COMPARACIÓN ENTRE OPERACIONES DE FILTRADO DE UNA LÍNEA MARINA DE DATOS SÍSMICOS 2D MEDIANTE EL PAQUETE DE PROCESAMIENTO SEISMIC UNIX

XIOMARA ALEJANDRA OTALVARO OVALLE

CÓDIGO: 20141032309

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD DEL MEDIO AMBIENTE
INGENIERÍA TOPOGRÁFICA
BOGOTÁ D.C.
2017

COMPARACIÓN ENTRE OPERACIONES DE FILTRADO DE UNA LÍNEA MARINA DE DATOS SÍSMICOS 2D MEDIANTE EL PAQUETE DE PROCESAMIENTO SEISMIC UNIX

XIOMARA ALEJANDRA OTALVARO OVALLE

Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero Topográfico

Director
ING. ROBINSON QUINTANA PUENTES
ING. CATASTRAL MAGISTER EN GEOFÍSICA

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD DEL MEDIO AMBIENTE
INGENIERÍA TOPOGRÁFICA
BOGOTÁ D.C.
2017

AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos van dirigidos en primer lugar a Dios por guiarme durante este largo camino de aprendizaje, por darme la fortaleza de continuar en los momentos en que parecía una meta inalcanzable.

A mis padres por su apoyo incondicional, por su paciencia, esfuerzo y confianza depositada en mí para la ejecución de los proyectos y metas propuestas.

Agradezco a los docentes que hicieron parte de este proceso por sus enseñanzas, por ser el ejemplo a seguir en mi formación como profesional.

A mi director de tesis, el Ing. Robinson Quintana, por la confianza consignada, por sus palabras de ánimo y sus numerosas enseñanzas que hicieron posible la realización de este proyecto.

A todos mis amigos, compañeros y colegas que estuvieron pendientes de este proceso, por su compañía y sus palabras de aliento.

¡MUCHAS GRACIAS!

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 11
OBJETIVOS 12
GENERAL 12
ESPECÍFICOS 12
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 13
1.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA 13
1.2. JUSTIFICACIÓN 14
2. MARCO TEÓRICO 15
2.1. ANTECEDENTES 15
2.2. MARCO CONCEPTUAL 15
2.2.1. ADQUISICIÓN DE DATOS SÍSMICOS 16
2.2.2. METÓDO SÍSMICO DE REFLEXIÓN 17
2.2.3. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS SÍSMICOS 17
2.2.4. SEISMIC UNIX 23
2.2.5. SEISEE 24
3. METODOLOGÍA 25
3.1. ADQUISICIÓN DE SOFTWARE Y DATOS SÍSMICOS 26
3.2. PRE PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN 26
3.3. ANÁLISIS ESPECTRAL 26
4. DESARROLLO 27
4.1. INSTALACIÓN DEL SOFTWARE LIBRE SEISMIC UNIX 27
4.2. ADQUISICIÓN DE LOS DATOS 27
4.3. CONVERSIÓN DE LOS DATOS CRUDOS A FORMATO SU 27
4.4. EDICIÓN DE LA GEOMETRÍA 31
4.4.1. CONTROLES DE CALIDAD DE LAS CABECERAS DEL ARCHIVO 33
4.5. EDICIÓN DE LAS TRAZAS 34
4.6. DETERMINACIÓN DE LAS FRECUENCIAS 34
4.7. APLICACIÓN DE FILTROS Y ANÁLISIS ESPECTRAL 36
4.7.1. FILTROS DE FRECUENCIA 36
4.7.2. FILTROS DE GANANCIA 55
5. CONCLUSIONES 61
BIBLIOGRAFÍA 63

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Adquisición de datos sísmicos marinos. 16

Ilustración 2: Secuencia básica de Procesamiento de datos sísmicos..... 17

Ilustración 3: Ruido en el tiempo y en el espacio. 19

Ilustración 4: Esquema de la aplicación de correcciones de amplitudes; en la imagen a) Decaimiento de la amplitud y b) Señal después de la corrección. 23

Ilustración 5: Diagrama de flujo en el proceso de comparación de filtros en el software Seismic Unix para una línea sísmica marina 2D. 25

Ilustración 6: Visualización de los datos mobil_total.segy en el software Seisee. 28

Ilustración 7: Recortar los datos en Tiempo, mediante el software Seisee. 29

Ilustración 8: Conversión de los datos crudos *mobil_4s.segy* al formato SU en la terminal de Ubuntu..... 29

Ilustración 9: a) Visualización de los datos Seismic.su en el dominio del Tiempo. b) Visualización de los datos en el dominio del tiempo con acercamiento. 30

Ilustración 10: Comando para aislar un rango de disparos de la información en un archivo de salida shots0_120.su, en la terminal de Ubuntu..... 31

Ilustración 11: Visualización de las cabeceras (headers) de la información sísmica. 31

Ilustración 12: Visualización del Rango de Frecuencias de los datos Sísmicos marinos 2D en el dominio del tiempo, desde el software Seismic Unix. 35

Ilustración 13: Visualización del Rango de Frecuencias de los datos Sísmicos marinos 2D desde el software Seisee. 36

Ilustración 14: Trazas sísmicas observadas en el dominio del tiempo antes de realizar las operaciones de filtrado. 37

Ilustración 15: Aplicación del filtro Bandpass en SU y visualización de las trazas de los datos Sísmicos marinos 2D..... 38

Ilustración 16: Aplicación del filtro Bandpass en SU y visualización de la imagen de los datos Sísmicos marinos 2D. 39

Ilustración 17: Comando para guardar los datos sísmicos filtrados en un archivo independiente en el software Seismic Unix. 39

Ilustración 18: Aplicación del filtro Highpass en SU y visualización de las trazas de los datos Sísmicos marinos 2D..... 40

Ilustración 19: Aplicación del filtro Highpass en SU y visualización de la imagen de los datos Sísmicos marinos 2D. 41

Ilustración 20: Aplicación del filtro Lowpass en SU y visualización de las trazas de los datos Sísmicos marinos 2D. 42

Ilustración 21: Aplicación del filtro Lowpass en SU y visualización de la imagen de los datos Sísmicos marinos 2D. 43

Ilustración 22: Aplicación del filtro Notch en SU y visualización de las trazas de los datos Sísmicos marinos 2D. 44

Ilustración 23: Aplicación del filtro Notch en SU y visualización de la imagen de los datos Sísmicos marinos 2D. 44

Ilustración 24: Aplicación del filtro Bandreject en SU y visualización de las trazas de los datos Sísmic os marinos 2D. 45

Ilustración 25: Aplicación del filtro Bandreject en SU y visualización de la imagen de los datos Sísmicos marinos 2D. 46

Ilustración 26: Comparación entre los datos resultantes a la aplicación de los filtros digitales de frecuencia en el software Seismic Unix. 46

Ilustración 27: Imagen comparativa de las diferentes bandas de filtro aplicados a los datos sísmicos marinos 2D, a) Filtro Bandpass 10,20,40,60, b) Filtro Bandpass 10,25,35,60, c) Filtro Bandpass 15,25,35,50, d) Filtro Bandpass 15,28,38,55. 48

Ilustración 28: Script *spectrum_amp* utilizado para graficar el Espectro de amplitud de los archivos resultantes de la aplicación de filtros digitales. 49

Ilustración 29: Espectros de frecuencias después de las pruebas de los filtros Bandpass a) Espectro de frecuencia del disparo original b) Espectro de frecuencia del filtro Bandpass 1 c) Espectro de frecuencia del filtro Bandpass 2 d) Espectro de frecuencia del filtro Bandpass 3 e) Espectro de frecuencia del filtro Bandpass 4 50

Ilustración 30: Script *Final_Spectrum.sh* utilizado para graficar el espectro del shot original y el shot filtrado. 51

Ilustración 31: Ventana de Frecuencias del *shot 60* en el archivo original a) Gráfica de las Series de tiempo, b) Espectro de amplitud, c) Espectro de Fase 51

Ilustración 32: Ventana de Frecuencias del *shot 60* en el archivo filtrado a) Gráfica de las Series de tiempo, b) Espectro de amplitud, c) Espectro de Fase 52

Ilustración 33: Espectro de amplitud de los datos sísmicos marinos 2D en el disparo 80 antes y después de la aplicación del filtro Bandpass. 53

Ilustración 34: Comparación final de los datos sísmicos marinos sin procesar y los datos procesados. 54

Ilustración 35: Aplicación de la función de ganancia Automática o AGC, a los datos sísmicos marinos 2D mediante el software Seismic Unix. ... 56

Ilustración 36: Aplicación de la función de ganancia AGC WAGC a los datos sísmicos marinos 2D mediante el software Seismic Unix. 57

Ilustración 37: Aplicación de la función de ganancia PBAL a los datos sísmicos marinos 2D mediante el software Seismic Unix. 58

Ilustración 38: Aplicación de la función de ganancia tpow a los datos sísmicos marinos 2d mediante el software Seismic Unix. 59

Ilustración 39: Aplicación de la función de ganancia gpow a los datos sísmicos marinos 2d mediante el software Seismic Unix. 60

TABLA DE ECUACIONES

Ecuación 1: Modelo matemático para uno de los filtros más simples. 19

Ecuación 2: Expresión matemática de un filtro digital. 20

Ecuación 3: Verificación matemática de la veracidad de la geometría de los datos sísmicos. 33

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Lista de comandos y símbolos utilizados en el software Seismic Unix durante la ejecución del procesamiento de datos sísmicos. 8

Tabla 2: Tipos de Filtros Digitales. 21

Tabla 3: Lista de identificación de los datos de la línea sísmica marina 2D en Seismic Unix. 33

Tabla 4: Valores de Frecuencia utilizados en pruebas de filtro Bandpass. 47

LISTA DE COMANDOS Y SÍMBOLOS UTILIZADOS EN EL SOFTWARE SEISMIC UNIX

>	Escribe datos de un programa a un archivo (sacar un archivo)
<	Lee datos de un archivo a un programa (llamar un archivo)
&	Ejecuta un programa en segundo plano
|	Encadenar programas
Pwd	Imprimir directorio de trabajo
Ls	Mostrar directorio de todos los archivos y subdirectorios
Cd	Cambiar directorio. Lleva al usuario a su directorio de inicio
Mkdir	Crear una carpeta
Rmdir	Borrar una carpeta
Segyread	Leer una cinta SEG-Y.
Segyclean	Dado que las cintas SEG-Y “extranjeras” pueden utilizar la parte no asignada de los encabezados de trazo y dado que SU también lo usa ahora, este programa pone cero los campos significativos para SU.
Suximage	Graficar la ventana de imagen de un conjunto de datos Segy.
Suwind	Ventana de trazas por palabra clave. Aísla el rango de un (header).
Surange	Obtener los valores máximos y mínimos para entradas de encabezado que no sean cero.
Sushw	Establecer una o más palabras de encabezado utilizando número de rastreo, la modificación y la división de enteros para calcular los valores del encabezado de un archivo. Corrige los valores de cabeceras.
Suspecfx	Obtener un vistazo rápido del espectro de amplitud de una traza sísmica, o un panel de rastros sísmicos.
Sufilter	Proporcionar una capacidad de filtrado de fase cero para las tareas habituales de filtrado, paso de banda, paso bajo, paso alto y filtro de muesca.
Suxwigb	Trazar un conjunto de datos Segy. Se observa el archivo de salida como trazas de movimiento. Se trata de un suxwigb modificado que utiliza la profundidad o la escala de coordenadas cuando tales valores se usan con claves.
Sufft	Trazar en tiempo real las trazas de frecuencias complejas.
Suamp	Salida de amplitud, fase, traza real o imagen de datos desde el dominio de frecuencia x.
Suxgraph	Graficar un conjunto de datos Segy.
Sugain	Aplicar varios tipos de ganancia.

Tabla 1: Lista de comandos y símbolos utilizados en el software Seismic Unix durante la ejecución del procesamiento de datos sísmicos.

Fuente: Sofware Seismic Unix, (CWP) Center for Wave Phenomena, Departamento de Geofísica, Escuela de Minas de Colorado.

RESUMEN

El presente trabajo se basó en la aplicación y comparación entre operaciones de filtrado a una línea marina de datos sísmicos 2D mediante el software libre Seismic Unix. Este proceso es uno de los pasos que se realizan en el pre apilamiento de la información sísmica según lo descrito por el geofísico Oz Yilmaz.

El software Seismic Unix proporciona distintas herramientas para el procesamiento de datos sísmicos, las cuales son utilizadas de acuerdo a los requerimientos en cada etapa del proceso. Algunas de estas herramientas son los filtros digitales, respecto a los algoritmos utilizados y sus parámetros se puede mejorar o no las señales sísmicas. El objetivo principal de esta fase del procesamiento es la eliminación del ruido obtenido durante la adquisición en campo de los datos. Con este propósito se efectuaron las operaciones de filtrado, ocho pruebas en los filtros de frecuencia y cinco pruebas en los filtros de ganancia. De esta manera se realizó un análisis espectral de donde se pudo determinar el mejor algoritmo que representa un realce en la relación señal/ruido de los datos sísmicos.

Consecuentemente, el filtrado digital es un proceso que se lleva a cabo durante todas las etapas del procesamiento sísmico, de su correcto análisis depende el aprovechamiento pleno de toda la información contenida en las señales sísmicas para la interpretación de las características del subsuelo. El conocer el funcionamiento de cada algoritmo permitió tomar las mejores decisiones en cuanto a la selección de parámetros y sus resultados, asimismo, se generaron los datos pre procesados para la futura continuación del procesamiento sísmico.

Palabras claves: Procesamiento Sísmico, Pre-apilamiento, Filtrado Digital, Frecuencias, Espectro.

ABSTRACT

The present work was based on the application and comparison between filtering operations to a marine line of 2D seismic data using the free software Seismic Unix. This process is one of the steps that are performed in the pre-stacking of seismic information as described by geophysicist Oz Yilmaz.

Seismic Unix software provides different tools for seismic data processing, which are used according to the requirements at each stage of the process. Some of these tools are digital filters, regarding the algorithms used and their parameters can improve or not seismic signals. The main aim of this phase of the processing is the elimination of the noise obtained during the field acquisition of the data. For this purpose, the filtration operations were carried out, eight tests in the frequency filters and five tests in the gain filters. In this way, a spectral analysis was performed to determine the best algorithm that represents an enhancement in the signal-to-noise ratio of the seismic data.

Consequently, digital filtering is a process that takes place during all stages of seismic processing, of its correct analysis depends the full use of all the information contained in the seismic signals for the interpretation of the characteristics of the subsoil. Knowing the operation of each algorithm allowed to make the best decisions regarding the selection of parameters and their results, In addition, pre-processed data were generated for the future continuation of seismic processing.

Key Words: Seismic Processing, Pre-Stacking, Digital Filtering, Frequencies, Spectrum.

INTRODUCCIÓN

Para procesar datos sísmicos se debe seguir un orden secuencial que permita extraer señales de ondas claras y de esta manera realizar un correcto análisis e interpretación de los datos geofísicos.

Es por esto que se realiza este trabajo con el propósito de obtener una línea de datos sísmicos pre procesados en el software libre desarrollado por The Center for Wave Phenomena (CWP) del Departamento de Geofísica de la Escuela de Minas de Colorado, Seismic Unix, teniendo como foco experimental la aplicación, comparación y análisis de los diferentes tipos de filtros digitales para potenciar la calidad de la información sísmica, con el propósito de que pueda ser usada en las siguientes etapas del procesamiento de los datos sísmicos marinos 2D obtenidos de manera libre a través de un servidor web.

Para iniciar el proceso de filtrado de la línea marina sísmica 2D se instaló el paquete de Unix, y el software de procesamiento Seismic Unix; posteriormente se obtuvieron los datos a trabajar de manera libre a través del open data de un servidor web, se realizó la conversión de los datos al formato interno, consecutivamente la corrección de la geometría y la comparación de distintos filtros digitales en la imagen sísmica, por último se elaboró un análisis espectral para determinar los cambios presentados en los datos sísmicos.

En resumen, en este trabajo se efectúa la primera etapa del procesamiento de datos sísmicos, llamado etapa de Pre Procesamiento, con el objetivo de obtener una señal limpia, atenuando el ruido al efectuar distintas pruebas de filtros con múltiples algoritmos, comparándolos y realizando un análisis espectral para obtener la mejor visualización de la traza sísmica en la siguiente etapa del procesamiento. Es una etapa importante, ya que la veracidad de los datos procesados y su análisis de resultados depende de un buen desarrollo del proceso desde el inicio.

OBJETIVOS

GENERAL

Realzar la relación señal/ruido de los datos de una línea marina sísmica 2D mediante la aplicación y comparación de filtros digitales en el software Seismic Unix.

ESPECÍFICOS

1. Obtener los datos sísmicos y llevarlos al entorno de trabajo del software de procesamiento.

2. Aplicar distintos algoritmos de filtros a una traza sísmica marina 2D mediante el software de procesamiento Seismic Unix.

3. Realizar un análisis espectral a los datos sísmicos obtenidos a partir del filtrado digital.

4. Realizar los controles de calidad requeridos durante el procesamiento de los datos sísmicos.

5. Generar los datos sísmicos pre-procesados para continuar con las siguientes etapas del procesamiento sísmico.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

A partir de la adquisición de datos sísmicos 2D de reflexión se inicia el procesamiento de la información, el cual se divide en tres etapas importantes según Yilmaz: el pre apilamiento, el apilamiento y el post apilamiento. La etapa inicial de pre apilamiento consiste en la edición de la información. El objetivo principal de esta fase es eliminar el ruido que interfiere en los datos y que dificultan llevar a cabo las siguientes etapas de procesamiento, y como consecuencia altera el análisis de las características geológicas subsuperficiales obtenidas como producto final del proceso.

Uno de los procesos que se usan para llevar a cabo tal objetivo es la aplicación de filtros digitales en diferentes dominios (frecuencia o tiempo) de la información, estos filtros están enmarcados en distintos algoritmos los cuales son creados por numerosas compañías. Es el caso del software libre desarrollado por The Center for Wave Phenomena (CWP) del Departamento de Geofísica de la Escuela de Minas de Colorado, Seismic Unix. Es preciso mostrar una metodología concisa que permita el pre procesamiento de los datos sísmicos a través del paquete Unix, puesto que actualmente existe muy poca información relacionada al uso de este software.

Cada algoritmo tiene unas características específicas que modifican la información de acuerdo a las especificaciones que se requieran; en consecuencia, se requiere mostrar las diferencias entre los distintos algoritmos de filtros digitales aplicados a los datos sísmicos en el software Seismic Unix, y de esta manera determinar ¿Cómo se registra visualmente cada filtro aplicado a los datos? ¿Qué significa espectralmente cada filtro? ¿Cuál es el mejor algoritmo para el realce de las señales sísmicas? Es decir, se pretende realizar un análisis comparativo y exhaustivo de la información obtenida durante la etapa de pre procesamiento.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Los métodos de prospección geofísica han ido evolucionando en Colombia a través del tiempo gracias a la necesidad de encontrar nuevas reservas de hidrocarburos que permitan solventar la demanda de consumo en el país. La exploración sísmica es una de las principales herramientas que se utilizan al momento de caracterizar reservorios de hidrocarburos. Ese proceso está comprendido por dos etapas: la adquisición de los datos y el procesamiento de los mismos.

Dentro de la etapa de procesamiento de datos sísmicos 2D de reflexión, se encuentra la fase de pre apilamiento, en donde se requiere eliminar el ruido existente de las señales obtenidas mediante las técnicas y herramientas adecuadas. Por esta razón es importante conocer las herramientas proporcionadas por el software Seismic Unix para este proceso, de tal manera que se ejecute eficientemente la etapa de atenuación del ruido para que al momento de la interpretación no se presente alteración en los atributos geológicos obtenidos a partir de la información sísmica.

Esta etapa del procesamiento de datos sísmicos es transcendental debido a que mejora la visualización de la información sísmica, facilitando las etapas de apilamiento y post apilamiento de tal manera que la información final obtenida de los rasgos estratigráficos pueda ser interpretada eficazmente. Adicionalmente, se incorpora información para el manejo de las herramientas proporcionadas por el software Seismic Unix en esta fase del procesamiento sísmico puesto que la información referente a ello es muy escasa.

En resumen, se pretende realizar la etapa del pre apilamiento de datos sísmicos con el objetivo de realzar la relación señal/ruido que se obtiene durante la etapa de adquisición marina o terrestre de la información sísmica, e inclusive, durante la misma etapa del procesamiento; esto con el fin de obtener datos claros que permitan una adecuada interpretación de los atributos sísmicos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES

Actualmente no se encuentra gran cantidad de información referente al procesamiento de datos sísmicos en el software Seismic Unix desarrollado por The Center for Wave Phenomena (CWP) del Departamento de Geofísica de la Escuela de Minas de Colorado. Como ya se había mencionado anteriormente, algunas compañías dedicadas al servicio de la industria petrolera elaboran sus propios algoritmos e inclusive trabajan con software interno o softwares comerciales para el procesado de los datos.

Sin embargo, investigando en diferentes portales de información, se han hallado algunos documentos, como el presentado en el año 2009, en el Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, el trabajo de grado *Procesamiento Sísmico en Tiempo 2D terrestre con Seismic Unix,* por Griselda Cureño Lópes para optar el título de *Ingeniero Geofísico,* este trabajo se basa en la secuencia básica de procesamiento de datos sísmicos reales utilizando este software, no obstante, está no se centra en el análisis de los resultados obtenidos en cada etapa del procesamiento.

Adicionalmente se ha encontrado un documento presentado en el año 2007 ante la Universidad Simón Bolívar, el trabajo de grado *Modelado Sísmico con Seismic Unix*, por José Antonio Lara Racioppi para optar del título de *Ingeniero Geofísico.* Este trabajo comprende un modelado sísmico a partir de perfiles de velocidad generados con el método de triangulación usando el paquete computacional Seismic Unix.

