



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
División de Estudios de Postgrado

ANÁLISIS DE LA DESCOMPOSICIÓN ESPECTRAL EN EL
CUBO PRELIMINAR ALMEJA CISNE 3D.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

(EXPLORACIÓN DE RECURSOS ENERGÉTICOS DEL
SUBSUELO)

P R E S E N T A :

RACIEL GARCÍA GARCÍA

Director de Tesis:
DR. MARTÍN CARDENAS SOTO



Ciudad Universitaria

ABRIL de 2006

Dedicatorias y Agradecimientos

A mí distinguido Director de Tesis y Sinodales:

Modelos de valor y sabiduría, por su desinteresada y generosa labor de transmisión del saber, su inagotable entusiasmo y sus acertados consejos y sugerencias durante la elaboración de este trabajo.

A mis amigos y compañeros de trabajo:

Un reconocimiento especial, sin su ayuda incondicional y desinteresada no hubiera podido llevara a cabo mis aspiraciones.

A mis Padres:

Que me han dado la oportunidad de existir, continúan rezando por mí y siguen guiando a sus hijos por caminos de inquietud intelectual.

A mis Hermanos:

Por sus principios inflexibles, su determinación y su incesante aliento en momentos de dificultad.

A Yadira:

Por su amor, confianza, paciencia y permanente apoyo para superar los momentos mas difíciles.

CONTENIDO

Lista de figuras

Lista de tablas

Apéndices

RESUMEN

INTRODUCCIÓN 1

CAPITULO I: GENERALIDADES

I.1 Área de estudio 4

I.2 Antecedentes Geológicos 5

I.3 Antecedentes Geofísicos 6

CAPITULO II: ELEMENTOS PARA EL ANÁLISIS DE INFORMACIÓ SÍSMICA

II.1 Cubo sísmico 8

II.2 Cubrimiento Sísmico 3D 10

II.3 Resolución Sísmica 11

(a) Criterio de Rayleigh 11

(b) Criterio de Ricker 13

(c) Criterio de Widess 13

II.4 Resolución vertical 14

II.5 Resolución horizontal 14

II.6 Relación señal a ruido 16

II.7 Ruido sísmico 17

II.8 Atenuación de ruido	18
II.9 Amplitud sísmica	18
II.10 Atributos sísmicos	20
II.11 Descomposición espectral	22

CAPITULO III: LEVANTAMIENTO SISMOLÓGICO ALMEJA-CISNE 3D

III.1 Adquisición de información sísmica	26
III.2 Objetivo del levantamiento	26
III.3 Parámetros de adquisición	27
(a) Cobertura del subsuelo	28
(b) Separación de los cables	29
III.4 Procesado preliminar de datos	29
(a) Transcripción de datos de un solo cable en formato SEG-D en tiempo real.	30
(b) Salida de tiros individuales.	32
(c) Envío de tiros con geometría al disco.	32

CAPITULO IV: ANÁLISIS Y APLICACIÓN DE LA DESCOMPOSICIÓN ESPECTRAL EN EL CUBO PRELIMINAR ALMEJA-CISNE.

IV.A Análisis de resolución sísmica	34
IV.A.1 Descomposición espectral en la resolución sísmica.	34
IV.A.2 Transformada de ondícula	35
(a) Transformada de ondícula continua.	36
(b) Ondícula kernel	37
(c) Descomposición espectral versión Paradigm Geophysical	38

IV.A.3 Parámetros	40
(a) Rango de frecuencia de la información sísmica	40
(b) Número de bandas en la que se descompone la información sísmica.	43
(c) Modo de incremento en frecuencias u octavas.	44
(d) Tamaño del operador (muestras).	44
(e) Tipo de atributo.	44
(f) Rango de salida.	45
IV.B Análisis de la huella de adquisición	52
IV.B.1 Descomposición espectral en la huella de adquisición	52
IV.B.2 Análisis post-stack	52
IV.B.3 Metodología en la detección de huellas de adquisición	53
(a) Análisis de mapas de cubrimiento.	54
(b) Aplicación de la descomposición espectral al cubo preliminar Almeja-Cisne.	58
(c) Normalización.	58
(d) Análisis de las secciones horizontales (slices) en el dominio tiempo-frecuencia.	60
IV.B.4 Mapa de amplitud vs huellas de adquisición.	64
(a) Continuidad de horizontes	65
(b) Parámetros de extracción.	66
(c) Análisis de mapas de amplitud	67
IV.C Análisis de ruido sísmico	72
IV.C.1 Ruido coherente e incoherente	72
IV.C.2 Tipos de ruido y la envolvente gaussiana	73

IV.C.3 Metodología de visualización e identificación cualitativa de ruido sísmico en los cubos de la envolvente de la señal.	75
(a) Parámetros	75
(b) Ruido sísmico vs crossplots	75
1) Normalización	76
2) Determinación cualitativa y coherente entre señal y ruido.	77
IV.C.4 Calculo de la relación señal a ruido (S/R).	92
(a) Relación señal a ruido en etapa pre-stack	92
(b) Calculo de la relación S/R usando parámetros estadísticos.	93
1) Descomposición espectral.	94
2) Crossplots S/R	95
CAPITULO V: RESULTADOS	102
CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	113
APENDICES	115
GLOSARIO DE TÉRMINOS	145
BIBLIOGRAFÍA	147

RESUMEN

La adquisición sísmica 3D debe estar diseñada para contar con una resolución que sea capaz de resolver espesores muy cercanos entre sí. Sin embargo, existen contribuciones inherentes en los registros sísmicos, como lo es el ruido y las huellas de adquisición, entre otros, lo cual enmascara a los reflectores sísmicos que pueden representar áreas de gran potencial petrolífero. Con el objetivo de mejorar la resolución sísmica, en este trabajo se desarrolló una metodología basada en la descomposición espectral a fin de explorar las características sísmicas indeseables (ruido y huellas de adquisición) comunes en la adquisición de datos en un ambiente marino. Aplicamos la descomposición espectral al cubo preliminar del prospecto Almeja-Cisne, siguiendo los objetivos geológicos de interés del prospecto (1 a 3.6 s).

En el rango de baja frecuencia (5 a 32.5 Hz), los resultados muestran que se mejora la resolución sísmica, permitiendo visualizar continuidad de reflectores entre 1 a 2.8 s; así mismo, se pudieron detectar las estrías características de la huella de adquisición entre 1 y 1.2 s.

La correlación de los cubos de descomposición espectral (DS) y preliminar permitió resaltar la contribución de la señal de aquella del ruido sísmico. Esto se llevó a cabo mediante el uso del atributo de la envolvente de la señal y gráficas cruzadas (cubos DS vs apilado preliminar). El cálculo de la relación señal a ruido (S/R) es un parámetro muy importante en estudios pre-apilados y en ese sentido, se llevó a cabo el cálculo de esta relación en un intervalo de tiempo de 1.1 a 1.6 s, lo que permitió obtener un rango de valores que osciló entre 0.05 y 12.

INTRODUCCIÓN

En la exploración petrolera, la tierra siempre ha sido visualizada en tres dimensiones y las reservas petroleras que nosotros evaluamos están contenidas en trampas tridimensionales, sin embargo, antes de los años setentas, el método sísmico usado en la búsqueda de imágenes del subsuelo fue tradicionalmente en dos dimensiones; Walton (1972), introdujo el concepto de levantamientos sísmicos tridimensionales, marcando la era del inicio de la adquisición de levantamientos sísmicos 3D.

Los métodos convencionales de adquisición sísmica marina (STREAMER), en el diseño de levantamientos sísmicos 3D, se concentran en las propiedades de geometría de la adquisición, tales como cubrimiento (fold), distribución de offsets y rangos de azimut; sin embargo, debido a la complejidad operacional y geofísica (e.g, metodologías de adquisición complejas, feathering, dirección del levantamiento, etc.), los levantamientos sísmicos marinos 3D siempre involucran muestreos irregulares de azimuts, offsets y cubrimiento. Es un hecho que la adquisición sísmica marina 3D es intrínsecamente irregular, en el sentido de que las trazas grabadas nunca están localizadas donde fueron diseñadas para estarlo, de tal forma que para entender y cuantificar el impacto de las geometrías de adquisición en la calidad de la información en el procesado final de un levantamiento sísmico marino 3D, es necesario desarrollar una metodología que nos permita validar la información sísmica de campo, y proporcione una mayor confiabilidad al procesador de datos y al interprete, en cuanto a la calidad de la información adquirida en campo.

Algunas de las irregularidades sísmicas que se pueden mencionar como más importantes de una sísmica marina convencional 3D son: huellas de adquisición, ruido sísmico y efectos del medio en la propagación de la onda (variación del ancho de banda). La eficiencia de la adquisición sísmica marina convencional se ha incrementado de manera significativa durante la última década, extendiéndose en particular a la mejora de la resolución y la calidad de la imagen, principalmente en dirección inline de la adquisición sísmica (Brown,1999).

Castagna *et al*, 2003, mencionan que el análisis en el dominio tiempo-frecuencia puede proveer resolución de altas frecuencias a zonas de bajas frecuencias y resolución a grandes profundidades en zonas de altas frecuencias, características deseables de ser analizadas en información sísmica.

Gardner *et al* (1998), desarrollan una metodología para reducir el efecto de las huellas de adquisición en secciones migradas que pueden resultar en interpretaciones incorrectas, y propuso mejorar los programas de migración y DMO con la idea de que estos actúen como minimizadores.

Smith (1999), realiza una discusión de los efectos del ruido de ambiente en la amplitud y fase, mostrando que el ruido de ambiente es particularmente problemático en información sísmica marina, debido a que su espectro de amplitud sobrepasa y contamina la señal sísmica; además, existe una ausencia de fase coherente a intervalos de muestreo espacial típicos.

Chopra y Larsen (2000), proponen una metodología efectiva para detectar y remover las huellas de adquisición; y un volumen dado fue seccionado en rebanadas de tiempo en cada muestra y examinadas en el dominio f-k para patrones lineales que exhibían correspondencia con las alineaciones de la huellas.

Las diferentes metodologías desarrolladas por los autores antes mencionados, deslumbran características de las irregulares sísmicas marinas como: detección de huellas de adquisición, estimación de resolución temporal, mejora de la relación señal a ruido y los efectos indeseables del ruido de ambiente; sin embargo, cabe resaltar que utilizan diferentes metodologías para estimar las características antes mencionadas.

Recientemente se desarrolló un nuevo método para mejorar la relación señal a ruido y la resolución de una sección sísmica basada en las propiedades de la transformada de ondícula de cruce por cero y la buena correlación entre ondas

reflejadas de trazas sísmicas vecinas. Esta metodología fue propuesta por Kunpertg *et al*, (2000), en la cual usó datos reales de etapa poststack, en donde observó que efectivamente había una mejora en las características sísmicas mencionadas al principio de este párrafo.

El objetivo de este trabajo consiste en presentar una metodología para mejorar la resolución vertical, calidad de imágenes sísmicas y detectar huellas de adquisición en el dominio tiempo frecuencia, mediante la aplicación de la descomposición espectral de un cubo sísmico preliminar.

En este trabajo, en el primer capítulo describe la ubicación del área de estudio, así como los antecedentes geológicos y geofísicos de la misma; en el segundo capítulo se da énfasis a la importancia de diversos conceptos geofísicos como son: cubo sísmico, cubrimiento en 3D, resolución sísmica, relación señal a ruido, ruido sísmico, amplitud símica, atributos sísmicos y finalmente, se describe la metodología de la descomposición espectral.

En el tercer capítulo, se presenta una descripción general del Levantamiento Sismológico Tridimensional Almeja-Cisne 3D y por último, en el cuarto capítulo, se realiza el análisis y aplicación de la descomposición espectral del cubo preliminar de la parte somera del levantamiento Almeja-Cisne. Finalmente, se describen los resultados del análisis realizado, conclusiones y recomendaciones, en el quinto y sexto capítulo, respectivamente.

Capítulo I

Generalidades

I.1 Área de estudio

El estudio sísmico 3D Almeja-Cisne, está localizado en el suroeste del Golfo de México, costa afuera del estado de Tabasco, en el área del Proyecto Coatzacoalcos, en aguas que promedian aproximadamente de 5 a 30 metros de profundidad. El área del estudio sísmico es un rectángulo que cubre aproximadamente 1300 km² (Figura 1). En la tabla 1 se muestran las coordenadas correspondientes al área.

Tabla 1. Coordenadas del levantamiento, Datum geodésico NAD 27.

PROSPECTO ALMEJA - CISNE		
CUADRO DE COORDENADAS		
VÉRTICE	COORDENADAS U.T.M.	
	X	Y
A	390,300.0000	2,045,700.0000
B	443,900.0000	2,065,100.0000
C	451,700.0000	2,043,200.0000
D	398,000.0000	2,024,000.0000

NOTA: DATUM EN NAD 27

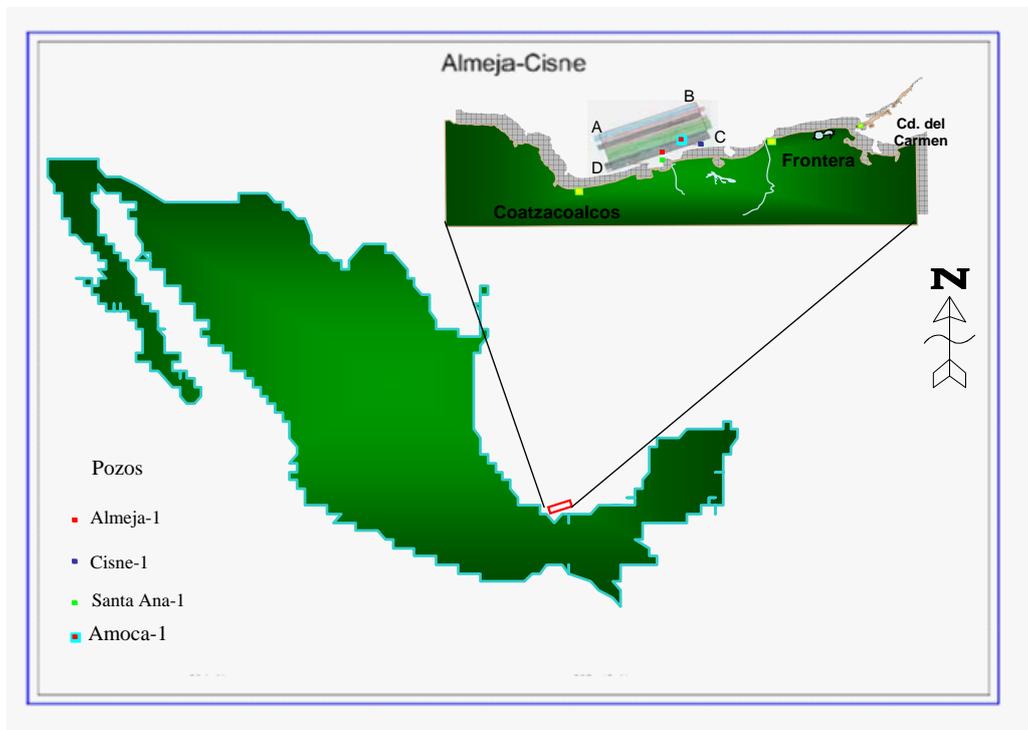


Figura 1. Mapa de ubicación del estudio sísmico Almeja-Cisne 3D (Pemex Exploración y Producción *et al*, 2003). Se muestra un perfil en planta SW-NE. Las letras A,B,C y D delimitan el área.

I.2 Antecedentes Geológicos

El área del estudio sísmico se encuentra dentro de la Provincia Geológica Cuenca Salina del Istmo. En tierra, esta Provincia tiene 46 campos productores de aceite y gas, mientras que en el mar solo se han encontrado 3. La parte sur terrestre, se considera una cuenca en una etapa exploratoria madura, y al norte, costa afuera, en el área del Proyecto Coatzacoalcos, una cuenca en etapa inicial de conocimiento exploratorio.

La actividad exploratoria en el área que cubre el Proyecto Coatzacoalcos inició en 1950, y hasta 1960 se habían descubierto 3 campos: Tortuguero, Rabón Grande y Santa Ana; posteriores a estos, de 1968 a 1982, se perforaron 10 pozos exploratorios, resultando productor solo el Marbella-1; en 1998 reinicia la exploración con la perforación del pozo Tabscoob-1 que también resultó productor. En el 2002 se perforan 2 pozos exploratorios que resultaron improductivos. En el 2003, se perforan los pozos Amoca-1, Xaxamani-1 y Tecolli-1, resultando productores.

En el sistema petrolero Terciario Superior - Jurásico Superior, en la porción marina de la Cuenca Salina del Istmo, se han identificado cinco plays productores en tierra y un play mesozoico hipotético. Actualmente la mayor exploración se enfoca, tanto en tierra como en la porción marina, a yacimientos terciarios. Estos yacimientos están asociados directamente al tipo de plays. A continuación se presenta una descripción de los cinco plays que ocurren en el proyecto:

Play Blasillo Subsal.- Esta representado por arenas turbidíticas, estructuradas por compresión, del Mioceno Medio - Inferior, que se encuentran por debajo de la sal.

Play Blasillo.- Son arenas turbidíticas estructuradas en pliegues compresionales, del Mioceno Medio - Inferior. El yacimiento es similar al del Play Blasillo Subsal; la diferencia es la ausencia de sal.

Play Magallanes.- Son arenas del Mioceno Superior – Medio, que se acuña contra las estructuras compresivas preexistentes del Play Blasillo.

Play Cinco Presidentes.- Es el mas importante productor en tierra y está representado por arenas turbidíticas sobre o que se acuñan contra la sal.

Play Orca.- Está representado por arenas turbidíticas del Plioceno Medio, asociadas a fallamiento normal.

Play Mesozoico Subsal.- Está representado por carbonatos de cuenca, fracturados y estructurados en un cinturón plegado abajo de la sal.

I.3 Antecedentes Geofísicos

Los levantamientos sísmicos en el área del Proyecto Coatzacoalcos iniciaron en 1995 con los estudios sísmicos regionales Catemaco 2D y Coatzacoalcos 2D; así mismo, en 1996 se adquirió el estudio 2D (Dos Dimensiones) Marbella-Subsal; posteriormente se llevaron a cabo estudios sísmicos de semidetalle, adquiriéndose Coatzacoalcos 3D en 1996; luego, en un solo contrato, se realizaron de 1997 a 1998 los levantamientos Santa Ana 2D, Santa Ana 3D y Norte de Kinil 2D; en 1998 se adquirió Santa Ana 3D con geometría de cable de fondo (OBC), mientras que en 1999 se adquirieron Rabón Grande 3D con el mismo tipo de geometría y Tucoo 3D (Streamer).

El levantamiento sísmico Almeja-Cisne 3D, se adquirió en el año 2002 con geometría de cable remolcado (STREAMER) que cubrió una superficie de apilamiento total de 1300 km^2 , que corresponde a un desarrollo lineal de CMP de 52,000 km, basado en una celda (bin) de 12.5 x 25 m; se emplearon dos fuentes de energía de 3930 pulg³ disparando en forma alternada cada 25 m (flip-flop), a una presión de 2000 psi, dando como resultado la adquisición de 115 líneas de navegación de 57 km de longitud cada una. Los estudios sísmicos que limitan al Levantamiento Almeja-Cisne 3D son: al Norte Santa Ana 2D, al Sur Rabón Grande 3D y Santa Ana 3D ambos con geometría de cable de fondo, al Oeste Santa Ana 3D y al Este Nich-Kinil 3D.

Los parámetros de adquisición del Levantamiento Almeja-Cisne se determinaron tomando en consideración algunas líneas sísmicas del estudio Santa Ana 3D (STREAMER), así como información de pozos como Almeja-1, Cisne-1, Santa Ana 1 y Amoca-1.

Las características de objetivos, adquisición y procesado preliminar del levantamiento Almeja-Cisne 3D, se describen en el capítulo III.

Capítulo II

Elementos para el Análisis de Información Sísmica

II.1 Cubo Sísmico

La tierra ha sido conceptualizada en tres dimensiones y las reservas de petróleo se han encontrado y evaluado en trampas tridimensionales (Brown, 1999). Sin embargo, el método sísmico que se ha usado tradicionalmente para obtener la imagen del subsuelo terrestre ha sido en dos dimensiones. Walton (1972) presentó el concepto de levantamientos sísmicos tridimensionales. Bone *et al* (1976) presentaron en la XLVI reunión anual de la Sociedad de Exploración Geofísica (SEG), las ventajas de la alta resolución en 3D. La esencia del método 3D es la adquisición de información circular seguida de un procesado y una interpretación del volumen denso de información (Brown,1999).

Un levantamiento 3D provee un volumen de información sísmica para su interpretación; este volumen es a lo que en la actualidad y comúnmente se le llama cubo sísmico.

El volumen 3D se puede presentar en varios productos (Fig. II.1A), por ejemplo; secciones verticales (lines y cross-lines), secciones horizontales o secciones “seiscrop” ó rebanadas de tiempo (time-slices). La combinación de secciones verticales y horizontales (Fig. II.1B), permiten apreciar la imagen del subsuelo en tres dimensiones y dar una interpretación con un mejor significado.

La mayoría de las interpretaciones 3D se llevan a cabo con estaciones de trabajo interactivas. Los beneficios de trabajar interactivamente son, por ejemplo: ahorro de tiempo eliminando los métodos convencionales de manejo de información en papel, combinar la información sísmica para tener la mejor visualización de la misma y uno de los puntos mas importantes y que se tratará en este trabajo, es el de verificar las inconsistencias del volumen de la información sísmica adquirido, con la finalidad de que el interprete tenga información mas completa y exacta.

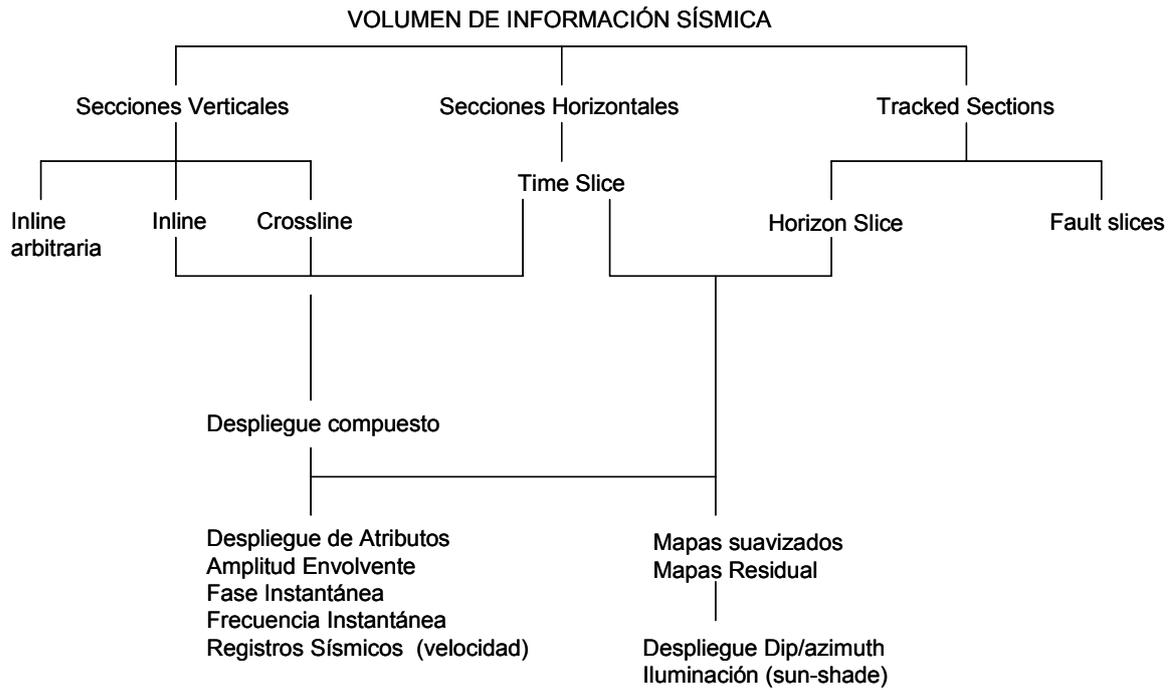


Fig. II.1A Nomenclatura de productos 3D. El volumen de información puede presentarse en secciones horizontales, verticales o a lo largo (o paralelos a) de horizontes. Pueden existir combinaciones de secciones horizontales con verticales (composite displays), así mismo pueden crearse mapas. (Sheriff & Geldart, 1995).

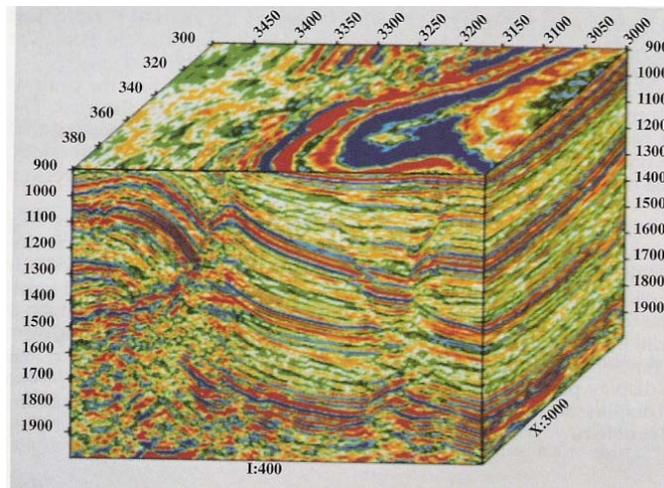


Fig. II.1B Despliegue de un cubo formado por dos secciones verticales ortogonales y una sección horizontal. (Brown, 1999).

II.2 Cubrimiento Sísmico 3D

Usualmente, se denomina cubrimiento 3D (fold of coverage) al número de trazas en un área ó celda (bin).

En 1987, Yilmaz presenta los beneficios de los levantamientos sísmicos con alto cubrimiento en la exploración y explotación de hidrocarburos.

Sheriff y Geldart (1995) sugieren que los trabajos 3D requieren solo la mitad de la multiplicidad de un trabajo 2D para lograr la misma calidad de información. Esta declaración está basada en el hecho de que la migración en tres dimensiones incrementa el número de trazas apiladas que contribuyen a la imagen final (Yilmaz, 1987).

Sin embargo, Huard y Spitz (1998), presentaron los siguientes argumentos acerca de la inconsistencia del cubrimiento sísmico 3D en el subsuelo terrestre:

- Es un hecho que una adquisición sísmica 3D es intrínsecamente irregular, en el sentido de que las trazas registradas nunca están localizadas donde fueron diseñadas.
- Cuando las irregularidades en adquisición sísmica son grandes con respecto al diseño original y se generan “huecos” (gaps) en el cubrimiento, estos dan lugar a efectos de adquisición que pueden afectar la calidad del volumen final de información.
- Cuando los “huecos” en el cubrimiento (debido a corrientes que causan el desplazamiento de los cables) exceden las especificaciones contractuales, el barco sísmico tiene que regresar y re-disparar algunas porciones del levantamiento.
- La experiencia común en la industria demuestra que los rellenos de porciones de áreas (infill acquisition) en levantamientos es del orden del 10%, y en algunas partes del mundo pueden exceder el 50%.

II.3 Resolución Sísmica

Sheriff & Geldart (1995) definen la resolución como la separación mínima entre dos eventos del subsuelo, de modo que se pueda decir que hay dos características separadas en vez de una. Por lo que, en sísmica de reflexión, nos podríamos preguntar: a) ¿Qué tan alejadas (en espacio o tiempo) deben estar dos interfases para mostrarse como reflectores separados?, o b) ¿Qué tanta separación debe haber entre dos características de una sola interfase para que aparezcan como características separadas?. Estas son algunas de las preguntas más comunes que se hacen acerca de la resolución, y en ese sentido es importante conocer los criterios establecidos por Rayleigh, Ricker y Widess (Kallweit y Wood,1977), ya que nos dan la pauta para responder estas preguntas y otras; tales criterios se explicarán en este capítulo.

Las definiciones históricas de la resolución nos llevan a referirnos a los criterios estudiados por Rayleigh (1957), Ricker (1953) y Widess (1973). En cada caso se refieren los límites teóricos de la resolución a parámetros que pueden ser medidos en la ondícula que es convolucionada con una secuencia reflectiva (Kallweit y Wood,1977).

(a) Criterio de Rayleigh

Desde el punto de vista óptico, un punto fuente de luz es similar a un impulso de reflexión, los instrumentos ópticos análogos a la tierra, y los patrones de difracción juegan un papel en la ondícula de banda limitada. El poder de resolución de un instrumento óptico estriba en su habilidad de producir imágenes separadas de objetos que caen cerca uno de otro. Los patrones de difracción colocan un límite superior en la resolución en una forma análoga a la propagación de la ondícula sísmica (Figura II.2). Esto es, si las leyes de la geometría óptica fueran aplicadas perfectamente, los instrumentos ópticos podrían enfocar luces paralelas a un punto de imagen.

El criterio establecido por Rayleigh (Jenkins y White, 1957, p.300) es definido como la separación pico a valle ($b/2$), que es el límite de la resolución, es decir, la separación del lóbulo central a mínimo adyacente en un intervalo de tiempo

de un patrón de difracción. En otras palabras, la imagen de dos objetos será resuelta ópticamente cuando su separación sea igual o exceda a la separación pico a valle del patrón de difracción del instrumento óptico.

Es importante notar en la figura II.2, la anchura de la ondícula de difracción (b) y el intervalo del primer cruce por cero ($2T_0$) son idénticos. Esto no es verdad para ondículas sísmicas que contienen energía de lóbulos negativos, como se observa en la figura II.3. Sin embargo, la anchura de la ondícula parece estar directamente relacionada a la resolución sísmica, para el caso de ondículas con espectro en blanco.

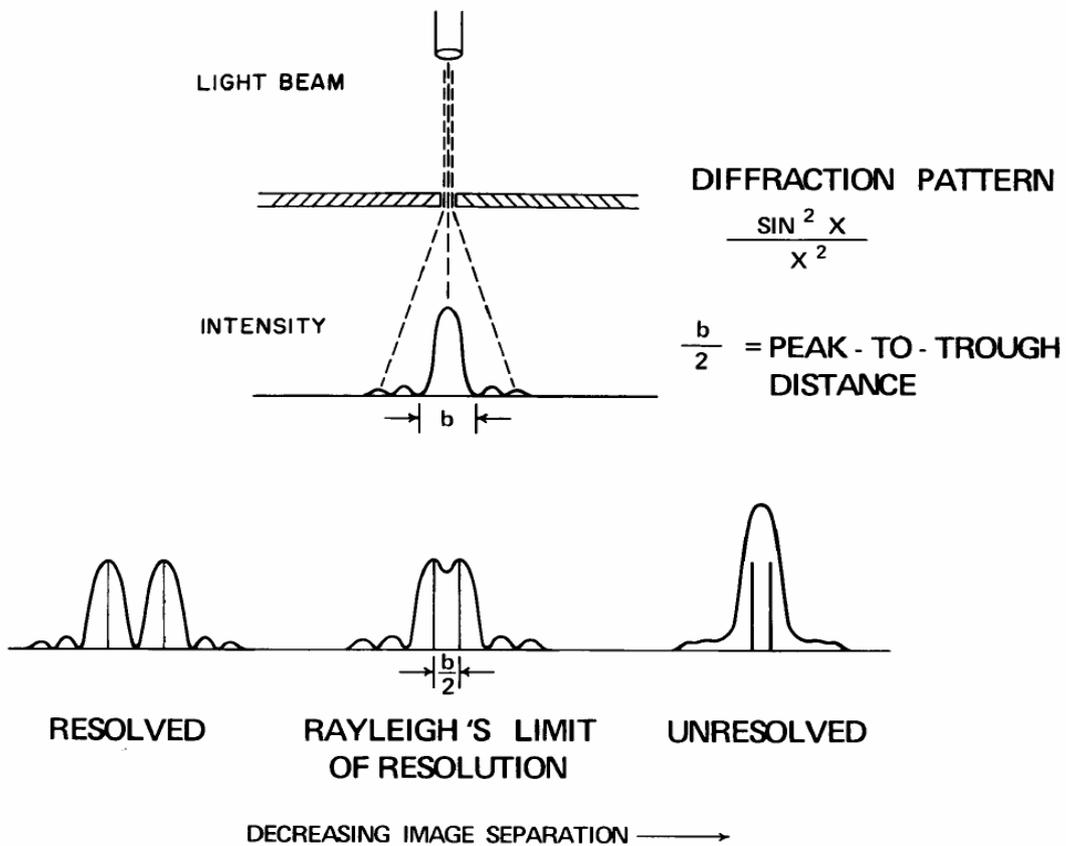


Figura II.2 Criterio de Rayleigh mostrando el límite de un instrumento óptico para distinguir imágenes separadas de objetos que caen cerca uno del otro, el cual ocurre cuando las dos imágenes difractadas son separadas por una distancia igual a la distancia pico a valle del instrumento del patrón de difracción.

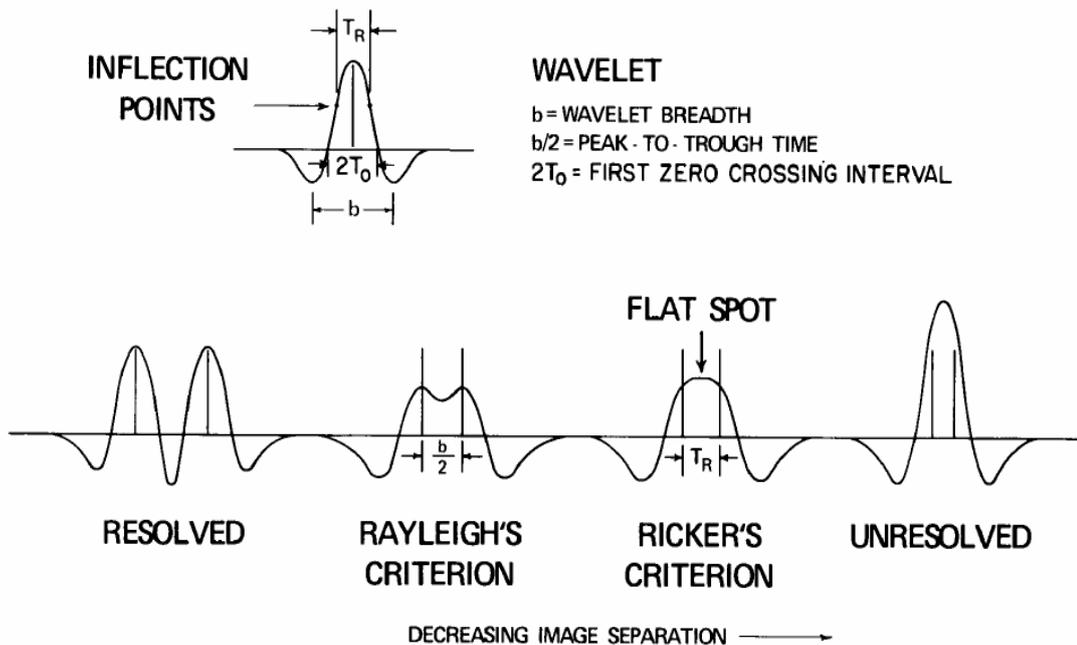


Figura II.3 Límite de resolución Rayleigh, ocurre cuando las imágenes son separadas por un intervalo de tiempo de pico a valle, donde el límite de Ricker se presenta, es decir, cuando las imágenes están separadas por un intervalo de tiempo igual a la separación entre los puntos de inflexión.

(b) Criterio de Ricker

Ricker (1953) estudió la forma de onda compuesta como una función de la separación, y escoge el límite de resolución como la separación de la forma de onda compuesta que tiene una curvatura de cero a su lóbulo central, ej. "flat spot" (Figura II.3). Ricker (1953, p.774) muestra que el límite de resolución puede ser determinado por la diferencia de una ondícula doble; es decir, un flat spot ocurre cuando dos impulsos están separados por un intervalo igual a la separación entre los puntos de inflexión en la parte central del lóbulo de la ondícula convolucionada.

Ricker (1953) fue el primero en descubrir esta propiedad y la aplicó al caso de impulsos de igual amplitud con igualdad de polaridades. Widess (1973) se dedicó exclusivamente al caso de igual amplitud y polaridades opuestas.

(c) Criterio de Widess

Widess (1973) describe un estudio de la forma de onda compuesta obtenida por la convolución de una ondícula de fase cero con dos impulsos de igual amplitud

y de polaridad opuesta. Una observación fundamental es que como la separación de un impulso decreciente, el efecto de convolución de la ondícula con dos impulsos de polaridades opuestas sería una de las diferencias.

Widess (1973), observa que como las separaciones decrecientes, hay un punto donde la ondícula compuesta se estabiliza en una buena réplica de la forma de onda derivativa, y para todo propósito práctico, no hay un cambio en el tiempo entre pico y valle pero si existe en la amplitud de la forma de onda compuesta.

Widess concluye por inspección que el límite de separación para una ondícula estabilizada ocurre cuando los espesores de capa (ej. separación de impulsos) son iguales a $1/8$ de una longitud de onda de la frecuencia predominante de la ondícula propagada. Widess (1973) confirma que las capas más delgadas que $1/8$ de la longitud de onda podrá ser resuelta en principio por la medición de los cambios en amplitud de la reflexión compuesta. Para Widess (1973) la separación de $1/8$ de la longitud de onda establece el límite de resolución de una capa delgada, además de que el decremento en la separación de los impulsos no parece tener correspondencia a los cambios en tiempo entre pico y valle desde una base visual.

II.4 Resolución Vertical

La resolución vertical también se puede expresar como la mínima separación entre reflectores, necesaria para definir interfases separadas, más que una sola interfase. La resolución es un tanto subjetiva, dependiendo del ruido y de la sensibilidad del intérprete para detectar el menor cambio de la forma de onda.

Generalmente, la resolución es alrededor de $1/8$ a $1/4$ de longitud de onda (Sheriff,1977). Bajo condiciones ideales, como estructuras y situaciones libres de ruido donde una buena referencia es confiable, las interfases tan cerradas como se tengan, puedan ser resueltas.

II.5 Resolución Horizontal

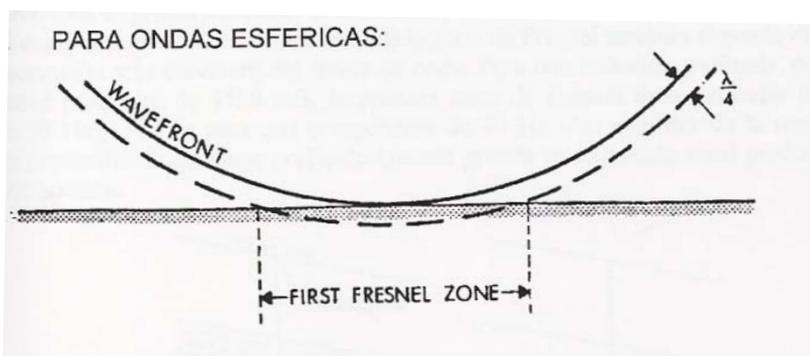
La resolución horizontal o lateral, se refiere a la distancia mínima de separación entre características para que se puedan distinguir; esta distancia se aproxima al ancho de la primera zona de Fresnel.

Sheriff (1977) citó lo siguiente: Las ondas sísmicas son vistas frecuentemente como análogas a un haz de luz de energía, que viaja desde la fuente al reflector a lo largo de una trayectoria de rayo y se conduce sin tener en cuenta haces de luz de energía adyacente. Siguiendo este punto de vista, la reflexión involucra solamente un punto en el reflector. Un frente de onda tiene sentido físico y se desplaza con el tiempo, de tal forma que cuando el frente de onda alcanza una interface reflectante, parte de ésta será reflejada, y la perturbación puede continuar para una región detrás del frente de onda. La Figura II.4A, muestra la región de $\frac{1}{4}$ de longitud de onda atrás del frente de onda, tangente al reflector. La porción del reflector entre los puntos de contacto con el frente de onda es el área en la cual se produce efectivamente la reflexión, ésta es llamada la primera zona de Fresnel. La energía de la periferia de la primera zona de Fresnel, puede alcanzar un detector en la localización de la superficie de $\frac{1}{2}$ de longitud de onda más tarde que la primera energía reflejada, permitiendo una trayectoria de tiempo de viaje doble. Toda la energía reflejada desde la primera zona de Fresnel puede arribar dentro de $\frac{1}{2}$ de longitud de onda y por lo tanto interferir constructivamente. El concepto de un área más que de un punto en un reflector involucrado en la reflexión, es la esencia de la resolución horizontal.

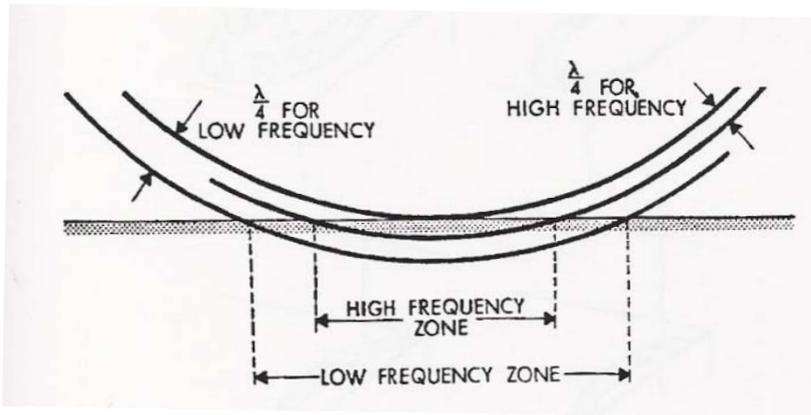
El radio de la zona de Fresnel está dado por:

$$R_F \cong \frac{1}{2} V_{ave} \left(\frac{t_0}{f_{dom}} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

donde t_0 es el tiempo de reflexión doble, V_{ave} como velocidad promedio y f_{dom} es la frecuencia dominante.



II.4A



II.4B

Figura II.4 (A,B).Primera zona de Fresnel. (A) Ondas esféricas reflejadas de una interface plana. (B) Aquí se muestra como el tamaño de la zona de Fresnel depende de la frecuencia.(Sheriff, 1977).

Las contribuciones netas del área de Fresnel son pequeñas y normalmente sólo se considera la primera zona de Fresnel. Las zonas de Fresnel son entonces definidas en términos de los criterios de $\frac{1}{2}$ y $\frac{1}{4}$ de longitud de onda. Dado que la longitud de onda depende de la frecuencia, las dimensiones de la zona de Fresnel dependen también de la frecuencia (Fig. II.4B).

II.6 Relación Señal a Ruido

El término señal se usa para denotar cualquier evento en el registro sísmico del cual se desea obtener información. Todo lo demás es ruido, incluyendo eventos coherentes que interfieren con la observación y medición de las señales. La relación entre señal y ruido, abreviada como S/R, es la relación de la energía de la señal en una porción específica del registro y la energía total del ruido en la misma porción (Sheriff y Geldart,1995). Cuando la relación señal/ruido es pequeña, se obtienen registros muy pobres; el nivel a que ésta se considera pequeña es, en gran medida, un juicio subjetivo. Sin embargo, cuando S/R es menor que la unidad, usualmente la calidad del registro es marginal y se deteriora rápidamente a medida que decrece la relación.

II.7 Ruido Sísmico

En el contexto de la prospección sísmica; Dobrin y Savit (1988) definen ruido como señales sísmicas no deseables del subsuelo no asociadas con reflexiones.

El ruido sísmico puede ser: a) coherente, o bien, b) incoherente. El ruido coherente se puede seguir cuando menos en unas cuantas trazas; el ruido incoherente es disímil en todas las trazas y no se puede predecir cuál traza será parecida, aun conociendo las trazas vecinas. A veces la diferencia entre ruido coherente e incoherente es simplemente cuestión de escala y si se tuvieran hidrófonos espaciados más estrechamente, el ruido incoherente se pudiera observar como ruido coherente. No obstante, el ruido incoherente se define con respecto a los registros que se estén usando, sin importar qué tan cerrado debería ser el espaciamiento para revelarlo.

El ruido incoherente se denomina a menudo ruido aleatorio (especialmente aleatorio), lo cual implica no sólo impredecibilidad sino también ciertas propiedades estadísticas; con mayor frecuencia el ruido no es verdaderamente aleatorio. Debe observarse que la aleatoriedad espacial y temporal pueden ser independientes; la traza sísmica usual tiende a ser aleatoria en tiempo, ya que no se sabe cuándo ocurrirá la reflexión con base en lo que ha mostrado previamente la traza, con la excepción de los múltiples (Sheriff y Geldart, 1995).

Algunas veces el ruido coherente se subdivide en: a) energía que viaja sobretodo horizontalmente, y b) energía que llega al tendido verticalmente. Otra importante distinción es entre: a) ruido que es repetible, y b) ruido que no lo es; es decir, si se observa el mismo ruido al mismo tiempo sobre la misma traza cuando se repite un tiro. Las tres propiedades – coherencia, dirección de viaje y repetibilidad – forman las bases de la mayoría de los métodos para mejorar la calidad del registro.

II.8 Atenuación de ruido

Debido a que hay muchos tipos de ruido, es necesario emplear varios métodos de atenuación de ruido. Todos están basados en las diferencias entre las propiedades del ruido y de la señal. Puesto que la naturaleza de la “señal” es algo subjetiva y las propiedades tanto de la señal como del ruido no son completamente conocidas, la atenuación de ruido no puede ser completamente objetiva.

La relación señal a ruido (S/R) generalmente depende de la frecuencia. Si el ruido presenta energía fuera de la principal gama de frecuencias de la señal, el filtrado de frecuencia se usa ventajosamente. Las componentes de frecuencia muy baja (como las ondas superficiales de baja energía ricas en frecuencias bajas) se pueden filtrar durante el registro inicial ya que las bajas frecuencias se separan suficientemente de las frecuencias de reflexión. Sin embargo, si el espectro del ruido traslapa con frecuencia al espectro de la señal, entonces el filtrado de frecuencia tiene un valor limitado para mejorar la calidad del registro (Sheriff y Geldart, 1995).

II.9 Amplitud Sísmica

La amplitud sísmica es la distancia entre cresta y la referencia cero de una ondícula sísmica.

En la década de los setenta, el descubrimiento de que los hidrocarburos podían ser detectados directamente a partir de los datos sísmicos, causó una gran revolución en el procesamiento e interpretación de datos sísmicos. Los actores principales fueron el registro y el procesamiento digital (Brown, 1999).

Con el advenimiento de las estaciones sísmicas de trabajo, se da una revolución completa al método de interpretación sísmica de reflexiones. Los atributos sísmicos, y especialmente las amplitudes, son ahora fácilmente desplegadas y mapeadas (Enachescu, 1993).

Enachescu (1993) citó lo siguiente:

Es importante que durante la adquisición y el procesado de datos de reflexión sísmica, se le de especial atención a la grabación y preservación de los valores de amplitud.

La amplitud de onda sísmica reflejada depende de tres factores:

1. La intensidad de la fuente de energía y el acoplamiento sensitivo de los receptores.
2. La dispersión geométrica, atenuación inelástica e interferencia de múltiples de período corto.
3. La secuencia reflectiva y la curvatura del reflector.

Así mismo, la amplitud de una reflexión depende del contraste de impedancia acústica de la interface reflejada (Sheriff y Geldart,1995), así como de los factores listados en la figura II.5.

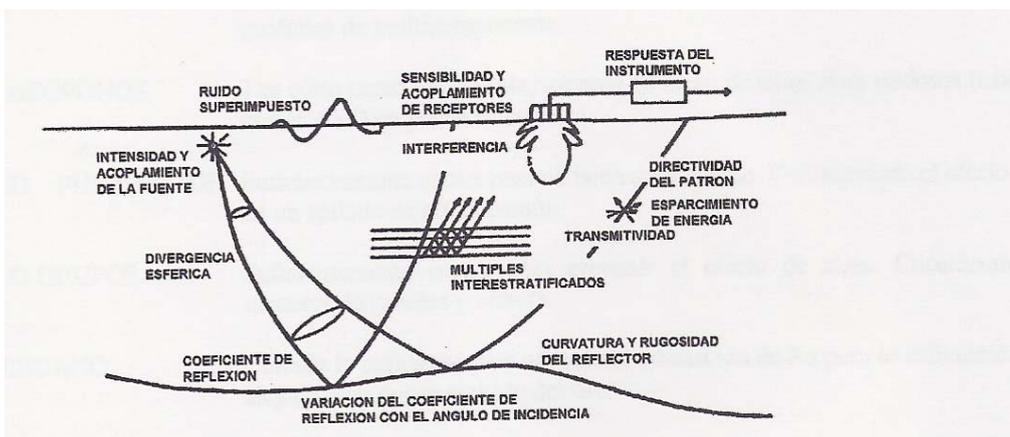


Fig. II.5 Factores que afectan a la amplitud (Sheriff, 1975).

Se pueden mencionar tres períodos históricos del uso de la amplitud sísmica y son los siguientes:

1. Al principio de los métodos de prospección, la amplitud fue el parámetro a desplegar como imagen.
2. La aplicación de la ecualización de las variaciones de amplitud (AGC), siendo el primer estándar práctico (primero se implementó en la instrumentación y después por computadora).

3. Durante los últimos 15-20 años, los cambios de amplitud son preservados y propiamente estudiados; esto se logró inicialmente usando las formas en blanco y negro, posteriormente el despliegue de una diversidad de colores y recientemente la imagen de la sísmica en video.

En la actualidad, los más recientes desarrollos para la preservación y un conveniente despliegue de amplitudes sísmicas son: a) una continua mejora del rango dinámico en los instrumentos de grabación, b) exactitud de los instrumentos receptores tanto en mar como en tierra, c) disponibilidad de dispositivos magnéticos capaces de almacenar el rango entero de valores de amplitud.

II.10 Atributos Sísmicos

Los atributos sísmicos son mediciones específicas de características geométricas, cinemáticas, dinámicas o estadísticas obtenidas a partir de datos sísmicos. Algunos son más sensitivos que otros a ambientes específicos del yacimiento; algunos son mejores para revelar anomalías del subsuelo no fácilmente detectables y algunos otros han sido usados como indicadores directos de hidrocarburos (Chen y Sydney, 1997).

Los atributos sísmicos describen información sísmica. Ellos cuantifican características de información específica, y así representan un complemento al total de la información. En efecto, al cálculo de un atributo a través de una estación de trabajo puede dar lugar a la descomposición de la información sísmica en varios atributos; es decir, esta descomposición es informal ya que no hay reglas que gobiernen cómo los atributos son calculados; de hecho cualquier cantidad calculada de la información sísmica puede ser considerado un atributo. En consecuencia hay muchos tipos de atributos: prestack, inversión, velocidad, horizontes, multi-componente etc., y la clase más común son los atributos derivados de un apilado convencional (Tabla 2) (Barnes, 2001).

Tabla 2. Métodos típicos en el cálculo de atributos sísmicos poststack, con algunos atributos representativos (Barnes, 2001).

Método	Atributos Representativos
Traza compleja	Amplitud, fase, frecuencia, polaridad, respuesta de fase, respuesta de frecuencia, echado, azimut, espaciamiento, paralelismo.
Tiempo-frecuencia	Echado, azimut, frecuencia promedio, atenuación, descomposición espectral.
Correlación/Covariancia	Discontinuidad, echado, azimut, gradiente de amplitud.
Intervalo	Amplitud promedio, frecuencia promedio, variancia, máximo, número de picos, longitud de arco, componentes espectrales, forma de onda.
Horizonte	Echado, azimut. curvatura
Misceláneos	Frecuencia de cruce por cero, frecuencia dominante, amplitud rms, complejidad de la señal.

