

**DISEÑO DE UNA TÉCNICA DE ADQUISICIÓN DE DATOS SÍSMICOS 2D
USANDO MUESTREO COMPRIMIDO**

ANDRÉS FELIPE RAMÍREZ SILVA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2015

**DISEÑO DE UNA TÉCNICA DE ADQUISICIÓN DE DATOS SÍSMICOS 2D
USANDO MUESTREO COMPRIMIDO**

ANDRÉS FELIPE RAMÍREZ SILVA

**Trabajo de grado para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO**

Director:

Jorge Enrique Meneses Flórez MSc.

Codirector:

Ana Beatriz Ramírez Silva PhD.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2015

DEDICATORIA

A Dios por brindarme tantas oportunidades en la vida.

A mi padre Luis J Ramírez, mi guía y ejemplo a seguir durante tantos años.

A mi familia por su apoyo incondicional.

A mis compañeros de trabajo que me apoyaron en todo momento.

AGRADECIMIENTOS

A **Ecopetrol** y **Colciencias** por el soporte técnico y económico a este proyecto, el cual fue desarrollado bajo el contrato 0266 del 2013 y al convenio 004 de 2014.

A **Jorge Enrique Meneses Flores**, Director del trabajo de grado, por su colaboración durante el desarrollo de este trabajo.

A **Ana Ramírez Silva**, Codirectora del trabajo de grado y directora del Grupo de investigación CPS, por la ayuda y el apoyo brindado durante el desarrollo de este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. IMPORTANCIA Y OBJETIVOS DEL PROYECTO	17
1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	17
1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	20
1.3. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO	22
2. DESCRIPCIÓN DEL DESARROLLO DE LA TESIS	23
2.1. ¿QUÉ SON LAS TRAZAS SÍSMICAS?	26
2.2. ¿CÓMO SE CONSTRUYERON LAS TRAZAS SÍSMICAS?	27
3. DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA DEL SUBSUELO (modelo geológico)	29
4. ARREGLO SUPERFICIAL DE GEÓFONOS	32
4.1. DISTRIBUCIÓN UNIFORME	32
4.2. DISTRIBUCIÓN ALEATORIA	33

5. DISEÑO Y DESARROLLO DE LA ADQUISICIÓN SÍSMICA 2D	34
5.1. ADQUISICIÓN DE TRAZAS SÍSMICAS	34
5.1.1. Propagación de onda acústica en el modelo geológico	34
5.1.2. Análisis de la primera capa.	35
5.1.3. Análisis de la segunda capa.	36
5.1.4. Generación de trazas sísmicas y de las imágenes del subsuelo.	41
5.1.5. Geófonos y fuentes uniformemente espaciados.	43
5.1.6. Geófonos y fuente aleatoriamente espaciados	47
5.2. PROCESO INVERSO	50
5.2.1. Geófonos y fuentes uniformemente espaciados.	50
5.2.2. Geófonos y fuente aleatoriamente espaciados	51
5.3. SUMA DE TRAZAS SÍSMICAS	52
5.3.1. Geófonos y fuentes uniformemente espaciados.	52
5.3.2. Geófonos y fuente aleatoriamente espaciados	54
5.4. NIVEL DE RUIDO EN LA ADQUISICIÓN	56
6. CONCLUSIONES	62
7. RECOMENDACIONES	64
BIBLIOGRAFIA	65
ANEXOS	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 : Muestreo sísmico sobre un campo con múltiples capas.....	- 17 -
Figura 2 : Distribución de geófonos, uniformemente espaciado.	- 18 -
Figura 3 : Obstrucción de sensores por frondosidad.	- 18 -
Figura 4 : Inviabile la posición del geófono.....	- 19 -
Figura 5 : Distribución de geófonos, no uniformemente espaciado.	- 21 -
Figura 6 : Simulación de adquisición sísmica con distribución uniforme.....	- 21 -
Figura 7 : Método sísmico.....	- 23 -
Figura 8 : Proceso de construcción de imágenes sísmicas simuladas.	- 25 -
Figura 9 : Traza sísmica.	- 26 -
Figura 10 : Trazas sísmicas sintéticas.	- 27 -
Figura 11 : Trazas sísmicas con ruido.	- 28 -
Figura 12 : Características del modelo geológico de capas.....	- 30 -
Figura 13 : Arreglo de una línea de geófonos uniformemente espaciados.....	- 32 -
Figura 14 : Arreglo de geófonos aleatoriamente espaciados.....	- 33 -
Figura 15 : Trayectoria de onda en la primera capa.	- 35 -
Figura 16 : Trayectoria de onda en la segunda capa.....	- 37 -
Figura 17 : Análisis de trayectoria en múltiples capas.	- 38 -
Figura 18 : Trazas sísmicas simuladas.....	- 39 -
Figura 19 : Interpretación de resultados.	- 40 -
Figura 20 : Fold en una adquisición.....	- 41 -
Figura 21 : Construcción del modelo sintético de trazas sísmicas.....	- 43 -
Figura 22 : Arreglo uniforme real.	- 44 -
Figura 23 : Arreglo uniforme Matlab.....	- 45 -
Figura 24 : Adquisición sintética de trazas sísmicas (espaciamiento uniforme) -	45 -
Figura 25 : Múltiples disparos (uniforme).....	- 46 -
Figura 26 : Método aleatorio propuesto.	- 47 -
Figura 27 : Arreglo aleatorio Matlab.....	- 48 -

Figura 28: Trazas sintéticas (distribución aleatoria).....	- 49 -
Figura 29: Múltiples disparos (distribución aleatoria).....	- 49 -
Figura 30: Corrección de trazas sísmicas modelo uniforme.	- 50 -
Figura 31: Corrección de trazas sísmicas modelo aleatorio.	- 51 -
Figura 32: Suma de trazas por disparo (uniforme).....	- 52 -
Figura 33: Suma trazas (uniforme).	- 53 -
Figura 34: Reconstrucción de los reflectores (distribución uniforme).....	- 53 -
Figura 35: Suma de trazas por disparo (distribución aleatoria).....	- 54 -
Figura 36: Suma trazas (distribución aleatoria).....	- 55 -
Figura 37: Reconstrucción de los reflectores (distribución aleatoria).....	- 55 -
Figura 38: Comparación de modelos.	- 56 -
Figura 39: Factores de ruido en decibeles.....	- 58 -
Figura 40: Reconstrucción de los reflectores – Ruido SNR = 52,2510 dB.....	- 58 -
Figura 41: Reconstrucción de los reflectores – Ruido SNR = 32,2455 dB.....	- 59 -
Figura 42: Reconstrucción de los reflectores – Ruido SNR = 18,2652 dB.....	- 59 -
Figura 43: Método aleatorio - Fold = 30.....	- 60 -
Figura 44: Método aleatorio - Fold = 20.....	- 61 -
Figura 45: Ejemplo de perforación (velocidades de las capas).....	- 69 -
Figura 46: Velocidad de onda P.....	- 70 -
Figura 47: Tipo de ondas internas. A) Ondas de compresión. B) Ondas transversales.....	- 73 -
Figura 48: Geófono electromagnético.....	- 74 -
Figura 49: Análisis en múltiples capas.....	- 75 -

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Densidades de rocas representativas.....	- 71 -

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.	68
ANEXO B. CÓDIGO EN MATLAB PARA MODELO UNIFORME	76
ANEXO C. MODELO DE TIEMPOS UNIFORME.	79
ANEXO D. CORRECCIÓN DEL MODELO UNIFORME.	81
ANEXO E. CÓDIGO EN MATLAB PARA MODELO ALEATORIO	82
ANEXO F. MODELO DE TIEMPOS ALEATORIOS.	86
ANEXO G. CORRECCIÓN DEL MODELO ALEATORIO.	88

RESUMEN

TITULO: DISEÑO DE UNA TÉCNICA DE ADQUISICIÓN DE DATOS SÍSMICOS 2D USANDO MUESTREO COMPRIMIDO*.

AUTOR: Andrés Felipe Ramírez Silva**.

PALABRAS CLAVES: Datos sísmicos, geófonos, muestreo comprimido.

DESCRIPCIÓN:

En la actualidad la exploración sísmica en zonas complejas de difícil acceso, y la necesidad de conservar el medio ambiente, ha llevado a la industria petrolera, a estudiar nuevas técnicas para adquisición de datos sísmicos terrestres. El estudio de un método alternativo que satisfaga las necesidades de la exploración sísmica sin alterar los espacios naturales es el tema primordial para esta investigación.

En esta tesis se estudia la adquisición de datos sísmicos 2D, usando trazado de los rayos que se propagan entre tres capas horizontales del subsuelo. Para la adquisición de la señal sísmica se utiliza un arreglo de geófonos y fuentes aleatoriamente espaciados en la superficie. El resultado de la imagen adquirida se compara con el método de adquisición tradicional que utiliza un arreglo de geófonos uniformemente espaciado en superficie. Para el estudio de adquisición de datos sísmicos se tienen en cuenta diferentes propiedades del subsuelo como velocidad de propagación de onda en las capas, la densidad y la porosidad de la roca. Además se estudia el parámetro conocido como *fold*, el cual se encuentra relacionado con el diseño de una adquisición sísmica. Finalmente, para generar adquisiciones más cercana a una adquisición real de campo, se estudian múltiples entornos relacionados con diferentes niveles de ruido.

* Trabajo de Grado. Modalidad de investigación

** Facultad de Ingenierías Físico -Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Jorge Enrique Meneses Flórez. Codirector: Ana Ramírez Silva.

ABSTRACT

TITLE: Design of a 2D seismic data acquisition technique using compressed sampling *.

AUTHOR: Andrés Felipe Ramirez Silva **.

KEY WORDS: Seismic data, geophone, compressed sampling.

DESCRIPTION:

The seismic exploration of complex zones with difficult access, and the need of preserving the environment have lead the oil industry and the academy to investigate new techniques for acquiring land seismic data. An alternative method that meets the needs of seismic exploration, avoiding large damage of the Surface is the main topic of this research.

In this thesis, the desing and development of a 2D acquisition technique that uses ray tracing in a geological model of three horizontal layers is studied. For the acquisition of the 2D seismic data, a randomly distributed array of geophones and sources is used. The resulting image is compared with the image obtained using the traditional acquisition method, which uses an array of uniformly spaced geophones and sources. In this study, relevant properties of the subsurface such as: wave propagation speed in the layers, density and porosity of the rock are taken into account. In addition the *fold* parameter related to the seismic acquisition design is also studied. In order to make a more realistic acquisition, different environments with different noise levels are also evaluated in this work.

* Degree. Research thesis.

** Faculty of Physics-Mechanics Engineering. School of Mechanical Engineering, Advisor: Jorge Enrique Meneses Flórez. Co-advisor: Ana Ramírez Silva

INTRODUCCIÓN

La Universidad Industrial de Santander junto con la escuela de Ingeniería Mecánica han permitido la generación de trabajos con carácter investigativo en diversos campos de la industria petrolera, estudiando posibles soluciones que pueden llegar a aplicarse dentro de sus procesos de ingeniería.

Por ejemplo, uno de los procesos de ingeniería más importantes para la industria petrolera es la exploración sísmica. La exploración sísmica es un método geofísico que permite determinar características del subsuelo. Se basa en el uso de ondas acústicas artificiales y sensores conocidos como geófonos ubicados en la superficie permitiendo obtener la ubicación de reflectores* y la identificación de características de la roca existente en las capas del subsuelo. La sísmica es un proceso fundamental para la identificación de nuevos recursos combustibles como petróleo y gas, además de otros recursos naturales en diferentes partes del mundo, ya sea en exploración terrestre (Onshore) o marítima (Offshore).

Esta tesis estudia el diseño y desarrollo de una técnica no convencional de adquisición de datos sísmicos. Esta técnica consiste en la localización aleatoria de geófonos en la superficie para la adquisición de una línea sísmica 2D. Con el uso de esta técnica, se pueden disminuir algunas limitaciones del método convencional de adquisición sísmica, el cual requiere un arreglo uniforme de geófonos en superficie.

*Un reflector hace referencia a la interfase entre dos capas de rocas de diferente impedancia acústica.

El libro explica de forma detallada la técnica mencionada y está organizado de la siguiente manera para facilitar su comprensión.

1. *Importancia y objetivos del proyecto.* En este capítulo se describe el problema a tratar, la justificación al problema y los objetivos necesarios para solucionar el problema.

2. *Descripción del desarrollo de la tesis.* En este capítulo se resume el trabajo realizado en la tesis, describiendo términos y procedimientos utilizados para obtener de los resultados finales de la investigación.

3. *Diseño del modelo geológico.* Este capítulo presenta las características de las capas del modelo geológico estudiado en esta investigación.

4. *Distribución de geófonos.* En este capítulo se describen los dos tipos de distribución espacial de los geófonos estudiados en esta investigación: uniforme y aleatorio. Además, se presentan las condiciones necesarias para realizar la adquisición sísmica.

5. *Diseño y desarrollo de la adquisición sísmica 2D.* En este capítulo se presenta el análisis matemático realizado para obtener sintéticamente las trazas sísmicas. Se incluyen además los resultados de la imagen del subsuelo reconstruida para los dos tipos de distribución espacial superficial de los geófonos y las fuentes.

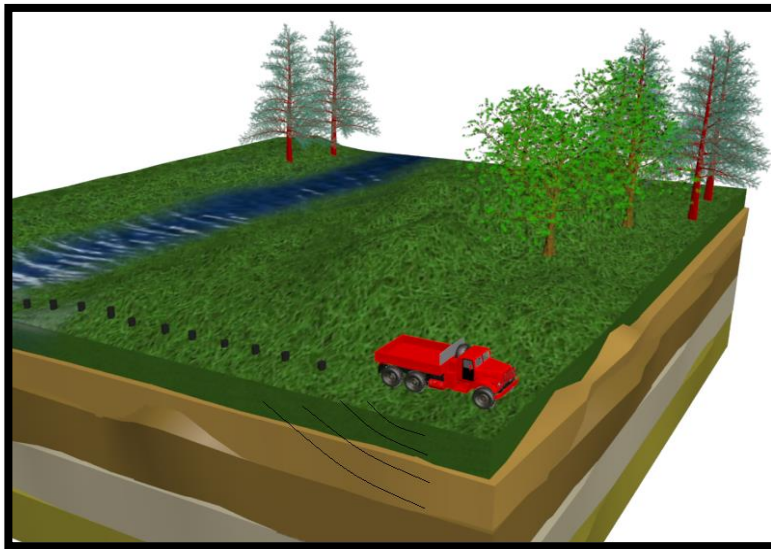
Al final del documento se presentan las principales conclusiones de este trabajo de grado, las recomendaciones para trabajos futuros y una lista de anexos con los fundamentos y códigos en Matlab de las implementaciones realizadas.

1. IMPORTANCIA Y OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Las empresas del sector de hidrocarburos invierten una gran cantidad de dinero en equipos, operarios y principalmente en tiempo para la exploración sísmica, en busca de áreas (reservorios con acumulación de hidrocarburos) con altos niveles de recursos energéticos. La exploración sísmica es el método geofísico más utilizado para adquirir información del subsuelo con buenos resultados (Figura 1). Los sensores utilizados para realizar la exploración sísmica son los geófonos. Estos sensores son distribuidos uniformemente en la superficie para el estudio del área seleccionada.

Figura 1 : Muestreo sísmico sobre un campo con múltiples capas.