Siguiendo con la labor investigativa se puede encontrar material pedagógico referente al procesamiento de datos sísmicos en SU, como los expuestos en el año 2015 por el *Semillero de Investigación en Geofísica Aplicada y Computacional,* de la Universidad Industrial de Santander, en donde se puede conocer las herramientas básicas del paquete SU para el procesamiento de la información sísmica.

Esta investigación permitió el desarrollo del trabajo en cuanto a herramientas y procedimientos que enriquecieron las bases teóricas y su aplicabilidad en la realización de este documento.

2.2. MARCO CONCEPTUAL

Es importante tener algunos conceptos claros para entender las bases y el desarrollo de este trabajo. A continuación se citaran algunos términos que contextualizan al lector en el tema de estudio.

2.2.1. ADQUISICIÓN DE DATOS SÍSMICOS

El principio básico de la prospección sísmica es iniciar un impulso desde una fuente sísmica en o cerca de la superficie de la Tierra y registrar las amplitudes y tiempos de recorrido de las ondas que vuelven a la superficie después de ser afectadas o refractadas de la interfaz de una o más capas. Cuando una fuente sísmica emite un impulso que se propaga a través de las capas sedimentarias, las ondas sonoras viajan entre las capas con diferentes velocidades y serán refractadas de acuerdo con la ley de Snell. (Mondol, 2010)

El proceso de adquisición sísmica es el método geofísico más usado a nivel mundial para la exploración de hidrocarburos. Según la Agencia Nacional de Hidrocarburos, la sísmica de reflexión se puede adquirir en tres tipos de ambientes: marino (offshore), terrestre (onshore) y zonas de transición.

Como lo menciona el Instituto Americano de Petróleo (API), en las operaciones marítimas, un buque especializado remolca una "serpentina sísmica", o una colección de cables con fuentes sísmicas e hidrófonos unidos. Las fuentes sísmicas utilizan aire comprimido para producir energía acústica. Los hidrófonos capturan las ondas sonoras que regresan las cuales serán analizadas posteriormente.

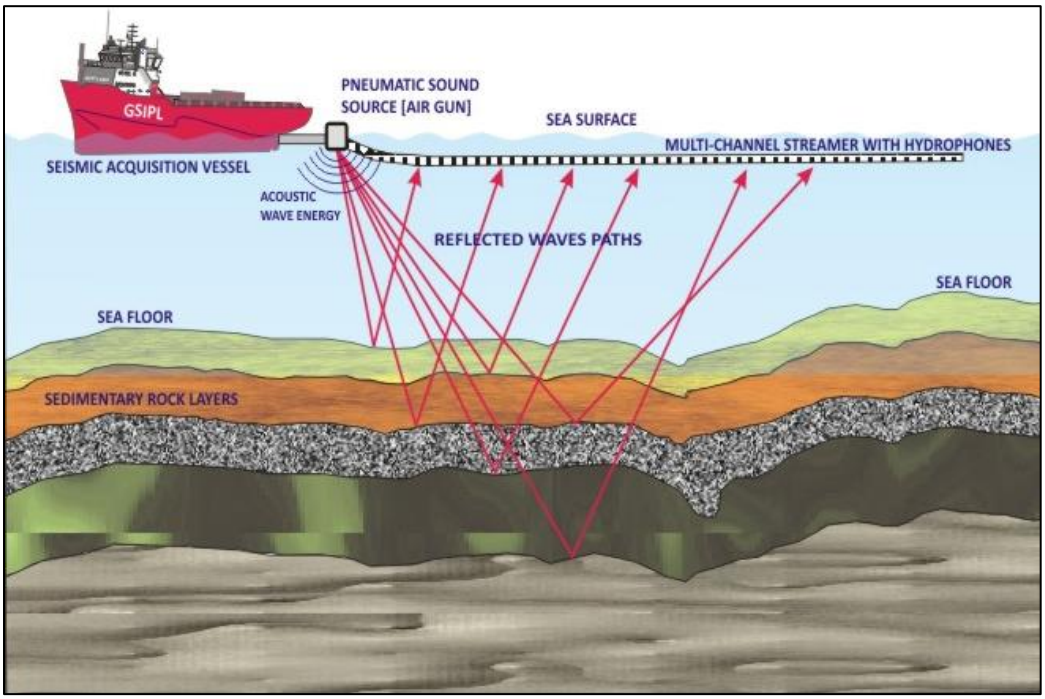


Ilustración 1: Adquisición de datos sísmicos marinos.

Fuente: 2D High Resolution Seismic Survey, Geostar Surveys Indis Pvt. Ltd. Recuperado de: http://geostar-surveys.com/map%20-methodology%20-%20High%20Resolution%20Seismic%20surveys.html

2.2.2. METÓDO SÍSMICO DE REFLEXIÓN

En el método sísmico se utiliza una fuente de energía impulsiva o vibratoria para generar las ondas elásticas que se propagan hacia el subsuelo pasando por capas de rocas que poseen propiedades físicas y litológicas de interés. Las ondas experimentan una partición de energía cada vez que encuentran a su paso una interfaz entre dos capas con velocidades y densidades diferentes; una parte de la energía se transmite y otra se refleja. La energía que se refleja forma el campo de ondas que contiene información de las amplitudes, longitudes de onda, fases y tiempos dobles de los reflectores del subsuelo. Cuando estos campos de onda llegan a la superficie son captados por instrumentos de escucha llamados en general geófonos y esta información se almacena en forma digital en cintas o discos duros en los equipos de registro del sismógrafo o “casablanca”. (ANH, 2010).

2.2.3. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS SÍSMICOS

Luego de adquirir los datos sísmicos, se hace un procesamiento en campo y posteriormente en oficina, para ello se cuenta con varios software que facilitan este proceso. Las etapas del procesamiento varían de acuerdo a las condiciones requeridas para el trabajo, sin embargo, una de las actividades iniciales que se realiza es la eliminación del ruido en la información sísmica.

En la ilustración 2 se puede observar las tres etapas de la secuencia básica de procesamiento de datos sísmicos según Yilmaz:

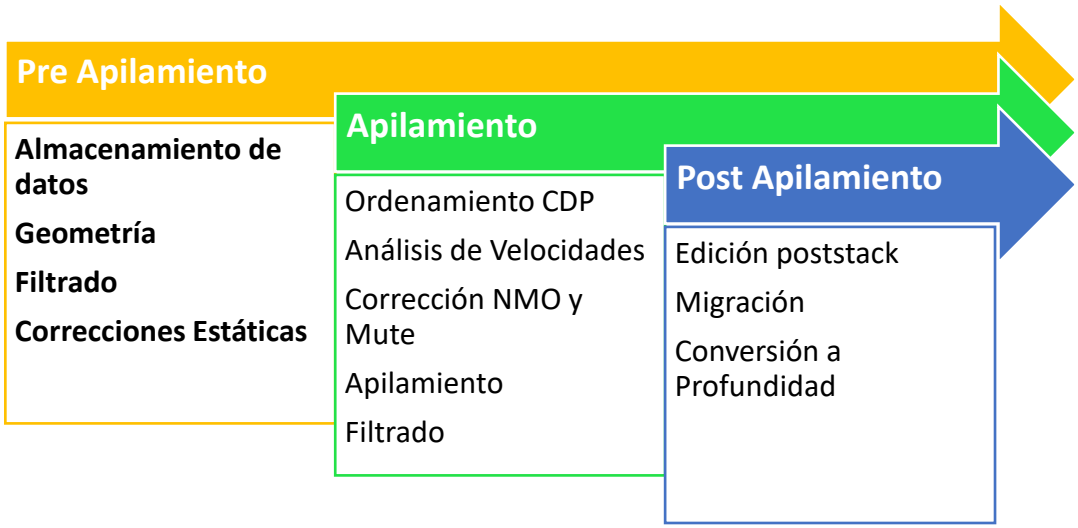


Ilustración 2: Secuencia básica de Procesamiento de datos sísmicos.

Fuente: Seismic Data Analysis. Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data. Öz Yilmaz. Volume I. Society of Exploration Geophysicists. (2001)

El propósito de adquirir y procesar datos sísmicos es aprender algo sobre el interior de la Tierra. Entonces el primer paso es llevar a cabo la adquisición de datos diseñados para el problema, el segundo paso es llevar a cabo el procesamiento de datos para identificar y mejorar la señal deseada, y el tercer paso realizar interpretaciones de datos basados en los datos procesados.

Después de la adquisición de datos y antes del procesamiento de datos, se lleva a cabo el proceso de control de calidad de datos, o QC. Esto implica comprobar la geometría de la encuesta, el formato de los datos y la consistencia entre los diferentes componentes del conjunto de datos, y asegurar que la calidad y la cantidad del conjunto de datos son satisfactorias para los objetivos del estudio. Después del pre-procesamiento para suprimir diversos tipos de ruido en los datos, la formación de imágenes sísmicas se lleva a cabo para producir diversas formas de imágenes para el proceso de interpretación. Los métodos de imágenes sísmicas incluyen migración sísmica, tomografía sísmica y muchos otros métodos de extracción de diversos atributos sísmicos. Algunas personas llaman a los métodos de imagen sísmica el procesamiento avanzado. (Zhou, 2014)

2.2.3.1. RUIDO EN LA INFORMACIÓN SÍSMICA

El ruido es una variación o fluctuación en los valores medidos y que se superpone con los valores buscados llamados señal. En Sismología, el ruido generalmente son pequeñas vibraciones del suelo por el paso de pesados vehículos y de fuertes vientos. Un método simple para mejorar la relación señal-ruido es repetir las lecturas y tomar su promedio: La señal se suma mientras que el ruido, generalmente aleatorio, tiende a anularse. Esto se llama *stacking* y también puede hacerse con perfiles, lo que es muy importante en *Reflexión Sísmica*. Un método más complejo para mejorar dicha relación implica realizar el procesamiento de señales.

La adquisición de datos sísmicos marinos recoge grandes cantidades de datos sísmicos y de posicionamiento, y tales datos representan numerosos parámetros que tienen múltiples fuentes de error. El viento, las olas y las corrientes mueven físicamente las serpentinas sísmicas en relación con el buque de remolque en un "ángulo de empuje" con respecto al rumbo del buque de remolque. Un ángulo de plumaje relativamente pequeño de cinco por ciento puede compensar un punto de serpentina a cientos de metros de la línea de levantamiento. También se producen errores debido a la dispersión de los puntos de reflexión de la trayectoria de la onda subsuperficial, a la ocurrencia de desplazamientos de fuente y receptor, a la inclinación de las superficies reflectantes ya otros factores. La exactitud y utilidad de los datos sísmicos requiere que los procedimientos de procesamiento de datos múltiples localicen con precisión los puntos de datos que representan los datos sísmicos. (Estrada, 2009)

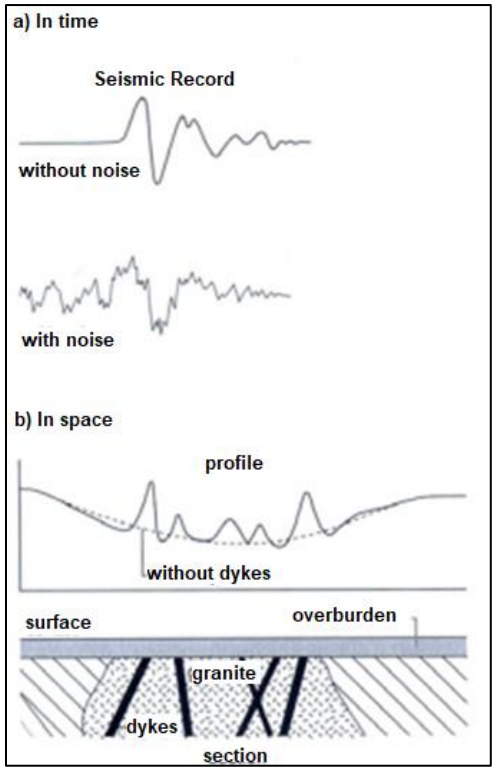


Ilustración 3: Ruido en el tiempo y en el espacio.

Fuente: Looking into the Earth. An introduction to Geological Geophysics – Alan E. Musset and M. Aftab Khan, Cambridge University Press (2000).

2.2.3.2. FILTRADO DIGITAL

Un modo alternativo de eliminar las longitudes de onda o frecuencias no deseadas es mediante el filtrado. Los filtros digitales son generalmente aplicados a valores tomados a intervalos de muestra espaciados regularmente. Si las lecturas son continuas los valores son leídos de la curva. Si son espaciadas irregularmente, los valores son leídos por interpolación. Uno de los filtros digitales más simples toma el promedio de tres lecturas sucesivas y lo coloca en el lugar del punto del medio. Esto es repetido en cada punto de muestreo, de modo que cada lectura es “usada” tres veces. Este promedio simple o corriente es también llamado “ventana moviente”. Se puede comparar con una tarjeta con un agujero de un tamaño tal que solo permite ver tres valores, los promedia y este valor lo pone en el central. Luego es desplazada al punto siguiente y hace lo mismo.

El citado valor medio es obviamente:

$$y_n = (y_{n-1} + y_n + y_{n+1})/3$$

Ecuación 1: Modelo matemático para uno de los filtros más simples.

Fuente: Looking into the Earth. An introduction to Geological Geophysics – Alan E. Musset and M. Aftab Khan, Cambridge University Press (2000).

El subíndice denota el punto donde se debe ubicar el resultado, es decir el punto medio de las tres lecturas.

Para averiguar cuáles longitudes de onda están siendo reducidas y en qué medida, se puede aplicar filtros para un rango de onda sinusoidal pura y ver cuánto son reducidos. Las longitudes de onda de varias veces el intervalo de muestra son fuertemente afectadas, y las de un valor cercano al de la muestra son fuertemente reducidas. Los filtros de 5 y de 7 puntos las reducen más que los de 3 puntos.

Estos filtros son llamados *low pass* porque dejan pasar longitudes de onda mayores, con poca o ninguna reducción, pero reducen enormemente las cortas. Estos son también llamados filtros de alisado o suavizado porque el "dentado" es reducido. Lo opuesto a un filtro *low pass* es el filtro *high pass*, que deja pasar solamente las longitudes de onda más cortas, mientras que el filtro *pasa-banda* es aquel que deja pasar solo un rango de longitudes de onda o frecuencias. (Estrada, 2009). El filtro *bandpass* se utiliza con mayor frecuencia, ya que un trazo sísmico típicamente contiene algunos ruidos de frecuencias bajas.

Matemáticamente, un filtro digital H (z) puede expresarse en forma racional como

$$H(z) = \frac{a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + \cdots}{b_0 + b_1 z + b_2 z^2 + \cdots}$$

Ecuación 2: Expresión matemática de un filtro digital.

Fuente: Practical Seismic Data Analysis, Hua-Wei Zhou. Cambridge University Press (2014).

El filtrado en el dominio de la frecuencia implica multiplicar el espectro de amplitud de la traza sísmica de entrada por el del operador de filtro. Por otra parte, el proceso de filtrado en el dominio del tiempo implica convolver al operador del filtro con la serie temporal de entrada.

Es decir, el filtro digital está representado por una cantidad de coeficientes de ponderación calificados, que pueden expresarse como series temporales o denotadas por la transformación z. Cuando el filtro actúa sobre una señal digital de entrada que puede expresarse como otra serie temporal, el filtro funciona como convolución con la señal de entrada. (Zhou, 2014)

Según Philip Kearey, Michael Brooks and Ian Hill del libro An Introduction to Geophysical Exploration, la convolución es una operación matemática que define el cambio de forma de una onda como resultado de su paso a través de un filtro. Así, por ejemplo, un impulso sísmico generado por una explosión se altera en forma mediante efectos de filtrado, en el sistema de registro, de manera que el sismograma (la salida filtrada) difiera significativamente del impulso sísmico inicial (la entrada).

La aplicación de un filtro en la frecuencia o en el dominio del tiempo produce resultados básicamente idénticos. En la práctica, se favorece el enfoque en el

dominio del tiempo, ya que la convolución que implica un arreglo corto, tal como un operador de filtro, es más económica que la aplicación de transformadas de Fourier. (Yilmaz, 2001).

En síntesis, se puede encontrar varios tipos de filtros digitales utilizados en el procesamiento de datos sísmicos, los cuales se pueden observar en la Tabla 1.

Nombre	**Función**
Filtro High-pass (Corte bajo)	Atenuar las frecuencias altas y / o bajas
Filtro Low-pass (Corte alto)	
Filtro Band-pass	
Fitro de corte (Notch filter)	Atenúa la banda estrecha de frecuencias
Balanceo en línea	Ajusta la impedancia resistiva / reactiva
Deconvolución de Spike	Construye todos los componentes de frecuencia dentro del paso de banda especificado a la misma amplitud
Blanqueo	
Deconvolución predictiva	Elimina los aspectos repetitivos después del retardo
Filtrado óptimo	Produce resultados lo más cerca posible de una salida deseada sujeto a restricciones
Filtración de Wiener	
Procesamiento de la ondícula	Determina o cambia la ondícula incrustada
Filtro de entropía máxima	Produce resultados tan impredecibles como sea posible
Filtro de entropía mínimo	Maximiza el carácter puntiagudo de la salida
Filtro mediano	Suprime el ruido tomando el valor mediano de un vecindario predefinido
Deconvolución homomórfica	Elevadores en el dominio cepstral
Apilado (Stacking)	Atenúa componentes fuera de registro
Filtro de velocidad	Filtro multicanal para atenuar eventos de ciertas velocidades aparentes o inmersiones
Filtro f-K	
Filtro Tau-p (τ-p)	Filtro multicanal para atenuar ciertos eventos
Filtro de tiempo variable	Cambio de los parámetros del filtro con el tiempo, usualmente una mezcla lineal de procesamiento con diferentes parámetros
Filtro de coherencia	Filtro multicanal para atenuar los casos en que no se satisfacen ciertas pruebas de coherencia
Picking Automático	Filtro multicanal para eliminar datos que fallan a ciertas pruebas de coherencia y amplitud
Filtro espacial	Realiza un muestreo discreto en el espacio

Tabla 2: Tipos de Filtros Digitales.

Fuente: Practical Seismic Data Analysis, Hua Wei Zhou, Cambridge University Press (2014).

2.2.3.3. RECUPERACIÓN DE LA AMPLITUD

Uno de los pasos en el proceso de pre apilamiento es la recuperación de ganancias o amplitudes que se produce por factores como la divergencia esférica. Este fenómeno es el principal factor que determina los cambios en el tiempo de la amplitud, la curvatura del rayo (causada por el incremento de la velocidad respecto a la profundidad) y la pérdida de energía del rayo convertida en calor, debido a su paso a través del medio. (Sheriff & Geldart, 1995). A continuación se presentan algunos de los métodos que describen los principales algoritmos de recuperación de amplitudes:

- Automatic Gain Control (AGC): es el tipo de escala más común (y a menudo más peligroso) que se utiliza. Se utiliza una ventana deslizante de longitud fija para calcular la amplitud media dentro de la ventana. Este promedio se compara con un nivel de referencia y la ganancia calculada para un punto en la ventana. La ventana entonces desliza hacia abajo una muestra y se calcula la siguiente corrección de ganancia. El proceso continúa hasta que se ha obtenido todo el rastro.

- ROBUST AGC: Es utilizado cuando las muestras mínimas y máximas dentro de una ventana se excluyen antes de calcular el promedio. En este método se conservan extremos de amplitud.

- AGC REVERSIBLE: Este tipo de AGC se aplica antes de la supresión de ruido multicanal, como la eliminación múltiple. El principio es igualar los datos pero almacenar los escalares AGC. A continuación, se aplica el proceso multicanal y se eliminan los escalares AGC. Bajo ciertas circunstancias esto puede ser efectivo, pero debe ser tratado con precaución cuando se requiere un análisis AVO.

- EQUALIZACIÓN: Por lo general se refiere a un trazo completo AGC en el que la amplitud media de cada traza se establece en un valor fijo.

- EXPONENCIAL: Especificado en dB por segundo.

- POWER: Tiempo para una potencia normalmente entre 1.8 y 2.4.

- CONTROL DE GANANCIA PROGRAMADO: normalmente la curva de decaimiento de amplitud (amplitud frente al tiempo) de una traza o grupo de trazas se suaviza y la función resultante se gana de modo que la desintegración es mínima. Los valores de ganancia más grandes se aplican generalmente en tiempos posteriores para compensar la descomposición de la energía. (Hardy, 2015)

A continuación se muestra un esquema de la aplicación de las correcciones de ganancia:

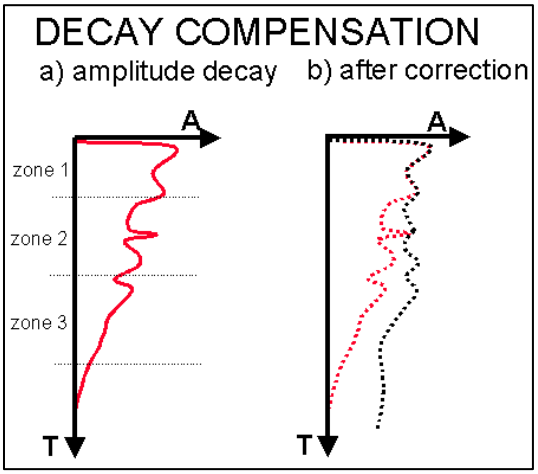


Ilustración 4: Esquema de la aplicación de correcciones de amplitudes; en la imagen a) Decaimiento de la amplitud y b) Señal después de la corrección.