En los últimos años se ha visto un incremento sustantivo en el número de atributos disponibles y sus usos. Los atributos se usan en los estudios de las propiedades estructurales, estratigráficas y en yacimientos.

Un atributo es derivativo de una medición de información sísmica básica. Todos los horizontes de atributos de formación no son independientes uno de otro, sino que simplemente se diferencian en la manera en que son presentados y estudiados en la información básica, la cual está conformada por el Tiempo, Amplitud, Frecuencia y Atenuación. Estos forman la base de la clasificación de atributos (Brown, 1999).

En términos generales, los atributos derivados del tiempo proveen información estructural y los atributos derivados de la amplitud proveen información estratigráfica y del yacimiento (ej. amplitud compuesta, impedancia acústica etc.).

Por otro lado, los atributos derivados de la frecuencia no han sido bien estudiados, pero hay un gran optimismo de que estos provean información adicional útil en la estratigrafía y en yacimientos. Actualmente, la atenuación no

es usada, pero hay la posibilidad de que en el futuro beneficiará la permeabilidad. La mayoría de los atributos son derivados de un volumen de información apilada y migrada, pero las variaciones de las mediciones básicas son función del ángulo de incidencia que proveerán más allá de la información que proporciona la fuente sísmica. El principal ejemplo de estos atributos pre-apilado es el AVO (amplitud versus offset) (Brown, 1999).

II.11 Descomposición Espectral

La transformación de información de una forma a otra es muy común en el análisis de señales; es decir, transformar la información sísmica del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, es el ejemplo más común de información acondicionada, la cual provee mucha utilidad en el análisis sísmico de información.

El análisis de información sísmica en el dominio tiempo-frecuencia requiere referirnos al análisis de traza compleja, ya que el efecto del análisis de traza compleja es lograr una separación natural de amplitud y fase, dos de las cantidades (llamadas “atributos”), las cuales son medidas en el análisis de traza compleja, es decir, el uso de la traza compleja hace posible definir los atributos instantáneos no solo de amplitud y fase, sino también de frecuencia, como la descomposición espectral.

El concepto de tratar una traza sísmica como la parte real de una función compleja de tiempo ha sido usado en años recientes en la interpretación tanto de señal de terremotos (Farnbach,1975) y punto de profundidad común (CDP) de registros de reflexión (Taner y Sheriff,1977; Sicking,1978;Taner *et al*,1979). La traza sísmica es una serie de tiempo causal, donde la parte imaginaria de la función compleja puede ser calculada directamente de la traza sísmica por si misma usando la transformada Hilbert. La parte real e imaginaria (también llamada cuadratura) son las entradas, las cuales pueden ser usadas para determinar propiedades específicas de una función compleja tal como los atributos instantáneos de amplitud, fase, y frecuencia. La ventaja de este tipo de análisis es que la señal sísmica es descompuesta dentro de funciones, las cuales distinguen la información de amplitud de la traza original de la información angular (fase y frecuencia).

Para estudiar la energía y dispersión, necesitamos medir las amplitudes con las envolventes, fases, tiempos y retardos; de allí que necesitamos señales cortas, fáciles de manejar tanto en el dominio del tiempo como el de frecuencia.

Tales ondículas complejas fueron estudiadas por D. Gabor y permitieron llevar a cabo la descomposición de señales o trazas sísmicas en el dominio tiempo-frecuencia (Gabor, 1946, 1951). Esto fue realizado con ondas seno puras moduladas por una función Gaussiana como se muestra en la figura II.6.

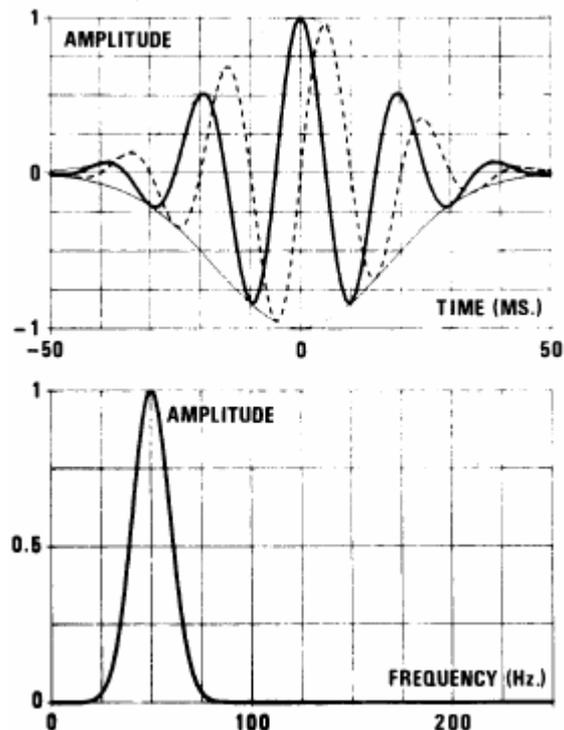


Fig. II.6 Ejemplo de la ondícula de Gabor compleja (Morlet *et al*, 1982).

Las componentes seno y coseno de la ondícula compleja están en cuadratura, lo que significa que en el dominio de la frecuencia, su respuesta en amplitud es una función Gaussiana, como en el dominio del tiempo.

Tales ondículas son definidas por los siguientes parámetros:

T = período promedio,

$f = 1/T$ = frecuencia promedio,

A_0 = máxima amplitud de la ondícula,

Δt = diámetro o duración,

Δf = Ancho de banda.

Δt y Δf representan límites físicos de la ondícula para el dominio del tiempo y frecuencia respectivamente. Esta definición es un tanto arbitraria, ya que nosotros podemos escoger los límites prácticos de las ondículas como los puntos donde las amplitudes de la envolvente Gaussiana caen a la mitad del valor máximo (Claerbout, 1976).

Desde el punto de vista de la información teórica, Δt mide la habilidad de la ondícula para distinguir o discretizar información sucesiva en el dominio del tiempo, Δf mide la habilidad de la ondícula para distinguir o discretizar información sucesiva en el dominio de la frecuencia; por lo tanto, se pueden introducir las siguientes definiciones: Δt se denomina como la resolución en el dominio del tiempo, Δf como la resolución en el dominio de la frecuencia.

Las ondículas Gabor con radio constante (Fig. II.7), pueden ser tomadas como las ondículas básicas para el muestreo de trazas sísmicas con la expansión especial de Gabor (apéndice A) para el dominio tiempo-frecuencia (Morlet *et al*, 1982). Esta expansión da directamente el espectro de frecuencia instantánea las trazas sísmicas.

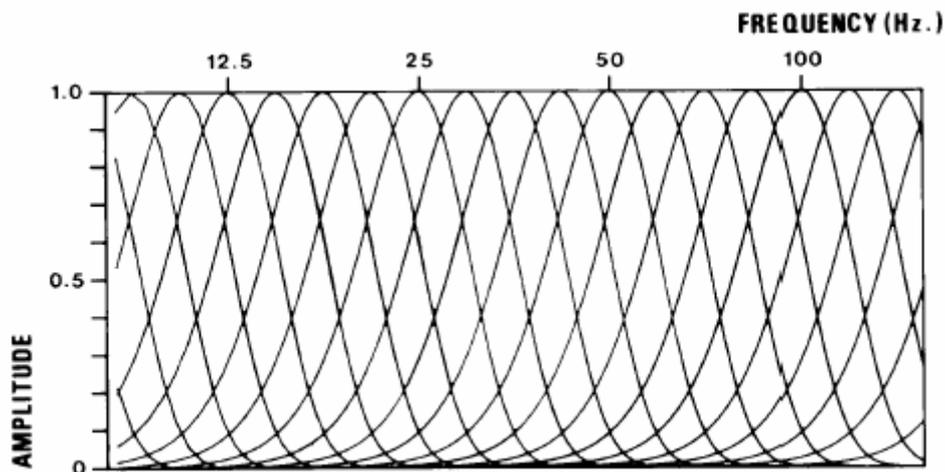


Fig. II.7 Serie de ondículas básicas Gabor usadas en la teoría de expansión de Gabor (Morlet *et al*, 1982).

Para este trabajo, el atributo de descomposición espectral se basa en el algoritmo de descomposición de Gabor-Morlet (1982).

Morlet *et al* (1982), mostraron y desarrollaron las ventajas de usar valores complejos en el manejo de información sísmica en el dominio tiempo-frecuencia, así mismo, presentaron la utilidad del método de dos dimensiones (2D), en la teoría de muestreo en el dominio tiempo-frecuencia usando la expansión de Gabor con una serie de ondículas básicas adaptadas a la preservación de fase; tal expansión en 2D nos permite manejar de manera apropiada el espectro de frecuencia instantánea.

Entonces, se puede asumir que la expansión de Gabor permite preservar tanto las fases y amplitudes de grandes rangos de frecuencias, y si tomáramos en cuenta la no ortogonalidad de las ondículas básicas de Gabor, es posible minimizar el número de muestras complejas necesarias para la discretización de la expansión de Gabor, es decir, esta característica de no ortogonalidad, permitiría que de la expansión se obtuviera directamente el espectro de frecuencia instantánea de las trazas sísmicas.

En la descomposición Gabor-Morlet, se divide la banda de la señal de la información original dentro de bandas más pequeñas Gabor-Morlet. Estas sub-bandas generadas por la descomposición son igualmente espaciadas, ya sea en escalas de octavas o incrementos de frecuencia.

Los filtros Gabor-Morlet son exponencialmente ondículas de cosenos complejas pesadas:

$$G(\omega, t) = \exp(-at^2) \cdot \exp(-i\omega t) \quad (2)$$

La descomposición es llevada a cabo por la convolución de la información sísmica con una serie de ondículas Gabor-Morlet generadas por una serie secuencial de valores w . Las ondículas Gabor fueron introducidas por primera vez en procesamiento sísmico por Morlet *et al* (1982).

Capítulo III

Levantamiento Sismológico Almeja-Cisne 3D

III.1 Adquisición de Información Sísmica

La adquisición del levantamiento Almeja-Cisne 3D fue llevada a cabo por la Compañía PGS Geophysical, desde Noviembre del 2002 hasta Mayo del 2003, empleando la embarcación geofísica “American Explorer”, logrando adquirir el área total propuesta del levantamiento de 1300 km².

La adquisición se llevó a cabo con el sistema de cable remolcado (STREAMER), y los datos fueron registrados utilizando un sistema de grabación Syntrak, con longitud de registro de 8192 ms, con un intervalo de muestreo de 2 ms. en formato SEG-D 8015, demultiplexado en cartuchos magnéticos 3590. El cubrimiento nominal del levantamiento fue de 60 trazas por bin y los datos fueron obtenidos empleando 4 y/o 6 cables marinos con longitud de 6000m y fuentes duales (Figura III.1)

Cabe mencionar que durante este levantamiento, se estaba perforando el pozo Amoca-1. En este sentido se consideró importante en este trabajo, agregar y considerar los intervalos probados en este pozo, los cuales se enlistan a continuación:

- Probar el potencial petrolero de las arenas de borde de plataforma del Play Orca, del Plioceno Medio de 2.4 ma. En el intervalo 1055 a 1375 m.
- Probar el potencial petrolero de las arenas de talud del Play Cinco Presidentes del Plioceno Medio de 3.0 ma. en el intervalo 2390 a 2565 m.

III.2 Objetivo del Levantamiento

El objetivo del levantamiento “Almeja-Cisne 3D”, fue obtener un volumen de información sísmica de alta resolución para determinar con precisión las características estructurales y estratigráficas de los plays terciarios que producen en el yacimiento Santa Ana y la roca mesozoica en el Pozo Yaxche-1, así como extraer atributos sísmicos para relacionarlos con la presencia de hidrocarburos, los cuales son esenciales para caracterizar y definir los límites de los yacimientos.

III.3 Parámetros de Adquisición

Definición 3D:

Modo de Adquisición	4/6 Cables Marinos/Fuente Dual
Espaciamiento entre líneas (Subsuelo)	25 m
Intervalo de Tiro	25 m flip/flop
Largo del bin (Inline)	12.5 m
Ancho del bin (crossline)	25 m
Orientación de la Línea	70.1 / 250.1 grados
Offset Cercano (en línea)	Aproximadamente 250 m

Fuente de Energía:

Tipo de Fuente:	2 arreglos de cañones de aire
Presión de Aire:	2000 psi
Volumen:	3930 pulgadas cúbicas
Separación entres arreglos:	50 m
Número de subarreglos:	3 en cada arreglo
Separación entre subarreglos:	12.5 m
Longitud de la Fuente:	14 m
Profundidad de la Fuente:	7m +/- 1 m
Pico-pico (filtro DFS V):	125.9 barm
Relación P/b (filtro DFS V):	20.7:1
Sincronización de Cañones:	+/- 1.0 ms

Cables marinos:

Número de Cables Marinos:	4 y/o 6
Longitud de los Cables:	6000 m
Profundidad de los Cables:	8 m +/- 1m
Separación entre Cables:	100 m
Número de Grupos de hidrófonos:	480 cada cable
Intervalo entre los grupos de hidrófonos:	12.5 m

Grabación de Datos:

Instrumento de Grabación:	Syntrak 480
Longitud de Registro:	8192 mseg.
Intervalo de Muestreo:	2 mseg.
Filtro corte bajo:	3Hz /6dB/octava
Filtro de corte alto:	218Hz /484dB/octava
Formato:	SEG-D/8015

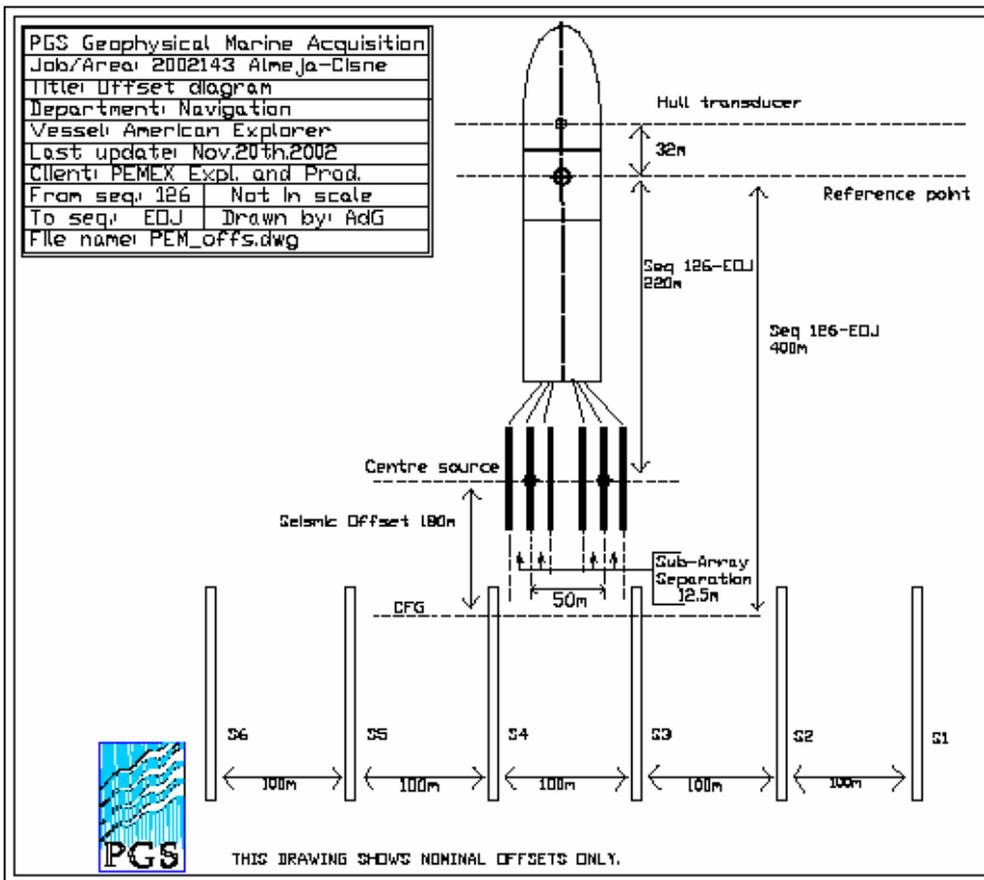


Figura III.1 Diagrama de Offset, embarcación American Explorer – 6 cables. (Pemex Exploración y Producción et al, 2003).

(a) Cobertura en el subsuelo:

El cubrimiento nominal fue de 60 de trazas (6000%), con un tamaño de bin de 12.5m en inline y 25m en crossline.

El cubrimiento mínimo aceptable fue de 48 (4800%) que consistió de 18 (90% de 20) trazas de offsets cercanos, 16 (80% de 20) trazas de offset intermedios y 14 (70% de 20) trazas de offsets largos, como se muestra a continuación:

Tabla 3. Descripción de la distribución de offsets y trazas mínimas por bin (Pemex Exploración y Producción et al, 2003).

Distribución de Offsets	Tamaño del Bin	Trazas mínimas por Bin
Cercanos (0-2000 m).	12.5 X 25 metros.	18
Medianas (2001-4000 m).	12.5 X 25 metros.	16
Largos (4001-6000 m).	12.5 X 25 metros.	14
Total		48

(b) Separaciones de los cables

La separación total del cable y de la fuente estuvo dentro de las especificaciones de 100m+/- 5%, excepto que la separación final de la cola con frecuencia fue remolcada entre 40-50% por debajo de la separación nominal. En las secuencias de línea 1700-1924, la separación del cable promedia desde 150 – 230 m entre los cables 2 y 3; esto se atribuyó al agua dulce proveniente del Río Coatzacoalcos que se mezcla con el agua salada de mar, creando un efecto de corriente submarina.

III. 4 Procesado preliminar de datos

El procesado preliminar de los datos sísmicos se llevó a cabo a bordo de la embarcación “American Explorer”, así como las pruebas de parámetros de adquisición y proceso, para verificar la calidad e integridad de los datos adquiridos. La secuencia de procesamiento aplicada a los datos sísmicos fue la siguiente:

1. Reformateo al formato interno de PGS.
2. Asignación de la navegación a los datos sísmicos.
3. Corrección por retardo del sistema (-36 ms).
4. Salida SEG-Y y respaldo en el mismo formato.
5. Editado de tiros y canales.
6. Remoción de la ondícula de la fuente.
7. Remuestreo a 4ms con filtro anti-alias fase cero.
8. Gathers de tiro a 4ms.
9. Sumado de trazas adyacentes.
10. Corrección por divergencia esférica V^2T .
11. Remoción de spikes.
12. Atenuación de ruido de mar (oleaje).
13. Gathers de tiro a 4ms.
14. Deconvolución predictiva de fase mínima.
15. Análisis de velocidad NMO (Malla de 1Km).
16. Corrección por NMO.
17. Enmudecimiento de trazas (mute).
18. Apilado NMO 3D.
19. Corrección al nivel del mar.
20. Compensación de cobertura residual.
21. Salida a SEG-Y, cruda y AGC.

Así mismo, se realizó una secuencia de control de calidad de la información sísmica, la cual constó de 3 pasos esenciales (Figura III.2).

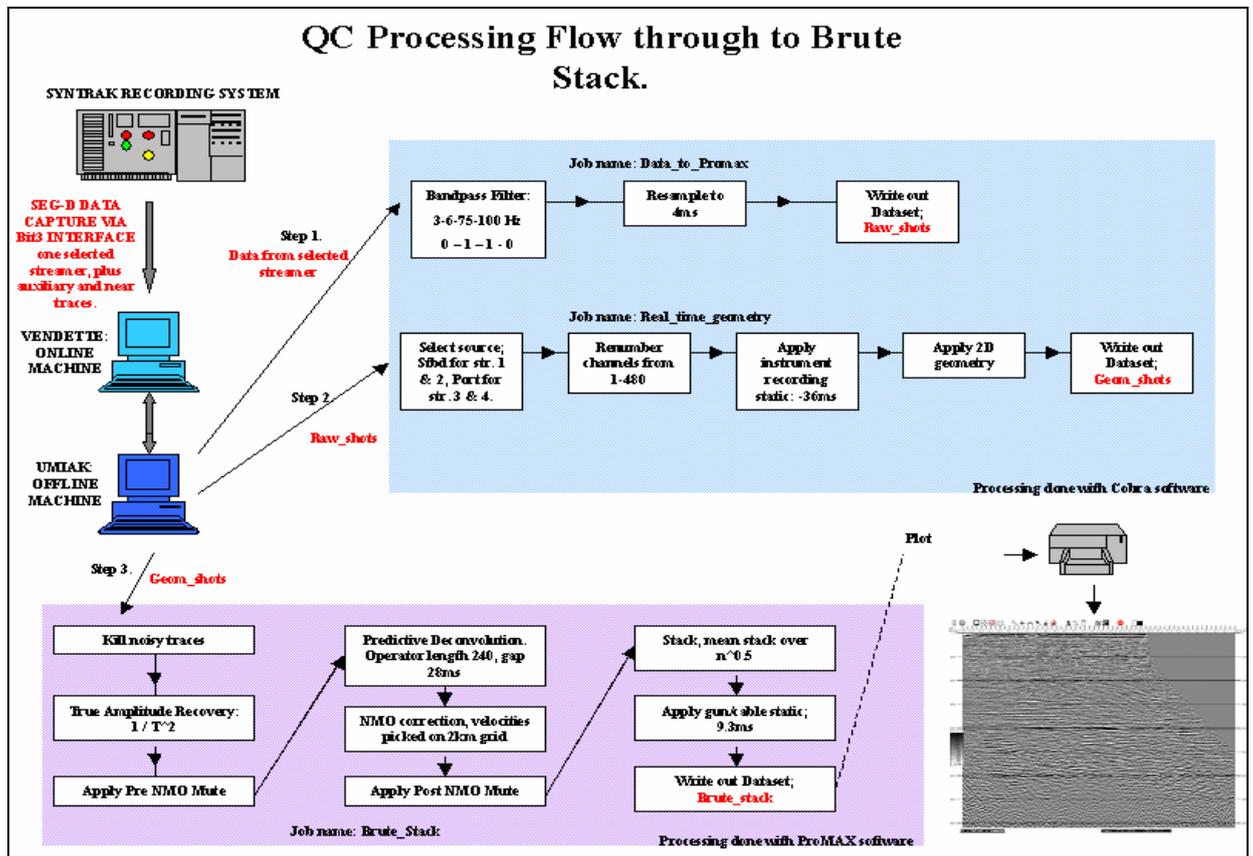


Figura III.2 Esquema que muestra el flujo de control de calidad (QC) aplicado al procesado preliminar de la información adquirida del Levantamiento Almeja -Cisne 3D (Pemex Exploración y Producción et al, 2003).

(a) Transcripción de datos de un solo cable en formato SEG-D, en tiempo real.

Los datos de campo en bruto fueron grabados en cartuchos de cinta IBM 3590 y cargados directamente en el sistema de control de calidad en campo; este paso inicial sirvió para asegurar que los cartuchos de la cinta 3590 eran de fácil lectura y que contenían el rango de los archivos en campo (FFID's) indicados en las etiquetas de las cintas y en los registros del observador. Durante este paso, se aplicó una función de recuperación de ganancia (TAR) a los datos para compensación de decaimiento de amplitud acoplada con la aplicación para la información de la geometría de navegación (P1/90). También, los datos fueron re-muestreados desde 2 a 4 milisegundos para conservar el espacio en disco duro en el sistema y la salida en formato SEG-Y para revisión interactiva en pantalla. Esta revisión en pantalla consistió en la verificación del rango de la calidad de los datos completos con respecto a la señal y el ruido, y una inspección de los valores de los cabezales que incluían el offset, el número de

punto de disparo, información de las coordenadas de “x” y “y” para los disparos y los receptores, tirante de la fuente y de los receptores, numeración de la traza y el cable, y las locaciones de la fuente y los receptores (Figura III.3). Esto permitió un chequeo inicial de la calidad de los datos y la exactitud de la información de geometría.

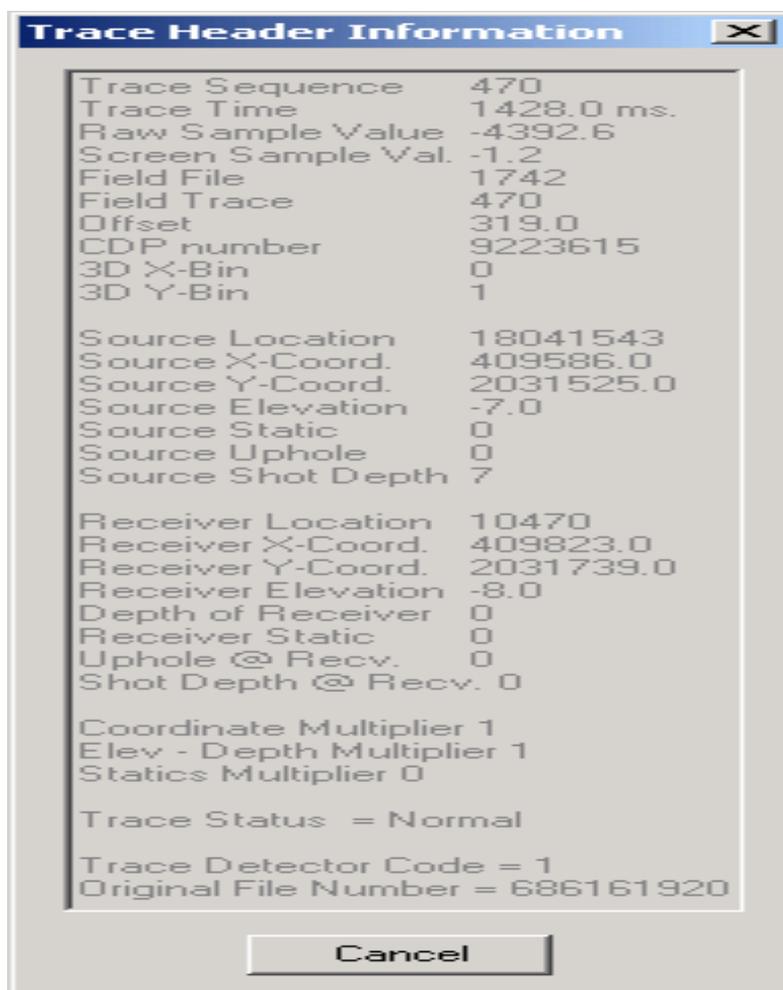


Figura III.3 Ventana de revisión interactiva para verificación de valores de los cabezales que incluían el offset, el número de puntos de disparo, información de las coordenadas de “x” y “y” para los disparos y los receptores, tirante de la fuente y de los receptores, numeración de la traza y el cable, y las locaciones de la fuente y los receptores del Levantamiento Almeja -Cisne 3D (Pemex Exploración y Producción et al, 2003).

(b) Salida de tiros individuales.

Se aplicó un cambio de tiempo de 36 mseg. a todos los datos para permitir un retardo del sistema incorporado (Figura III.4).

Los tiros y canales marcados como erróneos se eliminaron o se convirtieron en cero, según fuese necesario.



Figura III.4 Fotografía que muestra la verificación visual de disparos individuales en tiempo real, es decir disparo por disparo del Levantamiento Almeja -Cisne 3D (Pemex Exploración y Producción et al, 2003).

(c) Envío de tiros con geometría al disco.

Adicionalmente a las cintas en formato SEG-D que contienen los datos de campo en bruto, el contratista también produjo cintas en formato SEG-Y que contenían los datos en campo en bruto junto con la información de geometría P1/90 mezclada dentro de los cabezales de la cinta. Las cintas SEG-Y requirieron una plantilla de encabezado específico con respecto a los valores del encabezado y las locaciones según lo requirió el Centro Nacional de Procesado Sismológico (CNPS). El control de calidad de estas cintas consistió de:

- 1) Cargar todas las cintas SEG-Y dentro del sistema de control de calidad.
- 2) Desplegar los archivos en campo contenidos en cada cinta para revisar la información de la geometría con respecto al offset, coordenadas “x” y “y” para los disparos y los receptores, y la numeración de las trazas secuenciales.
- 3) Los valores del encabezado generados por el sistema de control de calidad, que incluyeron la numeración FFID, numeración del punto de disparo, tirante del cable de los hidrófonos, tirante de la fuente, tirante del agua, estática de retraso aplicado en la fuente, y locaciones del receptor y la fuente para verificación de la información del cable de hidrófonos y disparos. Además, cada cinta SEG-Y fue checada por la información del encabezado EBDIC para confirmar que la información requerida de los parámetros del proyecto estaba de conformidad a lo requerido por el CNPS. Como el paso final de control de calidad, se realizó una descarga binaria de los encabezados de las trazas para confirmar que las locaciones del encabezado y sus valores respectivos estaban correctos.

El adquirir información sísmica a espacios cada vez más cerrados sobre un área, permite tener volúmenes de información en tres dimensiones con mayor resolución, tal como el que se obtuvo en este estudio sísmico Almeja-Cisne 3-D. A este cubo sísmico se le aplicó una corrección estática de 10 ms, para ajustar los tiempos de viaje al nivel medio del mar; así mismo, el escalamiento de los datos se basó en la relación entre la amplitud rms de la traza central respecto de la rms promedio dentro de ventanas espaciales y temporales.

Finalmente, el cubo apilado bruto y con AGC se grabó en formato SEG-Y, en cartuchos 3590 y 8 mm.

Capítulo IV

Análisis y aplicación de la descomposición espectral en el cubo preliminar Almeja-Cisne

IV.A. Análisis de Resolución sísmica

IV.A.1 Descomposición espectral en la resolución sísmica.

En este trabajo de tesis, se aplica la descomposición espectral a la información sísmica del cubo preliminar Almeja-Cisne, usando para ello un software de interpretación sísmica convencional (Paradigm Geophysical)®.

Cabe recordar que el objetivo de este trabajo, consiste en presentar una metodología para mejorar la resolución vertical, calidad de imágenes sísmicas y detectar huellas de adquisición en el dominio tiempo frecuencia, mediante la aplicación de la descomposición espectral a un cubo sísmico preliminar.

La parte del cubo preliminar Almeja-Cisne 3D que se analizará en este trabajo, se encuentra ubicada la parte Sur central en aguas someras entre los 8 y 12 m de profundidad y el procesado preliminar que presenta este cubo es el que se describe en la sección III.4.

El análisis cuantitativo que se desarrollará en este trabajo, se aplica a una parte del cubo preliminar Almeja-Cisne 3D, la cual se ubica entre los Inlines 1761-1856 y Xlines 2300-4000, que para fines prácticos y de acuerdo con los objetivos geológicos del levantamiento solo se realizó en la ventana de 1 a 3.6 segundos del cubo.

Tradicionalmente, la descomposición espectral ha usado varias técnicas que requieren el uso de ventanas de tiempo (e.g. Transformada rápida de fourier, transformada discreta de fourier, etc.), estas ventanas producen serias distorsiones del espectro verdadero o severas limitaciones de la resolución vertical. En este sentido, la determinación en el dominio tiempo-frecuencia de señales no estacionarias, como las señales sísmicas, que son convencionalmente definidas por la transformada de fourier discreta (TFD), en

donde, su espectro en tiempo-frecuencia presenta una resolución que está condicionada por el tipo y longitud de la ventana seleccionada; por lo que es deseable obtener un espectro en el dominio tiempo-frecuencia que ajuste su resolución dependiendo del contenido de frecuencia de la señal sísmica.

Esto se logra, con la transformada de ondícula la cual permite a una señal sísmica ser examinada tanto en el dominio de tiempo y frecuencia al mismo tiempo, a través de convolucionar la señal con una ondícula que produce diferentes rangos de frecuencia.

IV.A.2 Transformada de ondícula

La representación en el dominio de la frecuencia de una serie de tiempo frecuentemente ilustra muchas características que son difíciles de visualizar en el dominio del tiempo. La manera en la cual la serie de tiempo es mapeada en el dominio de la frecuencia determina la cantidad de información que puede ser obtenida (Okaya *et al.*, 1995).

Idealmente, nos gustaría remover el ruido aleatorio y simultáneamente preservar la componente de alta frecuencia del espectro para obtener la máxima resolución posible de la sísmica. En la práctica, la resolución es mejorada vía deconvolución o a través de los métodos basados en balanceo espectral, los cuales son frecuentemente combinados con un paso de pre-procesado de supresión de ruido.

La transformada de ondícula fue desarrollada a fines de los 80's, y desde ese momento hasta la actualidad se han tenido un gran número de contribuciones realizada por varios investigadores, tales como: análisis de señales en una dimensión (1D) (Grossman *et al.*, 1989), representación tiempo-escala (Flandrin, 1989), teoría del filtro (Vetterli y Cormac, 1992), procesamiento de imágenes digitales (Mallat y Zhong, 1992), análisis tiempo frecuencia, filtraje e interpretación usando mapas frecuencia-tiempo (Chakraborty y Okaya, 1994) y corrección de fase usando transformada de ondícula (Rodríguez y Mansar, 1997).

Hay muchos tipos de transformada de ondícula; las más importantes son: la transformada de ondícula continua (TOC) y transformada de ondícula discreta (TOD).

La TOC fue primeramente introducida por Morlet *et al* (1982) y Goupillaud *et al* (1985), pero recibió toda la atención en la comunidad de procesado de señales cuando Daubechies (1988) y Mallat (1989) establecen la conexión de la transformada de ondícula con el procesado de señales discretas.

(a) Transformada de ondícula continúa

La transformada de ondícula continúa, se puede definir como un producto interno de la señal real $f(t)$ con respecto al análisis de ondícula $\psi(t)$ que equivaldría tener una serie de convoluciones:

$$W_{(a,b)} = \frac{1}{\sqrt{a}} \int \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) f(t) dt. \quad (3)$$

La función ventana $\psi(t)$ es llamada ondícula kernel. Los coeficientes a y b son llamadas escala (reciproco de la frecuencia) y traslación (cambio en tiempo), respectivamente. A cada escala (e.g. para cada valor de a) la ondícula kernel es escalada por un factor de $1/a$ y trasladada por b a producir los coeficientes de ondícula $W_{(a,b)}$. Chakraborty *et al* (1995), implementó esta transformada a través de una señal sintética (figura IV.1), considerando que si a de la formula 3 es reemplazada por 2^j , donde j es el índice de escala, se podría obtener un mapa representativo en 2D índice de escala-traslación (figura IV.2), el cual resulta de mapear los coeficientes de TOC de la señal sintética.

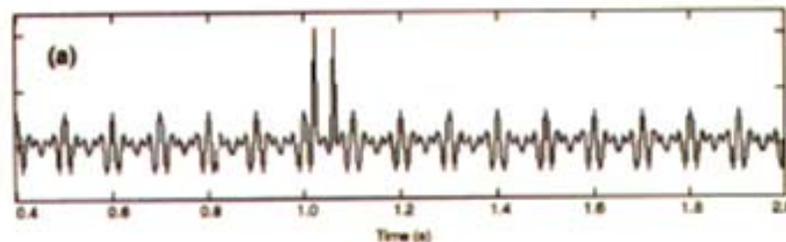


Figura IV.1 Transformada de Fourier de corto plazo (TFTC) de un vibrosismo de fuente de barrido (Chakraborty *et al*, 1995).

La respuesta en frecuencia de la función ventana es mapeada en la parte izquierda de la figura IV.2. En la parte baja del índice de escala, el ancho de banda de la función ventana es angosta, como resultado de que las tres sinusoides están bien resueltas. Sin embargo, dos de los impulsos no pueden ser identificados en la región de baja frecuencia, mientras que en el dominio del tiempo, conforme se da el incremento en el índice de escala, el ancho de banda de la función ventana incrementa por lo que los dos impulsos llegan a ser bien resueltos.

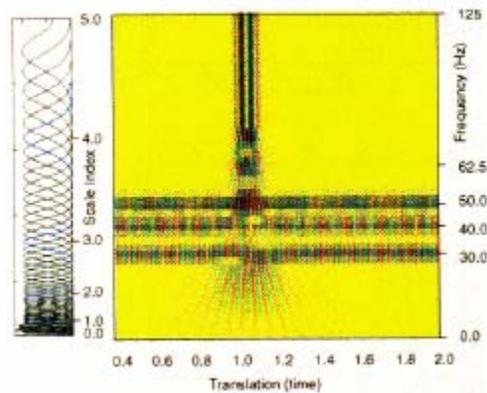


Figura IV.2 Transformada de ondícula continua de la señal sintética ilustrada en la figura IV.1. El índice de escala es una medida del comportamiento armónico de la frecuencia central del filtro en el dominio de la frecuencia (Chakraborty *et al.*, 1995).

Si comparamos la transformada de ondícula discreta con la transformada de Fourier, podemos encontrar que una de las ventajas de TOC es que tiene una buena resolución de frecuencia para bajas frecuencias y buen tiempo de resolución para altas frecuencias.

(b) Ondícula kernel

Cualquier función que deba ser usada como ondícula kernel necesita reunir las siguientes condiciones de admisibilidad (Shensa, 1992, Goupillaud *et al.*, 1985):

- 1) $\psi(t)$ debe ser absolutamente integrable y cuadradamente integrable (su energía es finita).

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt < \infty$$

y

(4)

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty$$

2) $\psi(t)$ es de banda limitada y tiene promedio de cero.

$$\int \left| \frac{\hat{\psi}(\omega)}{\omega} \right| d\omega < \infty. \quad (5)$$

La figura IV.3 muestra la ondícula Morlet y su espectro de frecuencia; se debe notar que tanto $\psi(t)$ y $\psi(w)$ son localizadas en tiempo y frecuencia, respectivamente.

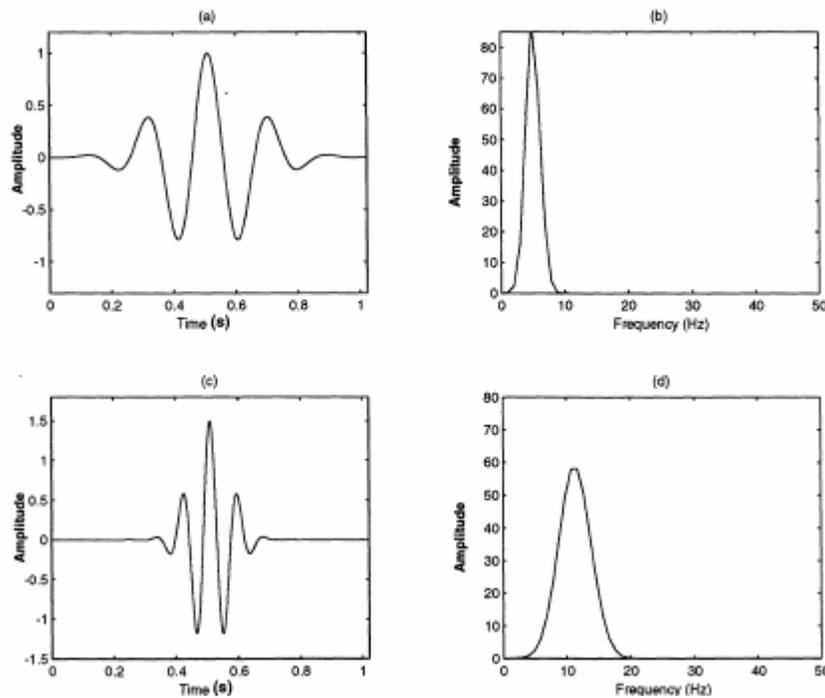


Figura IV.3 Ondícula Morlet y su espectro de frecuencia. (a) Representación en el dominio del tiempo con índice de escala de 0. (b) El correspondiente espectro de frecuencia. (c) La representación en el dominio del tiempo con índice de escala 2. (d) Su correspondiente espectro (Chakraborty *et al*,1995).

La definición de TOC muestra que el análisis de ondícula es una medida de la similitud entre funciones básicas (ondículas) y la traza real.

(b) Descomposición espectral versión Paradigm Geophysical ®

La versión de descomposición espectral de Paradigm, es una aproximación a la transformada de ondícula continua que presenta ondículas seno y coseno de banda limitada temporales cortas, como se muestra en la figura IV.4.

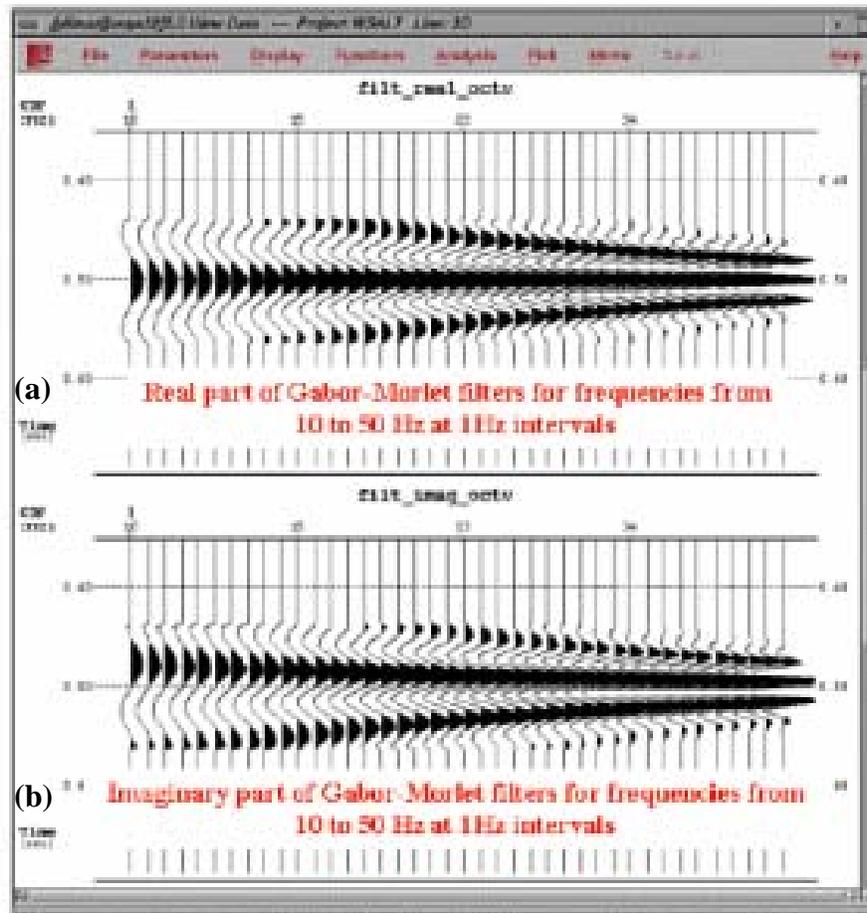


Figura IV.4 Filtro Gabor-Morlet con pasa banda de 10 a 50 Hz a intervalos de 1 Hz. (a) Parte real del filtro Gabor-Morlet compuesta de ondículas seno y coseno de banda limitada. (b) Parte imaginaria del filtro Gabor-Morlet compuesta de ondículas seno y coseno de banda limitada (Paradigm Geophysical ©,2003).

La descomposición espectral usa trazas complejas, sin embargo, no crea la parte real o imaginaria a través de la transformada rápida de Fourier o Hilbert, sino que se usa el filtro de la figura IV.4; en donde básicamente convoluciona una traza sencilla del cubo poststack con la primera ondícula real mostrada en la figura IV.4a, para obtener la traza real de la primera frecuencia, luego convoluciona la traza de entrada del cubo sísmico con la primera ondícula de la parte imaginaria para obtener la traza imaginaria, de aquí se inicia la construcción de un atributo de traza compleja, ya sea como envolvente, fase o amplitud, etc.. Este procedimiento se repite para cada ondícula del filtro en la misma traza y obteniendo trazas de banda limitada.

Las señales de ondículas básicas, como las definidas por Gabor-Morlet de la figura IV.4, presentan la característica de ser físicas y numéricamente

representadas por la combinación de los muestreos en el dominio del tiempo y de la frecuencia, lo cual cumple con las condiciones de admisibilidad, así mismo, las dimensiones (diámetro y ancho de banda) de las señales en los dominios conjugados están relacionados por Δt y $\Delta \omega$, las cuales se definen en el dominio tiempo-frecuencia como $\Delta t = \partial t$ y $\Delta \omega = \partial \omega$ que también representan las dimensiones de la celda para el muestreo regular definido por Gabor (1982), cuyo valor práctico para cada celda calculado en la expansión de Gabor (apéndice A) es de:

$$\partial t \partial \omega = 1/2T2\pi/T(2^{1/8} - 0.5^{1/8}) = 0.545 \dots, \quad (6)$$

En ese sentido, al asociar las ondículas básicas de la figura IV.4 con el muestreo regular en cada celda, permitió definir cuantitativamente la resolución en 2D (tiempo y frecuencia).

IV.A.3 PARAMETROS

Dentro de los parámetros básicos en la aplicación de la descomposición espectral a un cubo sísmico se encuentran los siguientes:

- a) Rango de frecuencias de la información sísmica.
- b) Número de bandas en las que se descompone la información sísmica
- c) Modo de Incremento en frecuencias o en octavas
- d) Tamaño de operador (muestras)
- e) Tipo de atributo
- f) Rango de salida.

a) Rango de frecuencias de la información sísmica

Considerando que la descomposición espectral que implementó Paradigm en su software, y que esta basada en la versión filtro Gabor-Morlet (Paradigm Geophysical®,2003) y de la expansión de Gabor (Morlet,1982), fue necesario determinar el ancho de banda útil del cubo poststack de Almeja-Cisne 3D, el cual se obtuvo de la siguiente manera:

Long *et al.*,(2004), es importante que antes de efectuar un levantamiento sísmico marino, se decidan las profundidades mas adecuadas de la fuente y el streamer para recuperar la máxima frecuencia del ancho de banda (profundidad de la fuente y streamer en la parte mas somera) y recuperar la mejor relación S/R de los datos sísmicos (profundidades de la fuente y el streamer lo mas profundo), tomando en consideración todas las posibles complejidades de la operación de campo.

En el caso de Almeja-Cisne 3D, se llevaron a cabo pruebas a 2 profundidades de la fuente de energía, las cuales fueron a 5 y 7 m, de aquí se tomaron los datos correspondientes a la amplitud de cada arreglo de la fuente de energía, estos datos fueron obtenidos del informe de adquisición del levantamiento Almeja-Cisne 3D (Pemex Exploración y Producción, 2003).

$$20 \log_{10} \left(\frac{(Amplitude_{each_array})}{(Amplitude_{shallowest_possible})} \right) \quad (7)$$

La respuesta plana calculada a partir de la formula (7) nos da una aproximación del ancho de banda útil de la información sísmica del cubo preliminar de Almeja-Cisne, que es de ≤ 12 dB, lo cual significa que tenemos un ancho de banda útil de aproximadamente 5 a 60 Hz.

Este rango de frecuencias útil se muestra en la figura IV.5, y la utilidad de este rango se deriva del hecho de tener un intervalo de información sísmica lo menos afectado por las discontinuidades creadas por el fenómeno de Gibbs'; en este sentido, es importante descomponer solo las frecuencias útiles de los datos sísmicos.

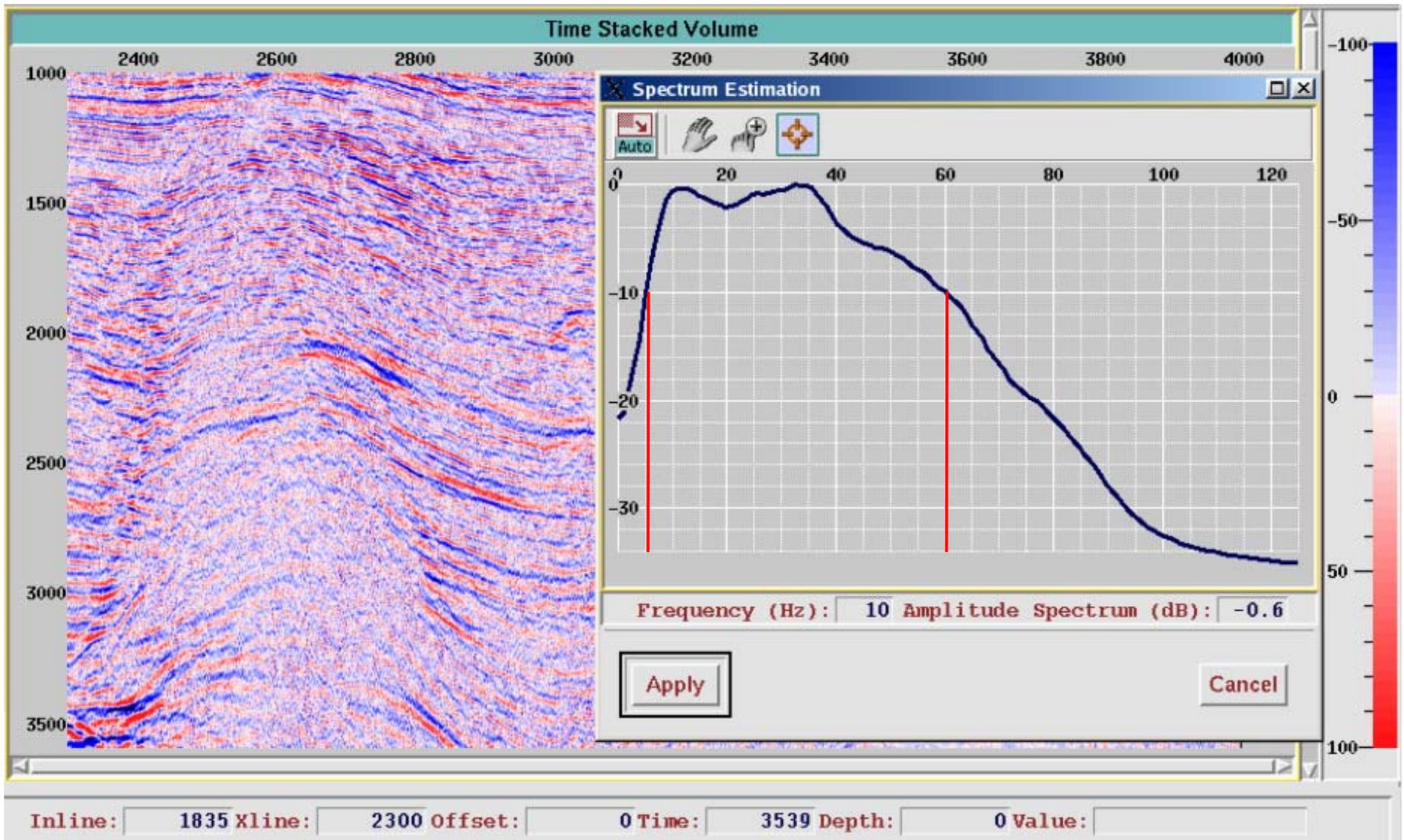


Figura IV.5 Espectro de amplitud representativo del cubo sísmico Almeja-Cisne 3D, con un ancho de banda de frecuencias útiles de 5 a 60 Hz.

b) Número de bandas en las que se descompone la información sísmica

Uno de los objetivos de la descomposición espectral es permitir iluminar características geofísicas o geológicas con diferentes bandas de frecuencia y de esta manera poder visualizar si alguna de ellas proporciona una mejor resolución.

