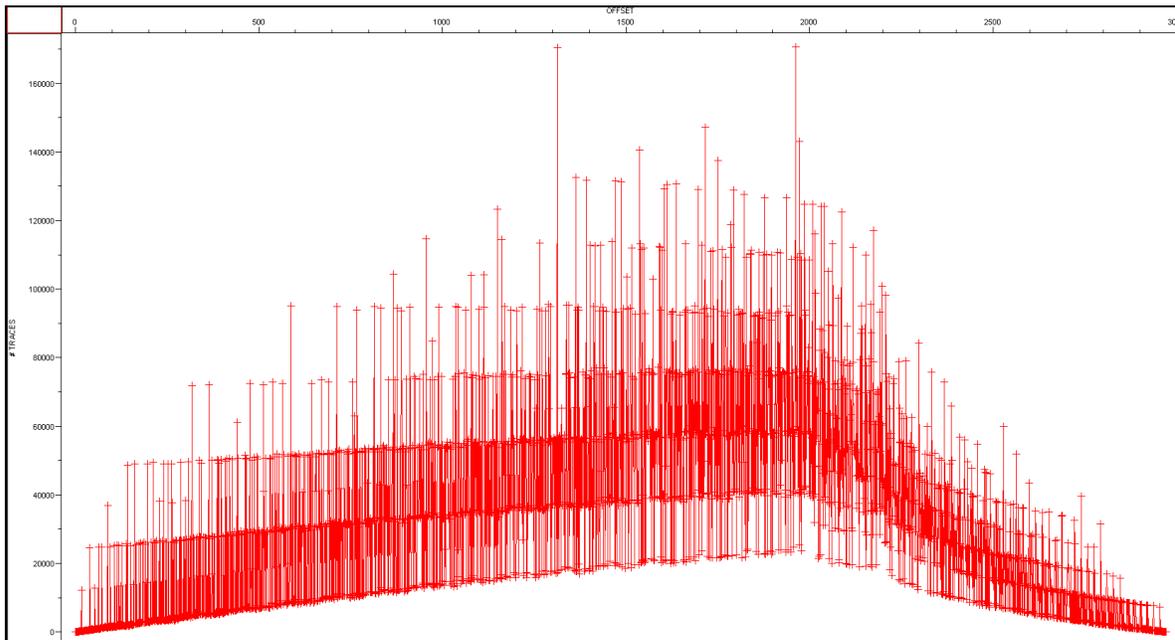


Figura 3.22 Diversidad de offsets Preplot.

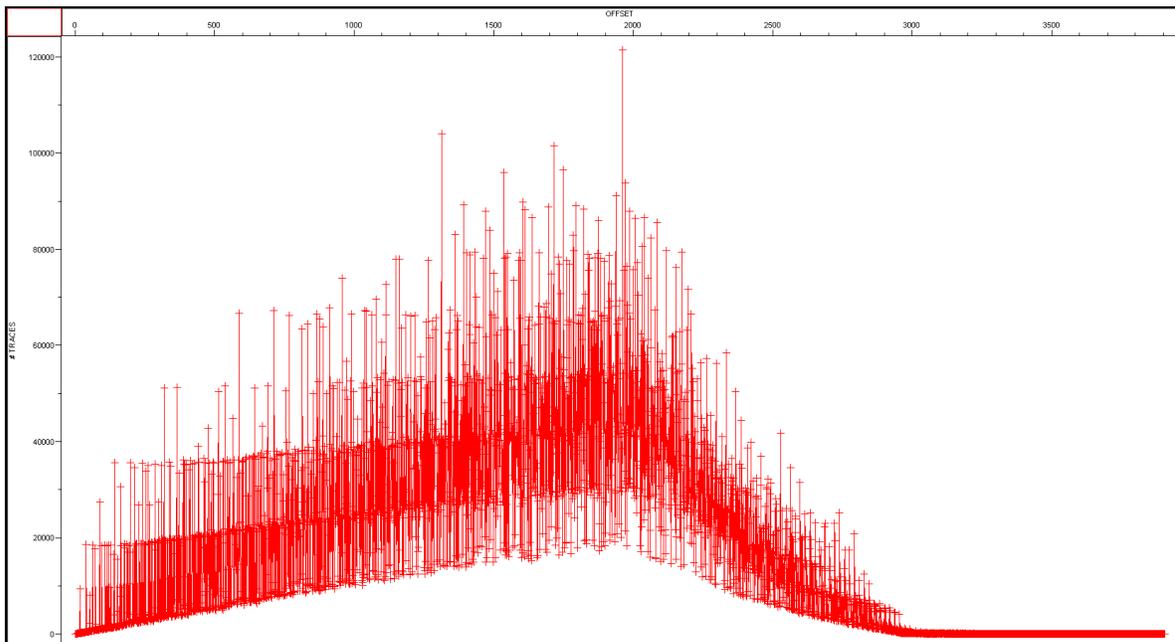


Figura 3.23 Diversidad de offsets Posplot.

d) Diversidad de Azimuts

En las Figuras 3.24 y 3.25, se muestra la diversidad de azimuts, preplot y postplot del levantamiento, se observa que en el rango de 20 a 350 se tiene un rango de trazas entre 200,000 y 350,000 trazas.

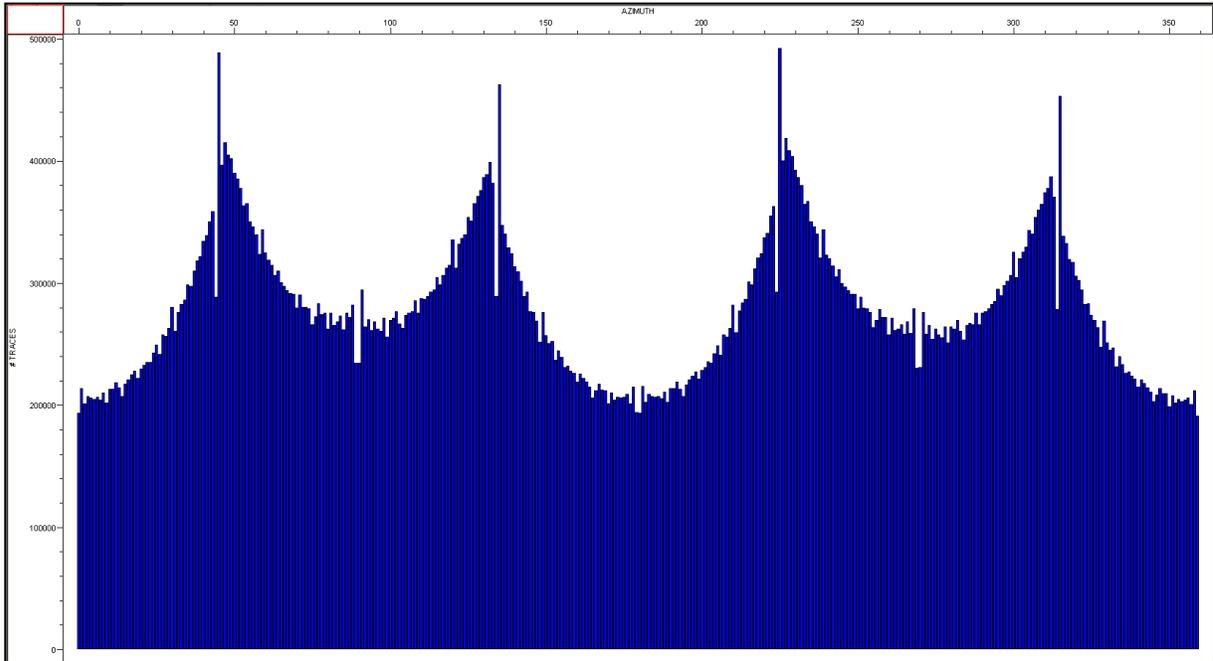


Figura 3.24 Diversidad de azimut Preplot.

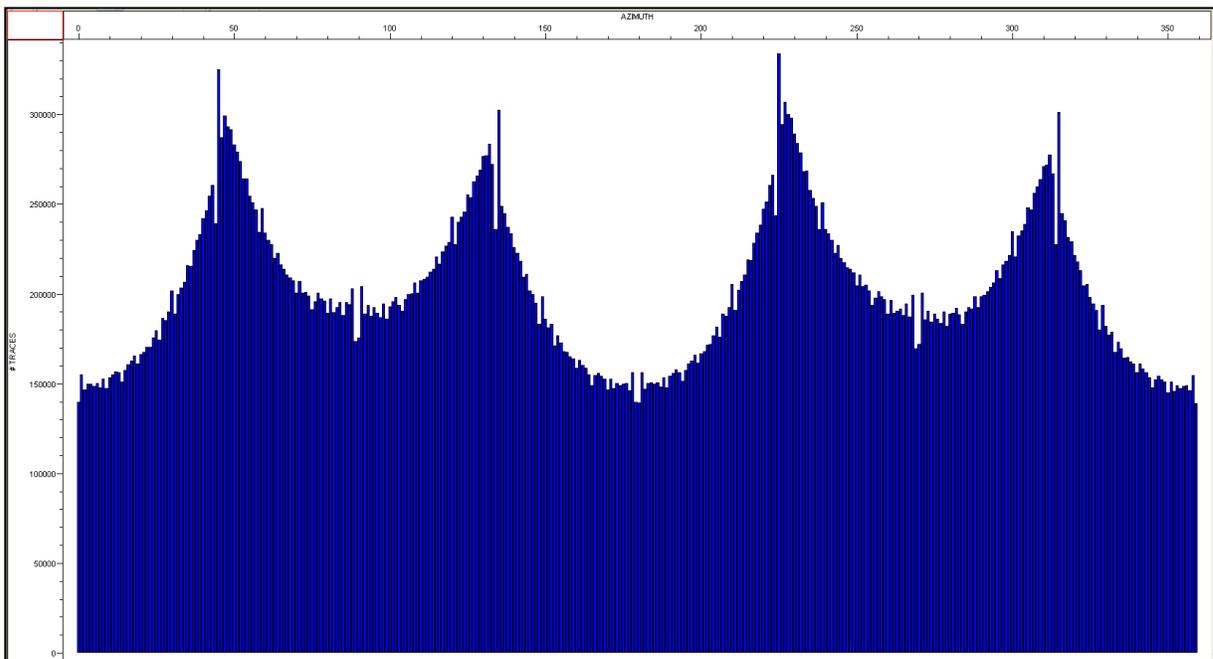


Figura 3.25 Diversidad de azimut Posplot.

IV. PROCESADO DE CAMPO

IV.1 Control de Calidad de la información adquirida

Durante la adquisición del levantamiento, de forma diaria se realizó la evaluación de la información sísmica adquirida de los sismogramas de campo, con la finalidad de hacer el control de calidad de los datos comparándolos con la información geológica y geofísica existente en el área.

Los criterios aplicados al análisis de la información sísmica se presentaron durante el avance del estudio hasta su conclusión, en donde se revisó el análisis de los Atributos Geofísicos cualitativos a nivel del objetivo geológico del levantamiento.

El procedimiento consistió en clasificar la respuesta de la señal sísmica en tres tipos:

- ❖ **Buena:** Comprende aquellos sismogramas donde la respuesta sísmica tiene amplitudes y frecuencias dentro del rango de la señal sísmica (06-55Hz). Figura 4.1.
- ❖ **Regular:** Estos sismogramas contienen en su mayoría bajas frecuencias (Ground-Roll) debido a las ondas superficiales en los offsets cercanos generadas por la fuente. Figura 4.2.
- ❖ **Baja:** Todos aquellos sismogramas que mantienen en mayor proporción altas frecuencias (más de 60 Hz) ocasionadas por factores ambientales como líneas de alta tensión que se encuentran en el área. Figura 4.3.