Fuente: Basic Seismic Processing for Interpreters, Scaling, Scaling in Practice, Rob Hardy (2015). Recuperado de: http://www.xsgeo.com/course/gain.htm#intro

2.2.4. SEISMIC UNIX

El procesamiento de datos sísmicos 2D se realiza mediante el paquete de Unix y el programa Seismic Unix (SU), el cual es un software libre desarrollado por The Center for Wave Phenomena (CWP) del Departamento de Geofísica de la Escuela de Minas de Colorado. SU es una extensión del sistema operativo Unix, y por lo tanto comparte muchas características de Unix, incluyendo la flexibilidad y la expansibilidad de Unix. La filosofía fundamental de Unix es que todos los comandos del sistema operativo son programas ejecutados bajo ese sistema operativo. La idea es que se identifiquen las tareas individuales, y que se escriban pequeños programas para realizar esas tareas por sí solas.

Unix tiene la característica añadida de soportar una variedad de lenguajes de shell, un Shell es la interfaz, el modo de comunicación entre el usuario y el sistema, (Lopes Cureño, 2009), haciendo de Unix, en sí mismo, un meta-lenguaje. Seismic Unix también se beneficia de todos estos atributos. En combinación con programas Unix estándar, los programas Unix de Seismic pueden utilizarse en scripts de shell para ampliar la funcionalidad del paquete. (CWP C. f., 2012).

2.2.5. SEISEE

Este software muestra los datos sísmicos en los formatos SEG-Y, CWP / SU, CGG CST en la pantalla de la computadora (Windows-2000, XP, Vista Windows-7, 8, Linux + Wine). (Pavlukhin & Sakhalinsk, 2004-2013).

Algunas de sus características son:

- Muestra sísmica en varios modos (wiggle, área variable, densidad variable, color)
- Escala de la imagen sísmica, control de ganancia, configuración de etiquetado de ejes
- Parcelas sísmicas a impresora (plotter)
- Exporta la imagen en los formatos Bitmap de Windows (.bmp) y postscript.
- Se visualizan los encabezados de seguimiento de SEG-Y (formatos Integer * 1, * 2, * 4, IEEE Float * 4, * 8, IBM Float * 4)
- Búsqueda de rastreo por valor de elemento de encabezado
- Exploración de muestras de datos
- Encabezado de texto y editor binario
- Filtro de paso de banda
- Control automático de ganancia (AGC)
- Comprobación de coherencia de encabezados
- Grabar un archivo SEG-Y completo o parte de él en el disco en formato SEG-Y (IBM-32) con la capacidad de seleccionar datos en la base del índice de rastreo o el valor del encabezado de rastreo y el intervalo de tiempo dado; También se admite el orden de trazado de reversión, los parámetros de procesamiento se pueden aplicar a los datos registrados (filtro, AGC, etc.).
- Exportar seguimiento (s) de muestra y valores de encabezado a archivo de texto
- Importar los valores de los encabezados de trazas desde el archivo de texto
- Cambio de rastreo de acuerdo con el valor del encabezado de seguimiento "Tiempo de grabación de retardo"
- Selección de trazas que se mostrarán mediante índice de rastreo o valor de encabezado y por expresión
- Los encabezados de seguimiento cambian por medio de expresiones
- Edición de valor de encabezado de seguimiento único
- Abrir y corregir archivos que contengan datos incorrectos en encabezado binario (Modo de recuperación)

3. METODOLOGÍA

Uno de los objetivos principales en el procesamiento de los datos sísmicos es la eliminación de las ondas, como el ruido, que se encuentra presente en los registros de las reflexiones. Este proceso puede lograrse mediante la aplicación de filtros digitales. A continuación se describe el diagrama de proceso utilizado para llevar a cabo este objetivo.

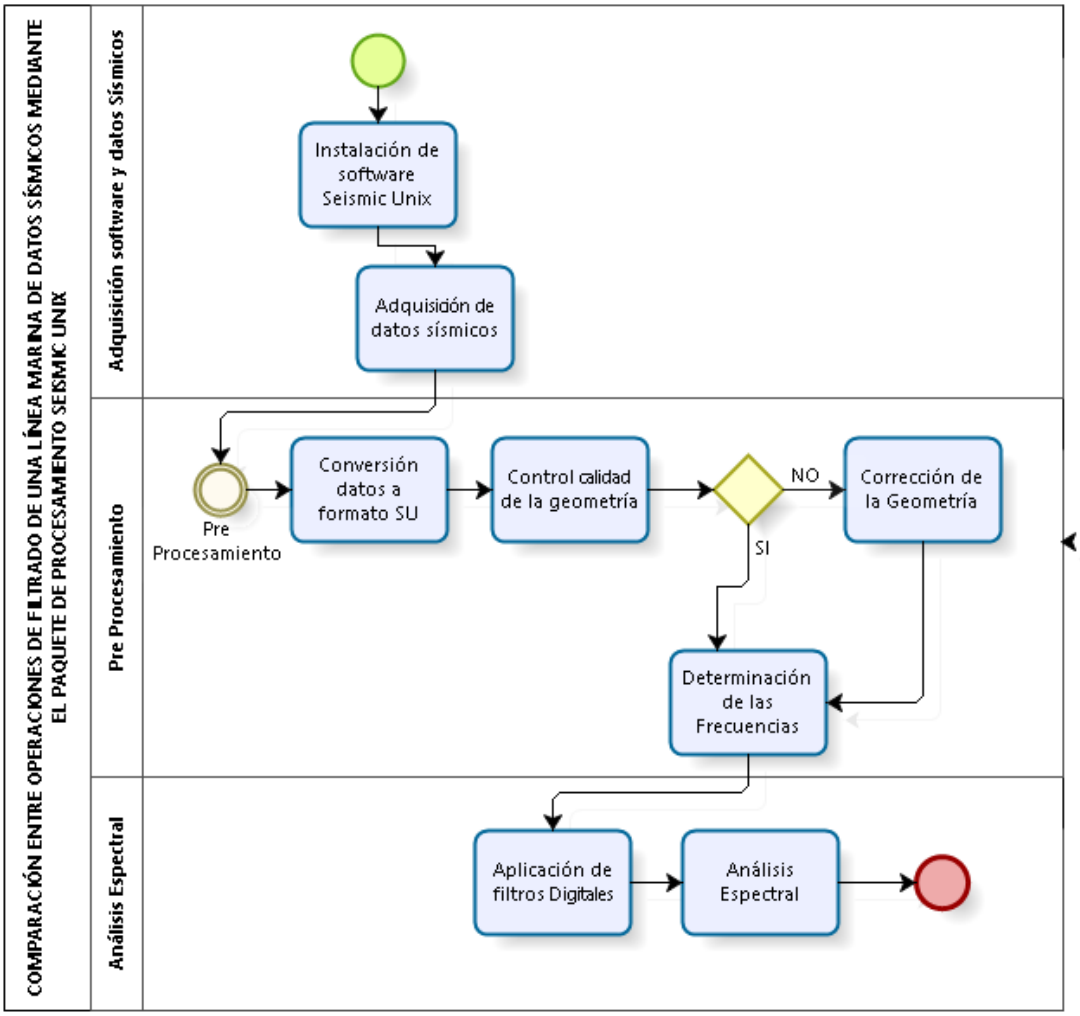


Ilustración 5: Diagrama de flujo en el proceso de comparación de filtros en el software Seismic Unix para una línea sísmica marina 2D.

Fuente: Propia

3.1. ADQUISICIÓN DE SOFTWARE Y DATOS SÍSMICOS

Para esta etapa del proceso se consultaron varios portales web con el fin de obtener los datos sísmicos de libre acceso, verificando que el archivo a trabajar fuera un archivo crudo, esto mediante la extensión del mismo. Por otra parte, como ya se ha mencionado, el software fue obtenido mediante la página web de The Center for Wave Phenomena (CWP) del Departamento de Geofísica de la Escuela de Minas de Colorado.

3.2. PRE PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

El pre procesamiento de la información se realizó en tres etapas:

- Verificación del formato de los datos descargados, mediante la extensión del archivo en formato .SEGY, es decir, la información representada en el formato binario de la maquina; siendo este el formato internacional adoptado en 1990 por la Sociedad de Geofísicos de Exploración (SEG) para sísmica profunda. (Vargas Parra, 2009), posteriormente la conversión de los datos a formato SU, en el software Seismic Unix.

- Verificación y corrección de la geometría del archivo, mediante la visualización de las cabeceras de los datos sísmicos utilizando el software Seismic Unix.

- Determinación del rango de frecuencias en donde se aplican los filtros digitales mediante la plataforma de Seismic Unix. Se verifica este rango de frecuencias a través del software libre Seisee

3.3. ANÁLISIS ESPECTRAL

El análisis espectral se realiza para tratar de entender el comportamiento de la frecuencia en una traza sísmica y de esta manera elegir los tipos de filtro y sus parámetros. Se realiza mediante el software Seismic Unix. Es un método reiterativo de prueba y error que a medida se asocia con la práctica y los conocimientos del procesador.

4. DESARROLLO

4.1. INSTALACIÓN DEL SOFTWARE LIBRE SEISMIC UNIX

El primer paso para el desarrollo de la metodología consiste en descargar el software libre Seismic Unix desde el servidor web: *www.cwp.mines.edu,* de The Center for Wave Phenomena (CWP), en la pestaña *Research, Sofftware & Publications → Software → Seismic Unix (SU).*

Sin embargo, este software funciona únicamente con el sistema operativo Linux, por lo tanto hay que instalarlo previamente. Como el computador con el que se trabajó en el procesamiento de los datos ya estaba configurado con el sistema Windows, se descargó e instaló la plataforma libre *Ubuntu,* la cual contiene el entorno Linux. Ésta queda en una partición del equipo sin alterar o eliminar el sistema operativo Windows.

4.2. ADQUISICIÓN DE LOS DATOS

Para el desarrollo del trabajo se pretendió desde un comienzo trabajar con datos sin restricciones, es decir se obtuvo los datos a partir del Open data del servidor web http://s3.amazonaws.com/open.source.geoscience/open_data/Mobil_Avo_Viking_Graben_Line_12/mobil_avo.html, correspondiente a la Línea 12 Mobil Avo Viking Graben proporcionados por La Sociedad de Geofísicos de Exploración mediante la Publicación No 4 del SEG File Publications, Comparación de métodos de inversión sísmica en un único conjunto de datos reales, Robert G. Keys y Douglas J. Foster, Eds.

4.3. CONVERSIÓN DE LOS DATOS CRUDOS A FORMATO SU

Antes de realizar la conversión de los datos a formato Su, se realiza una pre visualización de los datos en el software gratuito *Seisee,* descargado desde la página web http://downloads.informer.com/seisee/2.2/.

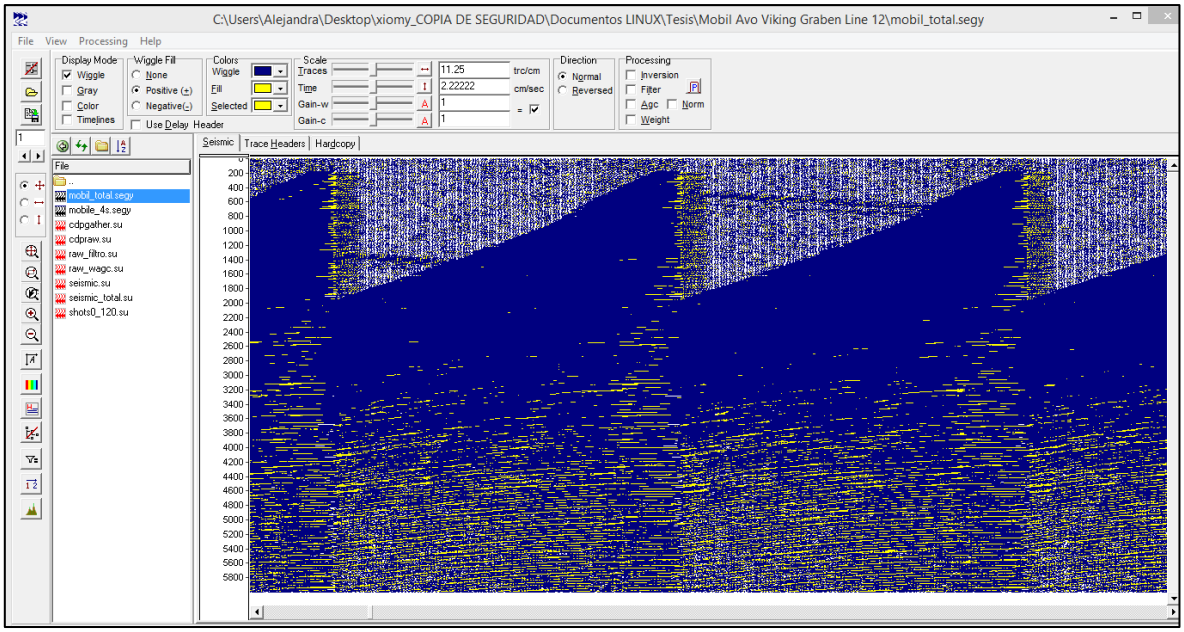


Ilustración 6: Visualización de los datos mobil_total.segy en el software Seisee.

Fuente: Propia

Se puede observar que los datos sísmicos se registraron en un tiempo de 6 segundos, motivo por el cual se recortan los datos en tiempo debido a la velocidad del procesamiento y al análisis de un segmento específico de la información. Debido a esto se resuelve recortar la información desde 0 hasta los 4 segundos.

Para recortar los datos en el tiempo, se realiza en *Seisee* mediante la opción File → Save As → En la ventana emergente ✓ All Traces → En la opción Time se des selecciona y se elige el tiempo de Min:0 a Max:4000 (microsegundos) → Save → mobile_4s.segy

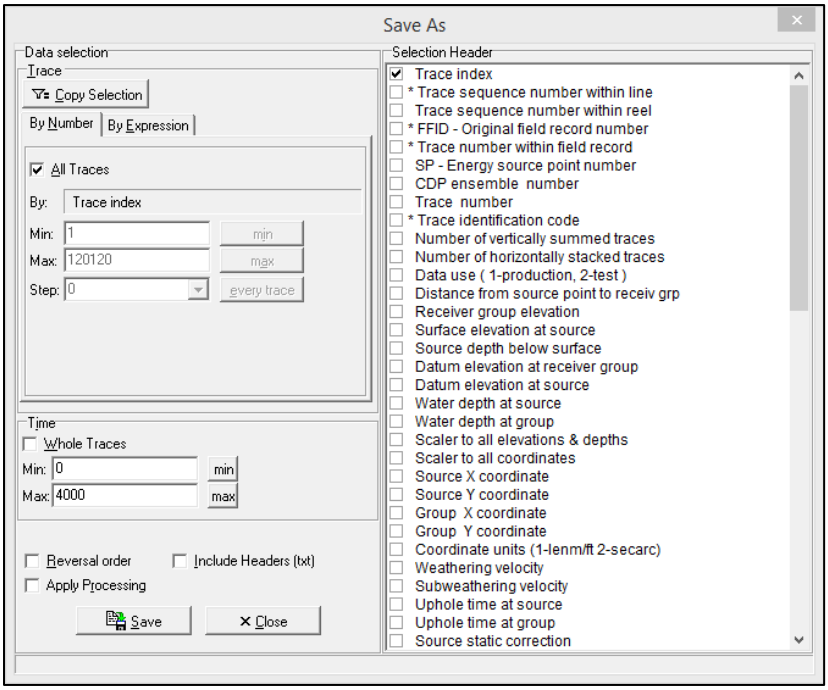


Ilustración 7: Recortar los datos en Tiempo, mediante el software Seisee.

Fuente: Propia

La conversión de los datos crudos *mobil_4s.segy* al formato SU, se realiza directamente en la terminal de Ubuntu, es decir donde se escriben las líneas de comandos a ejecutar, desde la carpeta donde se encuentra el archivo, mediante la expresión:

- *segyread tape=mobil_4s.segy verbose=1 | segyclean > seismic.su*

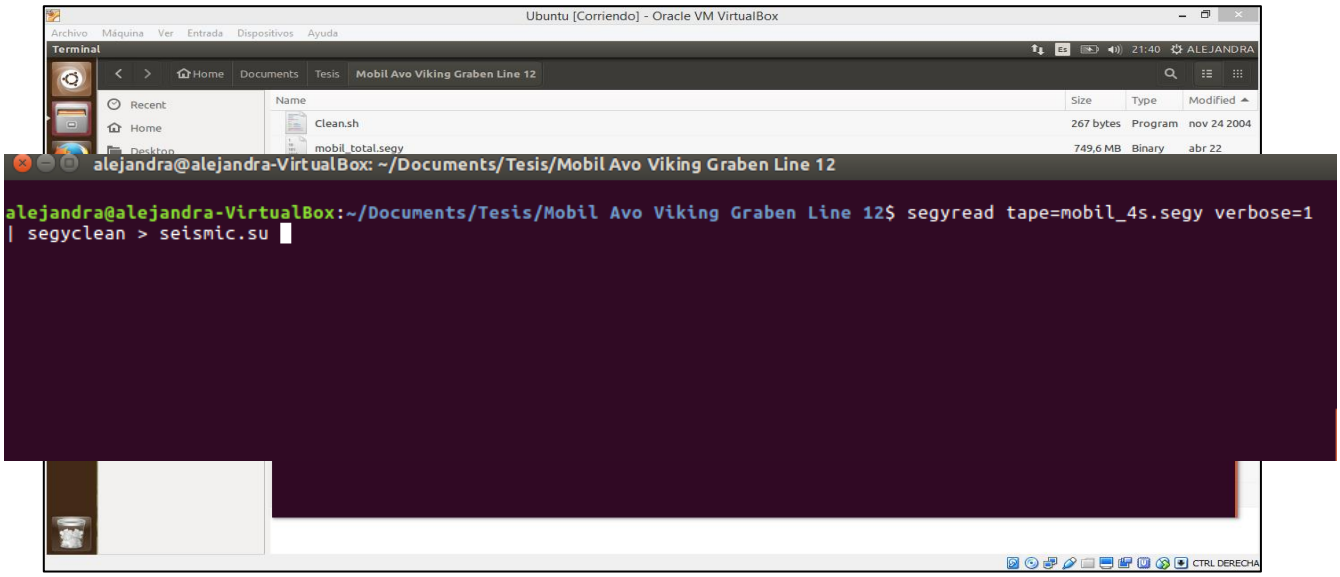


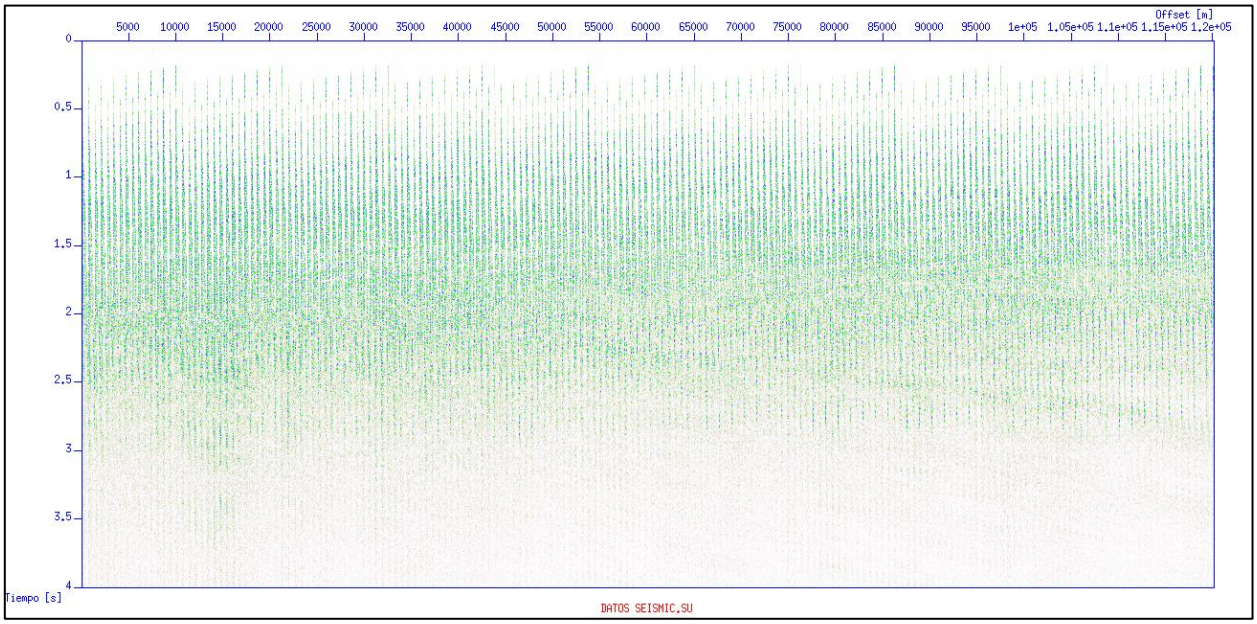
Ilustración 8: Conversión de los datos crudos *mobil_4s.segy* al formato SU en la terminal de Ubuntu.