Las variables que se tomaron en cuenta para elegir el número óptimo de bandas o rangos de frecuencia en las que se descompuso la información sísmica del cubo preliminar Almeja-Cisne, fueron la calidad de los datos y los objetivos del presente trabajo; en este sentido, se llevaron a cabo una serie de pruebas, en donde se contemplaron desde 3 hasta 10 bandas, y se encontró que de la banda 6 en adelante la información se distorsionaba y no resultaba de utilidad para el análisis de ruido y de la huella de adquisición, mientras que de 3 a 5 bandas, la resolución se adecuaba para el análisis de este trabajo; y tomando en consideración el análisis de control de calidad realizado por el contratista (PEMEX Exploración y Producción *et al.*,2003), se determinó usar 5 bandas (figura IV.6), con la finalidad de visualizar los alcances de la resolución, ruido y huella de adquisición en altas frecuencias en el dominio tiempo-frecuencia.

The screenshot shows the 'Spectral Decomposition' settings in a software application. The 'Output Attribute' section is expanded to show 'Spectral Decomposition'. The 'Frequency Range' section has 'From' set to 5.0, 'To' set to 60.0, and 'No. of Bands' set to 5. The 'Frequency Increments' dropdown is set to 'Frequencies'. The 'Operator Size [samples]' is set to 49. The 'Signal Amplitude' dropdown is set to 'Full Range'. The 'Along Horizon' checkbox is unchecked. The 'Input File' section shows 'Time Stacked Volume' with 'Select File...' and 'Input File Info...' buttons. The 'Output File Range' section has a table with the following data:

	From	To	Increment
Inlines	1761	1856	1
Crosslines	2300	4000	1
Time [ms]	1000	3600	

Below the table is a 'Full Range' button.

Figura IV.6 Parámetros básicos de la descomposición espectral aplicados al cubo preliminar Almeja-Cisne 3D, entre los que se encuentran: a) Rango de frecuencias: 5 a 60 Hz, b) Número de bandas: 5, c) Modo de incremento: frecuencias, d) Tamaño del operador: 49, e) Rango de salida: total del cubo.

c) Modo de Incremento en frecuencias u octavas.

El módulo de ventana de parámetros (figura IV.6) del software Paradigm Geophysical ®, presenta dos opciones en el modo de incremento que son: frecuencias u octavas.

Normalmente el modo de incremento se efectúa en decibeles por octava, sin embargo, las pruebas realizadas nos permitieron verificar que este modo no era tan efectivo al momento de analizar los slices de frecuencia para el caso del análisis de las huellas de adquisición y resolución, mientras que el modo de frecuencia permitió visualizar mejor estas características sísmicas, esto posiblemente afectado por el espaciamiento equidistante existente entre las ondículas Gabor.

d) Tamaño del operador (muestras).

La longitud del filtro en muestras debe ser tal que obtenga un muestreo regular, con la finalidad de lograr una distribución uniforme de la información sísmica.

El muestreo en el dominio de la frecuencia, responde al uso de señales de ondículas las cuales deben ser física y numéricamente representadas; esto se logra a través del uso de las ondículas Gabor-Morlet (1982), tal como se aprecia en la figura IV.4.

En este trabajo, el operador de longitud óptimo se logró obtener después de realizar varias pruebas y tomando en consideración las aseveraciones realizadas por Gabor para el dominio de la frecuencia (apéndice A).

e) Tipo de atributo

La ventana del módulo de Paradigm (Figura IV.6), permitió escoger uno dentro de los diez atributos de traza compleja que contiene, y que de acuerdo a los objetivos de este trabajo, la amplitud y la envolvente de la señal sísmica (II.10) son los apropiados para manejar las características sísmicas de la huella de adquisición, resolución y ruido sísmico.

f) Rango de salida

Este rango se puede manipular, dependiendo del detalle de información que se requiera manejar, así como de la disponibilidad del equipo técnico para manejar grandes volúmenes de información sísmica; en este trabajo de tesis se utilizó todo el volumen de información sísmica, ya que era un cubo pequeño y podía manipularse con relativa facilidad.

El rango de este volumen está formado por los inlines desde 1761 a 1856 y los crosslines del 2300 a 4000, con un tiempo de 1000 a 3600 milisegundos.

Una vez que los parámetros básicos son introducidos al módulo mostrado en la figura IV.6, se procede a aplicar la descomposición espectral al cubo Almeja-Cisne, obteniéndose la siguiente descripción de los volúmenes en la tabla 4.

Tabla 4 Descripción de parámetros de cada una de las cinco volúmenes de frecuencias obtenidas de la descomposición espectral del cubo Almeja-Cisne.

NOMBRE	BANDA DE FRECUENCIA (Hz).	TIPO DE ATRIBUTO	TIEMPO	INLINES	XLINES
CUBO-1	5 - 18.75	Amplitud	1 a 3.6 seg.	1761 a 1856	2300 a 4000
CUBO-2	18.75 - 32.50	Amplitud	1 a 3.6 seg.	1761 a 1856	2300 a 4000
CUBO-3	32.50 - 46.25	Amplitud	1 a 3.6 seg.	1761 a 1856	2300 a 4000
CUBO-4	46.25 - 60.00	Amplitud	1 a 3.6 seg.	1761 a 1856	2300 a 4000
CUBO-5	60	Amplitud	1 a 3.6 seg.	1761 a 1856	2300 a 4000

Como ya se ha visto, el ancho de banda útil del cubo sísmico de este trabajo, es de 5 a 60 Hz, y la operación de descomposición del cubo sísmico, se llevó a cabo tomando en cuenta la teoría de TOC (IV.A.2), es decir, primeramente se aplica un filtro pasa banda de 27.5 Hz al rango de 5 a 60 Hz, que corresponde a la frecuencia central de este ancho de banda, por lo que se obtienen dos versiones de la misma señal (5 a 32.5 y 32.5 a 60 Hz), y la frecuencia intermedia entre estas versiones es la frecuencia dominante de la inline sísmica (32.5 Hz); y continuando con la teoría de TOC, se toma la porción baja de 5 a 32.5 Hz y se aplica el mismo procedimiento descrito arriba y posteriormente con

el rango de 32.5 a 60 Hz, y a esta operación es lo que se conoce comúnmente como descomposición espectral, que es la forma como se obtuvieron las bandas de frecuencia de la tabla 4.

La figura IV.7 muestra el primero de los cinco cubos de descomposición espectral obtenidos a través de la aplicación de la transformada de ondícula al cubo preliminar Almeja-Cisne, aquí se puede observar la inline 1761 del rango de frecuencias de 5 a 18.75 Hz, es claro que hay reflectores claros y fuertes en los rangos de 1 a 1.1, 1.2 a 1.6 y de 2.3 a 3 segundos, estos son indicativos claros de la mejora de resolución en el dominio tiempo-frecuencia, esto se debe en gran parte a que el filtro Gabor-Morlet (1982) versión Paradigm, se adaptó al rango de frecuencias analizado (5 a 60Hz), y al hecho de que a bajas frecuencias tenemos menos muestras que corresponden en el dominio del tiempo a intervalos amplios, lo que significa que al aplicar la formula 3, y al multiplicar la señal real $f(t)$ por un menor número de muestras en tiempo, se obtendrá mayor resolución en frecuencia, y el caso contrario, cuando a mas altas frecuencias se tiene mayor número de muestras que corresponden a pequeños intervalos en tiempo, lo que implica una menor resolución en frecuencia, tal como se aprecia en cada uno de los cubos de descomposición espectral de la figura IV.7 a IV.11.

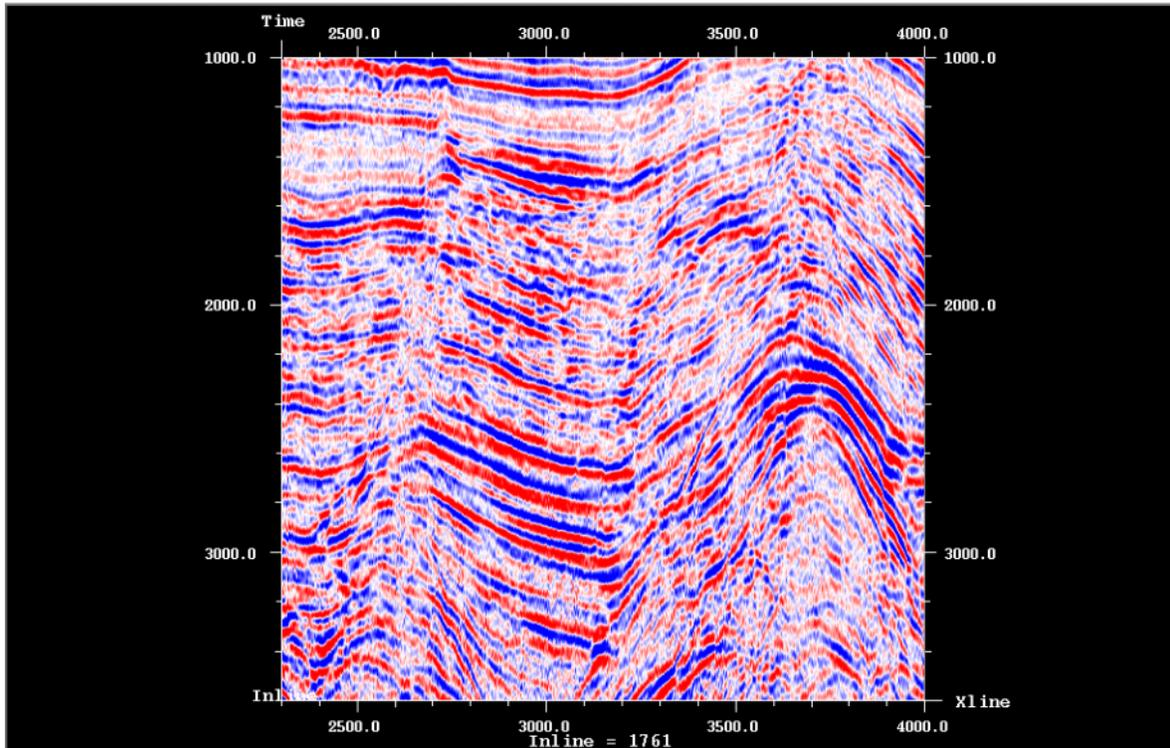


Figura IV.7 Sección sísmica inline 1761 correspondiente al primer cubo de descomposición espectral del levantamiento Almeja Cisne.

En el análisis de la figura IV.8, pudimos observar en el mismo inline (1761) pero en el segundo cubo de descomposición espectral, que el rango de reflectores de 2.3 a 3 s empieza a atenuarse, debido a que el ruido empieza acentuarse con mayor fuerza, sin embargo, los otros dos rangos de reflectores se mantienen con una buena resolución.

Cabe resaltar que la transformada de ondícula aplicada a este trabajo por el filtraje Gabor-Morlet versión Paradigm, tiene la característica de presentar una variabilidad de resolución en sus ondículas, lo que se puede apreciar conforme pasamos a los subsiguientes cubos mas altos en frecuencia, ya que el espaciamiento entre las subsecuentes componentes en frecuencia incrementa a medida que incrementa la frecuencia.

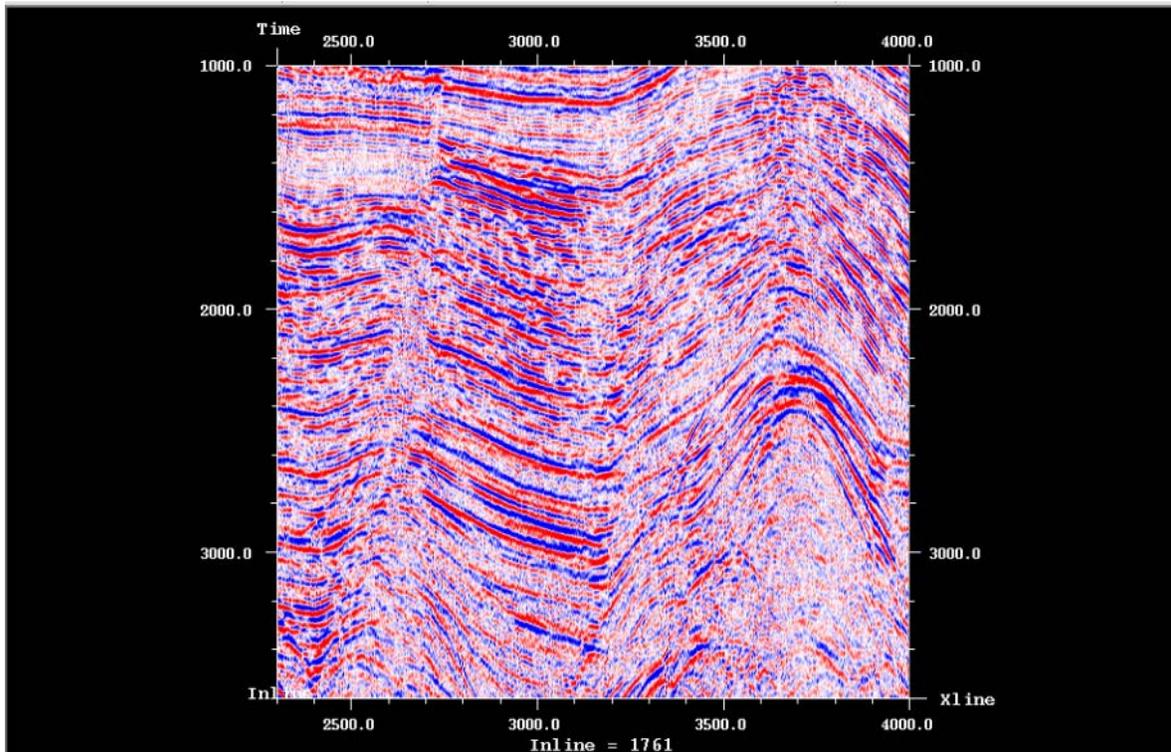


Figura IV.8 Sección sísmica inline 1761 correspondiente al segundo cubo de descomposición espectral del levantamiento Almeja Cisne.

Podemos ver que nuestro análisis empieza a tomar sentido, ya que en nuestra siguiente figura IV.9, que corresponde al tercer cubo de descomposición espectral de la misma inline, el ruido empieza a sobresalir fuertemente sobre los reflectores sísmicos de 2.3 a 3 s, particularmente entre los xlines 3500-4000 y los reflectores del primer rango de tiempo (1 a 1.1 s) se ven ligeramente atenuados por ruido sísmico, mientras que el paquete intermedio de reflectores de 1.2 a 1.6 s se mantiene con buena resolución.

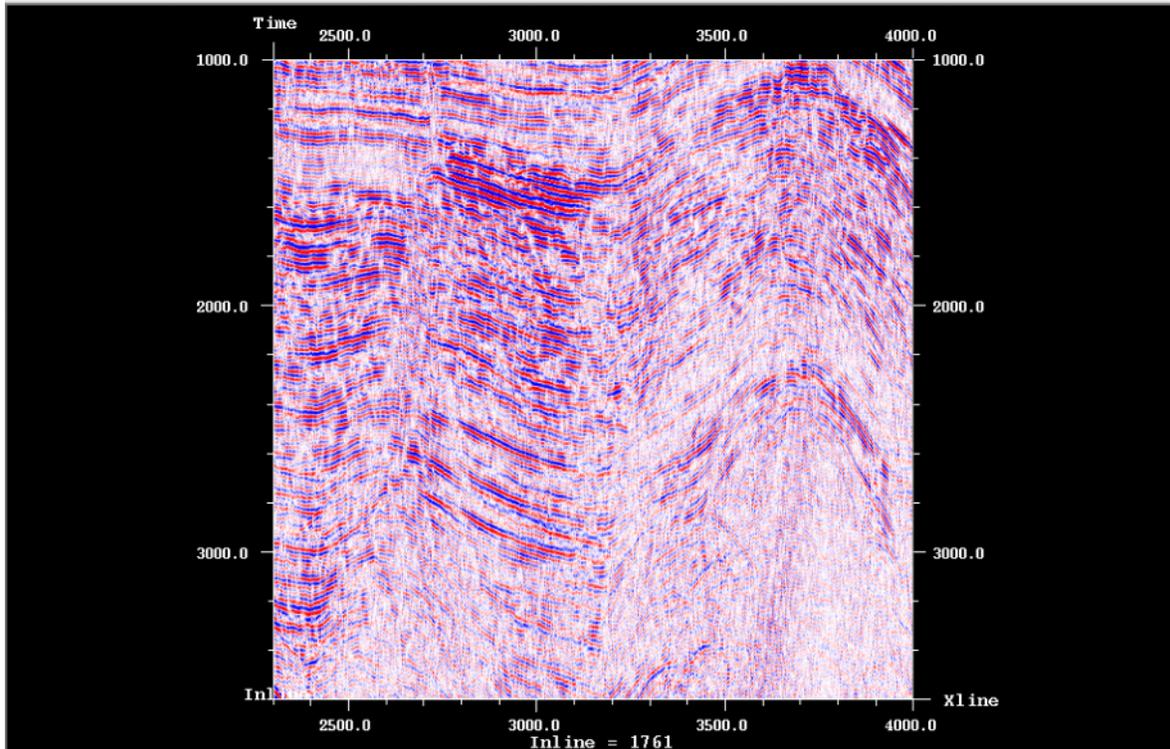


Figura IV.9 Sección sísmica inline 1761 correspondiente al tercer cubo de descomposición espectral del levantamiento Almeja Cisne.

El cuarto cubo mostrado en la figura IV.10, que muestra el mismo inline analizado, refleja que el único paquete de reflectores que se conservan se ven en la zona somera, desde 1 a 2.2 segundos, y prácticamente los reflectores “profundos “ (2.3 a 3 s) fueron oscurecidos completamente por la presencia de ruido sísmico.

Otra de las características importantes en la determinación de la resolución en el dominio tiempo-frecuencia, con base en la teoría de la transformada de ondícula continua, es que el coeficiente “a” denominado escala que es parte de la formula 5, en el que su valor está en función inversa a la frecuencia, es decir, una escala alta corresponde a bajas frecuencias y una escala baja corresponde a altas frecuencia, esto significa, que a medida que $a > 1$ se tiene mejor resolución pero si a es menor a este valor la resolución decrece (Polikar, 1996).

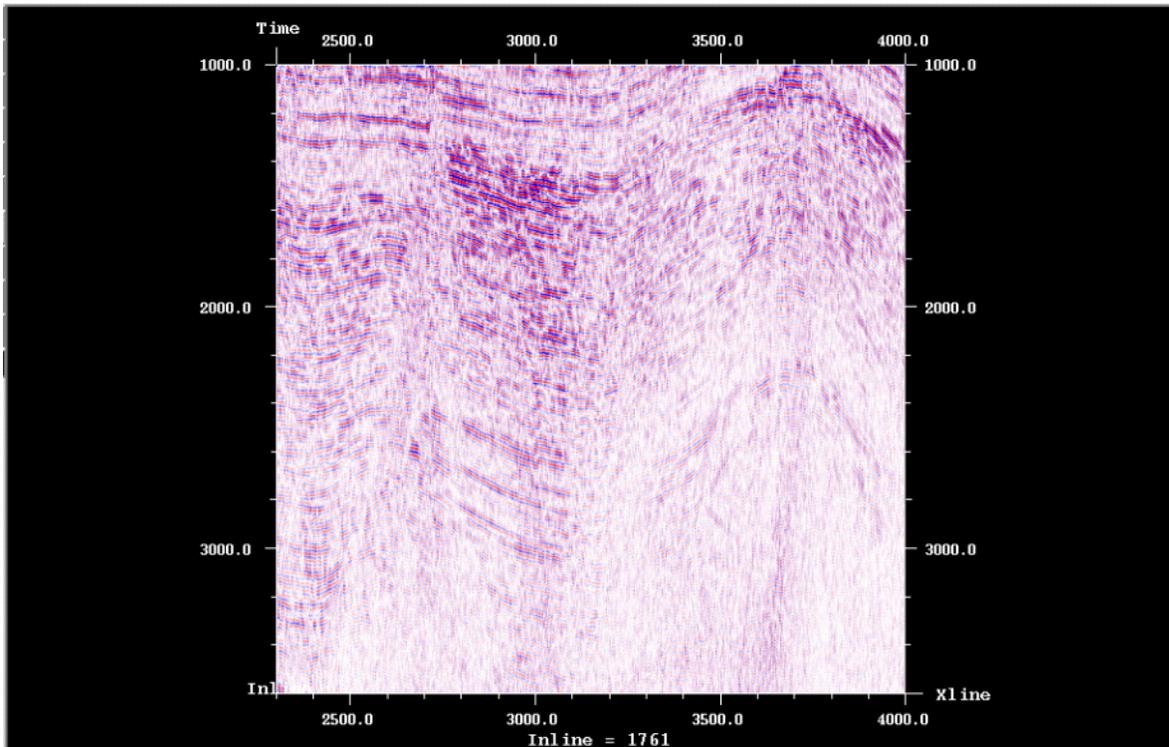


Figura IV.10 Sección sísmica inline 1761 correspondiente al cuarto cubo de descomposición espectral del levantamiento Almeja Cisne.

Por ultimo presentamos la inline 1761 correspondiente al quinto cubo de descomposición espectral mostrado en la figura IV.11. Aquí se puede confirmar que la calidad de la resolución disminuyó considerablemente, al grado de no tener reflectores continuos en la zona somera de 1 a 2 segundos, aunado a la presencia de ruido en prácticamente todo el inline (1 a 3.6 s).

Esto nos lleva a concluir que las más altas frecuencias tienen buena resolución en tiempo y las más baja frecuencias tienen mejor resolución en frecuencia. Esto significa, que cierta componente de alta frecuencia puede ser mejor localizada en tiempo (con menor error) que la componente de baja frecuencia. En caso contrario, la componente de baja frecuencia puede ser localizada mejor en frecuencia comparada con la componente de alta frecuencia.

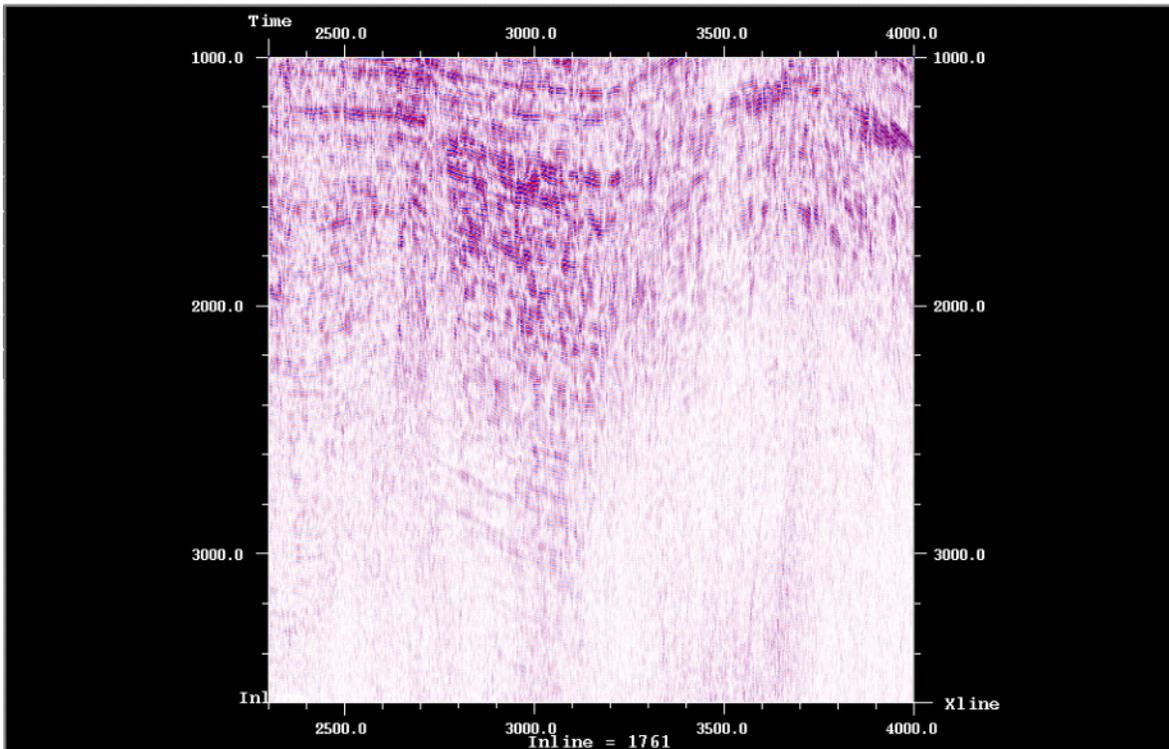


Figura IV.11 Sección sísmica inline 1761 correspondiente al quinto cubo de descomposición espectral del levantamiento Almeja Cisne. En este cubo la presencia de ruido es muy evidente en la parte profunda de la sección sísmica (debajo de 2 s), mientras que los reflectores en zona somera se mantuvieron hasta una profundidad de 2.2 segundos.

IV.B Análisis de la huella de adquisición

IV.B.1 Descomposición Espectral en la huella de adquisición

Un registro sísmico es una secuencia de valores de aceleración, velocidad y desplazamiento del subsuelo distribuidos en una serie de tiempo. Esta serie de tiempo está compuesta por ondas, que arriban a diferentes tiempos, longitud de onda y frecuencias, y en donde al rango de frecuencias diferentes se denomina espectro.

El proceso de descomposición o análisis de una señal dentro de sus componentes espectrales (frecuencias) es llamado descomposición espectral. El resultado de esta descomposición para el caso de un cubo sísmico es un cubo de frecuencia, compuesto de una distribución de amplitudes sobre el dominio tiempo-frecuencia.

La descomposición espectral en el dominio tiempo-frecuencia también presenta los mismos productos 3D que en el dominio del tiempo, es decir, es posible visualizar secciones horizontales (slice) tiempo-frecuencia, donde se despliegan eventos de más de un horizonte de reflexión.

IV.B.2 Análisis post-stack

Es indudable que las técnicas tanto de adquisición de datos sísmicos como de procesado han mejorado considerablemente, ya que han permitido observar información geológica significativa en volúmenes sísmicos, sin embargo, siempre es importante considerar nuevos tipos de mediciones que ayuden a localizar y analizar características geológicas y así mismo el poder verificar la calidad de la información sísmica adquirida. Sin lugar a dudas, este último punto es muy importante, ya que para llevar a cabo un procesado prestack es necesario una buena calidad de información sísmica, de tal forma, que si pudiéramos tener controles cuantitativos de la información sísmica de campo desde la etapa de poststack, permitiría verificar el estado de la calidad de la información sísmica adquirida, y que tan factible es esta información sísmica de campo para ser usada en procesos especiales.

IV.B. 3 Metodología en la detección de huellas de adquisición

La huella de adquisición es un término usado para definir patrones espaciales lineales vistos en secciones sísmicas 3D horizontales (time-slices). Estos patrones tienden a ser como un “espejo” de la geometría de adquisición usada para llevar a cabo un levantamiento sísmico. Usualmente la “huella” puede ser vista en time-slices, horizontales someros o en mapas de horizontes de amplitud en forma de “estrías” que pueden enmascarar las anomalías de amplitud de interpretaciones estratigráficas o en análisis de AVO y estudio de atributos de yacimientos (Marfurt *et al.*, 1995, 1998).

Un ejemplo muy claro de la característica representativa de una huella de adquisición se puede ver en el trabajo realizado por (La bella *et al.*, 1998), que se muestra a continuación (figura IV.12).

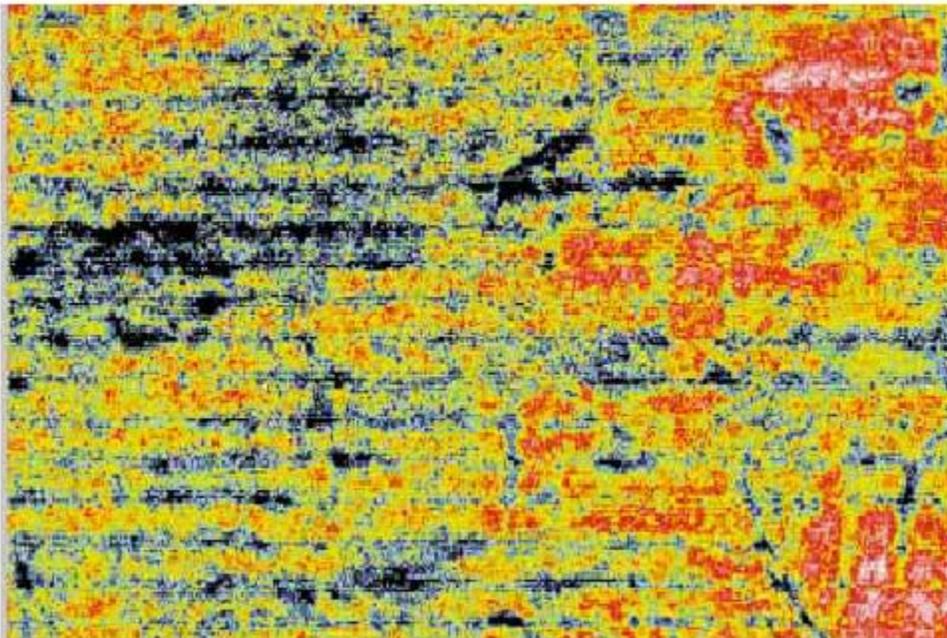


Figura IV.12 Mapa de amplitud mostrando la huella de adquisición como estrías lineales (La bella *et al.*, 1998).

Debido a la complejidad operacional y geofísica (Ej., metodologías de adquisición complejas, feathering, dirección del levantamiento, etc.), los levantamientos sísmicos marinos 3D involucran muestreos irregulares de azimuts, offsets y cubrimiento; producen huellas de adquisición en el volumen final migrado lo cual afecta negativamente a la interpretación.

Hay varios factores conocidos que intensifican las huellas de adquisición como son: polarización de azimut, polarización de offsets, distancias grandes entre cables de adquisición, bajo cubrimiento, baja relación S/R y DMO 3-D, los cuales están claramente relacionadas a la geometría de adquisición; estos factores son frecuentemente atenuados aplicando diversas herramientas de proceso a los mapas finales de amplitud, pero es mucho más importante removerlos desde el volumen de información sísmica sin afectar los atributos de amplitud.

a) Análisis de mapas de cubrimientos

Para entender y cuantificar el impacto de las geometrías de adquisición en la calidad de la información de los levantamientos sísmicos marinos 3D, es recomendable tomar en cuenta el cubrimiento sísmico 3D, tal como lo definieron Huard y Spitz (1998), quienes manifiestan que las irregularidades en los mapas de cubrimientos afectan directamente la calidad de la imagen de la información sísmica, por lo que se considera a los mapas de cubrimiento como una herramienta importante en el análisis de detección de huellas de adquisición.

Tomando en cuenta las aseveraciones realizadas por Marfurt *et al.*(1995,1998) y La bella (1998), el análisis del cubrimiento se llevó a cabo a offsets cercanos de 180 a 2180 m, tal como se presenta a continuación.

Los mapas de cubrimiento que se presentan en las figuras (IV.13 y IV.14), fueron tomados del informe Pemex Exploración y Producción *et al*, (2003). En la primera de estas figuras (IV.13) se muestra el mapa de cubrimiento total del Levantamiento Almeja-Cisne 3D, así como el área del presente trabajo de tesis, que se ve en líneas punteadas que forman un rectángulo.

La figura IV.14, es una ampliación del mapa de cubrimiento de offsets cercanos (180-2180) sin incremento en el tamaño del bin (flex binning), y aquí se puede ver el bajo cubrimiento principalmente en cuatro líneas de navegación (1822,1832,1839 y 1844) cuyos rangos están por debajo de las 17 trazas por bin, que es un nivel abajo de las especificaciones para obtener un buen

cubrimiento (III.3), así mismo se aprecia que este bajo fold esta en la parte central del área de análisis de este trabajo.

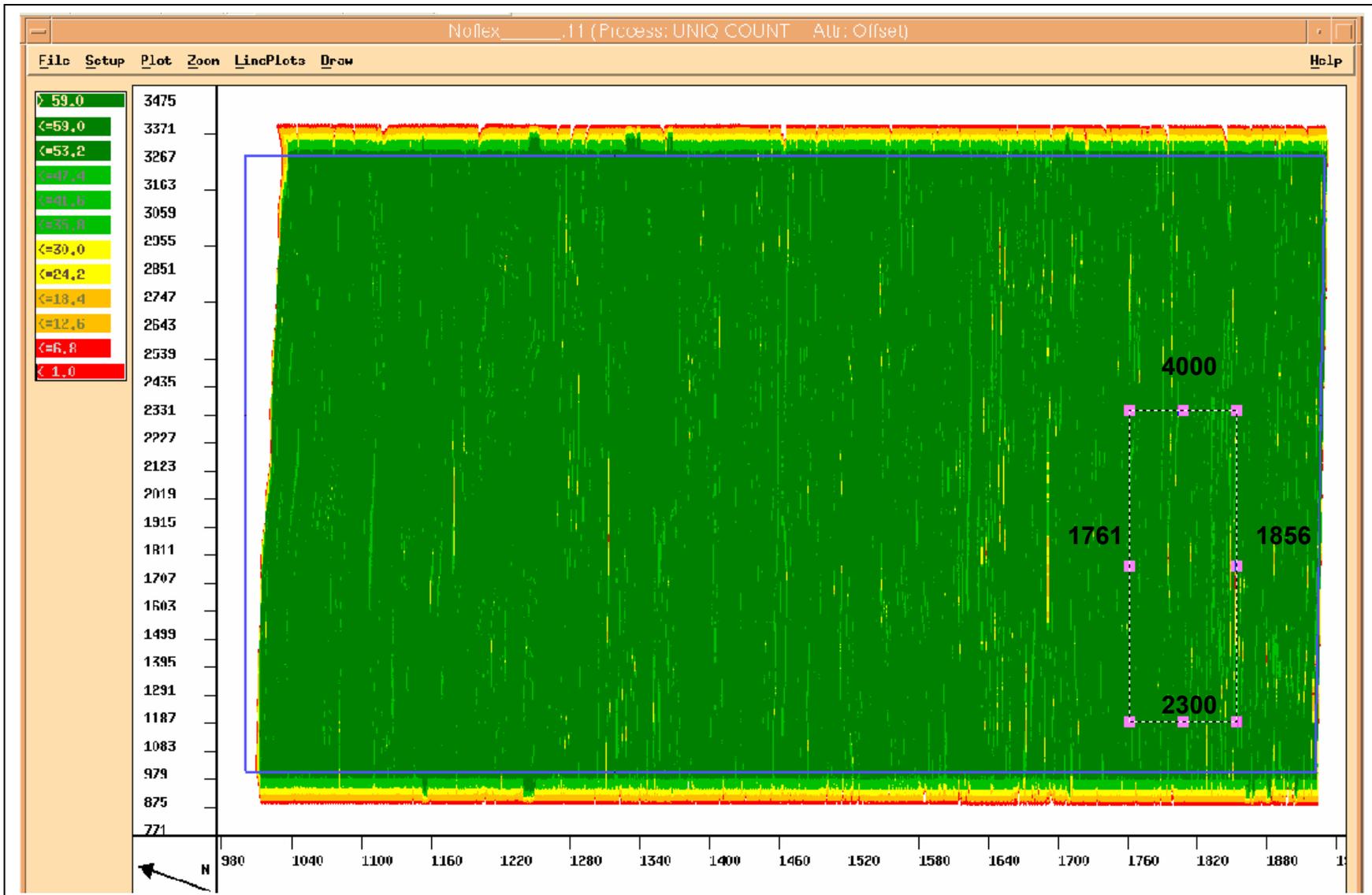


Figura IV.13 Mapa de cubrimiento total del levantamiento Almeja-Cisne 3D sin incremento en el tamaño del bin. En la parte superior izquierda se describen los rangos de cobertura mínima para cada bin estático individual. El rectángulo marcado con los puntos rosas indica el cubo del presente trabajo (Pemex Exploración y Producción *et al.*, 2003).

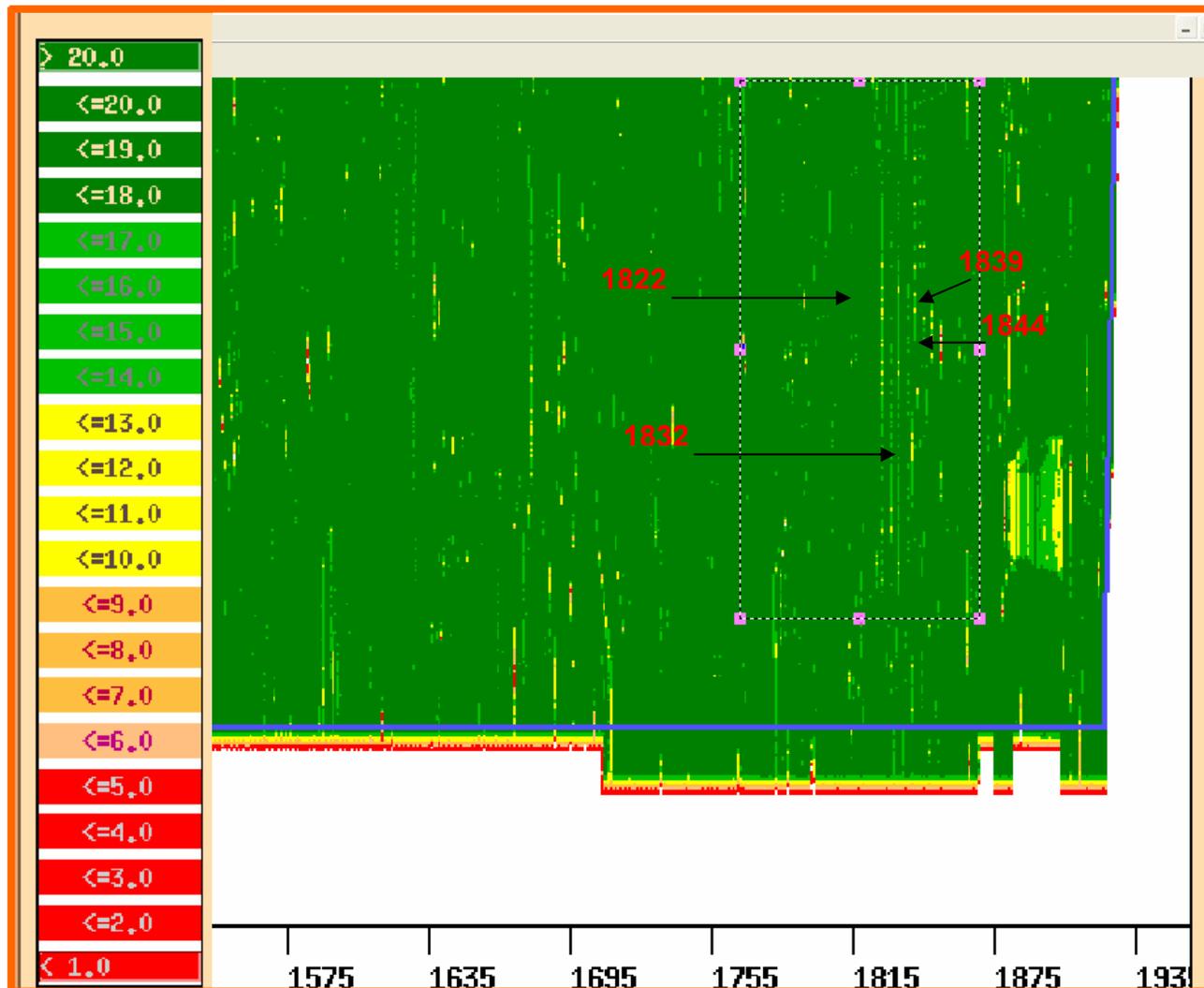


Figura IV.14 Ampliación del mapa de cubrimiento de offsets cercanos (180-2180m), mostrando el cubrimiento del cubo analizado en este trabajo; se puede observar los inlines 1822, 1832, 1839 y 1844 que presentan bajo cubrimiento, y que de acuerdo a los rangos de cobertura mínima mostrados en la tabla de la izquierda del mapa de cubrimiento, tienen menos de 17 trazas por bin hasta 10 trazas, las cuales están por debajo de las especificaciones técnicas presentadas en la tabla 2 del capítulo III (Pemex Exploración y Producción *et al.*, 2003).

b) Aplicación de la descomposición espectral al cubo preliminar Almeja-Cisne.

La interpretación y visualización de información sísmica en el dominio tiempo-frecuencia es una herramienta importante para estudiar información sísmica o geológica en una región. Típicamente tales análisis son llevadas a cabo con información sísmica post-stack (Castagna *et al.*, 2003).

Tal es el caso de este trabajo, donde se usaron secciones horizontales (slices) en el dominio tiempo-frecuencia del cubo Almeja-Cisne, para la detección de huellas de adquisición de este cubo preliminar.

Los parámetros considerados en el punto IV.A.3, son los mismos que se aplicaron a este análisis de huella de adquisición, incluidas figuras y tabla 4.

c) NORMALIZACIÓN

El rango dinámico de amplitudes en la información sísmica podría ser amplio, y para poder acomodar eventos fuertes y débiles dentro de una imagen sísmica, comúnmente y tal como Yilmaz (1987) lo aseveró, se aplica un control de ganancia automática (AGC) para escalar la información, sin embargo, el AGC presenta tres problemas (Yilmaz,1987) conocidos comúnmente como: (1) Introduce zonas someras en la vecindad de eventos fuertes en la ventana de AGC; (2) el orden relativo de amplitudes después de aplicar AGC es destruida; (3) las amplitudes iguales antes de AGC pueden no ser necesariamente igual después de AGC; y precisamente el AGC fue uno de los pasos de procesado que se aplicaron a este cubo preliminar (punto III.4), y tomando en cuenta que todo cubo de descomposición espectral está conformado por tres variables: ruido aleatorio, ondícula Morlet (1982) e información sísmica (Partyka y Gridley, 1999), por lo que fue necesario usar el método de normalización por histograma (NH) para balancear las amplitudes fuertes y débiles en las trazas sísmicas; de ahí que tanto eventos fuertes y débiles puedan ser acomodados y visualizados para los interpretes (Luo, 2001).

Es importante mencionar, que la aplicación de la normalización por histograma, puede sobrepasar los problemas asociados con AGC, y algunas de las ventajas pueden describirse a continuación:

- El método de normalización por histograma no presenta problemas de zonas someras típicamente asociados con el método AGC.
- Los eventos con igual amplitud permanecen igual después de hacer el escalamiento con NH.
- El orden relativo de amplitudes será preservado después del escalamiento de NH. Esto significa que las amplitudes mas grandes (o mas pequeñas) antes de escalar por NH se mantendrá mas grande (o mas pequeña) después de escalar con NH.

La figura IV.15, representa el histograma de amplitud de todo el cubo-1 de descomposición espectral sin normalizar, esto se obtuvo directamente del software de Paradigm Geophysical®.

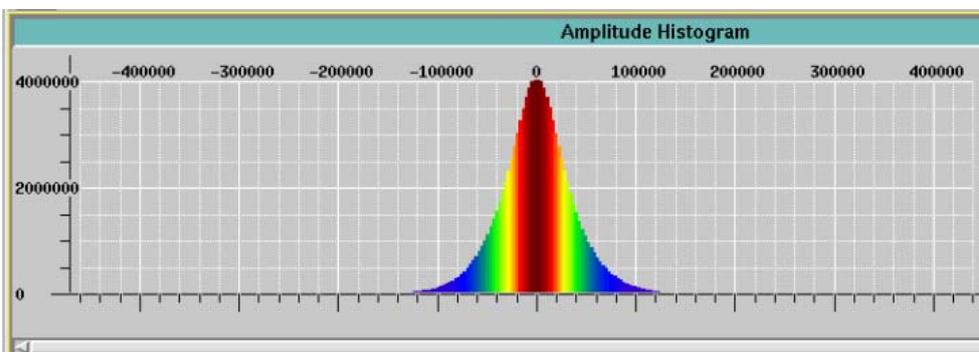


Figura IV.15 Histograma de amplitud de todo el cubo-1 de descomposición espectral sin normalizar (Software Paradigm Geophysical®,2003)

La técnica común de balanceo espectral depende de las estadísticas estacionarias invariantes y dispersas, es decir, si tomamos en cuenta los efectos del AGC y de la variabilidad de la información geológica del cubo preliminar Almeja-Cisne, entonces para lograr un balanceo espectral de amplitudes de este cubo, se aplica el principio teórico estadístico de promediar las amplitudes de cada sección horizontal en el cubo-1 de descomposición espectral, esto se realizó directamente a través del software de Paradigm® (apéndice E), de esta manera se obtuvo el balanceo espectral de amplitudes del cubo-1 de descomposición espectral (fig. IV.16).

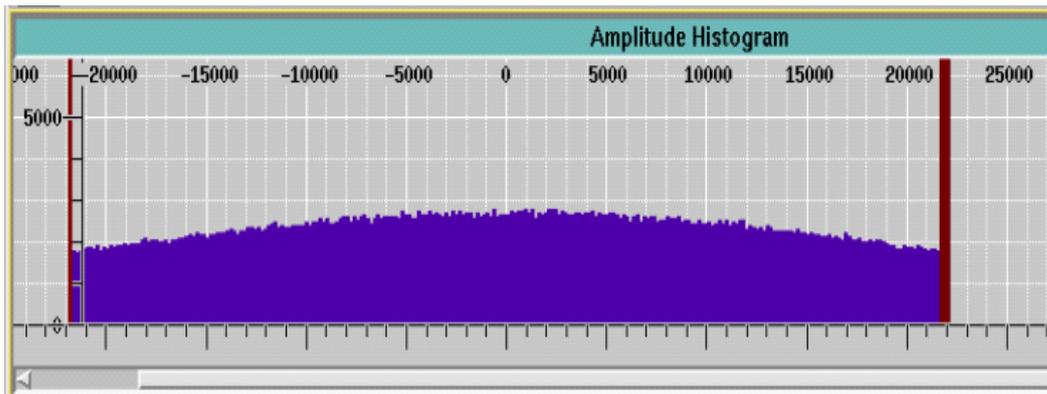


Figura IV.16 Histograma de amplitud balanceado de todo el cubo-1 de descomposición espectral, después de normalizar las amplitudes, tomando como referencia el valor promedio del rango dinámico del histograma de amplitud sin normalizar.

Esta operación de normalización por histograma se aplicó a los cuatro cubos restantes de descomposición espectral.

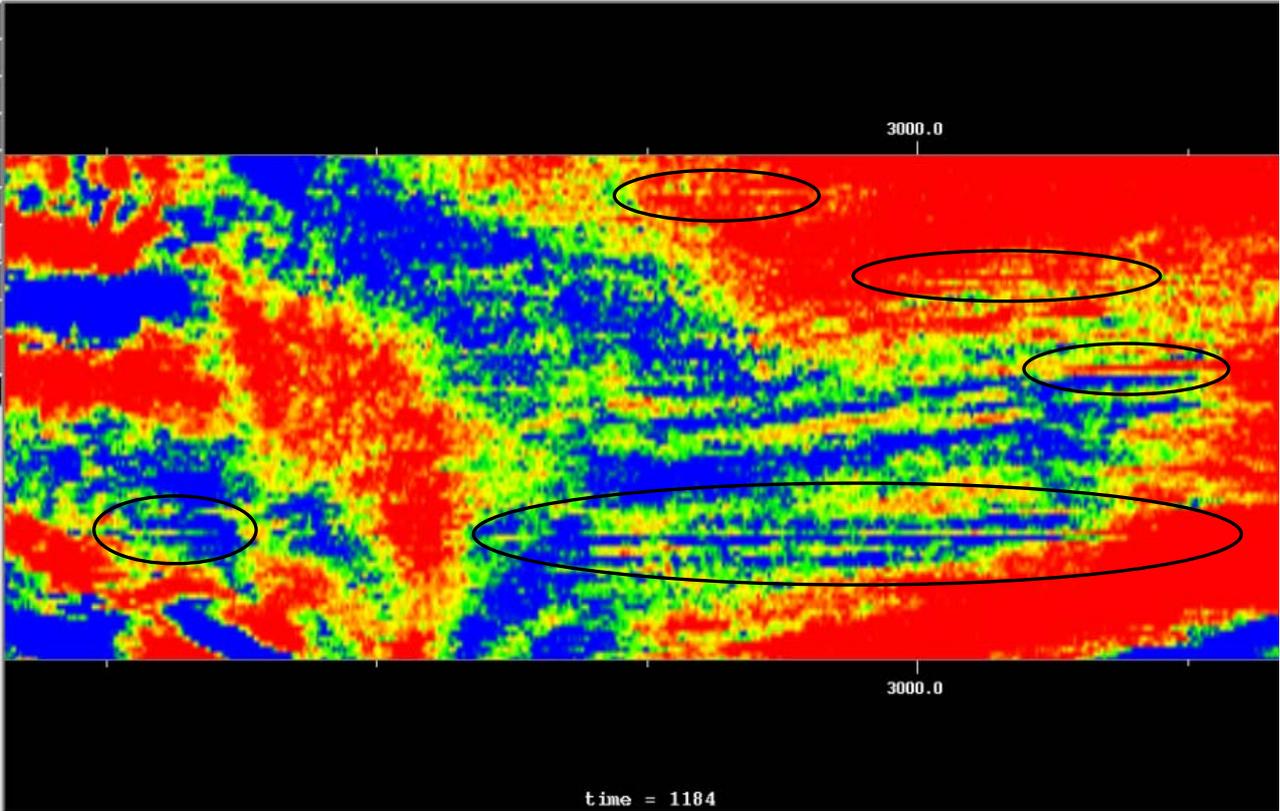
d) ANALISIS DE LAS SECCIONES HORIZONTALES (SLICES) EN EL DOMINIO TIEMPO-FRECUENCIAS.

La visualización de las secciones horizontales (slices) en el dominio tiempo-frecuencia del volumen de Almeja-Cisne 3D, se utilizó para identificar las huellas de adquisición de esta información sísmica, ya que al igual que los timeslices, comparten una característica que es observable tanto en el dominio del tiempo como en la frecuencia, que es denominado comúnmente como estrías, las cuales están típicamente alineadas en la dirección de navegación en la que fue adquirida la información sísmica.

