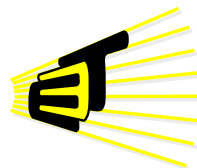


IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO EN MATLAB PARA EL EQUIPO DE ADQUISICIÓN SÍSMICA “SEISMEX 16” QUE PERMITA REALIZAR MUESTREO COMPRESIVO EN TIEMPO

OSCAR EDUARDO JAIMES GARNICA



Escuela de Ingenierías
Eléctrica, Electrónica y
de Telecomunicaciones



Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de
Telecomunicaciones
Bucaramanga
2017

IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO EN MATLAB PARA EL
EQUIPO DE ADQUISICIÓN SÍSMICA “SEISMEX 16” QUE PERMITA
REALIZAR MUESTREO COMPRESIVO EN TIEMPO

Autor:
OSCAR EDUARDO JAIMES GARNICA

*Trabajo de investigación presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Electrónico*

Director:
Ana Beatriz Ramírez Silva
PhD. en Ingeniería Electrónica

Codirector:
Julián Gonzalo Mantilla Arias
Ingeniero Electrónico

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de
Telecomunicaciones
Bucaramanga
2017

A Dios.

A Luis Eduardo Jaimes Reyes y Lucy Fátima Garnica, mis amados padres, por su apoyo, por su consejo, por ser mis guías, por estar en todo momento conmigo dándome palabras de aliento para poder culminar esta etapa de mi vida y por todo lo que me han brindado en mis 22 años de existencia.

A Diana Carolina Jaimes Garnica, mi querida hermana, por escucharme, por su cariño y por compartir tantas cosas durante mi carrera.

A Laura Priscila Rangel Gutiérrez, por su constante motivación para alcanzar este logro, por creer en mi, por su apoyo incondicional, por brindarme su amor y compañía.

A Wilson Yulián Pinzón, Janna Pamela Gomez y Carlos Alfredo Lozano Herrera, por su amistad y por su apoyo, y a toda mi familia, amigos y demás personas que me han acompañado a lo largo de mi formación profesional.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue desarrollado con el apoyo de la empresa colombiana del petróleo, ECOPETROL, y COLCIENCIAS como parte del proyecto de investigación No. 0266-2013. Agradezco al grupo de investigación CPS de la Universidad Industrial de Santander por brindarme los mecanismos para realizar esta tesis, y una mención especial para el M.Sc Julián Gonzalo Mantilla Arias por todo su apoyo y tiempo para guiarme en la elaboración de esta investigación.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	11
1 OBJETIVOS	12
1.1. Objetivo General	12
1.2. Objetivos Específicos	12
2 MARCO TEÓRICO	13
2.1. Exploración Sísmica	13
2.2. Corrección de Amplitudes	13
2.3. Muestreo Compresivo	14
2.4. Medición del Error de Reconstrucción	16
2.5. Sismógrafo “SEISMEX 16”	17
3 SUBMUESTREO, INTERFAZ Y RECONSTRUCCIÓN	20
3.1. Submuestreo Aleatorio en Tiempo	20
3.2. Diseño de la Interfaz Gráfica	22
3.3. Reconstrucción de Trazas	24
4 PRUEBAS Y RESULTADOS	26
4.1. Datos Iniciales	26
4.2. Preacondicionamiento de los Datos	30
4.3. Submuestreo Aleatorio	32
4.4. Reconstrucción	34
4.5. Medición del Error de Reconstrucción	40
5 CONCLUSIONES	41
6 OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES	42
6.1. Observaciones	42
6.2. Recomendaciones	42
REFERENCIAS	43
BIBLIOGRAFÍA	45

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Divergencia Esférica, Tomada de [1]	13
Figura 2. Submuestreo en Tiempo de una Señal y su Espectro en Frecuencia, Adaptada de [2]	15
Figura 3. Equipo de Adquisición Sísmica “SEISMEX 16”	18
Figura 4. Diagrama de Flujo del Software Original del Sismógrafo, Tomada de [3]	19
Figura 5. Diagrama de flujo de algoritmo de submuestreo de trazas	20
Figura 6. Diagrama de flujo de Interfaz Gráfica	21
Figura 7. Interfaz para Lanzar el Programa: Estado Final	22
Figura 8. Interfaz Gráfica del Software del Equipo “SEISMEX 16”	23
Figura 9. Cambio de la Interfaz al realizar Submuestreo Aleatorio	24
Figura 10. Ventanas Emergentes con Mensajes para el Usuario	24
Figura 11. Diagrama de Flujo del Proceso de Reconstrucción de Trazas	25
Figura 12. Comparación de Trazas de S3 - G8 Línea 2 cuando se aplica el filtro de 6 - 40 [Hz], (a) Todas las Trazas. (b) Traza 9.	27
Figura 13. Datos Iniciales de S1 - G1 Línea 2	28
Figura 14. Datos Iniciales de S2 - G4 Línea 2	28
Figura 15. Datos Iniciales de S3 - G8 Línea 2	29
Figura 16. Datos Iniciales de S4 - G12 Línea 2	29
Figura 17. Comparación de Trazas de S3 - G8 Línea 2 luego del preacondicionamiento, (a) Todas las Trazas. (b) Traza 9.	31
Figura 18. Datos de S3 - G8 Línea 2 luego del submuestreo conservando el 80 % de las muestras	32
Figura 19. Comparación de Trazas de S3 - G8 Línea 2 luego del submuestreo conservando el 80 % de las muestras, (a) Todas las Trazas (b) Traza 9 original y submuestreada conservando el 80 % de las muestras.	33
Figura 20. Cálculo de Lambda para el 80 % de las Muestras, (a) S1 - G1 Línea 2. (b) S2 - G4 Línea 2. (c) S3 - G8 Línea 2. (d) S4 - G12 Línea 2.	35
Figura 21. Datos Reconstruidos con el 80 % de Muestras de S3 - G8 Línea 2	36
Figura 22. Diferencia de Datos Reconstruidos con el 80 % de Muestras de S3 - G8 Línea 2	36
Figura 23. Datos Reconstruidos con el 50 % de Muestras de S3 - G8 Línea 2	37
Figura 24. Diferencia de Datos Reconstruidos con el 50 % de Muestras de S3 - G8 Línea 2	37
Figura 25. Comparación de Trazas de S3 - G8 Línea 2 luego de la reconstrucción con el 80 % de las muestras, (a) Todas las Trazas. (b) Traza 9.	38
Figura 26. Comparación de Trazas de S3 - G8 Línea 2 luego de la reconstrucción con el 50 % de las muestras, (a) Todas las Trazas. (b) Traza 9.	39

RESUMEN

TÍTULO: Implementación de un Algoritmo en MATLAB para el equipo de adquisición sísmica “SEISMEX 16” que permita realizar muestreo compresivo en tiempo*

AUTOR: Oscar Eduardo Jaimes Garnica**

PALABRAS CLAVE: Datos sísmicos, Trazas sísmicas, Muestreo Compresivo, Submuestreo Aleatorio, Reconstrucción de Trazas.

DESCRIPCIÓN: La técnica para realizar adquisición sísmica en la industria ha permanecido sin muchas modificaciones de lo largo de los años por los resultados obtenidos, sin embargo, en las últimas décadas se ha venido investigando la posibilidad de realizar un muestreo compresivo en la captura de los datos de manera que se pueda reducir el espacio de almacenamiento para los datos ya que un dato normalmente está en el orden de los *terabytes* de información.

Partiendo de estas investigaciones en la industria, el siguiente trabajo de investigación presenta la implementación de un algoritmo de submuestreo para realizar muestreo compresivo en tiempo, mediante el acople del software del equipo de adquisición “SEISMEX 16” donde el usuario puede controlar el tiempo de grabación, el intervalo de muestreo, la ganancia de los geófonos. Además, se realiza un preprocesamiento de los datos adquiridos, presentando primero un filtrado para eliminar el ruido de alta frecuencia presente en los datos, una corrección de amplitudes para darle más peso a los últimos arribos y seguido a esto se reconstruyen utilizando un algoritmo que mide el error al calcular la relación señal a ruido entre los datos iniciales y los datos finales para evaluar la viabilidad de la técnica del muestreo compresivo en tiempo en adquisiciones sísmicas.

* Trabajo de investigación.

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Programa de Pregrado de Ingeniería Electrónica. Director: Ana Beatriz Ramírez Silva, Codirector: M.Sc Julián G. Mantilla Arias

ABSTRACT

TITLE: Implementation of an algorithm in *MATLAB* for the seismic acquisition equipment "SEISMEX 16" that allows to realize compressive sampling in time*

AUTOR: Oscar Eduardo Jaimes Garnica**

KEYWORDS: Seismic data, Seismic traces, Compressive sensing, Random sub-sampling, Data reconstruction.

DESCRIPTION: The technique to perform the seismic acquisition in the industry has remained without many modifications over the years by the results obtained, however, in the last decades has been investigated the possibility of performing a compressive sampling in the data capture. The way you can reduce the storage space for the data and that a data is usually in the order of terabytes of information.

Based on these investigations in the industry, the following research work presents the implementation of a subsampling algorithm to perform compressive sampling in time, using the software of the acquisition equipment "SEISMEX 16" where the user can control the recording time. In addition, a preprocessing of the acquired data is performed, a file is presented to eliminate the high frequency noise presented in the data, a correction of amplitudes to give weight to the last arrivals and followed once they are reconstructed using an algorithm that measures error in calculating the relationship noted a noise between the initial data and the final data to evaluate the feasibility of the technique of compressive sampling in time in seismic acquisitions.

* Degree Project

** Faculty of Physics Mechanics Engineering. Electrical, Electronics Engineering and Telecommunications School, Director: Ana Beatriz Ramírez Silva, Codirector: M.Sc Julián G. Mantilla Arias

INTRODUCCIÓN

La explotación de los hidrocarburos consta de dos partes esenciales, la exploración y producción. El proceso exploratorio comprende los estudios enfocados a la búsqueda del yacimiento y abarca estudios desde geología de superficie a estudios geofísicos como métodos sísmicos. Estos últimos permiten la caracterización del subsuelo, localización de estructuras geológicas, delimitar el yacimiento y disminuir la incertidumbre al de realizar la perforación. Por otro lado, la producción hace referencia al proceso extractivo, en donde el estudio se enfoca plenamente en el yacimiento durante el proceso de extracción. Posterior a esto, es necesario el refinamiento de los hidrocarburos para obtener los productos deseados de estos.

El proceso de exploración de hidrocarburos es amplio y estandarizado, sin embargo, está en constante evolución gracias a la investigación que se realiza en las diferentes técnicas utilizadas, buscando reducir costos y tiempo de ejecución. El método sísmico es una de esas técnicas donde se centran los esfuerzos para su mejoramiento continuo ya que es una etapa imprescindible en todo proceso de exploración a nivel mundial.

En este método se generan ondas que viajan a través del subsuelo, atravesando las capas de rocas, donde la energía se ve reflejada y refractada en las diferentes interfaces, y retornando a la superficie donde son captadas por receptores, llamados geófonos, los cuales actúan como transductores convirtiendo esa energía en información del subsuelo y la almacenan en forma digital. Al almacenar esta información en forma digital, el teorema de muestreo de Nyquist establece la teoría necesaria para reconstruir la señal y realizar un procesamiento de los datos.

El teorema de Nyquist sugiere que se haga un muestreo uniforme a intervalos regulares de tiempo, pero en los últimos años se ha venido explorando la opción de tener menos muestras, surgiendo la teoría del muestreo compresivo, la cual consiste en reconstruir una señal, a partir de un conjunto reducido de muestras tomadas aleatoriamente, que es mucho menor al que se tendría si la señal fuese muestreada basada en el teorema de Nyquist.

Para probar la técnica del muestreo compresivo en tiempo, este trabajo de investigación se enfoca en la implementación de un algoritmo, acoplándolo con el software propio del equipo de adquisición de datos sísmicos, "SEISMEX 16"* , y, con los datos obtenidos, realizar una reconstrucción de las trazas.

* Sismógrafo desarrollado por la empresa *Subsuelo3d*, <http://www.subsuelo3d.com/es/ipaginas/ver/G12/16/equipos/>

1 OBJETIVOS

1.1. Objetivo General

Implementar un algoritmo en *MATLAB*^{*} con su respectiva interfaz gráfica que permita utilizar el equipo de adquisición sísmica “SEISMEX 16” para obtener trazas sísmicas con un muestreo aleatorio en tiempo.

1.2. Objetivos Específicos

- Acoplar el software del sismógrafo “SEISMEX 16” de manera que se puedan controlar todas sus funciones desde un algoritmo implementado en *MATLAB*.
- Diseñar la interfaz gráfica (*GUI*)[†] donde se permita al usuario elegir si desea realizar un muestreo uniforme o aleatorio en tiempo.
- Reconstruir las trazas sub-muestreadas aleatoriamente para generar un archivo de salida *.mat*[‡].

* Software Matemático para el Desarrollo e Investigación creado por *Mathworks*, https://es.mathworks.com/products.html?s_tid=gn_ps

† Graphical User Interface, en español, Interfaz Gráfica de Usuario.