Fuente: Propia

La visualización de los datos se realiza mediante el comando:

- *suximage < seismic.su perc=95 title="Datos seismic.su" label1="Tiempo (s)" label2="No de Trazas"*

a)



b)

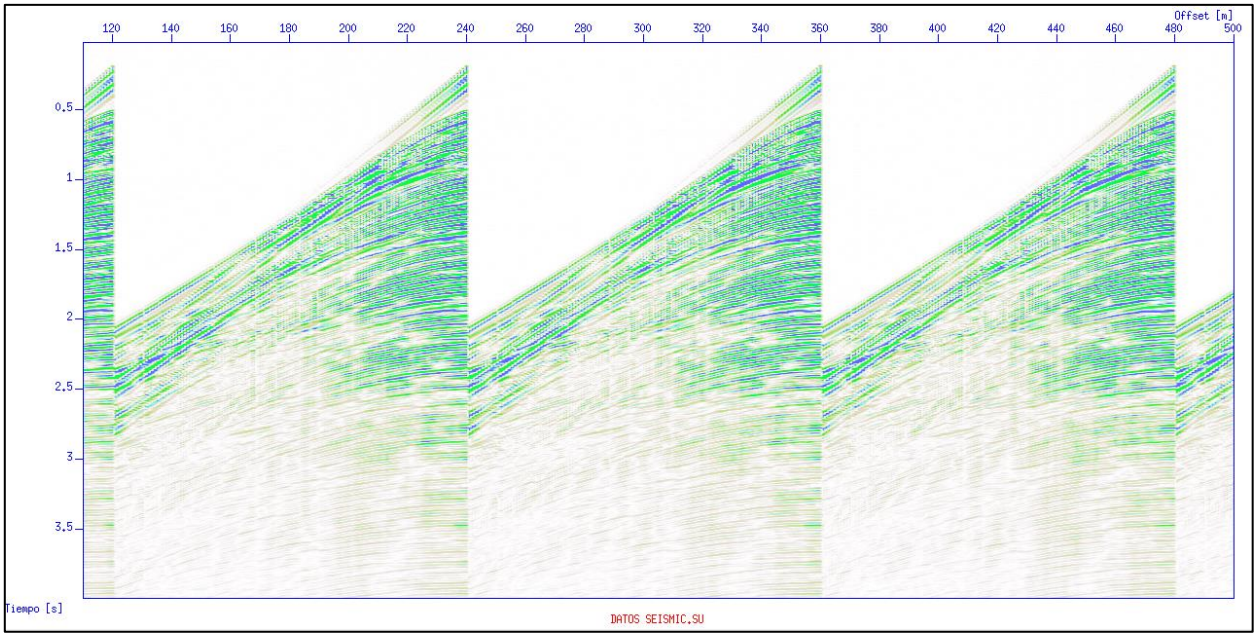


Ilustración 9: a) Visualización de los datos Seismic.su en el dominio del Tiempo. b) Visualización de los datos en el dominio del tiempo con acercamiento.

Fuente: Propia

Por otra parte, al ser el archivo *seismic.su* aún tan pesado para su procesamiento se decide aislar cierto rango de shots o disparos. Esta tarea se realiza en la terminal de Ububtu, especificando el rango de 0-120 shots en un archivo de salida denominado *shots0_120.su*, mediante el comando:

- *suwind < seismic.su key=fldr min=0 max=120 > shots0_120.su*

```
alejandra@alejandra-VirtualBox: ~/Documents/Tesis/Mobil Avo Viking Graben Line 12
alejandra@alejandra-VirtualBox:~/Documents/Tesis/Mobil Avo Viking Graben Line 12
$ suwind < seismic.su key=fldr min=0 max=120 > shots0_120.su
```

Ilustración 10: Comando para aislar un rango de disparos de la información en un archivo de salida shots0_120.su, en la terminal de Ubuntu.

Fuente: Propia

El archivo resultante shots0_120.su, se encuentra listo para continuar con la etapa de edición de la geometría.

4.4. EDICIÓN DE LA GEOMETRÍA

Es importante verificar que la información de las cabeceras (*headers*) de los registros sísmicos sea la correcta y en caso de no serla corregirla de manera manual.

Para verificar las características de la información sísmica de la línea marina 2D, en la terminal de Ubuntu, se utiliza el comando:

- *surange < shots0_120.su*, de esta manera se obtiene la siguiente información:

```
alejandra@alejandra-VirtualBox:~/Documents/Tesis$ surange < shots0_120.su
14160 traces:
tracl    1 14160 (1 - 14160)
tracr    1 14160 (1 - 14160)
fldr     3 120 (3 - 120)
tracf    1 120 (1 - 120)
ep       101 223 (101 - 223)
cdp      1 364 (1 - 364)
cdpt     1 120 (1 - 120)
trid     1
nhs      1
offset   -3237 -262 (-3237 - -262)
gelev    -10
selev    -6
scalel   1
scalco   1
sx       3237 6287 (3237 - 6287)
gx       0 6025 (0 - 6025)
counit   3
mute     48
ns       1001
dt       4000
```

Ilustración 11: Visualización de las cabeceras (headers) de la información sísmica.

Fuente: Propia

Se pude observar en la Ilustración 9 un listado de los tipos de datos SEGY/SU obtenidos de los *headers* de la traza sísmica. En la tabla 2 se muestra la descripción de los principales campos.

TIPO DE DATO	INFORMACIÓN DE LA TRAZA SÍSMICA	DESCRIPCIÓN
tracl	1-14160	Número de secuencia de las trazas dentro de la línea
tracr	1-14160	Número secuencial de trazas dentro de la cinta
fldr	3-120	Número de registro de campo
tracf	1-120	Numero de trazas dentro del registro de campo
ep	101-223	Número de punto de la fuente de energía
cdp	1-364	Número de conjunto de CDP
cdpt	1-120	Número de rastreo dentro del conjunto de CDP
trid	1	Código de identificación de rastreo 1=Dato Sísmico 2=Muerto 3=Ficticia 4=Fuera de tiempo 5=Uphole 6=Sweep 7=Timing
nhs	1	Número de trazas sumadas horizontalmente “Fold”
offset	-3237 -262	Distancia del punto de origen al receptor (Es negativo si está opuesto a la dirección en la que se disparó la línea)
gelev	-10	Elevación del grupo receptor desde el nivel del mar (sobre el nivel del mar es positivo)
selev	-6	Elevación de la fuente desde el nivel del mar (sobre el nivel del mar es positivo)
scalel	1	Factor de escala para 7 entradas anteriores con valor más o menos 10 a la potencia 0, 1, 2, 3 o 4 (si es positivo, multiplica, si es negativo divide)
scalcol	1	Factor de escala para las siguientes 4 entradas con valor más o menos 10 a la potencia 0, 1,

TIPO DE DATO	INFORMACIÓN DE LA TRAZA SÍSMICA	DESCRIPCIÓN
		2, 3 o 4 (si es positivo, multiplica, si es negativo divide
sx	3237-6287	Coordenada de la fuente en X
gx	0-6025	Coordenada del receptor en X
counit	3	Código de unidades de coordenadas: para las cuatro entradas anteriores 1 = longitud (metros o pies) 2 = segundos de arco (en este caso, los valores X son longitud y los valores Y son latitud, un valor positivo designa el número de segundos al este de Greenwich o al norte del Ecuador
mute	48	Tiempo muerto
ns	1001	Número de muestras
dt	4000	Intervalo de muestreo (en microsegundos)

Tabla 3: Lista de identificación de los datos de la línea sísmica marina 2D en Seismic Unix.

Fuente: Lista del tipo de datos SU (SEGY). Recuperado de: http://www.cwp.mines.edu/sututor/node149.html

4.4.1. CONTROLES DE CALIDAD DE LAS CABECERAS DEL ARCHIVO

Para determinar que el valor de las cabeceras es correcto, se verifica el número de trazas, que corresponde al valor resultante de multiplicar el número de registro de campo (*fldr*) por el número de trazas dentro del registro de campo (*tracf*). Además se puede verificar con el valor de *tracr*, el cual debe llegar hasta el número total de trazas indicado (14160).

Como el *fldr* inicia desde el registro 3 se resta del valor del último registro de campo es decir 120, incluyéndose a sí mismo; es decir que el valor del *fldr* es 118. Entonces para comprobar que dicha geometría es correcta se multiplica estos dos valores arrojando como resultado el número de trazas.

$$No\ de\ Trazas = 118(fldr) * 120\ (tracf) = \boxed{14160}$$

Ecuación 3: Verificación matemática de la veracidad de la geometría de los datos sísmicos.

Fuente: Procesamiento Sísmico en Seismic Unix. Semillero de Geofísica Universidad Industrial de Santander (2015)

Como se comprobó que la geometría del archivo shots0_120.su es correcta, se puede continuar con el pre procesado de la información. No obstante, puede ocurrir

el caso contrario donde las cabeceras del archivo no coinciden, en ese caso se utiliza el siguiente comando:

- *sushw < shots0_120.su key=tracl,tracr a=1,1 b=1,1 | surange*

La llave *tracl* y *tracf* se muestra como ejemplo de parámetros a corregir, en cualquier caso se reemplaza por el que se requiere editar. El valor de *a* es igual a la primera posición de la traza o de la llave que se quiere corregir, en este caso 1 para el *tracl* y 1 para *tracf.* El valor de *b* es igual al valor en el que va a aumentar cada llave, siguiendo el ejemplo, se da un valor de incremento de 1 para el *tracl* y *tracf.* De esta manera se corrige las cabeceras de los datos sísmicos y pueden ser guardados en un archivo nuevo.

4.5. EDICIÓN DE LAS TRAZAS

La edición de trazas se hace luego de verificar que la geometría de los datos corresponde con los datos tomados en campo. En este caso se realiza mediante el código *Trid* registrado en campo, es decir el código de identificación de la traza. En los datos sísmicos marinos 2D el código trid es igual a 1 en todos los registros, esto indica que no hay trazas muertas que eliminar. Esta información siempre debe ser chequeada con los datos de campo, sin embargo, no se puede realizar debido a que los datos sísmicos fueron descargados libremente y no se cuenta con esta información.

4.6. DETERMINACIÓN DE LAS FRECUENCIAS

El análisis de frecuencias se realiza para identificar la frecuencia de la traza en el dominio del tiempo. Para chequear el rango de frecuencias en la que se encuentran los datos y luego proceder a la aplicación de filtros digitales se utiliza el comando *suspecfx*, el cual calcula el espectro de amplitud de frecuencia f para cada posición de traza x. La orden se escribe en la terminal de la siguiente manera:

- *suspecfx < shots0_120.su | suximage perc=95*

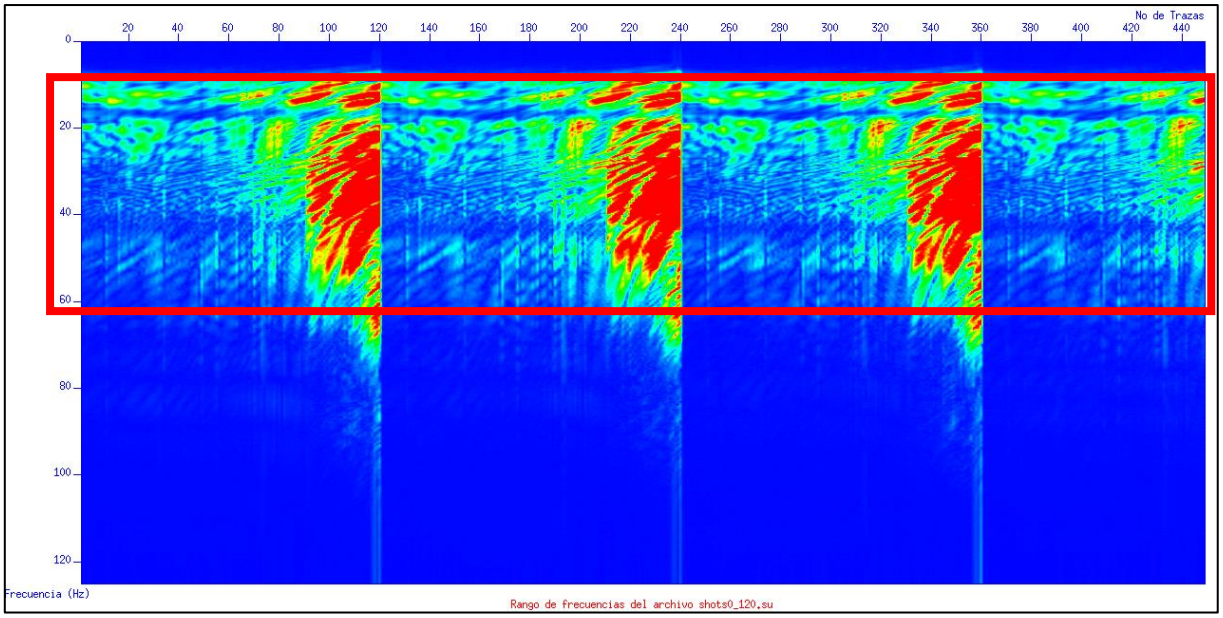


Ilustración 12: Visualización del Rango de Frecuencias de los datos Sísmicos marinos 2D en el dominio del tiempo, desde el software Seismic Unix.

Fuente: Propia

Al observar los rangos de frecuencias se puede determinar que los datos sísmicos marinos 2D se encuentran en un rango de 10 a 60 Hertz. Estos valores de frecuencia son utilizados como parámetro en las operaciones de filtrado digital.

Para verificar este rango de frecuencias se utiliza el software *Seisee,* en la pestaña View → Spectrum Window → ✓ Whole Selection. De esta manera se ilustra el rango de frecuencias en la que se encuentran los datos.

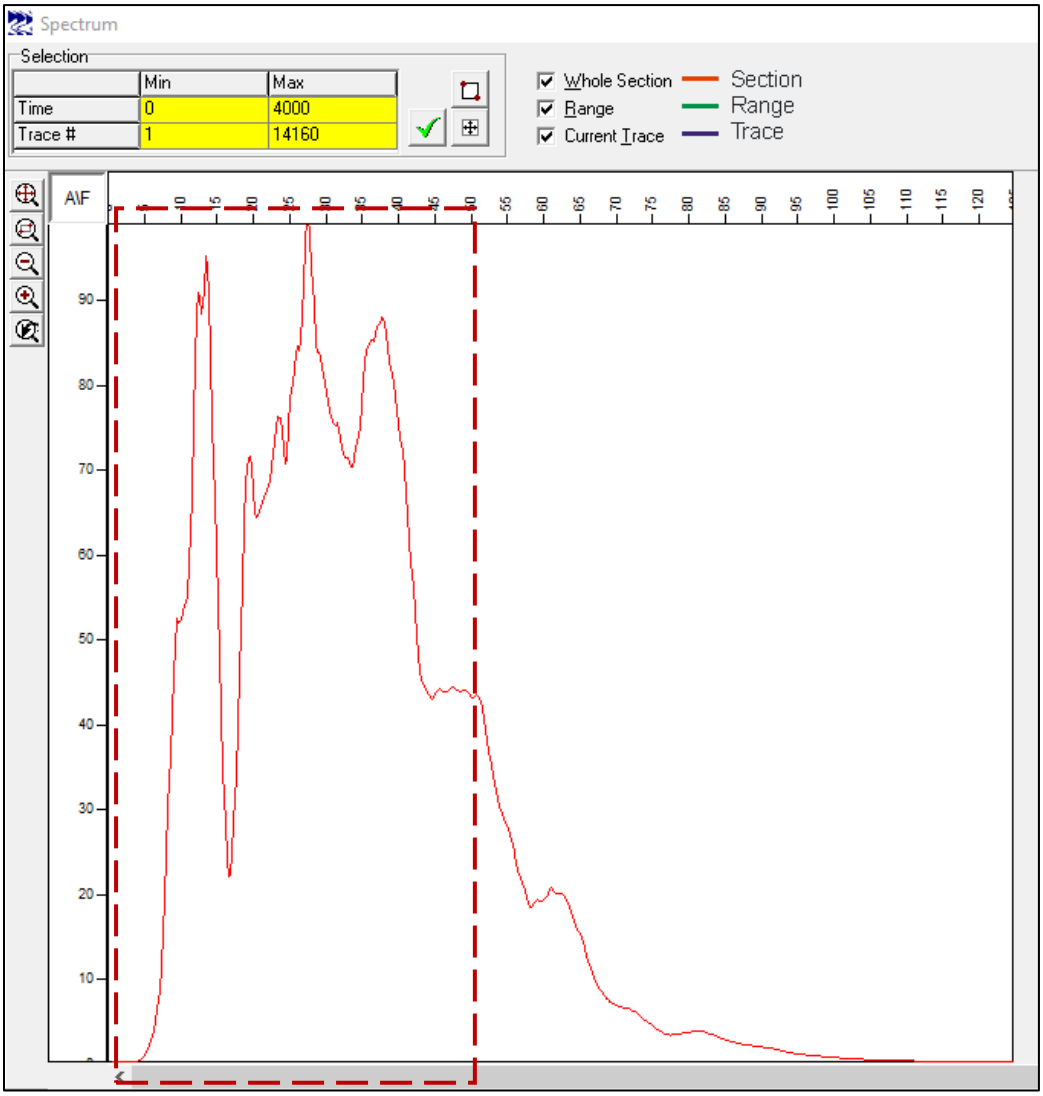


Ilustración 13: Visualización del Rango de Frecuencias de los datos Sísmicos marinos 2D desde el software Seisee.

Fuente: Propia

En la ilustración 11 se puede observar de una manera más clara que efectivamente las frecuencias se encuentran en un rango de 10 a 60 Hertz.

4.7. APLICACIÓN DE FILTROS Y ANÁLISIS ESPECTRAL

4.7.1. FILTROS DE FRECUENCIA

En Seismic Unix se encuentra como herramienta de procesamiento de datos la opción *sufilter* la cual permite realizar un filtrado unidimensional, y cuyo propósito es eliminar el *ground roll* y el ruido de los datos sísmicos. La herramienta *Sufilter*

aplica un filtro cónico sinusoidal de fase cero a los datos. Con esta herramienta se puede encontrar cinco algoritmos de filtros: Bandpass Highpass, Lowpass, Nocth y Bandreject; los cuales son utilizados en el procesamiento de los datos sísmicos marinos 2D, bajo los parámetros establecidos en el análisis espectral.

El filtro es poligonal, con las esquinas del polígono definidas por el vector de valores de frecuencia definidos por la matriz de f = valores, y una colección de valores de amplitud, definida por la matriz de amp= valores. Las amplitudes pueden ser cualquier número de punto flotante mayor o igual que cero. La única regla es que debe haber el mismo número de valores de amperios, como valores de f. (Stockwell & Cohen, 2008)

Antes de aplicar algún algoritmo de filtro, se visualizan los datos sin aplicar filtros para identificar las trazas y el ruido presente en la información. De esta manera se puede percibir el realce de la señal/ruido de los datos luego del procesamiento.

Para visualizar los datos en el dominio del tiempo sin aplicar algún filtro, se utiliza el siguiente comando en la terminal de Ubuntu utilizando el software Seismic Unix:

- *suxwigb < shots0_120 perc=95 title="SIN FILTRO" label1="Tiempo (S)" label2="No de Trazas"*

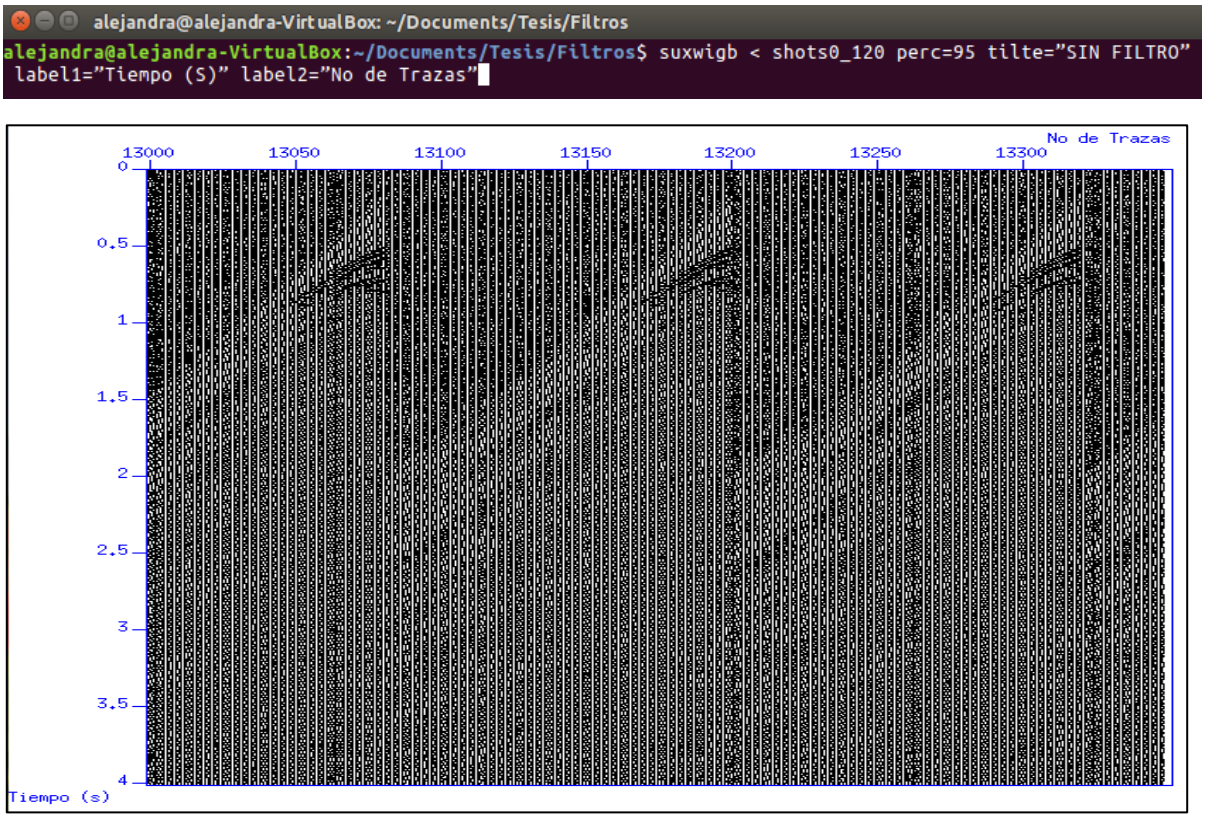


Ilustración 14: Trazas sísmicas observadas en el dominio del tiempo antes de realizar las operaciones de filtrado. Fuente: Propia

Las operaciones de filtrado inician con la aplicación del filtro Pasa banda ya que es el más usado en el procesamiento sísmico. Como ya se ha identificado el rango de frecuencias en el que se encuentran los datos, se procede a correr el algoritmo en Seismic Unix dando el parámetro de frecuencias y visualizando las *wiggles* o trazas mediante la siguiente orden:

- *sufilter f=10,20,40,60 < shots0_120.su | suxwigb perc=95 title="FILTRO BANDPASS" label1="Tiempo (S)" label2="No de Trazas"*

```
alejandra@alejandra-VirtualBox: ~/Documents/Tesis/Filtros
alejandra@alejandra-VirtualBox:~/Documents/Tesis/Filtros$ sufilter f=10,20,40,60 < shots0_120.su | suxwigb
 perc=95 tilte="FILTRO BANDPASS" label1="Tiempo (S)" label2="No de Trazas"
```

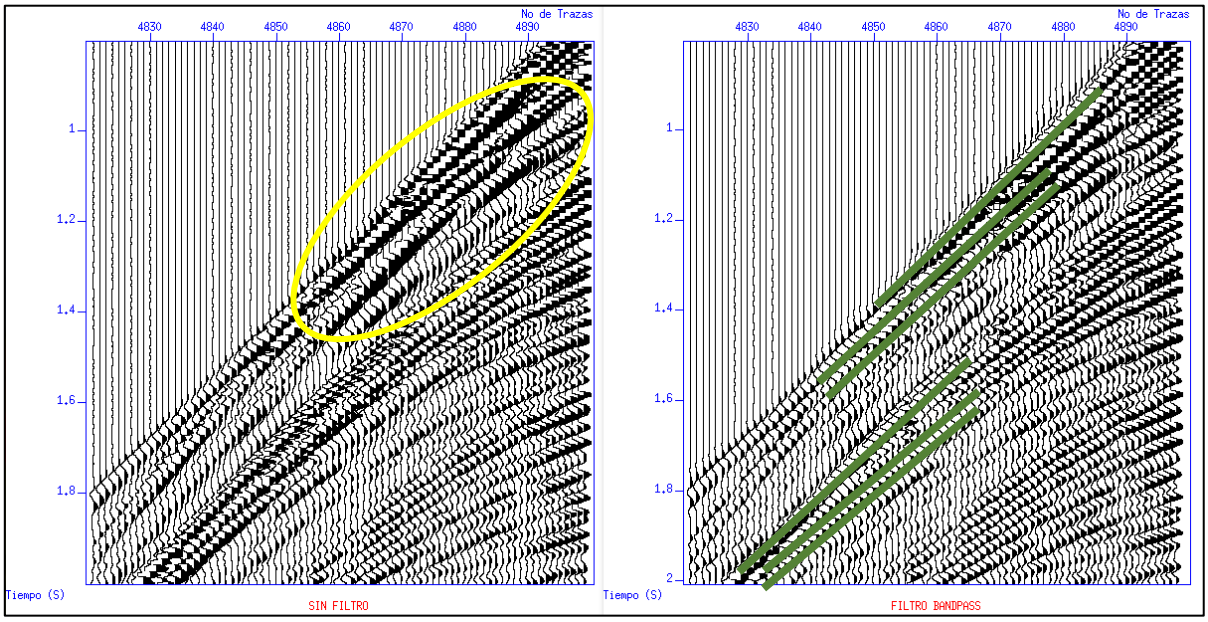


Ilustración 15: Aplicación del filtro Bandpass en SU y visualización de las trazas de los datos Sísmicos marinos 2D.