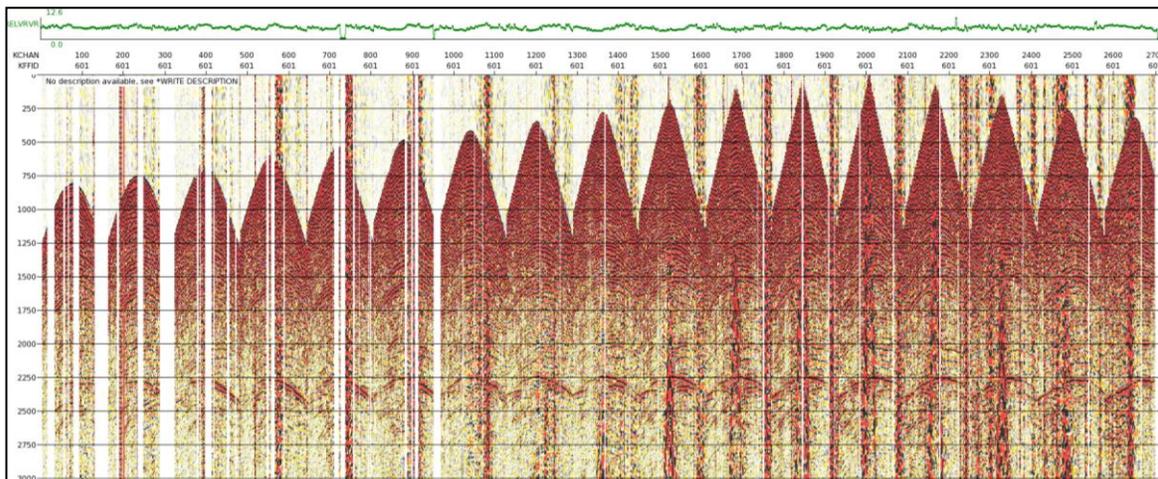


Figura 4.1 Sismograma de campo con respuesta sísmica buena.

Control de Calidad de un Levantamiento Sismológico 3DHD

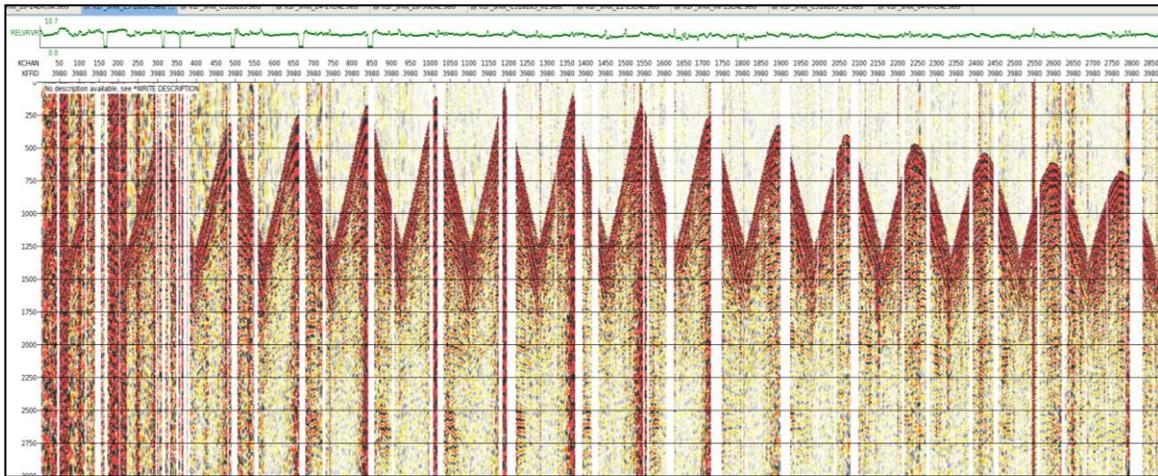


Figura 4.2 Sismograma de campo con respuesta sísmica regular.

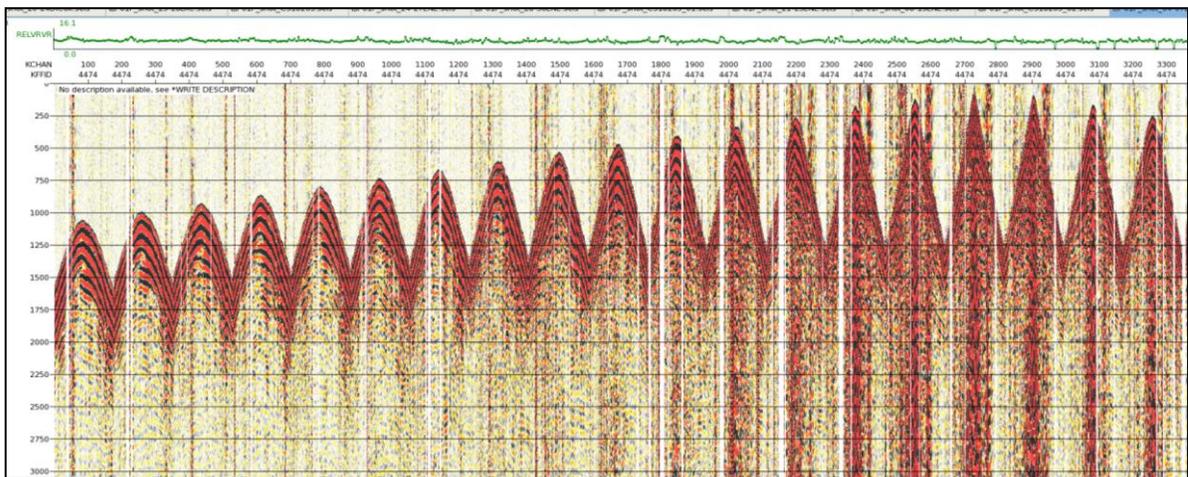


Figura 4.3 Sismograma de campo con respuesta sísmica baja.

En la Figura 4.4 y Figura 4.5, se muestra el indicador Cualitativo de la respuesta sísmica según la clasificación antes mencionada; en Figura 4.4 se muestran en color verde los puntos con buena señal sísmica, en azul los puntos con regular señal sísmica y en rojo los puntos con baja respuesta sísmica; para este último caso la gran mayoría se adquirieron con vibradores, situados en caminos circundantes y muy transitados donde el ruido urbano enmascaró la señal sísmica. Los porcentajes finales del análisis de la respuesta sísmica cualitativa son: con 91% buena, 7% regular y el 2% baja.

Predominantemente la respuesta de los sismogramas adquiridos presentan una buena respuesta sísmica, mientras que la regular a baja representa un menor porcentaje y se atribuye principalmente a zonas pobladas, restricciones ambientales y caminos altamente transitados como en el caso del Zipper 1, aún así, la adquisición resulta ser satisfactoria para el total de los 17,193 files registrados, donde la calidad del dato sísmico es buena a pesar de las dificultades del área.

Control de Calidad de un Levantamiento Sismológico 3DHD

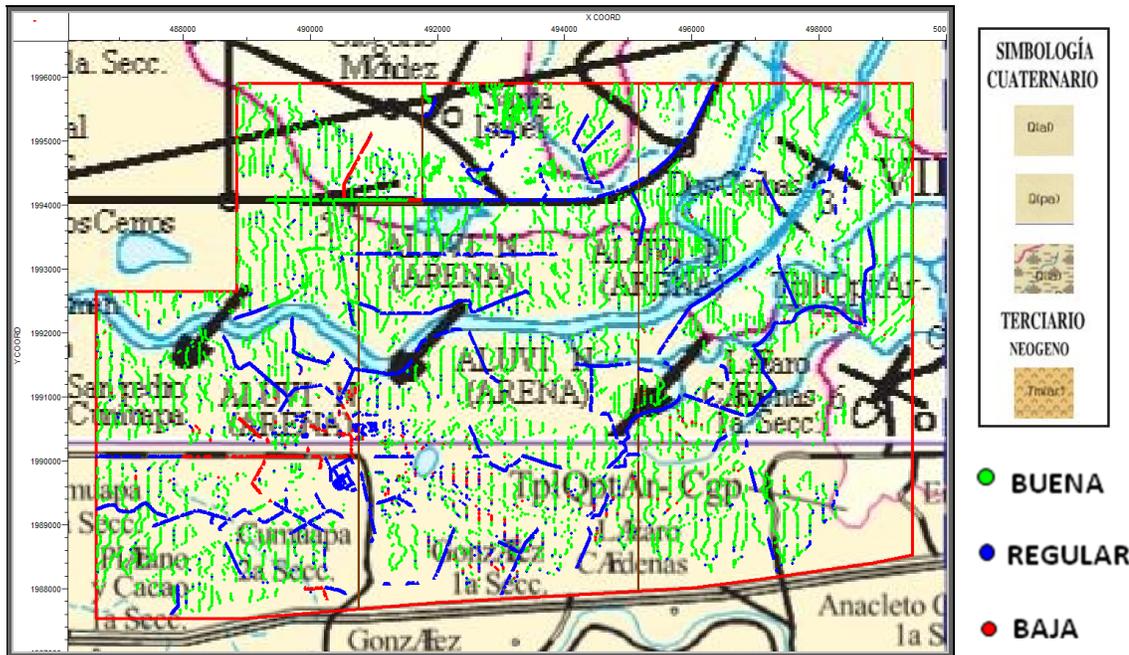


Figura 4.4 Indicador cualitativo de la respuesta sísmica a nivel sismograma de campo y su relación con la geología superficial.

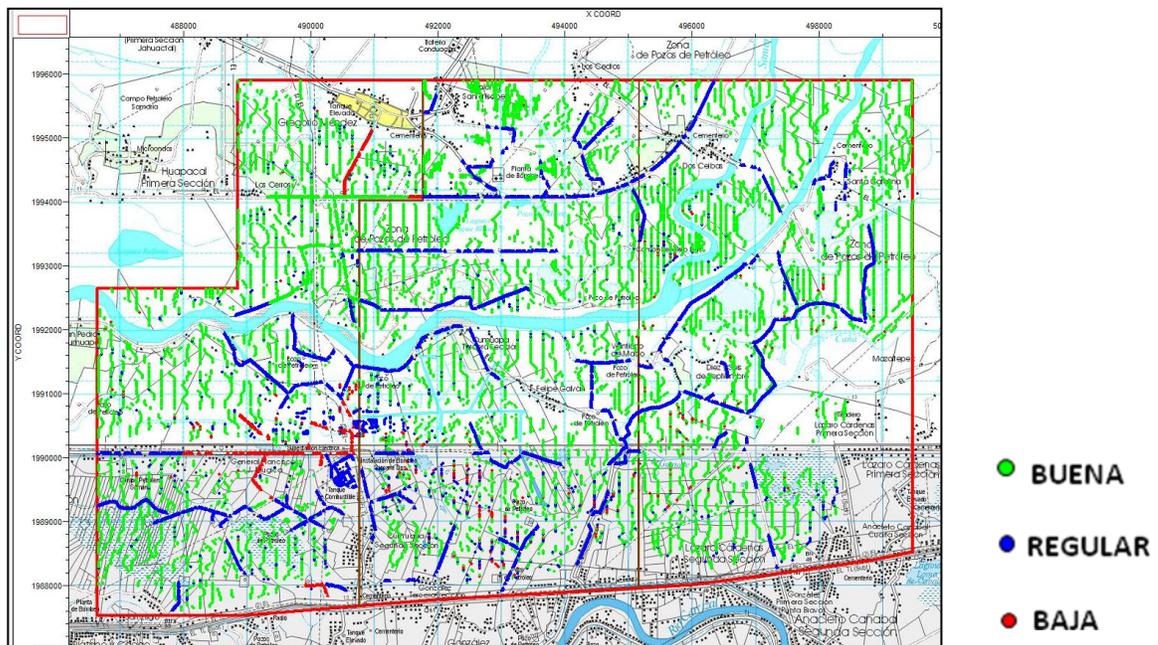


Figura 4.5 Plano del indicador cualitativo de la respuesta sísmica a nivel sismograma de campo y su relación con la cartografía de la zona.