‡ Formato utilizado para datos en *MATLAB*

2 MARCO TEÓRICO

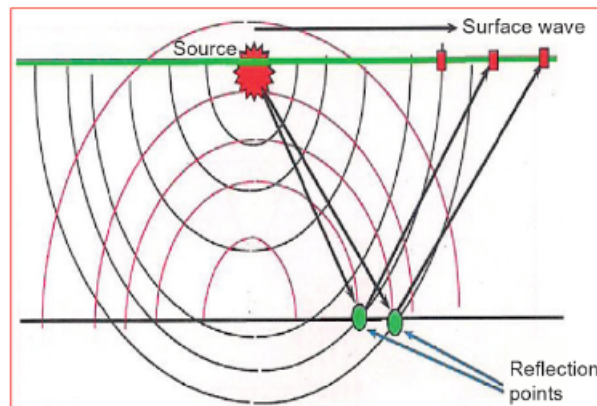
2.1. Exploración Sísmica

Para caracterizar el subsuelo y obtener una imagen que muestre las diferentes estructuras que componen el subsuelo, se realiza un experimento sísmico. El cual consiste en usar una fuente de energía (explosiones o vibraciones) la cual genera ondas de presión que viajan capa tras capa. Estas ondas se reflejan y refractan, como indica la ley de Snell-Descartes, al cambiar de medio con diferentes propiedades físicas. Las ondas reflejadas y refractadas llevan la información de interés, y cuando llegan a la superficie son captadas por transductores de energía llamados geófonos. El geófono se encarga de convertir esa energía en una señal digital o analógica que después será almacenada y procesada.

2.2. Corrección de Amplitudes

La energía producida por la fuente viaja a través del subsuelo con un frente de onda esférico, y a medida que se aleja de la fuente va disminuyendo su intensidad. Esta pérdida de energía afecta las ondas reflejadas y refractadas, de modo que los geófonos detectan esta disminución a medida que pasa el tiempo. A este efecto se le conoce como divergencia esférica y se aprecia en la Figura 1.

Figura 1: Divergencia Esférica, Tomada de [1]



Para compensar este efecto se aplica un aumento en las amplitudes de los datos que se encuentran a mayor profundidad, sin afectar las que se encuentran cerca a la superficie. Una de las formas más sencillas para mitigar la divergencia esférica es multiplicando los datos por una función exponencial, tal como propone Ozdogan Yilmaz y Stephen M. Doherty en [4]. La ecuación 2.1 muestra dicha ganancia, donde

A es la amplitud, t el tiempo donde se va a dar ganancia y n el exponente que se debe calcular para lograr el objetivo de maximizar las amplitudes a bastante profundidad sin ampliar las de poca profundidad.

$$G(t) = At^n. \quad (2.1)$$

2.3. Muestreo Compresivo

El criterio de Nyquist ha sido el principio para la adquisición de datos sísmicos porque garantiza una correcta reconstrucción de señales arbitrarias con limitado ancho de banda, este principio requiere que los equipos muestreen la señal de la onda reflejada o refractada con un periodo uniforme, de modo que el procesamiento posterior de la señal se realiza siguiendo la teoría de muestreo de Nyquist. En la Figura 2 se ve que las componentes fundamentales de frecuencia de la señal submuestreada aleatoriamente no se afectan, sin embargo, aparece un ruido de baja frecuencia que será eliminado en el proceso de reconstrucción explicado más adelante, mientras que al realizar un submuestreo uniforme incumpliendo el criterio de Nyquist, las componentes fundamentales no corresponden a las de la señal original. El muestreo compresivo, CS^* por sus siglas en Inglés, ha llegado como una teoría emergente en la adquisición de datos, asegurando que una señal puede ser recuperada con una menor cantidad de muestras que los métodos tradicionales, si se cumple que la señal sea poco densa, *Sparse*, en su estado natural o en algún dominio transformado y que la matriz de muestreo aleatoria sea incoherente con la base de representación de la señal *Sparse*, como plantean E. J. Candes y M. B. Wakin[5], y D. L. Donoho[6].

Señal poco densa (*Sparse*): Es aquella que tiene pocos coeficientes diferentes de cero, en su dominio natural o en algún dominio transformado.

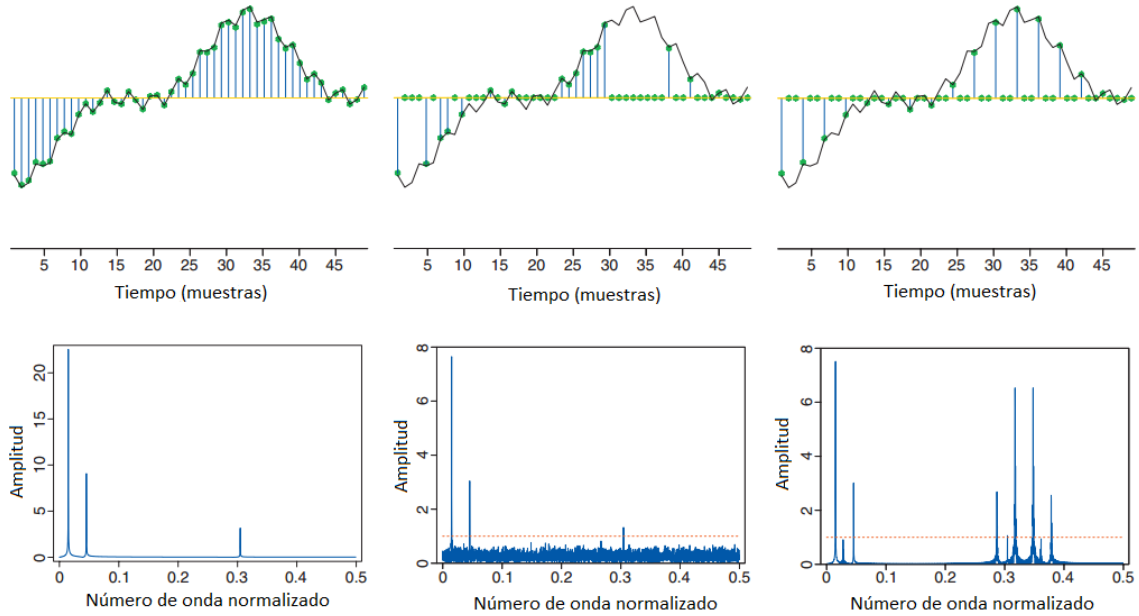
Incoherencia: Dos matrices son incoherentes entre ellas si hay poca correlación de sus columnas. Si se tiene una matriz muestreada aleatoriamente (A) y otra con un diccionario de representación *Sparse* (Φ), una medida de la coherencia indica que el máximo producto punto entre las columnas debe estar entre 1 y la raíz del número de muestras (n), como se muestra en la ecuación 2.2[†].

$$\mu(A, \Phi) := \sqrt{n} \cdot \max_{1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n} |\langle A_i, \Phi_j \rangle|. \quad (2.2)$$

* *Compressive Sensing o en español, Muestreo Compresivo*

† Tomada de [7]

Figura 2: Submuestreo en Tiempo de una Señal y su Espectro en Frecuencia, Adaptada de [2]



Muestreo Aleatorio: Matemáticamente, el muestreo comprimido se modela como se muestra en la ecuación 2.3*, donde b representa los datos muestreados aleatoriamente, A es el patrón de muestreo y x_o es la señal real en tiempo continuo. Si se garantiza que x_o tiene una representación *Sparse* en algún dominio se puede definir como el producto de un diccionario de representación *Sparse* y un vector poco denso como se ve en la ecuación 2.4. Además, si hay incoherencia entre la matriz de muestreo y la base de representación *Sparse*, es posible recuperar la señal original después de realizar un muestreo compresivo, siendo éste el problema a resolver con esta técnica. Usualmente en sismica, las bases de representación de los datos adquiridos son: *Wavelet*, *Curvelet*, *Fourier* y *Radon* [2]. En este trabajo de investigación se utilizó *Curvelet* como diccionario de representación *Sparse* de los datos sísmicos.

$$b = Ax_o, \quad (2.3)$$

$$x_o = \Phi\alpha. \quad (2.4)$$

La matriz A realiza un submuestreo de los datos traza por traza, tomando un porcentaje de las muestras de forma aleatoria con distribución uniforme.

* Tomada de [2]

Reconstrucción: Reconstruir nuevamente la señal x_o puede formularse inicialmente resolviendo la regresión de mínimos cuadrados minimizando la norma l_2 del error medio cuadrático, como se muestra en la ecuación 2.5*, donde $\|u\|_2^2 = (\sum_i u_i^2)^{1/2}$ es la norma l_2 de u . Sin embargo, como el número de muestras de x_o es mayor que el de b , esta solución genera un sobreajuste en la regresión de mínimos cuadrados. Para evitar este problema se debe añadir una regularización como plantean en S. J. Kim, K. Koh, M. Lustig, S. Boyd y D. Gorinevsky[8] en la ecuación 2.6, donde $\|x_o\|_1 = \sum_i^n |x_i|$ es la norma l_1 de α y, λ es un parámetro de la regularización que se debe elegir apropiadamente, mayor que cero, y se muestra en la ecuación 2.7.

$$\|Ax_o - b\|_2^2 \quad , \quad (2.5)$$

$$\hat{\alpha} = \min_{\alpha} \|A\Phi\alpha - b\|_2^2 + \lambda\|\alpha\|_1 \quad , \quad (2.6)$$

$$\lambda = 0,1\|A^T b\|_{\infty} > 0. \quad (2.7)$$

Se han propuesto diferentes métodos para solucionar este problema, el más utilizado es la Proyección Gradiente. Mário A. T. Figueiredo, Robert D. Nowak y Stephen J. Wright en [9] diseñan un algoritmo en *MATLAB* de licencia libre llamado “GPSR-BB”[†] el cual es un algoritmo de optimización muy utilizado para resolver problemas indeterminados como es el caso del CS.

2.4. Medición del Error de Reconstrucción

Para cuantificar la calidad de una señal luego de haber pasado por un proceso se calcula la relación señal a ruido, SNR^{\ddagger} por sus siglas en Inglés. Felix J. Herrmann en [2] propone la ecuación 2.8 para hallar dicha medida, donde f es la señal original y f_{ρ} es la señal reconstruida.

$$SNR = -20\log \frac{\|f - f_{\rho}\|}{\|f\|} \quad (2.8)$$

* Tomada de [8]

† Disponible la descarga en <http://www.lx.it.pt/~mtf/GPSR/>

‡ Signal To Noise Ratio o en español, Relación Señal a Ruido

2.5. Sismógrafo “SEISMEX 16”

El equipo utilizado para la elaboración de esta investigación fue diseñado para aplicaciones de sísmica de refracción, sísmica de reflexión, análisis de onda superficial y *Downhole**. Las especificaciones técnicas del sismógrafo son:

- 16 canales.
- Rango dinámico de 110 dB.
- Rechazo en modo común de 100 dB.
- Fuente de alimentación de 12 [V] de DC.
- Comunicación vía USB con una Laptop gracias a su propio software de adquisición de datos para refracción sísmica.
- 17 geófonos (1 para cada canal y uno más para el *Trigger*) GS ONE† con frecuencia central de 10 [Hz].
- Cable para 16 canales con separación de 8 [m] entre receptores , con sus respectivos conectores.

En las Figura 3 se presentan las fotos de los elementos con los que cuenta el “SEISMEX 16”. Y en la Figura 4 se muestra el diagrama de flujo del software de adquisición para refracción sísmica. En el manual de usuario[3] se encuentran más detalles de las conexiones y el funcionamiento del sismógrafo.

* Ensayo enfocado fundamentalmente a detectar la velocidad de propagación de los ondas tangenciales en su trayectoria vertical a través de una masa de suelo.