Fuente: Propia.

Sin embargo se quiere visualizar las trazas como una imagen y de esta manera identificar desde otra perspectiva las diferencias presentadas al aplicar el filtro pasa banda. A continuación se escribe el siguiente comando en la terminal de Ubuntu:

- *sufilter f=10,20,40,60 < shots0_120.su | suximage perc=95 tilte="FILTRO BANDPASS" label1="Tiempo (S)" label2="No de Trazas"*

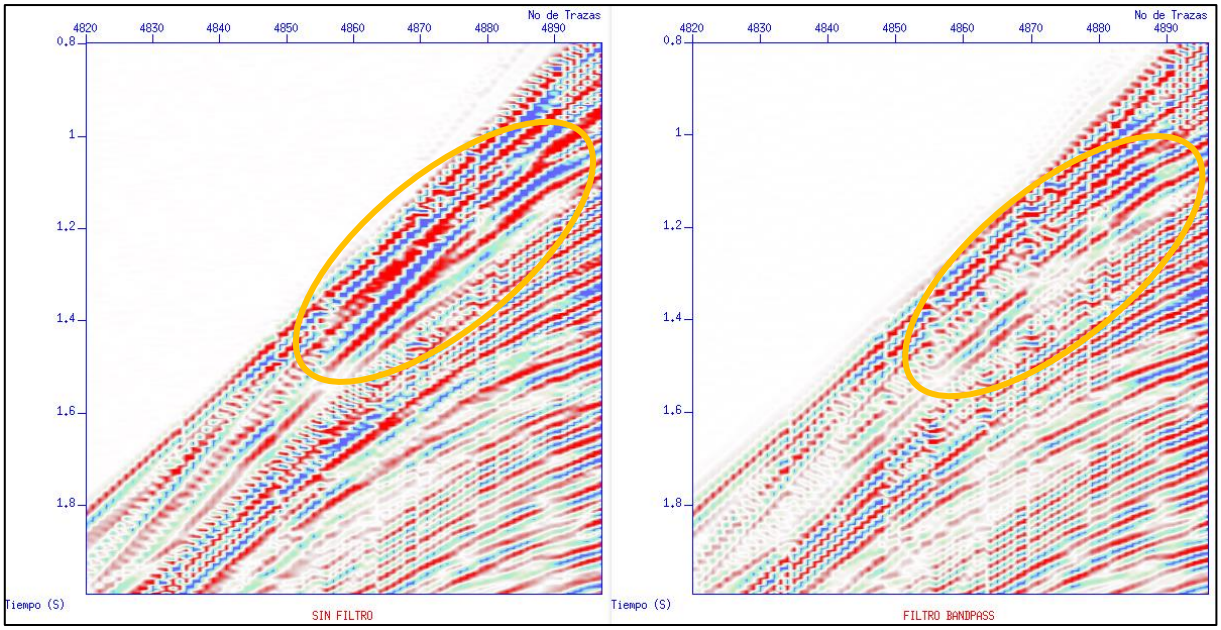


Ilustración 16: Aplicación del filtro Bandpass en SU y visualización de la imagen de los datos Sísmicos marinos 2D.

Fuente: Propia.

En las anteriores imágenes se puede observar que el filtro *bandpass* realza las señales que inicialmente no se observan con claridad, esto debido a que este filtro deja pasar un rango especifico de longitudes de onda los cuales se determinaron previamente con el análisis espectral, es decir se estimó un ancho de banda de aproximadamente 10 a 45 Hertz.

Sin embargo hasta ahora se ha obtenido una imagen como resultado de la aplicación de filtros. Para guardar los datos modificados en un archivo independiente se escribe la siguiente orden:

- *sufilter < shots0_120.su f=10,20,40,60 > filtro_bandpass.su*

```
alejandra@alejandra-VirtualBox: ~/Documents/Tesis/Filtros
alejandra@alejandra-VirtualBox:~/Documents/Tesis/Filtros$ sufilter < shots0_120.su f=10,20,40,60 >
fitro_bandpass.su
```

Ilustración 17: Comando para guardar los datos sísmicos filtrados en un archivo independiente en el software Seismic Unix.

Fuente: Propia.

La segunda prueba de filtro se realiza con el algoritmo del filtro *Highpass,* para ello se especifica en la ventana de comandos la siguiente orden:

- *sufilter f=10,20,40,60 amps=0.,0.,1.,1. < shots0_120.su | suxwigb title="FILTRO HIGHPASS" label1="Tiempo (S)" label2="No de Trazas"*

```
alejandra@alejandra-VirtualBox: ~/Documents/Tesis/Filtros
alejandra@alejandra-VirtualBox:~/Documents/Tesis/Filtros$ sufilter f=10,20,40,60 amps=0.,0.,1.,1.
< shots0_120.su | suxwigb title="FILTRO HIGHPASS" label1="Tiempo (S)" label2="No de Trazas"
```

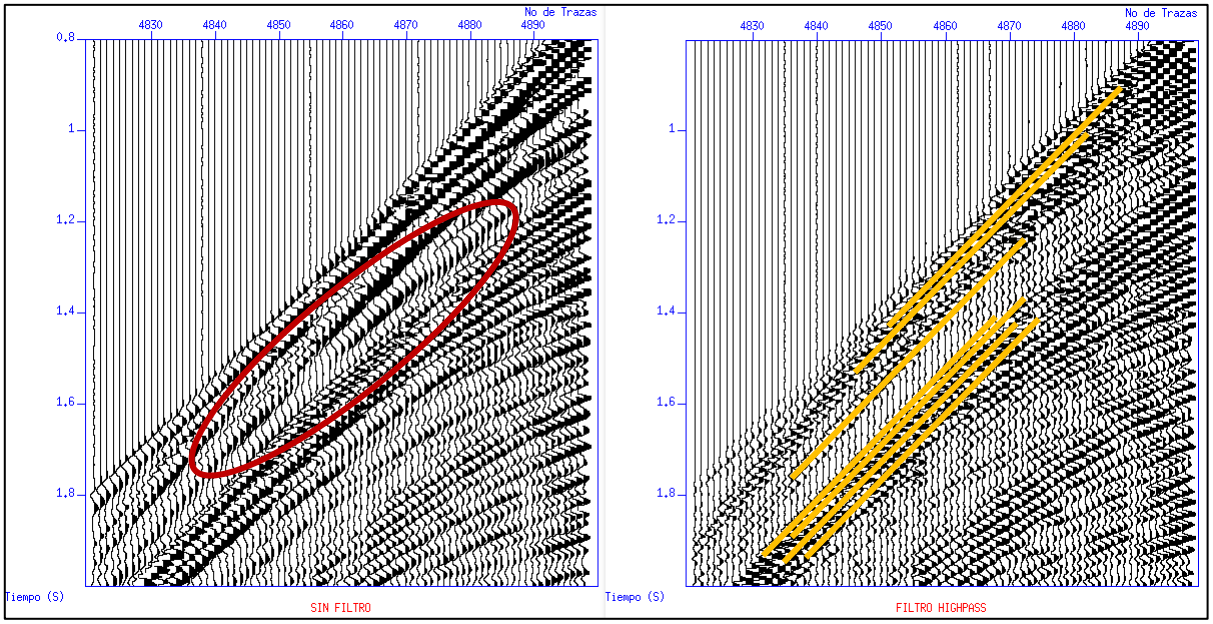


Ilustración 18: Aplicación del filtro Highpass en SU y visualización de las trazas de los datos Sísmicos marinos 2D.

Fuente: Propia.

El filtro Highpass deja pasar las longitudes de onda que están por encima de una frecuencia, por tal razón se puede observar que se realzan señales pero también se pierden otras. Se puede encontrar entonces, que se eliminaron las frecuencias bajas y la información de esa área. En la siguiente imagen se puede observar con claridad tal afirmación:

- *sufilter f=10,20,40,60 amps=0.,0.,1.,1. < shots0_120.su | suximage title="FILTRO HIGHPASS" label1="Tiempo (S)" label2="No de Trazas"*

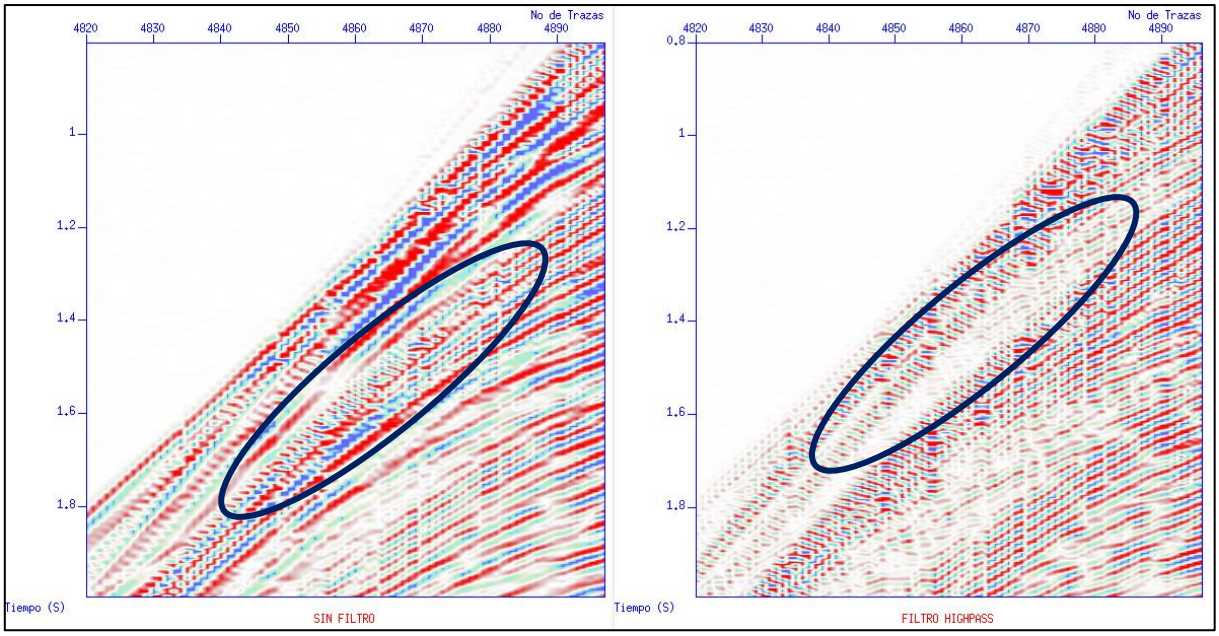


Ilustración 19: Aplicación del filtro Highpass en SU y visualización de la imagen de los datos Sísmicos marinos 2D.

Fuente: Propia.

El siguiente filtro a aplicar es el filtro *Lowpass,* para realizar esta operación de filtrado se utiliza el comando:

- *sufilter f=10,20,40,60 amps=1.,1.,0.,0. < shots0_120.su | suxwigb title="FILTRO LOWPASS" label1="Tiempo (S)" label2="No de Trazas"*

```
alejandra@alejandra-VirtualBox: ~/Documents/Tesis/Filtros
alejandra@alejandra-VirtualBox:~/Documents/Tesis/Filtros$ sufilter f=10,20,40,60 amps=1.,1.,0.,0.
 < shots0_120.su | suxwigb title="FILTRO LOWPASS" label1="Tiempo (S)" label2="No de Trazas"
```

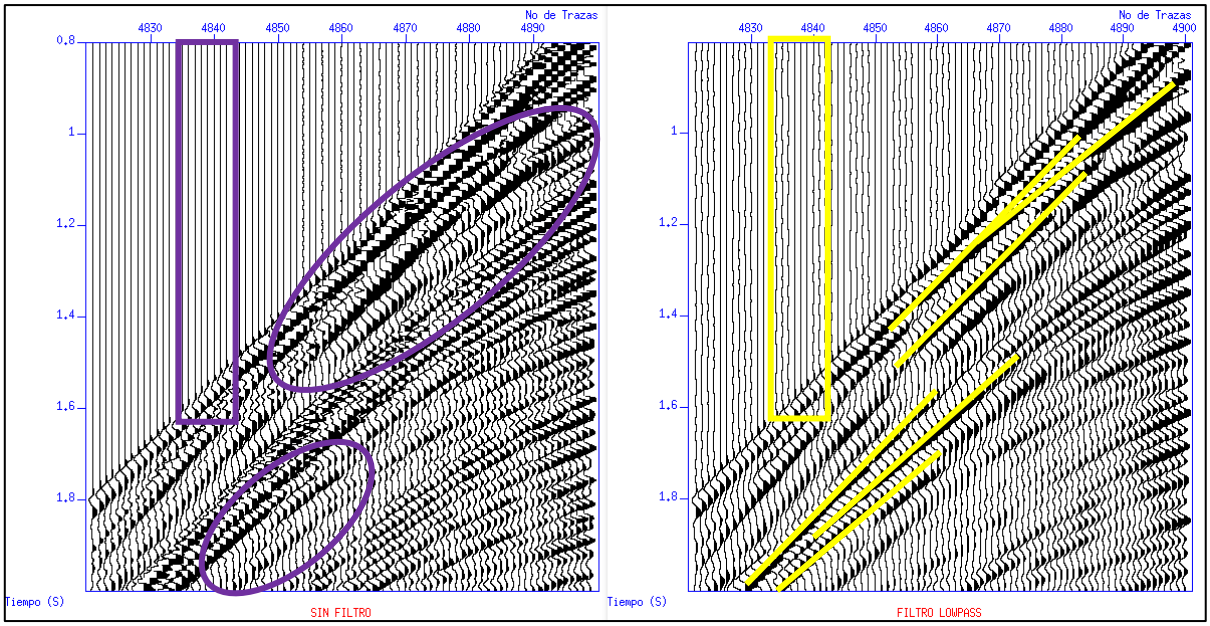


Ilustración 20: Aplicación del filtro Lowpass en SU y visualización de las trazas de los datos Sísmicos marinos 2D.

Fuente: Propia.

El filtro *Lowpass*, a diferencia del *highpass*, deja pasar las longitudes de onda que están por debajo del rango de frecuencias establecido. De acuerdo a la imagen anterior se puede encontrar que se atenúan algunas señales de manera significativa, sin embargo se distorsionan algunas señales, perdiendo resolución, y otras quedan en el mismo estado; esto es debido a la pérdida de altas frecuencias.

Al visualizar los datos como imagen se observa claramente que las señales ubicadas en la parte superior derecha no se alteran con la aplicación del algoritmo. Nuevamente se ejecuta el siguiente comando:

- *sufilter f=10,20,40,60 amps=1.,1.,0.,0. < shots0_120.su | suximage title="FILTRO LOWPASS" label1="Tiempo (S)" label2="No de Trazas"*

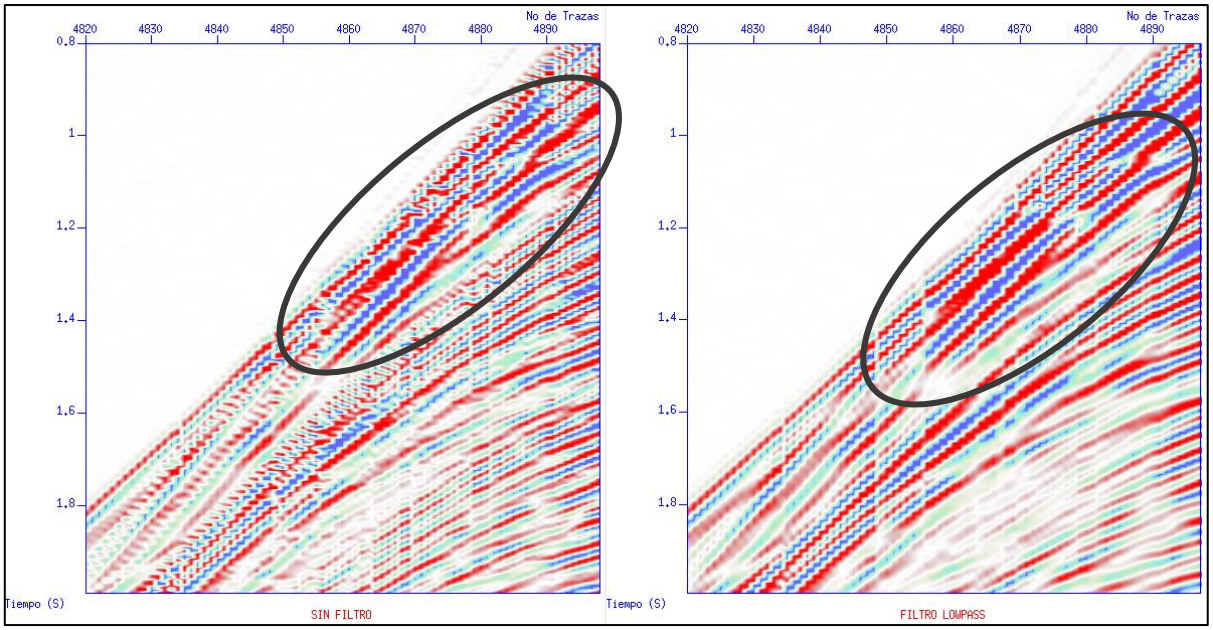


Ilustración 21: Aplicación del filtro Lowpass en SU y visualización de la imagen de los datos Sísmicos marinos 2D.

Fuente: Propia.