Posteriormente se realizó la revisión de la geometría, que consiste en verificar que cada punto de tiro se encuentre en su posición adquirida, es decir, que todos los receptores estén activos para la fuente observada y se encuentren ubicados en las coordenadas correctas, de no ser así se procede a determinar la coordenada que le corresponde mediante un modelo aproximado y se graba la corrección, posteriormente se adecua el archivo de posicionamiento de fuentes y receptores (SPS) y con este último se carga la información sísmica para obtener tiros con geometría (Figuras 4.6 y 4.7).

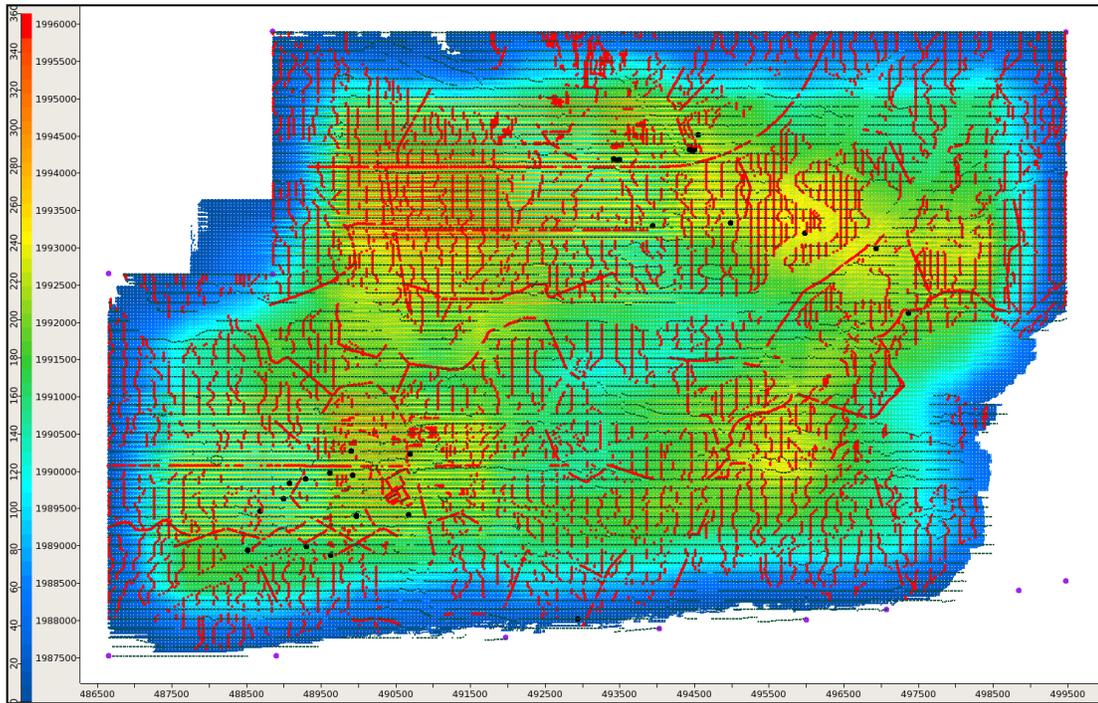


Figura 4.6 Mapa de geometría con fuentes (rojo) y receptoras (verdes) del Levantamiento sismológico Samaria-Íride 3D.

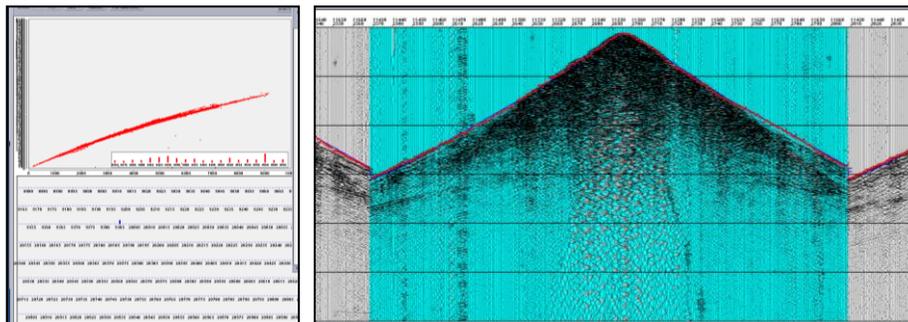


Figura 4.7 Geometría para cada fuente y su plantilla. Del lado izquierdo curva TX; lado derecho línea central del punto de tiro.

IV.2 Atenuación de amplitudes anómalas

El objetivo de la atenuación de ruido es resaltar los reflectores, para llevarlo a cabo se utilizan diversos tipos de filtros que operan sobre las bases de la frecuencia y la amplitud de las trazas, aunque también se pueden usar filtros que actúan sobre su coherencia o su longitud de onda.

Al aplicar la atenuación de ruido es posible disminuir el ruido coherente que presenta una tendencia lineal. De esta forma los eventos lineales de baja velocidad (Ground-Roll u ondas superficiales) se hallan con ángulos menores respondiendo a las bajas velocidades, mientras que las reflexiones, se localizan en sectores angulares mayores y también se menciona un ajuste de amplitudes anómalas presentes en los bordes, donde existe bajo apilamiento. En la Figuras 4.8 (A,B y C) se observan las pruebas de la atenuación de ruido para una fuente.

Control de Calidad de un Levantamiento Sismológico 3DHD

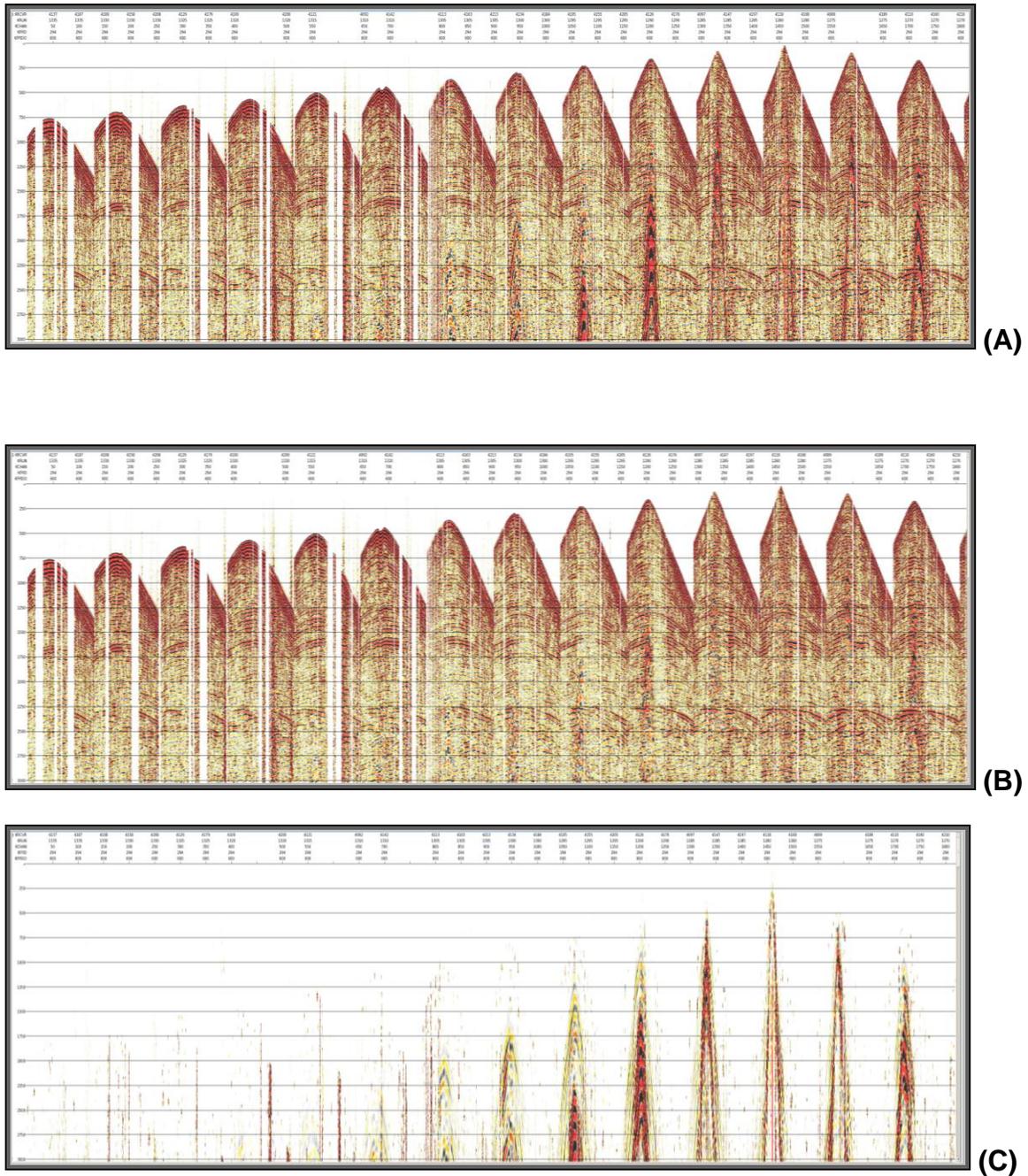


Figura 4.8 Pruebas de atenuación de ruido en una fuente (A) con geometría, (B) con la primera atenuación de ruido y (C) la diferencia.

A continuación se muestran las imágenes resultantes antes y después de la primera y segunda atenuación de ruido así como sus respectivos espectros de amplitud y frecuencia, donde se muestra el proceso de deconvolución, que denota el aumento del ancho de banda, (Figura 4.9), para los dos objetivos (750-1000 y 1000-1250 ms); adicionalmente se muestra el análisis para un reflejo a 2250 ms.