† Geófono Fabricado por la empresa *Geospace Technologies*, Hoja técnica disponible en <http://www.geospacetechnology.com/wp-content/uploads/2012/10/592-03290-01GS-OneSpanish-Rev-A.pdf>

Figura 3: Equipo de Adquisición Sísmica “SEISMEX 16”



(a) Sismógrafo, Tomada de [3]

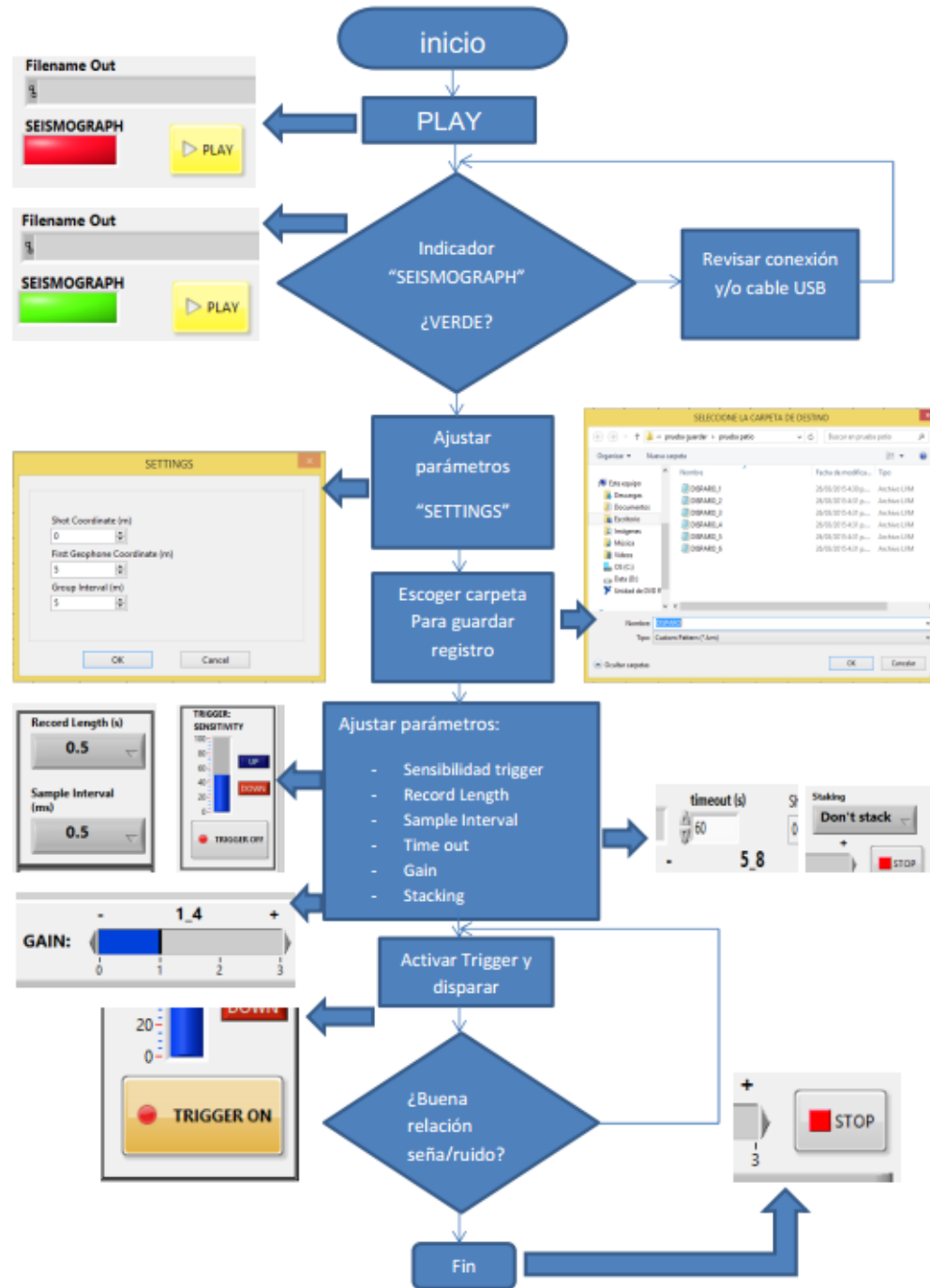


(b) Trigger, Tomada de [3]



(c) Conectores, Tomada de [3]

Figura 4: Diagrama de Flujo del Software Original del Sismógrafo, Tomada de [3]



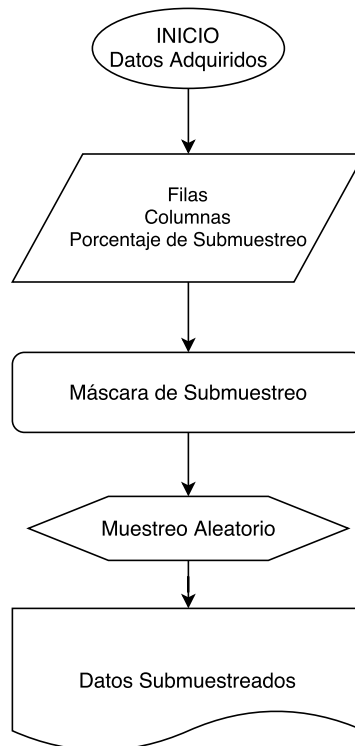
3 SUBMUESTREO, INTERFAZ Y RECONSTRUCCIÓN

En el presente capítulo se describe en detalle el algoritmo de submuestreo aleatorio en tiempo para realizar un muestreo compresivo, el diseño de la interfaz gráfica para acoplarla al software del sismógrafo “SEISMEX 16” y el proceso de reconstrucción de las trazas para evaluar si el muestreo compresivo en tiempo es viable para el desarrollo de futuras investigaciones en el grupo CPS.

3.1. Submuestreo Aleatorio en Tiempo

Se diseñó el algoritmo que tome los datos captados por el equipo “SEISMEX 16”, los submuestree aleatoriamente en tiempo y genere un archivo de salida. La Figura 5 muestra el diagrama de flujo de los datos para lograr un submuestreo aleatorio en tiempo, cuyas etapas serán explicadas a continuación.

Figura 5: Diagrama de flujo de algoritmo de submuestreo de trazas

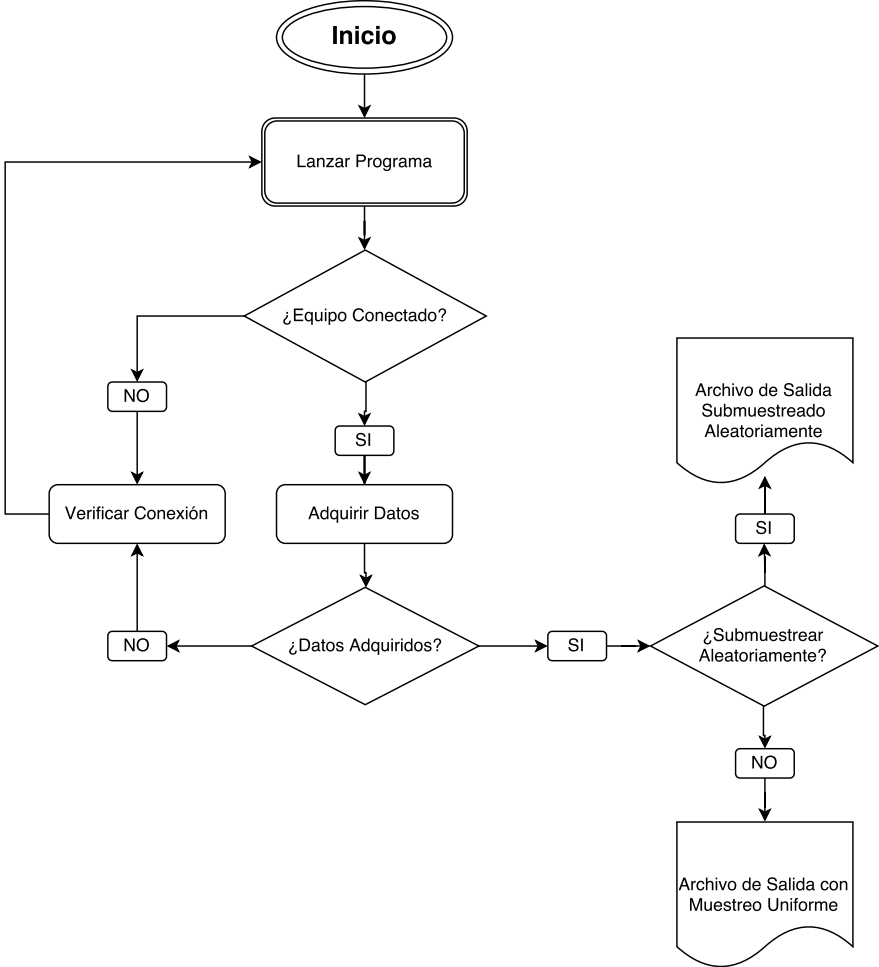


La primera etapa del algoritmo consiste en la adquisición de datos con el equipo, de los cuales se extraen variables importantes como el número de filas (corresponde

al número de muestras) y columnas (corresponde al número de trazas). En esta parte se le pide al usuario el porcentaje de muestras que desee conservar al momento de realizar el submuestreo, previamente el usuario conoce le número de muestras y el intervalo de muestreo con el que fueron adquiridas. Seguido a esto se crea una máscara de submuestreo con ayuda de un ciclo de la siguiente manera. Primero se construye un vector de números aleatorios que indican las posiciones a substraer su valor. Segundo, se crea un vector de unos y ceros con las posiciones obtenidas anteriormente, el cual constituye una columna de la máscara de submuestreo. Y por último se guarda cada vector aleatorio de unos y ceros en diferentes columnas, para así obtener una matriz de submuestreo aleatorio en tiempo y diferente para cada traza.

Para obtener el archivo de salida se aplica la matriz de muestreo sobre los datos originales, obteniendo las trazas muestreadas aleatoriamente en tiempo.

Figura 6: Diagrama de flujo de Interfaz Gráfica



3.2. Diseño de la Interfaz Gráfica

Se creó una interfaz gráfica que se acopla al software del equipo y todas sus funciones. La *GUI* se diseña para que tenga tres etapas al momento de ejecutarse. Una primera etapa lanza el programa original del equipo de adquisición “SEISMEX 16”, una segunda etapa se encarga de tomar los datos en campo y submuestrear, para luego guardar el archivo de salida resultante en su ubicación de preferencia, como lo muestra el diagrama de flujo de la Figura 6.

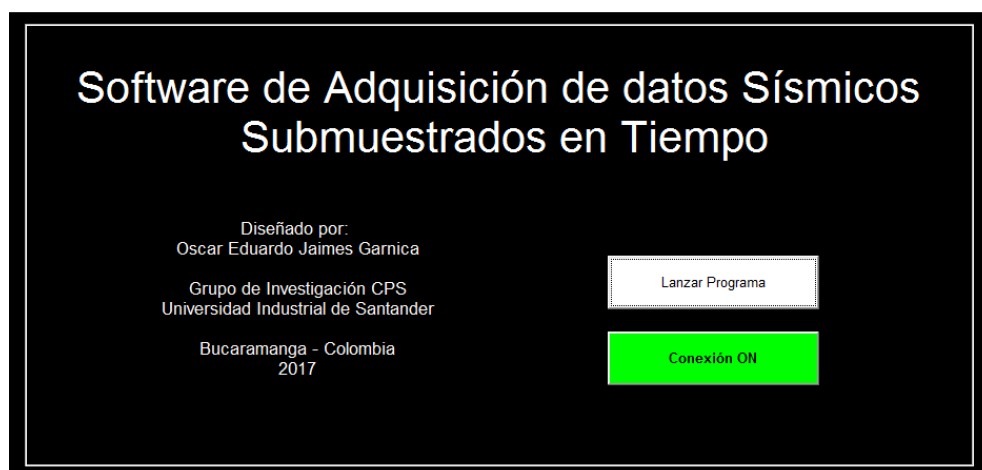
En la Figura 7 se ve que la primera etapa la *GUI* consta de:

- Botón “Lanzar Programa” que se encarga de ejecutar el software del equipo “SEISMEX 16” para realizar la adquisición de los datos.
- Indicador de conexión que cambia su estado de “OFF”(Apagado) a “ON”(Encendido) cuando el llamado al software del equipo “SEISMEX 16” se hace correctamente.

Luego de dar clic en el botón de lanzar el programa, la *GUI* nos conduce a la segunda etapa, que se realiza sobre el software original del equipo y en la cual se adquieren los datos. En la Figura 8 se muestra el aspecto del ejecutable. En el se puede modificar el tiempo de grabación, el intervalo de muestreo y la ganancia de los geófonos agrupados.

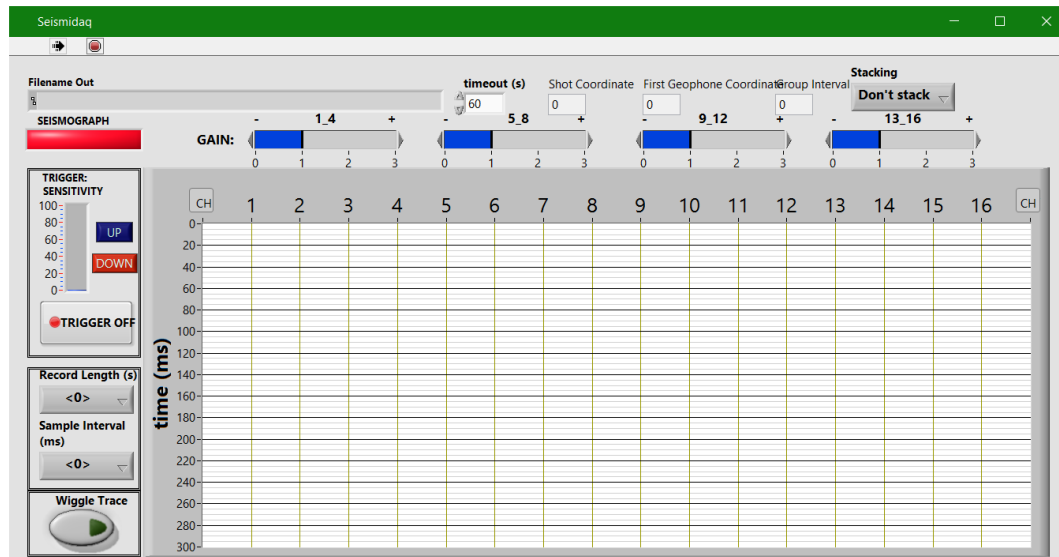
Una vez capturados los datos de la adquisición se despliega una *GUI* dando inicio a la tercera fase, donde se muestran las opciones de submuestreo aleatorio en tiempo, así como la selección de la ubicación del archivo de salida, entre otras posibilidades que se explicarán a continuación.