La cuarta operación de filtrado se realiza con el filtro *Notch* el cual rechaza fuertemente longitudes de onda presentes en una banda muy estrecha según las frecuencias especificadas. Se ejecuta el siguiente comando:

- *Sufilter f=10,12.5,35,50,60 amps=0.,.5,0.,.5,1. < shots0_120.su | suxwigb perc=95 title="FILTRO NOTCH" label1="Tiempo (S)" label2="No de Trazas"*

```
alejandra@alejandra-VirtualBox: ~/Documents/Tesis/Filtros
alejandra@alejandra-VirtualBox:~/Documents/Tesis/Filtros$ Sufilter f=10,12.5,35,50,60 amps=0.,.5,
0.,.5,1. < shots0_120.su | suxwigb perc=95 title="FILTRO NOTCH" label1="Tiempo (S)" label2="No de
 Trazas"
```

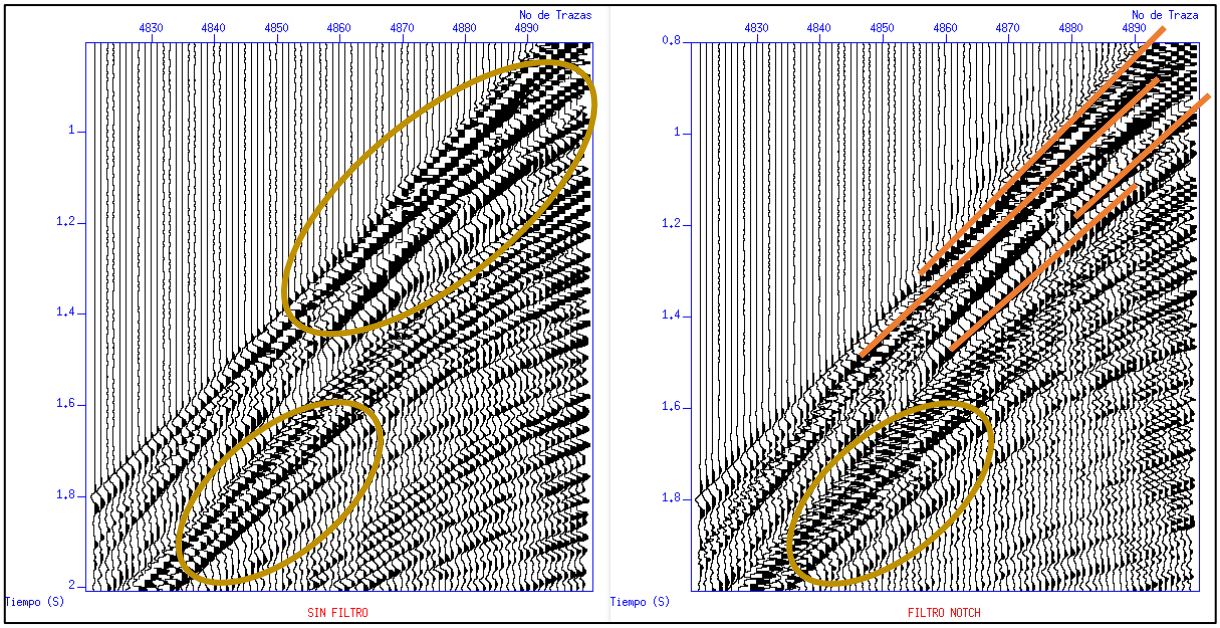


Ilustración 22: Aplicación del filtro Notch en SU y visualización de las trazas de los datos Sísmicos marinos 2D. Fuente: Propia.

- *Sufilter f=10,12.5,35,50,60 amps=0.,.5,0.,.5,1. < shots0_120.su | suximage perc=95 title="FILTRO NOTCH" label1="Tiempo (S)" label2="No de Trazas"*

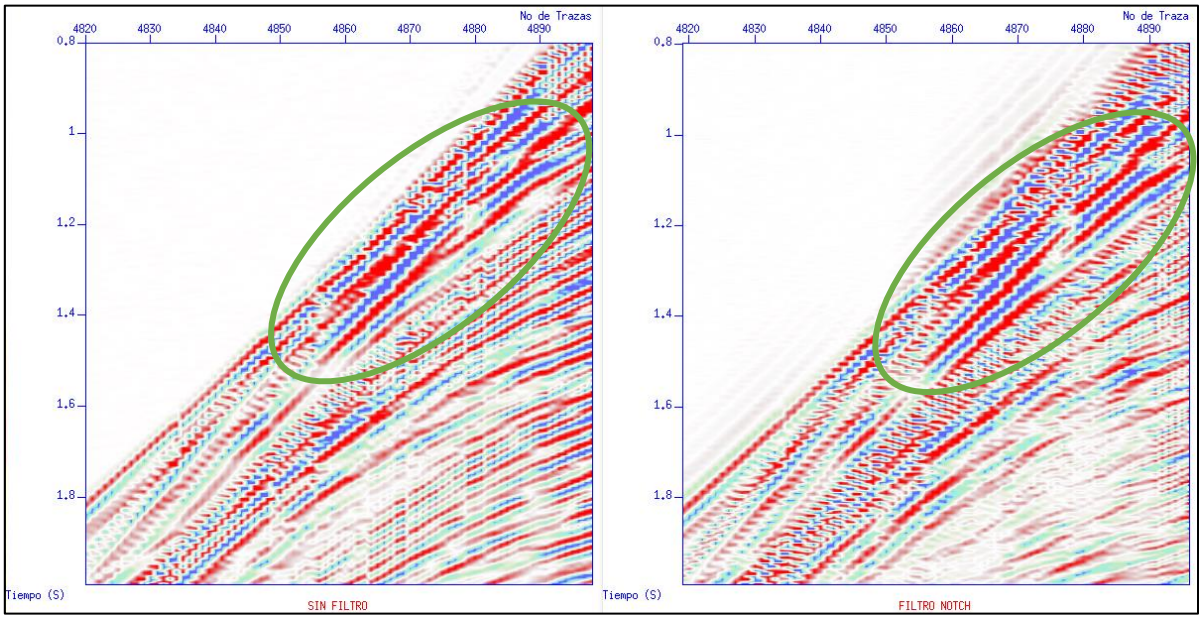


Ilustración 23: Aplicación del filtro Notch en SU y visualización de la imagen de los datos Sísmicos marinos 2D.

Fuente: Propia.

Reiteradamente se observa que el filtro Notch mantiene el ruido presente en los datos, son muy pocas las trazas que realzan la relación señal/ruido. Se puede

observar que espectralmente se ha producido una pérdida de frecuencias altas, por lo que no es el mejor algoritmo.

Por último, se aplica el último filtro de frecuencia o filtro *Bandreject*, el cual es totalmente opuesto al filtro *bandpass,* su funcionalidad es rechazar la banda de frecuencias donde se encuentra presente el ruido.

- *Sufilter f=10,20,40,60 amps=1.,0.,0.,1. < shots0_120.su | suxwigb perc=95 title="FILTRO BANDREJECT" label1="Tiempo (S)" label2="No de Trazas"*

```
alejandra@alejandra-VirtualBox: ~/Documents/Tesis/Filtros
alejandra@alejandra-VirtualBox:~/Documents/Tesis/Filtros$ Sufilter f=10,20,40,60 amps=1.,0.,0.,1.
 < shots0_120.su | suxwigb perc=95 title="FILTRO BANDREJECT" label1="Tiempo (S)" label2="No de Tr
azas"
```

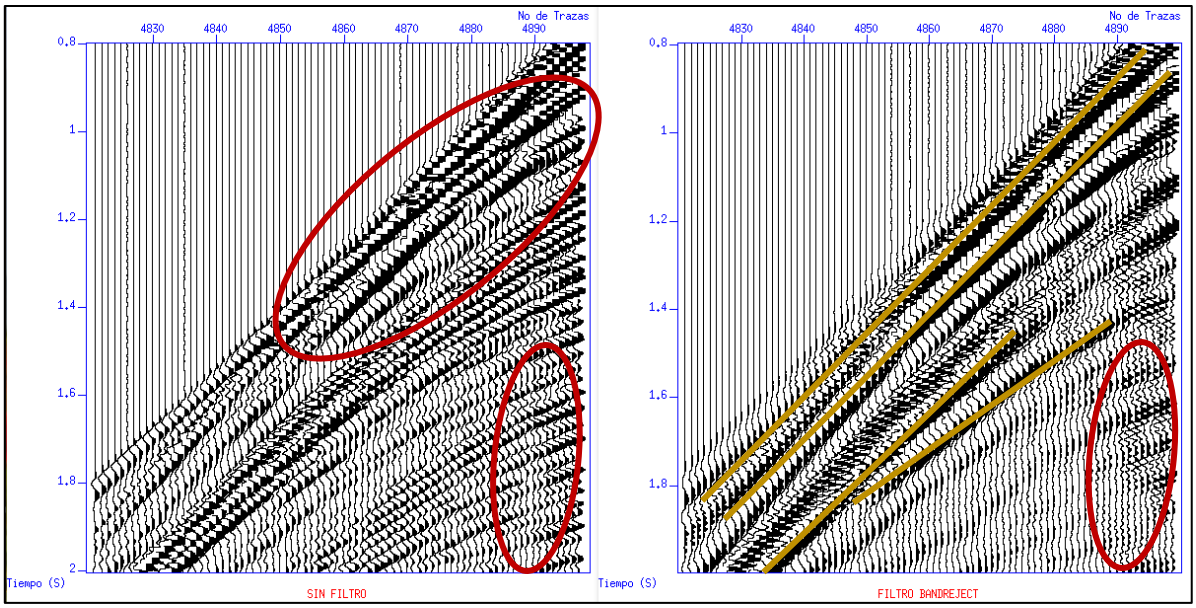


Ilustración 24: Aplicación del filtro Bandreject en SU y visualización de las trazas de los datos Sísmicos marinos 2D.

Fuente: Propia.

Como se puede apreciar, el filtro Bandreject no arrojó los resultados esperados puesto que alteró las frecuencias de las trazas de modo que se observan difusas, es decir, nuevamente se eliminaron las frecuencias altas siendo la causa de la degradación del detalle de la traza. En la siguiente imagen se observa claramente estas diferencias.

- *Sufilter f=10,20,40,60 amps=1.,0.,0.,1. < shots0_120.su | suximage perc=95 title="FILTRO BANDREJECT" label1="Tiempo (S)" label2="No de Trazas"*

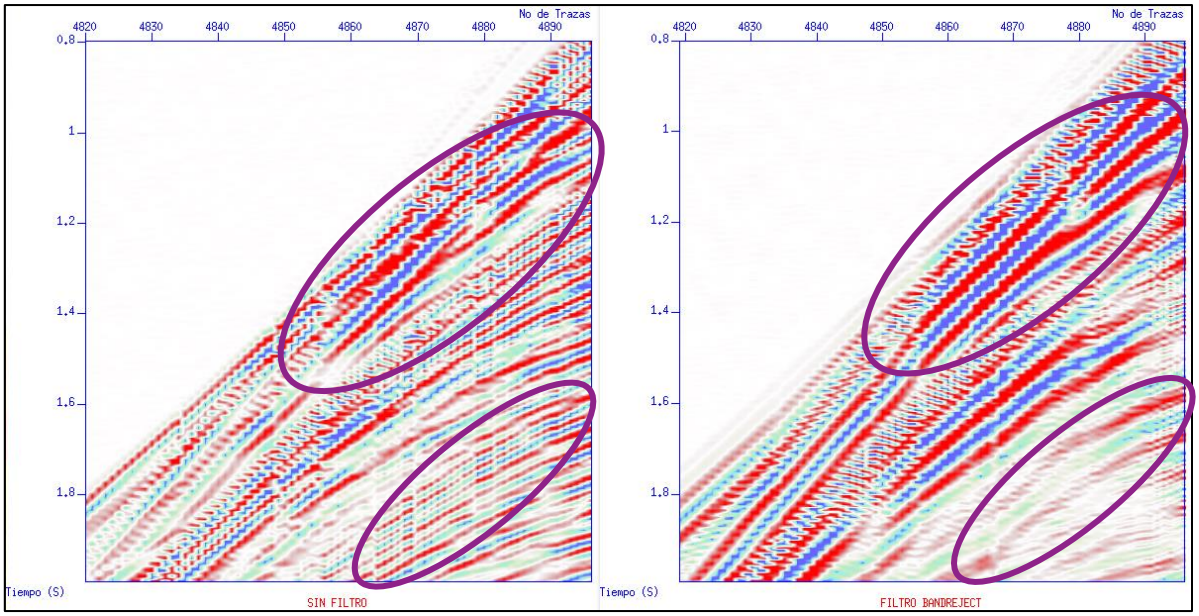


Ilustración 25: Aplicación del filtro Bandreject en SU y visualización de la imagen de los datos Sísmicos marinos 2D.

Fuente: Propia.

En la siguiente imagen se presentan los resultados correspondientes a la aplicación de los filtros digitales de frecuencia en el dominio del tiempo:

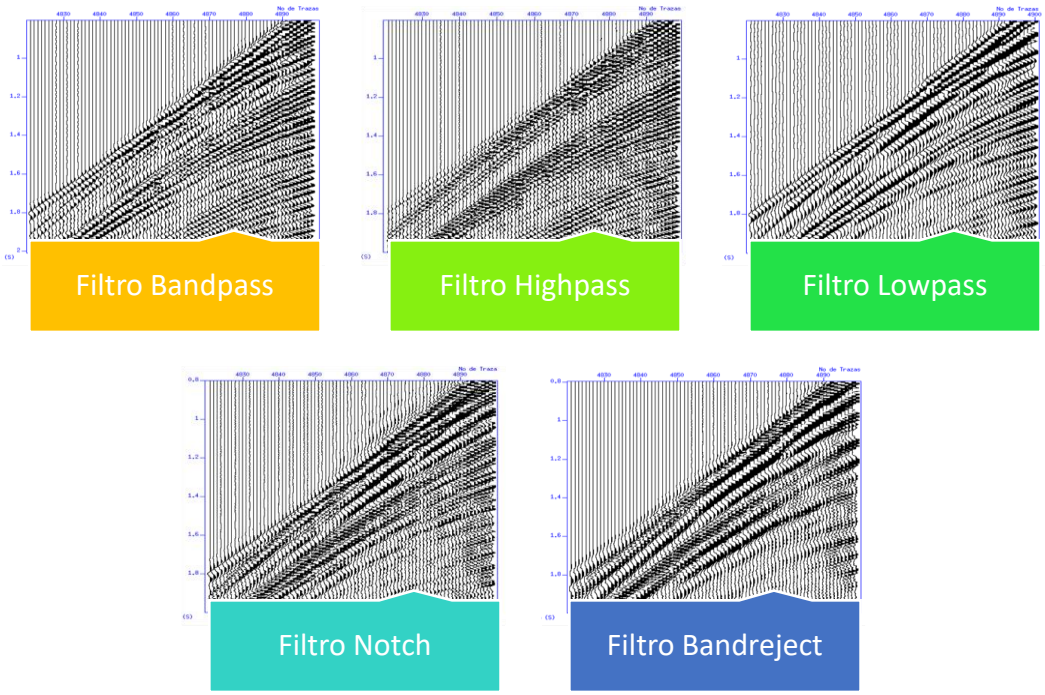


Ilustración 26: Comparación entre los datos resultantes a la aplicación de los filtros digitales de frecuencia en el software Seismic Unix.

Fuente: Propia.

Comparando los resultados de los algoritmos aplicados a los datos, se puede determinar que el filtro que mejor realza la relación señal ruido es el filtro *bandpass*, ya que no elimina información pero si elimina las señales del ruido presente. Observando los datos resultantes de la aplicación de los demás filtros se ha encontrado que son pocas las señales que se realzan en comparación con el filtro bandpass, además gran parte de la información es suprimida. Esta parte del procesamiento de datos es importante ya que la siguiente etapa o apilamiento, depende de las reflexiones filtradas previamente.

Realizando las pruebas anteriores se determinó que el mejor algoritmo de filtro es el *bandpass*, sin embargo se requiere realizar algunas pruebas adicionales para establecer el ancho óptimo de banda en donde se sitúan las reflexiones, y de esta manera realzar aún más la señal sísmica. Nuevamente se examina el análisis espectral previo, se conoce que el rango de valores esta entre 10 y 60 Hertz, sin embargo se prueba otros valores de ancho de banda cercanos a los picos generados en el espectro de frecuencias, estos valores se especifican en la Tabla 3.

FILTRO	BANDA DE FRECUENCIAS (HZ)
1	10,20,40,60
2	10,25,35,60
3	15,25,35,50
4	15,28,38,55

Tabla 4: Valores de Frecuencia utilizados en pruebas de filtro Bandpass.

Fuente: Propia

El siguiente paso es insertar la orden para la aplicación del filtro en el software Seismic Unix, no obstante el filtro 10,20,40,60 ya ha sido trabajado, por tal razón se insertará el comando con las frecuencias especificadas:

- *sufilter f=10,25,35,60 < shots0_120.su | suxwigb perc=95 title="FILTRO BANDPASS 10,25,35,60" label1="Tiempo (S)" label2="No de Trazas"*

- *sufilter f=15,25,35,50 < shots0_120.su | suxwigb perc=95 title="FILTRO BANDPASS 15,25,35,50" label1="Tiempo (S)" label2="No de Trazas"*

- *sufilter f=15,28,38,55 < shots0_120.su | suxwigb perc=95 title="FILTRO BANDPASS 15,28,38,55" label1="Tiempo (S)" label2="No de Trazas"*

```
alejandra@alejandra-VirtualBox: ~/Documents/Tesis/Filtros/Bandpass
alejandra@alejandra-VirtualBox:~/Documents/Tesis/Filtros/Bandpass$ sufilter f=10,25,35,60 <
 shots0_120.su | suxwigb perc=95 title="FILTRO BANDPASS 10,25,35,60" label1="Tiempo (S)" la
bel2="No de Trazas"
```

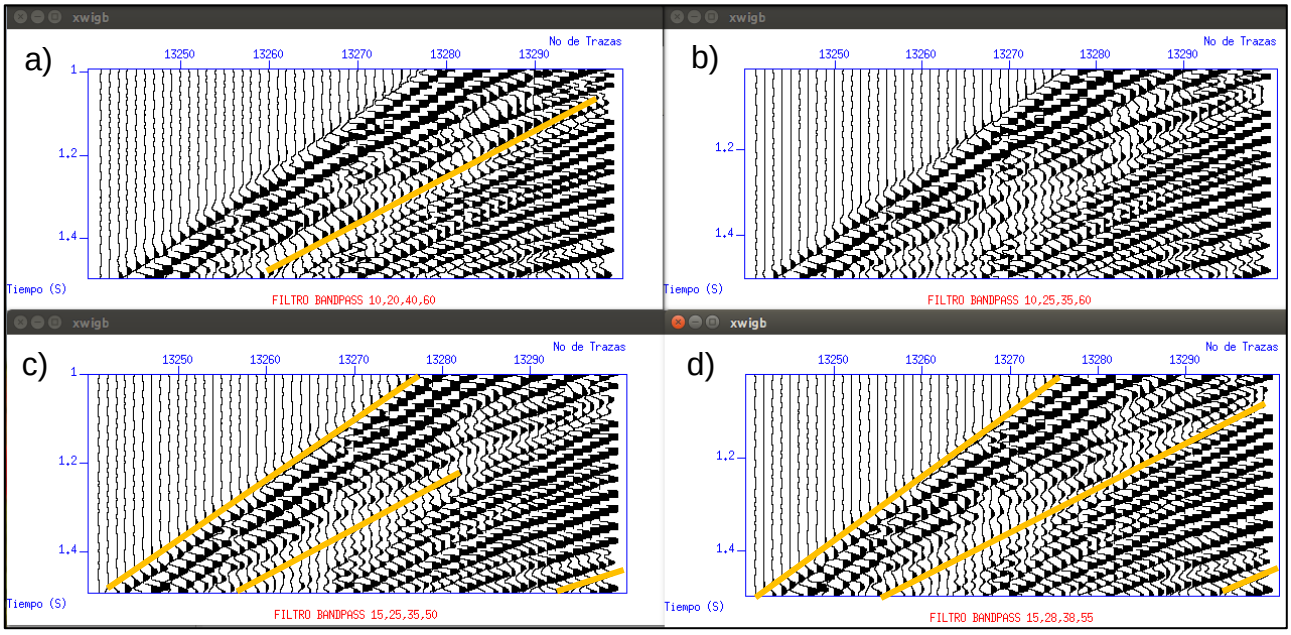


Ilustración 27: Imagen comparativa de las diferentes bandas de filtro aplicados a los datos sísmicos marinos 2D, a) Filtro Bandpass 10,20,40,60, b) Filtro Bandpass 10,25,35,60, c) Filtro Bandpass 15,25,35,50, d) Filtro Bandpass 15,28,38,55.

Fuente: Propia.

Revisando la imagen anterior se puede establecer que los filtros que recuperan más señales de traza sísmica son los filtros *c* y *d*. El filtro *b* no representa un cambio significativo en comparación al filtro *a*. Sin embargo se requiere revisar el espectro de frecuencias resultante de la aplicación de cada filtro, y con esto revisar el comportamiento de la señal. Para realizar esto con el software Seismic se aisla un solo disparo, es decir el *shot*=60 y *tracf=50,* de cada uno de los archivos resultantes en un tiempo de 2 a 2.5 segundos:

- *suwind < shots0_120.su key=fldr min=60 max=60 | suwind key=tracf min=50 max=50 tmin=2 tmax=2.5 > fldr0_120_60.su*

- *suwind < filtro_Bandpass.su key=fldr min=60 max=60 | suwind key=tracf min=50 max=50 tmin=2 tmax=2.5 > fldr10204060.su _60.su*

- *suwind < Bandpass_10253560.su key=fldr min=60 max=60 | suwind key=tracf min=50 max=50 tmin=2 tmax=2.5 > fldr10253560.su _60.su*

- *suwind < Bandpass_15253550.su key=fldr min=60 max=60 | suwind key=tracf min=50 max=50 tmin=2 tmax=2.5 > fldr15253550.su _60.su*

- *suwind < Bandpass_15283855.su key=fldr min=60 max=60 | suwind key=tracf min=50 max=50 tmin=2 tmax=2.5 > fldr15283855.su _60.su*

Con los nuevos archivos obtenidos se ejecuta el script *spectrum_amp.sh* para obtener las gráficas del Espectro de Amplitud.

En la terminal se escribe el siguiente comando para la ejecución del script:

- *sh spectrum_amp.su*

```
set -x

sufft < fldr0_120_60.su | suamp mode=amp |
 suxgraph \
          title="Espectro de Amplitud disparo original" \
          label1="Frecuencia (Hz)" label2="Amplitud" \
          style=normal linecolor=0 &

sufft < fldr10204060_60.su | suamp mode=amp |
 suxgraph \
          title="Espectro de Amplitud Filtro 1" \
          label1="Frecuencia (Hz)" label2="Amplitud" \
          style=normal linecolor=0 &

sufft < fldr10253560_60.su | suamp mode=amp |
 suxgraph \
          title="Espectro de Amplitud Filtro 2" \
          label1="Frecuencia (Hz)" label2="Amplitud" \
          style=normal linecolor=0 &

sufft < fldr15253550_60.su | suamp mode=amp |
 suxgraph \
          title="Espectro de Amplitud Filtro 3" \
          label1="Frecuencia (Hz)" label2="Amplitud" \
          style=normal linecolor=0 &

sufft < fldr15283855_60.su | suamp mode=amp |
 suxgraph \
          title="Espectro de Amplitud Filtro 4" \
          label1="Frecuencia (Hz)" label2="Amplitud" \
          style=normal linecolor=0 &

 # "press return key to..."
 pause remove the plots

 zap xgraph
 ##zap xwigb
```

Ilustración 28: Script *spectrum_amp* utilizado para graficar el Espectro de amplitud de los archivos resultantes de la aplicación de filtros digitales.