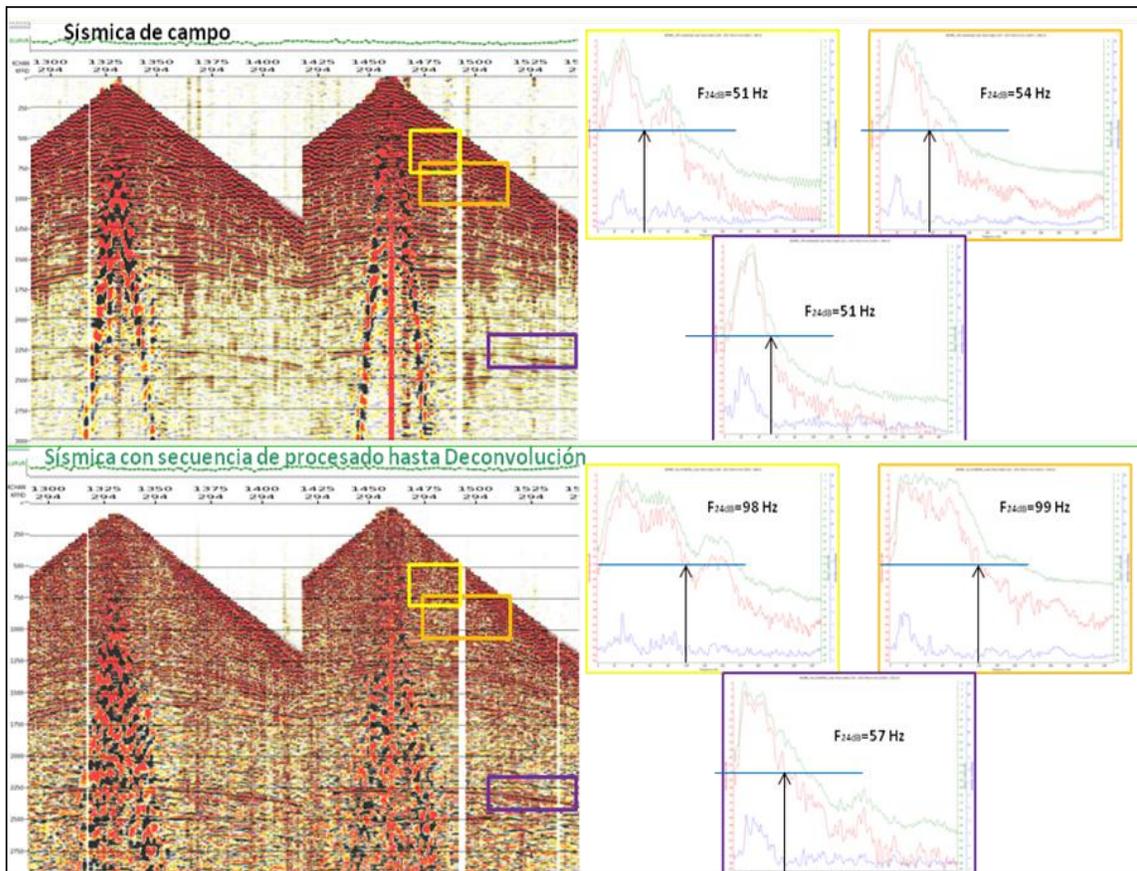


Figura 4.9 Fuente de campo y el procesado (con geometría, recuperación de amplitudes, primera atenuación, Deconvolución consistente con superficie y la segunda atenuación), en donde se muestran los espectros de frecuencia de los dos objetivos (750-1000 ms y 1000-1250 ms) y uno adicional siguiendo un reflejo a 2250 ms.

IV.3 Compensación y calibración de fuentes

Para que exista una buena correlación de los dos tipos de datos, con diferentes tipos de fuentes (material sismográfico y vibradores), se generan pruebas de cross-correlaciones para definir tanto la variación en fase como el shift; una parte fundamental antes de la calibración es tomar en cuenta que los dos tipos de datos tengan la misma fase, y como conclusión dado que la fuente por material sismográfico es fase mínima, se debe adecuar los datos de la fuente de vibradores de fase cero. En la Figura 4.10, se muestra que la compensación de fase-shift es despreciable por lo que sólo con el proceso de adecuación de fase es suficiente.

ANTES DEL MATCH FILTER DESPUÉS DEL MATCH FILTER

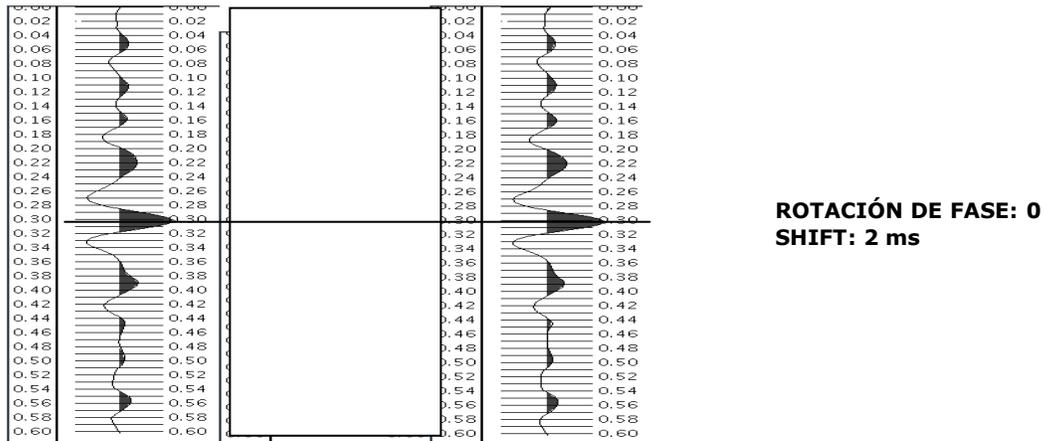


Figura 4.10. Cross-correlación (material sismográfico) con (vibros)

IV.4 Corrección de efectos asociados a la topografía y a la capa intemperizada

Las ondas de reflexión son por lo general afectadas por irregularidades encontradas en la superficie, como la elevación topográfica y las ondas superficiales que se generan durante el disparo y el viento. En las correcciones en tiempo debido a la topografía, las variaciones de velocidad y espesor de la capa intemperizada (weathering), se establece un plano horizontal de referencia (datum) por debajo de ésta, que es el nuevo punto cero de tiempos. Al tiempo total se le restan los tiempos que tarda el frente de onda en recorrer la capa meteorizada hacia abajo y hacia arriba. Se hace una corrección por incidencia, única para cada estación, de modo tal que se aplica la estática calculada a cada una de las trazas por registro. Para el cálculo de las estáticas de refracción se aplicó a los datos de fuentes y receptores, una velocidad de reemplazamiento de 2000 m/s y para la velocidad de la capa superficial 900 m/s, calculados en sismogramas representativos del área y corregidos con los picks-first de los primeros arribos (Figura 4.11).

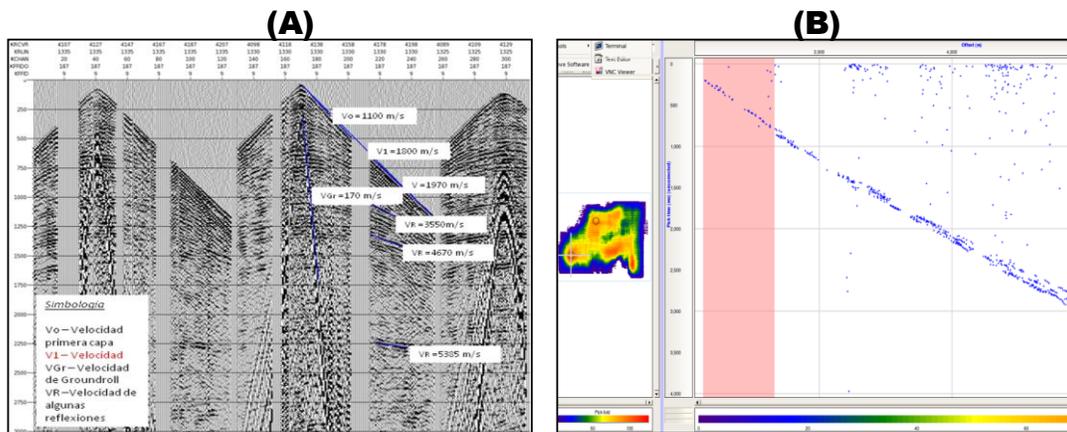


Figura 4.11 Sismograma de campo con (A) análisis de la velocidad para v_0 , v_1 y v_2 , (B) curva tx (offset [m] .vs. pick-first-break [ms]).

IV.5 Estáticas de refracción

El modelo de velocidad adecuado permite que el modelo geofísico sea más cercano al modelo geológico. Para lograr obtener un mejor modelo de velocidad se realizan análisis de velocidad reiterados, permitiendo tener como resultado un modelo de la capa intemperizada suave y preciso como se puede observar en la Figura 4.12.



Figura 4.12 Modelo de refracción de la capa intemperizada del área de estudio.

En el modelo existen anomalías debido a condiciones superficiales, tales como elevación, espesor y velocidad de la capa intemperizada, que ocasionan cambios en la señal sísmica que a su vez distorsionan los eventos de las estructuras geológicas. Las correcciones por estáticas de refracción determinan el espesor de la capa de intemperismo y la velocidad de la capa sub-intemperizada mediante mediciones de tiempos de arribo de las ondas refractadas.

El método que utiliza el software calcula tiempos de viaje a partir de un modelo de velocidad inicial (velocidad de reemplazamiento de 2000 m/s y velocidad de la capa superficial 900 m/s) cercano a la superficie comparando los tiempos de viaje observados con los calculados, las diferencias entre los tiempos de arribo modelados y observados son utilizadas para actualizar el modelo. Este procedimiento iterativo de modelado se lleva a cabo hasta que las diferencias de tiempo estén por debajo de un umbral establecido, esto normalmente ocurre después de un número significativo de iteraciones; las diferencias son generalmente minimizadas por mínimos cuadrados y generalmente se suaviza al modelo para aumentar la estabilidad del proceso y obtener un modelo que mejor se ajuste a los datos. El modelo de refracción obtenido se aplicó a los datos sísmicos y se procedió al análisis de velocidades.

IV.6 Compensación del decaimiento de la amplitud, recuperación de amplitud

La compensación de la amplitud, es necesaria debido a fenómenos como la división de la señal sísmica por reflexión y transmisión, la divergencia esférica, la absorción de energía, la dispersión de ondas sísmicas, la interferencia de reflexiones en capas delgadas, que provocan que exista un decaimiento de la señal sísmica. Los métodos para compensar esta pérdida consisten en emplear una ganancia exponencial, aplicar la inversa de la ganancia, elegir un control automático de ganancia ó una ganancia programada que recupere la pérdida de la amplitud.

El control de la recuperación de amplitud verdadera debido al efecto de atenuación por absorción de la energía, ocasionado tan sólo por la divergencia esférica se puede representar por el modelo siguiente:

$$A(x) = A_0 \text{EXP}^{-ax}$$

Donde, $A(x)$ es la amplitud del pulso acústico medido a una distancia "x" del punto de tiro; A_0 es la amplitud inicial del pulso y "a" es el factor de atenuación espacial. En la Figura 4.13, se ilustran las pruebas que se realizaron con sus respectivas curvas de respuesta, resultando que la $ax=2.0$ es el valor que define mejor la imagen y la curva para el fenómeno por divergencia esférica.