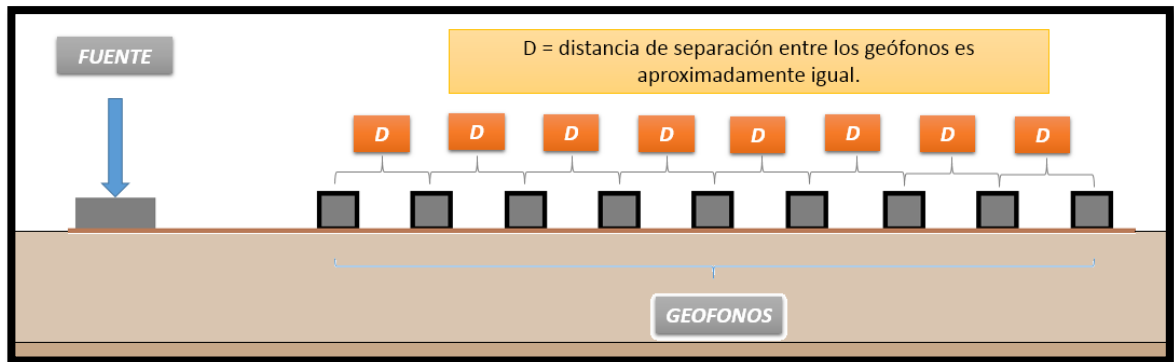


Fuente: Autor.

Sin embargo, en la superficie terrestre existen diferentes tipos de ambientes en el momento de realizar una exploración sísmica de un campo. Se puede, por ejemplo, encontrar un terreno lo suficientemente plano y desértico, lo que

facilita definir y situar una malla uniforme de los geófonos (Figura 2) en forma lineal para realizar la respectiva adquisición de datos sísmicos del subsuelo ya sea en 2D o 3D.

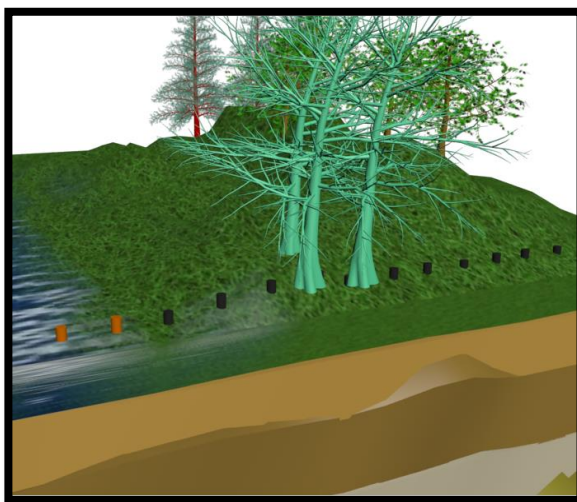
Figura 2 : Distribución de geófonos, uniformemente espaciado.



Fuente: Autor.

También se podría encontrar un terreno denso (Figura 3), que dificultaría el montaje de una malla uniforme de geófonos en él, ya que ubicar un geófono sobre uno de estos obstáculos sería imposible.

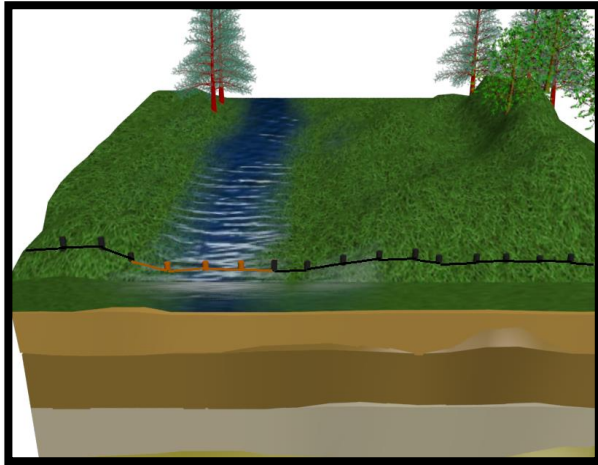
Figura 3 : Obstrucción de sensores por frondosidad.



Fuente: Autor.

Terrenos densos se refiere a que existen una serie de obstáculos que impiden la ubicación de dichos sensores en la superficie, estos pueden ser árboles, rocas, riachuelos (Figura 4), entre otros.

Figura 4 : Inviabile la posición del geófono.



Fuente: Autor.

La tala de árboles y la destrucción de la flora es uno de los problemas más grandes que existen en el momento de realizar una adquisición de datos sísmicos. Ya existen normas que restringen la deforestación al momento de realizar la adquisición, pero la realización de esto en algunos casos es obligatoria.

Cuando se logra ubicar los geófonos de forma efectiva la imagen generada durante la adquisición de datos sísmicos es de buena calidad y la presencia de trampas de hidrocarburos o gases se pueden observar con mayor precisión. Además, adquiriendo buenas imágenes se puede determinar la existencia de placas tectónicas que requieren un trato diferente al momento de perforar, ya que éstas pueden producir derrumbes en los pozos, ocasionando el daño de la broca y del pozo mismo.

1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

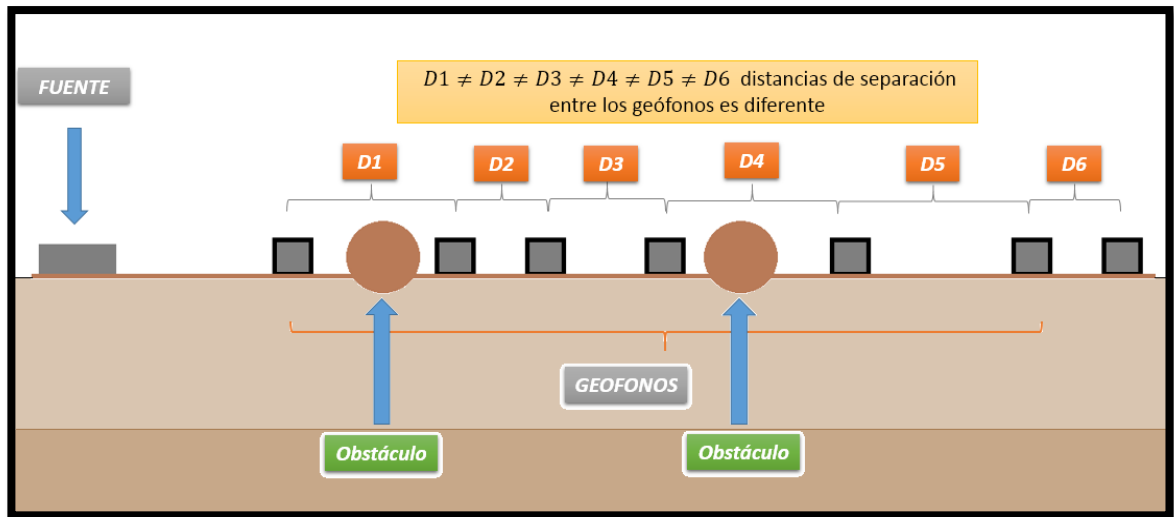
Los terrenos donde se utiliza el método de exploración sísmica deben tener ciertas condiciones para asegurar la adquisición de una buena imagen del subsuelo. Particularmente en Colombia, debido a la gran cantidad de flora que se encuentra en ciertas regiones, los métodos para exploración sísmica requieren la deforestación del terreno para poder localizar correctamente los sensores y de esa forma adquirir una buena imagen del subsuelo. Con esta investigación se desea estudiar una técnica de adquisición donde la tala de árboles para el despeje de la superficie donde se va a realizar la adquisición sísmica no sea una opción obligatoria para la exploración de hidrocarburos o recursos naturales en el subsuelo.

Con la presente investigación se desea probar una técnica novedosa en la exploración sísmica para la obtención de datos 2D del subsuelo. Está enfocada en obtener una buena imagen sísmica del subsuelo, cuando hay presencia de obstáculos en la superficie del terreno a explorar. La reacomodación uniforme de los geófonos puede ser algo tedioso, por esta razón se busca reubicar de manera no uniforme los sensores en la superficie de la tierra, evitando con esto los obstáculos o la deforestación principalmente (Figura 5). Sin embargo, antes de utilizar este tipo de adquisición en campo, es necesario diseñar y simular en Matlab un algoritmo matemático que represente correctamente la imagen del subsuelo a partir de los datos obtenidos en los sensores, no uniformemente espaciados ya que este método no se ha implementado en Colombia.

Con la herramienta de software MATLAB se puede simular, visualizar y comparar los resultados de forma económica, simulando matemáticamente una señal de onda acústica como la de una fuente (Figura 6), en un terreno sintético con una característica de velocidad de propagación de onda sobre

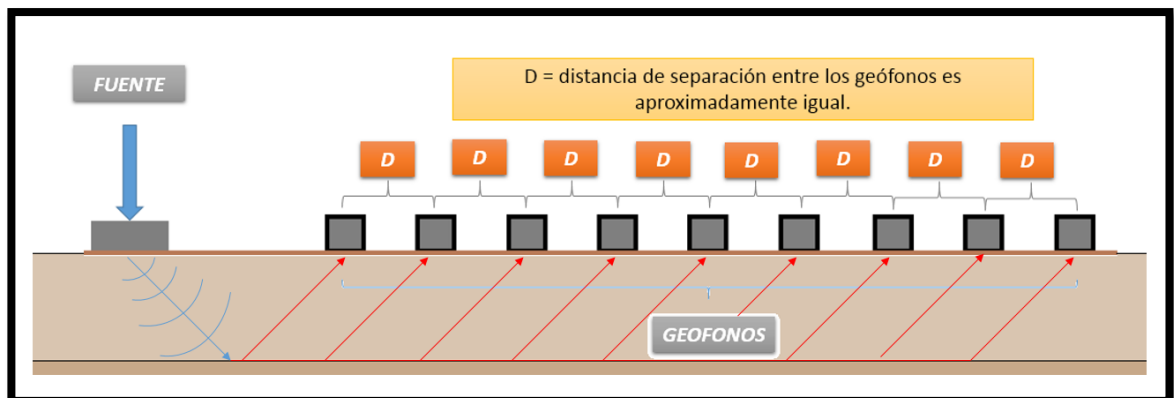
él, permitiendo con esto, obtener señales de los receptores según la propagación de la onda.

Figura 5: Distribución de geófonos, no uniformemente espaciado*.



Fuente: Autor.

Figura 6: Simulación de adquisición sísmica con distribución uniforme**.



Fuente: Autor.

* Distribución aleatoria en la superficie evitando satisfactoriamente los obstáculos.

** Comportamiento de propagación de las ondas sobre una capa del subsuelo y receptores igualmente espaciados. Imágenes diseñada por el autor.

1.3 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO.

1.3.1 OBJETIVO GENERAL.

- Contribuir con la misión de la Universidad Industrial de Santander, creando soluciones para las necesidades de la industria petrolera colombiana, a través del desarrollo de una técnica para la adquisición de datos sísmicos 2D usando una distribución aleatoria de geófonos.

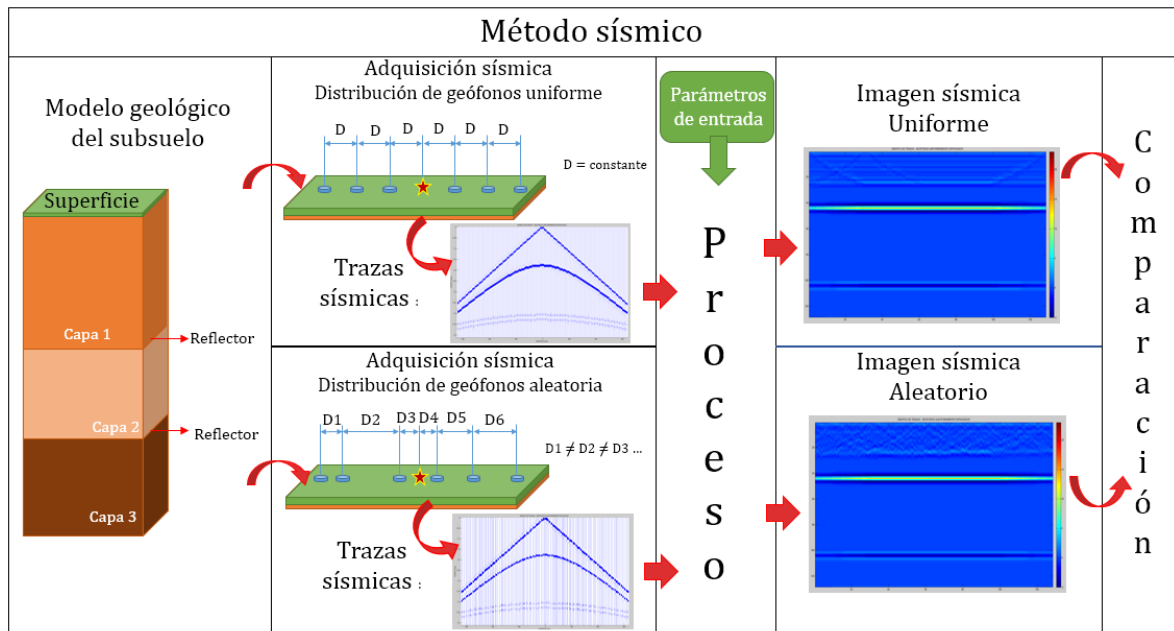
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar un modelo geológico simple de 2 capas de velocidad constante (arena y lodo) que represente el subsuelo.
- Simular en MATLAB la imagen que se obtendría del modelo geológico previamente diseñado usando las señales provenientes de un arreglo de geófonos uniformemente espaciados.
- Simular en MATLAB la imagen que se obtendría del modelo geológico previamente diseñado usando las señales provenientes de un arreglo de geófonos aleatoriamente espaciados.
- Comparar las imágenes obtenidas en las dos adquisiciones.

2. DESCRIPCIÓN DEL DESARROLLO DE LA TESIS.

La exploración sísmica es una necesidad para la industria de los hidrocarburos, la cual utiliza el método sísmico para la obtención de imágenes del subsuelo (ver figura 7). Las imágenes sísmicas son gráficos que contienen los reflectores o cambios de capas del subsuelo. Esta información es utilizada para localizar reservorios de petróleo, características y formas de la roca.

Figura 7. Método sísmico.



Fuente: Autor

El método sísmico inicia con el proceso de adquisición de datos, los cuales son conocidos como trazas sísmicas. Estas trazas se obtienen al producir una perturbación acústica (disparo) sobre la superficie del subsuelo, la cual viaja a través de la tierra y regresa a los geófonos, localizados también en superficie. En la actualidad las adquisiciones sísmicas terrestres utilizan distribución de geófonos uniformes del cual se obtienen las trazas sísmicas,

que posteriormente se llevan a un proceso para obtener la imagen del subsuelo.