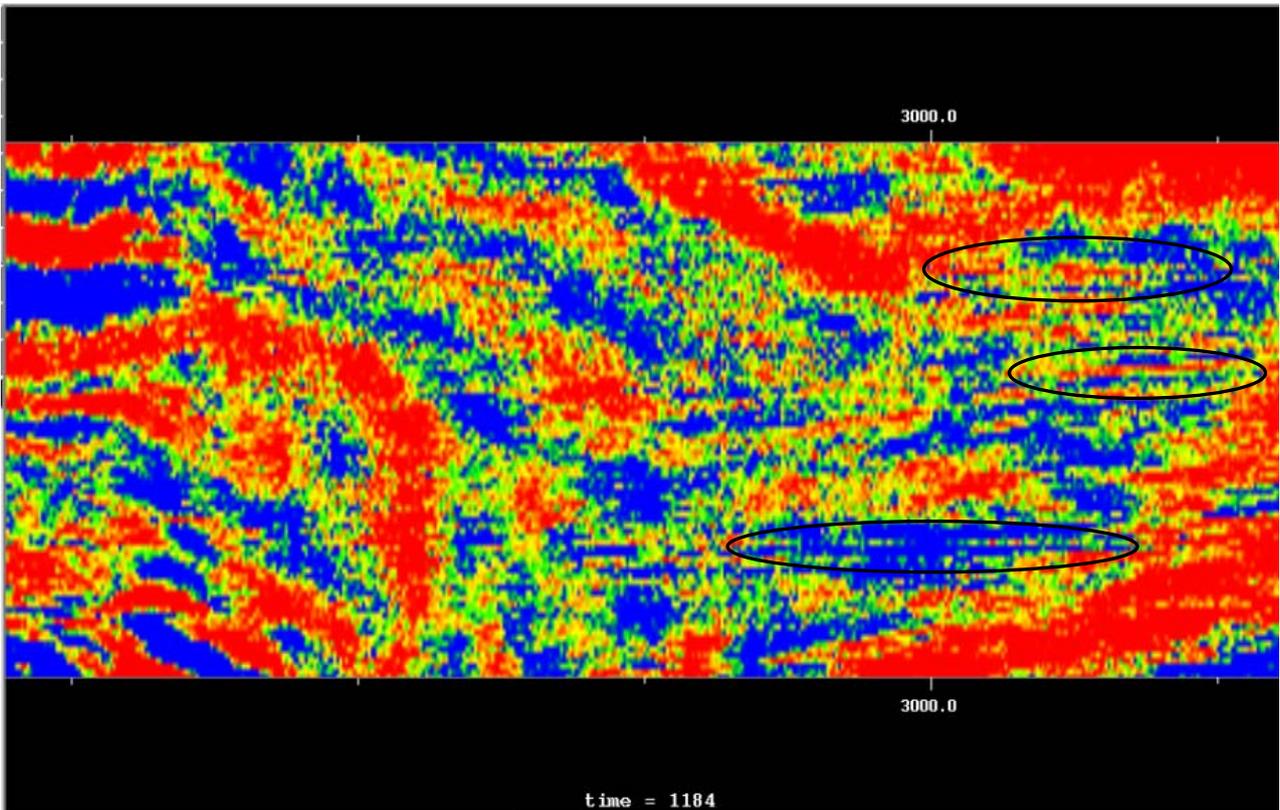
En este trabajo, el análisis de las huellas de adquisición se llevó a cabo entre 1.03 a 1.204 segundos, tomando como referencia que algunos de los intervalos probados en el pozo Amoca-1 fueron aproximadamente en este intervalo de tiempo.

Una vez que fueron normalizados los 5 cubos de descomposición espectral, se procedió a analizar un slice a 1184 segundos de cada cubo, tal como se muestra en la figura IV.17, y podemos observar que fue posible detectar las estrías que caracterizan a las huellas de adquisición, las cuales se encuentran encerradas por óvalos de color negro, así mismo, se logró determinar que las

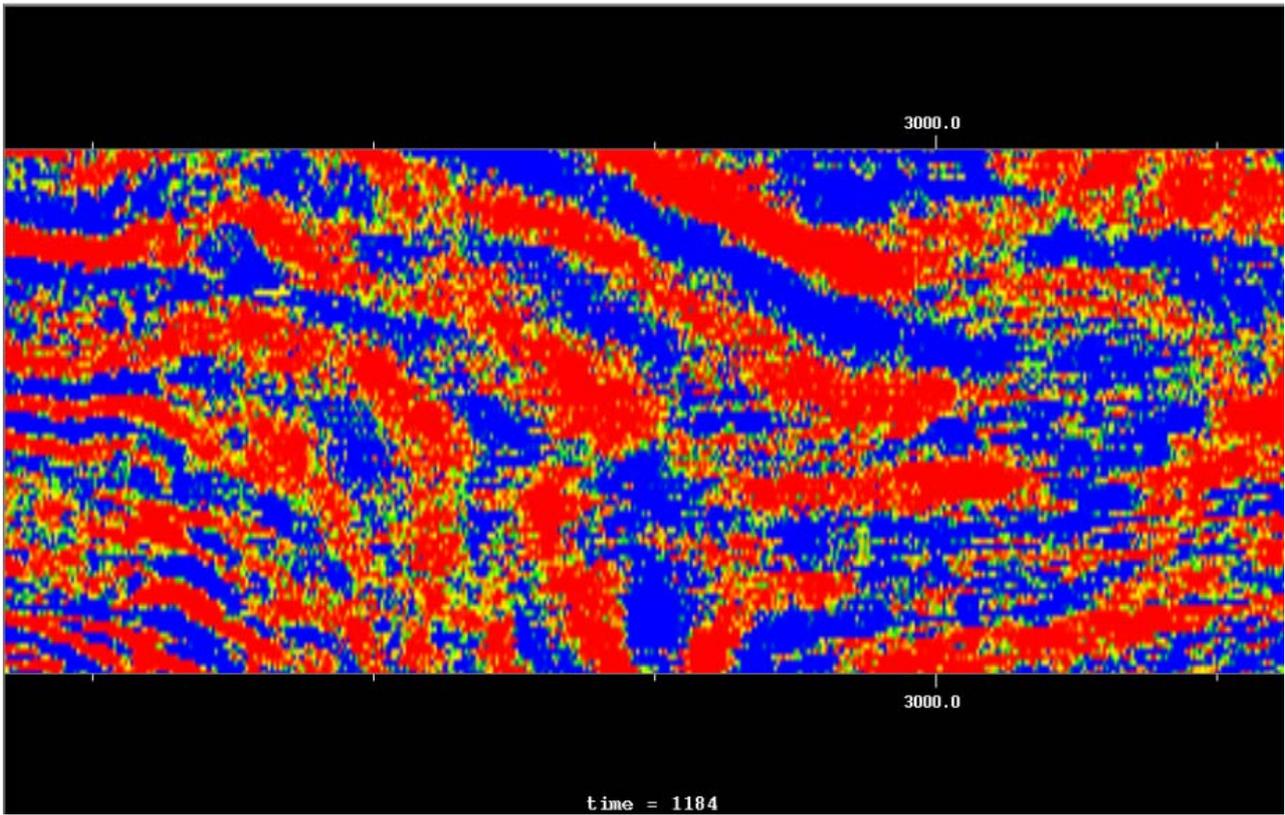
huellas solo se acentúan en las bajas frecuencias, particularmente de 5 a 32.5 Hz, es decir, son detectadas en los primeros dos cubos de descomposición espectral.



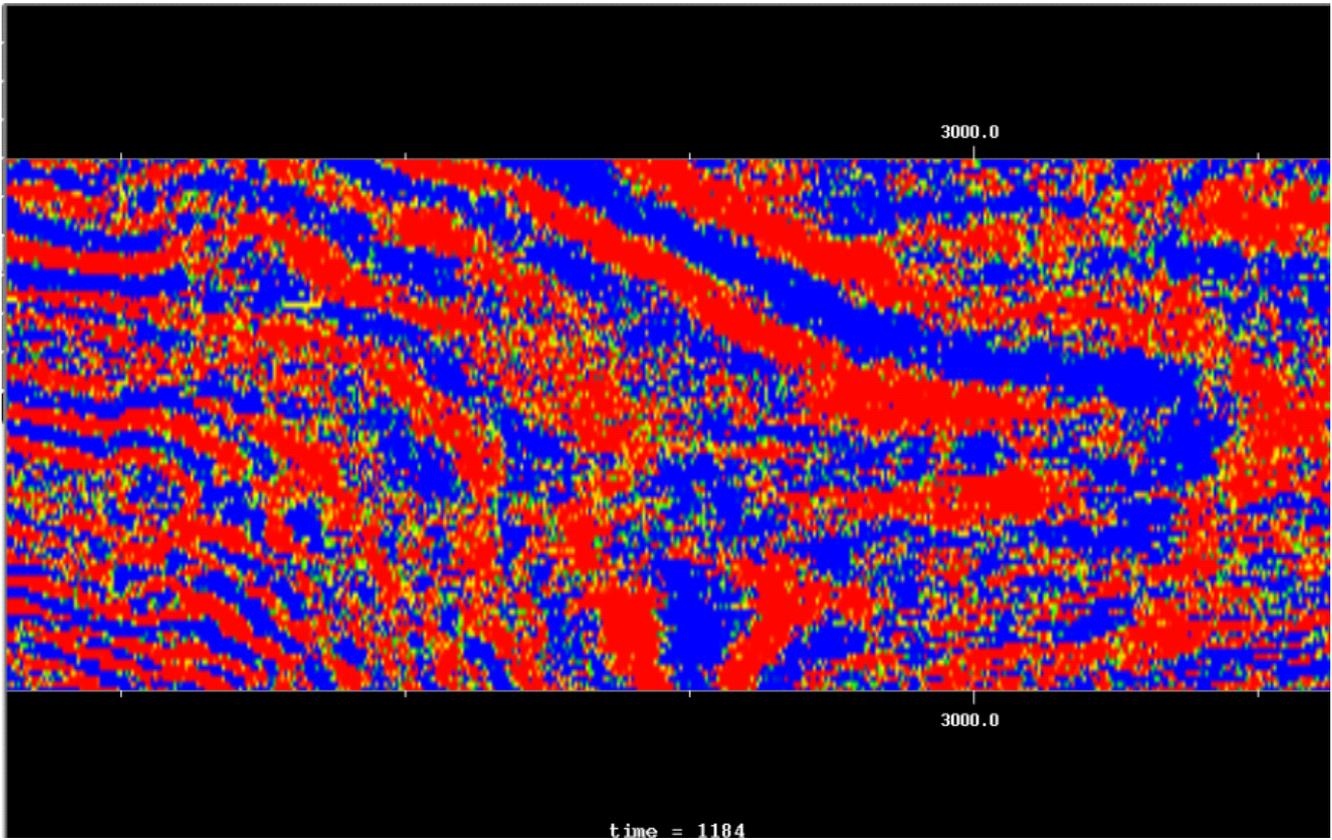
(a) 5 a 18.75 Hz



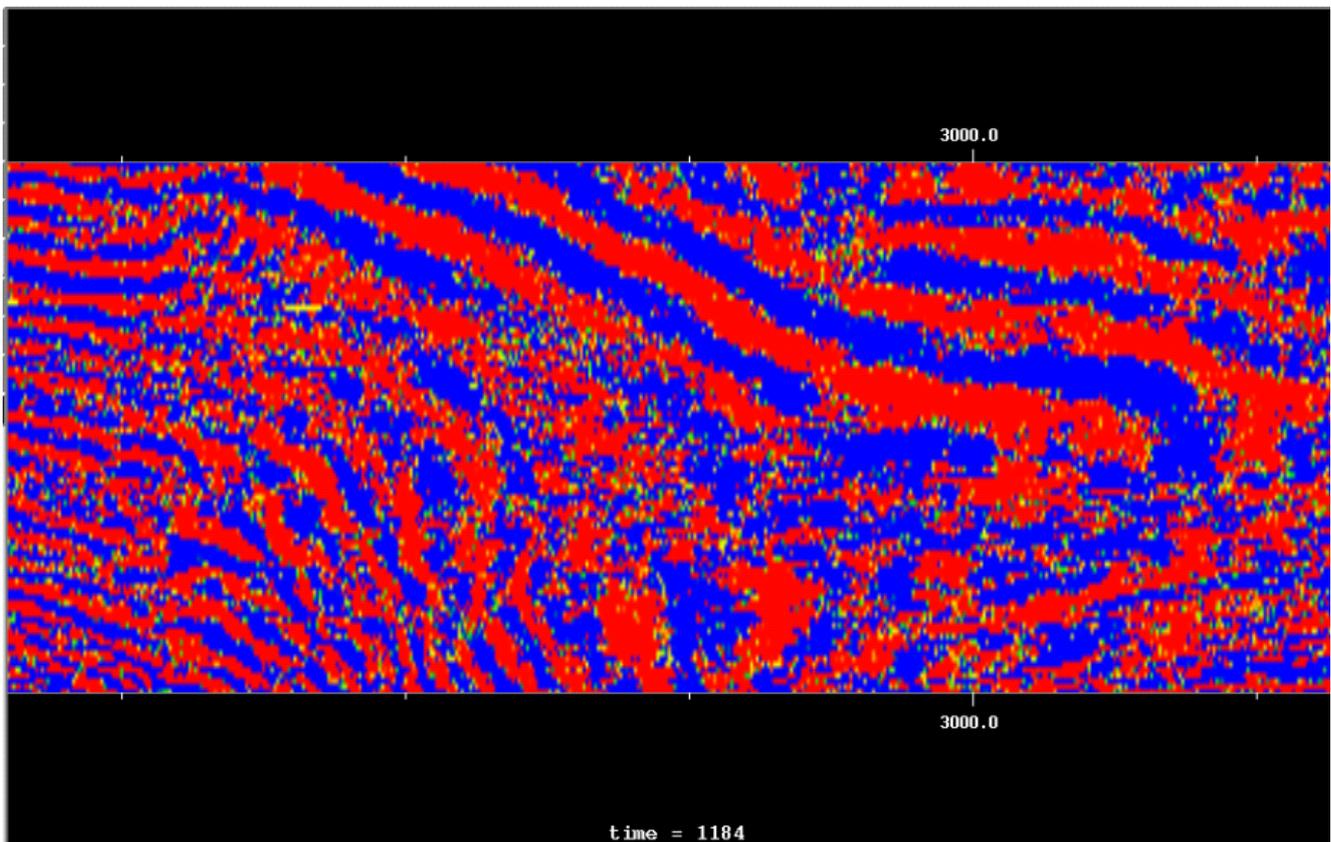
(b) 18.75 a 32.50 Hz



(c) 32.50 a 45.26 Hz



(d) 45.26 a 60 Hz



(e) 60 Hz

Figura IV.17 Slices en el dominio tiempo-frecuencia a 1184 segundos de cada una de los cinco cubos, después de aplicar descomposición espectral y normalización, con el objetivo de identificar las estrías características de las huellas de adquisición. a) slice de frecuencia correspondiente al cubo-1, mostrando siete huellas de adquisición, las cuales se encuentran encerradas en óvalos, las cuales se alinean a los inlines: 1839, 1835, 1832, 1828, 1803, 1784 y 1768; b) slice de frecuencia del cubo-2, presenta tres estrías características de huellas que se muestran encerradas en óvalos y las cuales se alinean a los inlines: 1835, 1832, 1800, 1784; c) slice de frecuencia del cubo-3, en donde no hay claridad de rasgo característico; d) slice de frecuencia del cubo-4 sin apariencia de estrías; e) slice de frecuencia sin estrías características.

Con este resultado, se procedió a realizar el análisis de la parte somera de interés de 1.03 a 1.204 segundos, de cada uno de los cinco cubos de descomposición espectral, esto se puede verificar en el apéndice B, que muestra los rangos en tiempo, inline y crosslines en que se presentan las estrías que son características de las huellas de adquisición del cubo Almeja-Cisne.

IV.B.4 Mapa de amplitud vs huellas de adquisición.

Considerando el trabajo realizado por Marfurt (1995,1998), tenemos que la extracción de mapas de amplitud es una herramienta que podría ayudar a visualizar huellas de adquisición, por lo que se desarrolló una metodología a

través de la cual se pudiera verificar el análisis realizado en IV.B.3d, por lo cual se consideraron los mismos pasos de descomposición espectral aplicados en IV.A.3.

a) CONTINUIDAD DE HORIZONTES Y PARAMETROS DE EXTRACCION

Para llevar a cabo la obtención de un mapa de amplitud, primero es necesario definir la continuidad de un par de horizontes entre 1.03 y 2.04 segundos, pero considerando que la información sísmica del levantamiento Almeja-Cisne que se analiza en este trabajo, se encuentra en etapa post-stack. Esto significa que la calidad de la información no es lo suficientemente buena para obtener una definición continua de horizontes (ver apéndice C), sin embargo, como este análisis se desarrolló en el dominio tiempo-frecuencia y aunado a la buena resolución del primer cubo de descomposición espectral, se logró seguir la continuidad de 2 horizontes (f y s) en la zona somera entre 1 s a 1.2 s (figura IV.18), que es la misma área analizada con los slice del punto IV.B.3d; las características de estos horizontes se pueden ver en la tabla 5.

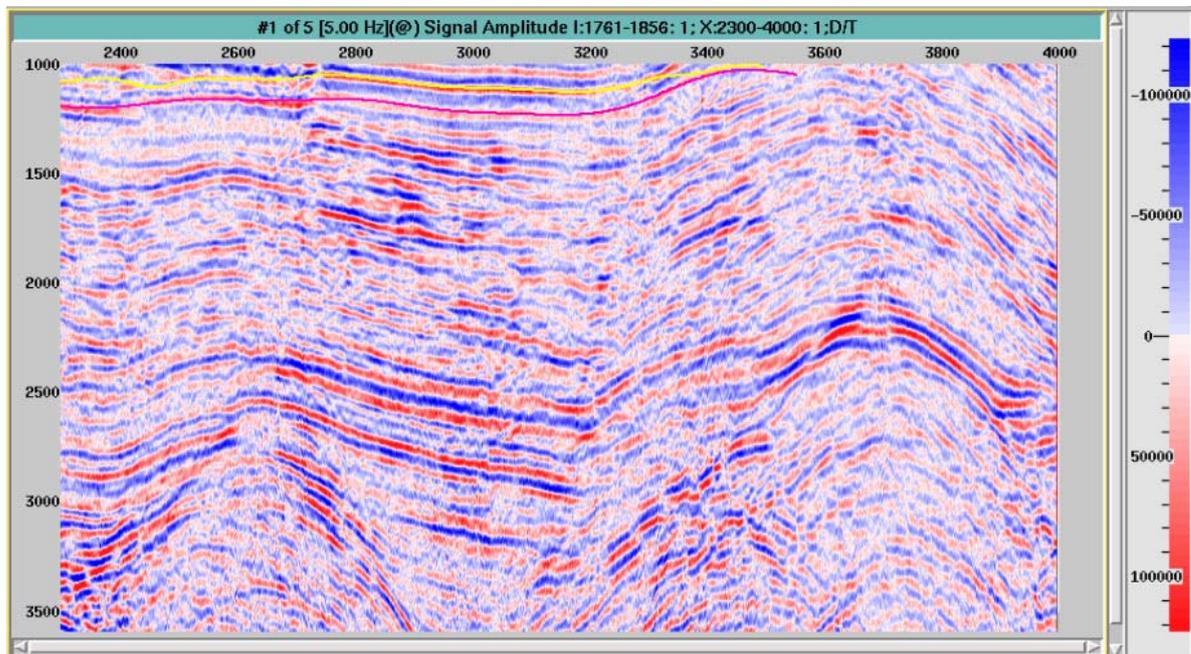


Figura IV.18 Sección inline 1790 correspondiente al primer cubo de descomposición espectral, la cual muestra los horizontes definidos por su buena continuidad; el color amarillo representa al horizonte f, mientras que el color morado representa al horizonte s.

Tabla 5 Rangos de ubicación de los horizontes f y s en la inline 1790 del cubo-1 de descomposición espectral.

HORIZONTE	TIEMPO	XLINES
f	1 a 1.17 s	2300-3380
s	1.04 a 1.2 s	2300-3550

b) PARAMETROS DE EXTRACCIÓN

Los parámetros de extracción que se usaron en la determinación de los mapas de amplitud para detectar las huellas de adquisición, se muestran en la figura IV.19. Esta ventana del modulo del software perteneciente a la compañía Paradigm®, muestra 6 pequeñas ventanas con las opciones de introducir los horizontes (limite superior e inferior), intervalos de tiempo de cima y base, y los parámetros propiamente de extracción como el tipo de atributo y el método de extracción.

Para este trabajo, se usaron los horizontes (f y s) por separado, es decir el mismo horizonte trabaja como límite superior e inferior, con 4 ms en cima y base, y el tipo de atributo fue el de amplitud, mientras que para la ventana del método de extracción se usó la energía, que es un método característicamente usado en la descomposición espectral (ver apéndice A).

Así mismo, tomando en cuenta que las huellas de adquisición que se encontraron en el análisis IV.B.3d, estaban entre los xlines 2800 a 3500, en este sentido, el análisis de mapas de amplitud se realizó en este rango.

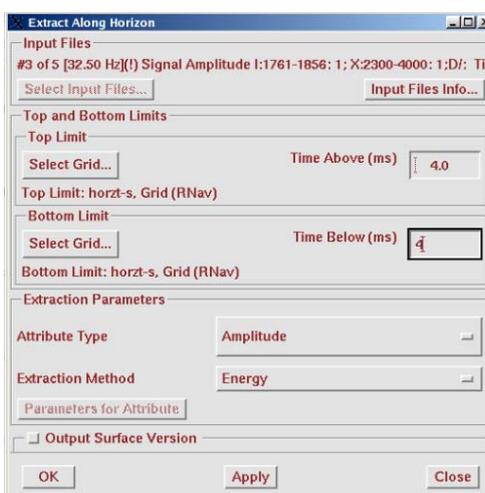


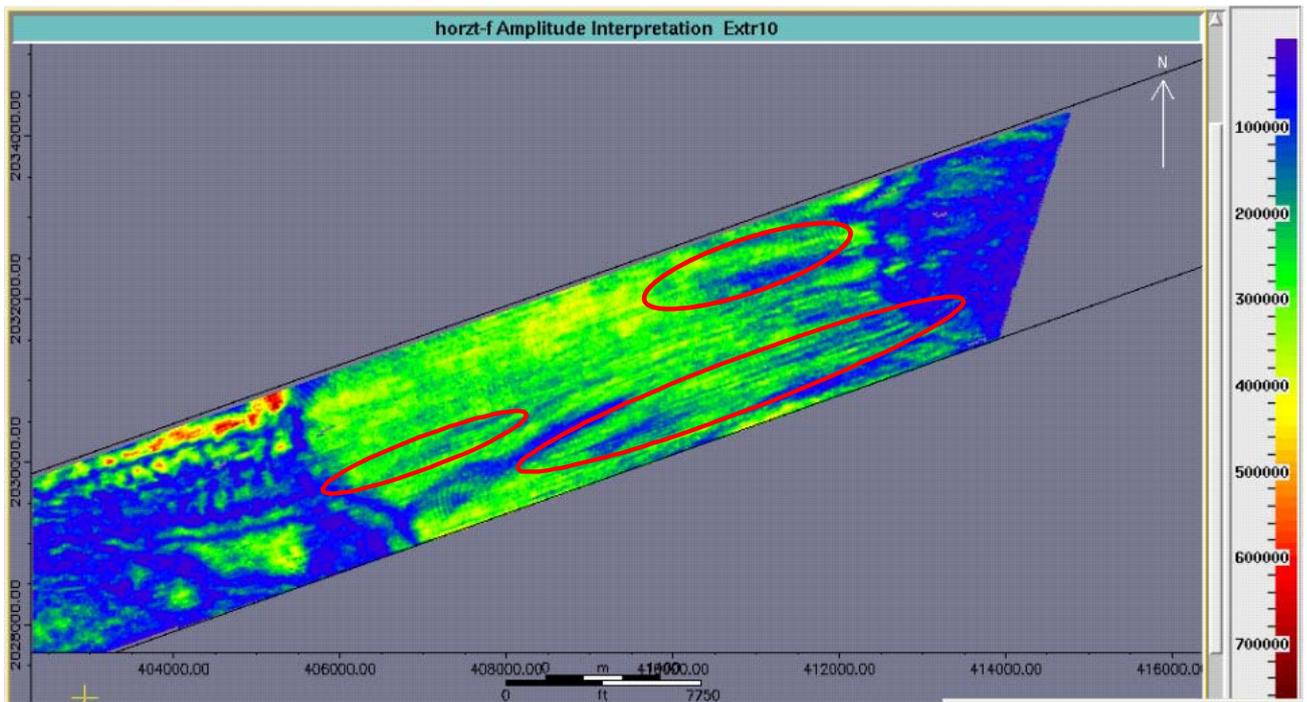
Figura IV.19 Parámetros de extracción determinados por la ventana del modulo del software Paradigm®, que muestra los parámetros usados en la extracción de los mapas de amplitud de la inline 1790 del primer cubo de descomposición espectral del levantamiento Almeja-Cisne 3D.

Estos parámetros de extracción fueron aplicados a cada uno de los 5 cubos de descomposición espectral, no solo de la inline 1790, sino que además a los inlines 1765 y 1820, considerando ambos horizontes, con la finalidad de corroborar los rasgos característicos de la huellas de adquisición como en el análisis IV.B.3.

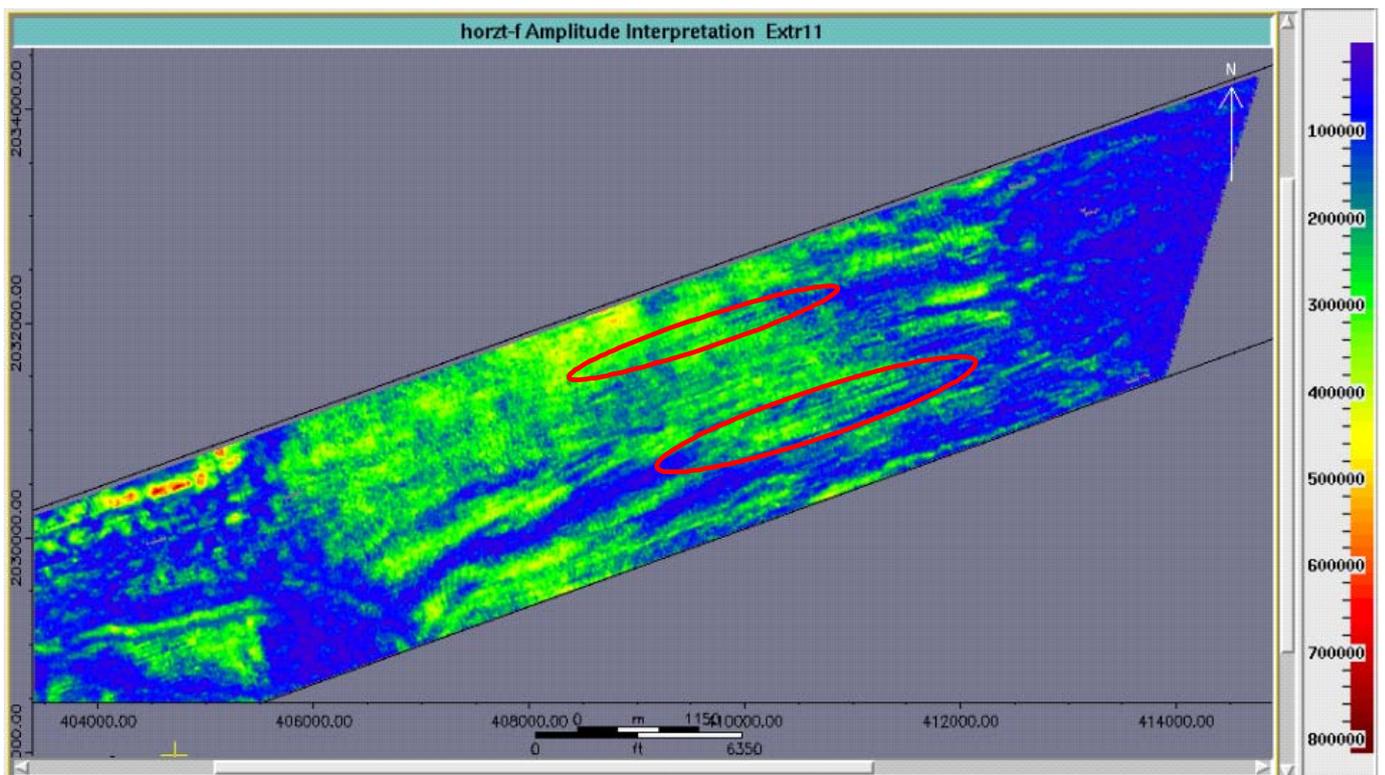
c) ANÁLISIS DE MAPAS DE AMPLITUD

Se extrajeron 5 mapas de amplitud correspondientes a cada uno de los cubos de descomposición espectral, en cada uno de ellos se examinaron los rasgos existentes en los mapas, encontrándose un patrón lineal en dirección de las líneas de navegación, que son las mismas estrías encontradas en IV.B.3d; que se pueden apreciar encerradas en óvalos de color rojo tanto en el primero como en el segundo cubo de descomposición espectral (bajas frecuencias) mostradas en la figura IV.20a y IV.20b , mientras que en el caso de las altas frecuencias que corresponde al tercero, cuarto y quinto cubo de la descomposición, no existe tal patrón, tal como se puede verificar en la figura IV.20. Tales mapas fueron extraídos del horizonte a.

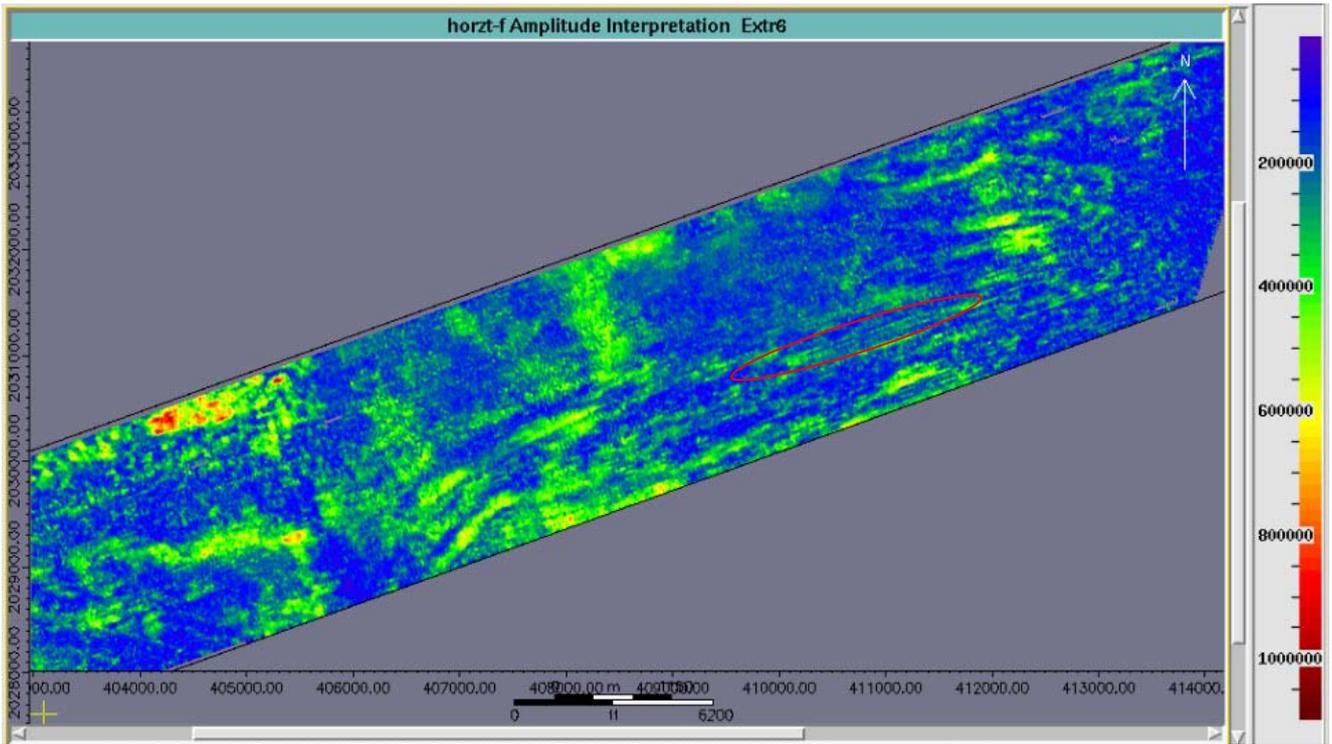
En el apéndice D, se muestra una descripción de la ubicación de las huellas de adquisición encontradas en ambos horizontes y en algunos de los inlines más representativos.



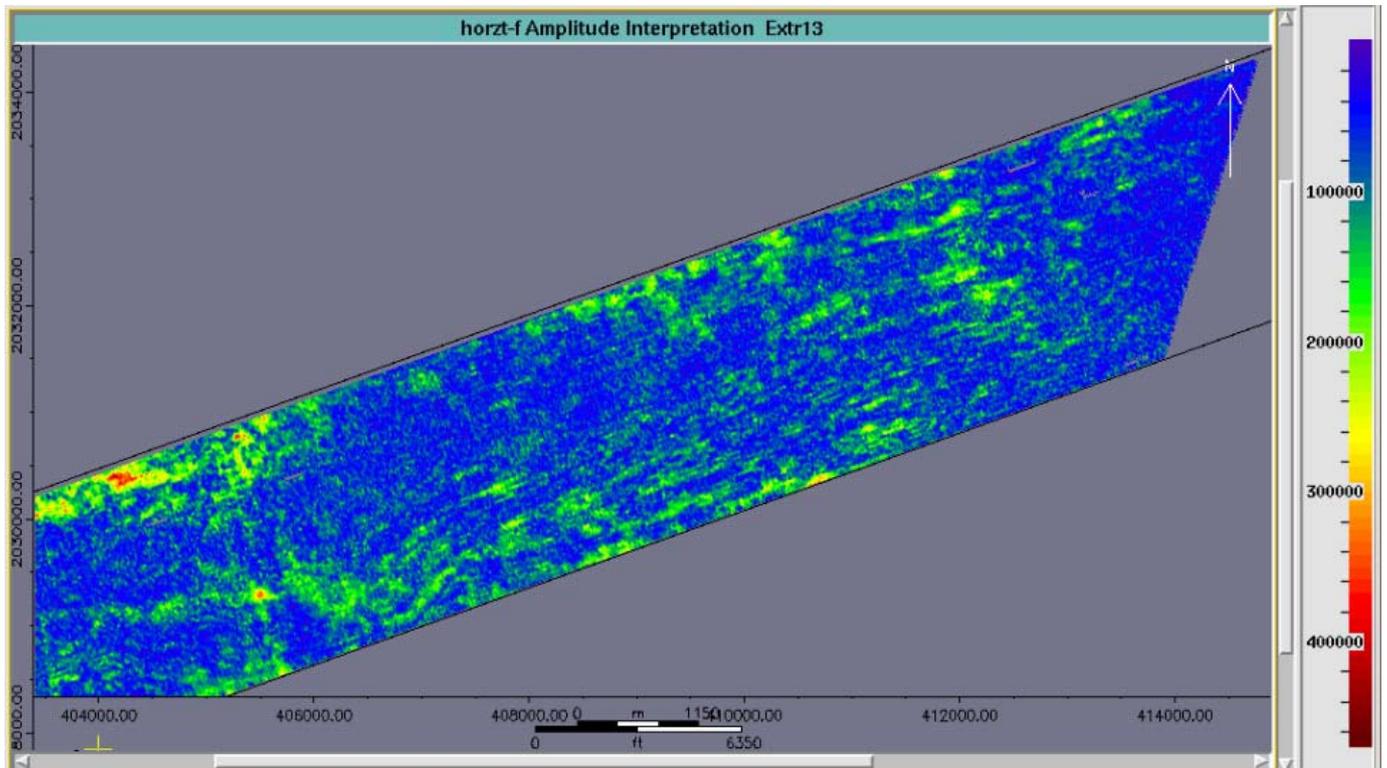
(a) Mapa de amplitud del cubo-1 de descomposición espectral.



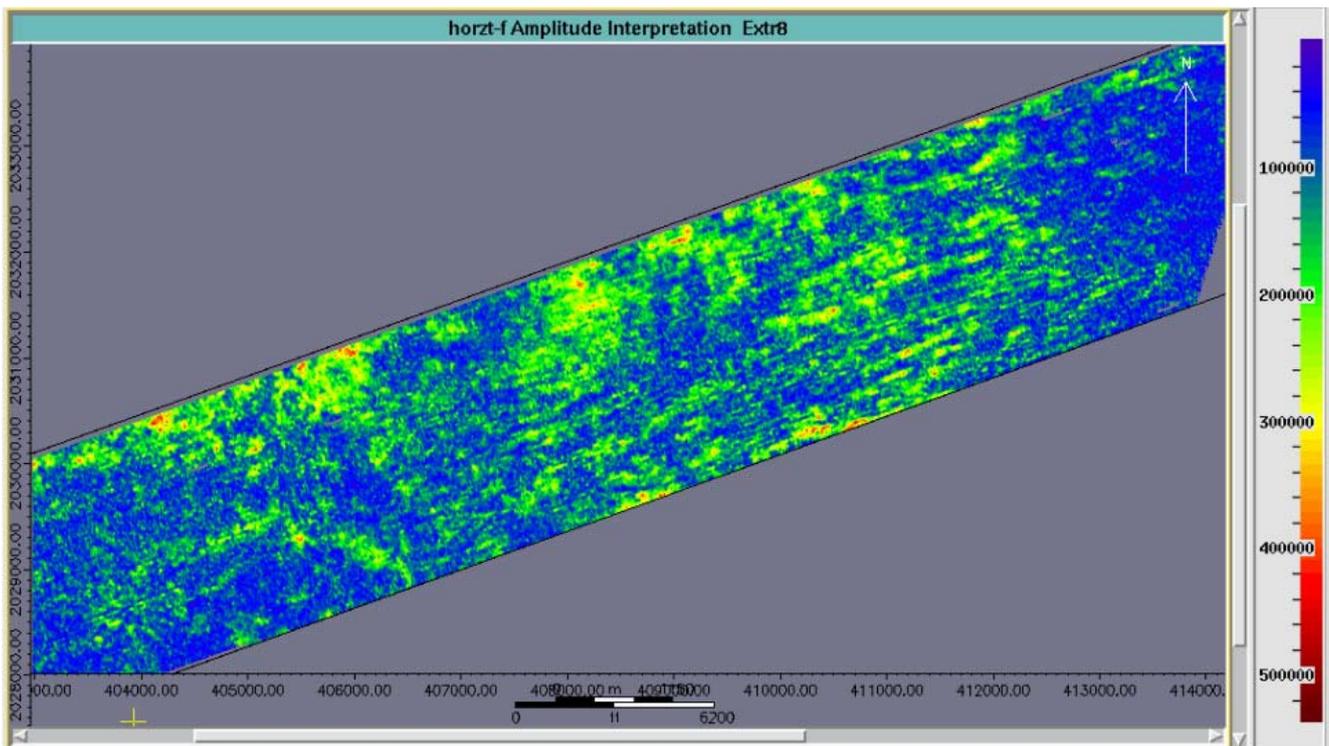
(b) Mapa de amplitud del cubo-2 de descomposición espectral.



(c) Mapa de amplitud del cubo-3 de descomposición espectral.



(c) Mapa de amplitud del cubo-4 de descomposición espectral.



(d) Mapa de amplitud del cubo-5 de descomposición espectral.

Figura IV.20 Mapas de amplitud extraídos de cada uno de los cubos de descomposición espectral, que en este caso se extrajeron de la in-line 1790. a) y b) Primeros dos mapas de amplitud extraídos del cubo-1 y 2 de descomposición espectral, en donde se detectaron estrías encerradas en óvalos, que muestran su alineación a las líneas de navegación del levantamiento Almeja-Cisne 3D; c,d y e) sin evidencia del patrón lineal característico de una huella de adquisición.

Los rangos de ubicación de la huella de adquisición para la in-line 1790, se presentan en la tabla 6.

Tabla 6. Rangos de ubicación de las huellas de adquisición de la in-line 1790 de cada uno de los cubos de descomposición espectral, en términos de in-line y x-lines, determinados a partir de extracción de mapas de amplitud del horizonte f.

CUBO	INLINE	XLINES
1	1832	3086-3319
1	1839	2956-3103
1	1835	3250-3323
1	1817	2863-2947
1	1784	3016-3147
2	1832	3086-3176
2	1824	3124-3219
2	1783	3016-3147
3	1825	3117-3199
4	-----	-----
5	-----	-----

Este análisis de mapas de amplitud ha permitido demostrar su congruencia contra los resultados obtenidos en IV.B.3d, ya que se repite la detección de las huellas de adquisición principalmente en los rangos de baja frecuencia de 5 a 32.5 Hz, así mismo la alineación existente en cuatro inlines (1832,1839,1835 y 1783), que prácticamente concuerda tanto en el análisis de slice como en el de mapas de amplitud, cuyos datos se pueden verificar en las figuras IV.17 y IV.20, y en los apéndices B y D respectivamente, de tal forma que podemos decir que existe una relación directa entre las bajas frecuencias y las huellas de adquisición.

IV.C Análisis del ruido sísmico

IV.C.1 Ruido Coherente e incoherente

Sheriff (2002) define a la teoría de la señal como una señal pura que es transmitida de la fuente a través de un medio, y que es registrada por estaciones receptoras, y en su trayecto se contamina de información superflua denominada ruido sísmico. Así el problema se traduce en la separación del ruido, con la finalidad de obtener una aproximación tanto como sea posible, de la señal original.

La energía sísmica no asociada a reflexiones sísmicas es aquella que ya han definido Dobrin (1988) y Sheriff (2002) como ruido, y que de igual manera se divide comúnmente en: ruido coherente e incoherente.

El ruido incoherente frecuentemente es referido como ruido aleatorio, que usualmente es asociado con la dispersión de irregularidades en superficies someras.

El arrastre de los cables marinos (streamers) genera ruido coherente, el cual se propaga a lo largo de los cables, desde el frente hasta la boya de cola del streamer, además las secciones de aislamiento entre cables son de mala calidad a bajas frecuencias, con lo que este tipo de ruido mantendrá componentes de baja frecuencia. Estas condiciones ambientales marginales presentaran tanto ruido coherente y aleatorio en la distribución de la variación de amplitudes a lo largo del streamer (Brink, 1990).

Normalmente la diferencia entre ruido coherente y aleatorio es solo cuestión de escala, Brink(1990) indica que existen niveles de ruido de ambos tipos que están presentes en los cables de adquisición sísmica marina. En este sentido, es importante recordar que la naturaleza de la información geológica, está directamente relacionada a un comportamiento de distribución normal o gaussiana, esto se puede verificar con el histograma que representa la distribución de valores de amplitud del cubo preliminar Almeja-Cisne que se muestra en la figura IV.21, este histograma se obtuvo directamente del software de Paradigm®.

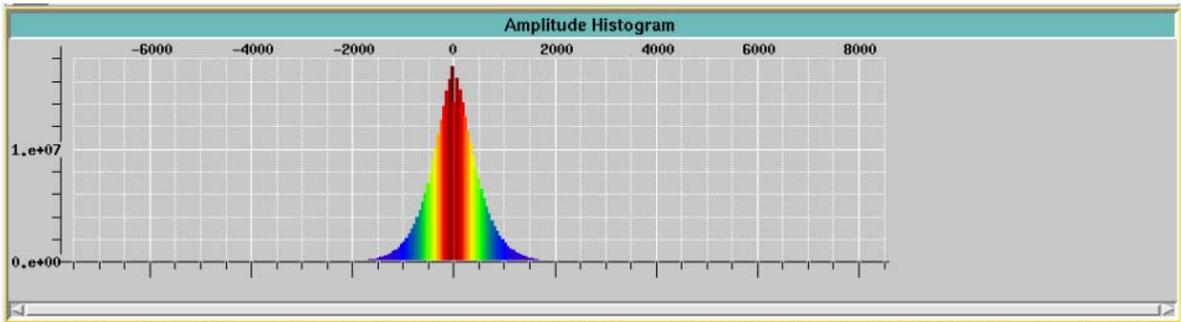


Figura IV.21 Distribución normal (gaussiana) del cubo preliminar Almeja-Cisne 3D.

En la actualidad, en la industria sísmica, se utilizan tanto las técnicas convencionales de filtraje como las de apilamiento, así como los modelos estadísticos, para lograr eliminar el ruido y por ende mejorar la relación señal a ruido.

En esta sección, nos enfocamos a evaluar cualitativa y cuantitativamente la relación señal a ruido de los horizontes de interés, para ello es necesario visualizar e identificar los tipos de ruido presentes en el cubo preliminar Almeja-Cisne 3D.

IV.C.2 Tipos de ruido y la envolvente gaussiana

Para lograr visualizar e identificar tanto señal como ruido en un cubo sísmico, es necesario primeramente conocer los tipos de ruido que con mayor frecuencia se presentan en sísmica marina; así como algunas características de los mismos.

En sismología de reflexión, la pobre calidad de la información es frecuentemente causada por altos niveles de ruido coherente. Este ruido puede ser dividido convenientemente en tres clases: arribo-directo, movimiento mecánico del cable (ambiente) y disperso (Regone, 1998).

El ruido de arribo directo viaja directamente de la fuente al receptor y debido a que su tiempo de arribo es solamente dependiente del offset y de la velocidad de propagación, puede ser atenuado efectivamente tanto en sismología 2D y 3D a través de las técnicas de arreglos de apilamiento, migración y algunos otros métodos de filtros de coherencia.

El movimiento mecánico del cable es causado por el arrastre tanto de la embarcación geofísica como por la boyas de las colas, es decir, el registro de este ruido representa la influencia del ambiente como puede ser la acción del oleaje, el ruido del barco o todas la fluctuaciones de presión en los grupos de hidrófonos a lo largo del cable cuando no hay fuentes disparando.

El ruido de ambiente es particularmente problemático en información sísmica marina, debido a que sus amplitudes se superponen al espectro de la señal, con lo que contamina a la señal sísmica, que aparece tanto como ruido coherente y aleatorio en ciertos intervalos de muestreo espacial (Smith, 1999).

El ruido de dispersión es una onda compleja causada por energía que viaja horizontalmente lejos de la fuente de energía y se refleja en las heterogeneidades existentes en el fondo marino.

La presencia de plataformas marinas o tráfico de barcos en el área de adquisición de información sísmica, puede dar lugar a un ruido denominado de interferencia sísmica, cuya severidad y apariencia depende de su origen (Farmer *et al*, 1989).

Típicamente hay dos tipos comunes de interferencia sísmica: 1) Ruido de secuencia aleatoria (e.g. plataforma); 2) ruido de embarcación, que se presenta como un tren continuo de ruido (Fookes *et al*, 1994).

Por otro lado, en el dominio del tiempo o frecuencia, se puede escoger usar la envolvente rectangular como atributo, sin embargo, en el dominio de la traza compleja, su transformada es una función seno, la cual involucra el efecto de discontinuidad ocasionado por el fenómeno de Gibbs al aplicarse como atributo sobre la información sísmica, además de no ser una señal física real; mientras que la envolvente Gaussiana usada como atributo, su transformada en el dominio de la traza compleja es el mismo tipo de función, es decir, no introduce efectos indeseables en la información sísmica, sino que por el contrario, puede proporcionar características interesantes en el dominio tiempo-frecuencia, ya que esta envolvente si se aproxima a una señal física real.

IV.C.3 Metodología de visualización e identificación cualitativa de ruido sísmico en los cubos de la envolvente de la señal.

a) Parámetros

La metodología para llevar a cabo, el análisis de señal a ruido de la información sísmica del cubo preliminar Almeja-Cisne, aplica los mismos parámetros que se llevaron a cabo en el punto IV.A.3, con la excepción del inciso (e), en donde en este caso de estudio de la relación señal a ruido, guarda particular importancia el uso del atributo envolvente de la señal (gaussiana) en lugar de amplitud de la señal, ya que este tipo de envolvente en el dominio tiempo-frecuencia y combinado con su uso como atributo (IV.C.2), permitió obtener cubos de descomposición espectral, en donde se logró visualizar la variabilidad de la energía de los eventos reflejados (Taner,2001) como lo son la señal y el ruido sísmico.

En otras palabras, la combinación de la transformada de ondícula y el filtro Gabor-Morlet (1982), aunada a las características del atributo señal envolvente de discriminar la energía reflejada en el subsuelo (Taner, 2001), todo esto aplicado al cubo preliminar Almeja-Cisne, dio lugar a 5 cubos de la envolvente de la señal con características de señal y ruido, los cuales se analizan en el punto de determinación cualitativa y coherente entre señal y ruido.

b) Ruido sísmico vs Crossplots.

Normalmente, la identificación de ruido sísmico se lleva a cabo cualitativamente, es decir, tomando en consideración las características y la fuente de generación de los diferentes tipos de ruido sísmico marino. Sin embargo, muchas veces se carece de una identificación coherente entre eventos sísmicos marinos, por tal razón, una herramienta que destaca la correlación efectiva entre variables sísmicas son las gráficas cruzadas (crossplots).

Los crossplots correlacionan valores de amplitud entre eventos sísmicos similares; lo que en esta sección, apoyó a la identificación cualitativa de los diferentes tipos de ruido.

1) NORMALIZACIÓN

Considerando el efecto de escalamiento que produce el AGC (método descrito en el punto IV.B.3c) en la información sísmica, fue necesario normalizar el cubo preliminar Almeja-Cisne, para lograr una congruencia de eventos sísmicos entre los cubos de la envolvente de la señal y la información sísmica real, tal normalización se efectuó a través del concepto estadístico de la media gaussiana, el cual consiste en promediar los valores de amplitud de todo el cubo preliminar que se encuentran representados en el histograma de la distribución normal de la figura IV.21.

La figura IV.22, representa el histograma normalizado del cubo preliminar Almeja-Cisne 3D, en donde se puede ver una media de valores de amplitud de aproximadamente 2000 rms. Este histograma fue obtenido de aplicar el concepto de la media gaussiana a través del método de normalización por histograma directamente de la aplicación del software de Paradigm®.

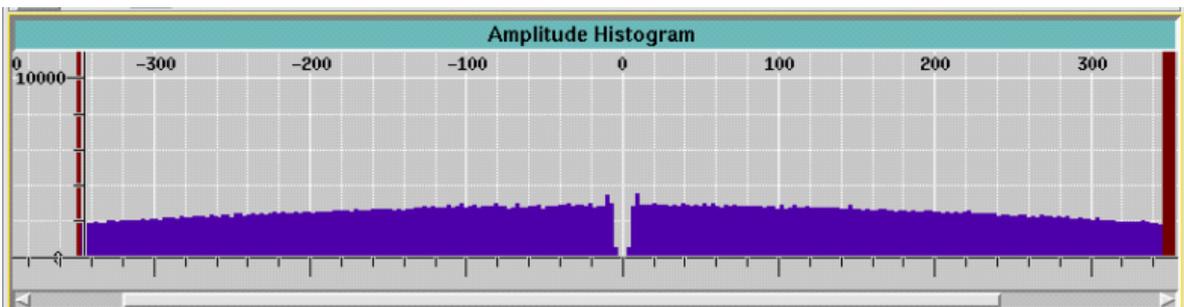


Figura IV.22 Histograma normalizado del cubo preliminar Almeja Cisne 3D, esta normalización se logro directamente del software de Paradigm®.

La figura IV.23, muestra la sección de la inline 1790 normalizada del cubo preliminar Almeja-Cisne, esta sección se usa en el análisis del siguiente punto, la cual se correlaciona con cada uno de los 5 cubos de la envolvente de la señal, en la discriminación entre señal y ruido sísmico.