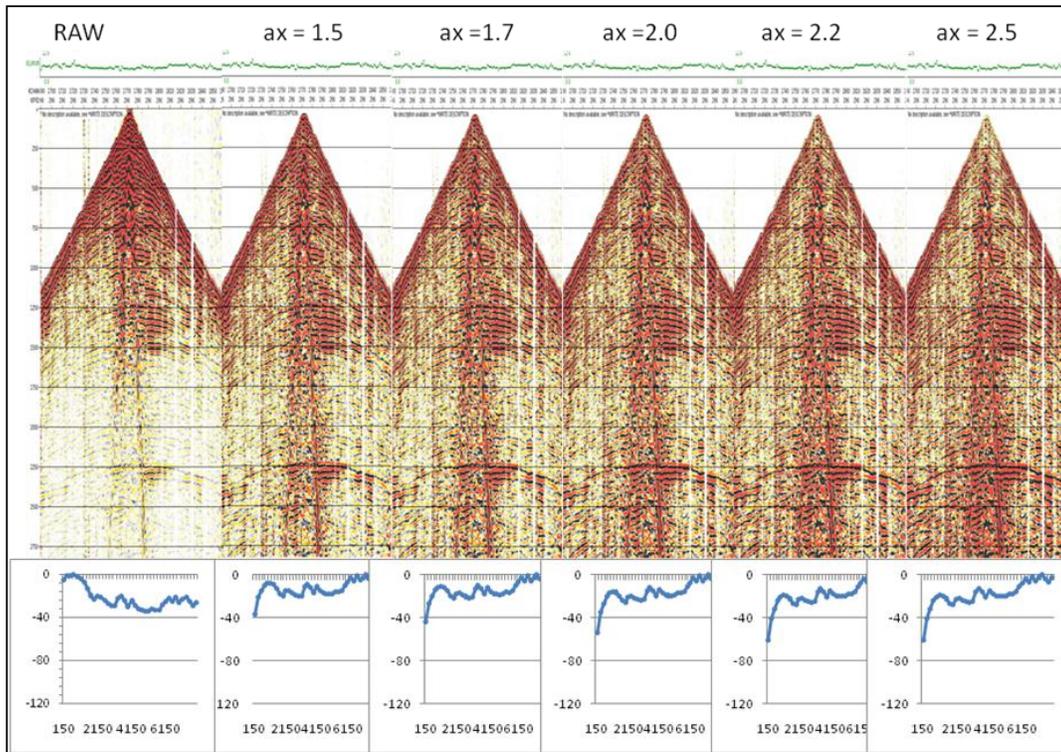


Figura 4.13 Pruebas de recuperación de amplitudes por divergencia esférica.

IV.7 Deconvolución consistente con superficie

La deconvolución es un proceso que mejora la resolución temporal de los datos sísmicos por compresión de la ondícula sísmica. Por otra parte remueve la energía múltiple. Para aplicar la deconvolución se realizaron pruebas con deconvolución impulsiva y predictiva tomando en cuenta el siguiente modelo general:

Modelo de Deconvolución: $x(t) = w(t) * e(t) + n(t)$

donde:

- $x(t)$ = Registro de campo o sismograma
- $w(t)$ = Ondícula sísmica básica
- $e(t)$ = La respuesta al impulso de la tierra
- $n(t)$ = Ruido aleatorio o ambiental
- *
- = Denota la deconvolución

El tipo de deconvolución aplicado es consistente con superficie, y su objetivo es comprimir la ondícula para definir mejor los eventos, atenuar reverberaciones y múltiples de corto período. Con ello se produce una representación de la reflectividad en el subsuelo; para lo cual se realizaron pruebas de selección de parámetros que consistieron en visualizar apilados, espectros y auto-correlogramas cada vez que se variaba la longitud de operador, distancia predictiva y ruido blanco, las pruebas fueron con los siguientes parámetros:

Control de Calidad de un Levantamiento Sismológico 3DHD

Longitud de Operador: 80, 120, 160 y 200 ms
Distancia Predictiva: 2, 12, y 32 ms
Ruido Blanco: 0.1%, 1.0%, 3.0% y 5.0%

Realizadas las pruebas variando la longitud del operador, distancia predictiva y porcentaje de ruido blanco. Se decidió aplicar la deconvolución impulsiva a los datos sísmicos con los siguientes parámetros:

Distancia Predictiva: 2 ms
Longitud de Operador: 120 ms
Ruido Blanco: 5.0 %

En la Figura 4.14, se observa el efecto antes y después de la deconvolución en una ventana que incluye los dos objetivos (750-1250ms), también se puede apreciar la mejora en el espectro de frecuencia con la amplitud de la señal.

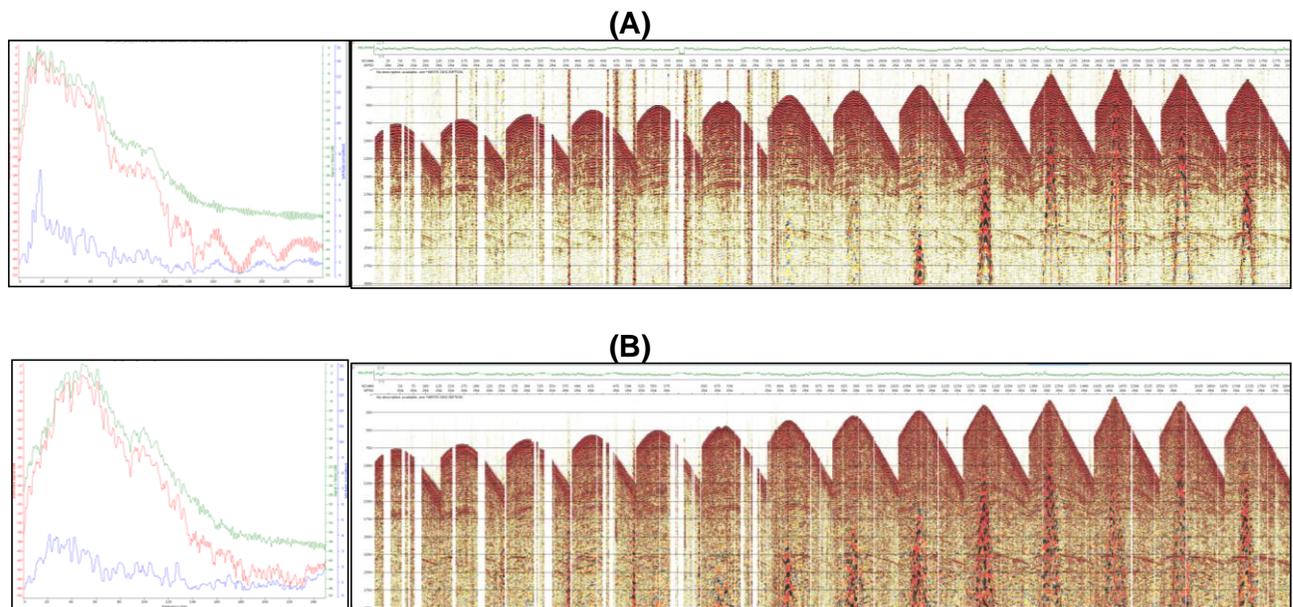


Figura 4.14 Pruebas de Deconvolución, kffid 924 (a) sin Deconvolución. (b) con Deconvolución lo: 120, dp:2 y rb:5.0%

IV.8 Ordenamiento por CMP

Una vez finalizado el pre-procesado de la información sísmica, se procede al ordenamiento de las trazas sísmicas en conjuntos con un punto medio de reflejo común o CMP (Common MidPoint), que consiste en agrupar trazas con geometría perteneciente a un mismo punto medio entre fuentes y receptores determinados.

Para su construcción el espaciado entre CMP es la mitad del espaciado entre estaciones receptoras, originando trayectorias hiperbólicas como se muestra en la Figura 4.15.

Esto se hace con el fin de suponer una incidencia normal, es decir, que la distancia fuente-receptor (offsets) es cero. Esto origina un cambio de dominio de SHOTS al CDPS, siendo uno de los tres pasos principales en la secuencia de procesamiento, y es aquí donde se aplica la corrección por NMO (Normal Move-out).

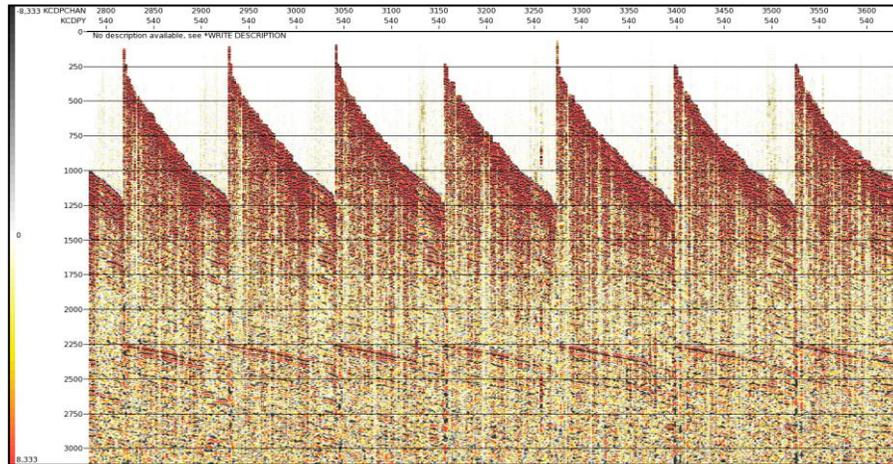


Figura 4.15 Ordenamiento por CMP-Gathers.

IV.9 Correcciones estáticas residuales consistentes con superficie

El cálculo de las estáticas de refracción considera únicamente la capa intemperizada, y los tiempos de reflexión se ven afectados por irregularidades de las capas subsecuentes, es necesario aplicar una corrección que compense los efectos de variación que se dan en la velocidad y en el espesor de las capas subsecuentes, la corrección se lleva a cabo con la aplicación de las estáticas residuales.

Las estáticas de refracción se basan en los tiempos absolutos de los primeros arribos para estimar las componentes de estáticas de periodo largo, mientras que las estáticas residuales estiman estáticas de periodo corto en base a las diferencias de los tiempos de reflexión.

Se diseña una ventana de aplicación que contenga la información sísmica de interés, esta llevará a cabo la correlación de cada traza con respecto a un modelo, esta correlación nos da la diferencia en tiempo entre la traza y el modelo, permitiendo estimar el máximo corrimiento (shift) aceptable para obtener la mejor correlación horizontal en los eventos de reflexión.

Se realizaron pruebas con respecto al shift (corrimiento en tiempo), así como la variación de la ventana de aplicación de acuerdo a la zona de interés, para cada prueba se apilaron líneas de control para analizar el posible resultado y sus diferencias. En la Figura 4.16, se observa el efecto de mejora antes y después de las estáticas residuales.

De acuerdo al análisis realizado de las diferentes pruebas, los parámetros elegidos para las estáticas residuales fueron:

- Inicio de ventana de correlación: 250 ms.
- Fin de ventana de correlación: 4000 ms.
- Límite del shift de correlación: 32 ms.
- Número de correlaciones para estimar el shift: 100
- Número de iteraciones: 4

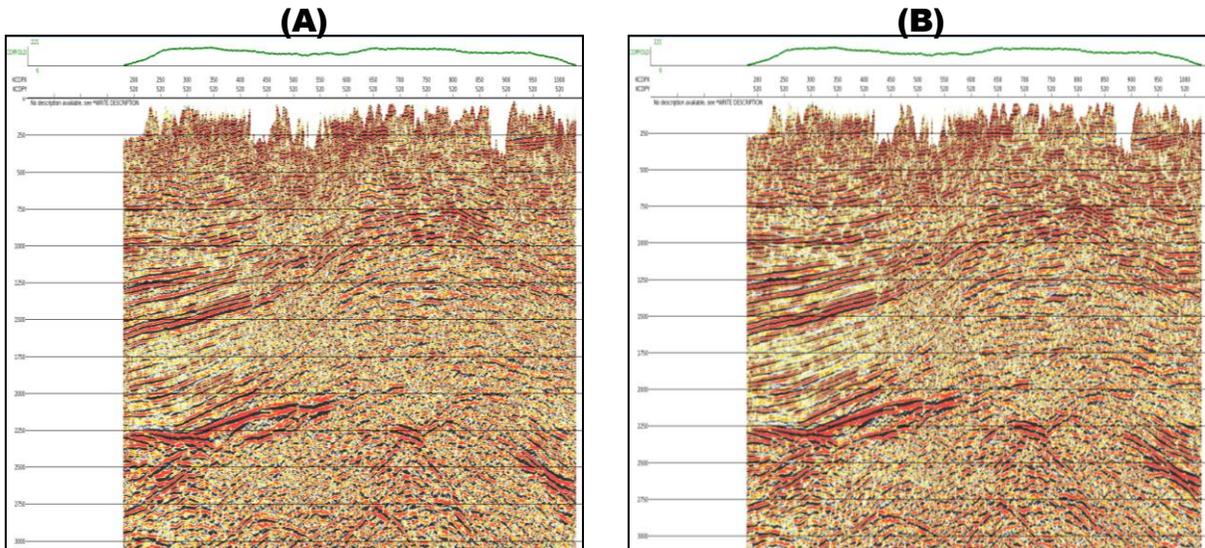


Figura 4.16 Apilado con estáticas de refracción (A) y con la corrección de estáticas residuales (B) (inline 520).