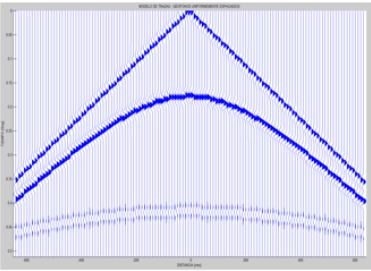
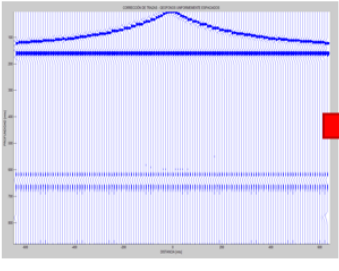
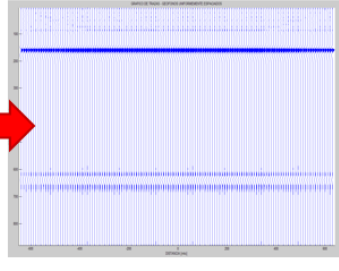
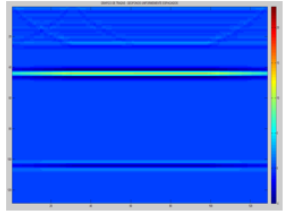
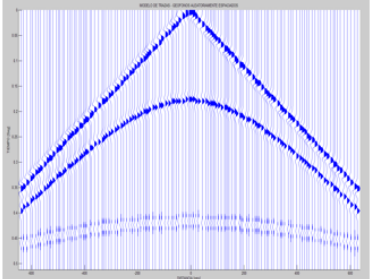
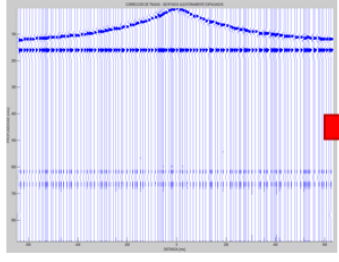
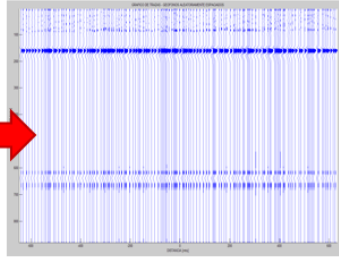
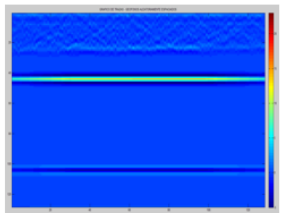
En esta investigación se comparan las imágenes sísmicas obtenidas cuando se usan dos formas de distribución de geófonos en superficie: una uniforme y otra aleatoria (ver figura 7). La etapa de adquisición, que se muestra en la figura 7, se puede realizar de forma experimental o simulada. Como no se cuenta con los medios para realizar un experimento real en campo, se generan las trazas sísmicas de forma simulada.

En esta investigación, se usa un modelo geológico de tres capas horizontales para simular el terreno y se realiza un estudio de propagación de ondas acústicas sobre este terreno de múltiples capas. Las características del modelo geológico se describen en el capítulo 3. Las trazas sísmicas se construyeron, de forma simulada, teniendo en cuenta las propiedades del modelo, y las formas de distribución de geófonos en la superficie. El código de programación utilizado para la construcción simulada de las trazas sísmicas, se puede visualizar en el ANEXO C, para el modelo uniforme y en el ANEXO F, para el modelo aleatorio.

Conociendo las trazas sísmicas y otros parámetros de entrada, como la velocidad de propagación de onda y densidades de las capas, se construyen las imágenes sísmicas del modelo geológico utilizando un proceso inverso, como se observa en la figura 7.

Este proceso inverso consiste principalmente de una corrección geométrica de las trazas sísmicas y una suma de trazas, como se muestra en la figura 8.

Figura 8. Proceso de construcción de imágenes sísmicas simuladas.

Parámetros de entrada		Simulación en Matlab		Resultados
Propiedades físicas del terreno V_{p1} V_{p2} V_{p3} } Velocidad de onda ρ_1 ρ_2 ρ_3 } Densidad de las capas	Arreglo de geófonos <i>UNIFORME</i> x } separación entre geofonos constante Trazas sísmicas 	Corrección de trazas sísmicas $h_1 = f(x, t_1, v_1, p_1)$ $h_2 = f(x, t_1, v_1, p_1, t_2, v_2, p_2)$ 	Suma de trazas sísmicas <i>fold</i> 	IMAGEN SISMICA UNIFORME 
	Propiedades sísmicas <i>fold</i> Factor de ruido Arreglo de geófonos <i>ALEATORIO</i> x_i } separación entre geofonos aleatorio Trazas sísmicas 	$h_1 = f(x_i, t_1, v_1, p_1)$ $h_2 = f(x_i, t_1, v_1, p_1, t_2, v_2, p_2)$  <p><i>h₁ y h₂ son cuaciones de propagación de onda acustica</i></p>	<i>fold</i>  <p><i>fold: es el valor que determina el numero de trazas a sumar</i></p>	IMAGEN SISMICA ALEATORIO 
Etapa A	Etapa B	Etapa C	Etapa D	

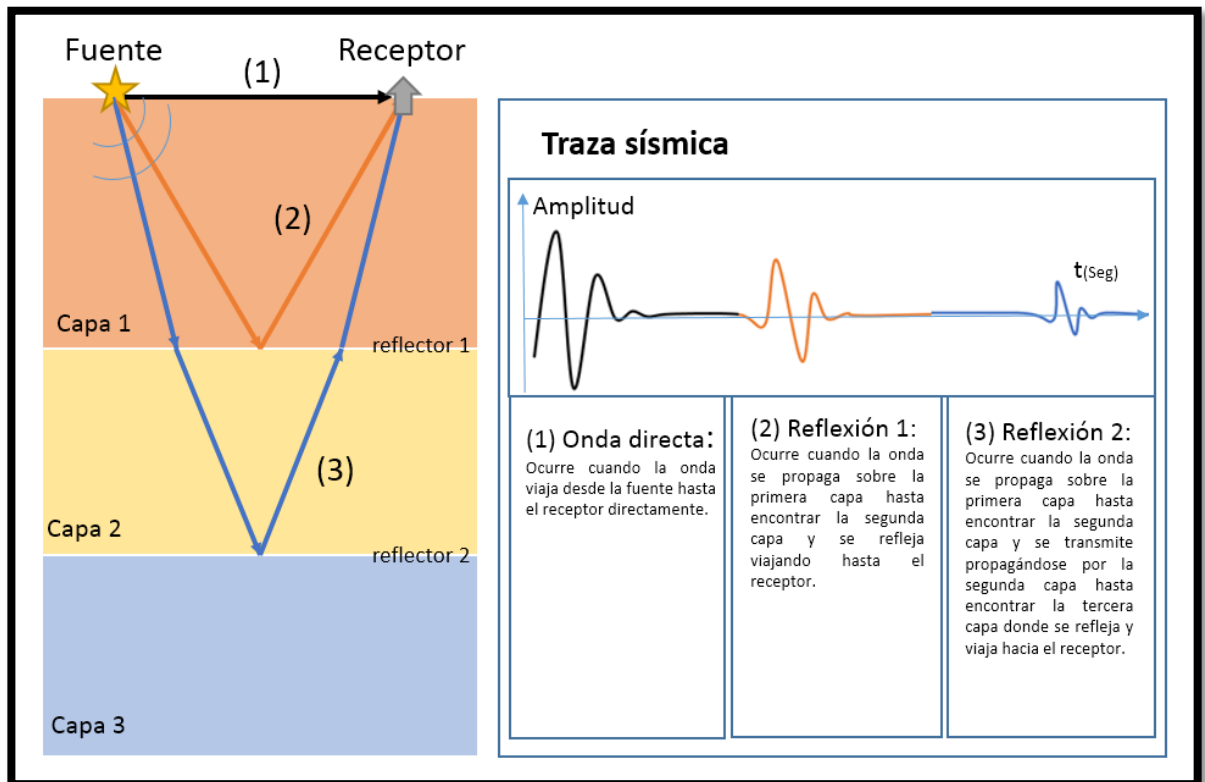
Fuente: Autor

La corrección de trazas sísmicas son el resultado de un proceso matemático que se realiza sobre las trazas adquiridas, para llevarlas al dominio profundidad vs. distancia entre fuente y geófonos. Esta operación se muestra en la figura 8, etapa C.

La siguiente etapa en el proceso inverso, consiste en sumar los resultados obtenidos en la etapa anterior, utilizando una variable conocida como *fold*, generando como resultado las imágenes sísmicas del subsuelo. Esta etapa se observa en la figura 8, etapa D.

2.1. ¿QUÉ SON LAS TRAZAS SÍSMICAS?

Figura 9. Traza sísmica.



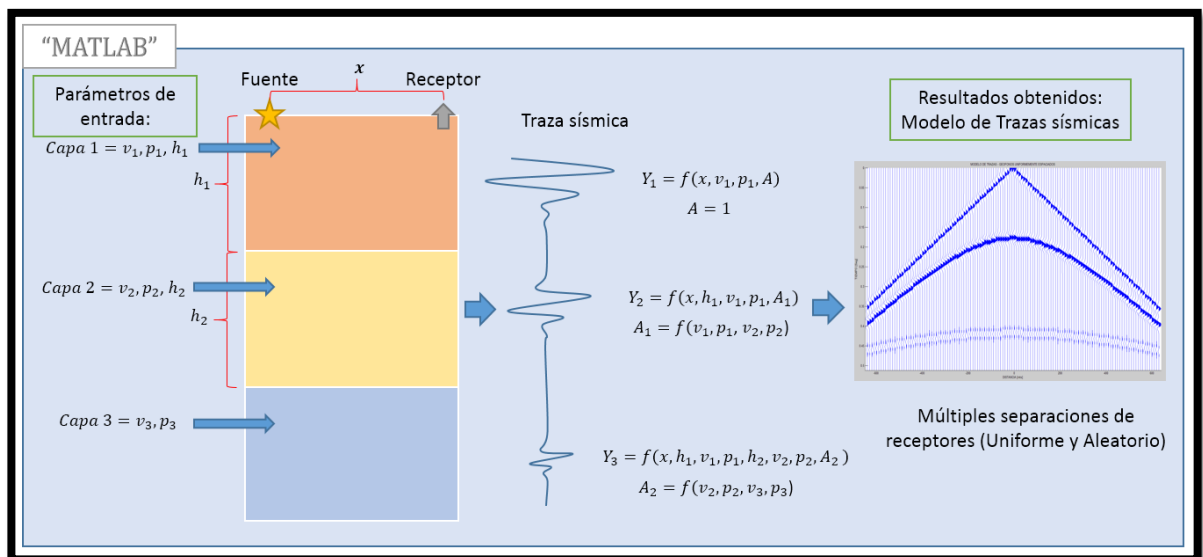
Fuente: Autor

Una traza sísmica es un registro de amplitud vs. el tiempo de arribo de la onda acústica que viaja a través de las capas del subsuelo, desde la fuente hasta un receptor (Ver figura 9). Las trazas sísmicas obtenidas de los geófonos contienen la información de los reflectores del subsuelo en una adquisición sísmica, que posteriormente serán procesadas para conseguir las imágenes del subsuelo y sus características.

2.2. ¿CÓMO SE CONSTRUYERON LAS TRAZAS SÍSMICAS?

Para la construcción de las trazas sísmicas sintéticas se utilizan las características del modelo geológico, descrito anteriormente. Usando este modelo geológico se obtiene el tiempo que tarda una onda en propagarse a través de las capas y llegar a cada receptor. Este tiempo se calcula cumpliendo con la teoría de trayectoria de ondas y está en función de la distancia entre la fuente y el receptor, de la velocidad de propagación de la onda, densidad y profundidad de la capa.

Figura 10. Trazas sísmicas sintéticas.

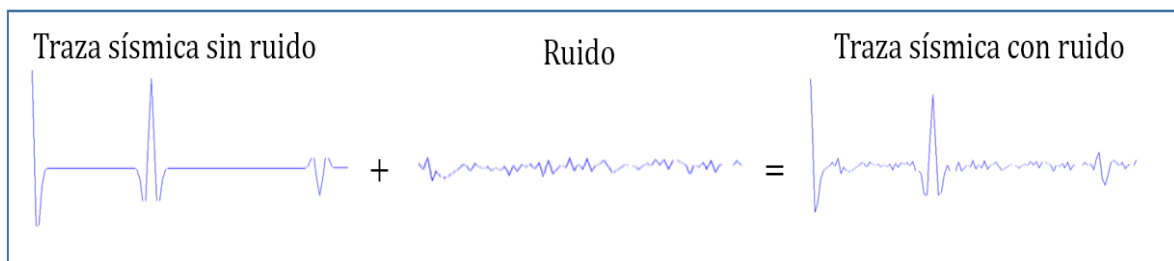


Fuente: Autor

Conociendo los tiempos de llegada de las ondas reflejadas y el pulso artificial de la fuente, se calculan las trazas sísmicas. El valor de la amplitud de la onda registrada en los geófonos dependerá de la impedancia acústica que produce el reflector entre capas del subsuelo. La impedancia acústica es función de la velocidad de propagación de onda y la densidad de la roca. Los valores de impedancia acústica para el modelo geológico estudiado en esta investigación se muestran en el capítulo 5 (sección 5.1.4).

A las trazas sísmicas sintéticas obtenidas se le adiciona ruido, el cual es un factor importante que está presente en la exploración sísmica real (ver figura 11). Debido a que el ruido afecta la imagen del subsuelo que se obtiene en el proceso inverso, es necesario estudiar y analizar su influencia. La potencia del ruido depende del lugar donde se realiza la adquisición sísmica. En esta tesis se tienen en cuenta factores de ruido para 3 tipos de ambientes: un ambiente con potencia del ruido pequeña, un ambiente con ruido mediano, y un ambiente con altos niveles de ruido.

Figura 11. Trazas sísmicas con ruido.



Fuente: Autor

3. DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA DEL SUBSUELO (MODELO GEOLÓGICO).

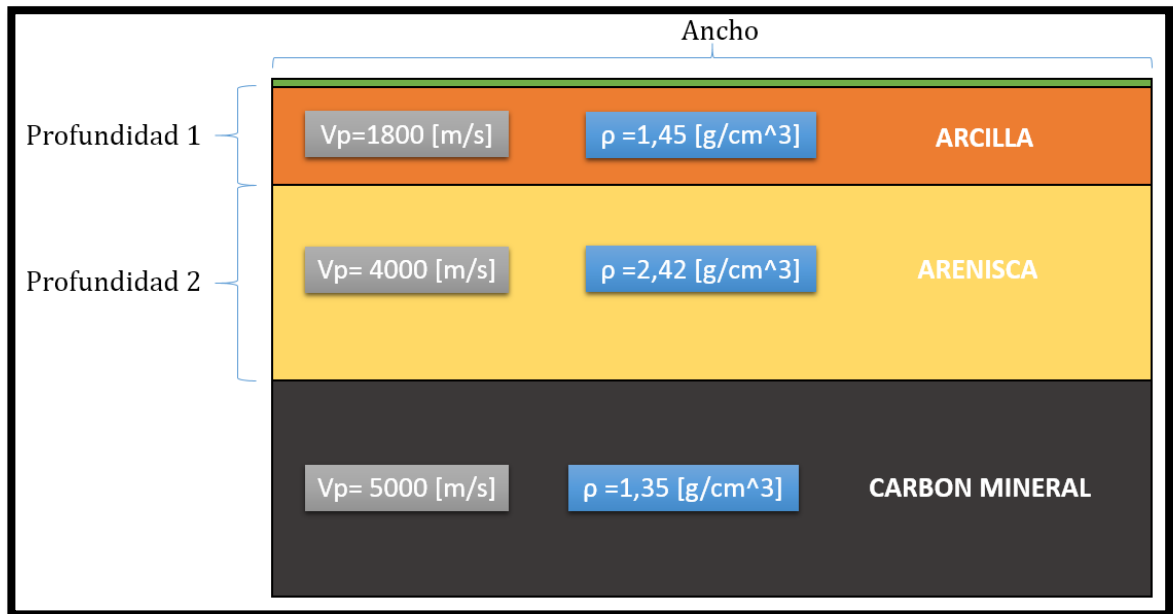
Con el uso de la sísmica, se pueden reconstruir modelos geológicos, utilizando las imágenes sísmicas obtenidas del método sísmico.