Figura 7: Interfaz para Lanzar el Programa: Estado Final



Para esta etapa se crea una *GUI* de aspecto variable (Ver Figura 9, de acuerdo a la preferencia del usuario, y consta principalmente de:

Figura 8: Interfaz Gráfica del Software del Equipo “SEISMEX 16”



- Botón “Buscar Archivo” permite al usuario ubicar y seleccionar los datos adquiridos en la etapa 2 para su submuestreo aleatorio.
- Visualización de la dirección del archivo, seleccionado por el usuario, para corroborar que es el dato deseado.
- Indicador de captura de datos que cambia su estado de “Error en Captura de Datos” a “Captura de Datos OK” para confirmar que el formato del archivo es el correcto.
- Selección del tipo de muestreo a realizar, ya sea dejar los datos muestreados uniformemente, ó, submuestrearlos aleatoriamente.
- Ingreso del porcentaje de muestras que se desean conservar.
- Visualización del tiempo de grabación de los datos utilizados de la adquisición convencional.
- Visualización del intervalo de muestreo de los datos de la adquisición convencional.
- Visualización del número de muestras obtenidas en los datos de la adquisición convencional.
- Botón “Iniciar” para comenzar el proceso de submuestreo aleatorio.
- Botón “Reset” para restablecer todos los valores ingresados.
- Ventanas emergentes con mensajes que brindan información sobre el éxito del proceso y sus pasos a seguir (Ver Figura 10).

Figura 9: Cambio de la Interfaz al realizar Submuestreo Aleatorio

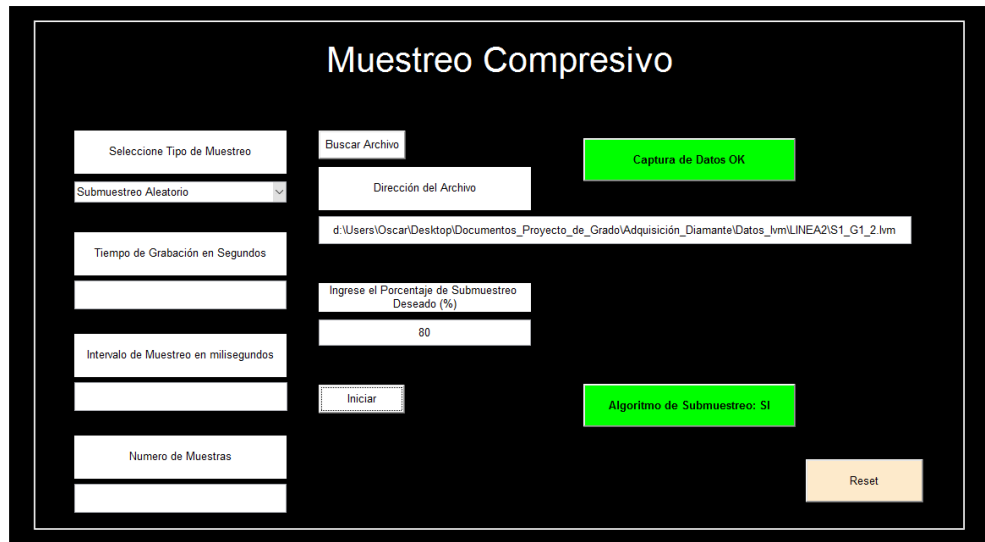
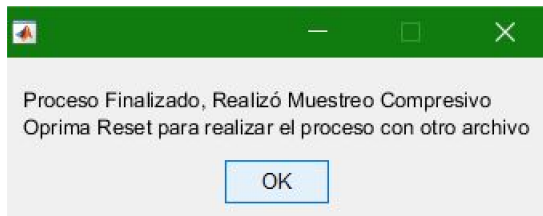
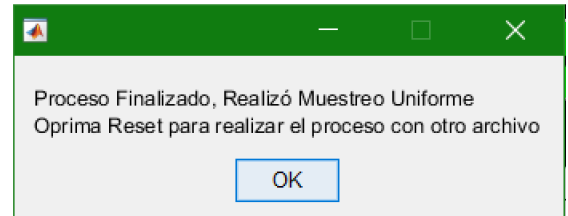


Figura 10: Ventanas Emergentes con Mensajes para el Usuario



(a) Mensaje de Finalización 1



(b) Mensaje de Finalización 2

3.3. Reconstrucción de Trazas

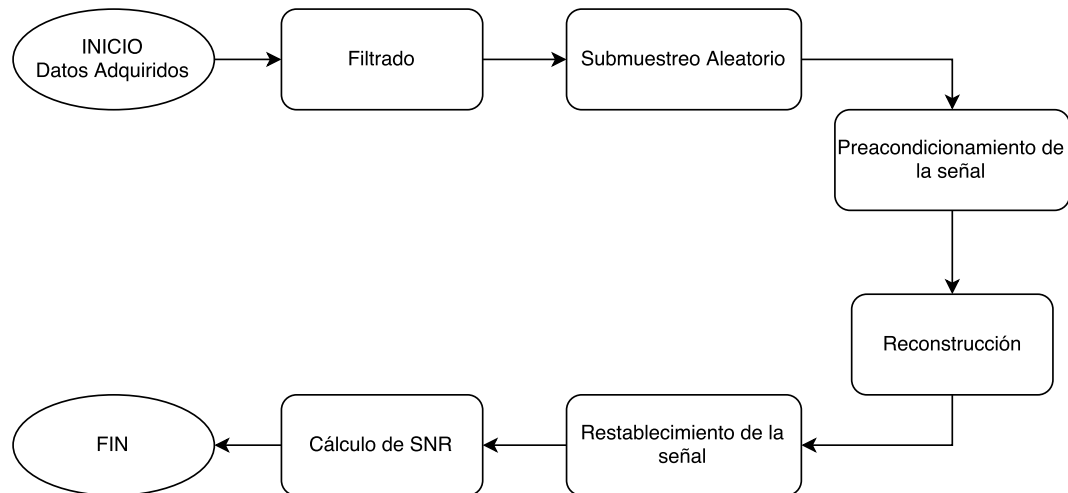
En esta sección se explica el proceso utilizado para evaluar el muestreo compresivo, partiendo de la adquisición de los datos hasta llegar al cálculo del error.

En la Figura 11 se aprecia el diagrama de flujo con el que se trataron los datos adquiridos para obtener una reconstrucción, calcular la SNR y cuantificar la calidad de los datos reconstruidos con respecto a los datos de referencia adquiridos de manera convencional. A continuación se describe cada parte de este flujo con más detalle.

Adquisición: Como primer paso se realiza una adquisición de los datos originales con el sismógrafo “SEISMEX 16”. Estos datos están muestreados uniformemente.

Filtrado: Después de adquirir los datos se busca obtener el mejor filtrado posible y eliminar componentes frecuenciales que no contengan información valiosa sobre el subsuelo analizado así como el ruido a baja frecuencia, ya que los geófo-

Figura 11: Diagrama de Flujo del Proceso de Reconstrucción de Trazas



nos del equipo, según su hoja técnica, captan frecuencias desde los 10 [Hz] hasta los 50 [Hz]. El filtro digital más usado para datos sísmicos es de tipo trapezoidal, comúnmente llamado “Ormsby”*. Estos se toman como referencia para futuras comparaciones de resultados.

Submuestreo Aleatorio: Continuando con el proceso, se efectúa el submuestreo aleatorio explicado en la sección 3.1 de esta tesis para obtener las trazas submuestreadas aleatoriamente.

Preacondicionamiento de los datos: Una vez filtrados y submuestreados los datos adquiridos se busca preacondicionar la señal corrigiendo las amplitudes de los valores que en el dominio tiempo demoraron más en registrarse y contienen información de las capas más profundas del subsuelo como se expone en la sección 2.1.2.

Reconstrucción: Luego del submuestreo aleatorio se elabora una reconstrucción utilizando el algoritmo “GPRS-BB” expuesto en la sección 2.2.1.

Cálculo de SNR: Finalmente con los datos reconstruidos se mide un *SNR* con la ecuación 2.7 expuesta en la sección 2.2.2 y se evalúan los resultados de la ejecución del código de reconstrucción.

* Función para *MATLAB* disponible en <https://es.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/15674-seislab-3-01?focused=5148577&tab=function>

4 PRUEBAS Y RESULTADOS

Al terminar la etapa de diseño se realizan pruebas para verificar el correcto funcionamiento de la parte gráfica y la evaluación del muestreo compresivo. En este capítulo se describe el desarrollo de estas pruebas y sus resultados, para su posterior análisis, con el fin de obtener conclusiones de los objetivos de esta investigación.

Los datos utilizados para las pruebas que se presentan a continuación, fueron adquiridos por el grupo de investigación en el diamante de softbol del campus universitario de la Universidad Industrial de Santander como prueba del sismógrafo "SEISMEX 16". Se seleccionan 4 *ghaters* para mostrar los resultados. A continuación se expone en detalle todo el tratamiento y procesado que se realiza hasta finalizar la reconstrucción.

Los 4 disparos estudiados son:

- S1 - G1 que corresponde al disparo 1 de la línea 1.
- S2 - G4 que corresponde al disparo 4 de la línea 2.
- S3 - G8 que corresponde al disparo 8 de la línea 3.
- S4 - G12 que corresponde al disparo 12 de la línea 4.

La adquisición total abarcó una distancia de 384 metros y se realizaron 20 disparos, a una profundidad máxima de 48 metros.

Las características de los 4 disparos tomados son: Tiempo de grabación de 1 segundo, Intervalo de muestreo de 3 milisegundos, Sensibilidad del Trigger: 50, Ganancia 1 para los 16 canales.

4.1. Datos Iniciales

Los datos iniciales corresponden a los gathers 1,2,3,y 4 de la adquisición de la línea 2 realizada en el diamante de softbol UIS. A estos disparos se les aplica un filtro de ancho de banda de 6 - 40 [Hz] porque el geófono capta información del subsuelo en frecuencias comprendidas entre 10 [Hz] y 50 [Hz] y con esto se eliminan saturaciones presentes en algunas trazas, debido al ruido en el lugar de la adquisición, tales como: personas caminando alrededor del lugar, corrientes de aire, vehículos, etc. Estos datos se toman como referencia para obtener las mediciones del error en la reconstrucción. En la Figura 12 se aprecia el efecto del filtrado para uno de los disparos. En las Figuras 13-16 se aprecia una representación de los 4 disparos utilizados para las pruebas.

Figura 12: Comparación de Trazas de S3 - G8 Línea 2 cuando se aplica el filtro de 6 - 40 [Hz], (a) Todas las Trazas. (b) Traza 9.

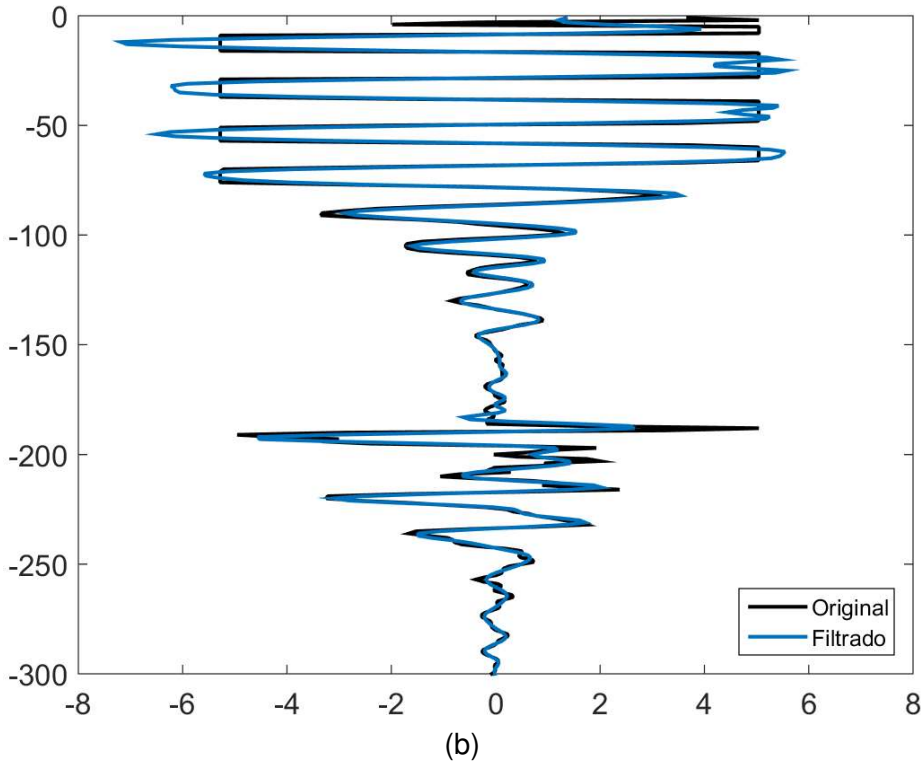
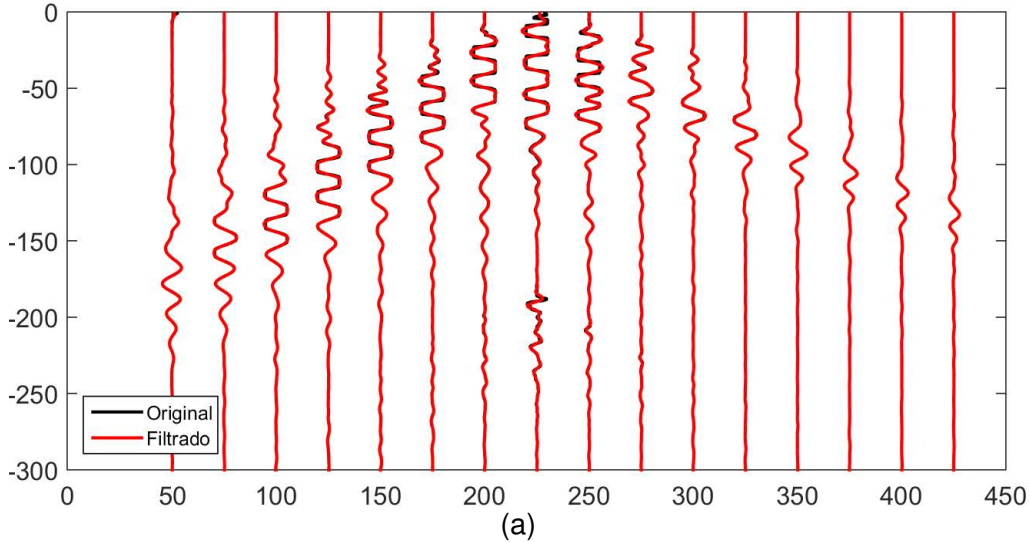