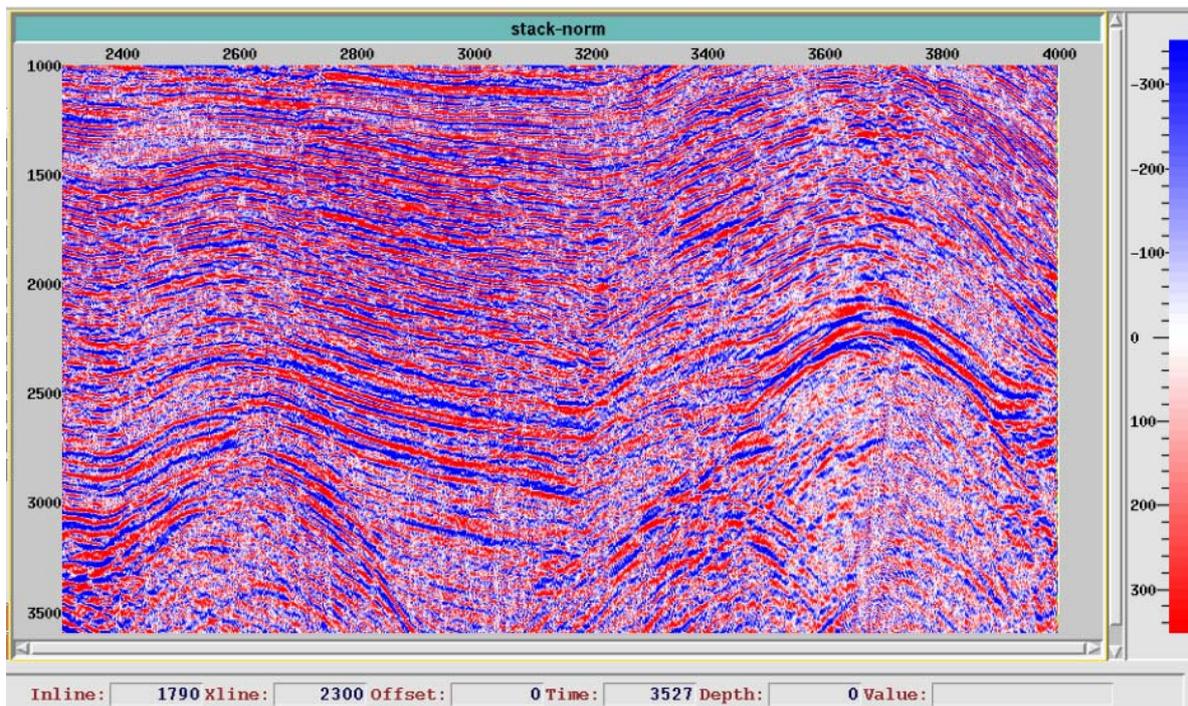


Figura IV.23 Sección inline 1790 normalizada del cubo preliminar Almeja Cisne 3D.

2) DETERMINACIÓN CUALITATIVA Y COHERENTE ENTRE SEÑAL Y RUIDO

Esta sección, consistió en conjuntar y analizar los pasos anteriores aplicados a la inline 1790, la cual se tomó como muestra para efectuar el análisis cualitativo del ruido sísmico del cubo preliminar.

En la figura IV.24, se muestra la envolvente de la señal de la sección inline 1790 del cubo-1 de descomposición espectral, con rango de frecuencia de 5 a 18.75Hz. En esta figura se observa que la señal sísmica se visualiza en eventos continuos de color gris con negro principalmente entre los xlines 2700 a 3400 y en un rango de 1.0 s a 3.0 s; mientras que el ruido se puede distinguir en color rojo. Así mismo, se puede ver un ruido tipo lineal que muestra un patrón lineal cruzado característico de ondas directas (Larner *et al.*, 1981) en la parte profunda de 2.7 s a 3.6 s y entre xlines 2500 a 3600 marcado con un óvalo de color amarillo, mientras que entre 1.3 y 1.4 s, y los xlines 2337 a 2645, hay presencia de ruido tipo dispersivo caracterizado por hipérbolas que se pueden apreciar en el apéndice C, que en el caso de esta figura solo se observa un patrón de color gris claro muy delimitado por un óvalo de color verde (ver tabla 8); en la figura IV.25 muestra la gráfica de crossplot del inline 1790 resultado de correlacionar el cubo de la envolvente contra la inline 1790

del cubo preliminar normalizado, aquí se puede verificar que en este primer rango de frecuencia no discrimina con claridad a el ruido lineal, ya que al correlacionarlo directamente con el cubo preliminar se puede observar que entre 2.5 y 3.6 s no hay una coherencia entre los eventos correlacionados, solo se alcanza a distinguir una tendencia del ruido.

Tabla 7 Resumen de los intervalos de tiempo y espacio donde se encontraron los ruidos de tipo lineal y dispersivo presentes en la banda1 del cubo señal a ruido de la inline 1790.

SEÑAL		RUIDO	TIEMPO	XLINE
TIEMPO	XLINE	Dispersivo	1.3 a 1.4	2337-2645
1 a 1.1	2600-3200	Lineal	2.7 a 3.6	2500-3600
1.3 a 1.8	2750-3100			
2.1 a 2.65	2700-4000			
2.6 a 3.0	2700-3200			
2.7 a 3.5	2300-2600			
2.7 a 3.6	2700-2950			

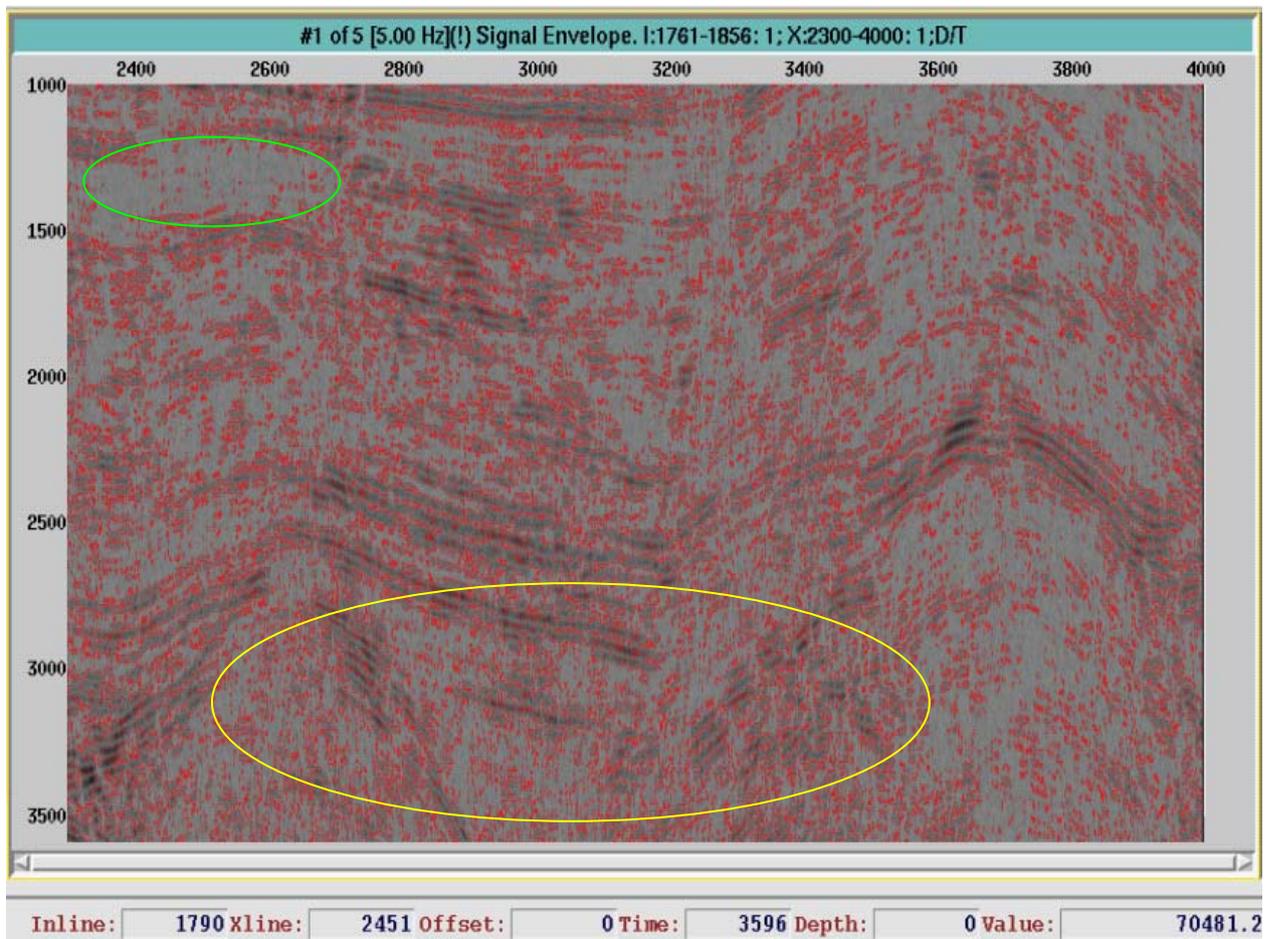


Figura IV.24 Sección envolvente de la señal de la inline 1790 del primer cubo de descomposición espectral del cubo Almeja-Cisne. La señal está presente en eventos continuos desde 1.0 s a 3.6 s en color gris y negro, mientras que el ruido de dispersión (óvalo verde) y el lineal (óvalo amarillo), se observan entre 1.3 a 1.4 y entre 2.7 a 3.6 respectivamente.

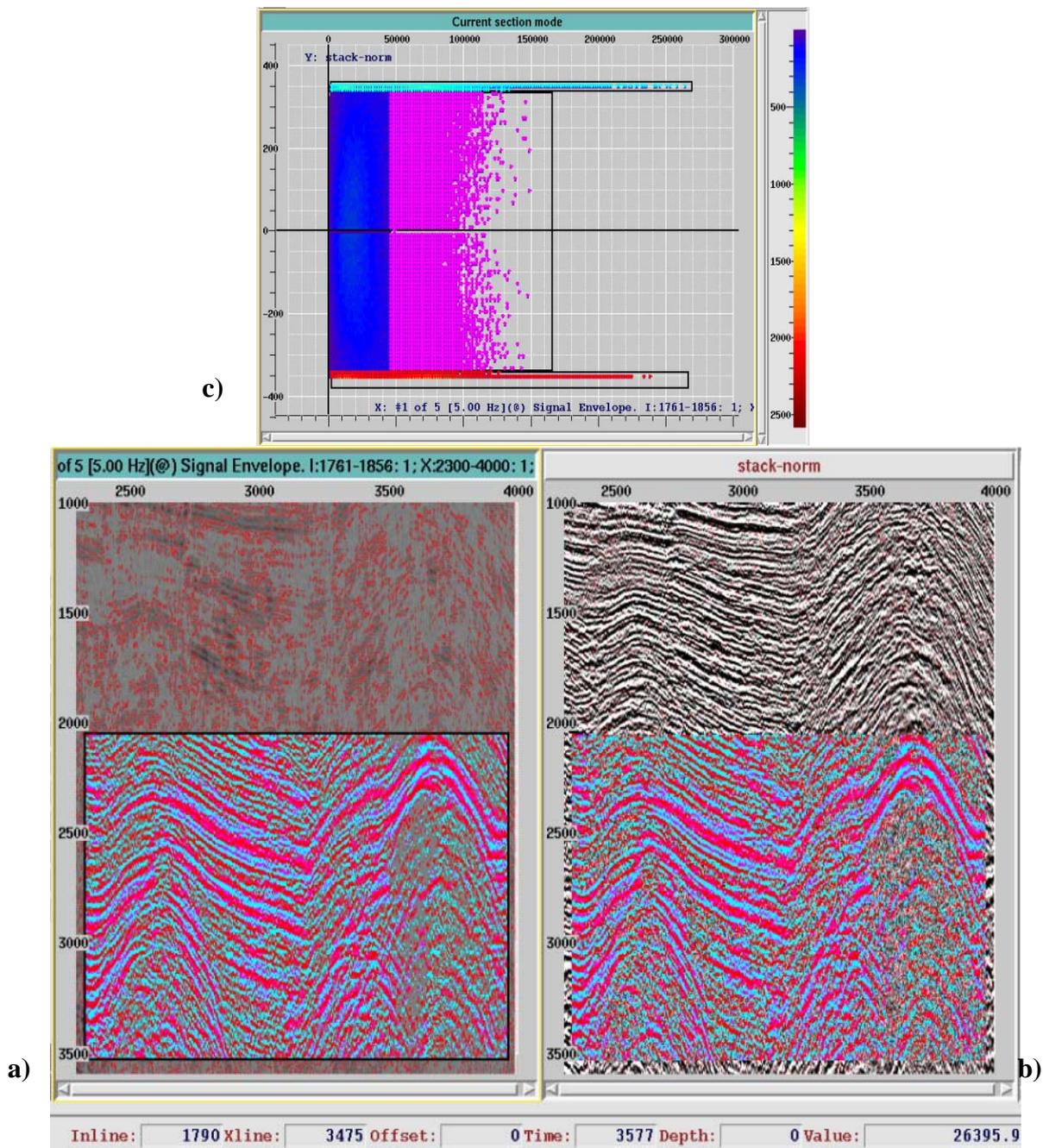


Figura IV.25 Crossplot entre sección envolvente del primer cubo y sección del cubo preliminar normalizada; a) sección 1790 del cubo envolvente: b) sección de la inline 1790 del cubo-1 preliminar normalizado; c) el crossplot ubicado en la parte superior de las secciones sísmicas, muestra la correlación entre valores de amplitud entre ambas secciones sísmicas, en donde se puede distinguir con claridad que los colores azul y rojo representan la señal sísmica, particularmente el horizonte reflector a 2.5s, que comparando con la figura IV.24 se puede ver la coherencia con el color gris y negro que ya se había mencionado representa la señal en el cubo-1 de la envolvente, mientras que en color morado del crossplot se observa la dispersión de los valores de amplitud que en la sección de de la sección envolvente no se distingue con claridad los ruidos, se solo alcanza a mostrar la tendencia del ruido de interferencia sísmica y lineal.

Cabe recordar que la adquisición de este levantamiento sísmico se llevó a cabo en las condiciones descritas por Farmer y Fookes (IV.C.2), de tal forma que se pudo observar con claridad este tipo de ruido en la sección del inline 1790 del cubo-2 de la envolvente, en donde nuevamente siguen resaltando la tendencia característica de los ruidos descritos en el sección del cubo-1 (figura IV.26). En esta figura, se muestra la sección sísmica del cubo-2, en la que efectivamente se puede ver un tren continuo de ruido aleatorio de 2.5 a 3.6 s y entre los xlines 3495 a 3878 en color rojo encerrado por un óvalo azul, esto se puede verificar con el crossplot de la figura IV.27, en donde se muestra una correlación coherente y muy aproximada entre el cubo-2 de la envolvente y el cubo preliminar normalizado; mientras que la señal sísmica se aprecia en la parte central del inline 1790 entre 1 a 2.8 s que se aprecia como eventos continuos de color gris con negro en la figura IV.26; un resumen de los intervalo de tiempo y espacio en que se encontraron la señal y ruido presentes en el cubo-2, se puede observar en la tabla 8.

Tabla 8 Resumen de los intervalos de tiempo y espacio en que se encontraron la señal y ruido en el cubo-2.

SEÑAL		RUIDO	TIEMPO	XLINE
TIEMPO	XLINE	Dispersión	1.1 a 1.5	2328-2668
1 a 2.8	2600-3200	Lineal	2.0 a 3.6	2500-3600
2.2 a 2.5	3500-3900	Interferencia sísmica	2.5 a 3.6	3495-3878
		Lineal	1.8 a 2.4	3705-3942
		Lineal	2.7 a 3.6	3880-4000

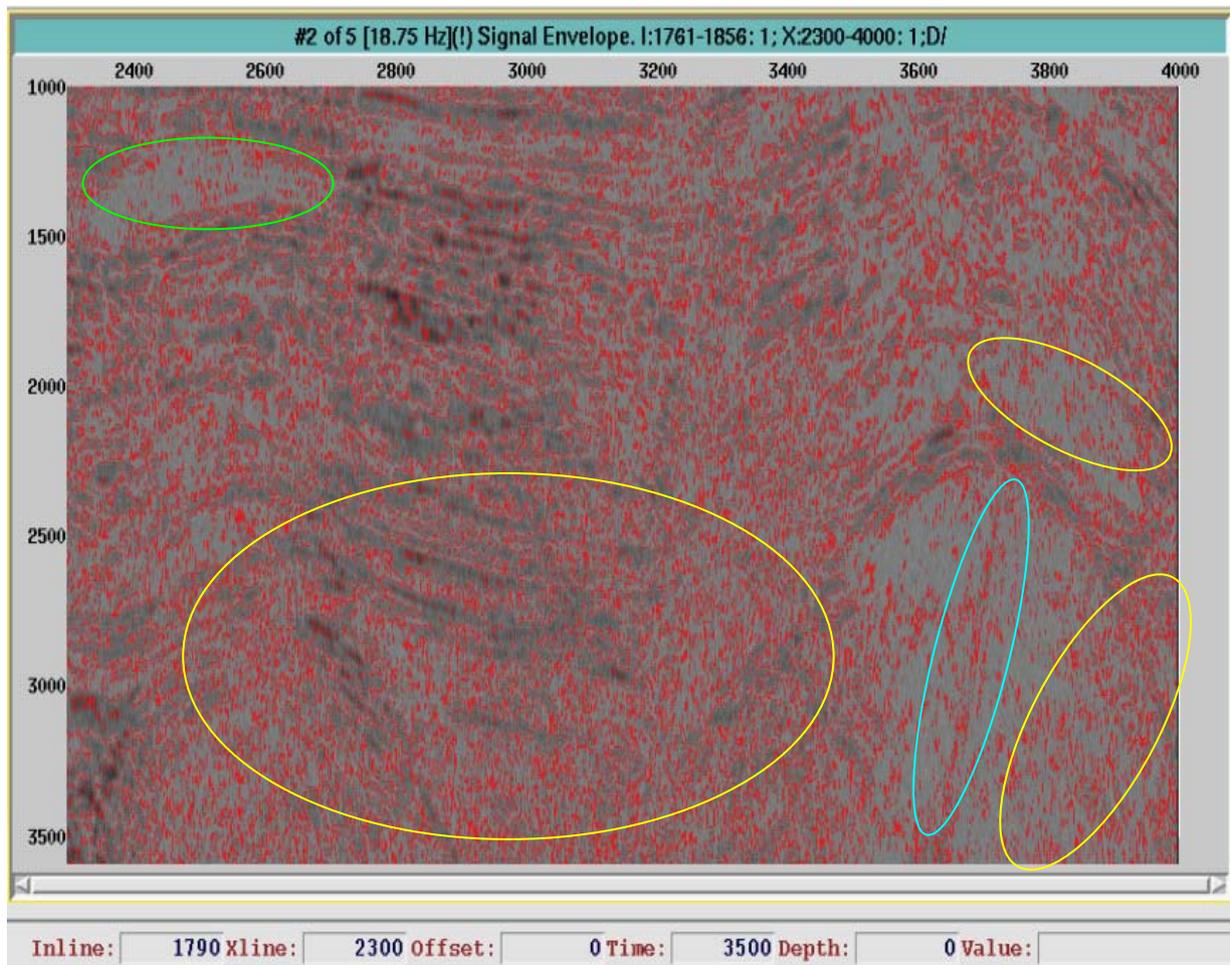


Figura IV.26 Sección envolvente de la inline 1790 del segundo cubo. La señal está presente en la parte central de la sección desde 1.0 s a 2.8 s en colores gris con negro, mientras que el ruido de dispersión y el lineal se observa en las elipses de color verde y amarillo respectivamente, mientras que el de interferencia sísmica muestra su rasgo lineal aleatorio con una elipse de color azul.

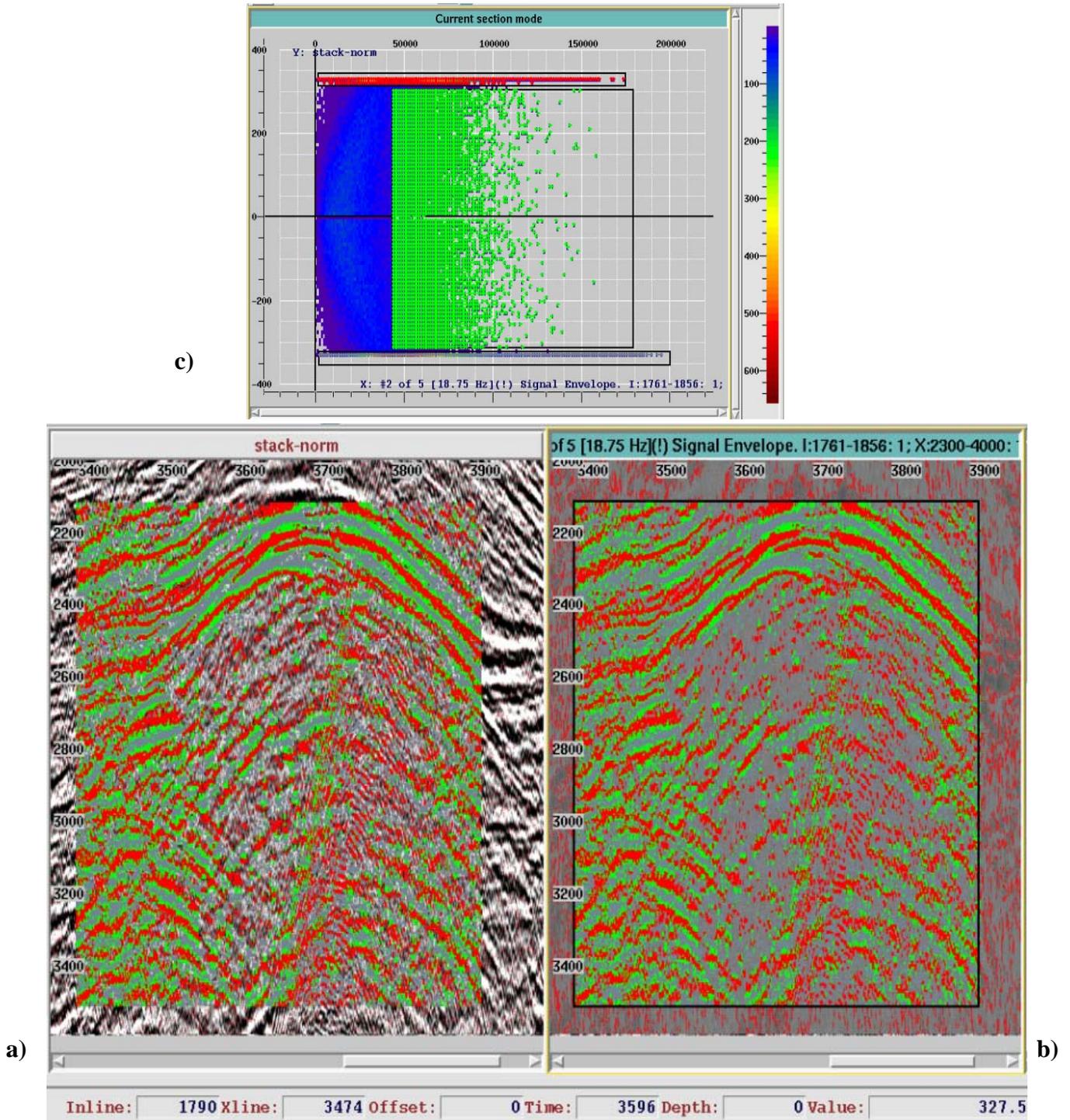


Figura IV.27 Crossplot entre sección envolvente del segundo cubo y sección del cubo preliminar normalizada. a) sección de envolvente de la inline 1790; b) sección inline 1790 del cubo preliminar normalizado; c) crossplot ubicado en la parte superior de las secciones sísmicas, muestra la correlación entre valores de amplitud entre ambas secciones, en donde se puede distinguir con claridad que los colores rojo y gris representan la señal sísmica, estando estas muy acorde coherentemente con los colores gris y negro de la figura IV.26 (parte central de la sección), mientras que en color verde del crossplot se observa la dispersión de los valores de amplitud que en las secciones sísmicas representa la tendencia del ruido de interferencia sísmica y lineal, que se pueden apreciar en ambas secciones.

Podemos apreciar que al pasar del análisis de la sección 1790 del cubo-1 a la del cubo-2 de la envolvente, el ruido sísmico se acentúa, mientras que la señal se atenúa, tal como podemos observarlo en la figura IV.28 de la sección de envolvente cubo-3 de la inline 1790.

En este cubo, la señal sísmica se ve disminuida en intensidad y en tiempo, ya que solo se puede observar entre 1 a 2.5 s (gris con negro), mientras que el ruido de dispersión (óvalo verde), lineal (óvalo amarillo) y de interferencia (óvalo azul) se acentúan fuertemente en la mayor parte de la sección sísmica (ver tabla 9).

La afirmación anterior, se comprueba en la gráfica crossplot de la figura IV.29, al correlacionar la sección envolvente del cubo-3 contra la sección del cubo preliminar; aquí se puede observar un acercamiento a ambas secciones sísmicas en el área del ruido dispersivo (1.1 a 1.5 s), y se muestra con mucha claridad en color gris y verde la presencia de este ruido, mientras que la señal sísmica se puede ver en amarillo y azul como eventos continuos.

Tabla 9 Resumen de los intervalos de tiempo y espacio donde se encontraron la señal y ruido sísmico del cubo-3 de la inline 1790.

SEÑAL		RUIDO	TIEMPO	XLINE
TIEMPO	XLINE	Dispersión	1.1 a 1.5	2364-2620
1 a 2.5	2600-3200	Lineal	1.4 a 3.6	3030-3475
		Lineal	1.7 a 3.6	2584-3533
		Interferencia sísmica	2.0 a 3.6	3500-3900
		Lineal	2.7 a 3.6	3880-4000

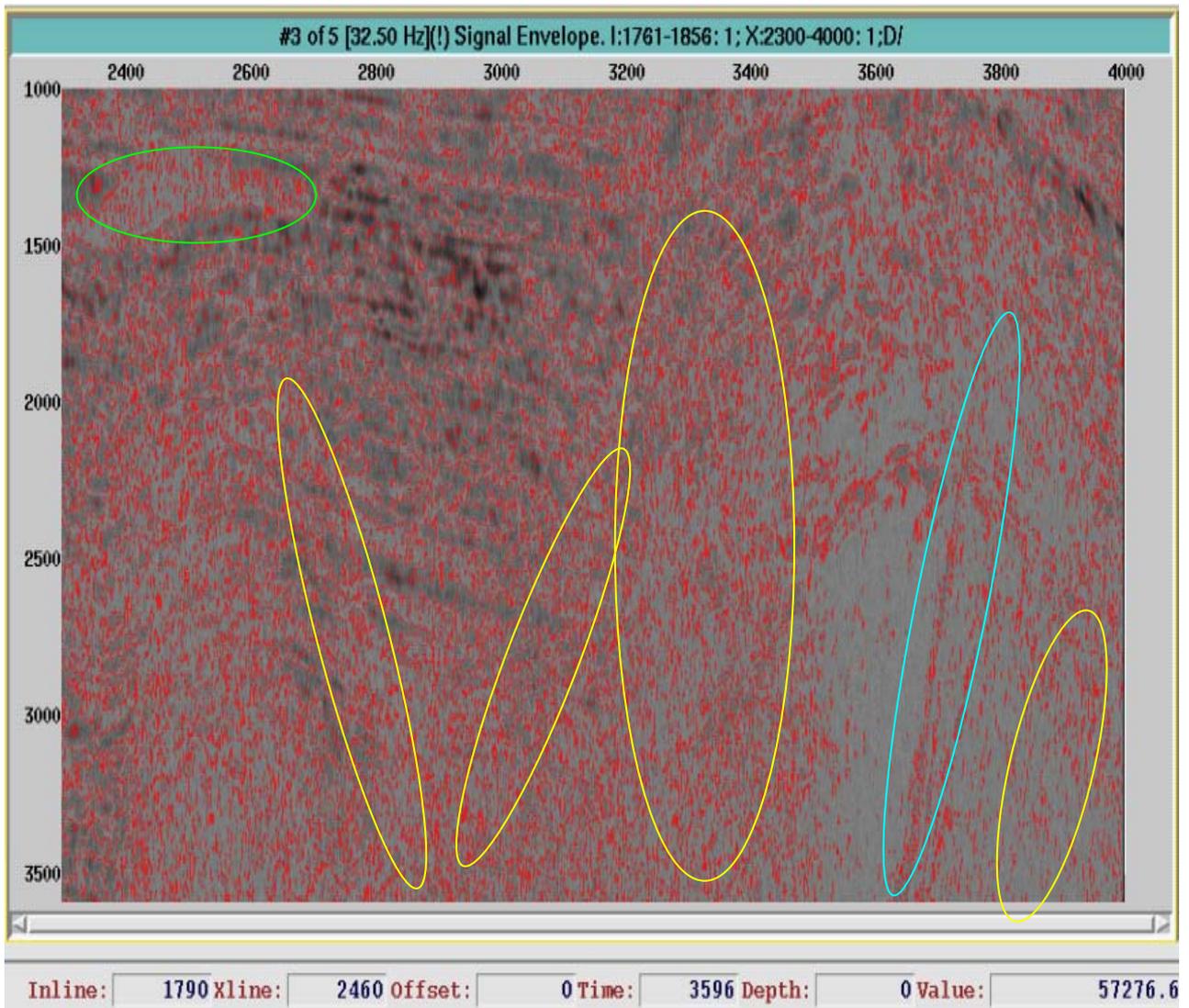


Figura IV.28 Sección envolvente de la inline 1790 del tercer cubo. La señal sigue presente en la parte central de la sección sísmica, pero a disminuido en intensidad y en tiempo de 3.6 s a 2.5 s en colores gris y negro, mientras que el ruido de dispersión y el lineal se observan en las elipses de color verde y amarillo respectivamente, mientras que la interferencia sísmica acentúa su rasgo lineal aleatorio, que se muestra con una elipse de color azul.

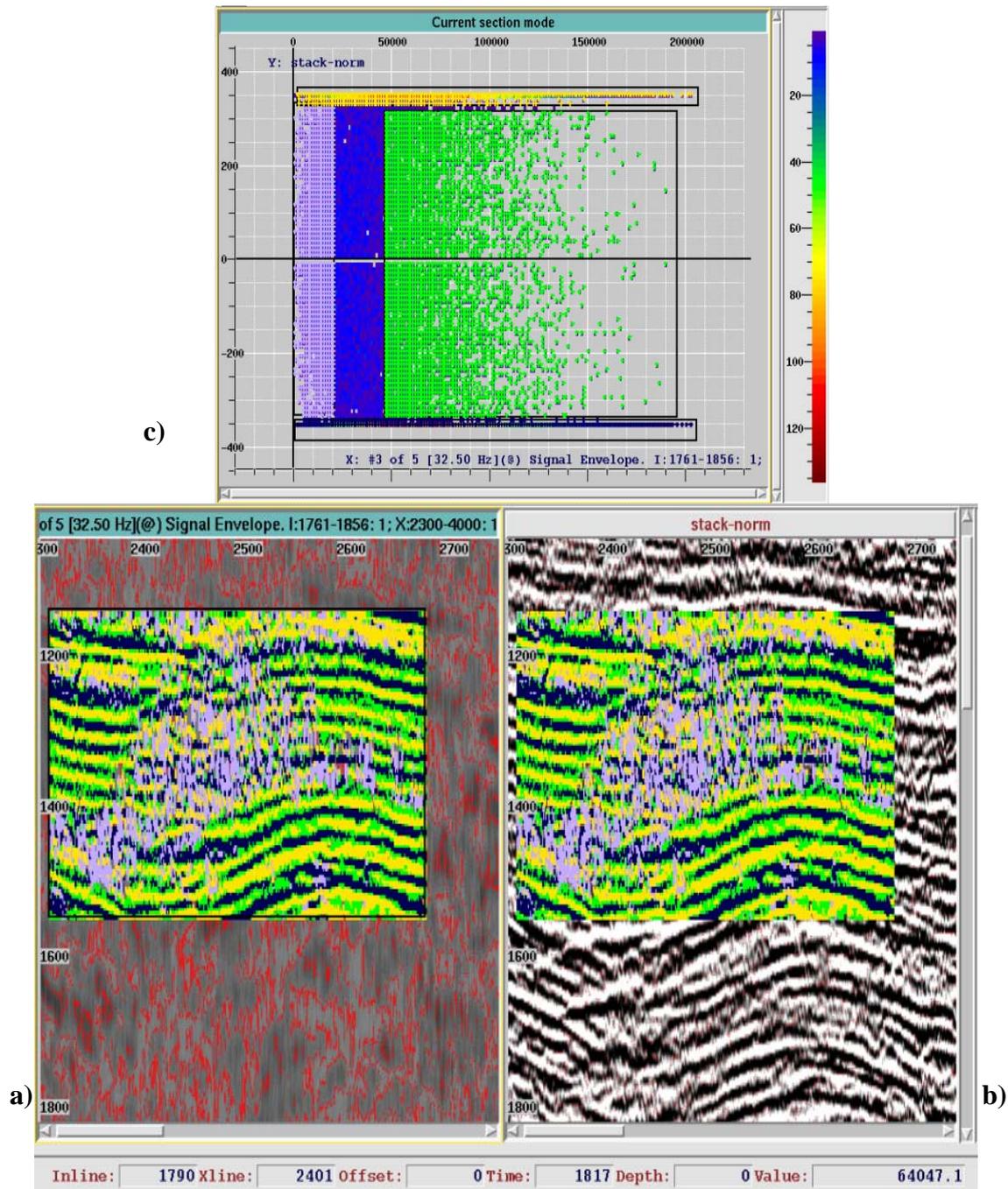


Figura IV.29 Crossplot entre sección envolvente del tercer cubo y sección del cubo preliminar normalizado en la area del ruido dispersivo (1.1 a 1.5 s) a) sección envolvente de la inline 1790; b) sección inline 1790 del cubo preliminar; c) crossplot ubicado en la parte superior de las secciones sísmicas, muestra la correlación entre valores de amplitud entre ambas secciones, en donde se puede distinguir que los colores amarillo y azul representan la señal sísmica, y en colores gris y verde permite distinguir entre ruido coherente y aleatorio respectivamente.

En la figura IV.30 se muestra la envolvente de la inline 1790 del cubo-4 de descomposición espectral, en donde se vuelve a confirmar que conforme se va aumentando el rango de frecuencias la señal sísmica disminuye en intensidad y tiempo y el ruido se va apreciando con mayor claridad.

Podemos observar la señal sísmica entre 1 a 2 s entre los xlines 2600 a 3200 (gris y negro), y por otro lado, el ruido lineal presenta su característica de linealidad y de cruce muy marcadas de 2 a 3.6 s y entre los xlines 2300 a 3500 (óvalos amarillos), así mismo, la interferencia sísmica se ve a 2.5 a 3.6 s y entre 3600 a 3800 encerrado en óvalo azul y el tipo dispersivo se sigue mostrando en el mismo intervalo (ver tabla 10).

Tabla 10 Resumen de los intervalos de tiempo y espacio en que se encontraron la señal y ruido de la inline 1790.

SEÑAL		RUIDO	TIEMPO	XLINE
TIEMPO	XLINE	Dispersión	1.3 a 1.5	2360-2610
1 a 2	2600-3200	Lineal	2.0 a 3.6	2500-2800
		Lineal	2.0 a 3.6	2900-3150
		Lineal	2.0 a 3.6	3400-3500
		Interferencia sísmica	2.5 a 3.6	3700-3800

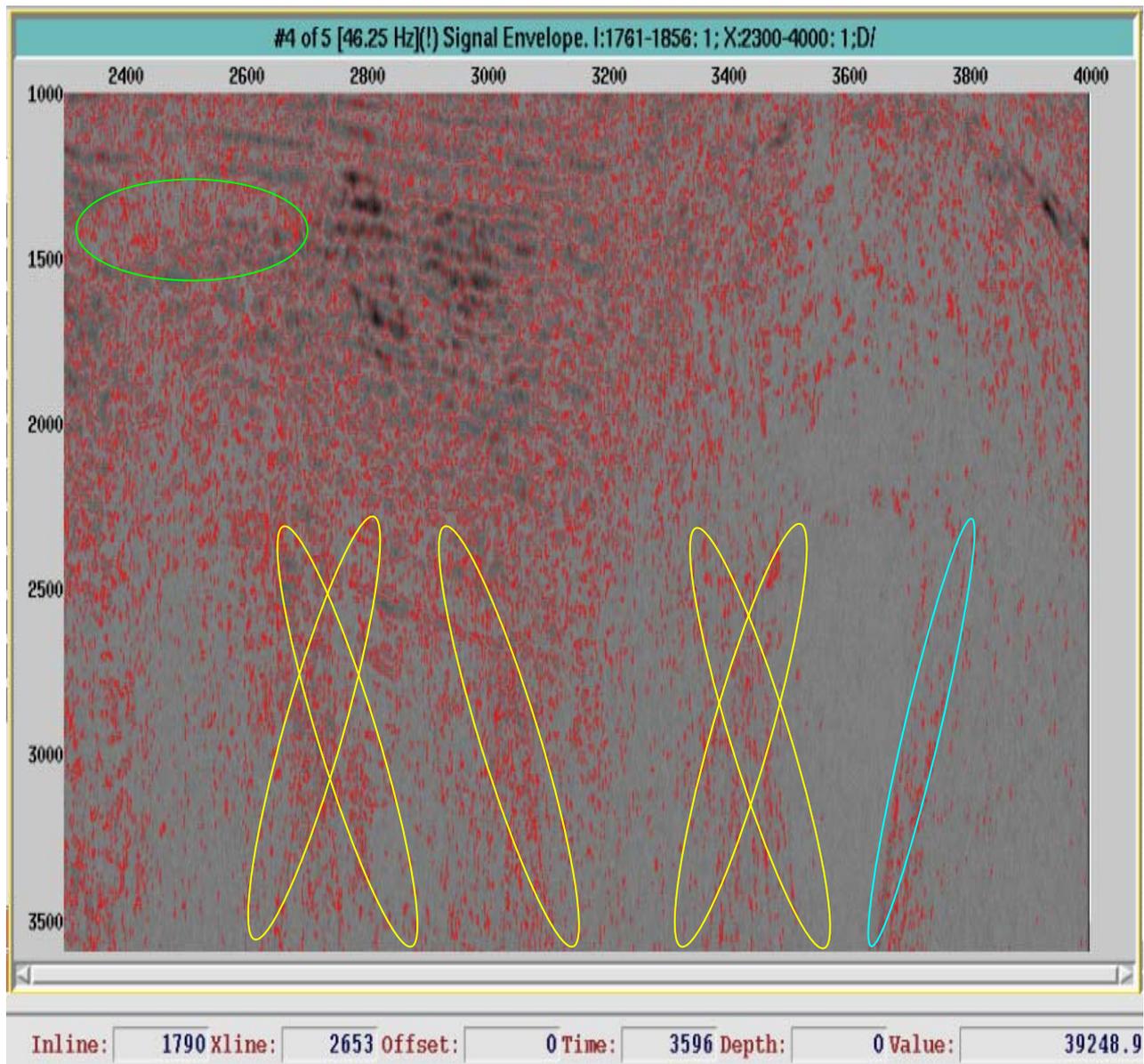


Figura IV.30 Sección envolvente de la inline 1790 del cuarto cubo. La señal se visualiza en la parte central de la sección sísmica, de 1 a 2 s en colores gris y negro, mientras que el ruido de dispersión y el lineal se observan en las elipses de color verde y amarillo respectivamente de 2 a 3.6 s, y la interferencia sísmica se muestra de 2.5 a 3.6s con una elipse de color azul.

Estos valores de la tabla 10, se corroboran con la correlación la sección envolvente de la inline 1790 y la del cubo preliminar mostrado en la figura IV.3

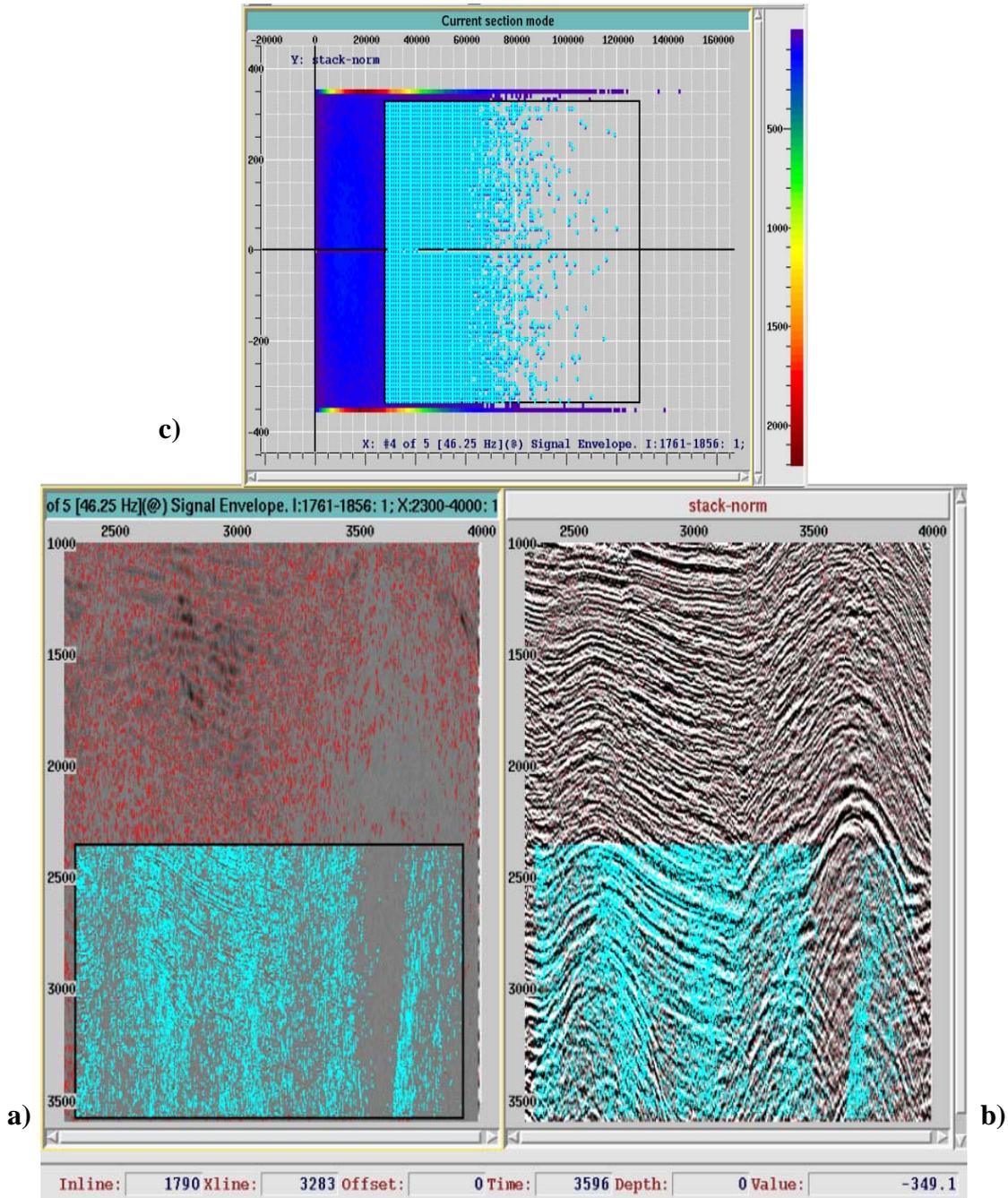


Figura IV.31 Crossplot entre envolvente del cuarto cubo y sección del cubo preliminar normalizado. a) sección envolvente de la inline 1790; b) sección inline 1790 del cubo preliminar; c) crossplot ubicado en la parte superior de las secciones sísmicas, muestra la mejor correlación de ruido tanto lineal como de interferencia sísmica entre los valores de amplitud entre ambas secciones en el rango de 2.4 a 3.6 s, así mismo, puede verse la clara tendencia del ruido lineal entre los xlines 3300 a 3500 de su extensión hasta casi 1 segundo, todo lo contrario a la señal sísmica que solo se visualiza en zona somera debajo de 2 segundos.

Finalmente, podemos observar en la figura IV.32, el quinto cubo de la envolvente, en donde la señal sísmica apenas se logra apreciar 1 a 1.8 s en colores gris y negro, esto nos demuestra la afirmación realizada por Yilmaz (1987), las bandas de alta frecuencia de señal útil están confinadas a zonas someras, esto es, que la resolución temporal es reducida en gran medida en las porciones mas profundas de la sección sísmica.

Por otro lado, tanto el ruido lineal como el de interferencia sísmica se continúan mostrando con mayor claridad principalmente en la parte profunda.

La siguiente tabla muestra un resumen de los intervalos de tiempo y espacio de señal y ruido en este quinto cubo; mientras que la figura IV.33 demuestra la identificación estos ruidos.

Tabla 11 Descripción de rangos de señal y ruido presentes en la quinta banda del cubo señal a ruido de la inline 1790.

SEÑAL		RUIDO	TIEMPO	XLINE
TIEMPO	XLINE	Dispersión	1.3 a 1.4	2360-2400
1 a 1.8	2600-3200	Lineal	2.5 a 3.6	2500-2800
		Lineal	2.5 a 3.6	2900-3150
		Lineal	2.5 a 3.6	3400-3500
		Interferencia sísmica	3.0 a 3.6	3700-3800

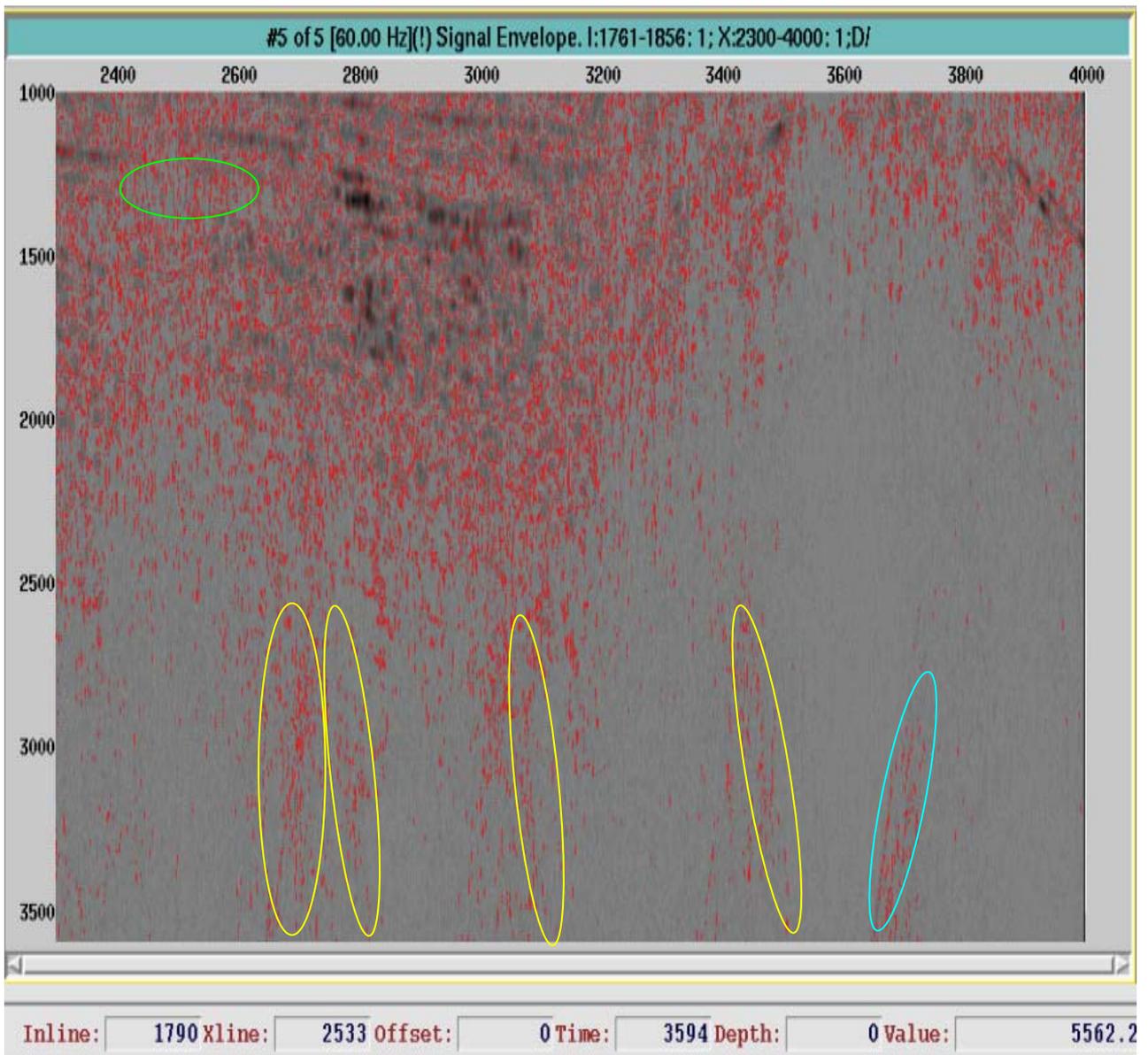


Figura IV.32 Sección envolvente de la inline 1790 del quinto cubo de descomposición espectral. La señal se visualiza en la parte central de la sección sísmica, de 1 a 1.8 s en colores gris y negro, mientras que el ruido de dispersión y el lineal se observan en las elipses de color verde y amarillo respectivamente, mientras que la interferencia sísmica se muestra de 3 a 3.6s con una elipse de color azul.

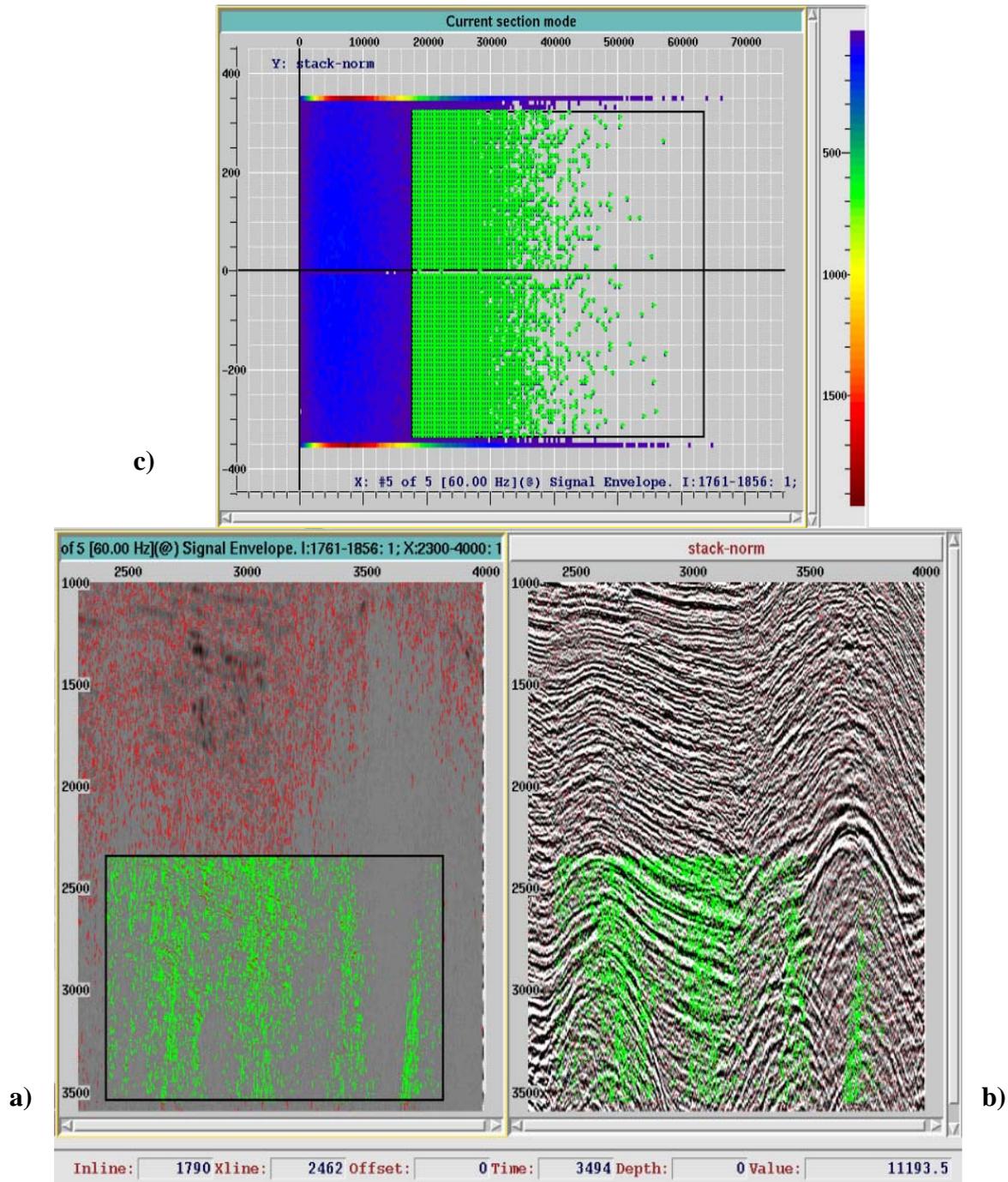


Figura IV.33 Crossplot entre sección envolvente del quinto cubo y sección del cubo preliminar normalizado. a) sección envolvente de la inline 1790; b) sección 1790 del cubo preliminar; c) nuevamente se puede observar que al igual que la correlación de la figura IV.31, esta es también una muy buena correlación del ruido tanto lineal como de interferencia sísmica entre los valores de amplitud entre ambas secciones en los intervalos de 2.4 a 3.6 s, y mientras que la señal sísmica continua disminuyendo hasta por debajo de 1.8 segundos.