Este capítulo describe el modelo geológico de 3 capas horizontales (Ver figura 12), el cual facilita posteriormente la visualización de los resultados en las imágenes sísmicas finales. Este modelo servirá para poner en práctica los conceptos de la ley de Snell de propagación de onda. La ley de Snell se puede encontrar en el ANEXO A (Propagación de ondas sísmicas).

El modelo geológico es de capas homogéneas de diferentes propiedades seleccionadas (Arcilla, Arenisca y Carbón mineral). Estos materiales seleccionados son los más comunes y se puede encontrar suficiente información sobre ellos. Las propiedades de las rocas necesarias para realizar la construcción de las trazas sísmicas son velocidad de onda longitudinal y densidades según la porosidad de la roca. Diferentes ejemplos de estas propiedades para diferentes tipos de roca, se encuentran en el ANEXO A (Velocidad – Densidad). Además de estas propiedades, se requiere definir el tamaño de la superficie a explorar para posteriormente definir el tipo de arreglo de sensores.

A continuación, se procede a identificar las características de las capas según el tipo de roca seleccionado. Estas características se observan en la figura 12, las cuales fueron obtenidas de acuerdo con la tabla 1 y figura 46 que se encuentran en el ANEXO A.

Figura 12.Características del modelo geológico de capas.



Fuente: Autor

Para el interés de esta tesis, el diseño del subsuelo es simulado con los siguientes parámetros:

Capa 1:

Profundidad = 160 metros.

Velocidad = 1800 m/s.

Densidad = 1,45 g/cm³.

Capa 2:

Profundidad = 480 metros

Velocidad = 4000 m/s.

Densidad = 2,42 g/cm³

Capa 3:

Velocidad = 5000 m/s.

Densidad = 1,35 g/cm³

Ancho = 1280 metros (Ancho del terreno de exploración).

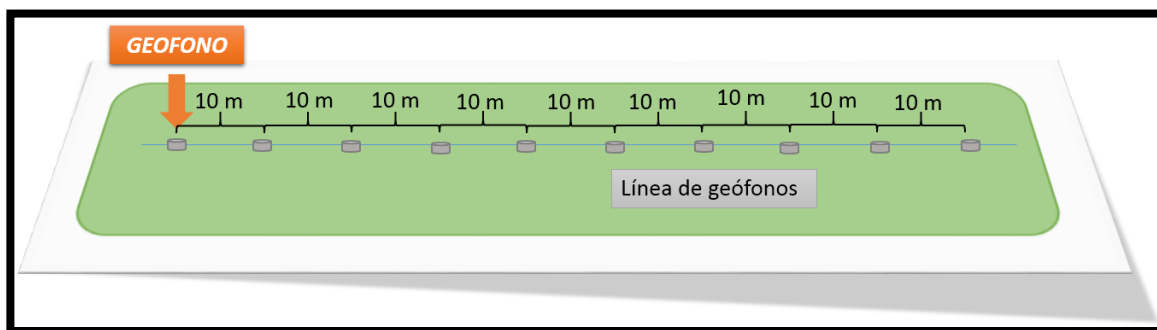
Con estos datos se tiene definida completamente las capas del subsuelo del terreno a estudiar. Estas propiedades de la roca como se explicó en el capítulo 2, son utilizados para la construcción de las imágenes sísmicas del subsuelo.

4. ARREGLO SUPERFICIAL DE GEÓFONOS.

En la presente tesis se estudia una adquisición sísmica sobre el modelo geológico anteriormente definido, usando una distribución de geófonos superficial en forma aleatoria. Esta adquisición sísmica aleatoria se compara con la adquisición sísmica sobre el mismo modelo geológico, obtenida usando una distribución superficial de geófonos uniformemente espaciados, este capítulo describe las características de los arreglos de geófonos utilizados en la investigación.

4.1. DISTRIBUCIÓN UNIFORME.

Figura 13: Arreglo de una línea de geófonos uniformemente espaciados.



Fuente: Autor

Los geófonos se ubican de manera uniforme con una separación entre ellos constante, buscando con esto simular una adquisición convencional. El rango de separación entre geófonos es considerado entre 5 y 15 metros⁴. El terreno se considera de un ancho de 1280 metros, por lo tanto se escoge para este modelo un número de geófonos igual a 128 lo que conllevaría a una separación entre geófonos de 10 m entre ellos. Este valor que se encuentra

⁴ El rango es tomado de consideración de los parámetros de una adquisición sísmica del informe presentado por Hernández Vera. [7].

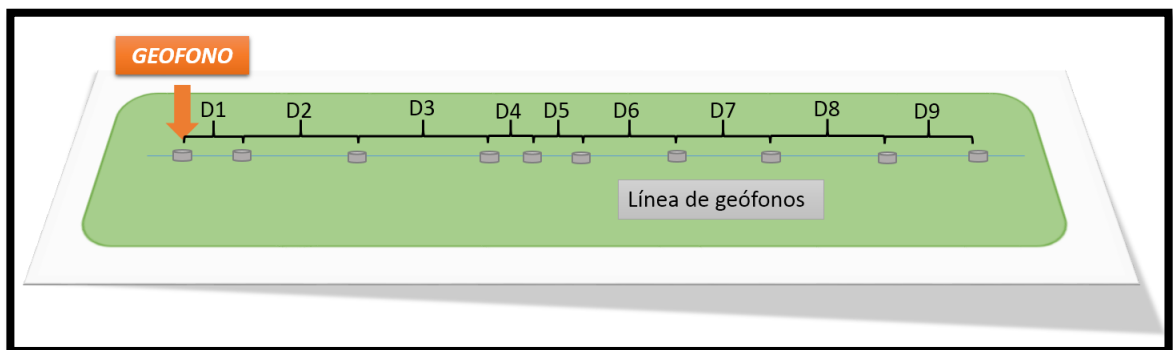
entre el rango de separación entre geófonos admitidos para obtener suficiente información del subsuelo.

4.2. DISTRIBUCIÓN ALEATORIA.

Para el modelo aleatorio, la cantidad de geófonos utilizados es la misma que el modelo uniforme, pero diferenciando la separación entre ellos. Se selecciona de manera programada, valores entre los 5 y 15 metros para 128 geófonos, lo cual corresponderá a la separación entre geófonos, obteniendo con esto una distribución aleatoria. (Ver figura 14).

Para la selección de manera aleatoria de las distancias entre geófonos, se realizó un programa en Matlab que permite generar números enteros entre 5 y 15. Ver ANEXO E (Generación aleatorio de geófonos).

Figura 14: Arreglo de geófonos aleatoriamente espaciados.



Fuente: Autor

5. DISEÑO Y DESARROLLO DE LA ADQUISICIÓN SÍSMICA 2D.

5.1. ADQUISICIÓN DE TRAZAS SÍSMICAS (ETAPA B DE LA FIGURA 8).

5.1.1. Propagación de onda acústica del modelo geológico. Las ondas acústicas tienen una velocidad de propagación finita, cuyo valor, depende de algunas propiedades de la roca. En el caso de esta investigación se suponen como constantes en un medio homogéneo.

Sabiendo que la velocidad es función de la trayectoria de viaje de la onda y del tiempo en que la onda tarda en desplazarse desde la fuente hasta el receptor (geófono), se tiene:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

La posición inicial de la fuente es $x_0 = 0$ y el tiempo inicial de la adquisición es $t_0 = 0$. Se reduce a:

$$v = \frac{x}{t} \quad (1)$$

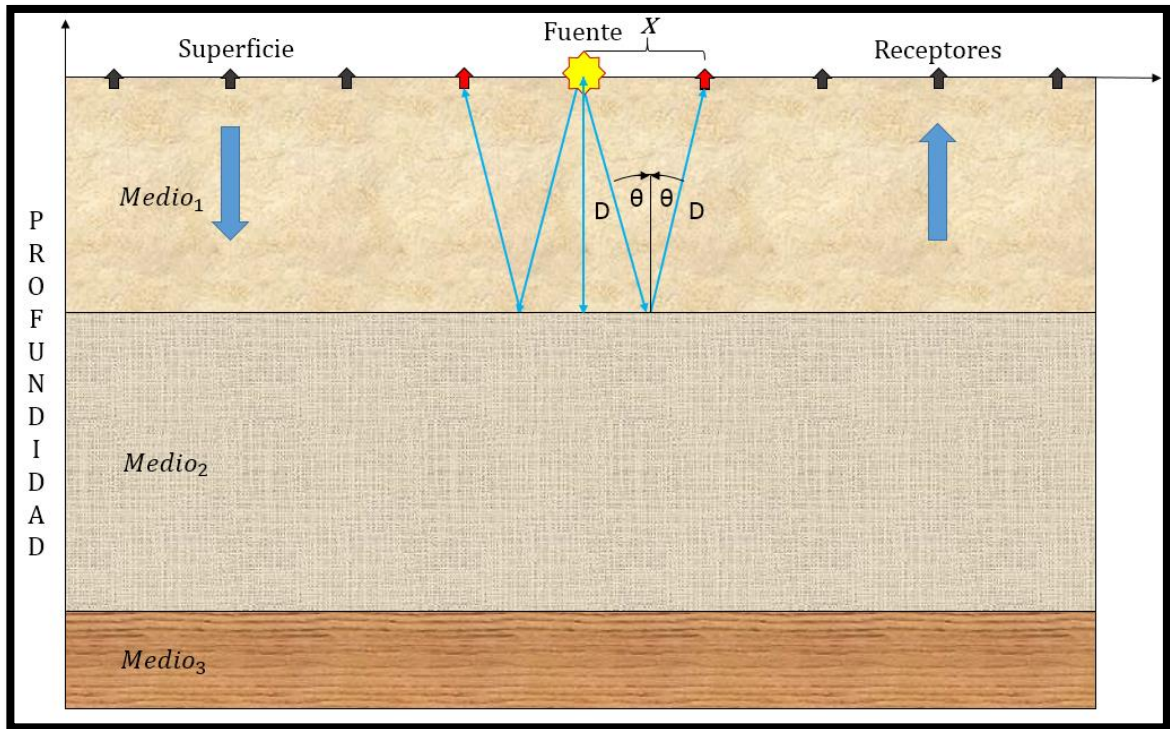
Despejando la ecuación 1, el tiempo tarda la onda acústica en desplazarse una distancia x está dado por:

$$t = \frac{x}{v} \quad (2)$$

Para cada capa del modelo propuesto se tiene un análisis de la propagación de la onda respecto de la posición de la fuente y la posición del receptor.

5.1.2. Análisis de la primera capa. Para la primera capa el tiempo de viaje de la onda acústica corresponde al tiempo necesario para propagarse desde la fuente, atravesando la primera capa, hasta que encuentra al reflector y nuevamente regresa a la superficie hacia los receptores.

Figura 15: Trayectoria de onda en la primera capa.



Fuente: Autor

La trayectoria más corta es perpendicular a la fuente. Luego el tiempo más corto se encuentra cuando la onda encuentra la segunda capa y se refleja hasta llegar al receptor. Aquí podemos definir un valor inicial (t_0).

$$t_0 = \frac{D + D}{V} \quad \longrightarrow \quad t_0 = \frac{2 * h_1}{V_{p1}} \quad (3)$$

Dónde: h_1 corresponde a la profundidad de la primera capa.

Para el cálculo de los demás tiempos, este valor depende de la ubicación de los receptores, además del tamaño y la velocidad de propagación de la onda en la capa. Este valor se puede determinar así:

$$t_x = \frac{2}{V_{p1}} * \sqrt{(h_1)^2 + (x/2)^2} \quad (4)$$

Dónde: x es la distancia horizontal entre la fuente y el receptor (geófono).

Las ecuaciones 3 y 4 son necesarias para el análisis de la primera capa y para obtener el tiempo que tarda la onda en encontrar el primer reflector y volver al receptor.

5.1.3. Análisis en la segunda capa. El análisis en la segunda capa, consiste en estudiar el tiempo que tarda la onda en propagarse por la primera capa hasta el primer reflector, transmitirse a la segunda capa, propagarse por la segunda capa hasta el segundo reflector, reflejarse y regresar al receptor. Esto se puede visualizar en la figura 16.

Al igual que en el caso anterior, el tiempo más corto ocurre cuando la onda viaja perpendicular a la fuente, pero en este caso se propaga entre las dos capas. Luego, el tiempo total será la suma de propagarse dos veces por la primera capa y propagarse dos veces por la segunda capa.

El tiempo más corto en el análisis del segundo reflector será:

$$t_{0_1} = \frac{2 * h_1}{V_{p1}}$$

t_{0_1} = tiempo de propagación de la primera capa.

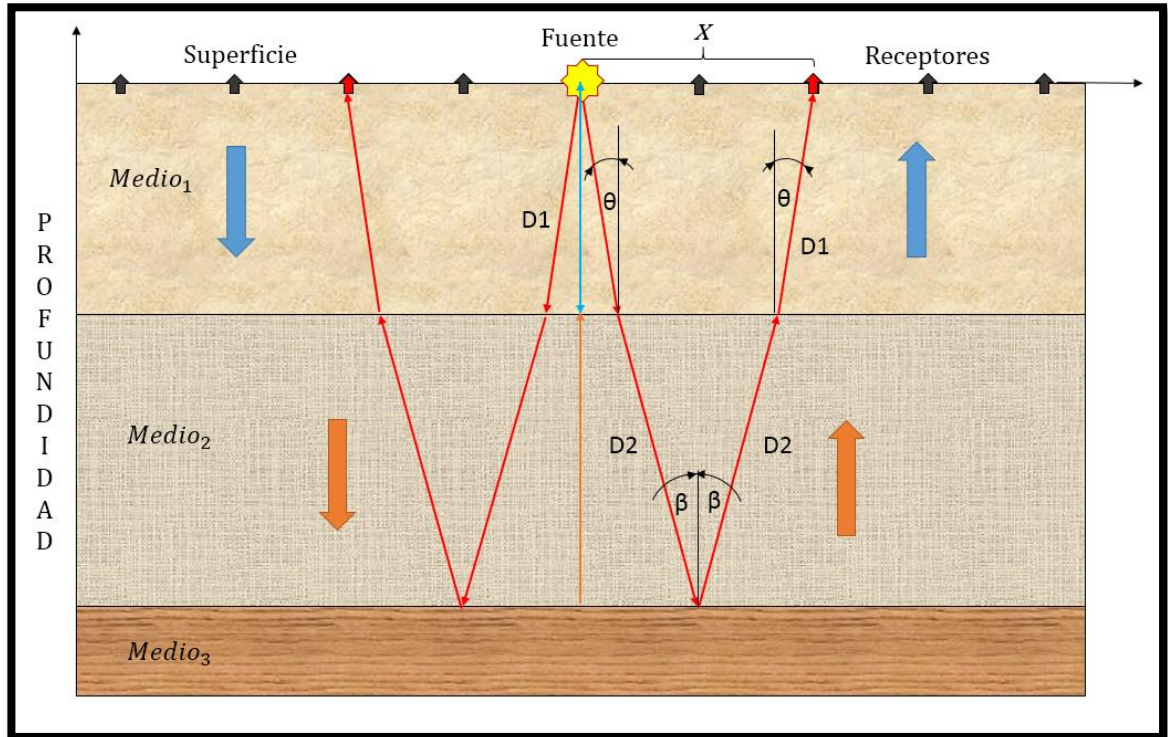
$$t_{0_2} = \frac{2 * h_2}{V_{p2}}$$

$t_{0,2}$ = tiempo de propagación de la segunda capa.