Fuente: Propia

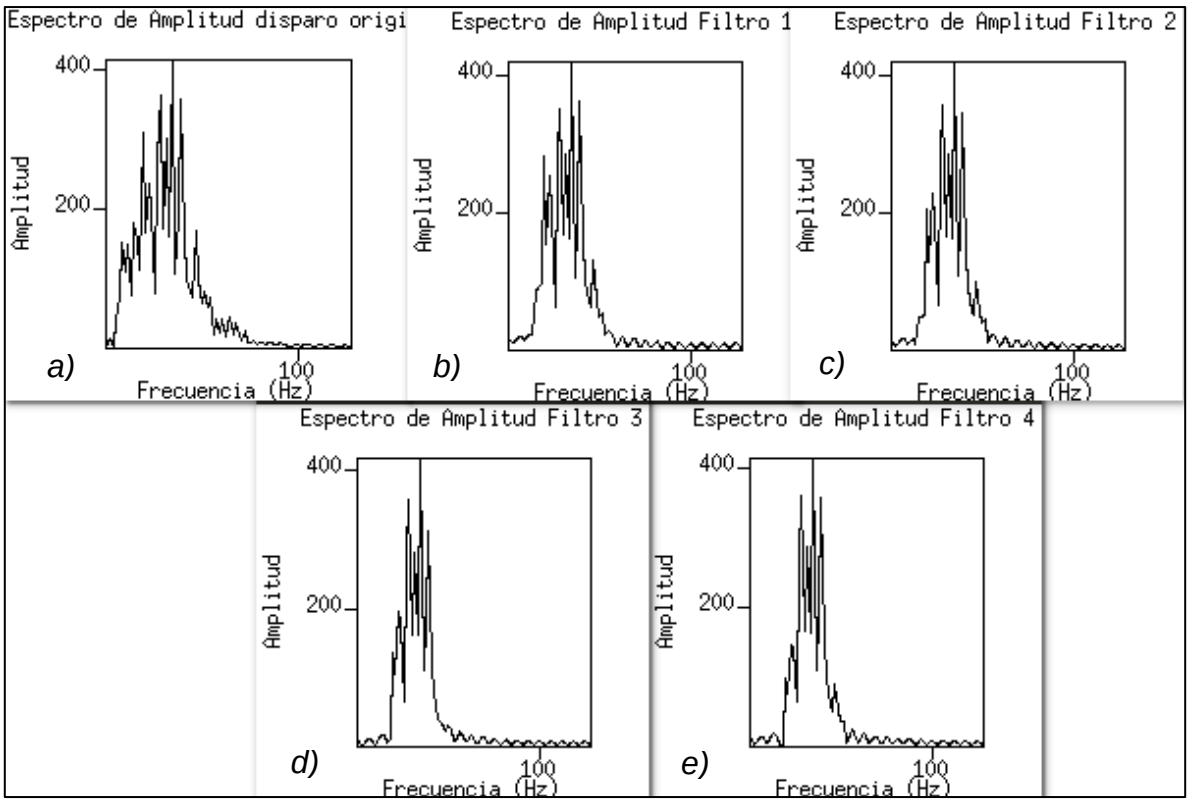


Ilustración 29: Espectros de frecuencias después de las pruebas de los filtros Bandpass a) Espectro de frecuencia del disparo original b) Espectro de frecuencia del filtro Bandpass 1 c) Espectro de frecuencia del filtro Bandpass 2 d) Espectro de frecuencia del filtro Bandpass 3 e) Espectro de frecuencia del filtro Bandpass 4.

Fuente: Propia

Se puede concluir que con la aplicación de estos filtros disminuye el ancho de banda de la frecuencia original, dejando solo las señales deseadas, eliminando las frecuencias con ruido producidas en el momento de la adquisición. De acuerdo a esto, se elige el filtro *d* de frecuencias 15,28,38,55 puesto es el que mejor representa el realce de la relación señal/ruido en la información.

Para visualizar parte de la nueva traza con el filtro elegido y compararla con la traza original, se aisla de nuevo el *shot=80 y tracf=60* en un tiempo de 2-2.5 segundos. Nuevamente se ingresa la siguiente orden en la terminal:

- *suwind < shots0_120.su key=fldr min=60 max=60 | suwind key=tracf min=50 max=50 tmin=2 tmax=2.5 > fldr0_20_80.su _60.su*

- *suwind < Bandpass_15283855.su key=fldr min=60 max=60 | suwind key=tracf min=50 max=50 tmin=2 tmax=2.5 > fldr_80.su _60.su*

El anterior comando crea un archivo nuevo con las especificaciones descritas. Se procede a ejecutar el script *Final_Spectrum.sh:*

- *sh Final_Spectrum.sh*

```
#! /bin/bash
# File: Final_Spectrum.sh
#      Time to Frequency transform of a trace
# Output = 3 plots: time, freq amplitude, phase spectrum
#      Use: Final_Spectrum.sh (input.su)
# Example: Final_Spectrum.sh wavl.su

# Set messages on

set -x

suxgraph < fldr_80.su \
         title="Input: fldr_80" \
         label1="Tiempo (s)" label2="Amplitud" \
         style=normal linecolor=0 &

##suxwigb < $1 wt=1 va=2 style=normal labelcolor=black \
##        wbox=400 hbox=200 xbox=420 ybox=10 \
##        title="Input: $1" titlecolor=black \
##        label1="Timpo (s)" label2="Amplitud" &

sufft < fldr_80.su | suamp mode=amp |
suxgraph \
         title="Espectro de Amplitud" \
         label1="Frecuencia (Hz)" label2="Amplitud" \
         style=normal linecolor=0 &

sufft < fldr_80.su | suamp mode=phase |
suxgraph \
         title="Espectro de Fase" \
         label1="Frecuencia (Hz)" label2="Fase (rad)" \
         style=normal linecolor=0 &

# "press return key to..."
pause remove the plots

zap xgraph
##zap xwigb
```

Ilustración 30: Script *Final_Spectrum.sh* utilizado para graficar el espectro del shot original y el shot filtrado.

Fuente: Tomado y adaptado del libro *Seismic Data Processing with Seismic Un*x*, David Forel, Thomas Benz and Wayne D. Pennington, Society of Exploration Geophysicists, (2005).

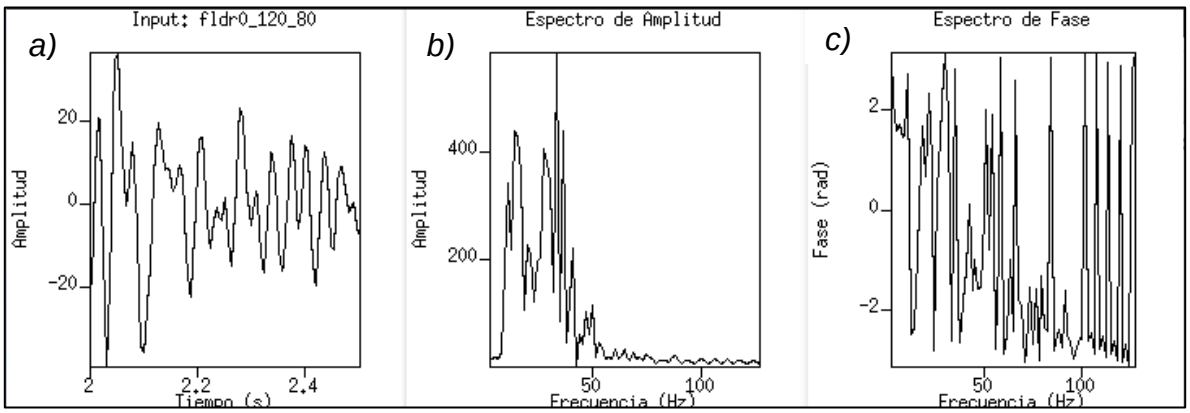


Ilustración 31: Ventana de Frecuencias del *shot 60* en el archivo original a) Gráfica de las Series de tiempo, b) Espectro de amplitud, c) Espectro de Fase.

Fuente: Propia.

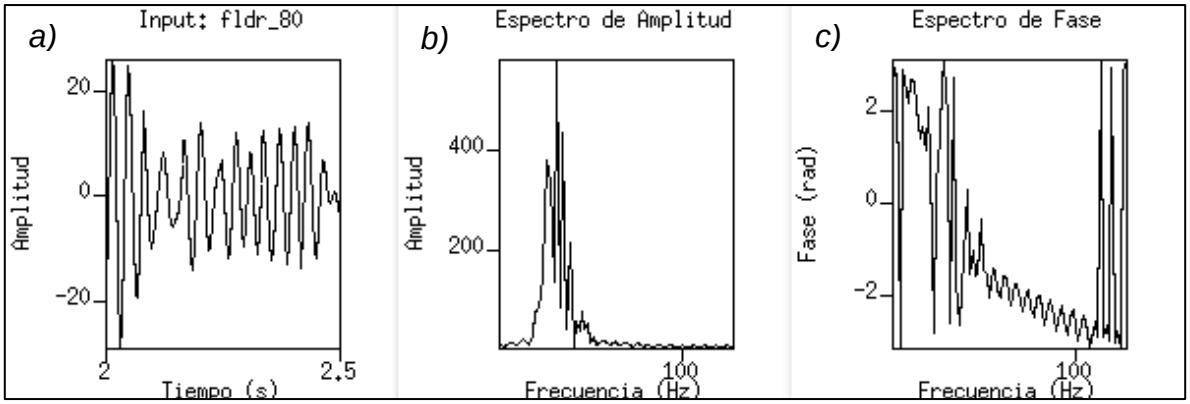


Ilustración 32: Ventana de Frecuencias del *shot 60* en el archivo filtrado a) Gráfica de las Series de tiempo, b) Espectro de amplitud, c) Espectro de Fase.

Fuente: Propia.

Como se puede observar en las imágenes *31* y *32*, hay una disminución de las frecuencias debido a que se eliminaron señales asociadas al ruido, permaneciendo las señales del dato sísmico. En la ventana del espectro de fase de la traza sísmica se puede encontrar que la señal se reduce a su fase mínima o fase cero tras la ejecución de los algoritmos de los filtros digitales.

4.7.2.1. CONTROLES DE CALIDAD

Para verificar las nuevas frecuencias obtenidas se grafica el espectro de amplitud antes y después de la aplicación del filtro de frecuencia Bandpass. Primero se eligió el disparo 80 y se guardó como un archivo nuevo, utilizando el siguiente comando para obtener el espectro de amplitud antes de la aplicación del filtro:

- *suwind < shots0_120 key=fldr min=80 max=80 > shotfldr0_120.80.su*

Y para los datos resultantes de la operación de filtrado el siguiente comando:

- *suwind < Bandpass_15283855.su key=fldr min=80 max=80 > shot.fldr80.su*

En la terminal de Ubuntu se escribe la orden para visualizar el espectro de amplitud como se muestra a continuación:

- *suspecfx < shotfldr0_120.80.su | suxgraph title="INTERVALO DE MUESTREO ANTES DEL FILTRO" label 1="Frecuencia (Hz)" label 2="ESPECTRO DE AMPLITUD" width=300 height=325*

- *suspecfx < shot.fldr80.su | suxgraph title="INTERVALO DE MUESTREO DESPUES DEL FILTRO" label 1="Frecuencia (Hz)" label 2="ESPECTRO DE AMPLITUD" width=300 height=325*

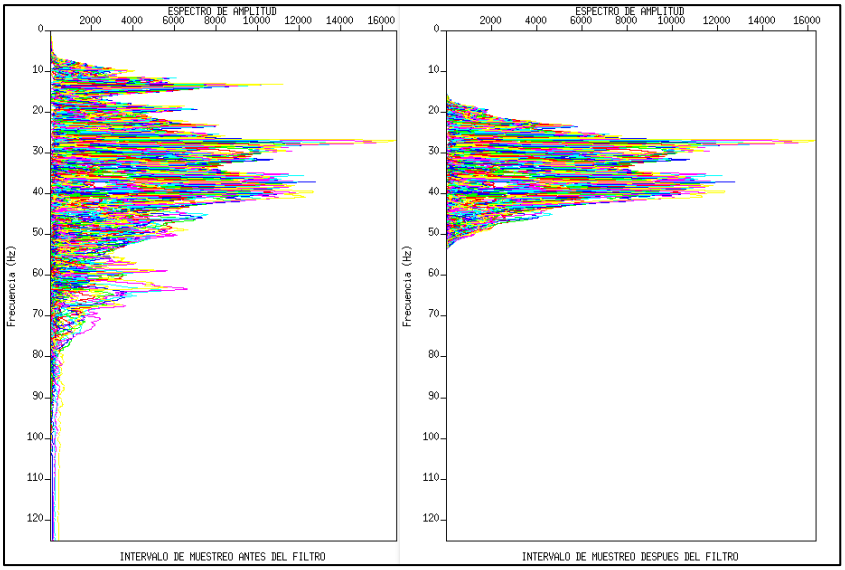


Ilustración 33: Espectro de amplitud de los datos sísmicos marinos 2D en el disparo 80 antes y después de la aplicación del filtro Bandpass.

Fuente: Propia

Con la anterior imagen se puede verificar que efectivamente los datos sísmicos están dentro del rango de frecuencias especificado.

Para finalizar con esta fase del procesamiento se puede observar en la Ilustración 34 la comparación final entre los datos sin procesar y el resultado final de los datos procesados:

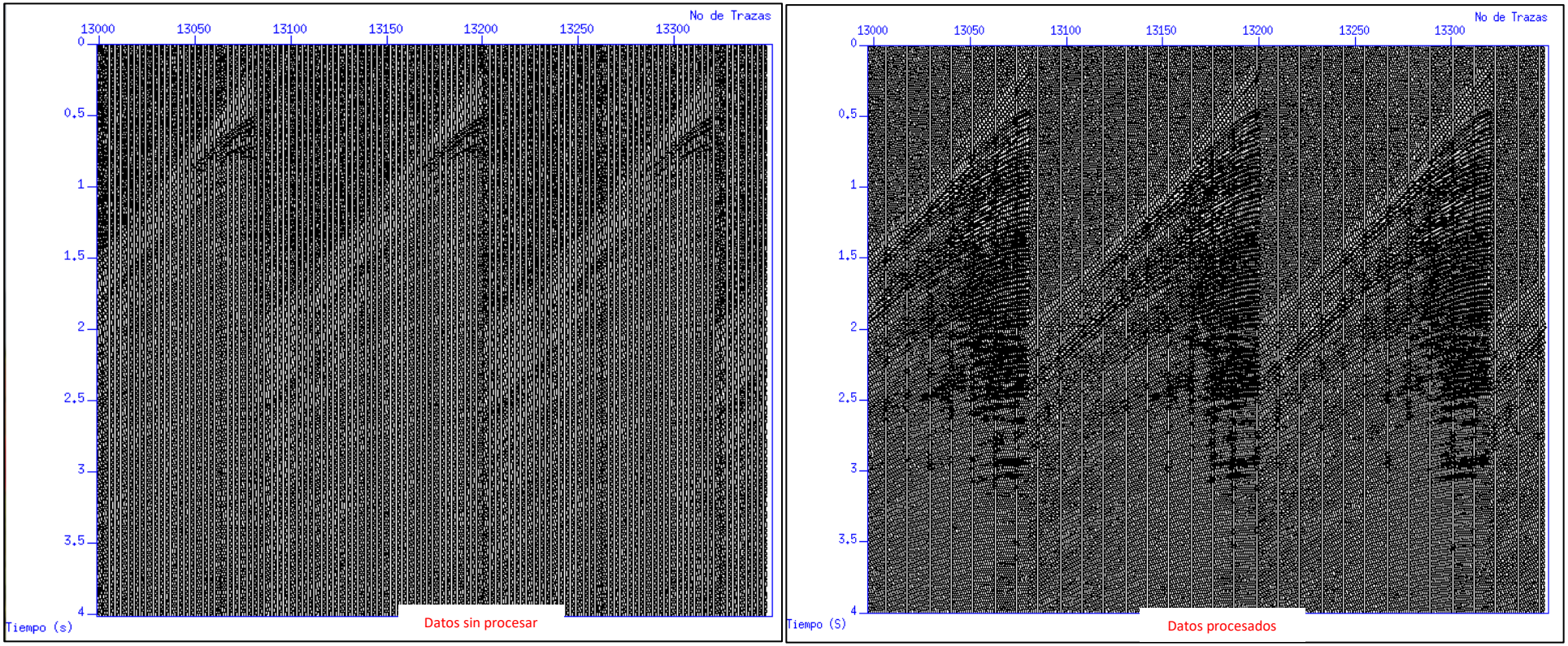


Ilustración 34: Comparación final de los datos sísmicos marinos sin procesar y los datos procesados.

Fuente: Propia

4.7.2. FILTROS DE GANANCIA

Este paso del procesamiento se realiza para recuperar amplitudes que se pierden debido a fenómenos como la divergencia esférica. La divergencia esférica tiene como consecuencia la variación de las amplitudes sísmicas debido al decrecimiento de la energía con respecto a la distancia.

Es por esto que se aplican funciones de recuperación o ganancia, para compensar la divergencia del frente de onda en el procesamiento sísmico. Los filtros de ganancia se aplican para la visualización de los datos y por lo general son aplicados antes de la Deconvolución. (Yilmaz, 2001)

El software Seismic Unix contiene la función *Sugain*, la cual contiene varias operaciones, entre ellas:

- Escala de los datos
- Multiplicación de los datos por una potencia del tiempo
- Control de ganancia automática
- Atrapar los rastros del ruido
- Recortar amplitudes o cuantiles especificados
- Equilibrar trazas por clip cuantil, valor RMS o media
- Sesgado de los datos. (CWP C. f., 2012)

La primera prueba para la corrección de amplitudes se realiza con el filtro AGC ó control de ganancia automática. AGC significa subdividir cada traza en ventanas con una longitud especificada por el usuario. La amplitud RMS (media cuadrática) en la ventana se calcula y compara con un valor deseado; si estos dos no coinciden con un factor de escala, se aplica a las muestras dentro de la ventana. El AGC es un ejemplo de "correcciones de amplitud dependientes de datos" - la información de amplitud de los datos se utiliza para escalarla (Meyer, 2007). Para la siguiente prueba se tomará un factor de escala igual a 1.

- *sugain agc=1 < Bandpass_15283855.su | suxwigb perc=95 title:"FILTRO AGC" label1="Tiempo (S)" label2="No de Trazas"*

```
alejandra@alejandra-VirtualBox: ~/Documents/Tesis/Filtros/Ganancia
alejandra@alejandra-VirtualBox:~/Documents/Tesis/Filtros/Ganancia$ sugain agc=1
< Bandpass_15283855.su | suxwigb perc=95 title="FILTRO AGC" label1="Tiempo (S)"
label2="No de Trazas"
```

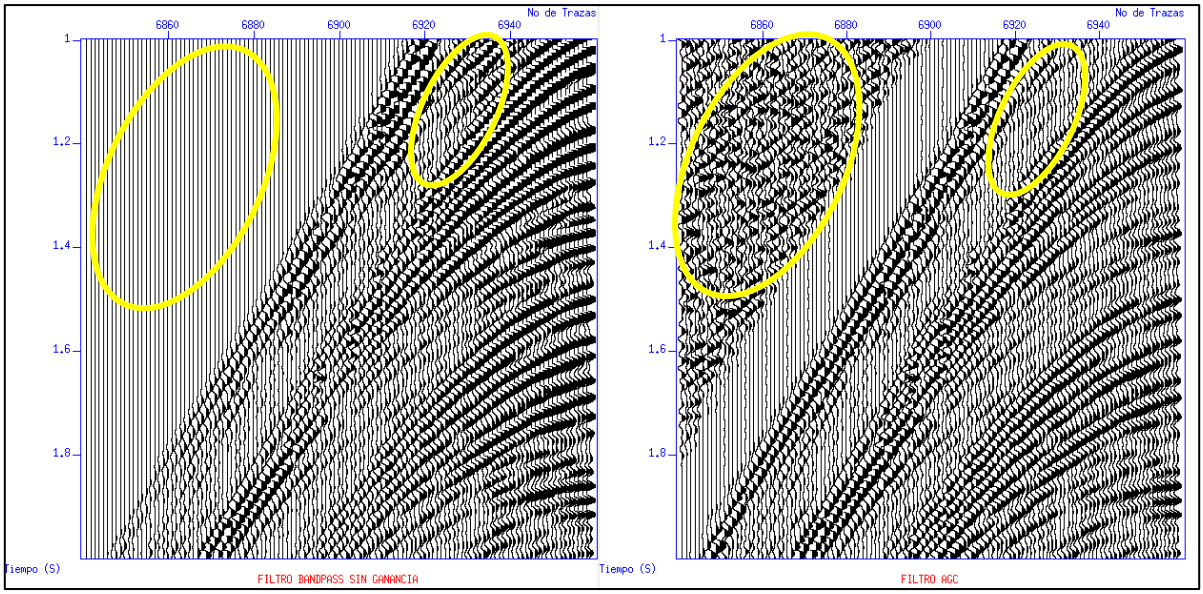


Ilustración 35: Aplicación de la función de ganancia Automática o AGC, a los datos sísmicos marinos 2D mediante el software Seismic Unix.