Cabe mencionar, que se analizaron 7 inlines más con espaciamiento entre ellos de 15 inlines en cada uno de los cubos de envolvente de descomposición espectral, esto se puede verificar en el apéndice F.

IV.C.4 CÁLCULO DE LA RELACIÓN SEÑAL A RUIDO

a) Relación señal a ruido en etapa pre-stack

El cálculo de la relación señal a ruido permite determinar tanto la magnitud y exactitud de una anomalía que puede ser extraída de la información sísmica, así como llevar a cabo análisis de velocidad, AVO etc (White,1998).

En este sentido, calcular la relación señal a ruido es de gran importancia en estudios prestack, ya que tal como lo afirmaron White y Thomas (1998), para determinar la exactitud de un análisis prestack, se debe contar con una buena calidad de información sísmica. En un análisis prestack el volumen de información sísmica es organizada en gathers de trazas muestreadas en una región del subsuelo, desde un rango de ángulos de incidencia, hasta los cambios que sufre la forma de onda reflejada a través de estas trazas que son dependientes de las propiedades de las rocas y de los fluidos en los límites de reflectividad, y además de que la relación señal a ruido debe ser suficientemente alta para detectar cambios en la forma de onda o cualquier otro comportamiento anómalo.

Los principales factores que afectan la calidad de información prestack son: relación señal a ruido, calidad de imagen en los gathers de punto de reflexión común (PRC), resolución lateral y vertical.

Si bien es cierto, el objetivo de los esquemas de procesado es producir información en un formato tal que esté libre de efectos negativos, sin embargo, normalmente no existe una estimación de los parámetros que afectan la calidad de la información.

Entre los métodos para estimar la relación señal a ruido, se encuentran los siguientes:

- a. Pruebas de disparos de información sísmica cruda.
- b. Auto y cross-correlación
- c. Parámetros estadísticos en cubo preliminar.

Con excepción del inciso (a), los dos subsiguientes consideran en su estimación el ruido aleatorio, de acuerdo a los estudios realizados por White y Thomas (1998) y Galbraith (2003).

Considerando el análisis realizado en el punto IV.C.3, en donde se determinó que en el cubo preliminar Almeja-Cisne existen rasgos característicos de ruido coherente e incoherente (aleatorio); en este sentido, y tomando en cuenta que se carece de las herramientas de correlación en el software usado, además de no contarse con gathers que son necesarios para el caso (b), por lo que se hace necesario el uso del inciso (c).

b) Cálculo de la relación S/R usando parámetros estadísticos

Recordando que toda información geológica esta directamente relacionada a un comportamiento de distribución gaussiana y si asumimos que tenemos n hidrófonos, cada uno responde a una señal coherente S, la cual trae consigo otra componente denominada ruido R_i que esta sobrepuesto a S, de tal forma que en estas condiciones es posible calcular un valor promedio x_i de señal y ruido, que se describe con la siguiente formula:

$$x_i = S + R_i$$

Este valor promedio es la mejor forma de representar a la señal, mientras que el ruido se identifica por su distribución con la desviación estándar σ (Sheriff y Geldart, 1995).

Por lo que tenemos las siguientes aproximaciones:

$$S \approx \bar{x} = 1/n \sum x_i ; \quad \text{y considerando a } R_i \approx \sigma$$

$$\sigma^2 = 1/n \sum (x_i - \bar{x})^2 = 1/n \sum N_j^2$$

Sustituyendo las relaciones anteriores en la relación S/R, se obtiene la estimación de la relación S/N, esto es:

$$\frac{S}{N} \approx \frac{x}{\sigma} = \frac{x}{(1/n^{1/2})(\sum R^2_j)^{1/2}} = \frac{n^{1/2} x}{(\sum R^2_j)^{1/2}} = \frac{n^{1/2} x}{\sigma} \quad (8)$$

El cálculo de la relación señal a ruido que se llevó a cabo en el cubo preliminar Almeja-Cisne, se enfocó a la zona somera de las secciones sísmicas, esto considerando los objetivos descritos en el capítulo III.

En este sentido, para lograr la estimación de la relación señal a ruido se llevaron a cabo dos pasos en la solución de este requerimiento para una buena calidad de información sísmica.

1) Descomposición espectral

Después de haber analizado la resolución sísmica en el dominio tiempo-frecuencia en el punto IV.A.1, y considerando la influencia del ruido sísmico sobre la calidad de la resolución, esto nos lleva afirmar que la frecuencia juega un papel importante la relación S/R, con lo que transformar la información sísmica del cubo preliminar Almeja-Cisne 3D del dominio del tiempo al de la frecuencia, fue el primer paso para llevar a cabo la estimación de la relación señal a ruido, que se efectuó con los mismos parámetros con que se ejecutó el punto descrito en IV.A.3, es decir, se obtuvieron las mismas características de la tabla 4. Sin embargo, cabe destacar que solo fue necesario obtener las cubos en el dominio tiempo-frecuencias sin necesidad de aplicar normalización, ya que considerando la importancia de la fórmula para la estimación de la relación S/N, y en particular la variable n, con lo que se requirió el total de muestras de valores de amplitud, que permitieran ver su interacción directa o indirecta en el cálculo de esta relación.

2) CROSSPLOTS S/R

La correlación se llevó a cabo entre las secciones sísmicas de cada una de los 5 cubos de descomposición espectral contra las secciones del cubo preliminar Almeja-Cisne.

El cubo preliminar permaneció sin aplicarle ningún escalamiento, es decir su típica distribución de valores de amplitud gaussiana; de esta manera la correlación se efectuó, tomando como muestra la inline 1790 en un rango de 1.1 a 1.6 s.

La correlación de la sección inline 1790 del primer cubo contra la sección del cubo preliminar se muestra en la figura IV.34, aquí se observa que al correlacionar estas secciones, se obtuvo un crossplot con una elipse que presenta una gran cantidad de valores de amplitud muy dispersos en la periferia, lo que significa estadísticamente una media alta con un factor de correlación de 0.56, y si aplicamos la formula 8 de S/R, y considerando los valores de variables estadísticas mostradas en la misma figura, se obtiene una relación S/R de 4 (ver tabla 12)., que de acuerdo a Gailbraith (2003) y Brown (1999) es un valor de visibilidad moderada.

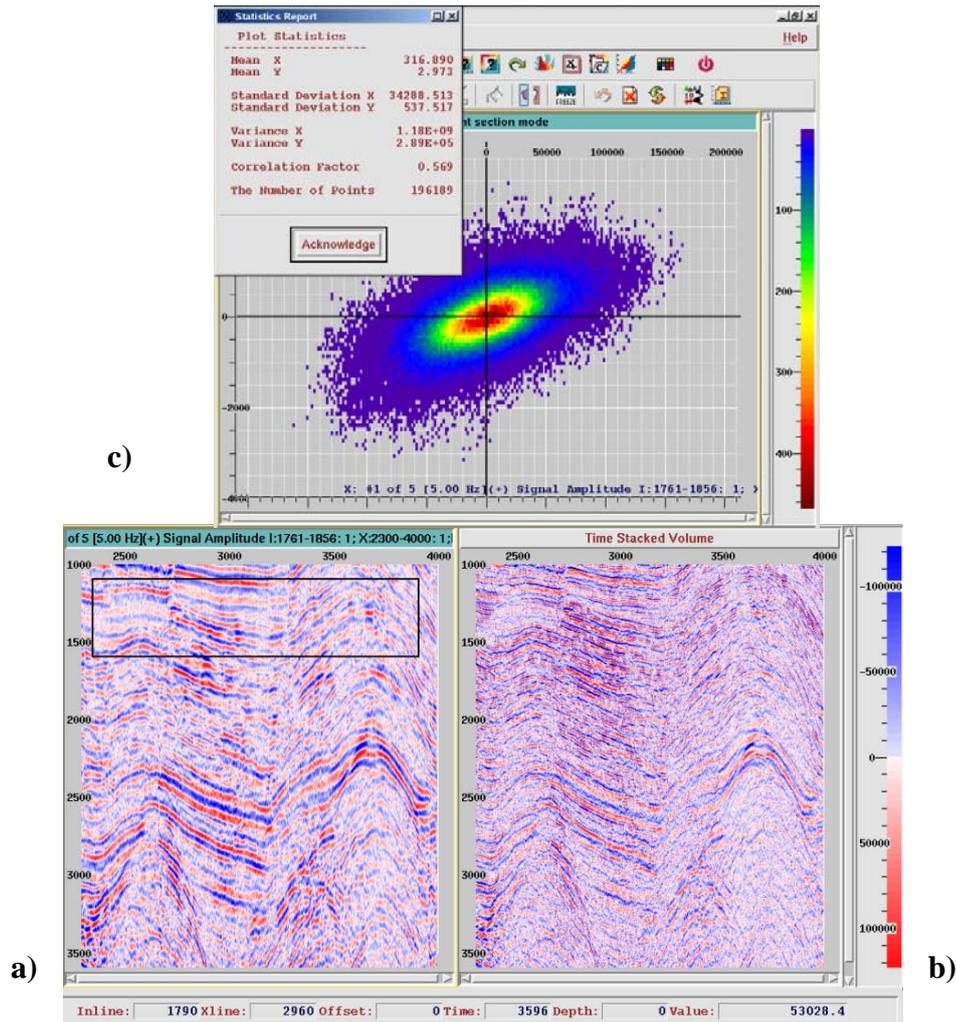


Figura IV.34 Crossplot entre sección 1790 del primer cubo y la sección del cubo preliminar sin normalizar. a) Sección inline 1790 del cubo-1 de descomposición espectral que muestra un rectángulo negro que ejemplifica el área a correlacionar (1.1 a 1.6 s); b) sección inline 1790 del cubo preliminar sin normalizar; c) crossplot ubicada arriba de las secciones, en donde se observa una elipse con mucha dispersión en la periferia, lo que proporciona valores altos de media, tal como se ve en la tabla de valores estadísticos de esta figura.

La figura IV.35, muestra que continúa la dispersión en la periferia de la elipse, pero con una mejor alineación entre los puntos mostrados en el crossplot, lo que significa estadísticamente una mejor correlación cuyo factor es de 0.84, sin embargo, la media x es menor que en la primer cubo, y cabe agregar que el número de muestras “n” se aumentó con respecto a las muestras del primer cubo, que al hacer el cálculo S/R en la formula 8 no se ve ningún efecto en el resultado, tales resultados se presentan en la tabla 12.

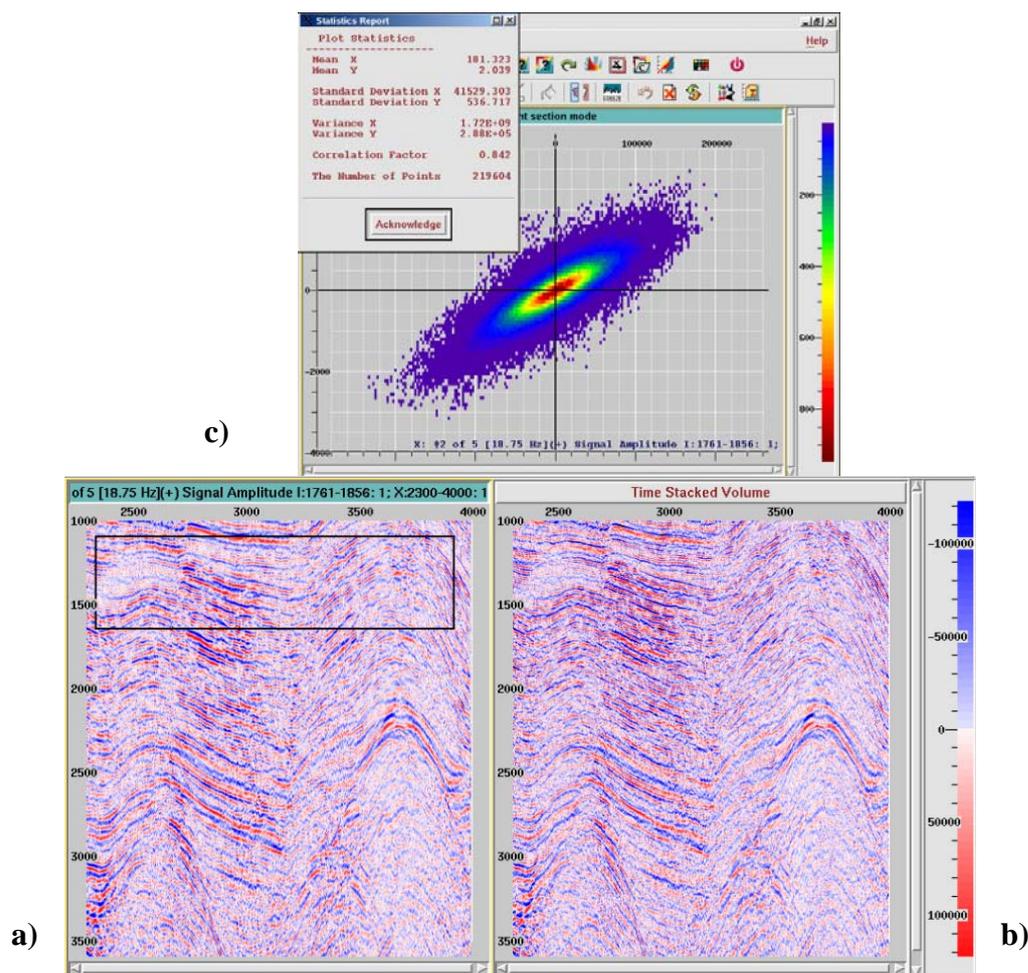


Figura IV.35 Crossplot entre sección 1790 del segundo cubo y la sección del cubo preliminar sin normalizar. a) Sección inline 1790 del cubo-2 de descomposición espectral que muestra un rectángulo negro que ejemplifica el área a correlacionar (1.1 a 1.6 s); b) sección inline 1790 del cubo preliminar sin normalizar; c) crossplot ubicado arriba de las secciones, en donde se observa una elipse con mucha dispersión en la periferia, pero los puntos están mejor alineados entre si, lo que significa un valor de 0.84, así mismo, hay una mayor cantidad de muestras “n” que en la figura anterior, tal como se ve en la tabla de valores estadísticos de la figura.

La tendencia lineal entre los valores de dispersión se empieza a acentuar cada vez con mayor fuerza, tal como se puede observar en la figura IV.36, cuya medición lo da el parámetro de factor de correlación, que en ese sentido, es un valor alto de 0.89 que significa buena correlación.

Sin embargo, la media x continúa disminuyendo, y “n” se sigue muestreando cada vez con mayor valor, mientras que la desviación estándar (σ) es una función directa de la variabilidad aleatoria (ruido) existente entre eventos en esta zona somera de la sección sísmica, por lo que, al hacer nuestra estimación S/R, vemos que continúa disminuyendo (ver tabla 12).

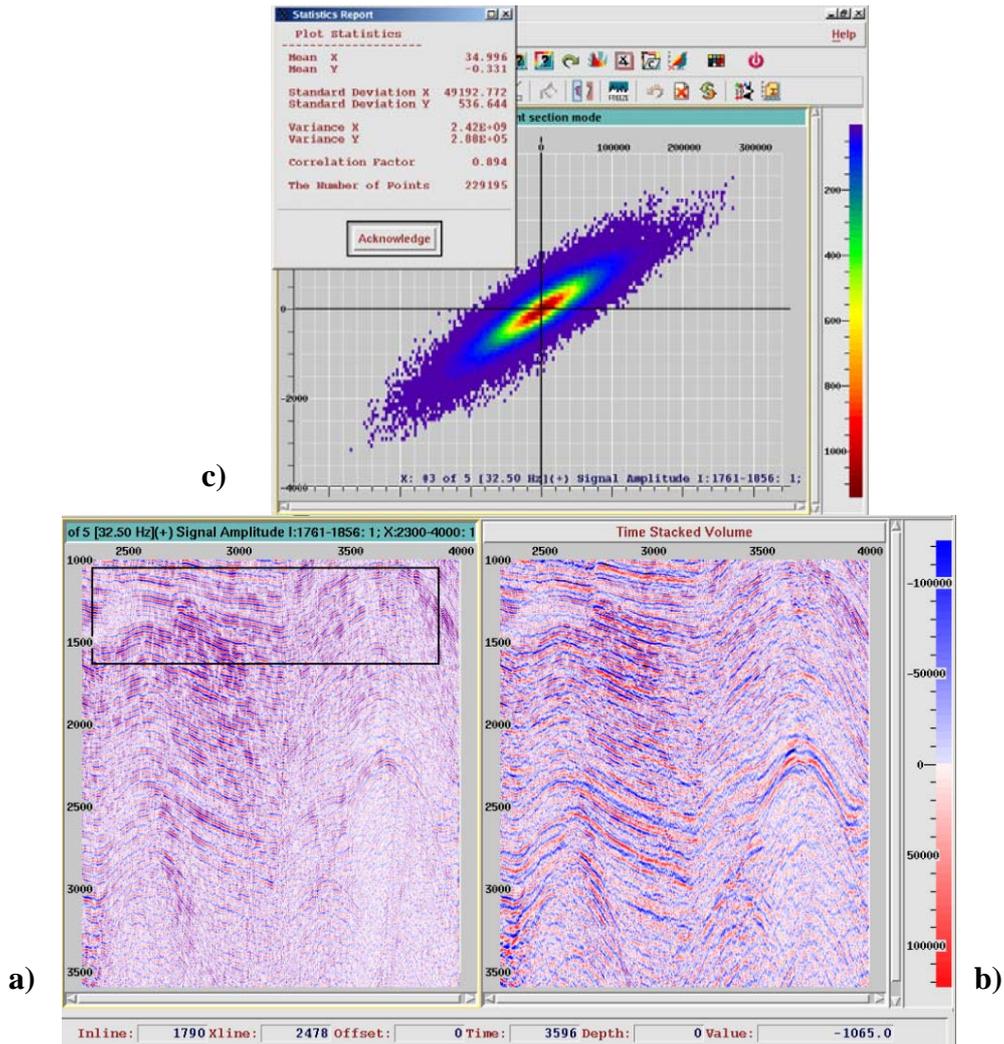


Figura IV.36 Crossplot entre sección 1790 del tercer cubo y la sección del cubo preliminar sin normalizar. a) Sección inline 1790 del cubo-3 de descomposición espectral que muestra un rectángulo negro que ejemplifica el área a correlacionar (1.1 a 1.6 s); b) sección inline 1790 del cubo preliminar sin normalizar; c) se puede ver en el crossplot una tendencia lineal muy acentuada entre los valores de dispersión, lo que significa una correlación alta de 0.89, sin embargo nuestra media x continua disminuyendo al igual que la relación S/R.

Nuevamente, la dispersión se acentúa en la periferia de la elipse mostrada en la figura IV.37, es decir, continúa habiendo alineamiento en los valores de amplitud de esta dispersión, pero hay una gran cantidad de valores fuera de la tendencia lineal, lo que obviamente significa una correlación menor de 0.80 con respecto a los anteriores estimaciones (tabla 12), pero esto no significa que nuestra estimación S/R fuera a aumentar, sino que al contrario sigue disminuyendo, lo que pudiera significar que no existe una relación directa entre factor de correlación y la media x de los cubos de descomposición espectral.

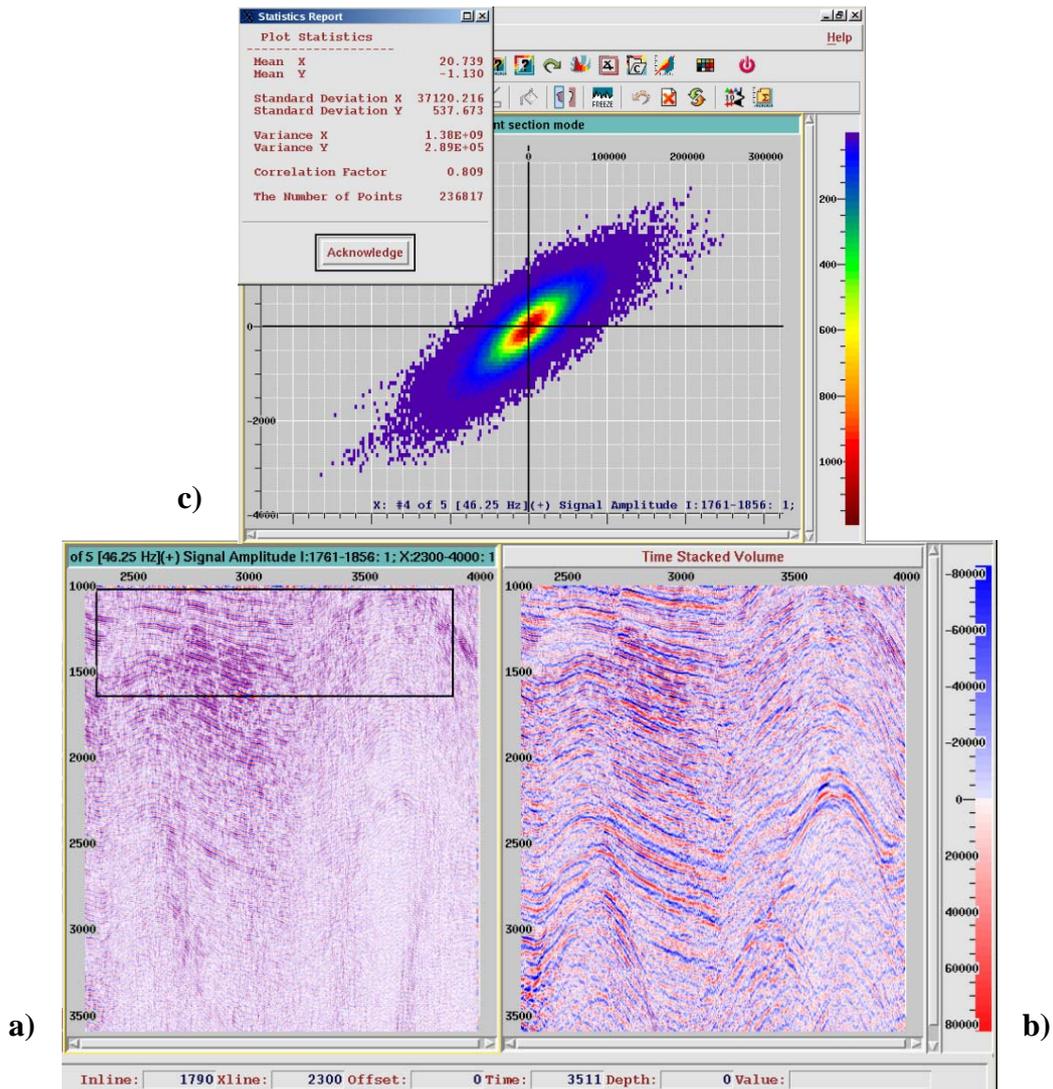


Figura IV.37 Crossplot entre sección 1790 del cuarto cubo y la sección del cubo preliminar sin normalizar. a) Sección inline 1790 del cubo-4 de descomposición espectral que muestra un rectángulo negro que ejemplifica el área a correlacionar (1.1 a 1.6 s); b) sección inline 1790 del cubo preliminar sin normalizar; c) en esta correlación vuelven a dispersarse los valores de amplitud en la periferia de la elipse fuera de la tendencia lineal de la misma, lo que significa una disminución en el factor de correlación con respecto a las correlaciones de las tres cubos anteriores, pero no influye en la determinación del cálculo S/R, el cual continua disminuyendo.

Finalmente, tenemos la figura IV.38, en la que se observa aún mas la acentuación de dispersión de valores en la periferia del elipse de datos, y al igual que la figura anterior nos demuestra un factor de correlación bajo de 0.54, y como ya se comentó, no afecta al valor de la media x, y en este mismo sentido, al realizar el cálculo de S/R seguimos teniendo una disminución en esta estimación (tabla 12).

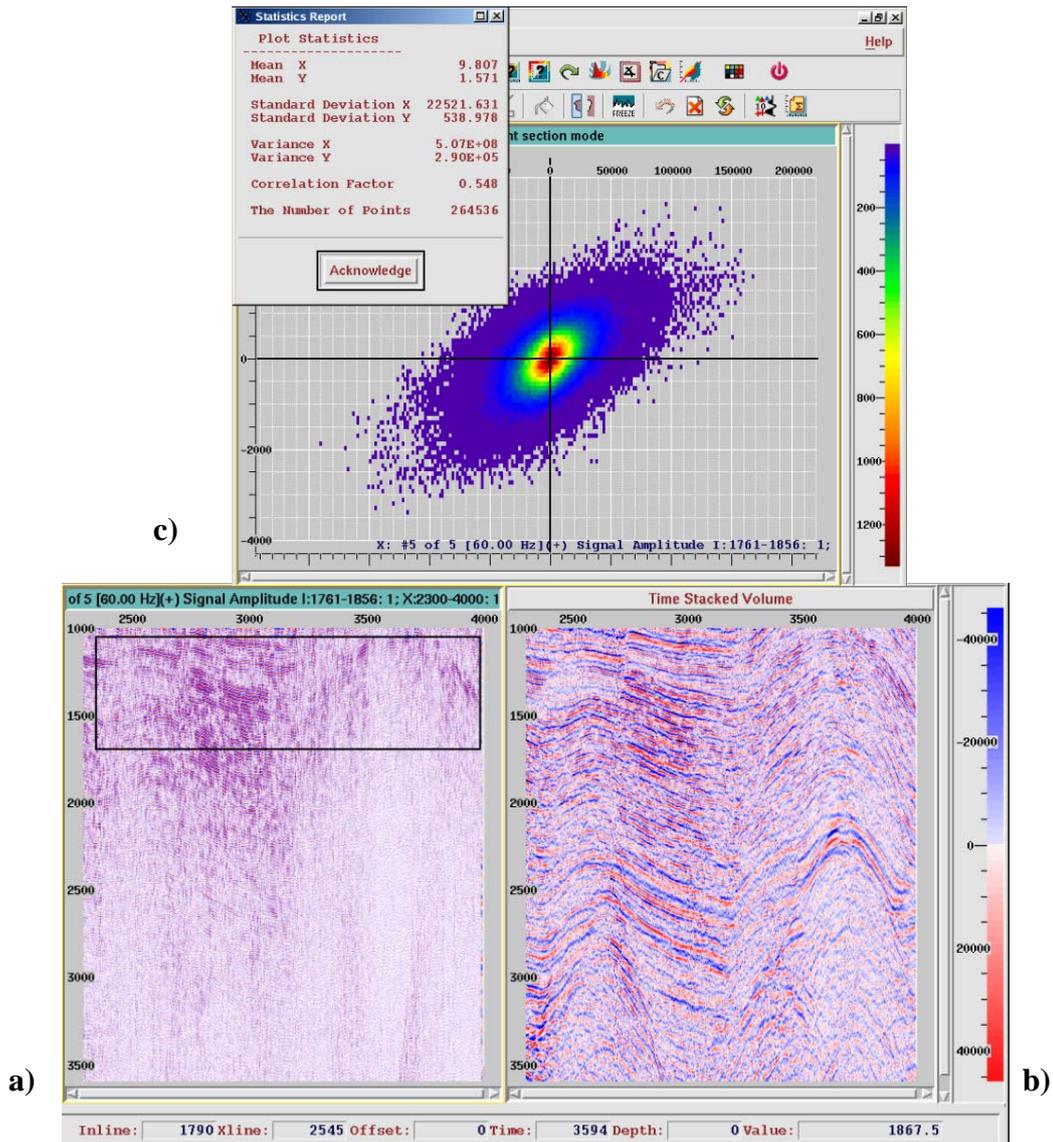


Figura IV.38 Crossplot entre sección 1790 del quinto cubo y la sección del cubo preliminar sin normalizar. a) Sección inline 1790 del cubo-5 de descomposición espectral que muestra un rectángulo negro que ejemplifica el área a correlacionar (1.1 a 1.6 s); b) sección inline 1790 del cubo preliminar sin normalizar; c) aquí tenemos la correlación mas baja que se ha tenido con respecto a las anteriores cubo de tiempo-frecuencia (tabla 12), así mismo el valor mas bajo de S/R.

Tabla 12 Resumen de parámetros estadísticos obtenidos a partir de la correlación entre cada uno de los cubos de descomposición espectral vs cubo preliminar del volumen Almeja –Cisne, así mismo los valores de las estimaciones S/R realizadas a cada uno de los 5 cubos de la inline 1790.

BANDA	INLINE	x	δ	n	S/R
1	1790	316.8	34288	196189	4
2	1790	181.3	41529	219604	2
3	1790	34.9	49192	229195	0.33
4	1790	20.7	37120	236817	0.27
5	1790	9.8	22521	264536	0.22

Con la finalidad de corroborar la calidad y congruencia de valores de la estimación S/R, se calcularon y resumieron 18 inlines mas, los cuales se pueden verificar en el apéndice G.

V. Resultados

La aplicación de la descomposición espectral inicia con la transformación del dominio del tiempo del cubo preliminar Almeja-Cisne al dominio tiempo-frecuencia, a través del método de la transformada de ondícula continua, cuyo algoritmo se usó por medio del software Paradigm®, obteniéndose 5 cubos en el dominio tiempo-frecuencia, que muestran una mejoría de la resolución sísmica en el rango de frecuencia de 5 a 32.5 Hz lo que corresponde al primer y segundo cubo de descomposición espectral, esto en comparación con la mala calidad en resolución en el dominio del tiempo, mientras que a altas frecuencias (32.5 a 60 Hz) se llega a tener buena resolución hasta 2.2 s.

Esto se ejemplifica con el resultado que se aprecia en la figura V.1, donde se puede distinguir claramente que existen tres rangos muy fuertes de reflectores sísmicos: el primero se puede ver de 1 a 1.1 s, 1.2 a 1.6 s y de 2.3 a 3 segundos, así mismo, se destaca a simple vista una relación señal a ruido aceptable, y esto es debido a que la presencia de ruido no es tan fuerte en este rango de frecuencia.

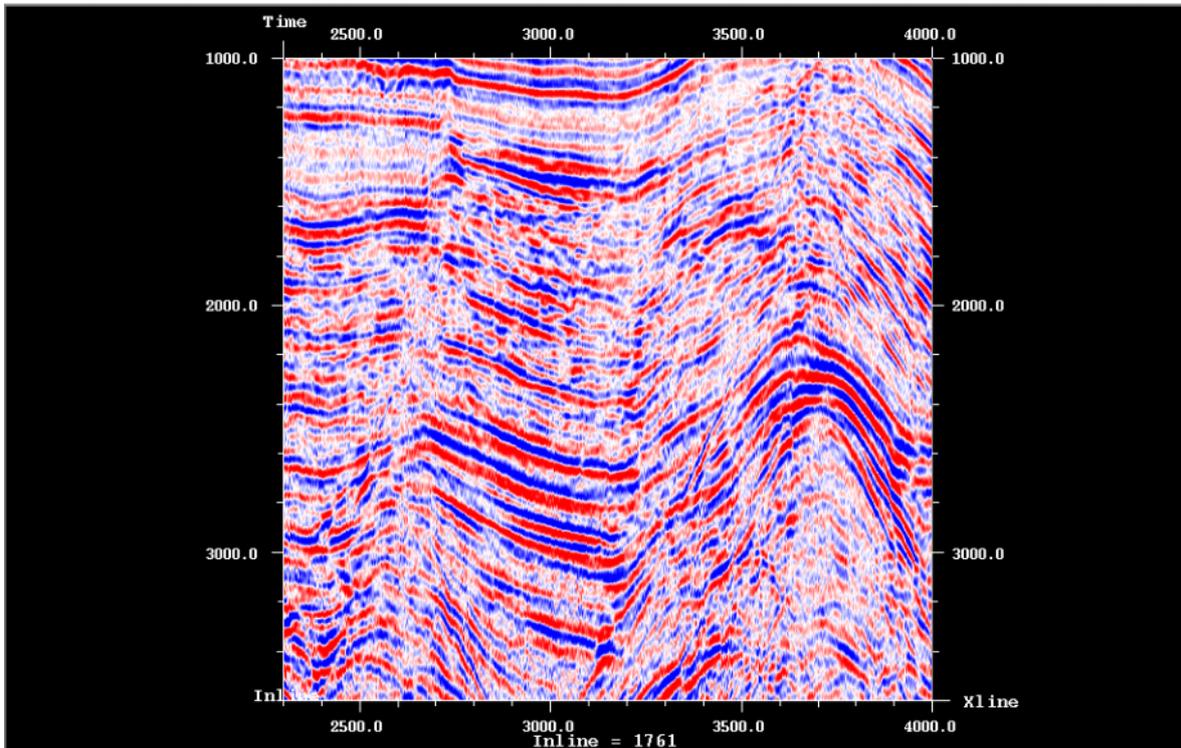


Figura V.1 Sección sísmica inline 1761 correspondiente al primer cubo (5 a 18.75 Hz) de descomposición espectral del levantamiento Almeja Cisne.

La metodología de descomposición espectral que se aplicó en el análisis de la detección de la huella de adquisición del cubo preliminar Almeja-Cisne 3D, resultó ser efectiva, ya que se pudieron visualizar y detectar en bajas frecuencias (5 a 32-5 Hz), las estrías características muy comunes en una huella de adquisición de ambiente marino, lo que se puede verificar con toda claridad en el resultado obtenido por descomposición espectral y normalización en la figura V.2, que muestra una sección horizontal a 1184 s del cubo-1 del rango de frecuencia 5 a 18.75 Hz, mostrando siete huellas de adquisición encerradas en óvalos negros (inlines:1839,1835,1832,1828,1803,1784,1768).

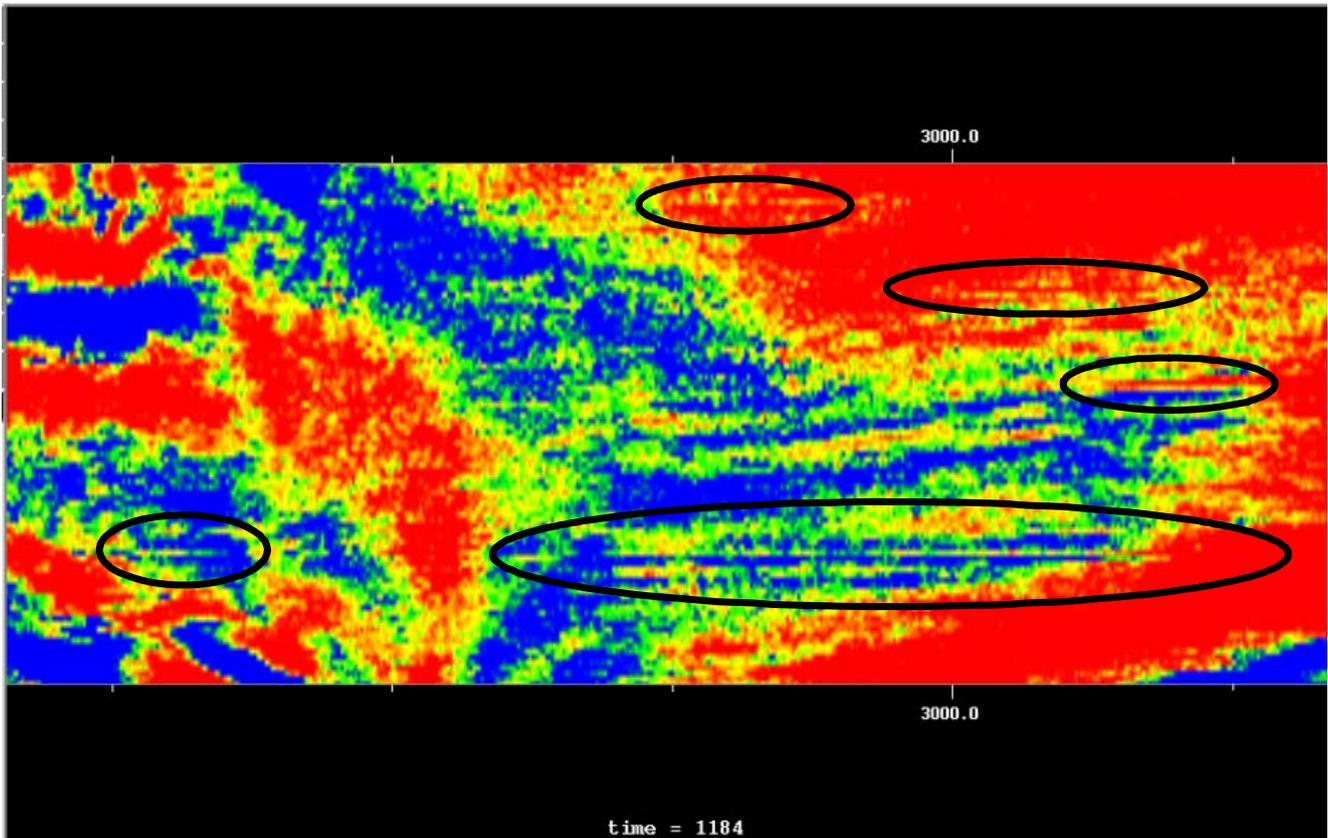


Figura V.2 Sección horizontal a 1184 s del cubo-1 (5 a 18.75 Hz) de descomposición espectral y normalizada, se pueden ver estrías de siete huellas de adquisición encerradas en óvalos negros (inlines:1839,1835,1832,1828,1803,1784,1768).

Este resultado fue comprobado por los mapas de apilamiento y a través de la aplicación de la metodología de extracción de mapas de amplitud en los 5 cubos descompuestos espectralmente, por lo que al tener los mapas de amplitud en esta zona somera y en el dominio tiempo-frecuencia, nos permitió verificar la existencia del mismo patrón característico observado en la figura V.2, lo cual se corrobora con la figura V.3, en donde se presenta el mapa de amplitud del cubo-1 en el rango de frecuencias de 5 a 18.75 Hz, y se distingue en óvalos rojos las estrías que representan la huella de adquisición en los inlines 1839, 1835, 1832, 1817 y 1784, lo cual coincide con 5 de los obtenidos en la sección horizontal a 1184 s del cubo-1 (5 a 18.75 Hz).

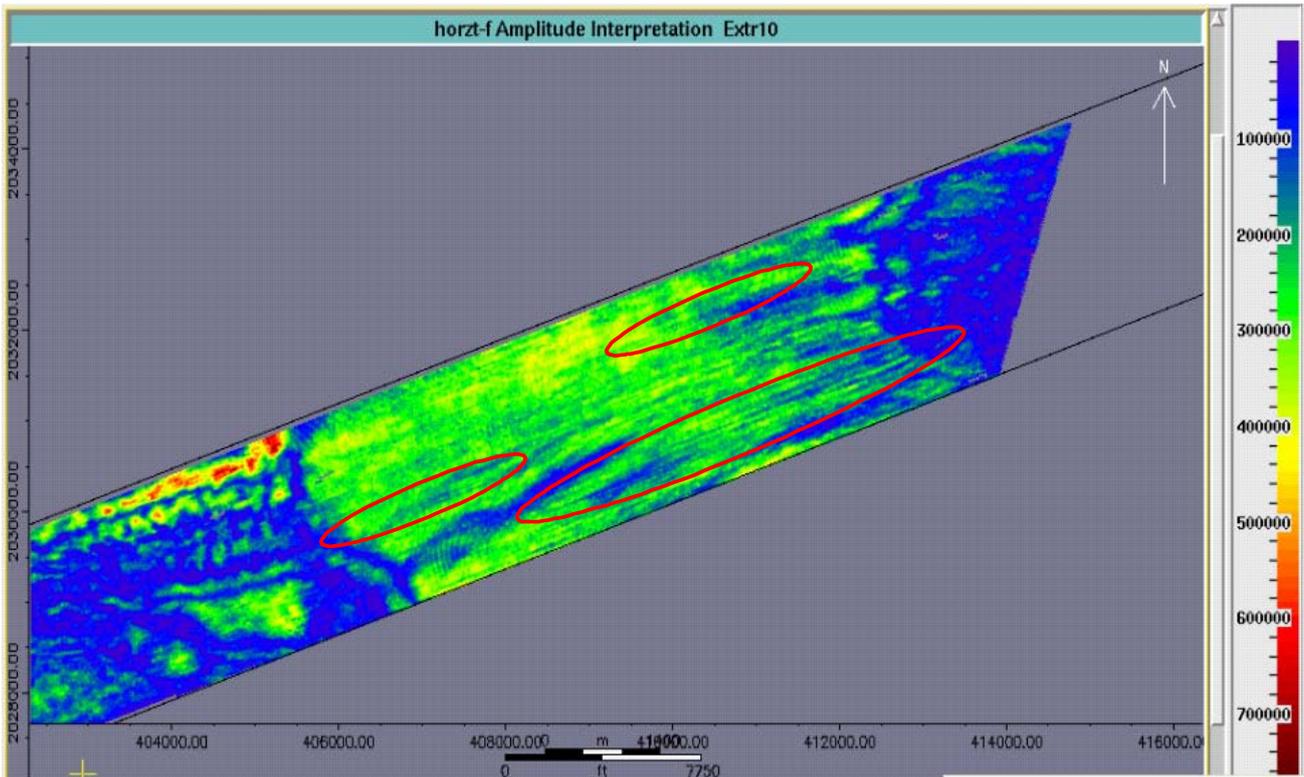


Figura V.3 Mapa de amplitud del cubo-1 (5 a 18.75 Hz) de descomposición espectral, se pueden ver estrías de cinco huellas de adquisición encerradas en óvalos rojos (inlines:1839,1835,1832, 1817 y 1784).

Definir cualitativamente el ruido sísmico del cubo preliminar Almeja-Cisne, fue otro de los resultados que se lograron en este trabajo, esto se efectuó con la aplicación de la descomposición espectral y con el uso de crossplots.

Primeramente se obtuvieron 5 cubos que se denominaron envolvente de la señal, ya que la combinación de la ondícula envolvente de Gabor y la envolvente como atributo permitió obtener como resultado cubos con rasgos únicamente de señal y ruido tal como se puede observar en la figura V.4, aquí se muestran tres ruidos encontrados en todo el análisis realizado del cubo preliminar Almeja-Cisne que son: dispersivo, lineal y de interferencia sísmica, los cuales se encierran en óvalos de color verde, amarillo y azul respectivamente.

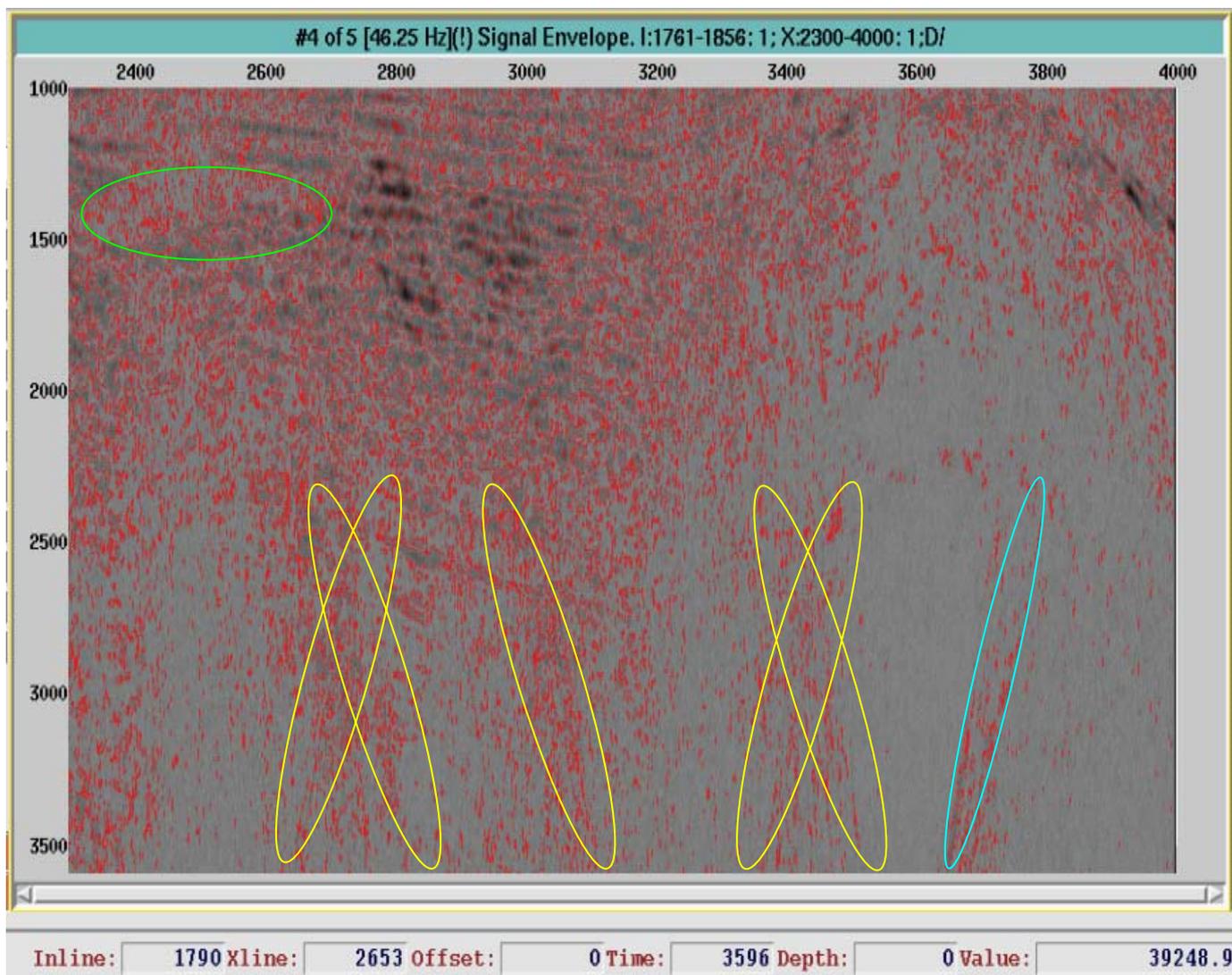


Figura V.4 Sección envolvente de la inline 1790 del cuarto cubo. La señal se visualiza en la parte central de la sección sísmica, de 1 a 2 s en colores gris y negro, mientras que el ruido de dispersión y el lineal se observan en las elipses de color verde y amarillo respectivamente de 2 a 3.6 s, y la interferencia sísmica se muestra de 2.5 a 3.6s con una elipse de color azul.

Este análisis cualitativo fue corroborado a través de la correlación efectuada entre las secciones inline de cada uno de los 5 cubos de la envolvente y las secciones del cubo preliminar. En la figura V.5 presenta la correlación efectuada entre el cuarto cubo de la envolvente de la sección inline 1790 y la correspondiente sección del cubo preliminar y podemos ver en el crossplot que la dispersión de valores de amplitud (puntos en color azul), representan ruido lineal y de interferencia que se presentan con mucha congruencia en ambas secciones sísmicas. Este resultado valida las características encontradas en los cubos de la envolvente de la señal.

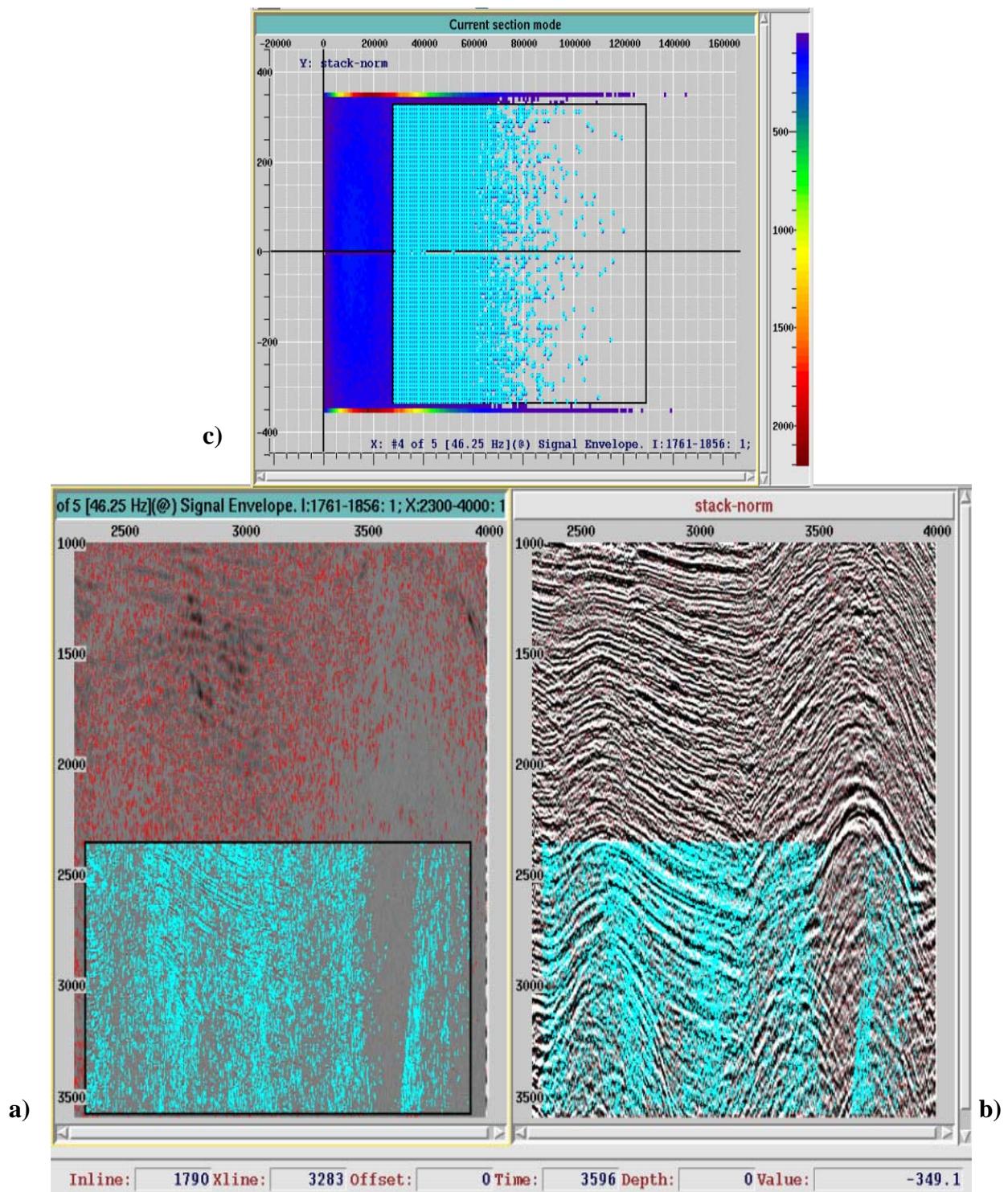


Figura V.5 Crossplot entre envolvente del cuarto cubo y sección del cubo preliminar normalizado. a) sección envolvente de la inline 1790; b) sección inline 1790 del cubo preliminar; c) crossplot ubicado en la parte superior de las secciones sísmicas, muestra la mejor correlación de ruido tanto lineal como de interferencia sísmica entre los valores de amplitud entre ambas secciones en el rango de 2.4 a 3.6 s, así mismo, puede verse la clara tendencia del ruido lineal entre los xlines 3300 a 3500 de su extensión hasta casi 1 segundo, todo lo contrario a la señal sísmica que solo se visualiza en zona somera debajo de 2 segundos.