El tiempo total será:

$$t_0 = t_{0,1} + t_{0,2} \quad (5)$$

Figura 16: Trayectoria de onda en la segunda capa.



Fuente: Autor

Para el análisis de los tiempos de propagación de ondas hasta los demás sensores, estos tiempos dependen de la ubicación de los sensores en la superficie y de las velocidades de las capas. Para este análisis se tiene en cuenta la ley de Snell de transmisión de ondas.

Así, el tiempo que tarda una onda en llegar a un receptor ubicado en una posición diferente a la de la fuente será:

$$t_x = 2 * \left(\frac{D_1}{V_{p1}} + \frac{D_2}{V_{p2}} \right) \quad (6)$$

Dónde:

t_x = tiempo de llegada de la onda en cada receptor.

D_1 = trayectoria recorrida por la onda en la primera capa.

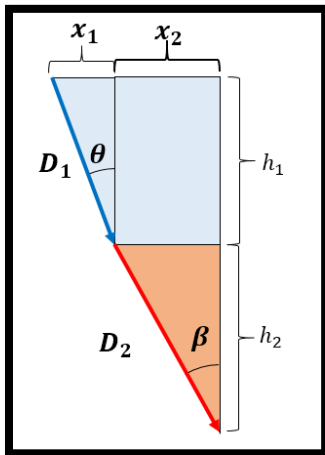
D_2 = trayectoria recorrida por la onda en la segunda capa.

V_{p1} y V_{p2} = velocidades de propagación de la onda en las capas.

Las trayectorias de las ondas son valores que están en función de la distancia entre la fuente y el sensor. La determinación de las trayectorias en múltiples capas no es tan sencilla que para una sola capa. La razón es porque la variable x depende de las dos trayectorias; D_1 y D_2 :

$$x = \text{función}(D_1, D_2).$$

Figura 17: Análisis de trayectoria en múltiples capas.



Fuente: Autor

En la figura 17 se puede visualizar las variables de interés para el análisis de los tiempos de llegada de las ondas a los receptores y las variables involucradas en la solución. Para este análisis se requieren las siguientes ecuaciones:

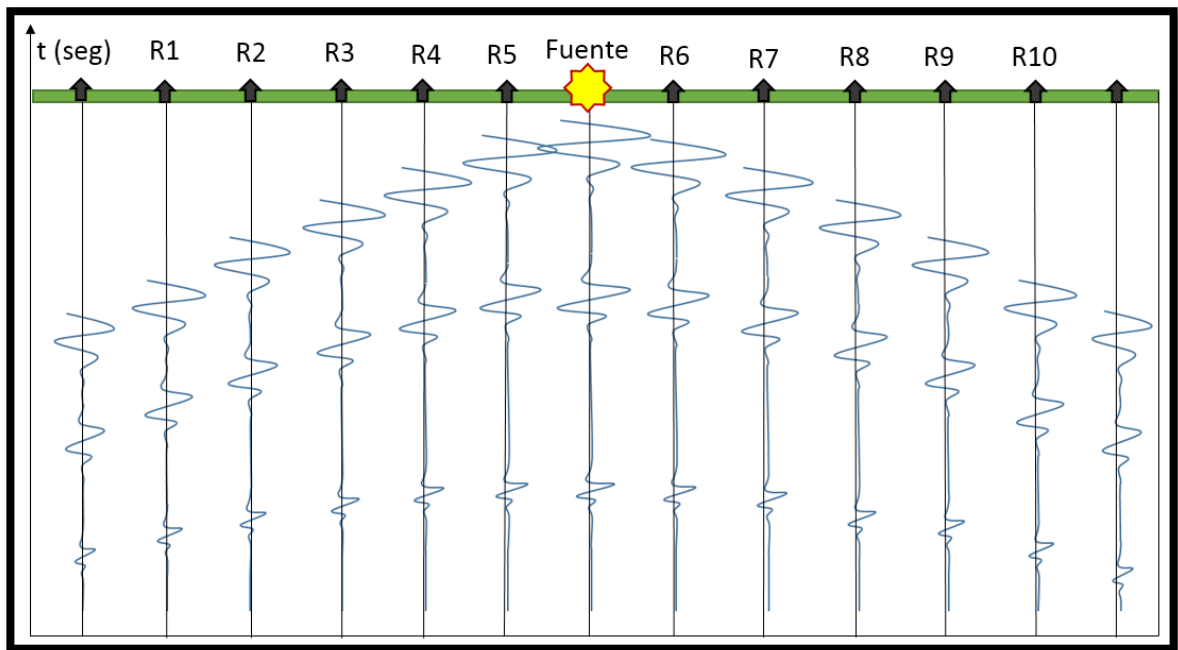
$$D_1^2 = x_1^2 + h_1^2 \quad (7) \qquad x_1 = D_1 * \sin(\theta) \quad (10)$$

$$D_2^2 = x_2^2 + h_2^2 \quad (8) \qquad x_2 = D_2 * \sin(\beta) \quad (11)$$

$$x = 2 * (x_1 + x_2) \quad (9) \qquad \frac{\sin\theta}{v_1} = \frac{\sin\beta}{v_2} \quad (12)$$

Con las ecuaciones 7 al 12, se tienen 6 incógnitas y 6 ecuaciones.

Figura 18. Trazas sísmicas simuladas.

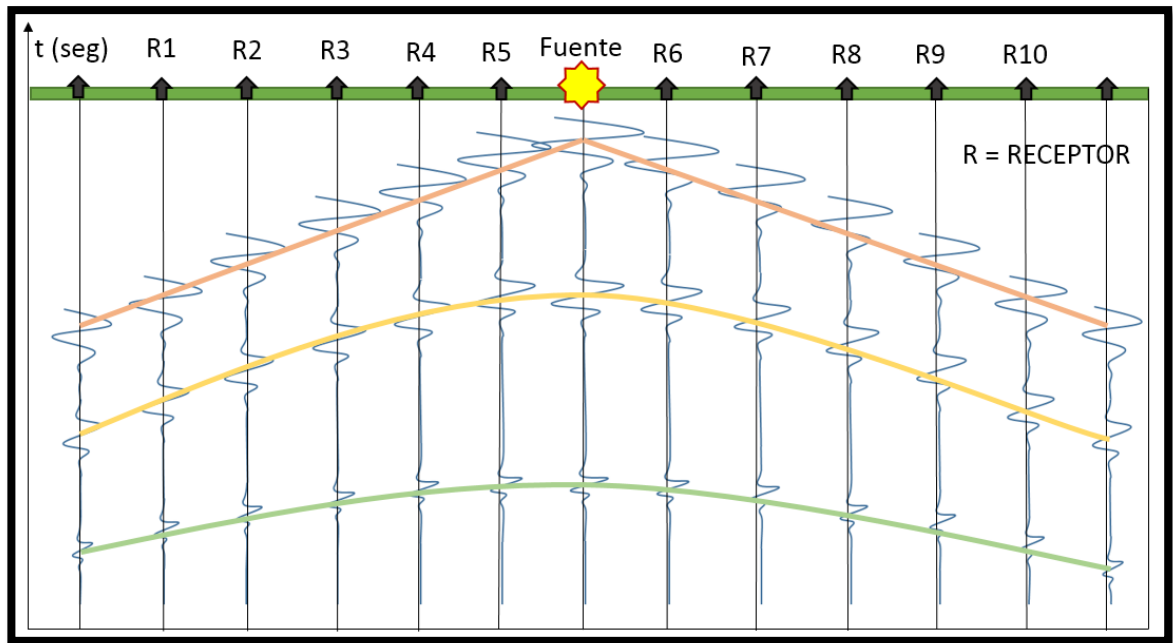


Fuente: Autor

Resolviendo el sistema de ecuaciones para encontrar el tiempo de arribo de la señal transmitida, se obtiene el sismograma de la figura 18 para el modelo geológico propuesto. El resultado que se observa en la figura son tres ondas

principales; la directa, y las dos ondas reflejadas, visualizándose la directa como una función lineal, y las dos reflexiones como hipérbolas (Ver figura 19).

Figura 19: Interpretación de resultados.



Fuente: Autor

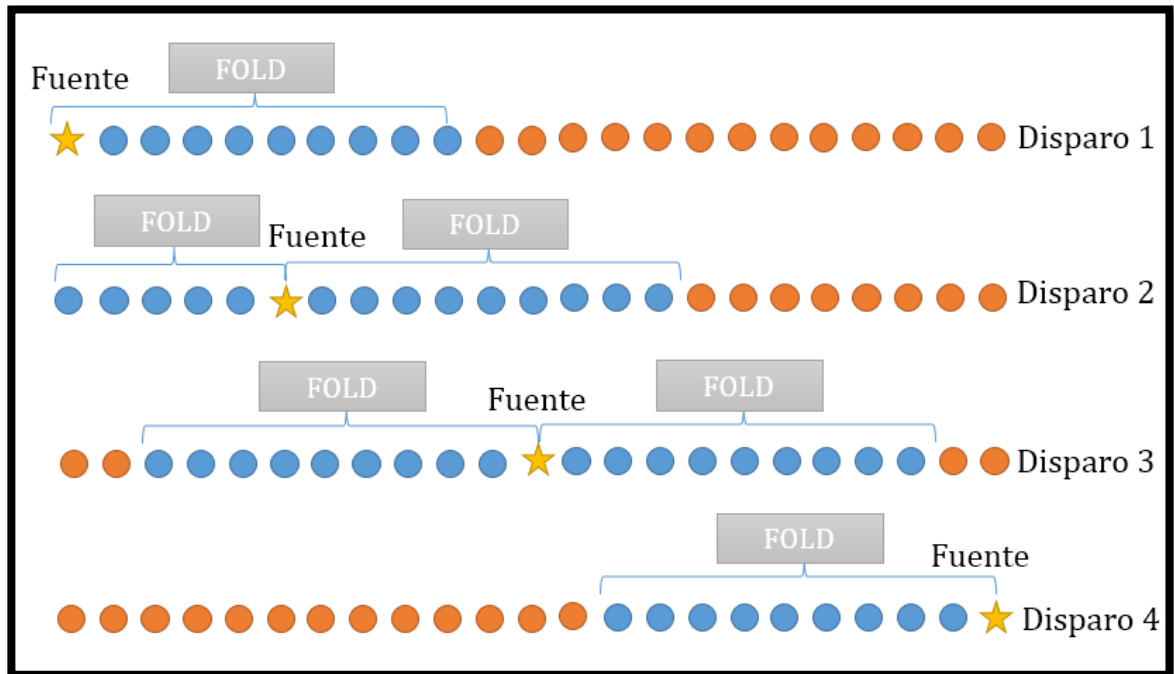
Con un solo disparo, no se obtiene suficiente información del subsuelo, por esta razón se deben realizar múltiples disparos para mejorar la calidad de las imágenes obtenidas.

El *fold* es un parámetro que determina el número de trazas a sumar en una adquisición, ya que todos los datos utilizados en un disparo contienen información valiosa para dicha adquisición.

En la figura 20 se visualiza un ejemplo del uso del *fold* en una línea de geófonos para adquisiciones en 2D, con múltiples disparos. A medida que la fuente se ubica en una posición centrada de los geófonos, va aumentando el número de geófonos que reciben información del subsuelo. En la figura 20

se puede ver que en el disparo 3, el número de datos a sumar es igual a 2 veces el valor *fold*. Cuando, la fuente se localiza en los extremos de la línea de geófonos, el número de trazas que se suman es igual a la variable del *fold*.

Figura 20: Fold en una adquisición.



Fuente: Autor

5.1.4. Generación de las trazas sísmicas y de las imágenes del subsuelo.

Inicialmente se implementó un código en Matlab para la adquisición sísmica de las trazas. Luego, se implementó un código en Matlab que permite recuperar la imagen del subsuelo, a partir de las trazas adquiridas anteriormente.

Es necesario describir un término usado en la implementación del modelo de adquisición. Este término es la impedancia acústica, el cual se refiere a un

valor de reflexión entre dos capas de diferentes características internas. Este valor está definido por:

$$c_1 = \frac{(v_2 * \rho_2) - (v_1 * \rho_1)}{(v_2 * \rho_2) + (v_1 * \rho_1)}$$

Dónde, v_i es la velocidad de propagación de la onda en la capa i y ρ_i es el valor de la densidad de la capa i .

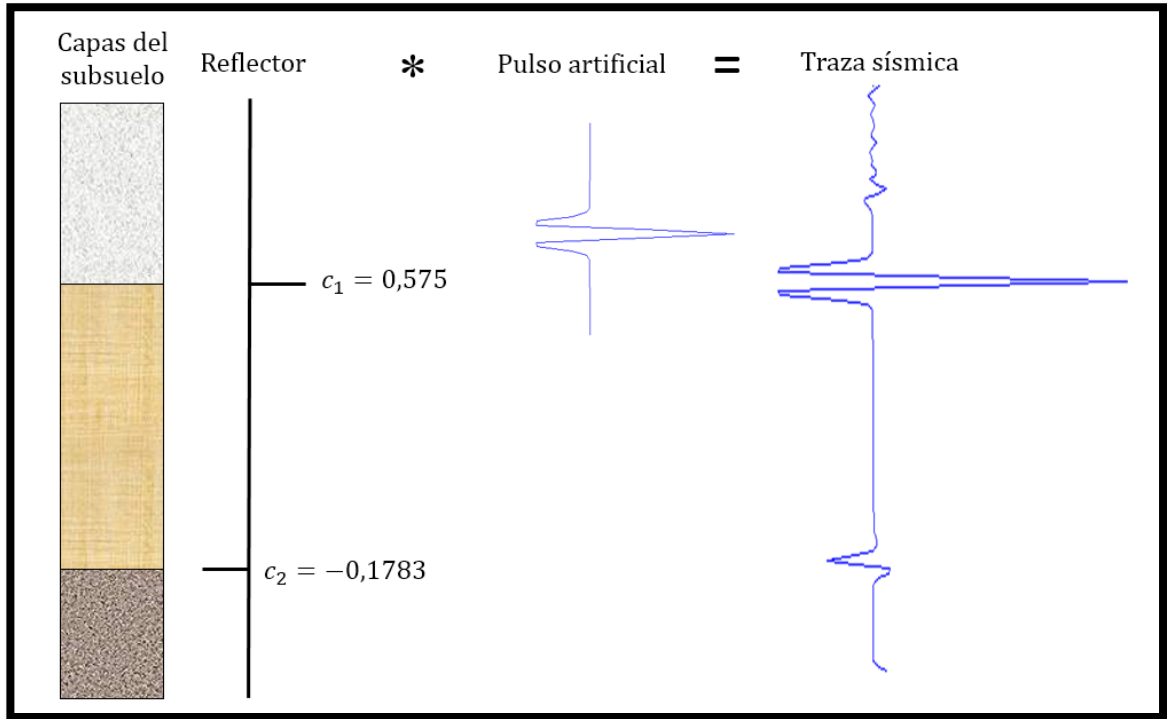
Para las características de las rocas definidas en el capítulo 3, tenemos los siguientes valores de impedancias acústicas, para los dos reflectores propuestos en esta tesis:

$$c_1 = \frac{(v_2 * \rho_2) - (v_1 * \rho_1)}{(v_2 * \rho_2) + (v_1 * \rho_1)} = \frac{(4000 * 2,42) - (1800 * 1,45)}{(4000 * 2,42) + (1800 * 1,45)} = 0,575$$

$$c_2 = \frac{(v_3 * \rho_3) - (v_2 * \rho_2)}{(v_3 * \rho_3) + (v_2 * \rho_2)} = \frac{(5000 * 1,35) - (4000 * 2,42)}{(5000 * 1,35) + (4000 * 2,42)} = -0,1783$$

Teniendo en cuenta la localización de los reflectores en el subsuelo y el valor de la amplitud con el cual la onda llega al receptor, despreciando la pérdida de energía por atenuación en el medio homogéneo, un ejemplo de la forma de una traza sísmica es mostrado en la figura 21.