Como paso alternativo se realizó un segundo análisis de velocidad a cada 500 m de espaciamento en líneas de control ya establecidas, en el que se agregan a los datos sísmicos las estáticas residuales previamente calculadas.

Se toma como referencia el campo de velocidades obtenido en el primer análisis de velocidad con la corrección de estáticas de refracción. Para este segundo análisis se construyen paneles de apilados con porcentajes de velocidad con un rango de porcentajes del 90% al 110% a un intervalo de 2%.

IV.10 Aplicación del proceso de DMO (dip-moveout)

La corrección por NMO fue aplicada usando un campo de velocidades para los CDP-gathers, un proceso óptimo para aplanar los eventos, sin embargo, en estas velocidades el echado no es tomado en cuenta. La corrección por echados (DMO) es necesaria para corregir por los efectos del echado sobre las velocidades ya analizadas, dado que no tenemos en el subsuelo estratos totalmente horizontales y que indudablemente afecta la trayectoria del frente de onda. En la Figura 4.17, se observa la mejora antes y después del procesamiento aplicando DMO.

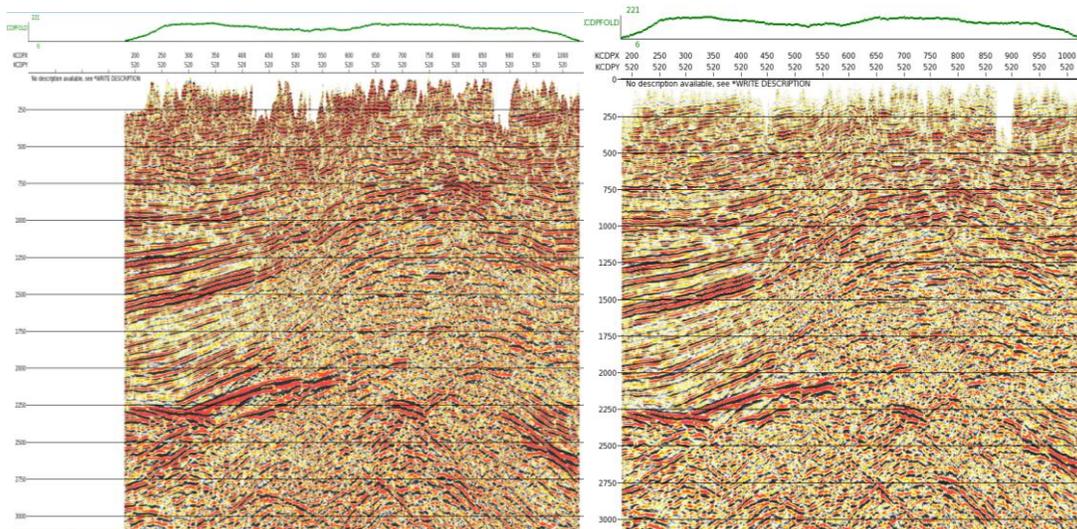


Figura 4.17 Apilados sin y con la corrección DMO (inline 520).

La corrección por echados ha sido desde 1985 una parte integral de la secuencia de procesamiento convencional para datos 2-D y 3-D en sísmica. La corrección es aplicada posteriormente a la corrección NMO usando la velocidad de un evento-plano. Para el estudio, se emplean los parámetros del origen de la malla, el tamaño del bin, el rango total de inline y crossline, el offset máximo, el ángulo máximo del echado y una cierta apertura de aplicación para tener consistencia entre CDPs.

IV.11 Análisis de velocidades

El análisis de velocidades además de proporcionar una mejor relación señal-ruido, describen la cobertura de apilamiento con distancia-cero de los registros de campo. Se aplica sobre la selección CDP-Gathers o grupos de gathers. El archivo de salida del análisis de velocidades es una tabla de números que contienen valores de tiempo y velocidades, de esta forma se obtiene una función de velocidad para cada CDP-Gathers.

Por contrato, se analizaron velocidades a cada 1000 m (Figura 4.18) para un control de calidad en la primera fase del proceso, posteriormente a cada 500 m (Figura 4.19) con el objetivo de tener una mejor definición de las capas geológicas en el área. Los paneles que se utilizaron son: la semblanza, el supergather common-offset y el panel de porcentajes de velocidad, como se ve en la Figura 4.20. Se analizan las velocidades en sentido inline y crossline creando un campo de velocidades.

El campo de velocidades debe tener la característica de ser consistente, sin dejar que se forme artefactos que hagan que se invierta la velocidad, con la condición de que la velocidad aumente en relación con el tiempo. Sin embargo, es cierto que en algunas ocasiones los materiales poseen diferentes coeficientes de reflexión que hace que las inversiones se presenten, debido a cambios litológicos y/o cambios en las propiedades físicas de los mismos.

CAMPO DE VELOCIDADES DEL CUBO SÍSMICO

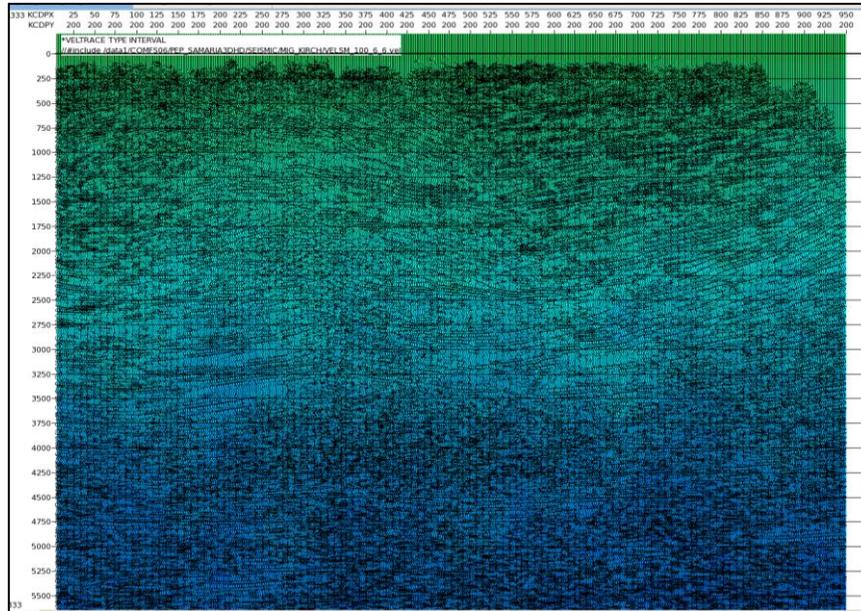


Figura 4.18 Campo de velocidades a cada 1000m, inline 200.

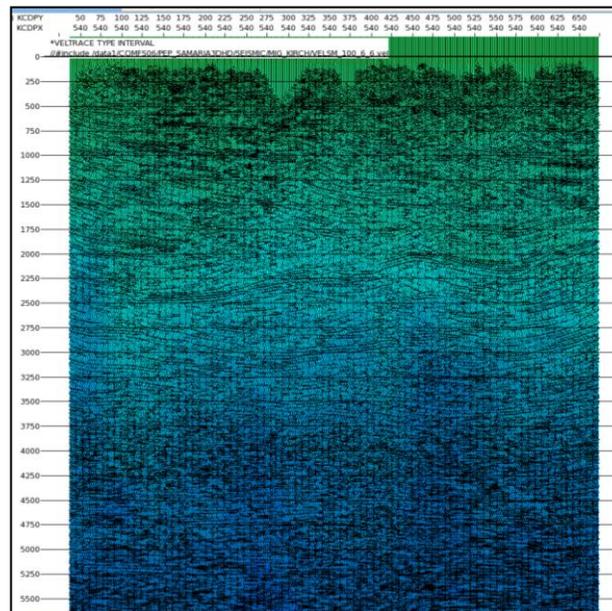


Figura 4.19 Campo de velocidades a cada 500m, crossline 540.

Paneles para el análisis de velocidades

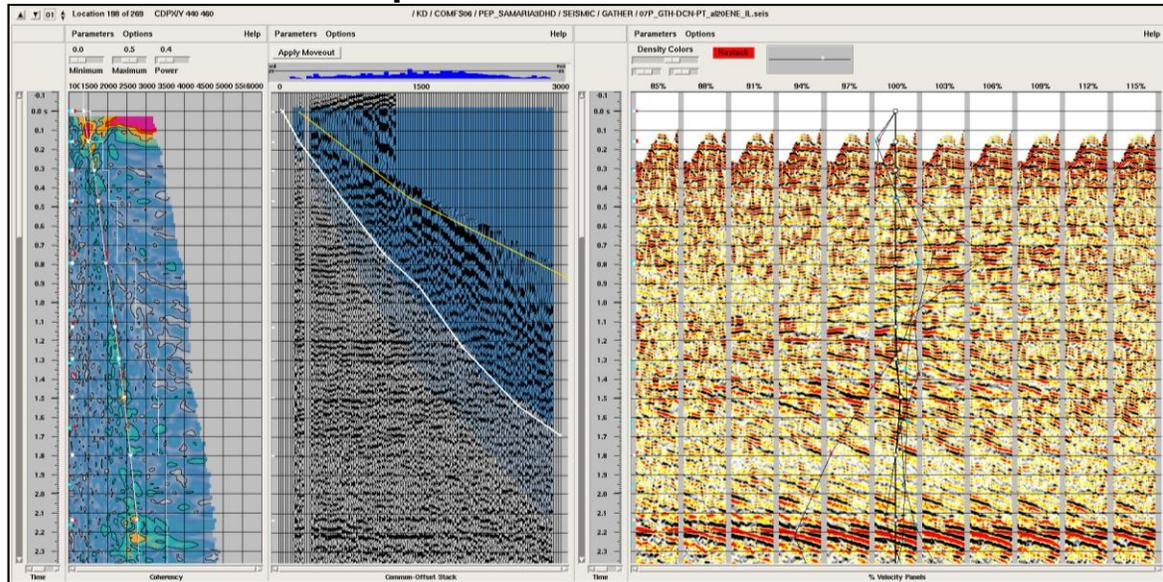


Figura 4.20 Análisis de velocidades en supergathers.

IV.12 Corrección dinámica por NMO (normal move-out)

El campo de velocidades descrito anteriormente es usado para la corrección dinámica por NMO, que consiste en llevar todas las trayectorias oblicuas de una familia CDP a la vertical, es decir, suponer que la fuente y el receptor se encuentran en la misma estación.