Nuevamente resultó ser efectiva la aplicación de la metodología de descomposición espectral en la determinación el calculo de la relación S/R, ya considerando que con el primer resultado obtenido en este trabajo, en cuanto a la buena calidad de resolución sísmica en bajas frecuencias en el dominio tiempo-frecuencia, nos dio la pauta para comprobar si existía una relación entre buena relación S/R y resolución sísmica, lo cual dio resultados positivos; para esto fue necesario correlacionar las secciones inline de cada uno de los 5 cubo de descomposición espectral contra las secciones del cubo preliminar.

La figura V.6 muestra el resultado de la correlación de la sección inline 1790, en donde se obtuvo un crossplot con una elipse que presenta una gran cantidad de valores de amplitud muy dispersos en la periferia, lo que significa estadísticamente una media alta con un factor de correlación de 0.56, y si se aplica la formula estadística de calculo de S/R definida por Sheriff (1995) como:

$$\frac{S}{N} \approx \frac{x}{\sigma} = \frac{x}{(1/n^{1/2})(\sum N^2_j)^{1/2}} = \frac{n^{1/2} x}{(\sum N^2_j)^{1/2}} = \frac{n^{1/2} x}{\sigma}$$

y considerando los valores de variables estadísticas mostradas en la misma figura, se obtiene como resultado una relación S/R de 4, mientras que los cálculos efectuados a la misma inline pero del segundo al quinto cubo, vemos que los resultados de los cálculos son de 2, 0.33, 0.27 y 0.22 respectivamente.

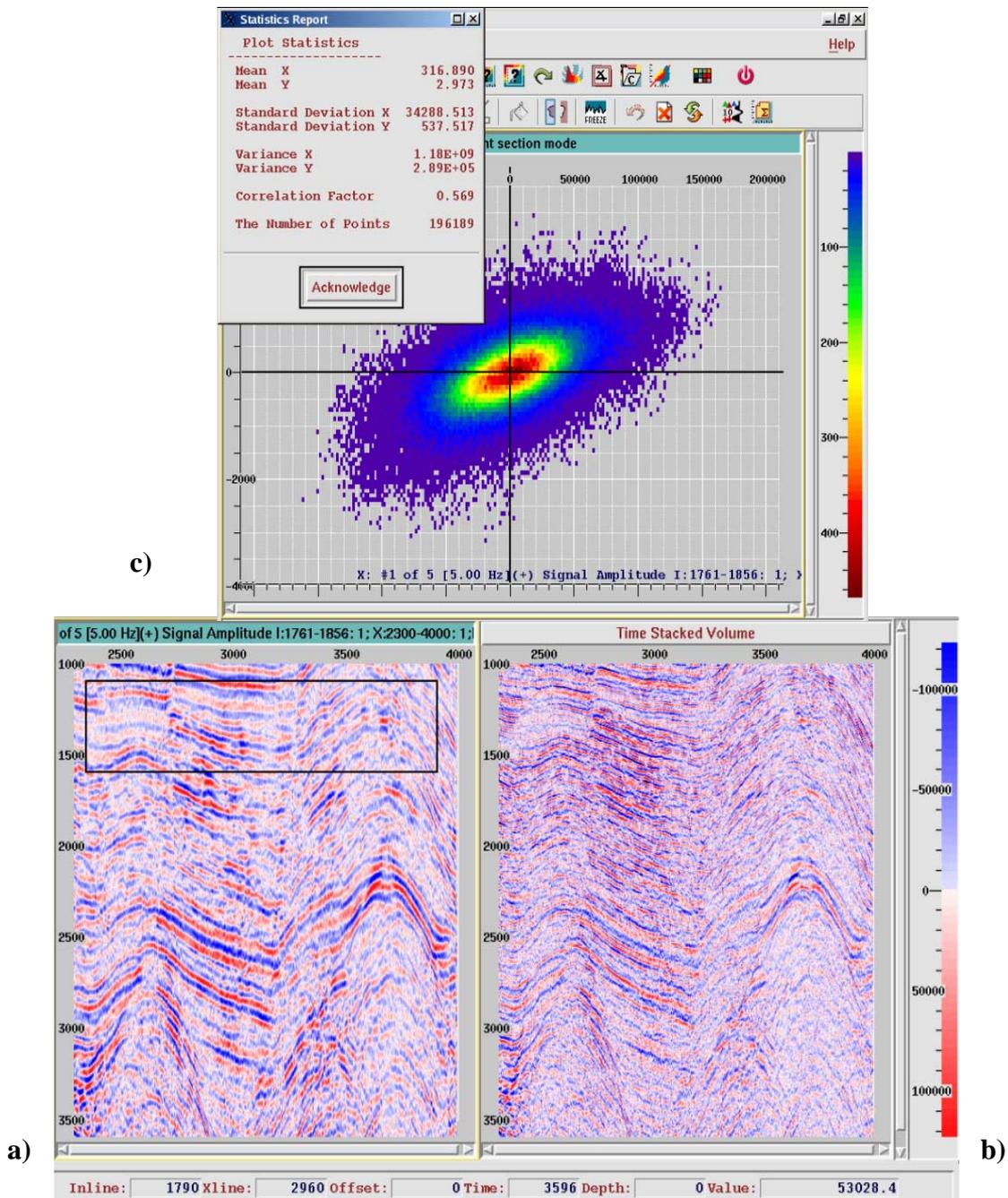


Figura V.6 Crossplot entre sección 1790 del primer cubo y la sección del cubo preliminar sin normalizar. a) Sección inline 1790 del cubo-1 de descomposición espectral que muestra un rectángulo negro que ejemplifica el área a correlacionar (1.1 a 1.6 s); b) sección inline 1790 del cubo preliminar sin normalizar; c) crossplot ubicada arriba de las secciones, en donde se observa una elipse con mucha dispersión en la periferia, lo que proporciona valores altos de media, tal como se ve en la tabla de valores estadísticos de esta figura.

Con la finalidad de corroborar la calidad y congruencia de valores de la estimación S/R, se calcularon y resumieron 18 inlines más, los cuales se pueden verificar en la siguiente tabla:

Tabla 13 Resumen de parámetros estadísticos obtenidos a partir de la correlación entre cada de una de los cubos de descomposición espectral vs cubo preliminar del volumen Almeja –Cisne, así mismo los valores de las estimaciones S/R realizadas a cada uno de los 5 cubos de 18 inlines.

CUBO	INLINE	x	σ	n	S/N
1	1765	1274	47807	205282	12
2	1765	575	54741	223964	4.9
3	1765	102	61130	223289	0.78
4	1765	72	43966	203443	0.73
5	1765	41	44658	231299	0.44
1	1770	1077	45052	210059	10.9
2	1770	716	53111	225281	6.3
3	1770	126	60906	242423	1
4	1770	60	42722	241682	0.69
5	1770	30	25006	276843	0.63
1	1775	659	47400	210991	6.3
2	1775	284	53711	228775	2.5
3	1775	66	58250	236136	0.5
4	1775	19	39499	219474	0.22
5	1775	8	22913	228820	0.16
1	1780	342	44485	234005	3.7
2	1780	115	50648	240784	1.1
3	1780	28	56167	248853	0.24
4	1780	13	40443	256036	0.16
5	1780	1	23597	259574	0.02
1	1785	658	39116	230485	8
2	1785	286	44826	255330	3.2
3	1785	96	51277	259332	0.9
4	1785	35	38704	272692	0.4
5	1785	9	23541	279109	0.2
1	1790	278	35695	217718	3.6
2	1790	62	41689	237040	0.72
3	1790	7	48742	251696	0.07
4	1790	5	36394	251703	0.06
5	1790	1	22261	273344	0.02
1	1795	233	33442	232236	3.35
2	1795	68	38710	240799	0.86
3	1795	33	45131	248215	0.36
4	1795	10	34777	268789	0.14
5	1795	5	21664	255880	0.11
1	1800	143	34030	215748	1.95
2	1800	137	38448	260130	1.8
3	1800	24	43414	275055	0.28
4	1800	6	33387	271851	0.09
5	1800	2	20572	284542	0.05
1	1805	171	35140	235468	2.3

2	1805	97	38903	263086	1.27
3	1805	15	42844	256884	0.17
4	1805	11	31760	270748	0.17
5	1805	7	19259	279800	0.16
1	1810	150	31057	215603	2.2
2	1810	100	36013	262169	1.4
3	1810	74	40874	240070	0.8
4	1810	13	32332	276535	0.2
5	1810	6	20585	287117	0.1
1	1815	184	30441	217258	2.8
2	1815	118	35389	251050	1.6
3	1815	29	40681	267383	0.36
4	1815	8	31871	281798	0.13
5	1815	1	19639	322044	0.2
1	1820	188	29075	232765	3
2	1820	58	34848	2060140	0.8
3	1820	43	41138	265202	0.5
4	1820	30	31748	252778	0.4
5	1820	9	19548	301354	0.2
1	1825	335	29465	233533	5.4
2	1825	205	34939	273320	3
3	1825	45	41011	260438	0.55
4	1825	34	31792	291914	0.50
5	1825	5	19786	295460	0.13
1	1830	297	29136	247093	5
2	1830	218	34805	291906	3.3
3	1830	74	39581	289328	1
4	1830	15	29960	291434	0.27
5	1830	7	18046	311724	0.21
1	1835	179	24892	215616	3.3
2	1835	151	33145	258284	2.3
3	1835	52	40230	279428	0.6
4	1835	14	31477	295345	0.24
5	1835	8	19689	288052	0.21
1	1840	226	29544	234871	3.7
2	1840	158	34188	254602	2.3
3	1840	37	38471	272868	0.5
4	1840	5	29838	265003	0.08
5	1840	2.5	17983	270449	0.07
1	1845	285	26810	248315	5.2
2	1845	143	31623	227345	2.1
3	1845	42	38341	311404	0.6
4	1845	15	30592	294061	0.2
5	1845	5	18746	306695	0.1
1	1850	360	29190	235224	6
2	1850	189	34649	256908	2.7
3	1850	45	40478	286582	0.5
4	1850	24	31664	267425	0.39
5	1850	11	19600	291208	0.30

1	1855	270	32147	218297	3.9
2	1855	118	30038	240698	1.9
3	1855	79	40272	283481	1
4	1855	12	31215	291585	0.2
5	1855	3	19519	307759	0.08

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo hemos aplicado la técnica de la descomposición espectral al cubo sísmico preliminar Almeja-Cisne 3D con el propósito de mejorar la resolución sísmica.

1. En las secciones sísmicas analizadas se mejoró la resolución en el rango de frecuencias bajas (5 a 32.5 Hz) en el intervalo de tiempo de 1 a 3.3 s. En el rango de frecuencias altas (32.5 a 60 Hz) la resolución fue en el intervalo de tiempo de 1 a 2.2 s.
2. El análisis de las huellas de adquisición en el dominio tiempo-frecuencia muestra que las estrías características de la huella de adquisición marina se detectaron en el rango de bajas frecuencias (5 a 32.5 Hz).
3. El análisis cualitativo de ruido sísmico aplicado a el cubo Almeja Cisne en etapa de apilado en bruto, es un de los primeros estudiados mediante la descomposición espectral.
4. La combinación de la técnica de descomposición espectral, el atributo de envolvente de la señal y el uso de crossplots en el cubo preliminar Almeja-Cisne 3D, permitieron visualizar y detectar cualitativamente tres ruidos sísmicos como son: dispersivo, lineal e interferencia sísmica.
5. Los resultados encontrados en el análisis para el cálculo de la relación S/R, muestran que los valores altos (entre 6 y 12) de la relación S/R, se encontraron en el cubo de baja frecuencia (5 a 18.75 Hz), mientras que valores muy bajos (2 a 0.02) se vieron desde el segundo al quinto cubo de descomposición espectral, para un rango de tiempo de 1.1 a 1.6 s.

Observamos que los resultados obtenidos en frecuencias bajas ponen de manifiesto que la técnica de descomposición espectral podría ser deseable de ser aplicada y analizada en información sísmica pre-apilada, ya que en muchos campos petroleros los yacimientos son diagnosticados en zonas de bajas frecuencias, y así mismo podría obtener una estimación de espesores de capas delgadas en estudios de estratigrafía, considerando la buena resolución de los cubos de altas frecuencias.

Este análisis es recomendable aplicarse a la información sísmica marina de campo, para actuar como un indicador de la calidad de la información sísmica adquirida.

APÉNDICE A

TRANSFORMADA DE ONDÍCULA

D. Gabor (1946,1951) introdujo el método de muestreo en 2-D en los dominios tanto de tiempo y frecuencia para combinar las ventajas de los dos métodos estándar de muestreo. Tal método conduce hacia modelos matemáticos, los cuales mejoran la propagación de la onda que el uso por separado de los dominios estándar.

Ondas monocromáticas: Un señal real monocromática puede ser representada como:

$$s(t) = a \cos \omega t + b \sin \omega t, \quad (9)$$

donde:

$$\begin{aligned} \cos \omega t &= \operatorname{Re}(e^{i\omega t}), \\ \sin \omega t &= -\operatorname{Re}(ie^{i\omega t}), \end{aligned}$$

donde Re representa la parte real de una cantidad compleja; entonces tendríamos:

$$s(t) = a(e^{i\omega t} + e^{-i\omega t})/2 + b(e^{i\omega t} - e^{-i\omega t})/2i, \quad (10)$$

y

$$s(t) = a(e^{i\omega t} + e^{-i\omega t})/2 - ib(e^{i\omega t} - e^{-i\omega t})/2, \quad (11)$$

o más simple,

$$s(t) = 1/2[(a - ib)e^{i\omega t} + (a + ib)e^{-i\omega t}]. \quad (12)$$

En esta última expresión, el primer término representa las frecuencias positivas y la segunda, las frecuencias negativas.

Para hacer estas expresiones más simples, podemos escribir:

$$a - ib = A e^{i\phi},$$

y entonces,

$$s(t) = 1/2 A[e^{i(\omega t + \phi)} + e^{-i(\omega t + \phi)}]. \quad (13)$$

Se debe notar que el segundo término de la última expresión es el conjugado del primero. La señal $s(t)$ es aquella que esta completamente definida solo por el primer término. En el dominio de la frecuencia angular, la transformada de fourier de $s(t)$ es $S(\omega) = a + ib = A e^{-i\phi}$. La señal monocromática $s(t)$ puede ser representada como una función de dos variables, en el dominio del tiempo-frecuencia: $S(t,\omega) = A e^{i(\omega t + \phi)}$. A y ϕ son dos parámetros que pueden tener cualquier valor.

Ancho de banda de las ondas

En la representación tiempo-frecuencia, debemos considerar que las ondas son construidas de interferencias, e.g., sumas complejas de un número infinito de ondas monocromáticas. Esto se conoce como la transformada inversa de fourier:

$$s(t) = \int_0^{\infty} 1/2 A(\omega)[e^{i[\omega t + \phi(\omega)]} + e^{-i[\omega t + \phi(\omega)]}]d\omega, \quad (14)$$

o frecuencias angulares usando,

$$s(t) = 1/2\pi \int_0^{\infty} 1/2 A(\omega)[e^{i[\omega t + \phi(\omega)]} + e^{-i[\omega t + \phi(\omega)]}]d\omega. \quad (15)$$

Aquí se usan solo frecuencias positivas $\omega \in [0, \infty]$. Nos permite definir

entonces

$$s(t) = 1/2[\psi(t) + \psi^*(t)]. \quad (16)$$

$\psi(t)$ es llamada la señal compleja correspondiente a $s(t)$.

Ahora, regresando a la transformada de fourier, nosotros podemos introducir las frecuencias negativas para una señal real $s(t)$, que implica:

$$\begin{cases} A(-\omega) = A(\omega), \\ \phi(-\omega) = -\phi(\omega). \end{cases}$$

Entonces la transformada inversa de fourier llega a ser:

$$s(t) = 1/2\pi \int_{-\infty}^{+\infty} 1/2 A(\omega) e^{i[\omega t + \phi(\omega)]} d\omega. \quad (17)$$

Comparando las expresiones (14) y (15), representan la señal real $s(t)$ de la formula dada por la señal compleja. La integración es dos veces más grande, pero la amplitud es reducida a la mitad.

Respecto a la transformada de fourier, nosotros podemos considerar obtenerla por la crosscorrelación compleja de la señal $s(t)$ con una serie de funciones exponenciales complejas (coseno y seno) que representan las ondas monocromáticas elementales, las cuales son un conjunto de ondas básicas para la descomposición espectral. Usando solo frecuencias positivas, podemos leer la suma de estas croscorelaciones complejas como sigue:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(-t) \cdot \cos \omega t dt + i \int_{-\infty}^{+\infty} s(-t) \sin \omega t dt, \quad (18)$$

o

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(-t) e^{i\omega t} dt, \quad (19)$$

o permutando t por $-t$

$$S^*(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-i\omega t} dt \quad (20)$$

e introduciendo la señal compleja

$$S(\omega) = 1/2 \int_{-\infty}^{+\infty} \psi^*(t) e^{i\omega t} dt, \quad (21)$$

la cual representa la crosscorrelación compleja de la señal $\Psi(t)$ con la onda monocromáticas $e^{i\omega t}$.

Expansión de Gabor

Teoría de muestreo en el dominio tiempo-frecuencia

Usando la representación tiempo-frecuencia, se puede definir "espectro de frecuencia instantánea" y de allí obtener un mejor modelo matemático de señales reales que con la "señal analítica", conduciendo a obtener tanto la frecuencia instantánea como la correspondiente fase.

La representación $S(t, \omega)$ es un problema práctico en 2D que involucra t y ω . Gabor logró resolverlo, usando un muestreo regular en áreas pequeñas lo que conduce a un plano de información regular con celdas rectangulares de tamaño constante, y el rango de muestreo se define como Δt para la escala en tiempo y $\Delta \omega$ para la escala de frecuencia. En cada celda $C(t_i, \omega_j)$ o $C(i, j)$ de esta pequeña área, el muestreo elemental de la función $S(t, \omega)$ es definida por su amplitud A y su fase Φ :

$$\begin{aligned} A(t_i, \omega_j) &= A(i, j), \\ \Phi(t_i, \omega_j) &= \Phi(i, j). \end{aligned}$$

Un muestreo de la función S no debe ser considerado como un valor escalar e inclusive como número complejo, pero como resultado de un promedio de la función S en la celda $C(i, j)$; un conjunto de señales elementales son tomadas como base para la descomposición de la función S .

Los dos casos comunes de muestreo son:

(a) Muestreo en el dominio del tiempo:

En este caso particular, las señales elementales tomadas como las ondículas básicas lo son las funciones Dirac, infinitamente angostas en el dominio del tiempo pero con una amplitud infinita; entonces $\Delta t = 0$ y $\Delta \omega = \infty$.

En la práctica se usó como ondícula básica señales las cuales se pueden representar física y numéricamente. El muestreo de la pequeña área, de la celda correspondiente presenta las dimensiones de $\Delta t = \varepsilon$ (valor muy pequeño) y $\Delta w = k / \varepsilon$ (valor muy grande).

(b) Muestreo en el dominio de la frecuencia:

En este caso, las ondículas básicas elementales son ondas monocromáticas exponenciales complejas las cuales se leen como e^{iwt} . Las celdas del correspondiente muestreo de la pequeña área tiene como dimensiones $\Delta t = \infty$ y $\Delta w = 0$.

El correspondiente muestreo de la pequeña área presenta las dimensiones de $\Delta t = k / \varepsilon$ (muy largo) y $\Delta w = \varepsilon$ (muy pequeño).

Teoría de muestreo y resolución

Los métodos de resolución para señales fueron desarrollados por físicos en un principio como una extrapolación de mediciones experimentales de cantidades escalares físicas. Esta medición de cantidades escalares, corresponden a características específicas de dos objetos de diferente material y logran medirse por la comparación de sus pesos.

Este método de mediciones se pueden trasladar para el caso de muestreo de señales pseudo-periódicas o ondas, pero debemos recordar los siguientes puntos: (1) El muestreo de señales es logrado por una secuencia sucesiva de operaciones promedio, cuyo orden es impuesto previamente. (2) Las mediciones de dos señales consecutivas pueden no corresponder al total de la información independiente. Es de allí muy difícil, pero no imposible, distinguir y separar perfectamente dos señales independientes. Esto permite tener la noción del poder de resolución, lo cual representa la habilidad del método de medición para separar dos señales elementales que corresponde a dos eventos. (3) La cantidad medida no es un escalar muy grande, pero es de tipo complejo y periódico. La unidad de peso de la medición debe ser señales elementales complejas. Por otro lado, al final de la cuantificación dentro de los valores muestreados, el resultado de la

medición es una cantidad física cuya dimensión física es la raíz cuadrada de la energía; de allí que la linealidad de las operaciones de medición son observadas por señales complejas.

(4) Si las señales son afectadas por ruido aleatorio, debemos resaltar la exactitud de las mediciones de las señales, por lo que la información se puede ejecutar, y se debe repetir la operación de las mediciones de tal manera que separe las señales de ruido.

Resolución en tiempo y en frecuencia.

Tanto el muestreo en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia, las dimensiones (diámetro o ancho de banda) de las señales en los dos dominios conjugados están relacionados por la expresión $\Delta t \Delta w \geq k$, con k como número constante. Tener la opción de elegir un muestreo por rejilla de la información adaptada a señales pseudo-periódicas como trazas sísmicas, haría que los valores se comprimieran entre Δt y Δw cuando se definan las señales elementales para la representación de trazas en el dominio tiempo-frecuencia.

Ondícula Gabor

Se podría escoger usar en ambos dominios (tiempo o frecuencia) la envolvente rectangular para señales básicas, pero entonces, en el dominio conjugado, su transformada es una función $\text{sinc} x / x$. Usando tales señales involucra efectos de distorsión en el cálculo (fenómeno de Gibbs), además no son señales físicas reales; de allí que se prefiere usar la envolvente Gaussiana para ondículas básicas, donde el mismo tipo de función es su transformada en el dominio conjugado.

Tales señales son mas cercanas a las señales físicas y sus envolventes correspondientes a la raíz cuadrada de la intensidad en difracción spot, la cual esta directamente relacionada a la resolución.

Tales ondículas complejas fueron introducidas por Gabor (1946). En el dominio del tiempo, ellas están representadas por el producto de una función seno compleja por la envolvente Gaussiana.

La parte real de tales ondículas (o ondícula coseno) es una ondícula de fase cero, simétrica en el dominio del tiempo. La parte imaginaria (o ondícula seno) es anti-simétrica, y en cuadratura con la correspondiente ondícula coseno.

En la expansión particular usada por Gabor, la información plana esta espaciada usando áreas pequeñas regulares, las celdas las cuales son sus dimensiones están relacionadas por $\Delta t \Delta \omega = k$. Por lo que, en el dominio del tiempo, Δt es constante y las envolventes de cada ondícula básica son idénticos; en el dominio de la frecuencia, el rango de muestreo es constante, teniendo el valor de $\Delta \omega$.

La figura 1A representa el una ondícula Gabor compleja usada como ondícula elemental para la expansión de Gabor.

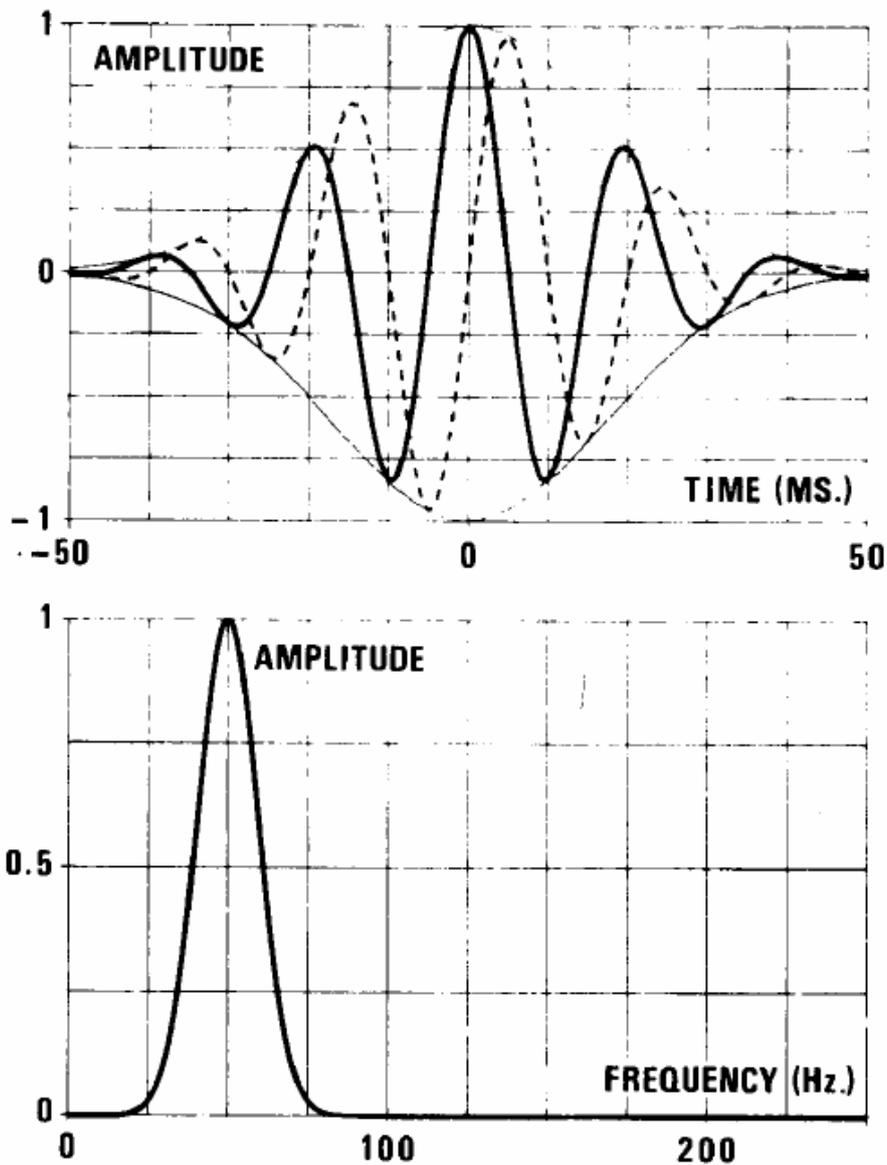


Figura 1A Ejemplo de ondícula Gabor compleja usada como ondícula elemental en la expansión de Gabor.

Energía por la ondícula Gabor.

La amplitud usada por una onda monocromática (función de una onda monocromática compleja):

$$s(t) = U e^{i\omega(t - x/V)} \quad (22)$$

donde U es la máxima velocidad de la partícula en el medio propagado, ρ densidad del medio, x es el espacio en coordenadas y V la aceleración de la onda.

El total de la densidad de la energía usada (cinética + potencial) es $W_T = U^2 \rho$. La densidad de la energía cinética usada por la onda sería la mitad de W_T , es decir $W_T = 1/2 U^2 \rho$.

Para señales de tiempo limitado, definidas como ondas seno truncadas de duración dt , la energía total usada por una onda plana sería $W_T = U^2 \rho dt$.

Para una ondícula Gabor con una envolvente Gaussiana, el total de la energía usada es obtenida de la integración de la formula anterior, para un modulo de onda compleja la función Gaussiana en tiempo.

$$\begin{aligned} W_T &= \rho \int_{-\infty}^{+\infty} [U e^{-(2t/\Delta t)^2 \ln 2}]^2 dt & (23) \\ &= U^2 \rho \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-2(2t/\Delta t)^2 \ln 2} dt \\ &= k U^2 \rho \Delta t, \end{aligned}$$

con $k = 1/2[\pi/(2 \ln 2)]^{1/2} = 0.7526$

Para una onda monocromática, la velocidad de la partícula U esta relacionada al desplazamiento de la partícula A por la relación:

$$U = A \omega. \quad (24)$$

por lo que podemos escribir:

$$W_T = k A^2 \omega^2 \rho \Delta t. \quad (25)$$

Y si $w\Delta t = \text{constante}$, y es el caso para un conjunto de ondículas con una forma de radio constante, tendríamos que $W_T = K A^2 \rho w$.

Por lo que, este subconjunto particular de ondículas, como los fotones, representan para la energía usada una relación directa con la frecuencia.

Celda muestreada por la Ondícula Gabor.

(a) Distribución de Energía en un plano de información.

Una vez que la señal en 2D (traza sísmica) es muestreada en el dominio tiempo-frecuencia, necesitamos representar exactamente su distribución de

energía y fase, por ejemplo, su amplitud compleja como una función 2D de tiempo y frecuencia.

Nosotros sabemos que las ondas monocromáticas su energía usada es proporcional a U^2 .

Por lo que, ni una onda monocromática pura ni un pulso de Dirac existe en la práctica, y debemos entonces definir un intervalo de tiempo ∂t , para un intervalo de frecuencia $\partial \omega$, y entonces la energía usada por una celda C muestreada tiene dimensiones ∂t y $\partial \omega$.

Si U representa el promedio de la densidad de la distribución de U en la celda C , la cantidad de energía en la celda es:

$$W_T(C) = \langle U \rangle^2 \rho \times t \partial \omega = k \rho \langle U \rangle^2. \quad (26)$$

Por lo tanto, para un medio de propagación dado, y celdas de área constante k , la energía elemental para la celda es proporcional al cuadrado de la amplitud.

Finalmente, si U es una función compleja, nosotros podemos representarla en cada celda por un valor complejo dado por su amplitud $A(t, \omega)$ y su fase $\Phi(t, \omega)$. La energía usada es por lo tanto proporcional a A^2 .

(b) Resolución en celda y resolución de ondícula.

La teoría de muestreo implica una ambigüedad acerca de la resolución, de hecho, nosotros debemos distinguir entre dos juegos de símbolos en el dominio tiempo-frecuencia: Δt y $\Delta \omega$ para las dimensiones de la ondícula, ∂t y $\partial \omega$ para las dimensiones de la celda en la rejilla muestreada. Así mismo, para realizar el muestreo de señales por descomposición en una base de un conjunto de ondículas que son usadas como ondículas elementales para la operación medición de las señales. La figura 2A presenta como operan las celdas en el muestreo en el dominio tiempo-frecuencia usada para la expansión de Gabor.

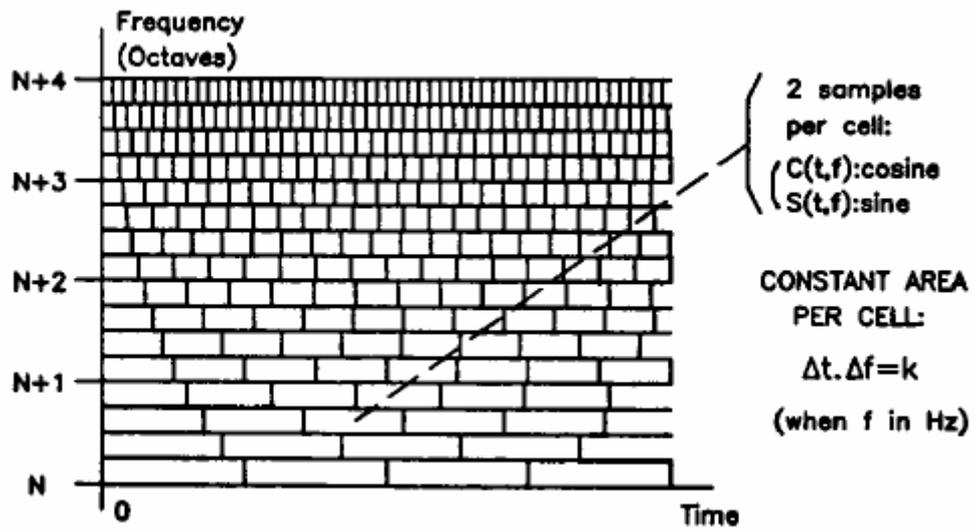


Figura 2A Rejillas del muestreo de áreas por celda en el dominio tiempo-frecuencia usada para la expansión de Gabor.

APÉNDICE B

RESUMEN DE INTERVALOS EN0020TIEMPO DE SECCIONES HORIZONTALES Y ESPACIOS EN INLINE Y XLINE EN QUE SE ENCONTRARON LAS HUELLAS DE ADQUISICIÓN EN CADA CUBO DE DESCOMPOSICIÓN ESPECTRAL

(a) Cubo-1 de descomposición espectral

SECCIONES HORIZONTALES (s)	XLINE	INLINE
1188	2880-3081	1832
1188	3109-3054	1802
1188	3011-3072	1784
1184	2862-2988	1839
1184	2878-2989	1835
1184	2875-3071 2707- 2732	1832
1184	3024-3057	1828
1184	3051-3110	1803
1184	3004-3068	1784
1184	2899-2966	1768
1180	2861-2899	1839
1180	2877-3033	1835
1180	2874-3064 2707-2725	1832
1180	3055-3104	1803
1176	2859-2899	1839
1176	2868-2943	1835
1176	2875-3064 2707- 2721	1832
1176	3021-3060	1828
1176	2897-2957	1818
1176	3022-3108	1808
1176	3055-3098	1803
1172	2859-2897	1839
1172	2865-2912	1835
1172	2871-3048 2706-2720	1832
1172	2897-2945	1818
1172	2973-3106	1808
1172	3031-3099	1800
1172	3036-3077	1793
1168	2858-2882	1839
1168	2861-2885	1832
1168	2894-2945	1818
1168	2914-2952	1805
1168	3061-3097	1800
1164	2832-2948	1832
1164	2977-3102	1810
1164	2914-2953	1804

1164	3085-3119	1769
1164	3095-3120	1767
1160	2829-2945	1832
1160	2862-2903	1828
1160	2829-2958	1806
1160	2784-2892	1798
1160	3055-3113	1769
1156	2843-2931	1832
1156	2805-2923	1828
1156	2828-2865	1806
1156	2885-2914	1803
1156	2823-2874	1799
1156	3065-3105	1774
1152	2846-2923	1832
1152	2857-2929	1828
1152	2822-2868	1799
1152	2830-2860	1785
1152	3058-3107	1776
1148	2847-2889	1832
1148	2853-2886	1828
1148	2809-2865	1799
1148	2798-2825	1786
1144	2884-2913	1816
1144	2806-2860	1799
1140	2885-2919	1816
1140	2805-2846	1799
1136	2985-3017	1832
1136	2887-2942	1816
1132	2987-3051	1832
1128	-----	-----
1124	3014-3061	1850
1124	3020-3055	1847
1124	3057-3092	1845
1124	3060-3094	1841
1124	3063-3117	1770
1124	2978-3084	1764
1120	3010-3052	1847
1120	3057-3093	1841
1120	3049-3113	1770
1120	2975-3016	1767
1120	2996-3079	1764
1116	3025-3056	1845
1116	3024-3087	1841
1116	3008-3094	1769
1112	3000-3082	1841
1112	2929-2887	1832
1112	2979-3064	1773
1108	2996-3072	1841
1108	2885-2928	1832

1104	2975-3000	1839
1100	2942-2965	1845
1096	2961-2998	1839
1096	2968-3047	1835
1096	2959-3072	1832
1092	2957-3064	1832

(b) Cubo-2 de descomposición espectral

SECCIONES HORIZONTALES (s)	XLINE	INLINE
1204	2857-3069	1832
1204	3057-3095	1800
1204	3066-3103	1797
1204	3056-3078	1793
1204	2988-3024	1768
1200	2973-3017	1832
1200	3062-3112	1800
1200	3062-3103	1797
1200	3087-3115	1793
1196	-----	-----
1192	2867-2943	1832
1192	3065-3111	1800
1188	2930-2987	1836
1188	2871-2951	1832
1188	3059-3106	1800
1188	3003-3038	1784
1184	2878-2972	1835
1184	2876-3069	1832
1184	3054-3109	1800
1184	3004-3038	1784
1180	2866-2903	1839
1180	2879-2930	1835
1180	2877-3067	1832
1180	3055-3096	1800
1180	3012-3058	1786
1176	2862-2897	1839
1176	2876-3068	1832
1176	3058-3089	1806
1176	3063-3106	1800
1168	3017-3080	1806
1168	3067-3099	1800
1168	3031-3072	1786
1164	3095-3116	1812
1164	3015-3073	1806
1164	3084-3110	1800
1164	2996-3029	1784
1160	3055-3116	1812
1160	2859-2922	1806
1160	2831-2885	1784

1160	2849-2871	1780
1156	3000-3117	1812
1156	3061-3102 2829-2871	1800
1156	2831-2882	1784
1152	2827-2921	1832
1152	2865-2921	1828
1152	3083-3118	1812
1148	2996-3050	1806
1148	2828-2906	1800
1148	2819-2850	1799
1144	2827-2904	1806
1144	2814-2861	1799
1144	2817-2843	1786
1140	-----	-----
1136	-----	-----
1132	-----	-----
1128	-----	-----
1124	-----	-----
1120	-----	-----
1116	-----	-----
1112	-----	-----
1108	-----	-----
1104	-----	-----
1100	2970-3056	1836
1100	2958-3061	1832
1100	3015-3117	1786
1096	2933-3044	1832
1096	2966-3069	1786
1092	2936-3041	1832

(c) Cubo-3 de descomposición espectral

SECCIONES HORIZONTALES (s)	XLINE	INLINE
1184	2886-3032	1832
1180	-----	-----
1176	3078-3174	1787
1172	-----	-----
.	-----	-----
.	-----	-----
1040	3006-3139	1787
1036	3004-3065	1787
1036	2974-3144	1832

En los cubos 4 y 5 no se detectó ningún patrón lineal que indicara presencia de huellas de adquisición.

APÉNDICE C

DESCRIPCIÓN CUALITATIVA DEL RUIDO SÍSMICO DEL CUBO PRELIMINAR ALMEJA-CISNE 3D.

El ruido sísmico puede ser: a) coherente, o bien, b) incoherente. El ruido coherente se puede seguir cuando menos en unas cuantas trazas; el ruido incoherente es disímil en todas las trazas y no se puede predecir cuál traza será parecida, aun conociendo las trazas vecinas. A veces la diferencia entre ruido coherente e incoherente es simplemente cuestión de escala y si se tuvieran hidrófonos espaciados más estrechamente, el ruido incoherente se pudiera observar como ruido coherente.

En sismología de reflexión, la pobre calidad de la información es frecuentemente causada por altos niveles de ruido coherente. Este ruido puede ser dividido convenientemente en tres clases: arribo-directo, movimiento mecánico del cable (ambiente) y disperso (Regone, 1998).

El ruido de arribo directo viaja directamente de la fuente al receptor y debido a que su tiempo de arribo es solamente dependientemente del offset y de la velocidad de propagación, puede ser atenuado efectivamente tanto en sismología 2D y 3D a través de las técnicas de arreglos de apilamiento, migración y algunos otros métodos de filtros de coherencia.

En el análisis de la línea 1790 del cubo preliminar Almeja-Cisne (figura 1C y 2C), se pueden observar rasgos de este tipo ruido coherente, presenta un patrón lineal cruzado que esta desde 2 hasta 3.6 segundos (óvalo amarillo), y aproximadamente entre los xlines 2300 a 4000, prácticamente en todo el rango xline de este cubo preliminar.

El movimiento mecánico del cable es causado por el arrastre tanto de la embarcación geofísica como por la boyas de las colas, es decir, el registro de éste ruido representa la influencia del ambiente como puede ser la acción del oleaje, el ruido del barco o todas la fluctuaciones de presión en los grupos de hidrófonos a lo largo del cable cuando no hay fuentes disparando.

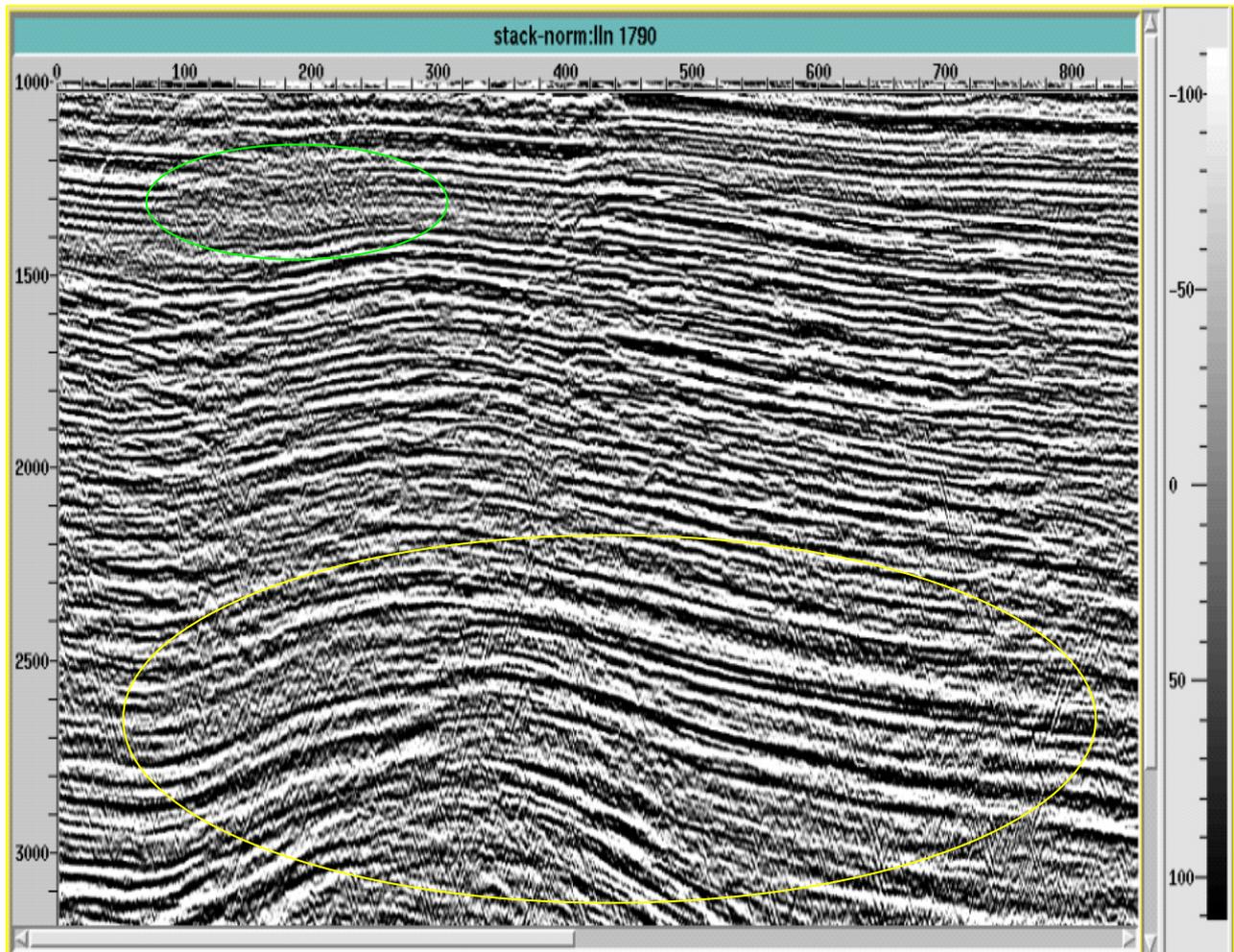


Figura 1C Sección inline 1790 del cubo preliminar Almeja-Cisne, se muestran dos ruidos. El ruido de dispersión mostrado en óvalo verde desde 1.2 a 1.4 s, entre los xlines 2350 a 2650 caracterizado por su patrón tipo hipérbola. Por otro lado, el ruido lineal mostrado prácticamente en toda la parte profunda que va desde 2 hasta 3.6 s, y el rango de xlines es de 2300 a 3140.

El ruido de ambiente es particularmente problemático en información sísmica marina, debido a que sus amplitudes se superponen al espectro de la señal, con lo que contamina a la señal sísmica, que aparece tanto como ruido coherente y aleatorio en ciertos intervalos de muestreo espacial (Smith, 1999).

Con respecto a este ruido, no se muestra con claridad en las 2 figuras de este apéndice, sin embargo, se ven ciertos rasgos muy cercano al ruido de interferencia, el cual se describe más abajo, y que ambos parecen comportarse como ruido incoherente.

El ruido de dispersión es una onda compleja causada por energía que viaja horizontalmente lejos de la fuente de energía y se refleja en las heterogeneidades existentes en el fondo marino.

Este es el ruido que mas afecta a la información sísmica marina, y se puede ver su patrón tipo hipérbola en la figura 1C, encerrado por un óvalo verde, en el intervalo de 1.2 a 1.4 segundos y entre los xlines 2350 a 2650.

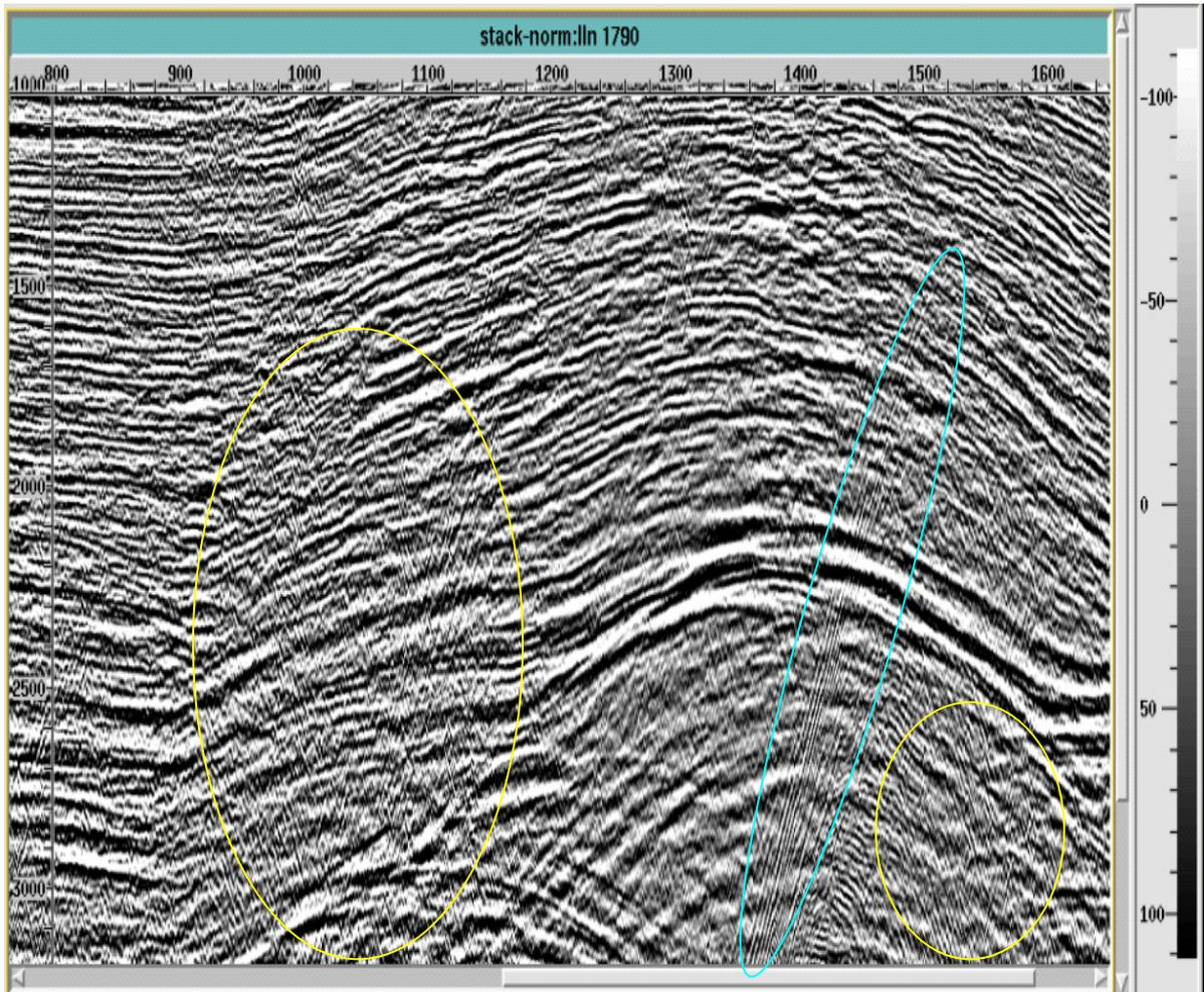


Figura 2C Sección inline 1790 del cubo preliminar Almeja-Cisne, que muestra nuevamente el ruido lineal (óvalo amarillo) desde 1.8 a 3.6 s y en el intervalo xline de 3100 a 3600 y también se le alcanza a ver su rasgo lineal de 2.7 a 3.6 s entre los xlines 3850 a 4000. En óvalo azul se ve el fuerte rasgo lineal paralelo de la interferencia sísmica desde 1.6 a 3.6 s.

La presencia de plataformas marinas o tráfico de barcos en el área de adquisición de información sísmica, puede dar lugar a un ruido denominado de interferencia sísmica, cuya severidad y apariencia depende de su origen (Farmer et al, 1989).

Cabe mencionar que durante la adquisición del levantamiento Almeja-Cisne 3D, había en operación un par de plataformas, y que a pesar del filtraje de ruido durante la adquisición, este ruido de interferencia se ve acentuado desde aproximadamente 1.6 hasta 3.6 s (óvalo azul), su patrón es lineal paralelo, entre los xlines 3500 a 3900, esto se ve muy claramente en la figura 2C.