Figura 21: Construcción del modelo sintético de trazas sísmicas.

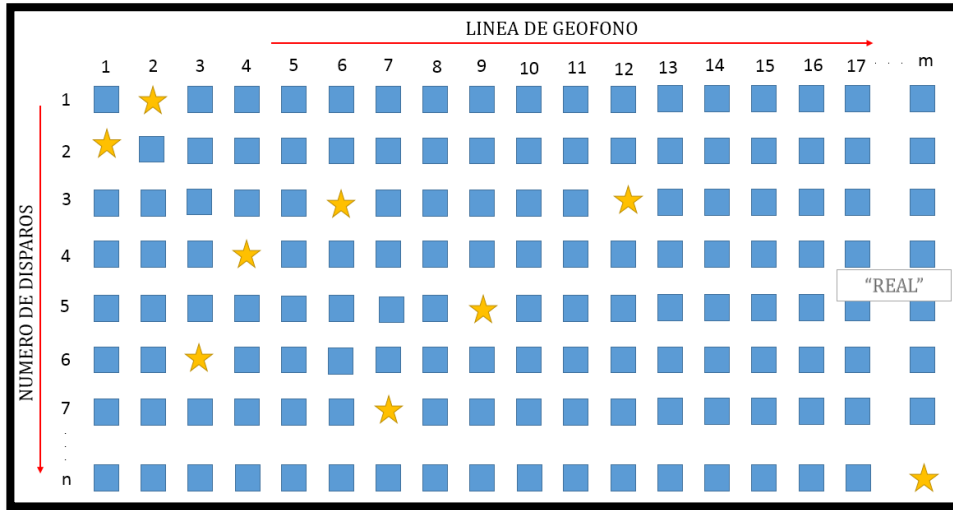


Fuente: Modificado de [4]

Usando un equipo de cómputo se puede realizar la simulación de la adquisición de las múltiples trazas obtenidas en el medio geológico propuesto anteriormente.

5.1.5. Geófonos y fuente uniformemente espaciados. El método de distribución uniforme de fuentes y sensores es el modelo convencional utilizado en una adquisición sísmica en campo. En este modelo se ubican los receptores (o geófonos) con una separación constante entre ellos (por ejemplo de 10 metros). Se realiza un disparo, localizando la fuente en una de las posiciones del geófono y se adquieren las trazas. Luego se procede a cambiar la posición de la fuente y repetir el procedimiento, para así obtener los conjuntos de trazas por cada disparo.

Figura 22: Arreglo uniforme real.

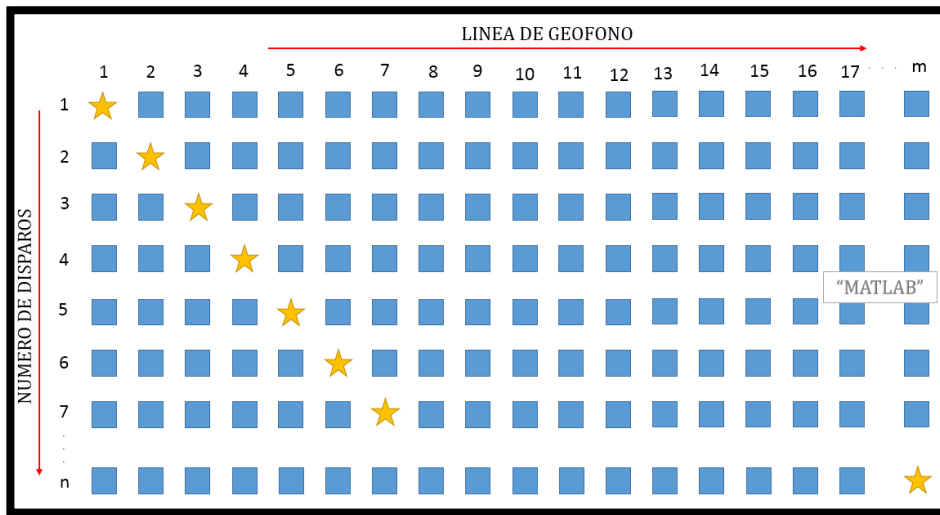


Fuente: Autor

En la figura 22, se puede visualizar el sistema utilizado para realizar la distribución y el arreglo de geófonos convencional, como se explicó anteriormente. El orden de la fuente no tiene secuencia y no necesariamente el número de fuentes debe ser igual al número de receptores en el campo. El número de disparos depende de factores como el costo del montaje y las condiciones del medio en el cual se está realizando la adquisición. Además se pueden repetir disparos en una ubicación si la información del disparo es insuficiente.

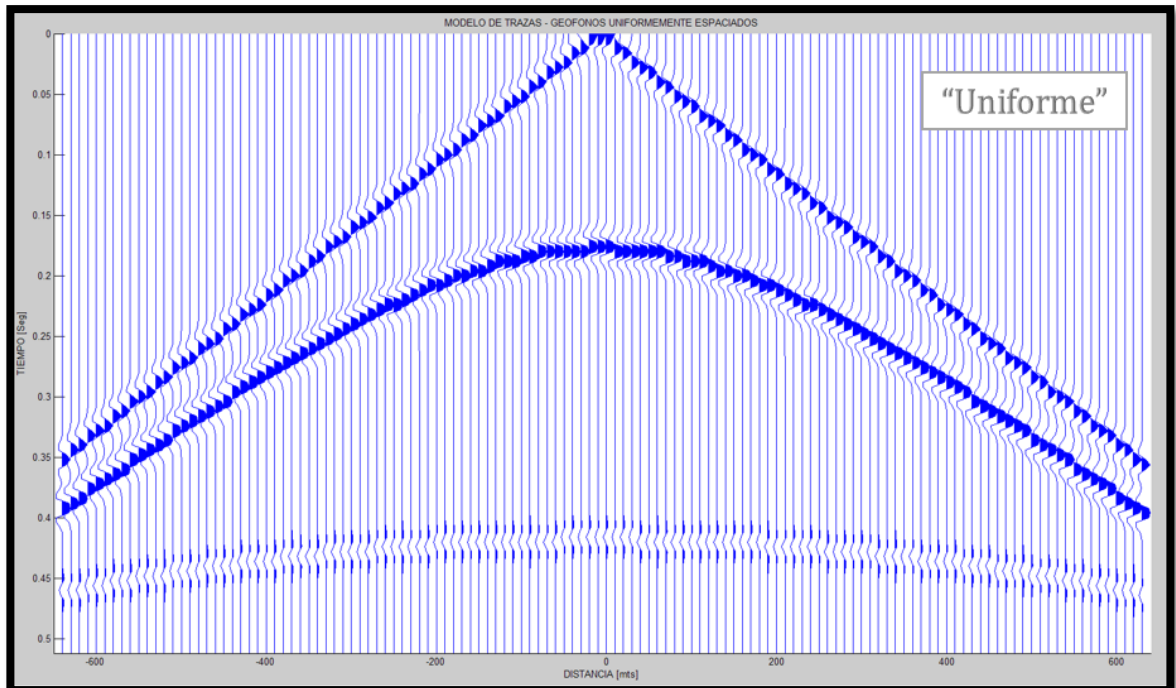
En el código implementado usando Matlab, la localización de la fuente se realiza de forma ordenada y secuencial. Además, el número de disparos a es igual al número de receptores existentes. Este método de adquisición se puede observar en la figura 23.

Figura 23: Arreglo uniforme Matlab.



Fuente: Autor

Figura 24: Adquisición sintética de trazas sísmicas (espaciamiento uniforme).

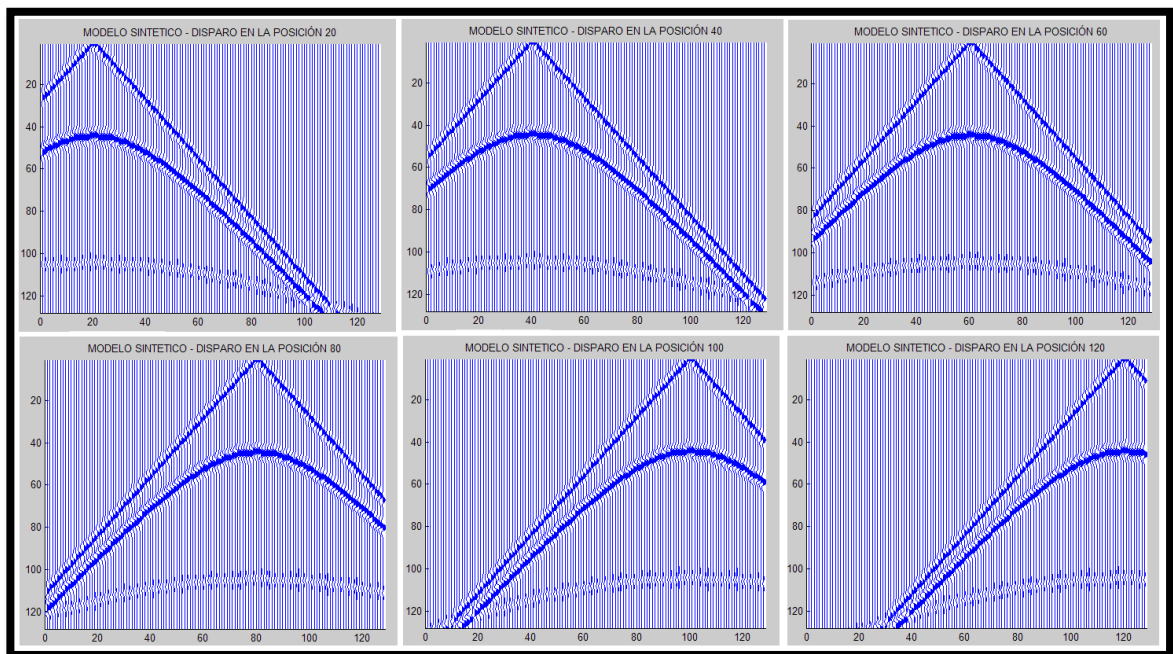


Fuente: Autor

Las trazas sintéticas obtenidas con el arreglo uniforme de geófonos se pueden visualizar en la figura 24. En la figura se observa en el eje horizontal el número de geófonos, y en el eje vertical el tiempo. En la figura 24 se puede visualizar claramente los tres tipos de ondas: la onda directa y las dos hipérbolas correspondientes a los dos reflectores.

Las formas de las ondas se observan en todas las imágenes, sin importar la ubicación de la fuente. La figura 25 presenta 6 disparos diferentes de los 128 posibles disparos realizados. Si el modelo geológico no fuera de capas horizontales, las formas de las ondas serían diferentes.

Figura 25: Múltiples disparos (uniforme).



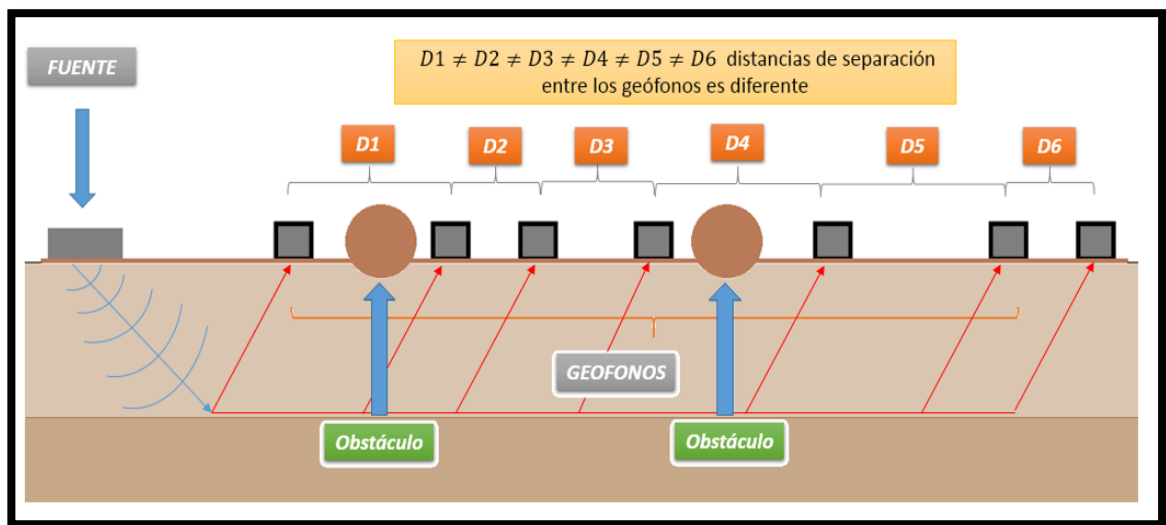
Fuente: Autor

Como se puede visualizar en la imagen 25, para el primer disparo existe un tiempo, en donde los tres tipos de ondas se mezclan y la información en este tiempo se mezcla. El parámetro *fold* juega un papel importante pues permite tomar sólo los datos con la información relevante para el modelo.

5.1.6. Geófonos y fuente aleatoriamente espaciados. A continuación se introduce la técnica de adquisición aleatoria. Esta técnica se utiliza un arreglo de geófonos y fuentes localizados en forma aleatoria sobre la superficie. Posteriormente, se elimina un porcentaje de señales adquiridas con el fin de estudiar la posibilidad de realizar una adquisición comprimida de trazas.

El procedimiento consiste en ubicar cada geófono de forma aleatoria respecto al geófono anterior, usando la misma cantidad de receptores del método uniforme. La distancia aleatoria entre geófonos debe cumplir con las condiciones de separación máxima y mínima que puede existir entre receptores. El número de disparos es igualmente un valor constante, y la localización de estas fuentes se dan en el mismo lugar en el que se localiza cada receptor.

Figura 26: Método aleatorio propuesto.



Fuente: Autor

El procedimiento es el mismo que el método convencional. Se realizan múltiples disparos variando la posición de la fuente, buscando con esto obtener los 128 conjuntos de trazas sísmicas.

La línea de geófonos en este caso, se encuentra de forma aleatoria, pero el código implementado en Matlab realiza los disparos en forma ordenada y secuencial ayudando con esto a archivar en forma de matriz los resultados obtenidos (Ver figura 27). Un ejemplo de las trazas aleatorias adquiridas sintéticamente se puede visualizar en la figura 28. En la figura 28, se puede observar la onda directa, y las hipérbolas que resultan debido a los reflectores del modelo geológico.