La corrección por NMO hace que las trazas se estiren a medida que la corrección del tiempo y la distancia aumenta, causando distorsiones de frecuencias en tiempos superficiales y offsets lejanos. Este fenómeno se denomina stretching, la zona distorsionada es borrada (mute) antes del apilamiento. Dependiendo de la relación señal-ruido de los datos sísmicos de campo, un stretching de un 25% a un 50% es aceptable (Yilmaz, 1987). Agregar a bibliografía

IV.13 Migración post-apilamiento en tiempo con el algoritmo de Kirchhoff

La Migración es un proceso por medio del cual los eventos sísmicos tales como las reflexiones con cierto echado son movidos a su posición verdadera, y las difracciones son colapsadas en el sentido espacial y temporal obteniendo de este modo una imagen más real del subsuelo. Entre los principales algoritmos se encuentran la **Migración de Kirchhoff**, basada en la solución integral de la ecuación de onda, y es la respuesta a un punto de difracción es una hipérbola definida por una determinada velocidad y por tanto la suma sobre su inversa coloca en fase a la difracción. Para la secuencia de procesamiento y de acuerdo al contrato se empleó la migración de Kirchhoff.

Control de Calidad de un Levantamiento Sismológico 3DHD

Se realizan pruebas para obtener los parámetros en líneas de control para mejorar las secciones con respecto al paso anterior (DMO), los parámetros para la migración fueron los siguientes: Campo de velocidades al 100%, Echado de las capas con un ángulo máximo de 30° y Apertura máxima de 2000 m.

La Figura 4.21, se presentan dos secciones una con el procesamiento DMO aplicado (A) y otra con la Migración Post-apilado en tiempo (B), ambas con un filtro (Pasa-Banda) y una ganancia (AGC) para una mejor visualización.

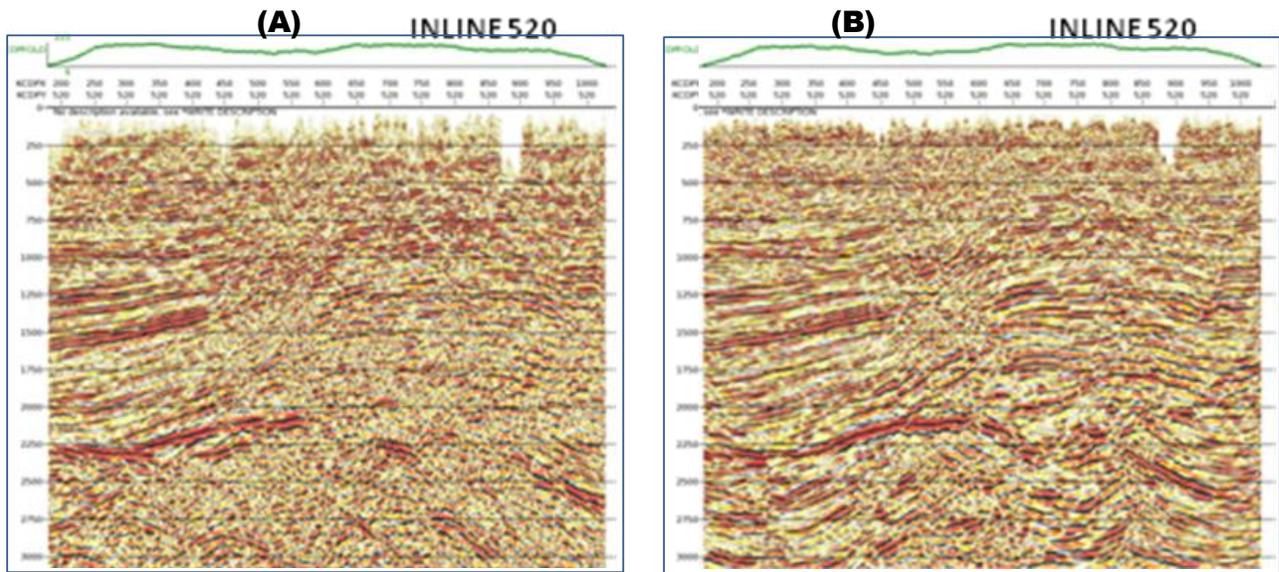


Figura 4.21 Apilado (inline 520), (A) con DMO. (B) migración post-apilamiento en tiempo con filtro y ganancia.

En la Figura 4.22 se muestran cortes de tiempo (time-slices) del cubo sísmico a 700 ms y 1000 ms.

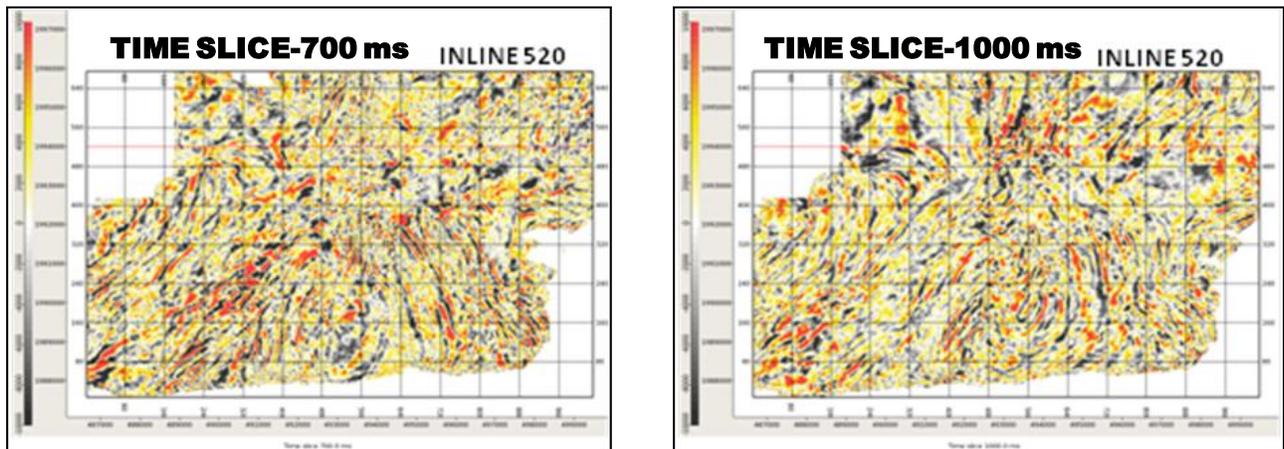


Figura 4.22 Cortes de tiempo (timeslices) ubicando la inline 520.

En la Figura 4.23 se muestran cortes de tiempo (time-slices) del cubo sísmico a 1300 ms y 1500 ms.

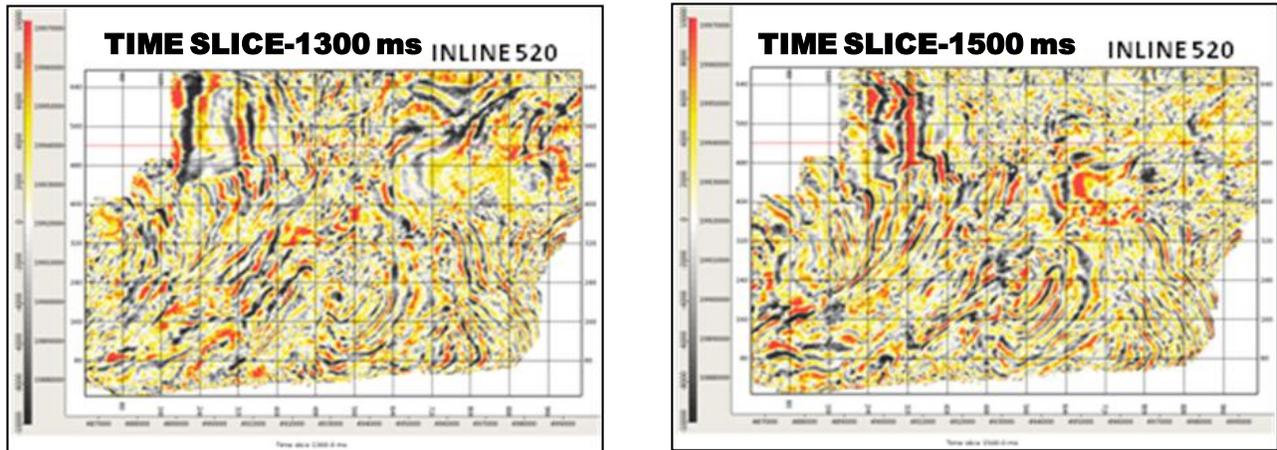


Figura 4.23 Cortes de tiempo (timeslices) ubicando la inline 520.

I.14 Análisis espectral del cubo sísmico migrado post-apilamiento en tiempo

Para finalizar el análisis espectral se obtiene un mapa de amplitud y frecuencia del cubo migrado post-apilado en tiempo en la ventana a nivel objetivo, este análisis se realiza una vez terminada la secuencia de procesamiento propuesta para el procesado en brigada, con el propósito de conocer el comportamiento de la frecuencia y la amplitud en el cubo sísmico, se genera un mapa con el contenido de frecuencias y otro con el contenido de amplitudes para los objetivos (Figura 4.23 y 4.24 respectivamente).

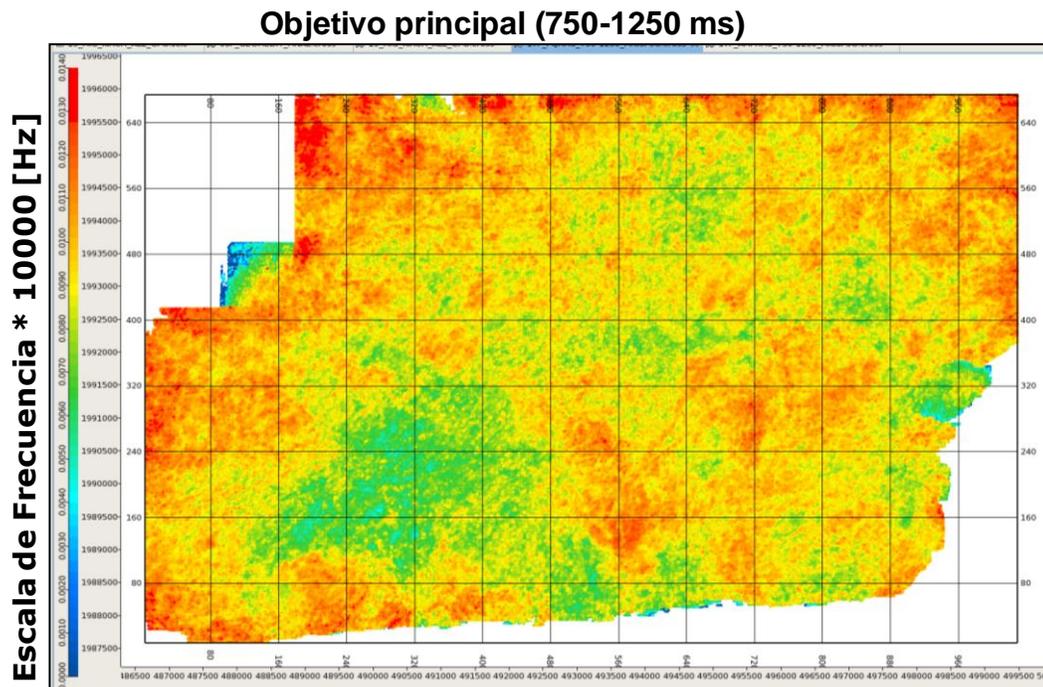


Figura 4.23 Mapa de frecuencia del cubo sísmico con migración post-apilamiento.