Fuente: Propia

Este filtro permite visualizar las señales que llegan de manera tardía, es por esto, que en la anterior imagen se puede observar un aumento de amplitud significativa de las bajas señales. La visualización de estas trazas debe ser clara para la correcta ejecución de procesos posteriores.

Se utiliza también el filtro de ganancia WAGC al que se da un parámetro de ventana de 0,25 segundos de largo

- *sugain* agc=1 wagc=0.25 < *Bandpass_15,28,38,55.su* | *suxwigb perc=95 title:"Filtro AGC WAGC" label1="Tiempo (S)" label2="No de Trazas"*

```
alejandra@alejandra-VirtualBox: ~/Documents/Tesis/Filtros/Ganancia
alejandra@alejandra-VirtualBox:~/Documents/Tesis/Filtros/Ganancia$ sugain agc=1 wagc=0.
25 < Bandpass_15283855.su | suxwigb perc=95 title="FILTRO AGC WAGC" label1="Tiempo (S)"
 label2="No de Trazas"
```

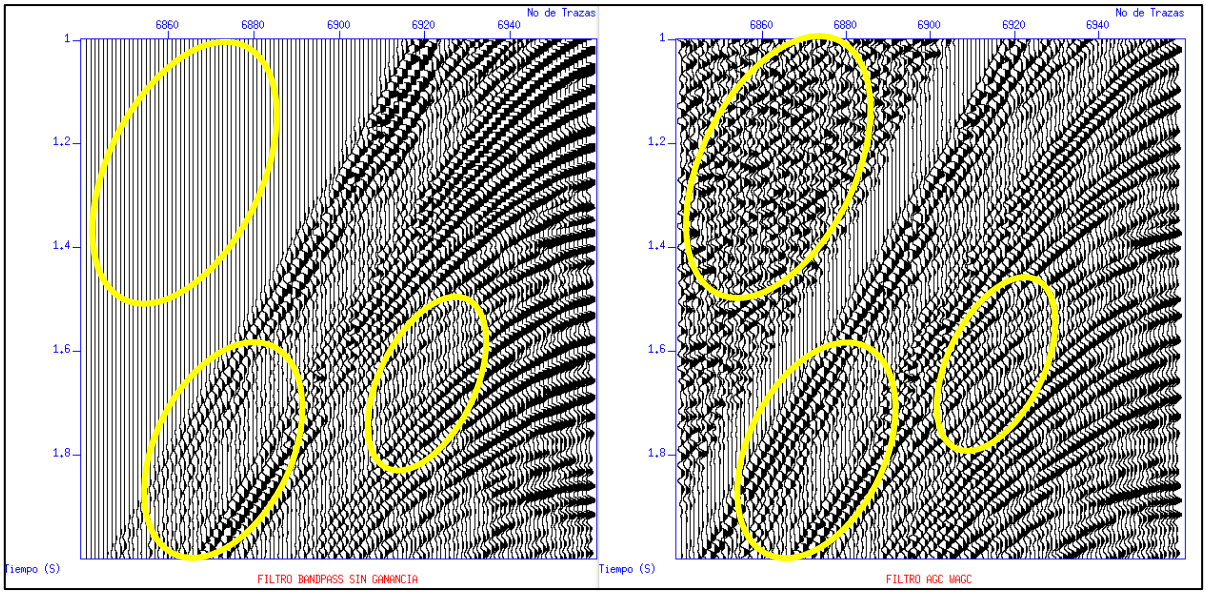


Ilustración 36: Aplicación de la función de ganancia AGC WAGC a los datos sísmicos marinos 2D mediante el software Seismic Unix.

Fuente: Propia

En comparación con el filtro AGC, el filtro WAGC recupera de manera más amplia las amplitudes de los datos en zonas donde eran muy difusas las trazas, incluso se puede observar que en la parte superior izquierda de la imagen, se hace más perceptible la recuperación de esas amplitudes.

El algoritmo del siguiente filtro de ganancia, o filtro *pba*l, divide por la potencia RMS de los datos, la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los valores de datos sísmicos en todas las huellas de un tiro dado. (CWP, 2012). Entonces se escribe la siguiente orden:

- *sugain* pbal=1 < *Bandpass_15,28,38,55.su* | *suxwigb perc=95 title="FILTRO PBAL" label1="Tiempo (S)" label2="No de Trazas"*

```
alejandra@alejandra-VirtualBox: ~/Documents/Tesis/Filtros/Ganancia
alejandra@alejandra-VirtualBox:~/Documents/Tesis/Filtros/Ganancia$ sugain pbal=1 < Bandp
ass_15283855.su | suxwigb perc=95 title="FILTRO PBAL" label1="Tiempo (S)" label2="No de
Trazas"
```

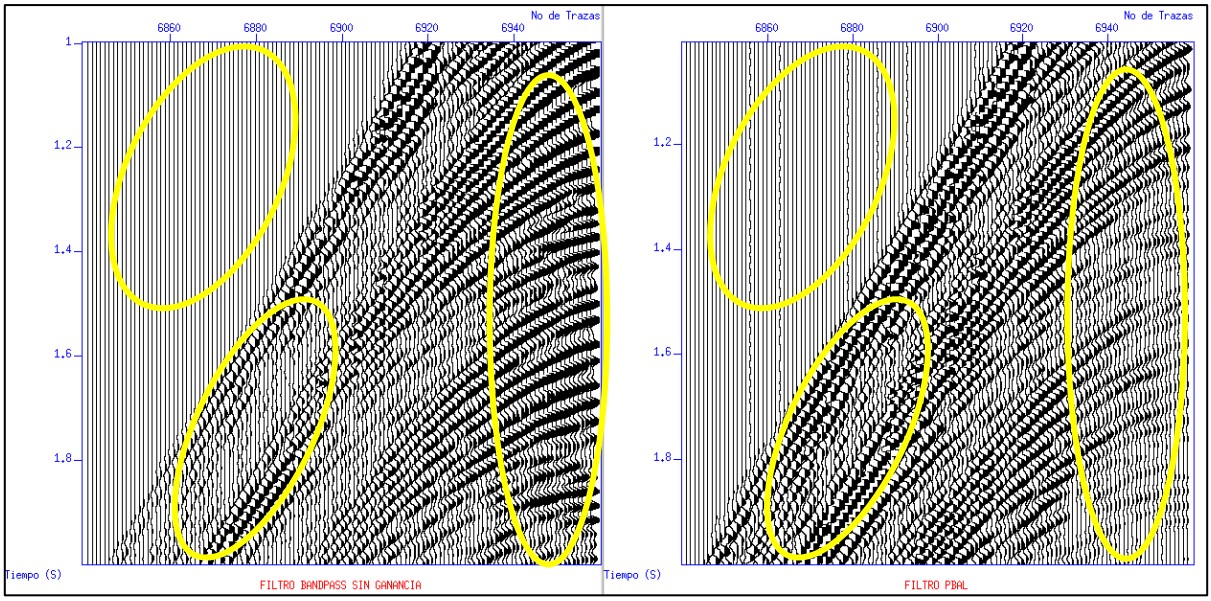


Ilustración 37: Aplicación de la función de ganancia PBAL a los datos sísmicos marinos 2D mediante el software Seismic Unix.

Fuente: Propia

Con la ejecución del algoritmo del filtro de ganancia *pbal* se puede indicar que no es el resultado que se podría esperar, puesto que se recuperan amplitudes pero también hay pérdida de información, lo que indica que se deba usar otro tipo de filtro.

Consecutivamente, el decaimiento de las ondas sísmicas puede compensarse con la ejecución de una función comúnmente utilizada llamada función de poder. En SU se aplica este filtro que resulta de multiplicar cada amplitud en la traza por un factor de t^{tpow}, usualmente valores entre 1.8 y 2.4. En este caso se usará un valor de 2 como se expresa en la siguiente orden:

- *sugain* tpow=2 < *Bandpass_15,28,38,55.su* | *suxwigb perc=95 title="FILTRO TPOW 2" label1="Tiempo (S)" label2="No de Trazas"*

```
alejandra@alejandra-VirtualBox: ~/Documents/Tesis/Filtros/Ganancia
alejandra@alejandra-VirtualBox:~/Documents/Tesis/Filtros/Ganancia$ sugain tpow=2 <
Bandpass_15283855.su | suxwigb < Filtro_tpow_2.su perc=95 title="FILTRO TPOW 2" la
bel1="Tiempo (S)" label2="No de Trazas"&
```

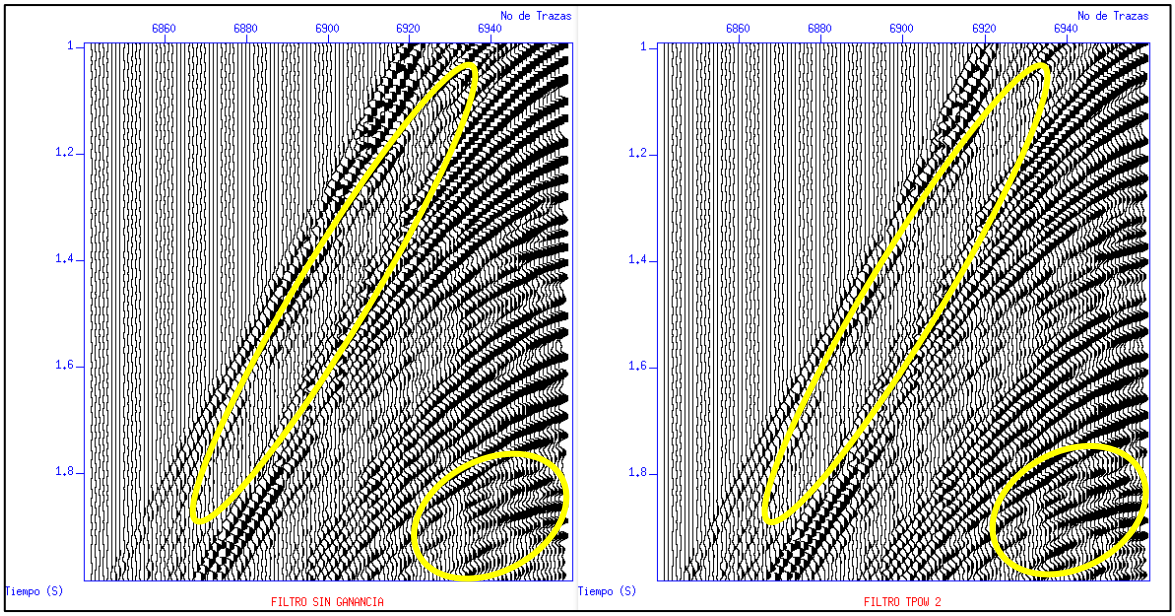


Ilustración 38: Aplicación de la función de ganancia tpow a los datos sísmicos marinos 2d mediante el software Seismic Unix.

Fuente: Propia

Como se puede observar, no hay una ganancia muy notoria en las trazas sísmicas, se nota una pérdida de amplitudes en las trazas ubicadas en la parte superior izquierda, por lo que se procede a la aplicación de otros filtros de ganancia.

La siguiente función de ganancia que se aplica es la *gpow,* ésta es una función de raíz cuadrada la cual evita que se incrementen amplitudes mayores en lugar de las más pequeñas. (CWP, 2012). El parámetro para el siguiente comando en SU es de gpow=0.5, sin embargo iterativamente se eligen los valores convenientes.

- *sugain* gpow=0.5 < *Bandpass_15,28,38,55.su* | *suxwigb perc=95 title="FILTRO GPOW 2" label1="Tiempo (S)" label2="No de Trazas"*

```
alejandra@alejandra-VirtualBox: ~/Documents/Tesis/Filtros/Ganancia
alejandra@alejandra-VirtualBox:~/Documents/Tesis/Filtros/Ganancia$ sugain gpow=0.5 <
Bandpass_15283855.su | suxwigb perc=95 title="FILTRO GPOW" label1="Tiempo (S)" label2
="No de Trazas"
```

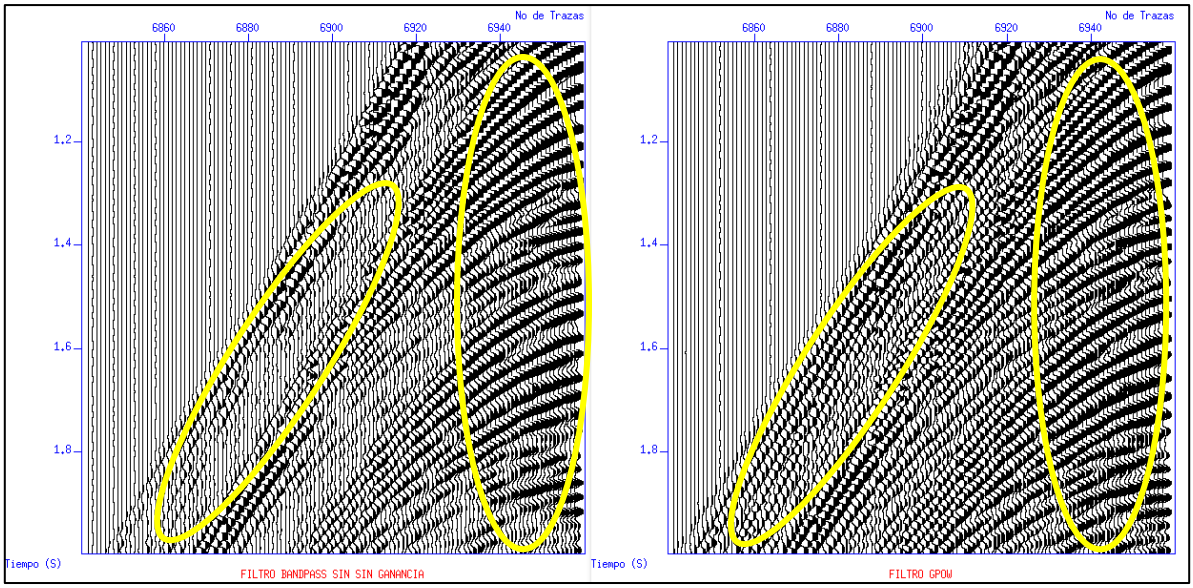


Ilustración 39: Aplicación de la función de ganancia gpow a los datos sísmicos marinos 2d mediante el software Seismic Unix.

Fuente: Propia

Con la función *gpow* se hace muy notoria la visualización de los datos en la parte superior derecha de la imagen, opuesto a lo que ocurre en los datos de la parte inferior derecha, donde se observa algunas sombras sobre las trazas, lo que dificultaría los siguientes pasos del procesamiento de datos.

Para finalizar, se ha mencionado reiteradamente la importancia de un buen pre procesado de datos, por lo que se deben escoger las mejores herramientas que proporcionen los resultados que satisfagan los requerimientos de cada proceso. Por esta razón se ha elegido para la recuperación de amplitudes el filtro WAGC, que ha mostrado un aumento revelador de las bajas señales.

Con la recuperación de ganancias ha culminado la etapa de pre apilamiento de la información, en donde se han acondicionado los datos de las señales sísmicas marinas 2D para continuar con las etapas de apilamiento y migración en el procesamiento de datos sísmicos.

5. CONCLUSIONES

1. El objetivo principal de este trabajo era la realización de la etapa de pre apilamiento de datos sísmicos, específicamente, las operaciones de filtrado. Uno de los retos fue conseguir la información requerida para ello, cabe resaltar que desde un comienzo se pretendió trabajar con datos y software libre, debido a que la adquisición de datos es un proceso complejo y de tiempo, además, la obtención de datos por parte de compañías privadas podría incurrir en algún inconveniente de tipo legal por el uso de los mismos. En cuanto al software se ha mencionado que hay varios programas de tipo comercial para el procesamiento de datos, sin embargo, la idea de la realización con el software Seismic Unix es la facilidad de obtención y del uso de sus herramientas. Con el objetivo mencionado anteriormente se puede observar que las ordenes o comandos descritos en cada etapa no son muy complejas, no obstante, el uso de scripts para tareas más elaboradas lo hace muy funcional.

2. La aplicación de filtros digitales a los datos sísmicos puede interpretarse como una simple operación cosmética en la información sísmica, sin embargo, va mucho más allá de eso. En la etapa de pre apilamiento o pre procesado de la información es importante reconocer el ruido de las señales sísmicas y aislarlo, por esta razón se utilizaron varias herramientas proporcionadas por el software Seismic Unix, desde la conversión del archivo crudo al formato del programa, hasta el análisis frecuencial y espectral. La aplicación de filtros por su parte es un proceso de mucho análisis en el que juega un papel muy importante la experiencia y el conocimiento de lo que se pretende realizar. Se convierte en la primera etapa del procesamiento sísmico del cual depende la correcta interpretación de la información en las etapas de apilamiento y migración; es allí donde nuevamente se recurre al proceso de filtrado.

3. Los parámetro elegidos en las operaciones de filtrado fueron obtenidos en un proceso experimental como producto del análisis de los resultados derivados durante cada operación de filtrado. Este análisis espectral permite revisar y comparar el objetivo de la aplicación de cada algoritmo de filtrado con los resultados derivados de cada operación, y siguiendo este proceso, lograr conseguir en el caso de los filtros de frecuencia un realce en la relación señal/ruido, en este caso mediante el filtro pasabanda; y por otra parte, la recuperación de amplitudes mediante el uso de filtros de ganancia, específicamente con el filtro WAGC. Una mala elección de filtros y de sus parámetros, puede generar información errónea y consecuentemente una mala interpretación de los rasgos estratigráficos obtenidos durante el proceso de interpretación sísmica.

4. Es importante que se realicen controles de calidad en cada etapa del procesamiento para que se puedan obtener los resultados esperados al final de todo el proceso. Esto puede realizarse mediante varias herramientas, la mayoría de ellas proporcionadas por el mismo software. Sin embargo, en la elaboración de este trabajo se ha recurrido a un software adicional como lo es el Seisee. Este software, también gratuito, permite visualizar los datos, obtener información referente a ellos y aplicar algunos filtros para verificar y tomar decisiones en cuanto a los resultados obtenidos por las operaciones de filtrado, utilizados para el procesamiento de datos sísmicos en el software Seismic Unix.

5. Para finalizar, el procesamiento de datos sísmico requiere tiempo, conocimiento y buen manejo de las herramientas informáticas, por esta razón se ha decidido profundizar en la ejecución del pre apilamiento de los datos sísmicos marinos 2D, mostrando las operaciones, comandos y técnicas llevadas a cabo para obtener un archivo pre procesado que pueda ser utilizado en un futuro para llevar a cabo las siguientes etapas, como lo son el apilamiento y migración con todos los subprocesos que esto conlleva.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Ahay Org. (Septiembre de 2014). *GEO391.* Obtenido de http://www.ahay.org/RSF/book/geo391/hw1/paper_html/node4.html

[2] ANH, A. N. (Enero de 2010). *Manual para la adquisición y procesamiento de sísmica terrestre y su aplicación en Colombia.* Obtenido de http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Documents/Manual%20Tecnicas%20Sismica%20Terrestre.pdf

[3] Cantos Figuerola, J. (1973). *Tratado De Geofísica Aplicada.* Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingeniería.

[4] Claerbout, J. (1996). *Imaging The Earth's Interior.* Stanford University.

[5] CWP. (Noviembre de 2012). *A Course in Geophysical Image Processing with Seismic Unix:.* Obtenido de http://www.cwp.mines.edu/~john/GPGN461.561/ch1-14.pdf

[6] CWP, C. f. (2012). *Center For Wave Phenomena*. Obtenido de http://www.cwp.mines.edu/sututor/node7.html

[7] Estrada, L. (2009). *Procesamiento de Datos Geofísicos.* Obtenido de Universidad Nacional De Tucuman: https://catedras.facet.unt.edu.ar/geofisica/wp-content/uploads/sites/4/2014/02/procesamiento-datos-geofisicos.pdf

[8] Forel, D., Benz , T., & Pennington, W. (2005). Taiwan Data: Examine, Zero Traces, Re-examine. En S. o. Geophysicists, *Seismic Data Processing with Seismic Un*x.* USA: Series Editor, Lawrence M. Gochioco.

[9] Hardy, R. (Marzo de 2015). *Basic Seismic Processing for Interpreters*. Obtenido de SCALING IN PRACTICE: http://www.xsgeo.com/course/gain.htm

[10] Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration.* BlackwellScience.

[11] Lopes Cureño, G. (Agosto de 2009). *Procesamiento Sísmico en Tiempo 2D Terrestre con Seismic Unix.* Obtenido de http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/15196

[12] Meyer, O. D. (2007). *Seismic Unix Course May 2007.* Obtenido de Electronics Workshop: http://www.geo.uib.no/eworkshop/index.php?n=Main.SuCourseSpring07

[13] Mondol, N. (2010). Seismic Exploration. En N. H. Mondol, *Petroleum Geoscience* (págs. 375-402).

[14] Musset, A., & Khan, M. (2000). *Looking into the Earth An introduction to Geological Geophysics.* Cambridge University Press.

[15] Pavlukhin, S., & Sakhalinsk, Y. (2004-2013). *Seisee (2.22) User's Manual*. Obtenido de http://www.dmng.ru/docs/Freeware/seisee/html/SeiSeeEng.htm

[16] Sheriff, R., & Geldart, L. (1995). *Exploration Seismology.* EE.UU: Cambridge University Press.

[17] Stockwell, J., & Cohen, J. (2008). *The New SU User's Manual .* Colorado School of Mines: The Society of Exploration Geophysicist.

[18] Vargas Parra, J. A. (2009). *Repositorio Universidad Industrial de Santander*. Obtenido de Adquisición y Procesamiento de Datos Sísmicos Someros 2D en la falla de Bucaramanga en el área de Piedecuesta (Santander): http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/1088/2/131265.pdf

[19] Yilmaz, Ö. (2001). *Seismic Data Analysis.* Tulsa, USA: Society of Exploration Geophycists.

[20] Zhou, H. W. (2014). *Practical Seismic Data Analysis.* EE.UU: Cambridge University Press.