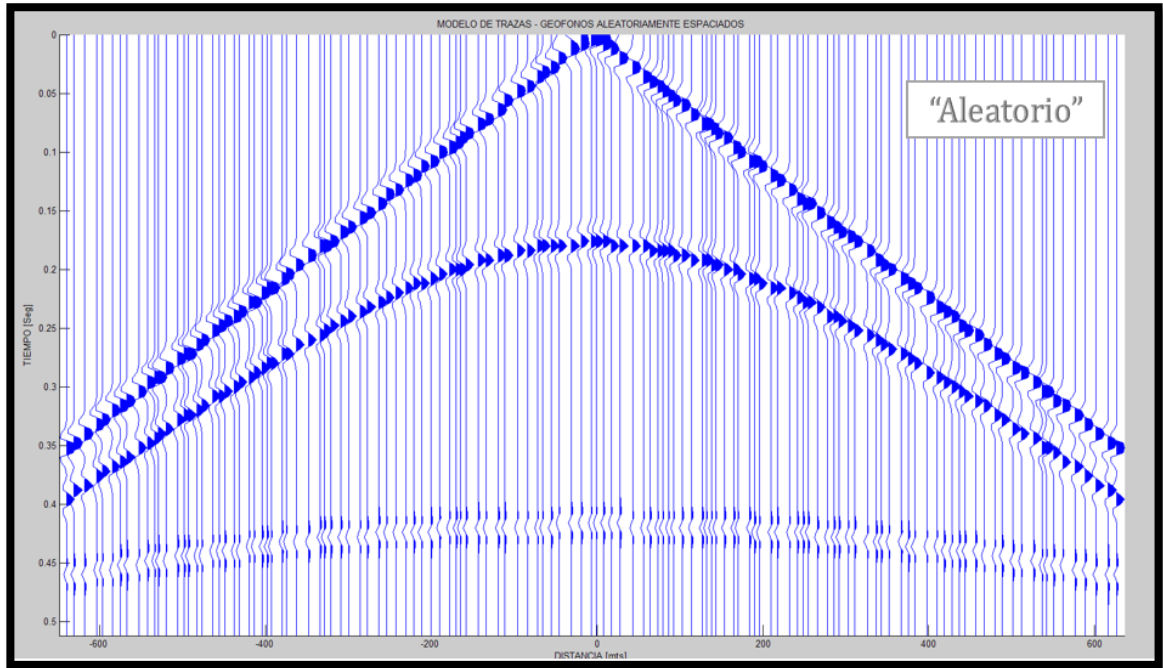
Figura 27: Arreglo aleatorio Matlab.



Fuente: Autor

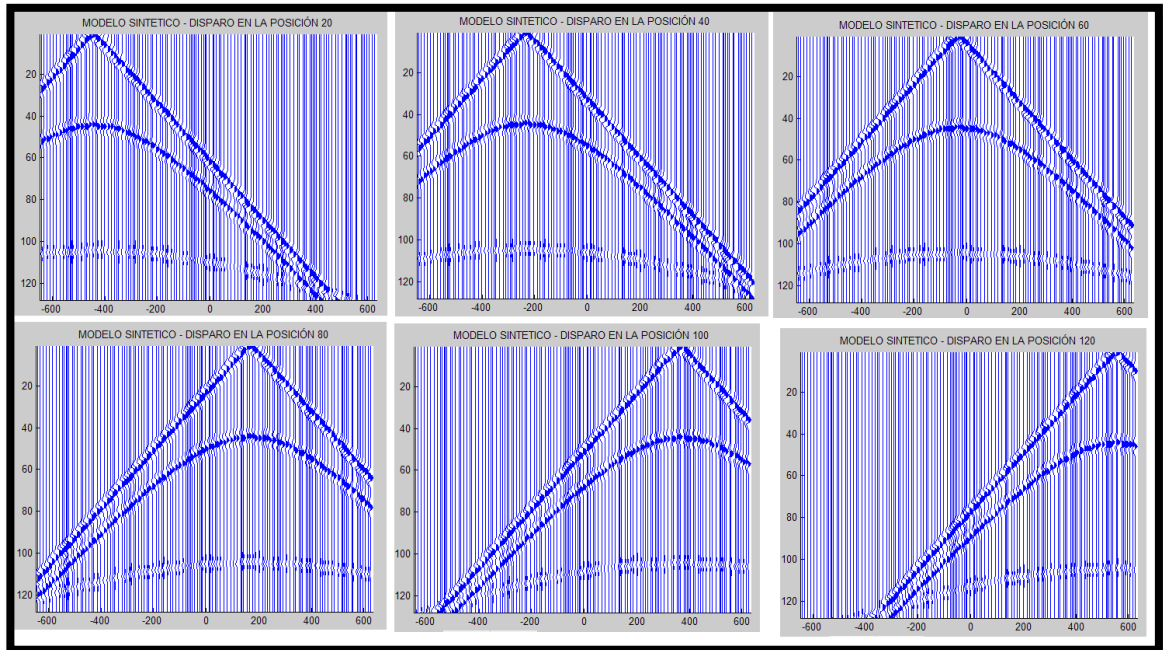
La figura 28 presenta las trazas obtenidas de un disparo en la posición central de la línea de geófonos con un arreglo de geófonos aleatoriamente espaciados. En la figura 29 se muestran 6 posiciones diferentes de la fuente, donde se pueden observar nuevamente las tres ondas características.

Figura 28: Trazas sintéticas (distribución aleatoria).



Fuente: Autor

Figura 29: Múltiples disparos (distribución aleatoria).

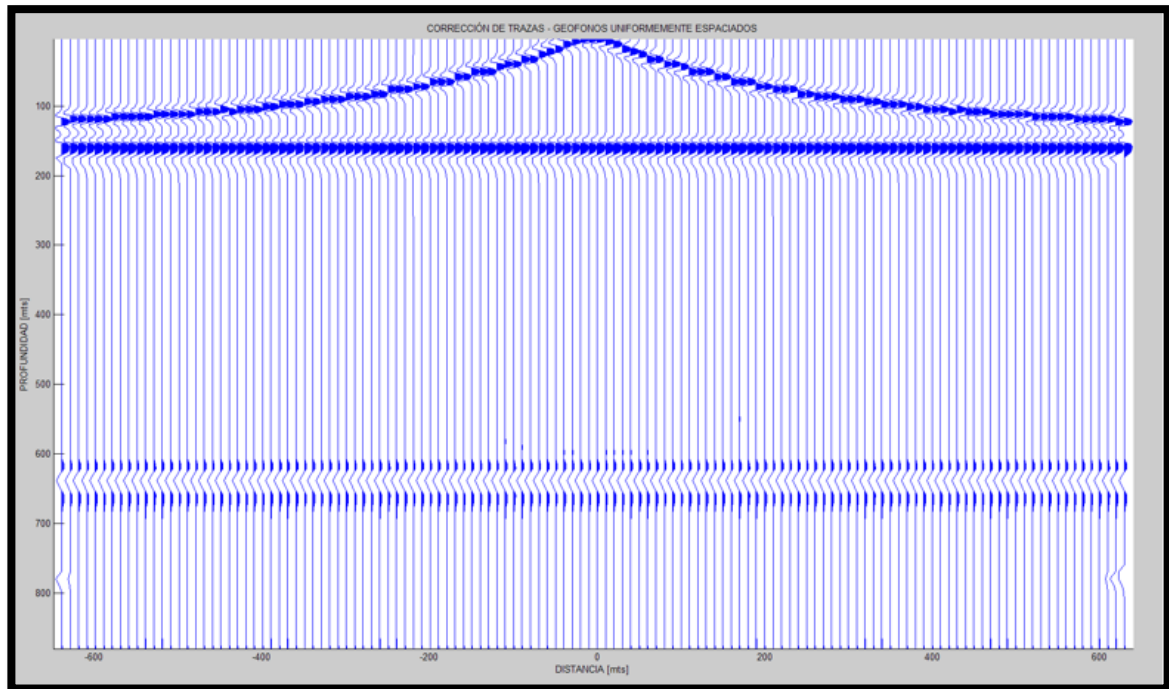


Fuente: Autor

5.2. Proceso inverso (etapa C de la figura 8).

5.2.1. Geófonos y fuente uniformemente espaciados. Para recuperar la imagen del subsuelo (o la localización de los reflectores), a partir de las trazas adquiridas, el procedimiento siguiente es la corrección a profundidad de las 128 trazas. Este método hace uso de las ecuaciones presentadas anteriormente en forma inversa, teniendo como variable desconocida la profundidad de las capas y como información de entrada las trazas y los valores de velocidad de propagación de onda del modelo sintético.

Figura 30: Corrección de trazas sísmicas modelo uniforme.



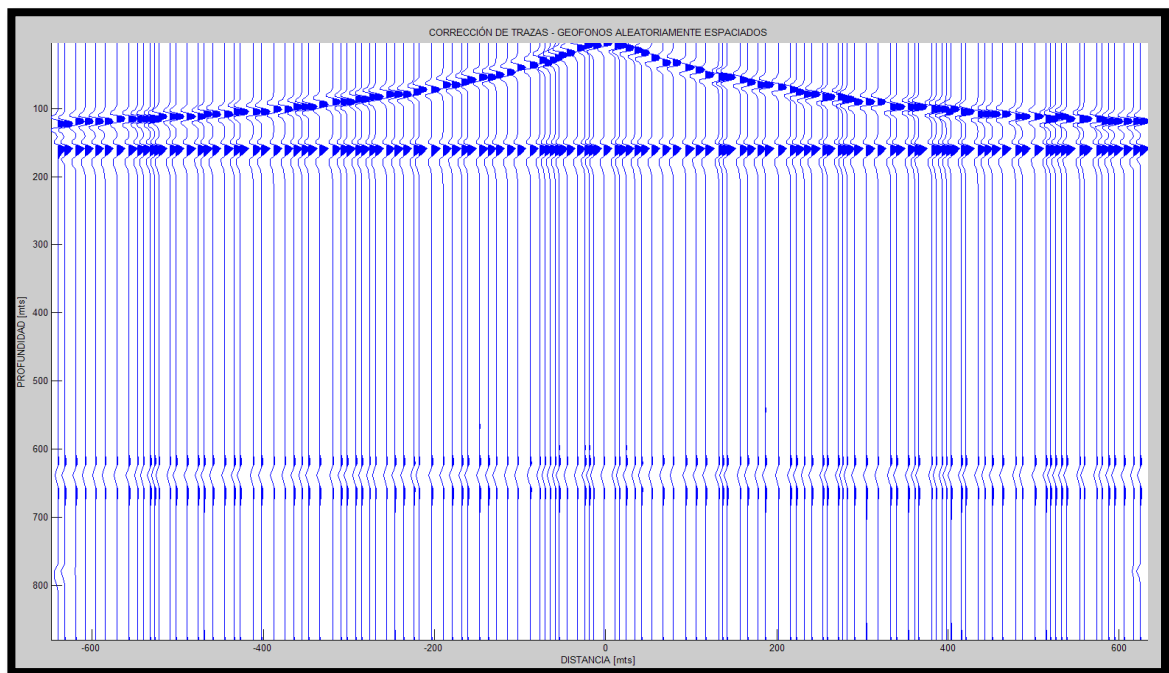
Fuente: Autor

La figura 30 muestra la corrección a profundidad de las trazas sísmicas obtenidas anteriormente, y que se visualizan en la figura 24. En esta imagen, el eje horizontal corresponde a la distancia de los receptores a la fuente y el eje vertical corresponde a la profundidad. El procedimiento de corrección se realiza para las 128 imágenes obtenidas con los 128 disparos realizados.

Cada posición fija de un geófono recibe información del mismo punto del subsuelo para diferentes disparos. Por esta razón, el siguiente paso es sumar las trazas que corresponden al mismo sensor dentro de las 128 imágenes corregidas.

5.2.2. Geófonos y fuente aleatoriamente espaciados. Como se explicó para el modelo uniforme el siguiente paso es la corrección de las trazas de tiempo a profundidad, éste es un proceso inverso, teniendo como entrada las trazas sísmicas y la velocidad de propagación de onda sobre el modelo geológico. La figura 31 muestra la corrección de trazas sísmicas para el arreglo aleatorio de geófonos.

Figura 31. Corrección de trazas sísmicas modelo aleatorio.

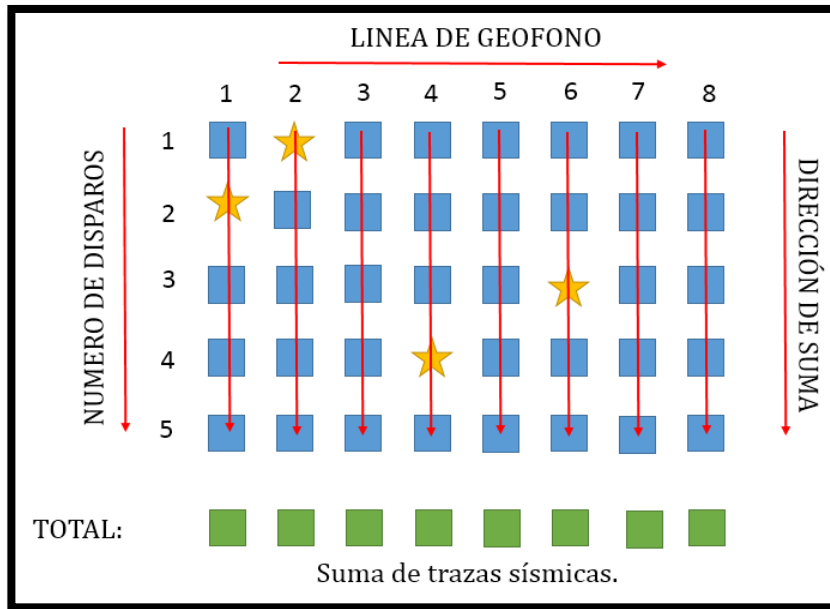


Fuente: Autor

5.3. Suma de trazas sísmicas (etapa D de la figura 8).

5.3.1. Geófonos y fuente uniformemente espaciados.

Figura 32: Suma de trazas por disparo (uniforme).