Figura 13: Datos Iniciales de S1 - G1 Línea 2

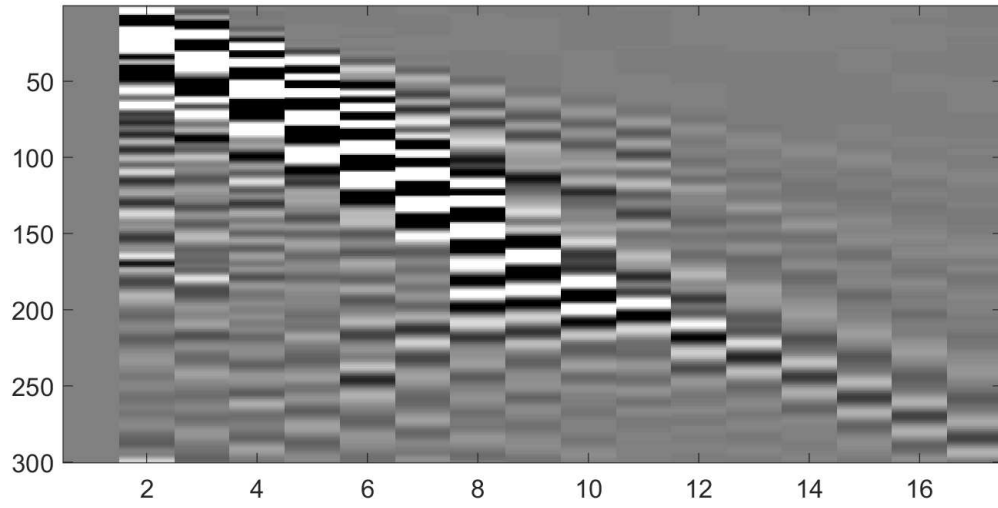


Figura 14: Datos Iniciales de S2 - G4 Línea 2

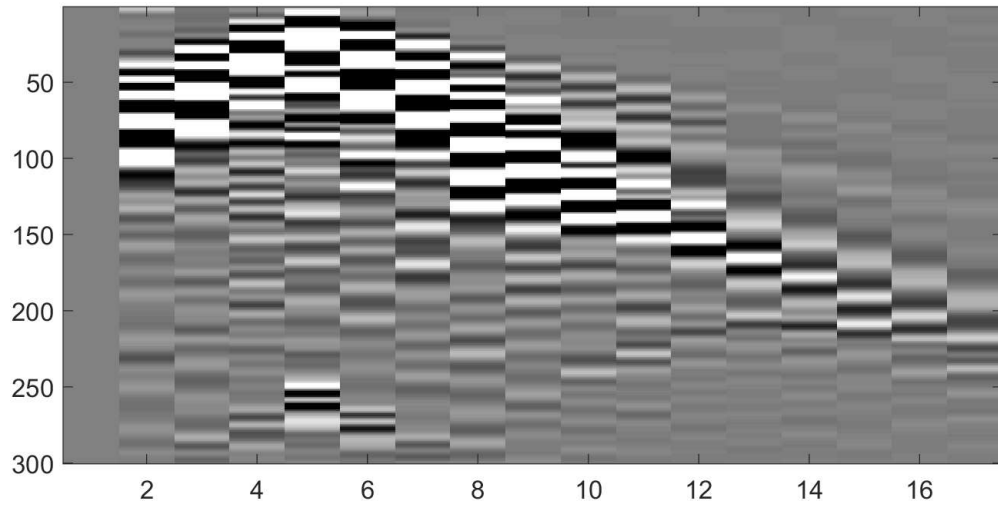


Figura 15: Datos Iniciales de S3 - G8 Línea 2

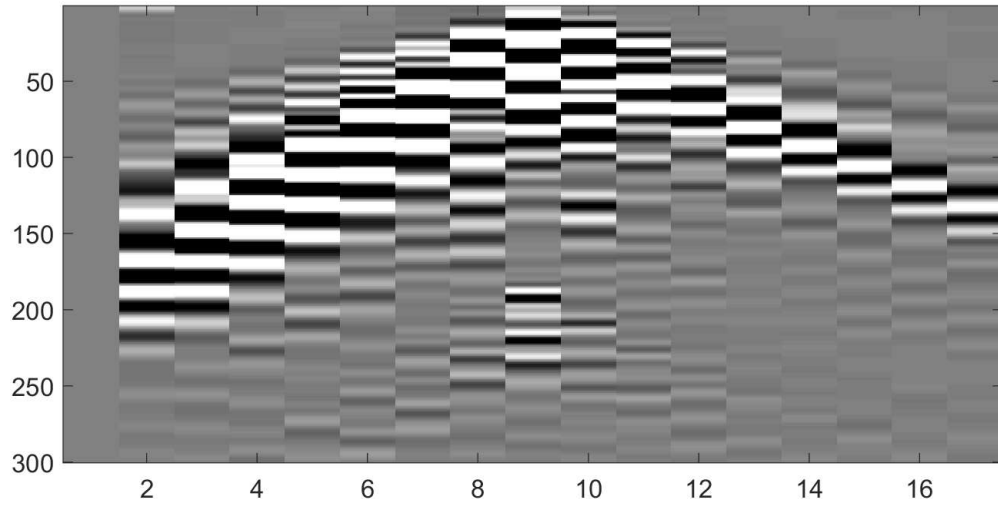
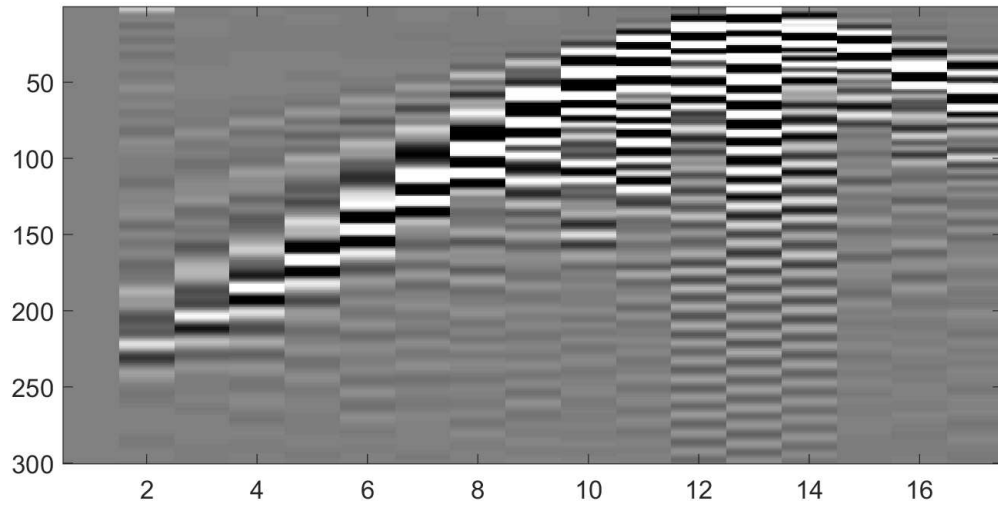


Figura 16: Datos Iniciales de S4 - G12 Línea 2

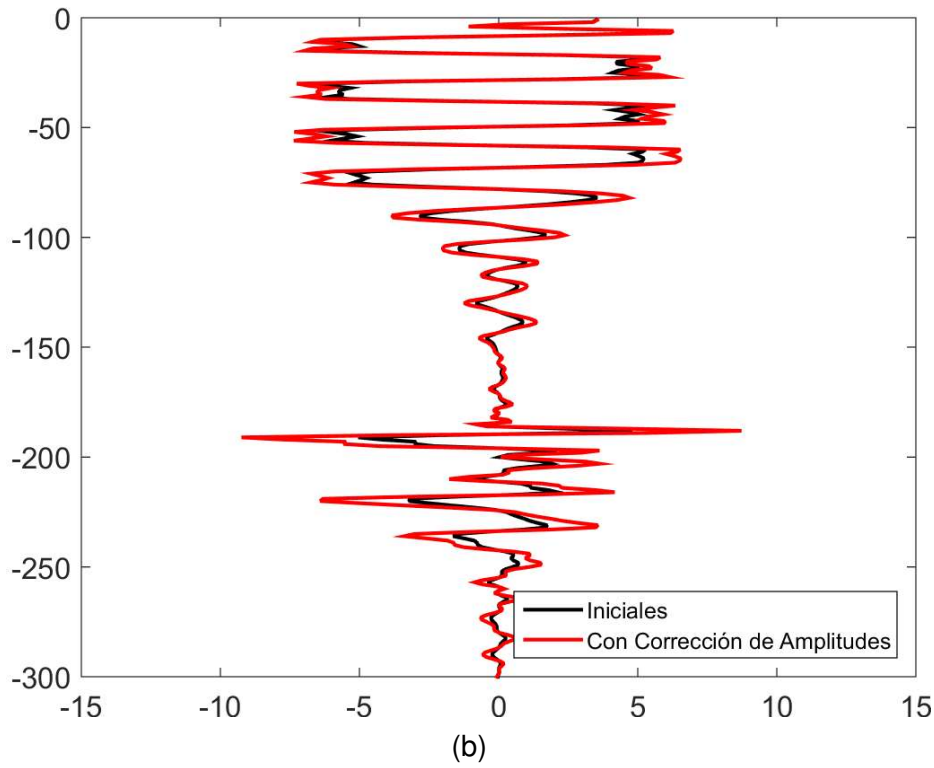
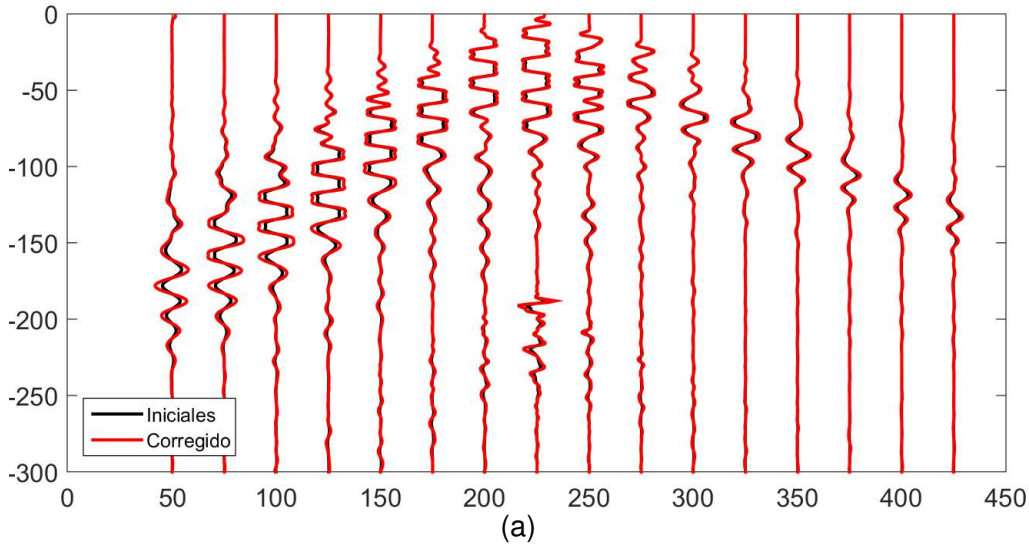


4.2. Preacondicionamiento de los Datos

De acuerdo a la teoría expuesta en la sección 2.1.2 de este informe, se debe encontrar un valor del exponente de la ecuación de ganancia de tal manera que la energía de los eventos más lejanos en tiempo tengan más peso para que no sean omitidos en la reconstrucción por su baja amplitud. Por lo tanto se varía el valor del exponente de la curva de ganancia de 0.1 a 1.3 con pasos de 0.2 y se realiza una valoración cualitativa de los cambios en las trazas con respecto a los datos iniciales para determinar la magnitud correcta de los datos.