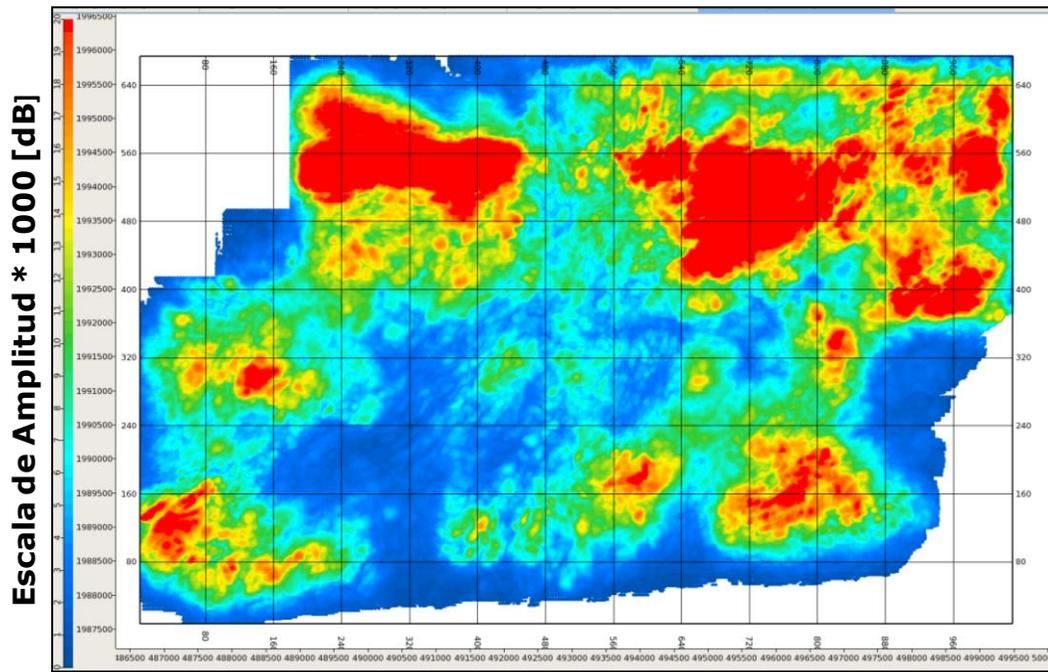


Figura 4.24 Mapa de amplitud del cubo sísmico con migración post-apilamiento.

Al observar el valor de la frecuencia dominante y máxima de los sismogramas adquiridos con respecto a la frecuencia procesada es diferente, debido a que a la mayoría de los procesos que se aplicaron posteriormente realzan la señal adquirida, resultando un incremento en el ancho de banda. Por lo anterior se concluye que los parámetros fueron satisfactorios porque dieron una mejor relación señal ruido, mejorando la resolución temporal y espacial de los eventos geológicos como se observa en las secciones sísmicas finales.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

El levantamiento sismológico Samaria-Íride 3DHD se llevó a cabo satisfactoriamente, en tiempo y forma, obteniendo buenos resultados conforme a lo esperado según los objetivos planteados al inicio del levantamiento. Durante el desarrollo del mismo se presentaron problemáticas sociales, las cuales ya se habían previsto y por las cuales se tuvieron que tomar decisiones que al final repercutieron en el diseño original del levantamiento, no obstante fueron bien libradas ya que los resultados obtenidos cubrieron las expectativas del cliente.

La etapa de control de calidad y procesado juega un papel muy importante ya que está involucrado desde el inicio del proyecto con la revisión del diseño teórico y posteriormente con el registro de cada una de las fases operativas durante el desarrollo del levantamiento, hasta la conclusión del mismo realizando la entrega final del cubo procesado; considerando que se interactúa diariamente con el resto de las fases operativas en la toma de decisiones así como en la revisión de la información que cada fase realiza para llevar un control estricto de la calidad de la información obtenida. El relieve de la zona, con alturas no mayores de 25 msnm, permitió tener un avance constante, lo que facilitó las actividades en campo, sin mayores complicaciones operativas.

La coordinación con la fase de gestoría (encargado de obtener los permisos de paso de servidumbre) fue muy oportuna ya, que al inicio de las operaciones se temía que el estudio no se pudiera realizar por conflictos sociales ya conocidos en la zona, sin embargo, fue bien controlada por parte de gestoría lo que permitió tener un avance de acuerdo a lo programado. La cobertura en FOLD se cumplió teniendo un Fold máximo de 30 muestras por Bin a nivel objetivo y un muestreo homogéneo en el área de interés.

Los resultados obtenidos del presente estudio sismológico serán utilizados posteriormente en una fase de interpretación más avanzada que tendrá como consecuencia la caracterización de la cuenca sedimentaria, los sedimentos que la constituyen, características estratigráficas y estructurales, ubicar secuencias sedimentarias de interés, proponer localizaciones exploratorias y apoyar en los trabajos de producción. La exploración en la búsqueda de yacimientos de hidrocarburos está destinada a detectar yacimientos comercialmente explotables, así como incrementar las reservas conocidas y disminuir el riesgo.

La sísmica de reflexión consiste en emitir ondas de sonido en la superficie del terreno (con explosivos enterrados en el suelo o con camiones vibradores en el caso de exploración en tierra), las que se transmiten a través de las capas del subsuelo y son reflejadas nuevamente hacia la superficie cada vez que haya un cambio importante en el tipo de roca; las ondas recibidas en superficie se miden por el tiempo que tardan en llegar, de lo que se infiere la posición en profundidad y la geometría de las distintas capas. El producto final es una imagen de subsuelo que permite conocer las características de las rocas del subsuelo.

Recomendaciones

La imagen sísmica adquirida como resultado de un levantamiento sismológico es el resultado de un conjunto de disciplinas que se engranan desde el inicio hasta su culminación; la calidad de la información registrada se traduce en señal y ruido, mismos que es recomendable se identifiquen y clasifiquen durante la fase de procesamiento para no afectar la fase y amplitud de la señal útil conservando todos los rangos de amplitud y frecuencias adquiridas en campo al aplicar los diferentes procesos.

Es recomendable que antes de realizar un levantamiento se reconozca físicamente el área de estudio para identificar aquellos eventos que se pueden asociar a ruidos aleatorios como zonas urbanas, vías de ferrocarril, líneas eléctricas de alta tensión, carreteras, zonas de ganado, etc., y de esta manera controlar y suprimir toda esa señal que no es útil.

Se recomienda trabajar en conjunto con el resto de las fases operativas, dándoles a conocer la relevancia del trabajo en campo, ya que un geófono mal plantado en campo representa trazas que se deberán eliminar del registro y eso nos lleva a no obtener una buena calidad en la información.

Una fase que juega un papel muy importante es la gestoría ya que de esta depende el inicio y avance de las operaciones, por lo que se recomienda se realice con eficiencia.

Se recomienda impartir pláticas continuas a lo largo del levantamiento a todos los departamentos operativos en conjunto con los representantes de cada área, para crear una mayor consciencia de la relevancia del trabajo de cada fase, ya que del buen cumplimiento de sus actividades depende la calidad de la información que se adquiere en campo.

Es recomendable realizar estudios de sísmica en áreas en las que ya existe extracción de hidrocarburos, así como en zonas aledañas no exploradas, ya que de los resultados obtenidos se puede reconstruir la secuencia de depósito de las cuencas y determinar posibles sistemas petroleros dentro de las mismas, factibles de ser explotados.

Bibliografía

Ángeles-Aquino, F.J., Reyes-Núñez, J., Quezada-Muñetón, J.M. y Meneses-Rocha, J.J., 1994; Tectonic evolution, structural styles, and oil habitat in Campeche Sound, Mexico: GCAGS Transactions, v. 44, p. 53-62.

Buffler, R.T. and D.S. Sawyer, 1985, Distribution of Crust and Early History, Gulf of Mexico Basin: Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions, v. 35. P. 333-344.

Chávez-Valois, V.M., Clara-Valdés, M.L., Juárez-Placencia, J.I., Alor-Ortiz, I., Mata-Jurado, M., Villagrán-Yáñez, R., Guerrero-Tristán, M. y Ghosh, S., 2004, A New approach of Tertiary plays in a multidisciplinary framework: Sureste Basin, Tabasco, México: Resumen Extendido, AAPG Internacional Conference, Cancún, México.

Cruz, M.M.A; Reyes, T.E; López C. H; Sánchez R. R, León R.R; Peterson R.R, Flores Z.J; Barrera G.D; Vázquez C.A; Peña G. A, Fonseca S. I, Hernández A. L; 2010 Estudio Interregional Tectónica Salina y sus Implicaciones en la Exploración Petrolera. Pemex-Inédito pt: 197.

Guzmán V.M, Clara V.L, Medrano M.L, 1995. Estudio de biomarcadores parte II: el hábitat de petróleo en las Cuencas del Sureste, un enfoque con biomarcadores Proy. CAB-501 IMP-PEMEX. Inédito.

Martínez-Kemp, H., González-Posadas, J.F. y Bartok, P., 2005a, Salt Involvement in the Jujo-Tecominoacán Thrust Belt, Chiapas-Tabasco Región, South East Basin, Mexico: GCAGS Transactions, v. 55, p. 520-530.

Meneses de Gyves, J., 1980, "Geología de la Sonda de Campeche", Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, Vol.32, pp.1-26.

Padilla y Sánchez, R.J., 2007, Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo LIX, num1, 2007, pp.19-42.

Pindell, J.L., 1985, Alleghanian reconstruction and subsequent evolution of the Gulf of Mexico, Bahamas, and Proto-Caribbean: Tectonics, v. 4, p. 1-39

Pindell, J., L. Kennan, J. Rosenfeld, J. Granath, Miranda-Canseco, E., Patiño-Ruiz, J., Alvarado-Céspedes, A., Marino-Castañón, A., Hernández-Bravo, J., Espinosa-Nava, M., Ramírez-Espinosa, A., Maldonado-Leal, M., Marín-Toledo, A., Alor-Ortiz, I., Darío-Gómez, R., Vera-Morán, A., Reyes-bache, G., Hernández-Mejía, J., Alzaga-Ruiz, H., Méndez-Vázquez, J., Jacobo-Albarrán, J. y Hernández-Ávila, L., 2002, Análisis paleogeográfico Mesozoico-Cenozoico y dinámica de cuencas en el Golfo de México profundo y márgenes: La relación entre evolución tectonosedimentaria y sistemas petroleros: PEP-Tectonic Analysis. Informe Interno, Pemex Exploración y Producción. 328p.

Pindell, J., A. Watts, and L. Kennan, 2008, Refinement of Jurassic tectonic evolution model using new magnetic data, and 2D process-oriented gravity modeling of rifting, subsidence, and heat flow history, East Mexican margin/western Gulf of México: PEP-Tectonic Analysis. Informe Interno, Pemex Exploración y Producción.

Control de Calidad de un Levantamiento Sismológico 3DHD

Soto-Cuervo, A., Ortega-González, V. y Mora-Oropeza, G., 2004, Present and future of the Salina del Istmo Basin and its offshore extension into the Gulf of Mexico: AAPG International Conference, Resumen Extendido, Cancún, México

Oviedo-Pérez, A., 1998, New Exploration Concept in the Salina Basin, Southeast Mexico: AAPG Annual Convention, Abstract

PEMEX Y Pindell, J., 2002, Origen, evolución e importancia económica Petrolera del Sureste de México (Cuenca de Macuspana), informe técnico interno

PEMEX 2013, "Provincia Petrolera Sureste (Salina del Istmo, Reforma-Akal y Macuspana)"

Santiago-Acevedo et al (1984). Bioestratigrafía de secuencias del Mioceno-Plioceno de la cuenca Macuspana, sureste del Golfo de México.