APÉNDICE D

TABLAS QUE MUESTRAN LOS HORIZONTES F Y S USADOS EN LA EXTRACCIÓN DE MAPAS DE AMPLITUD, CON LOS INTERVALOS EN INLINE Y CROSSLINE EN QUE SE ENCONTRARON LAS HUELLAS DE ADQUISICIÓN DE LOS INLINES 1765 Y 1820 EL DOMINIO TIEMPO-FRECUENCIA

(a) Inline 1765

CUBO	HORIZONTE	INLINE	XLINE
1	s	1832	3089-3321
1	“	1839	2959-3108
1	“	1835	3142-3282
1	“	1807	2891-3000
1	“	1816	2844-2908
1	s	1832	3085-3164
2	f	1832	3084-3180
2	“	1822	3217-3132
2	“	1782	3015-3100
2	“	1814	3114-3058
2	s	1822	3201-3297
3	f	1825	3199-3117
3	s	1783	3022-3085
4	f	-----	-----
4	s	-----	-----
5	f	-----	-----
5	s	-----	-----

(a) Inline 1820

CUBO	HORIZONTE	INLINE	XLINE
1	f	1832	3082-3321
1	“	1835	3047-3187
1	“	1839	2957-3107
1	“	1783	2889-3059
1	“	1828	3202-3278
1	“	1817	2852-3408
1	s	1832	3033-3166
2	f	1822	3221-3119
2	“	1832	3091-3180
2	“	1783	3013-3133
2	“	1839	2956-2999
2	s	1823	3197-3292
3	f	1823	3116-3211
3	s	1783	3019-3080
4	f	-----	-----
4	s	-----	-----
5	f	-----	-----
5	s	-----	-----

APÉNDICE E

NORMALIZACIÓN POR HISTOGRAMA

La información sísmica ha probado ser la que mejor describe con detalle al subsuelo en la exploración de hidrocarburos. Por lo que el valor de la información es incalculable y muchas veces puede ser mal interpretada por no estar visible su verdadera forma de amplitud.

En este sentido, es necesario escalar la información sísmica antes de que obtener la imagen adecuada para interpretarla. Esto se puede llevar a cabo a través de la técnica denominada Normalización por histograma (NH), originalmente desarrollada en procesado de campo.

El método NH tiene la ventaja de preservar algunas amplitudes características mientras balancea el resto de amplitudes. Es especialmente útil para interpretación estratigráfica; así mismo, esta libre de problemas de zonas somera típicamente asociados con el escalamiento AGC, que puede marcar la diferencia en la visualización de ciertas características de la información sísmica.

La NH consiste en lograr un promedio de valores de amplitud y esto se logra a través del concepto de la media gaussiana (\bar{x}), para lo cual el software de Paradigm Geophysical® (2003), uso el concepto de la distribución gaussiana, en ese sentido, y aunada a la relación que existe entre los valores de amplitud de la información sísmica y la distribución gaussiana, se da una breve descripción al respecto.

La distribución de probabilidad más importante en todo el campo de la estadística es la distribución normal. Su gráfica cotidianamente recibe el nombre de curva normal, es la curva en forma de campana que se muestra en la Figura E1, la cual describe en forma aproximada muchos fenómenos que ocurren en la naturaleza, la industria y la investigación. Los errores pequeños en las mediciones científicas se aproximan hasta límites

extremadamente pequeños gracias a la distribución normal. En 1733, Abraham DeMoivre desarrolló la ecuación matemática de la curva normal. Proporcionó una base la cual se fundamenta gran parte de la teoría de la estadística inductiva. A la distribución normal, frecuente, se le llama distribución gaussiana, en honor a Kart Friedrich Gauss (1777-1855), quien también derivó su ecuación de un estudio de errores en mediciones repetidas de la misma cantidad.

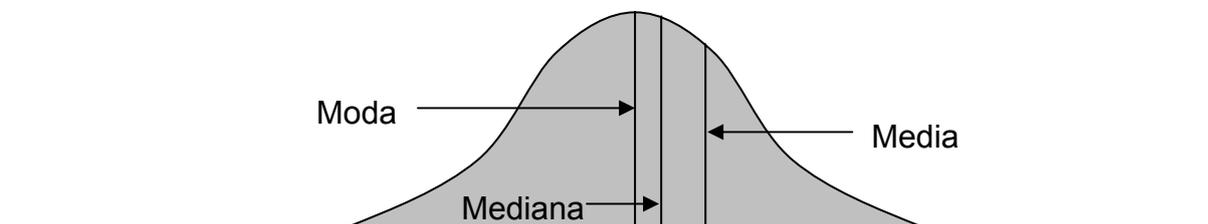


Figura E1 Distribución normal (Gaussiana), con sus variables estadísticas características: moda, mediana y media.

Las características más importantes de la distribución son:

- Está definida única y exclusivamente por dos parámetros estadísticos: la media μ y la desviación estándar σ .
- La moda, mediana, y media son aproximadas entre ellas.
- Es simétrica y los puntos de inflexión de la curva ocurren en $\mu - \sigma$ y $\mu + \sigma$. La probabilidad de que la variable aleatoria x se encuentre entre $\mu - \sigma$ y $\mu + \sigma$ es 0.6826. El área bajo la curva entre los límites de $\mu \pm 2\sigma$ es de 0.9544 mientras que para $\mu \pm 3\sigma$ es 0.9974.
- Los límites teóricos de la distribución son $-\infty$ y $+\infty$. En la práctica es común truncar la variable aleatoria x a valores de 4 ó 5 desviaciones estándar es decir $\mu \pm 4\sigma$.

En este sentido, sabiendo que los valores de amplitud que se encuentran distribuidos bajo esa curva gaussiana, lo que se hace es promediar tomando el espacio de valores comprendidos en la media gaussiana tanto positivos como negativos, y aplicar un balanceo, de tal forma que el resultado es un histograma casi plano como el de la figura E2, excepción en el eje por cero, ya que representa los puntos de cruce por cero de la información original.

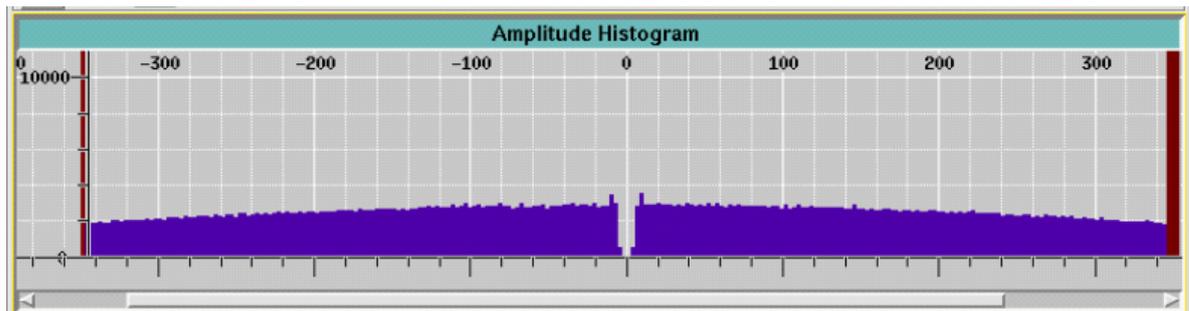


Figura E2 Histograma de la distribución Gaussiana normalizada del cubo preliminar Almeja Cisne 3D.

APÉNDICE F

RESUMEN DE LOS INTERVALOS DE TIEMPO Y ESPACIO EN QUE SE ENCONTRARON LA SEÑAL Y EL RUIDO SÍSMICO, REPRESENTADA POR SUS INLINE Y XLINES EN LOS CUBOS DE DESCOMPOSICIÓN ESPECTRAL.

(a) Primer cubo de descomposición espectral

SEÑAL		RUIDO	TIEMPO	INLINE	XLINE
TIEMPO	XLINE				
1 – 1.1	2600-3400	Disperso	1.3-1.5	1765	2300-2700
1.2-1.5	2800-3300	Lineal	2.5-3.6	1765	2300-4000
1.5-2.3	2300-3200				
2.4-3.0	2300-4000				
3.0-3.5	2300-3500				
1.5-1.8	3400-3600				
1.0-1.1	2500-3400				
1.0-1.1	2300-3400	Disperso	1.3-1.5	1780	2300-2700
1.3-1.5	2750-3150	Lineal	2.5-3.6	1780	2300-4000
1.5-2.2	2300-3150				
2.4-3.0	2300-4000				
3.0-3.6	2300-2800				
3.0-3.6	3200-3500				
1-1.1	2600-3300	Disperso	1.3-1.5	1795	2300-2700
1.3-1.7	2700-3100	Lineal	2.5-3.6	1795	2300-3500
2.4-2.6	2300-4000				
2.7-3.6	2300-2800				
2.6-2.7	2800-3200				
1-1.1	2600-3400	Disperso	1.3-1.5	1810	2300-2750
1.3-1.7	2600-3000	Lineal	1-2.3	1810	3500-3900
2.1-2.5	2700-3200	Lineal	2.5-3.6	1810	3500-3900
2.6-2.8	2900-3200				
2.6-3.6	2300-2900				
2.5-3.6	3200-3500				
1-1.1	2300-3400	Disperso	1.3-1.4	1825	2300-2600
2-2.5	2700-3600	Lineal	2.5-3.6	1825	2300-3400
3-3.6	2300-2800	Lineal	1-3.6	1825	3500-3800
1-1.1	2300-3400	Disperso	1.3-1.4	1840	2300-2600
2-2.6	2600-3500	Lineal	2.5-3.6	1840	2300-3500
3-3.6	2300-2600	Lineal	1-3.6	1840	3400-3800
1-1.1	2300-3400	Disperso	1.2-1.5	1855	2300-2600
2-2.4	2600-3500	Lineal	2.5-3.6	1855	2300-3400
2.5-3	2800-3300	Lineal	1-3.6	1855	3400-3800
3-3.6	2300-2500				

(b) Segundo cubo de descomposición espectral

SEÑAL		RUIDO	TIEMPO	INLINE	XLINE
TIEMPO	XLINE				
1 – 3.4	2300-4000	Disperso	1.3-1.5	1765	2300-2700
		Lineal	1.0-3.6	1765	2600-2800
		Lineal	1-3.6	1765	3000-3400
		Interferencia	1-3.6	1765	3500-3800
1-3.4	2300-4000	Disperso	1.3-1.5	1780	2300-2700
		Lineal	2.5-3.6	1780	2300-3400
		Lineal	2.5-3.6	1780	3600-3800
1-3.4	2600-3500	Disperso	1.3-1.5	1795	2300-2600
		Lineal	2.0-3.6	1795	2300-3500
		Interferencia	2.5-3.6	1795	2600-3800
1-3.4	2300-3500	Disperso	1.3-1.5	1810	2300-2600
		Lineal	2.5-3.6	1810	2600-2800
		Lineal	1.5-3.6	1810	3400-3500
		Lineal	1-3.6	1810	3500-3800
1-3.4	2600-3400	Disperso	1.3-1.4	1825	2300-2700
		Lineal	2.5-3.6	1825	2300-2800
		Lineal	2.5-3.6	1825	3000-3500
		Lineal	1-3.6	1825	3500-3800
1-1.1	2300-3400	Disperso	1.3-1.5	1840	2300-2600
2-2.5	2800-3200	Lineal	2.5-3.6	1840	2300-3500
1-3.4	2800-3200	Lineal	2.5-3.6	1855	2300-3500

(c) Tercer cubo de descomposición espectral

SEÑAL		RUIDO	TIEMPO	INLINE	XLINE
TIEMPO	XLINE				
1 – 3.0	2300-4000	Disperso	1.3-1.5	1765	2400-2700
		Lineal	2.0-3.6	1765	2300-3600
		Interferencia	2.5-3.6	1765	3600-3800
1-2.8	2300-4000	Disperso	1.3-1.4	1780	2400-2650
		Lineal	2.5-3.6	1780	2300-3500
		Interferencia	2.5-3.6	1780	3600-3800
1-2.5	2600-3400	Disperso	1.3-1.5	1795	2400-2600
		Lineal	2.0-3.6	1795	2300-3500
		Interferencia	2.5-3.6	1795	3600-3800
1-2.6	2300-3500	Disperso	1.3-1.5	1810	2300-3500
		Interferencia	2.0-3.6	1810	3700-3800
1-2.5	2600-3200	Lineal	2.0-3.6	1825	2600-3500
1-2.3	2500-3200	Lineal	2.5-3.6	1840	2300-3500
1-2.3	2600-3200	Lineal	1.5-3.6	1855	2300-3400
		Lineal	1.5-3.6	1855	3700-4000

(d) Cuarto cubo de descomposición espectral

SEÑAL		RUIDO	TIEMPO	INLINE	XLINE
TIEMPO	XLINE				
1-2.2	2300-4000	Lineal	2.0-3.6	1765	2300-3500
		Interferencia	2.5-3.6	1765	3600-3800
1-2.2	2300-4000	Lineal	2.5-3.6	1780	2300-3500
		Interferencia	2.5-3.6	1780	3600-3800
1-2.0	2300-4000	Lineal	2.0-3.6	1795	2300-3500
		Interferencia	2.5-3.6	1795	3600-3800
1-1.8	2600-3400	Lineal	2.0-3.6	1810	2600-3500
1-1.7	2300-3400	Lineal	1.5-3.6	1825	2300-3500
		Interferencia	2.0-3.6	1825	3700-3850
1-1.5	2300-3200	Lineal	2.0-2.6	1840	2300-3200
1-1.4	2300-3200	Lineal	1.5-3.6	1855	2300-3200

(e) Quinto cubo de descomposición espectral

SEÑAL		RUIDO	TIEMPO	INLINE	XLINE
TIEMPO	XLINE				
1-2.0	2300-4000	Lineal	2.0-3.0	1765	2300-3200
		Interferencia	2.5-3.6	1765	3700-3800
1-2.0	2300-3200	Lineal	2.0-3.0	1780	2300-3100
		Interferencia	3.0-3.6	1780	3700-3800
1-1.7	2300-3200	Lineal	2.0-3.6	1795	2300-3200
		Interferencia	2.5-3.6	1795	3700-3800
1-1.6	2300-3400	Disperso	1.3-1.5	1810	2300-2500
1-1.5	2300-3400	Lineal	2.0-3.6	1825	2300-3500
1-1.5	2300-3200	Lineal	1.5-3.6	1840	2700-3100
1-1.5	2300-3100	Lineal	2.0-3.6	1855	2400-2800

APENDICE G

RESUMEN DE PARÁMETROS ESTADÍSTICOS OBTENIDOS A PARTIR DE LA CORRELACIÓN ENTRE CADA UNO DE LOS CUBOS DE DESCOMPOSICIÓN ESPECTRAL VS CUBO PRELIMINAR DEL VOLUMEN ALMEJA –CISNE, ASÍ MISMO LOS VALORES DE LAS ESTIMACIONES S/R REALIZADAS A CADA UNO DE LOS 5 CUBOS DE 18 INLINES.

CUBO	INLINE	\bar{x}	σ	n	S/N
1	1765	1274	47807	205282	12
2	1765	575	54741	223964	4.9
3	1765	102	61130	223289	0.78
4	1765	72	43966	203443	0.73
5	1765	41	44658	231299	0.44
1	1770	1077	45052	210059	10.9
2	1770	716	53111	225281	6.3
3	1770	126	60906	242423	1
4	1770	60	42722	241682	0.69
5	1770	30	25006	276843	0.63
1	1775	659	47400	210991	6.3
2	1775	284	53711	228775	2.5
3	1775	66	58250	236136	0.5
4	1775	19	39499	219474	0.22
5	1775	8	22913	228820	0.16
1	1780	342	44485	234005	3.7
2	1780	115	50648	240784	1.1
3	1780	28	56167	248853	0.24
4	1780	13	40443	256036	0.16
5	1780	1	23597	259574	0.02
1	1785	658	39116	230485	8
2	1785	286	44826	255330	3.2
3	1785	96	51277	259332	0.9
4	1785	35	38704	272692	0.4
5	1785	9	23541	279109	0.2
1	1790	278	35695	217718	3.6
2	1790	62	41689	237040	0.72
3	1790	7	48742	251696	0.07
4	1790	5	36394	251703	0.06
5	1790	1	22261	273344	0.02
1	1795	233	33442	232236	3.35
2	1795	68	38710	240799	0.86
3	1795	33	45131	248215	0.36
4	1795	10	34777	268789	0.14
5	1795	5	21664	255880	0.11
1	1800	143	34030	215748	1.95
2	1800	137	38448	260130	1.8
3	1800	24	43414	275055	0.28
4	1800	6	33387	271851	0.09
5	1800	2	20572	284542	0.05

CUBO	INLINE	\bar{x}	σ	n	S/N
1	1805	171	35140	235468	2.3
2	1805	97	38903	263086	1.27
3	1805	15	42844	256884	0.17
4	1805	11	31760	270748	0.17
5	1805	7	19259	279800	0.16
1	1810	150	31057	215603	2.2
2	1810	100	36013	262169	1.4
3	1810	74	40874	240070	0.8
4	1810	13	32332	276535	0.2
5	1810	6	20585	287117	0.1
1	1815	184	30441	217258	2.8
2	1815	118	35389	251050	1.6
3	1815	29	40681	267383	0.36
4	1815	8	31871	281798	0.13
5	1815	1	19639	322044	0.2
1	1820	188	29075	232765	3
2	1820	58	34848	2060140	0.8
3	1820	43	41138	265202	0.5
4	1820	30	31748	252778	0.4
5	1820	9	19548	301354	0.2
1	1825	335	29465	233533	5.4
2	1825	205	34939	273320	3
3	1825	45	41011	260438	0.55
4	1825	34	31792	291914	0.50
5	1825	5	19786	295460	0.13
1	1830	297	29136	247093	5
2	1830	218	34805	291906	3.3
3	1830	74	39581	289328	1
4	1830	15	29960	291434	0.27
5	1830	7	18046	311724	0.21
1	1835	179	24892	215616	3.3
2	1835	151	33145	258284	2.3
3	1835	52	40230	279428	0.6
4	1835	14	31477	295345	0.24
5	1835	8	19689	288052	0.21
1	1840	226	29544	234871	3.7
2	1840	158	34188	254602	2.3
3	1840	37	38471	272868	0.5
4	1840	5	29838	265003	0.08
5	1840	2.5	17983	270449	0.07

CUBO	INLINE	\bar{x}	σ	n	S/N
1	1845	285	26810	248315	5.2
2	1845	143	31623	227345	2.1
3	1845	42	38341	311404	0.6
4	1845	15	30592	294061	0.2
5	1845	5	18746	306695	0.1
1	1850	360	29190	235224	6
2	1850	189	34649	256908	2.7
3	1850	45	40478	286582	0.5
4	1850	24	31664	267425	0.39
5	1850	11	19600	291208	0.30
1	1855	270	32147	218297	3.9
2	1855	118	30038	240698	1.9
3	1855	79	40272	283481	1
4	1855	12	31215	291585	0.2
5	1855	3	19519	307759	0.08

Glosario de Términos

AVO	Amplitud la señal sísmica contra distancia variable.
AGC	Control automático de ganancia.
BIN	Rejilla o celda establecida en el subsuelo durante el diseño de parámetros sísmicos.
CMP	Punto de reflexión teórico que esta en medio de una fuente y un receptor.
Composite display	Combinación de secciones horizontales con verticales.
CROSSLINE	Dirección perpendicular al tendido de las líneas receptoras.
DMO (Dip move out)	El cambio de la reflexión en tiempo debido a cambio en posición del punto de reflexión de trazas de CMP.
Flat spot	Reflexión sísmica horizontal atribuida a una interface entre dos fluidos tales como gas y agua o gas y aceite.
Flexibinning	Incremento en el tamaño del bin local para mantener una multiplicidad constante; diseñado para compensar las irregularidades en la adquisición.
Flip-flop	Disparos de forma alternada de las fuentes sísmicas.
FOLD	Número de trazas que caen dentro de una celda.
Gather	Una colección de trazas sísmicas.
Infill acquisition	Áreas no cubiertas durante la adquisición.
INLINE	Dirección del tendido de las líneas receptoras.
Normalización	Escalamiento de amplitudes.
NH	Normalización por histograma.
Normal Moveout (NMO)	La variación de la reflexión en tiempo como una función de la distancia

	fuente-receptor (offset).
OBC	Cable de Fondo Marino (Geometría de Adquisición Marina).
OFFSET	Distancia desde el punto de explosión hasta el centro de cualquier grupo de hidrófonos.
Post-stack	Información sísmica apilada sin migración.
Pre-stack	Apilamiento efectuado antes de migración para evitar la dispersión de puntos de reflexión.
Play	Conjunto de prospectos genéticamente relacionados, que comparten los siguientes elementos: roca generadora, roca almacén roca sello, geometría de la trampa, así como los procesos de sincronía migración y tipo de hidrocarburos.
SEG	Sociedad de Exploración Geofísica.
SEG-D	Formato estándar aprobado por la Sociedad de Exploración Geofísica para grabar información de campo.
SEG-Y	Formato aprobado por la SEG para grabar información sísmica. Hay muchas variaciones del formato SEG-Y, sí es que, frecuentemente, es necesario probar la compatibilidad entre diferentes sistemas.
Seiscrop	Término referido a secciones sísmicas horizontales.
S/R	Relación señal a ruido.
STREAMER	Cable remolcado en adquisición sísmica marina.
Zona de Fresnel	La primera zona de Fresnel es el área alrededor de un punto de reflexión dentro del cual ocurren interferencias constructivas.

Bibliografía

Andreas Cordsen, Mike Galbraith, John Peirce, 2000, Planning Land 3-D Seismic Surveys, Geophysical Developments Series No.9, Society of Exploration Geophysicists.

Brown Alistar R., 1999, Interpretation of Three Dimensional Seismic Data. AAPG Memoir 42
SEG Investigations in Geophysics N0.9

Bone, M.R., B.F. Giles, y E.R. Tegland, 1976, 3D High resolution data collection processing and display: Houston, Texas, presented at 46th Annual SEG Meeting.

Barnes, A.E., 2001. Seismic Attributes in your facies. Landmark Graphics Corp. Englewood, Colorado, U.S.A

Brink M., y Ronen S., 1998, Coverage and binning issues for marine seismic surveys.

Castagna J.P., Sinha S.K., Routh P.S., Anno P.D., 2003, Time-frequency attribute of seismic data using Continuous Wavelet Transform.

Claerbout, J. F., 1976, Fundamental of geophysical processing: New York, McGraw-Hill.

Chakraborty A., Okaya D., 1995, Frequency-time decomposition of seismic data using wavelet based methods.

Chen Q., y Sidney S., 1997, Seismic attribute technology for reservoir forecasting and monitoring.

Chopra S., Larsen G., Pickford S., 2000, Acquisition Footprint – Its detection and removal.

Daubechies, I., 1988, Orthonormal bases of compactly supported wavelets: Comm. in Pure Applied Math, 41, 909-996.

Enachescu, M.E., 1993, Amplitude Interpretation of 3D reflection data. Husky Oil International Cooperation, Calgary Canada.

Farmer P., Haldorsen J., 1989, Suppression of high energy noise using an alternative stacking procedure.

Flandrin, P., 1989, Some aspects of nonstationary signal processing with emphasis on time-frequency and time-scale methods, in Combes, J. M., Grossmann, A., and Tchamitchian, P., Eds., Wavelets time-frequency methods and phase space: Springer-Verlag, 68-98.

Fookes G., y Warner C., 1994, Practical interference noise elimination in modern marine data processing.

Gailbraith M., 2003, A new methodology for 3D survey design.

Gabor, D., 1946, Theory of communication: J. I.E.E.E.

Gardner H.F., Canning A., 1998, Reducing 3D acquisition footprint for 3D DMO and 3D prestack migration.

Goupillaud, P., Grossmann, A., and Morlet, J., 1985, Cycle octave and related transforms in seismic signal analysis, in *Geoexpl.*: Elsevier Science Publ. B.V., 23, 85-102.

Grossmann, A., Martinet, R. K., and Morlet, J., 1989, Reading and understanding continuous wavelet transforms, in Combes, J. M., Grossmann, A., and Tchamitchian, P., Eds., *Wavelets time-frequency methods and phase space*: Springer-Verlag, 2-20.

Huard, I y S. Spitz, 1998, Filling gaps in the coverage of 3D marine acquisition.

Jenkis, F.A., y H.F. White, 1957, *Fundamentals of Optics*, New York: McGraw-Hill.

Kallweit, R.S., y Wood, L.C., 1982, The limits of resolution of zero-phase wavelets. Presented at the 47th Annual International SEG Meeting September 21, 1977, in Calgary.

Kunpertg L., Yexin L., y Yanda L., 2000, Improving both seismic signal-noise ratio and resolution by the properties of wavelet transform zero-crossings and polynomial fitting.

LA Bella and E. Loinger, ENI, Milano, Italy, L. Savini, AGIP North Africa B.V. Lybian Branco, 1998, *The cross-shotting methodology: Design, acquisition and processing*.

Larner K, Chambers R., Yang M., Lynn W. and Wai W., 1983, Coherent noise in marine seismic data.

Luo Y., Krish P., Wu A., y Mohammed A., 2001, Histogram equalization and its application in seismic exploration.

Mallat, S., and Zhong, S., 1992, Characterization of signals from multiscale edges: *IEEE Trans. Pattern analysis and machine intelligence*, 14, 710-732.

Marfurt, K.J.; Scheet, R.M.; Sharp, J.A.; Cain, G.J and Harper, M.G., 1995, 'Suppression of the acquisition footprint for seismic sequence attribute mapping: Presented at the 65th Ann. Int. Mtg. Soc. Exp. Geophys.

Marfurt, K.J.; Scheet, R.M.; Sharp, J.A., and Harper, M.G., 1998, Suppression of the acquisition footprint for seismic sequence attribute mapping: *Geophysics*, V63, no. 3, p1024.

Morlet, J., Arens, G, Fourgeau E, y Giard D., 1982, Wave propagation and sampling theory- Part I y II: Complex signal and scattering in multilayered media. Presented at the 50th Annual International SEG Meeting November 19, 1980 in Houston.

Okaya, D. A., 1995, Spectral properties of the earth's contribution to seismic resolution: *Geophysics*, 60, 241-251.

Paradigm Geophysical, 2003, Software Paradigm.

Partyka G., Gridley J., y Lopez J., 1999, Interpretational applications of spectral decomposition in reservoir characterization.

Pemex Exploración y Producción, BP Exploration, 1993-1994, Cuencas Terciarias del Suroeste y área Marbella.

Pemex Exploración y Producción, PGS Mexicana, 2003, Informe de Adquisición Sísmica del Levantamiento Almeja-Cisne 3D.

Pemex Exploración y Producción, Schlumberger Geco-Prakla, 1997-1998, Informe Final de las Operaciones de Campo de Prospectos Santa Ana 2D y Santa Ana 3D.

PGS Data Processing, 2003, Informe de procesado sísmico preliminar del levantamiento sísmológico marino Almeja-Cisne 3D.

Polikar R., 1996, The wavelet tutorial.

Ricker, N., 1953b. Wavelet contraction, wavelet extension and the control of seismic resolution, *Geophysics*, 18:769-92.

Regone C, 1998, Supression of coherent noise in 3D seismology, Amoco E&P Technology Group, Tulsa, Oklahoma

Rodriguez, J.M. and Mansar, S., 1996 Analyzing and correcting seismic phases using the wavelet transform, 61st Mtg. Eur. Assoc. Expl Geophys., Extended Abstracts, P187.

Sheriff, R.E. y L.P Geldart, 1995, *Exploration Seismology*, Cambridge University Press, Second Edition.

Sheriff, R.E., 1977, Limitations on resolution of seismic reflections and geologic detail from them, In *Seismic Stratigraphy- Aplications to Hydrocarbon Exploration*, C.E. Payton, ed., pp.3-14, AAPG Memoir 26, Tulsa: American Association of Petroleum Geologists.

Taner, M.T., Koehler, F., y Sheriff, R.E., 1979, Complex seismic trace analysis. Presented at the 46th Annual International SEG Meeting October 27, 1976 in Houston.

Taner M.T., 2001, Seismic attributes

Thomas R., White R., 1998, Quantitative controls on 3D seismic processing for prestack attribute analysis.

Taner. M. T.. and Sheriff, R. E.. 1977. Application of amplitude, frequency, and other attributes to stratigraphic and hydrocarbon determination in Applications to hydrocarbon exploration, C. E. Payton, Ed.. AAPG Memoir 26: Tulsa, Am. Assn. Petroleum Geologists. p. 301-327.

Vetterli, M., and Cormac, H., 1992, Wavelets and filter banks: Theory and design: IEEE Trans. Signal Proc., 40, 2207-2231.

Walton,G.G., 1972, Three dimensional seismic method: Geophysics, v.37, p.417-430.

White R., y Thomas R., 1998, Quantitative controls on 3D seismic processing for prestack attribute analysis.

Widess, M.B.,1973, How thin is a thin bed? Geophysics, 38: 1176-80.

Yilmaz, O, 1987, Seismic Data Processing, Society of Exploration Geophysicists.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación del estudio sísmico Almeja-Cisne 3D (Pemex Exploración y Producción *et al*, 2003). Se muestra un perfil en planta SW-NE. Las letras A,B,C y D delimitan el área.

Fig. II.1A Nomenclatura de productos 3D. El volumen de información puede presentarse en secciones horizontales, verticales o a lo largo (o paralelos a) de horizontes. Pueden existir combinaciones de secciones horizontales con verticales (composite displays), así mismo pueden crearse mapas.(Sheriff & Geldart, 1995).

Fig. II.1B Despliegue de un cubo (cube display) formado por dos secciones verticales ortogonales y una sección horizontal. (Brown, 1999).

Figura II.2 Criterio de Rayleigh mostrando el límite de un instrumento óptico para distinguir imágenes separadas de objetos que caen cerca uno del otro, el cual ocurre cuando las dos imágenes difractadas son separadas por una distancia igual a la distancia pico a valle del instrumento del patrón de difracción

Figura II.3 Límite de resolución Rayleigh, ocurre cuando las imágenes son separadas por un intervalo de tiempo de pico a valle, donde el límite de Ricker se presenta, es decir, cuando las imágenes están separadas por un intervalo de tiempo igual a la separación entre los puntos de inflexión.

Fig. II.4A Primer zona de Fresnel. (A) Ondas esféricas reflejadas de una interface plana. (Sheriff, 1977).

Fig. II.4B Primer zona de Fresnel. (B) Aquí se muestra como el tamaño de la zona de Fresnel depende de la frecuencia.(Sheriff, 1977).

Fig. II.5 Factores que afectan a la amplitud (Sheriff, 1975).

Fig. II.6 Ejemplo de la ondícula de Gabor compleja (Morlet *et al*, 1982).

Fig. II.7 Serie de ondículas básicas Gabor usadas en la teoría de expansión de Gabor (Morlet *et al*, 1982).

Figura III.1 Diagrama de Offset, embarcación American Explorer – 6 cables. (Pemex Exploración y Producción *et al*, 2003).

Figura III.2 Esquema que muestra el flujo de control de calidad (QC) aplicado al procesado preliminar de la información adquirida del Levantamiento Almeja -Cisne 3D (Pemex Exploración y Producción *et al*, 2003).

Figura III.3 Ventana de revisión interactiva para verificación de valores de los cabezales que incluían el offset, el número de puntos de disparo, información de las coordenadas de “x” y “y” para los disparos y los receptores, tirante de la fuente y de los receptores, numeración de la traza y el cable, y las locaciones de la fuente y los receptores del Levantamiento Almeja -Cisne 3D (Pemex Exploración y Producción *et al*, 2003).

Figura III.4 Fotografía que muestra la verificación visual de disparos individuales en tiempo real, es decir disparo por disparo del Levantamiento Almeja -Cisne 3D (Pemex Exploración y Producción *et al*, 2003).

Figura IV.1 Transformada de fourier de corto plazo (TFTC) de un vibró sísmo de fuente de barrido (Chakraborty *et al*,1995).

Figura IV.2 Transformada de ondícula continua de la señal sintética ilustrada en la figura IV.1. El índice de escala es una medida del comportamiento armónico de la frecuencia central del filtro en el dominio de la frecuencia (Chakraborty *et al*,1995).

Figura IV.3 Ondícula Morlet y su espectro de frecuencia. (a) Representación en el dominio del tiempo con índice de escala de 0. (b) El correspondiente espectro de frecuencia. (c) La representación en el dominio del tiempo con índice de escala 2. (d) Su correspondiente espectro (Chakraborty *et al*,1995).

Figura IV.4 Filtro Gabor-Morlet con pasa banda de 10 a 50 Hz a intervalos de 1 Hz. (a) Parte real del filtro Gabor-Morlet compuesta de ondículas seno y coseno de banda limitada. (b) Parte imaginaria del filtro Gabor-Morlet compuesta de ondículas seno y coseno de banda limitada (Paradigm Geophysical ©,2003).

Figura IV.5 Espectro de amplitud representativo del cubo sísmico Almeja-Cisne 3D, con un ancho de banda de frecuencias útiles de 5 a 60 Hz.

Figura IV.6 Parámetros básicos de la descomposición espectral aplicados al cubo preliminar Almeja-Cisne 3D, entre los que se encuentran: a) Rango de frecuencias: 5 a 60 Hz, b) Número de bandas: 5, c) Modo de incremento: frecuencias, d) Tamaño del operador: 49, e) Rango de salida: total del cubo.

Figura IV.7 Sección sísmica inline 1761 correspondiente al primer cubo de descomposición espectral del levantamiento Almeja Cisne.

Figura IV.8 Sección sísmica inline 1761 correspondiente al segundo cubo de descomposición espectral del levantamiento Almeja Cisne.

Figura IV.9 Sección sísmica inline 1761 correspondiente al tercer cubo de descomposición espectral del levantamiento Almeja Cisne.

Figura IV.10 Sección sísmica inline 1761 correspondiente al cuarto cubo de descomposición espectral del levantamiento Almeja Cisne.

Figura IV.11 Sección sísmica inline 1761 correspondiente al quinto cubo de descomposición espectral del levantamiento Almeja Cisne. En este cubo la presencia de ruido es muy evidente en la parte profunda de la sección sísmica (debajo de 2 s), mientras que los reflectores en zona somera se mantuvieron hasta una profundidad de 2.2 segundos.

Figura IV.12 Mapa de amplitud mostrando la huella de adquisición como estrías lineales (La bella *et al.*, 1998).

Figura IV.13 Mapa de cubrimiento total del levantamiento Almeja-Cisne 3D sin incremento en el tamaño del bin. En la parte superior izquierda se describen los rangos de cobertura mínima para cada bin estático individual. El rectángulo marcado con los puntos rosas indica el cubo del presente trabajo (Pemex Exploración y Producción *et al.*, 2003).

Figura IV.14 Ampliación del mapa de cubrimiento de offsets cercanos (180-2180m), mostrando el cubrimiento del cubo analizado en este trabajo; se puede observar los inlines 1822,1832, 1839 y 1844 que presentan bajo cubrimiento, y que de acuerdo a los rangos de cobertura mínima mostrados en la tabla de la izquierda del mapa de cubrimiento, tienen menos de 17 trazas por bin hasta 10 trazas, las cuales están por debajo de las especificaciones técnicas presentadas en la tabla 2 del capítulo III (Pemex Exploración y Producción *et al.*, 2003).

Figura IV.15 Histograma de amplitud de todo el cubo-1 de descomposición espectral sin normalizar (Software Paradigm Geophysical©,2003)

Figura IV.16 Histograma de amplitud balanceado de todo el cubo-1 de descomposición espectral, después de normalizar las amplitudes, tomando como referencia el valor promedio del rango dinámico del histograma de amplitud sin normalizar.

Figura IV.17 Slices en el dominio tiempo-frecuencia a 1184 segundos de cada una de los cinco cubos, después de aplicar descomposición espectral y normalización, con el objetivo de identificar las estrías características de las huellas de adquisición. a) slice de frecuencia correspondiente al cubo-1, mostrando siete huellas de adquisición, las cuales se encuentran encerradas en óvalos, las cuales se alinean a los inlines: 1839, 1835, 1832, 1828, 1803, 1784 y 1768; b) slice de frecuencia del cubo-2, presenta tres estrías características de huellas que se muestran encerradas en óvalos y las cuales se alinean a los inlines: 1835, 1832, 1800, 1784; c) slice de frecuencia del cubo-3, en donde no hay claridad de rasgo característico; d) slice de frecuencia del cubo-4 sin apariencia de estrías; e) slice de frecuencia sin estrías características.

Figura IV.18 Sección inline 1790 correspondiente al primer cubo de descomposición espectral, la cual muestra los horizontes definidos por su buena continuidad; el color amarillo representa al horizonte f, mientras que el color morado represente al horizonte s.

Figura IV.19 Parámetros de extracción determinados por la ventana del modulo del software Paradigm®, que muestra los parámetros usados en la extracción de los mapas de amplitud de la inline 1790 del primer cubo de descomposición espectral del levantamiento Almeja-Cisne 3D.

Figura IV.20 Mapas de amplitud extraídos de cada uno de los cubos de descomposición espectral, que en este caso se extrajeron de la inline 1790. a) y b) Primeros dos mapas de amplitud extraídos del cubo-1 y 2 de descomposición espectral, en donde se detectaron estrías encerradas en óvalos, que muestran su alineación a las líneas de navegación del levantamiento Almeja-Cisne 3D; c, d y e) sin evidencia del patrón lineal característico de una huella de adquisición.

Figura IV.21 Distribución normal (gaussiana) del cubo preliminar Almeja-Cisne 3D.

Figura IV.22 Histograma normalizado del cubo preliminar Almeja Cisne 3D, esta normalización se logra directamente del software de Paradigm®.

Figura IV.23 Sección inline 1790 normalizada del cubo preliminar Almeja Cisne 3D.

Figura IV.24 Sección envolvente de la señal de la inline 1790 del primer cubo de descomposición espectral del cubo Almeja-Cisne. La señal esta presente en eventos continuos desde 1.0 s a 3.6 s en color gris y negro, mientras que el ruido de dispersión (óvalo verde) y el lineal (óvalo amarillo), se observan entre 1.3 a 1.4 y entre 2.7 a 3.6 respectivamente.

Figura IV.25 Crossplot entre sección envolvente del primer cubo y sección del cubo preliminar normalizada; a) sección 1790 del cubo envolvente; b) sección de la inline 1790 del cubo-1 preliminar normalizado; c) el crossplot ubicado en la parte superior de las secciones sísmicas, muestra la correlación entre valores de amplitud entre ambas secciones sísmicas, en donde se puede distinguir con claridad que los colores azul y rojo representan la señal sísmica, particularmente el horizonte reflector a 2.5s, que comparando con la figura IV.24 se puede ver la coherencia con el color gris y negro que ya se había mencionado representa la señal en el cubo-1 de la envolvente, mientras que en color morado del crossplot se observa la dispersión de los valores de amplitud que en la sección de la sección envolvente no se distingue con claridad los ruidos, se solo alcanza a mostrar la tendencia del ruido de interferencia sísmica y lineal.

Figura IV.26 Sección envolvente de la inline 1790 del segundo cubo. La señal esta presente en la parte central de la sección desde 1.0 s a 2.8 s en colores gris con negro, mientras que el ruido de dispersión y el lineal se observa en las elipses de color verde y amarillo respectivamente, mientras que el de interferencia sísmica muestra su rasgo lineal aleatorio con una elipse de color azul.

Figura IV.27 Crossplot entre sección envolvente del segundo cubo y sección del cubo preliminar normalizada. a) sección de envolvente de la inline 1790; b) sección inline 1790 del cubo preliminar normalizado; c) crossplot ubicado en la parte superior de las secciones sísmicas, muestra la correlación entre valores de amplitud entre ambas secciones, en donde se puede distinguir con claridad que los colores rojo y gris representan la señal sísmica, estando estas muy acorde coherentemente con los colores gris y negro de la figura IV.26 (parte central de la sección), mientras que en color verde del crossplot se observa la dispersión de los valores de amplitud que en las secciones sísmicas representa la tendencia del ruido de interferencia sísmica y lineal, que se pueden apreciar en ambas secciones.

Figura IV.28 Sección envolvente de la inline 1790 del tercer cubo. La señal sigue presente en la parte central de la sección sísmica, pero a disminuido en intensidad y en tiempo de 3.6 s a 2.5 s en colores gris y negro, mientras que el ruido de dispersión y el lineal se observan en las elipses de color verde y amarillo respectivamente, mientras que la interferencia sísmica acentúa su rasgo lineal aleatorio, que se muestra con una elipse de color azul.

Figura IV.29 Crossplot entre sección envolvente del tercer cubo y sección del cubo preliminar normalizado en la área del ruido dispersivo (1.1 a 1.5 s) a) sección envolvente de la inline 1790; b) sección inline 1790 del cubo preliminar; c) crossplot ubicado en la parte superior de las secciones sísmicas, muestra la correlación entre valores de amplitud entre ambas secciones, en donde se puede distinguir que los colores amarillo y azul representan la señal sísmica, y en colores gris y verde permite distinguir entre ruido coherente y aleatorio respectivamente.

Figura IV.30 Sección envolvente de la inline 1790 del cuarto cubo. La señal se visualiza en la parte central de la sección sísmica, de 1 a 2 s en colores gris y negro, mientras que el ruido de dispersión y el lineal se observan en las elipses de color verde y amarillo respectivamente de 2 a 3.6 s, y la interferencia sísmica se muestra de 2.5 a 3.6s con una elipse de color azul.

Figura IV.31 Crossplot entre envolvente del cuarto cubo y sección del cubo preliminar normalizado. a) sección envolvente de la inline 1790; b) sección inline 1790 del cubo preliminar; c) crossplot ubicado en la parte superior de las secciones sísmicas, muestra la mejor correlación de ruido tanto lineal como de interferencia sísmica entre los valores de amplitud entre ambas secciones en el rango de 2.4 a 3.6 s, así mismo, puede verse la clara tendencia del ruido lineal entre los xlines 3300 a 3500 de su extensión hasta casi 1 segundo, todo lo contrario a la señal sísmica que solo se visualiza en zona somera debajo de 2 segundos.

Figura IV.32 Sección envolvente de la inline 1790 del quinto cubo de descomposición espectral. La señal se visualiza en la parte central de la sección sísmica, de 1 a 1.8 s en colores gris y negro, mientras que el ruido de dispersión y el lineal se observan en las elipses de color verde y amarillo respectivamente, mientras que la interferencia sísmica se muestra de 3 a 3.6s con una elipse de color azul.

Figura IV.33 Crossplot entre sección envolvente del quinto cubo y sección del cubo preliminar normalizado. a) Sección envolvente de la inline 1790; b) sección 1790 del cubo preliminar; c) nuevamente se puede observar que al igual que la correlación de la figura IV.31, esta es también una muy buena correlación del ruido tanto lineal como de interferencia sísmica entre los valores de amplitud entre ambas secciones en los intervalos de 2.4 a 3.6 s, y mientras que la señal sísmica continua disminuyendo hasta por debajo de 1.8 segundos.

Figura IV.34 Crossplot entre sección 1790 del primer cubo y la sección del cubo preliminar sin normalizar. a) Sección inline 1790 del cubo-1 de descomposición espectral que muestra un rectángulo negro que ejemplifica el área a correlacionar (1.1 a 1.6 s); b) sección inline 1790 del cubo preliminar sin normalizar; c) crossplot ubicada arriba de las secciones, en donde se observa una elipse con mucha dispersión en la periferia, lo que proporciona valores altos de media, tal como se ve en la tabla de valores estadísticos de esta figura.

Figura IV.35 Crossplot entre sección 1790 del segundo cubo y la sección del cubo preliminar sin normalizar. a) Sección inline 1790 del cubo-2 de descomposición espectral que muestra un rectángulo negro que ejemplifica el área a correlacionar (1.1 a 1.6 s); b) sección inline 1790 del cubo preliminar sin normalizar; c) crossplot ubicado arriba de las secciones, en donde se

observa una elipse con mucha dispersión en la periferia, pero los puntos están mejor alineados entre si, lo que significa un valor de 0.84, así mismo, hay una mayor cantidad de muestras "n" que en la figura anterior, tal como se ve en la tabla de valores estadísticos de la figura.

Figura IV.36 Crossplot entre sección 1790 del tercer cubo y la sección del cubo preliminar sin normalizar. a) Sección inline 1790 del cubo-3 de descomposición espectral que muestra un rectángulo negro que ejemplifica el área a correlacionar (1.1 a 1.6 s); b) sección inline 1790 del cubo preliminar sin normalizar; c) se puede ver en el crossplot una tendencia lineal muy acentuada entre los valores de dispersión, lo que significa una correlación alta de 0.89, sin embargo nuestra media x continua disminuyendo al igual que la relación S/R.

Figura IV.37 Crossplot entre sección 1790 del cuarto cubo y la sección del cubo preliminar sin normalizar. a) Sección inline 1790 del cubo-4 de descomposición espectral que muestra un rectángulo negro que ejemplifica el área a correlacionar (1.1 a 1.6 s); b) sección inline 1790 del cubo preliminar sin normalizar; c) en esta correlación vuelven a dispersarse los valores de amplitud en la periferia de la elipse fuera de la tendencia lineal de la misma, lo que significa una disminución en el factor de correlación con respecto a las correlaciones de las tres cubos anteriores, pero no influye en la determinación del calculo S/R, el cual continua disminuyendo.

Figura IV.38 Crossplot entre sección 1790 del quinto cubo y la sección del cubo preliminar sin normalizar. a) Sección inline 1790 del cubo-5 de descomposición espectral que muestra un rectángulo negro que ejemplifica el área a correlacionar (1.1 a 1.6 s); b) sección inline 1790 del cubo preliminar sin normalizar; c) aquí tenemos la correlación mas baja que se ha tenido con respecto a las anteriores cubo de tiempo-frecuencia (tabla 12), así mismo el valor mas bajo de S/R.

Figura V.1 Sección sísmica inline 1761 correspondiente al primer cubo (5 a 18.75 Hz) de descomposición espectral del levantamiento Almeja Cisne.

Figura V.2 Sección horizontal a 1184 s del cubo-1 (5 a 18.75 Hz) de descomposición espectral y normalizada, se pueden ver estrías de siete huellas de adquisición encerradas en óvalos negros (inlines:1839,1835,1832,1828,1803,1784,1768).

Figura V.3 Mapa de amplitud del cubo-1 (5 a 18.75 Hz) de descomposición espectral, se pueden ver estrías de cinco huellas de adquisición encerradas en óvalos rojos (inlines:1839,1835,1832, 1817 y 1784).

Figura V.4 Sección envolvente de la inline 1790 del cuarto cubo. La señal se visualiza en la parte central de la sección sísmica, de 1 a 2 s en colores gris y negro, mientras que el ruido de dispersión y el lineal se observan en las elipses de color verde y amarillo respectivamente de 2 a 3.6 s, y la interferencia sísmica se muestra de 2.5 a 3.6s con una elipse de color azul.

Figura V.5 Crossplot entre envolvente del cuarto cubo y sección del cubo preliminar normalizado. a) sección envolvente de la inline 1790; b) sección inline 1790 del cubo preliminar; c) crossplot ubicado en la parte superior de las secciones sísmicas, muestra la mejor correlación de ruido tanto lineal como de interferencia sísmica entre los valores de amplitud entre ambas secciones en el rango de 2.4 a 3.6 s, así mismo, puede verse la clara tendencia del ruido lineal entre los xlines 3300 a 3500 de su extensión hasta casi 1 segundo, todo lo contrario a la señal sísmica que solo se visualiza en zona somera debajo de 2 segundos.

Figura V.6 Crossplot entre sección 1790 del primer cubo y la sección del cubo preliminar sin normalizar. a) Sección inline 1790 del cubo-1 de descomposición espectral que muestra un rectángulo negro que ejemplifica el área a correlacionar (1.1 a 1.6 s); b) sección inline 1790 del cubo preliminar sin normalizar; c) crossplot ubicada arriba de las secciones, en donde se observa una elipse con mucha dispersión en la periferia, lo que proporciona valores altos de media, tal como se ve en la tabla de valores estadísticos de esta figura.

Figura 1A Ejemplo de ondícula Gabor compleja usada como ondícula elemental en la expansión de Gabor.

Figura 2A Rejillas del muestreo de áreas por celda en el dominio tiempo-frecuencia usada para la expansión de Gabor.

Figura 1C Sección inline 1790 del cubo preliminar Almeja-Cisne, se muestran dos ruidos. El ruido de dispersión mostrado en óvalo verde desde 1.2 a 1.4 s, entre los xlines 2350 a 2650 caracterizado por su patrón tipo hipérbola. Por otro lado, el ruido lineal mostrado prácticamente en toda la parte profunda que va desde 2 hasta 3.6 s, y el rango de xlines es de 2300 a 3140.

Figura 2C Sección inline 1790 del cubo preliminar Almeja-Cisne, que muestra nuevamente el ruido lineal (óvalo amarillo) desde 1.8 a 3.6 s y en el intervalo xline de 3100 a 3600 y también se le alcanza a ver su rasgo lineal de 2.7 a 3.6 s entre los xlines 3850 a 4000. En óvalo azul se ve el fuerte rasgo lineal paralelo de la interferencia sísmica desde 1.6 a 3.6 s.

Figura E1 Distribución normal (Gaussiana), con sus variables estadísticas características: moda, mediana y media.

Figura E2 Histograma de la distribución Gaussiana normalizada del cubo preliminar Almeja Cisne 3D.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas del levantamiento, Datum geodésico NAD 27.

Tabla 2. Métodos típicos en el cálculo de atributos sísmicos poststack, con algunos atributos representativos (Barnes, 2001).

Tabla 3. Descripción de la distribución de offsets y trazas mínimas por bin.

Tabla 4. Descripción de parámetros de cada una de las cinco bandas de frecuencias obtenidas de la descomposición espectral del cubo Almeja-Cisne.

Tabla 5 Rangos de ubicación de los horizontes f y s en la inline 1790 del cubo-1 de descomposición espectral.

Tabla 6. Rangos de ubicación de las huellas de adquisición de la inline 1790 de cada uno de los cubos de descomposición espectral, en términos de inline y xlines, determinados a partir de extracción de mapas de amplitud del horizonte f.

Tabla 7. Resumen de los intervalos de tiempo y espacio donde se encontraron los ruidos de tipo lineal y dispersivo presentes en la banda1 del cubo señal a ruido de la inline 1790.

Tabla 8 Resumen de los intervalos de tiempo y espacio en que se encontraron la señal y ruido en el cubo-2.

Tabla 9. Resumen de los intervalos de tiempo y espacio donde se encontraron la señal y ruido sísmico del cubo-3 de la inline 1790.

Tabla 10 Resumen de los intervalos de tiempo y espacio en que se encontraron la señal y ruido de la inline 1790.

Tabla 11 Descripción de rangos de señal y ruido presentes en la quinta banda del cubo señal a ruido de la inline 1790.

Tabla 12 Resumen de parámetros estadísticos obtenidos a partir de la correlación entre cada de una de los cubos de descomposición espectral vs cubo preliminar del volumen Almeja – Cisne, así mismo los valores de las estimaciones S/R realizadas a cada uno de los 5 cubos de la inline 1790.

APÉNDICES

APÉNDICE A

Transformada de ondícula

APÉNDICE B

Resumen de intervalos en tiempo de secciones horizontales y espacios en inline y xline en que se encontraron las huellas de adquisición en cada cubo de descomposición espectral

APÉNDICE C

Descripción cualitativa del ruido sísmico del cubo preliminar almeja-cisne 3d.

APÉNDICE D

Tablas que muestran los horizontes a y b usados en la extracción de mapas de amplitud, con los intervalos en inline y crossline en que se encontraron las huellas de adquisición de los inlines 1765 y 1820 el dominio tiempo-frecuencia

APÉNDICE E

Normalización por histograma

APÉNDICE F

Resumen de los intervalos de tiempo y espacio en que se encontraron la señal y el ruido sísmico, representada por sus inlines y xlines en los cubos de descomposición espectral.

APÉNDICE G

Resumen de parámetros estadísticos obtenidos a partir de la correlación entre cada uno de los cubos de descomposición espectral vs cubo preliminar del volumen almeja –cisne, así mismo los valores de las estimaciones s/r realizadas a cada uno de los 5 cubos de 18 inlines.