En la Figura 17 se observa la comparación de las trazas cuando se aplica sobre las trazas una curva de ganancia con exponente igual a 0.9. De acuerdo a las comparaciones realizadas se decide que el valor más adecuado para el exponente es el de 0.9 ya que la parte superior (Refracción de las primeras capas) mantiene una amplitud muy similar a la original pero para la parte inferior (Refracción de las últimas capas) se obtiene un aumento en la amplitud que refuerza la posibilidad de descubrir las características del subsuelo a mayor profundidad.

Figura 17: Comparación de Trazas de S3 - G8 Línea 2 luego del precondicionamiento, (a) Todas las Trazas. (b) Traza 9.



4.3. Submuestreo Aleatorio

El muestreo compresivo que se realiza en esta investigación se basa en un submuestreo aleatorio en tiempo para los datos que se obtienen en campo, donde se busca probar, con 4 diferentes submuestreos, los resultados del algoritmo de reconstrucción. Los porcentajes de muestras conservadas escogidos son: 50 %, 60 %, 70 %, y 80 %. En las Figuras 18 y 19 se aprecia el submuestreo conservando el 80 % de los datos para un disparo.

Partiendo de la teoría expuesta en capítulo 2, este submuestreo garantizará que se pueda realizar una reconstrucción puesto que la señal es *Sparse* en el dominio del tiempo y se consigue que la matriz de muestreo utilizada tenga baja correlación en cada una de sus trazas con la base de representación.

Figura 18: Datos de S3 - G8 Línea 2 luego del submuestreo conservando el 80 % de las muestras

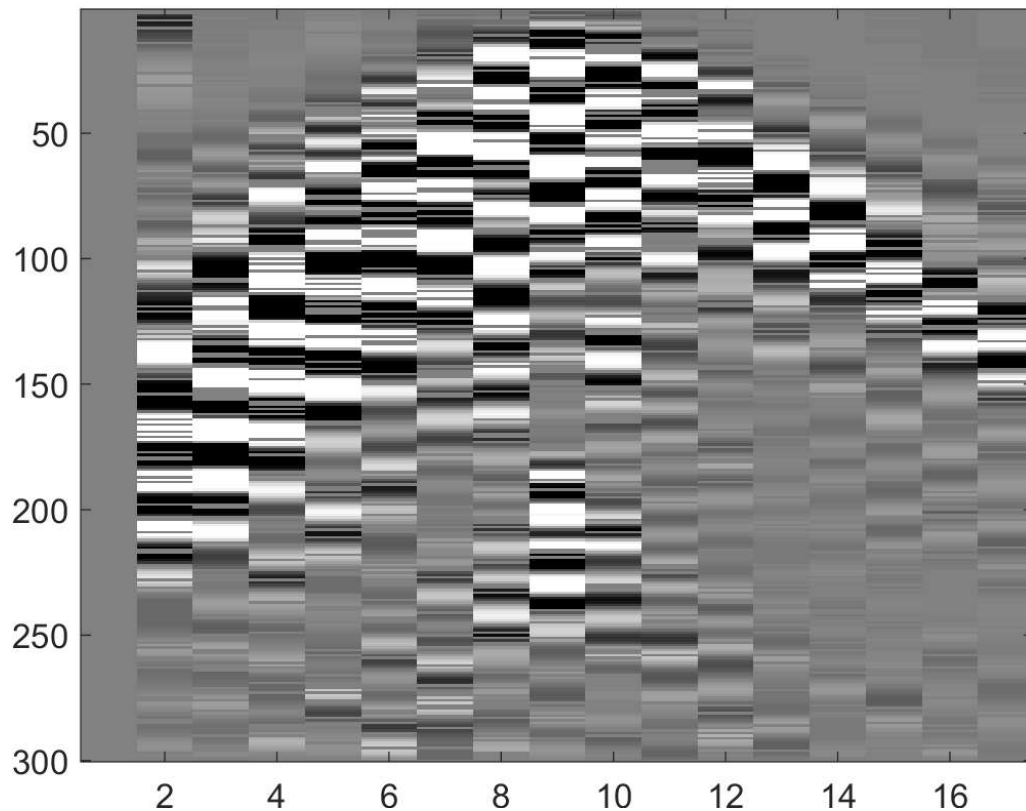
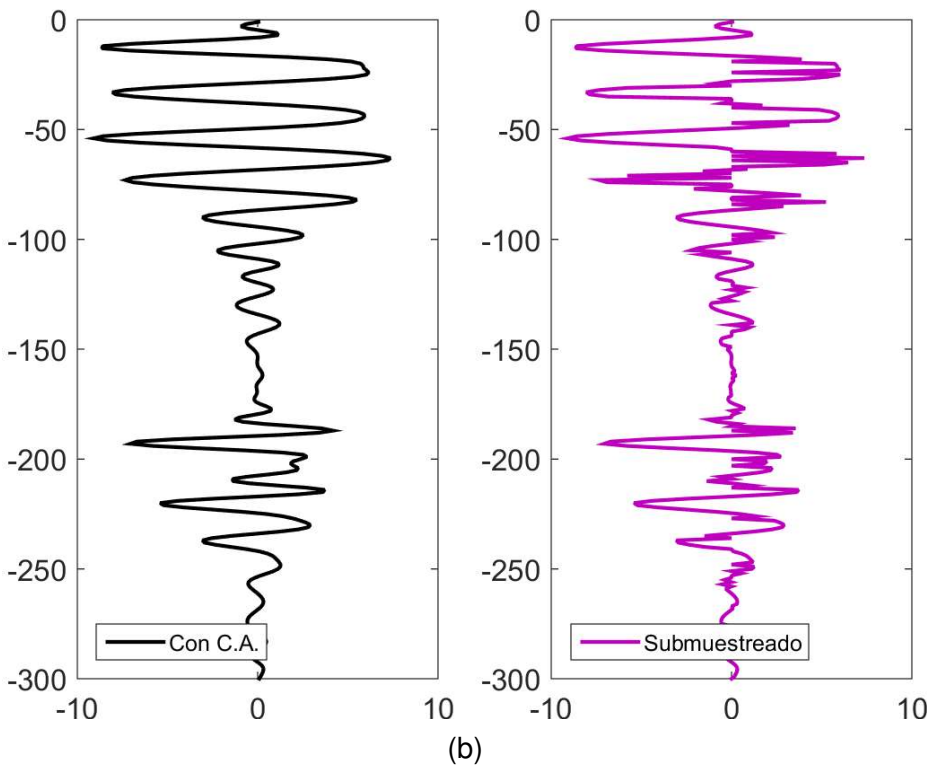
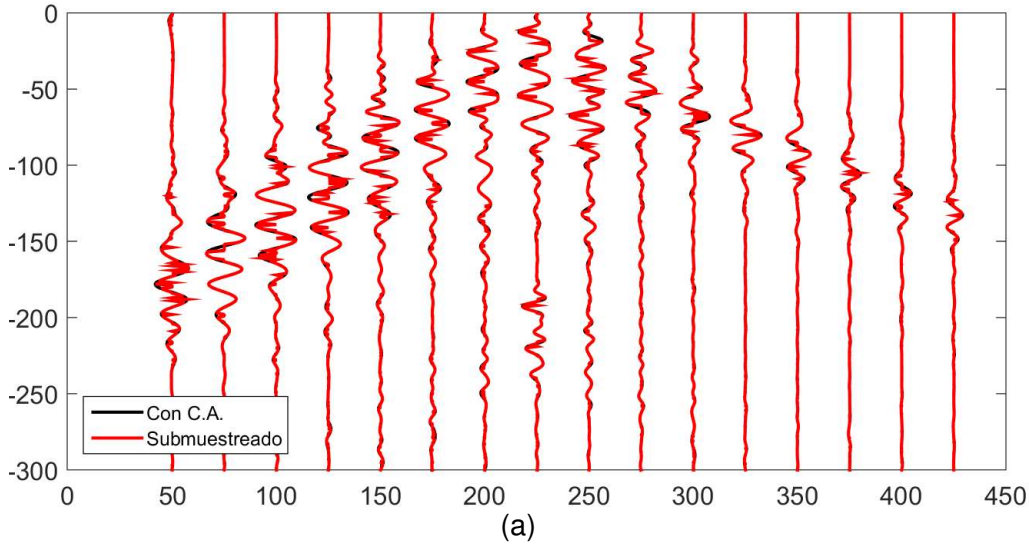


Figura 19: Comparación de Trazas de S3 - G8 Línea 2 luego del submuestreo conservando el 80 % de las muestras, (a) Todas las Trazas (b) Traza 9 original y submuestreada conservando el 80 % de las muestras.



4.4. Reconstrucción

Se realiza una reconstrucción de los datos utilizando el algoritmo “GPSR-BB” que fue desarrollado para resolver problemas de reconstrucción de señales *Sparse*.

La función “GPSR-BB” exige en sus variables de entrada un “ τ ” (en este informe a sus futuras menciones se le llamará lambda, “ λ ”) que actúa como un parámetro de la función objetivo. El algoritmo de reconstrucción busca minimizar la función objetivo (ver Ecuación 2.6) , utilizando la proyección gradiente para ello.

Como primer paso para obtener los mejores resultados se debe encontrar el valor adecuado para “Lambda” los cuales son diferentes para cada porcentaje de submuestreo. Se cuenta con 4 disparos conservando el 50 %, 60 %, 70 % y 80 % de las muestras, de modo que se obtendrán 4 valores de “Lambda” los cuales se seleccionan de acuerdo al promedio de la mayor medición de *SNR* de los disparos de control seleccionados. Para nuestras pruebas la magnitud de “Lambda” se obtendrá de manera experimental, variando su valor para encontrar el punto donde el *SNR* es máximo para cada porcentaje de submuestreo y con ellos calcular el promedio de los 4 disparos.

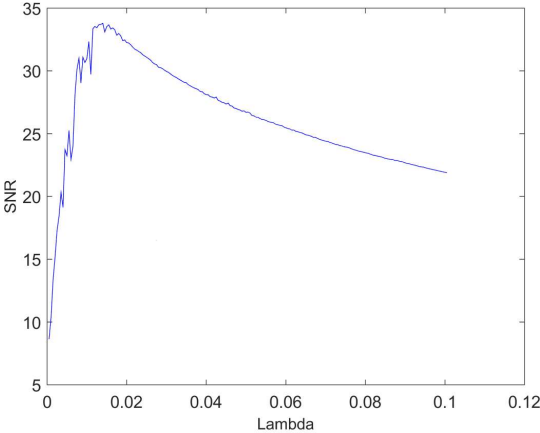
En la Figura 20 se observan las mediciones del *SNR* de las reconstrucciones al variar Lambda de 0.0005 hasta 0.1005 con pasos de 0.0005 para los disparos submuestreados conservando el 80 % de los datos. Luego de encontrar donde el *SNR* alcanzaba un valor máximo para cada disparo con un determinado porcentaje de submuestreo en las gráficas anteriormente mencionadas, en la Tabla 1 se plasma el “Lambda” promedio de cada uno ellos. Estos valores promedio son los que se utilizaron para todas las reconstrucciones realizadas en el proyecto.

Tabla 1: Tabla de Valores Máximos de Lambda para cada Dato Submuestreado

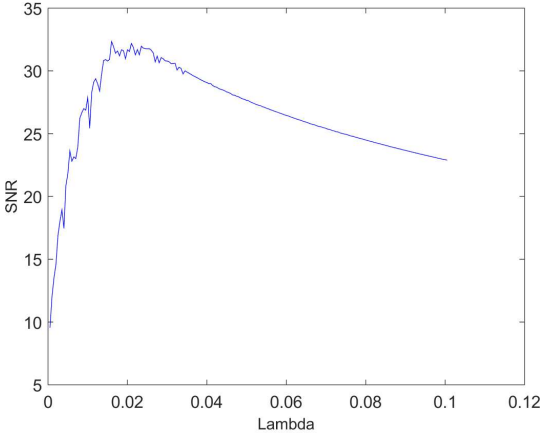
Porcentaje	S1 - G1	S2 - G4	S3 - G8	S4 - G12	Lambda Prom
50 %	0.08	0.045	0.055	0.02	0.05
60 %	0.036	0.058	0.026	0.04	0.04
70 %	0.015	0.021	0.043	0.021	0.025
80 %	0.013	0.021	0.012	0.014	0.015

Teniendo un valor de “Lambda” para cada porcentaje de submuestreo se reconstruyen los datos y se revierte la corrección de amplitudes hecha en la sección 4.2.3 para comparar los resultados. De nuevo, para simplificar la cantidad de figuras se toma solo el resultado de un solo disparo con el 80 % de muestras conservadas luego del submuestreo. En las Figuras 21 - 24 se aprecia la reconstrucción de los datos y la diferencia con los iniciales. En las Figuras 25 - 26 se modifica la representación para poder visualizar la diferencia entre las trazas reconstruidas

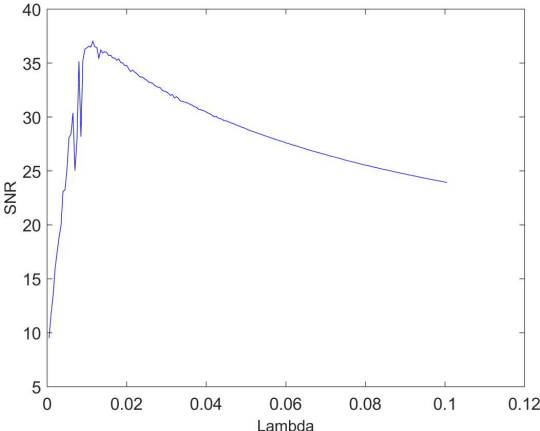
Figura 20: Cálculo de Lambda para el 80% de las Muestras, (a) S1 - G1 Línea 2. (b) S2 - G4 Línea 2. (c) S3 - G8 Línea 2. (d) S4 - G12 Línea 2.



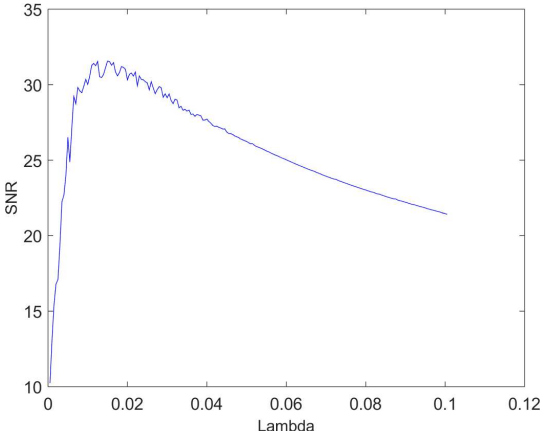
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 21: Datos Reconstruidos con el 80% de Muestras de S3 - G8 Línea 2

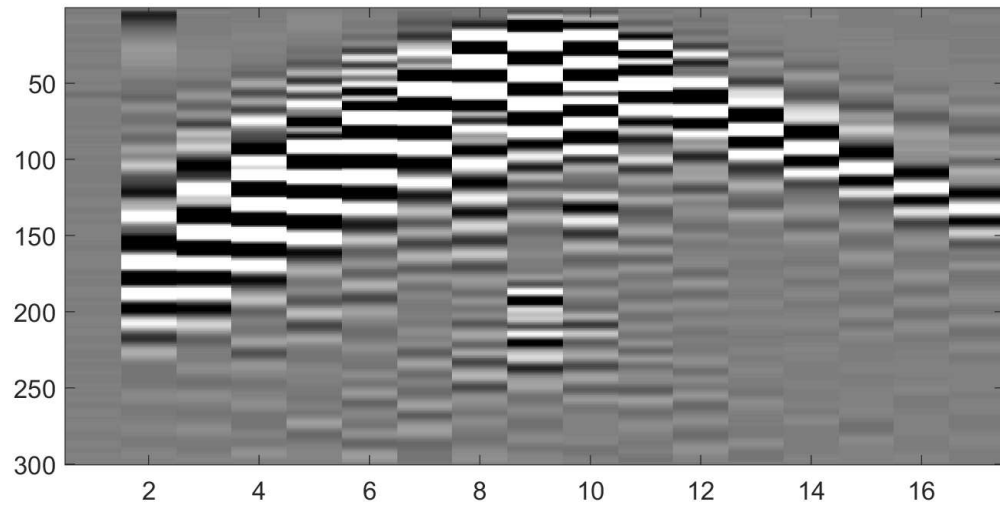


Figura 22: Diferencia de Datos Reconstruidos con el 80% de Muestras de S3 - G8 Línea 2

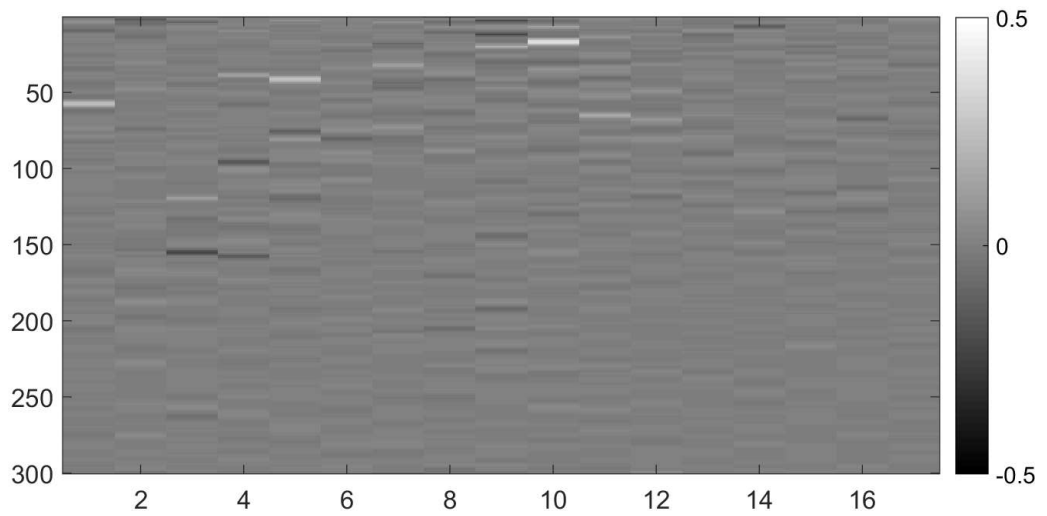


Figura 23: Datos Reconstruidos con el 50% de Muestras de S3 - G8 Línea 2

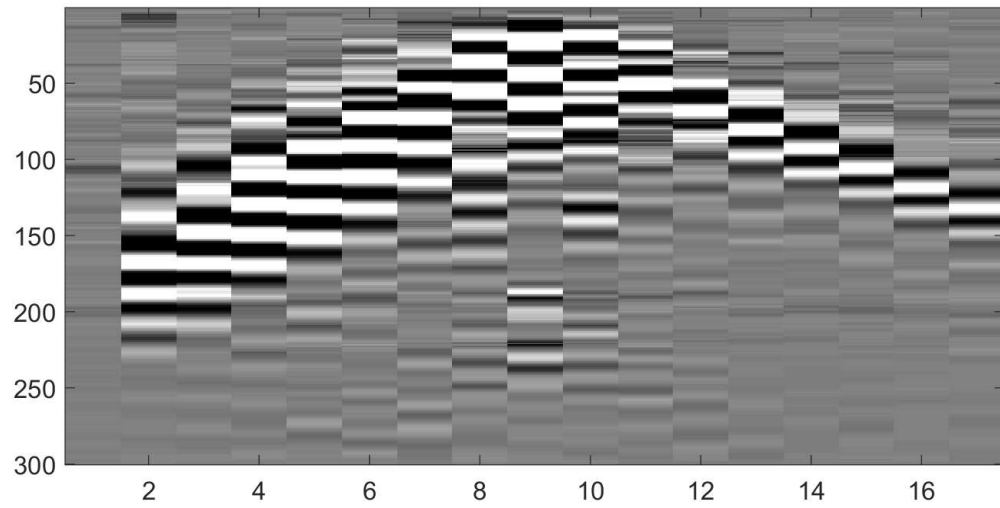


Figura 24: Diferencia de Datos Reconstruidos con el 50% de Muestras de S3 - G8 Línea 2

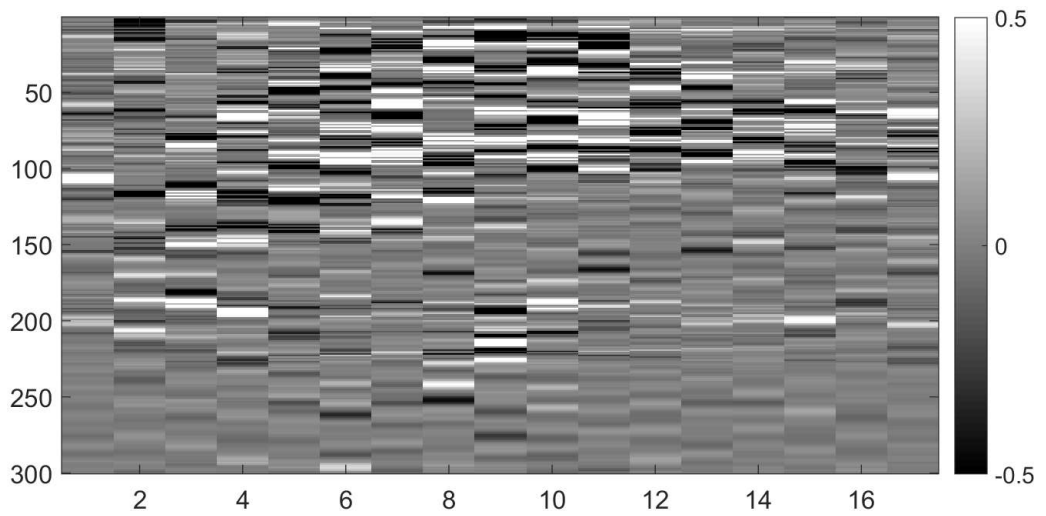


Figura 25: Comparación de Trazas de S3 - G8 Línea 2 luego de la reconstrucción con el 80% de las muestras, (a) Todas las Trazas. (b) Traza 9.

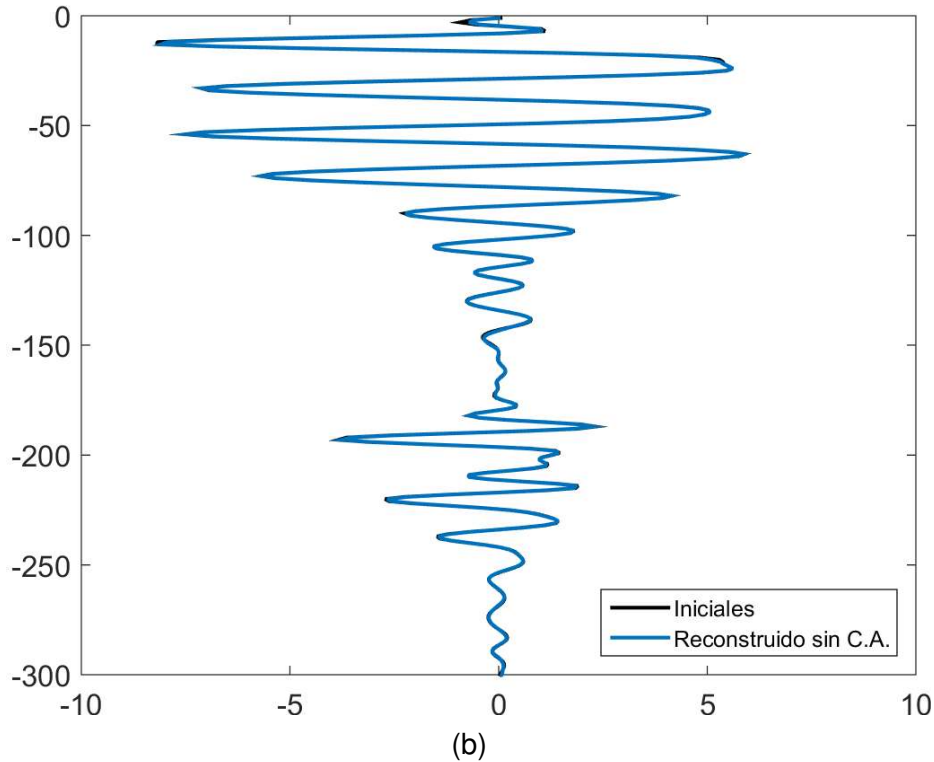
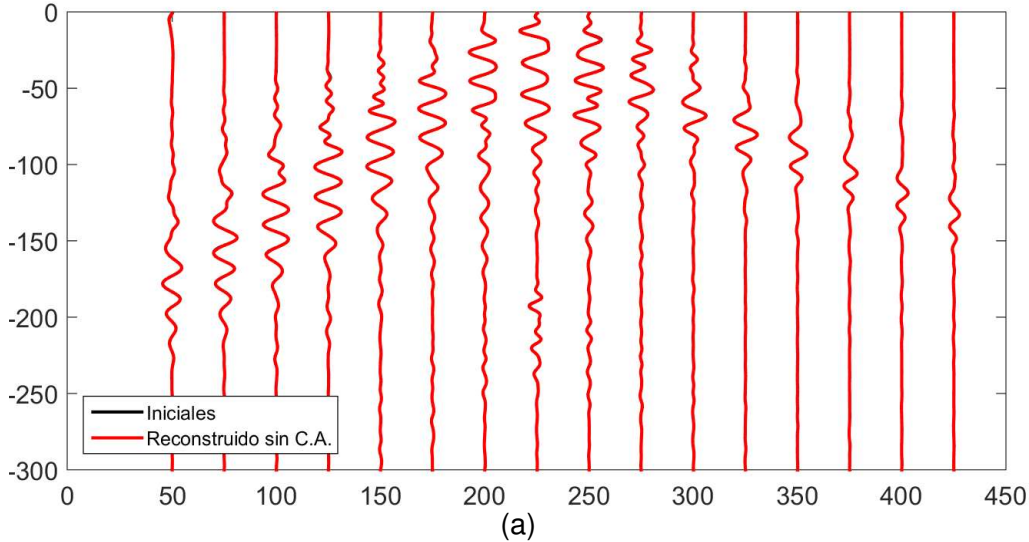
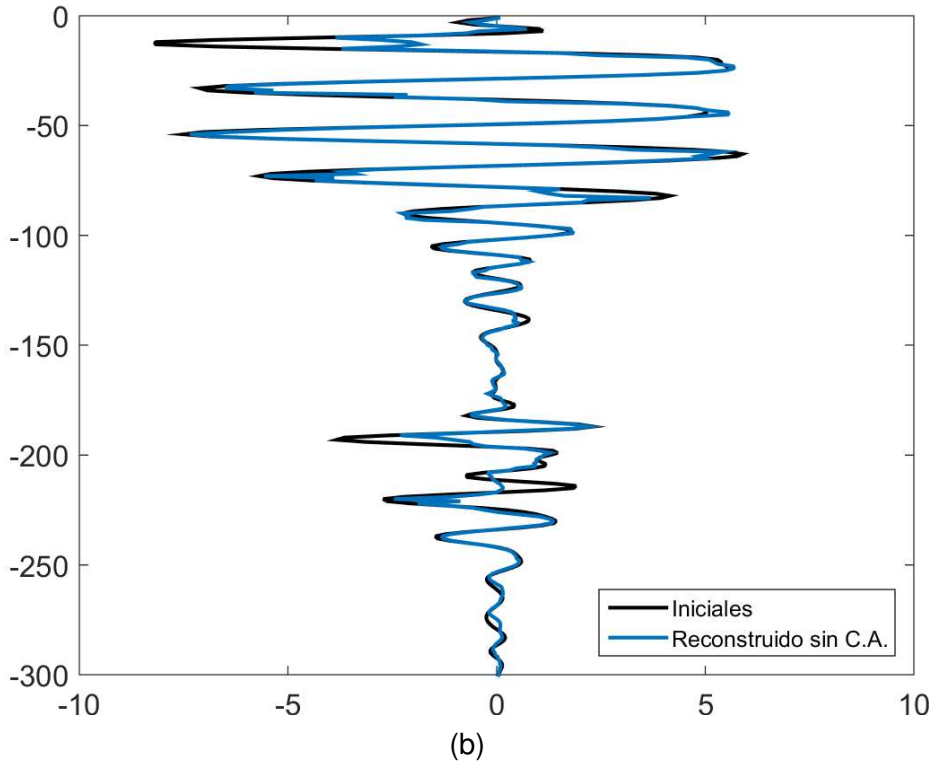
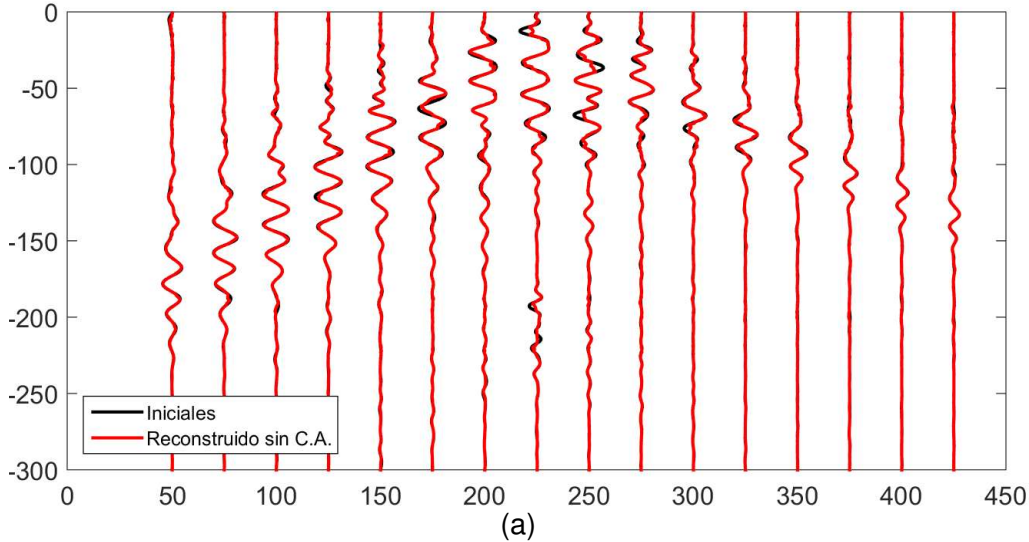


Figura 26: Comparación de Trazas de S3 - G8 Línea 2 luego de la reconstrucción con el 50% de las muestras, (a) Todas las Trazas. (b) Traza 9.



4.5. Medición del Error de Reconstrucción

Como último paso se valora la calidad de cada reconstrucción por medio de la *SNR*, el cual permite tener una medida cuantitativa de la calidad del dato reconstruido permitiendo obtener conclusiones de esta investigación. En la Tabla 2 se ven los resultados obtenidos al aplicar el algoritmo de reconstrucción, el valor del exponente de la curva de ganancia para la corrección de amplitudes es de 0.9 y el valor de “Lambda” dependiendo del porcentaje de submuestreo que se seleccionó en la sección anterior y es el óptimo para cada caso.

Tabla 2: Tabla de Valores de *SNR* [dB] de la reconstrucción de todos los disparos de la prueba, usando la Ecuación 2.8

Porcentaje	S1 - G1	S2 - G4	S3 - G8	S4 - G12
50 %	9.22	9.44	11.47	8.48
60 %	16.32	14.45	18.30	13.13
70 %	23.15	22.00	24.72	18.05
80 %	30.52	35.20	36.29	30.25

5 CONCLUSIONES

- Se implementó un algoritmo de submuestreo aleatorio para realizar muestreo compresivo en tiempo sobre los datos adquiridos con el equipo “SEISMEX 16”.
- Se diseñó e implementó una interfaz gráfica para el acople entre el algoritmo de submuestreo y el software propio del sismógrafo, permitiéndole al usuario controlar todas sus funciones.
- Se reconstruyeron las trazas adquiridas con el equipo y se obtuvo una medición del error de reconstrucción luego de aplicar un muestreo compresivo en tiempo.
- De las mediciones del error de reconstrucción se puede afirmar que el muestreo compresivo en tiempo es una alternativa viable para la adquisición sísmica pues los resultados obtenidos en esta investigación evidencian que para varios porcentajes de submuestreo se logra una buena reconstrucción, lo que se traduce en menos capacidad de almacenamiento necesaria para los datos y con ello un ahorro de dinero para la industria.

6 OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Observaciones

- El cálculo del “Lambda” de la función objetivo es muy importante puesto que la mala selección de este parámetro no arroja resultados adecuados en las reconstrucciones. También se observa en esta investigación que a medida que se aumenta el porcentaje de submuestreo, el valor de “Lambda” decrece.
- A medida que se aumenta el porcentaje de muestras conservadas se obtienen mejores resultados en la reconstrucción, sin embargo, para un submuestreo donde se conservan solo la mitad de los datos se obtienen buenos resultados en la reconstrucción.

6.2. Recomendaciones

Se propone el uso del algoritmo de submuestreo para muestreo compresivo en tiempo utilizado en esta investigación para la adquisición de datos de futuros proyectos de investigación del grupo CPS en esta rama porque permite la reducción del tamaño de los datos obteniendo buenos resultados. Además se recomienda realizar un procesado mas elaborado de los datos luego de aplicar muestreo compresivo en tiempo.

REFERENCIAS

- [1] Onajite Enwenode, *Seismic Data Analysis Techniques in Hydrocarbon Exploration*. Elsevier, 2013.
- [2] Herrmann Felix J, "Randomized sampling and sparsity: Getting more information from fewer samples," *Geophysics*, vol. 75, no. 6, pp. WB173–WB187, 2010.
- [3] 3d Subsuelo, *Manual de Usuario SEISMEX 16*.
- [4] Yilmaz Ozdogan and Doherty Stephen M., *Seismic Data Processing (Investigations in Geophysics, Vol 2)*. Society of Exploration, 1987.
- [5] Candes E. J. and Wakin M. B., "An introduction to compressive sampling," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 25, pp. 21–30, Mar. 2008.
- [6] Donoho D. L., "Compressed sensing," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, pp. 1289–1306, Apr. 2006.
- [7] Tang Wen, Ma Jianwei, and Herrmann Felix J, "Optimized compressed sensing for curvelet-based seismic data reconstruction," *preprint*, vol. 280, p. 1928, 2009.
- [8] Kim S. J., Koh K., Lustig M., Boyd S., and Gorinevsky D., "An interior-point method for large-scale ℓ_1 -regularized least squares," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 1, pp. 606–617, Dec. 2007.
- [9] Figueiredo M. A. T., Nowak R. D., and Wright S. J., "Gradient projection for sparse reconstruction: Application to compressed sensing and other inverse problems," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 1, pp. 586–597, Dec. 2007.
- [10] CMath Nicholas A Alexander, *Seismic Analysis (2nd Edition)*. Lulu, 2010.
- [11] Donoho D. L. and Tanner J., "Precise undersampling theorems," *Proceedings of the IEEE*, vol. 98, pp. 913–924, June 2010.
- [12] Herrera Yajaira and Cooper Norman, *Manual para la adquisición y procesamiento de sísmica terrestre y sus aplicaciones en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia, 2010.
- [13] Kim S. J., Koh K., Lustig M., and Boyd S., "An efficient method for compressed sensing," en *Proc. IEEE Int. Conf. Image Processing*, vol. 3, pp. III – 117–III – 120, Sept. 2007.

- [14] Kutyniok Gitta, "Theory and applications of compressed sensing," *GAMM-Mitteilungen*, vol. 36, no. 1, pp. 79–101, 2013.
- [15] Qaisar Saad, Bilal Rana Muhammad, Iqbal Wafa, Naureen Muqaddas, and Lee Sungyoung, "Compressive sensing: From theory to applications, a survey," *Journal of Communications and networks*, vol. 15, no. 5, pp. 443–456, 2013.
- [16] Sengbush Ray L., *Seismic Exploration Methods*. Springer, 2013.

BIBLIOGRAFÍA

Candes E. J. and Wakin M. B., “An introduction to compressive sampling,” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 25, pp. 21–30, Mar. 2008

CMath Nicholas A Alexander, *Seismic Analysis (2nd Edition)*. Lulu, 2010

Donoho D. L., “Compressed sensing,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, pp. 1289–1306, Apr. 2006

Donoho D. L. and Tanner J., “Precise undersampling theorems,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 98, pp. 913–924, June 2010

Figueiredo M. A. T., Nowak R. D., and Wright S. J., “Gradient projection for sparse reconstruction: Application to compressed sensing and other inverse problems,” *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 1, pp. 586–597, Dec. 2007

Herrera Yajaira and Cooper Norman, *Manual para la adquisición y procesamiento de sísmica terrestre y sus aplicaciones en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia, 2010

Herrmann Felix J, “Randomized sampling and sparsity: Getting more information from fewer samples,” *Geophysics*, vol. 75, no. 6, pp. WB173–WB187, 2010

Kim S. J., Koh K., Lustig M., Boyd S., and Gorinevsky D., “An interior-point method for large-scale ℓ_1 -regularized least squares,” *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 1, pp. 606–617, Dec. 2007

Kim S. J., Koh K., Lustig M., and Boyd S., “An efficient method for compressed sensing,” en *Proc. IEEE Int. Conf. Image Processing*, vol. 3, pp. III – 117–III – 120, Sept. 2007

Kutyniok Gitta, “Theory and applications of compressed sensing,” *GAMM-Mitteilungen*, vol. 36, no. 1, pp. 79–101, 2013

Onajite Enwenode, *Seismic Data Analysis Techniques in Hydrocarbon Exploration*. Elsevier, 2013

Qaisar Saad, Bilal Rana Muhammad, Iqbal Wafa, Naureen Muqaddas, and Lee Sungyoung, “Compressive sensing: From theory to applications, a survey,” *Journal*

of Communications and networks, vol. 15, no. 5, pp. 443–456, 2013

Sengbush Ray L., *Seismic Exploration Methods*. Springer, 2013

3d Subsuelo, *Manual de Usuario SEISMEX 16*

Tang Wen, Ma Jianwei, and Herrmann Felix J, “Optimized compressed sensing for curvelet-based seismic data reconstruction,” *preprint*, vol. 280, p. 1928, 2009

Yilmaz Ozdogan and Doherty Stephen M., *Seismic Data Processing (Investigations in Geophysics, Vol 2)*. Society of Exploration, 1987