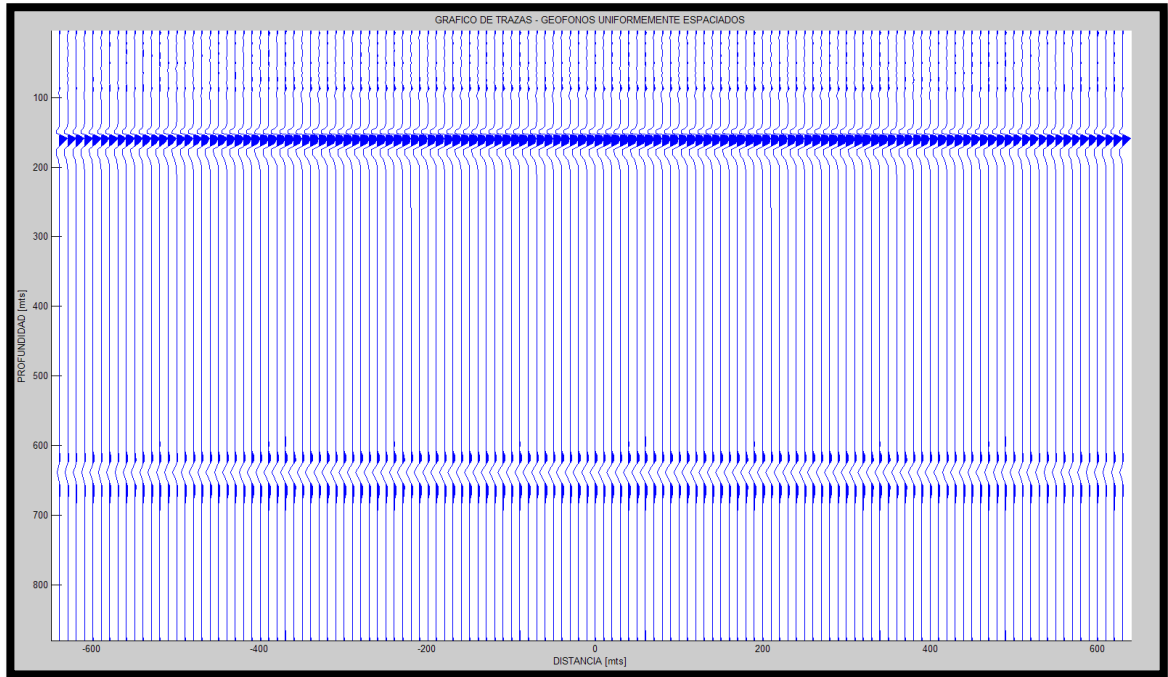


Fuente: Autor

La figura 32 representa el procedimiento de suma de trazas, el cual consiste en sumar la señal obtenida por cada geófono, en cada uno de los diferentes disparos realizados. El número de trazas a sumar depende del modelo geológico y de la ubicación de los reflectores. Realizando el procedimiento adecuado se obtienen 128 señales con información relevante de la ubicación de los reflectores (Ver figura 33).

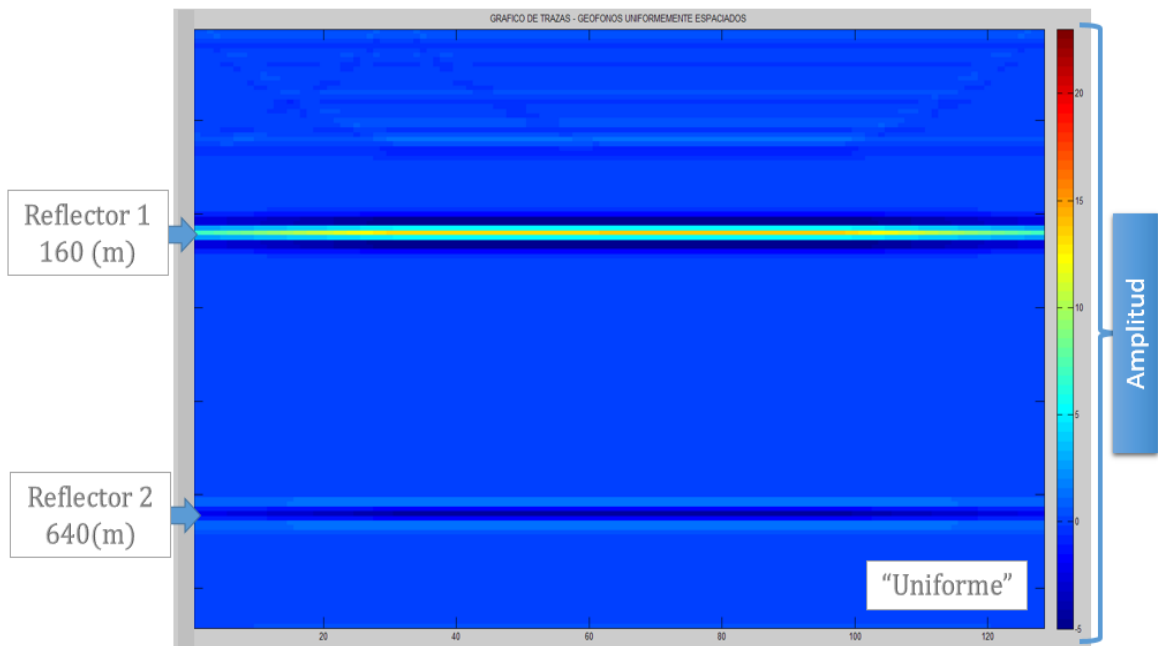
La figura 34 presenta los resultados, donde se puede visualizar con mayor facilidad la ubicación de los reflectores. Como se puede ver, el valor del reflector 1 es positivo, y el valor del reflector 2 es negativo, debido a los valores de impedancia acústica.

Figura 33: Suma de trazas (uniforme).



Fuente: Autor

Figura 34: Reconstrucción de los reflectores (distribución uniforme).

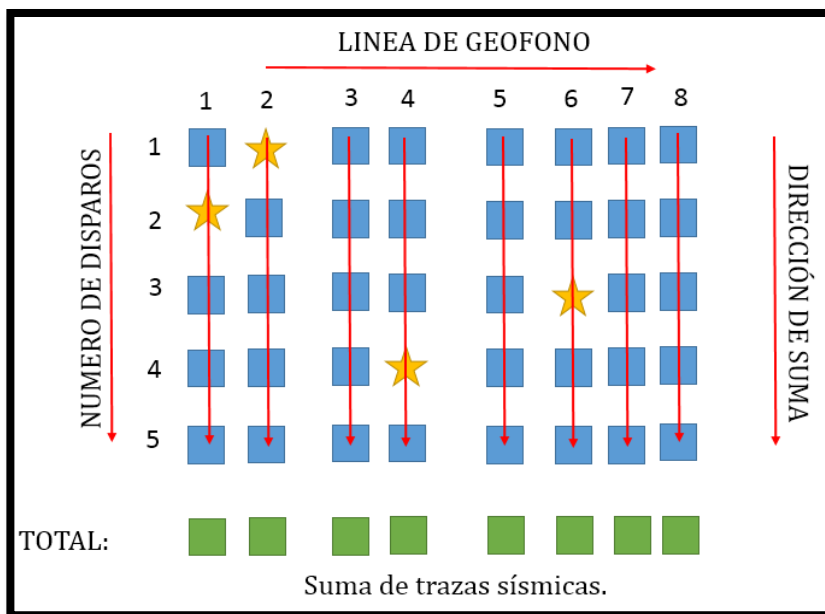


Fuente: Autor

5.3.2. Geófonos y fuente aleatoriamente espaciados. Teniendo las 128 conjuntos de trazas corregidas, al igual que con el método uniforme, se procede a realizar la suma de trazas usando un valor del *fold* de 30. Esto permite mejorar la calidad de los reflectores que queremos encontrar en las imágenes.

La suma se realiza de la misma forma que en el método uniforme. La figura 35 muestra cómo se debe realizar la suma de trazas.

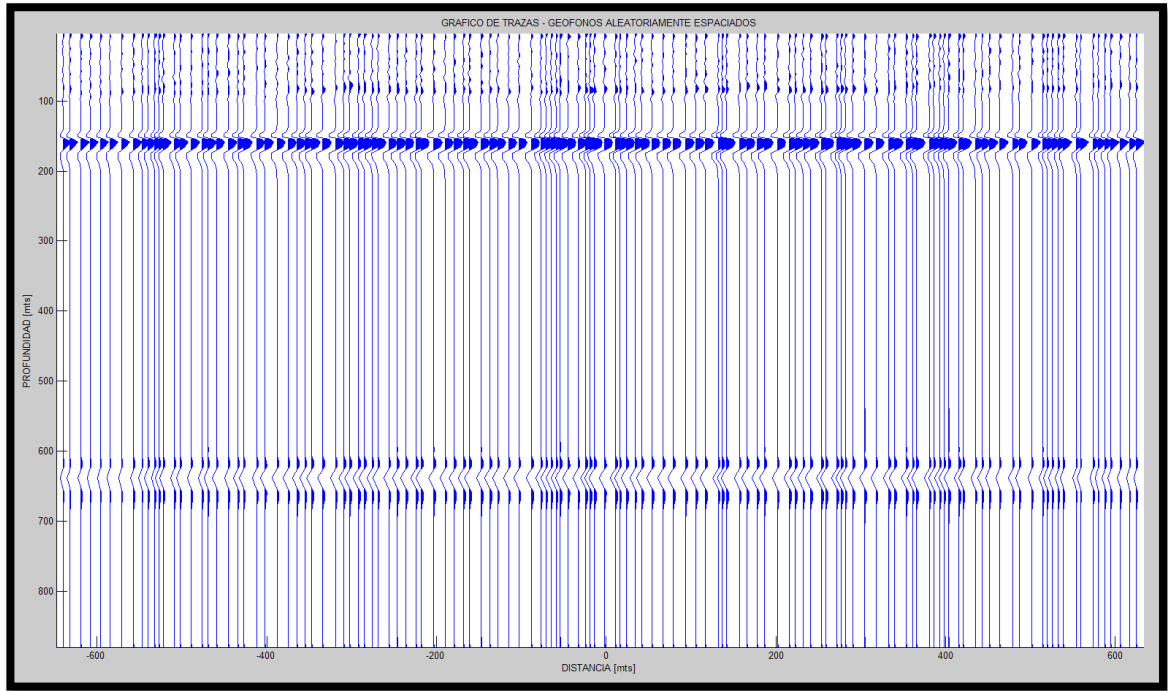
Figura 35: Suma de trazas por disparo (distribución aleatoria).



Fuente: Autor

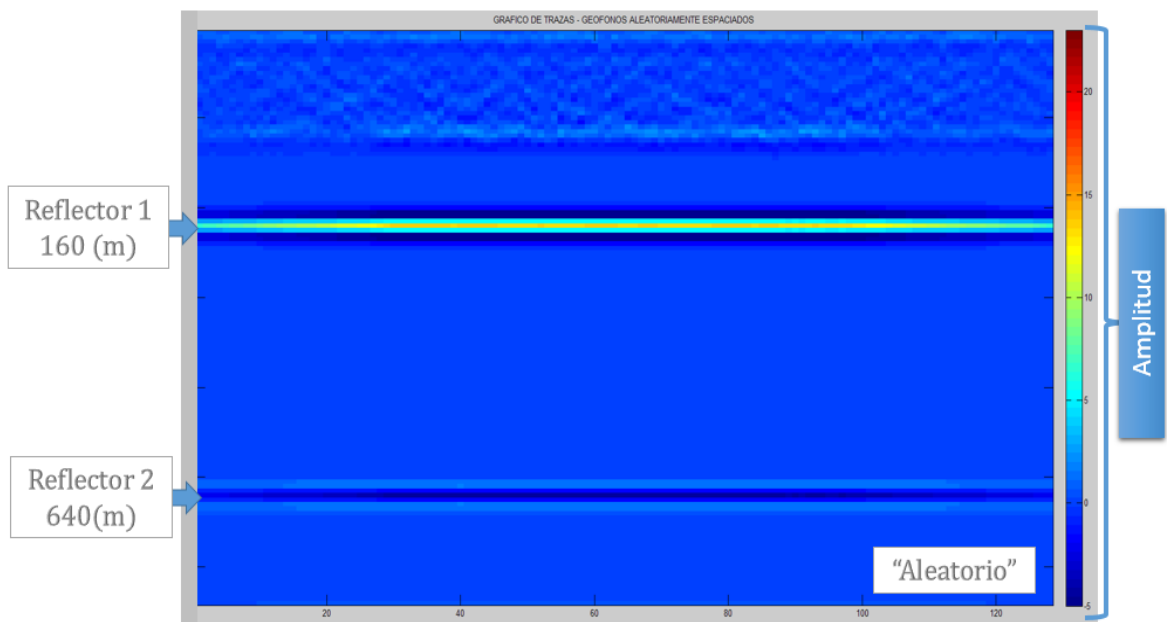
La figura 36 muestra la suma de las trazas con el modelo aleatorio. Se puede observar que conserva el mismo comportamiento del método convencional. La figura 37 muestra los reflectores con mayor detalle y los valores correspondientes a la amplitud máxima y mínima de los reflectores.

Figura 36: Suma trazas (distribución aleatoria).



Fuente: Autor

Figura 37: Reconstrucción de los reflectores (distribución aleatoria).



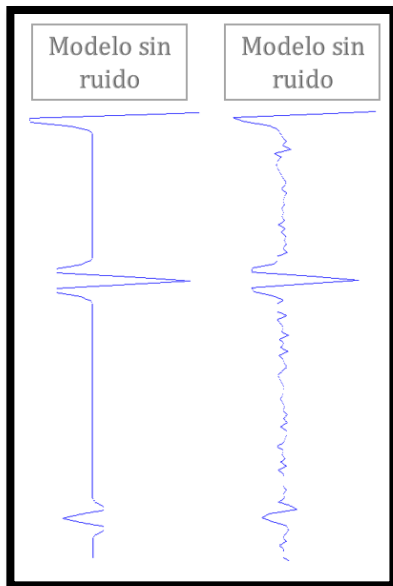
Fuente: Autor

Por lo que se puede observar, los resultados son similares, aunque las amplitudes sean las mismas, en algunas partes difieren los resultados, ya que depende de la aproximación de los receptores el valor de la amplitud mostrada, a medida que más geófonos se encuentran en un espacio de terreno más corto, la información de esa área será mejor y por consiguiente será más sencillo localizar los reflectores.

5.4. Nivel de ruido en la adquisición.

El ruido son ondas naturales que se encuentran presentes y se propagan en todos los medios. Los tipos de ruido presentes al realizar una exploración sísmica depende de muchos factores de los alrededores, como la ubicación (ríos y animales), el clima (lluvias y tormentas), el nivel urbanístico (vehículos, aviones, ruido de personas), etc. El ruido dificulta la interpretación de los datos en una adquisición sísmica.

Figura 38: Comparación de modelos.



Fuente: Autor

Para acercar la adquisición sintética simulada en esta tesis al caso de una adquisición real, se añade diferentes niveles de ruido a los datos, para simular ambientes externos reales y se repiten los procesos anteriores.

Se estudiaron 3 tipos de ambientes con diferentes niveles de ruido: un ambiente donde el factor de ruido es pequeño, en un segundo caso un ambiente con ruido mediano, y un tercer caso con altos niveles de ruido.

Para los 3 tipos de ambientes, se calcula las relaciones señal a ruido dada por:

$$SNR_{[dB]} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{señal\ sin\ ruido}}{P_{ruido}} \right)$$

Donde:

$P_{señal\ sin\ ruido}$ = Potencia de la señal libre de ruido

P_{ruido} = Potencia del ruido aleatorio

Los valores obtenidos en decibeles (dB) son:

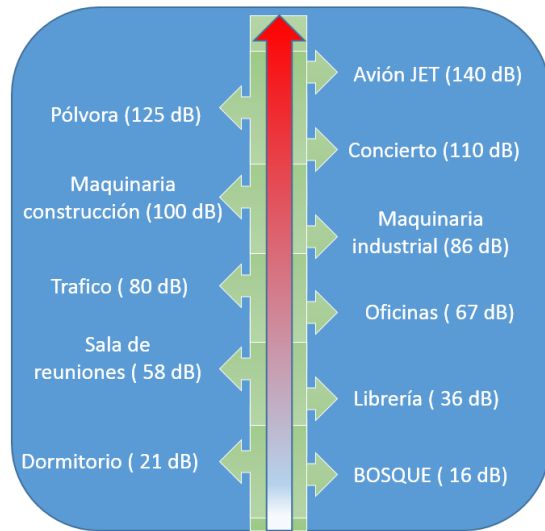
Tranquilo: PSNR = 52,2510 (dB).

Normal: PSNR = 32,2455 (dB).

Ruidoso: PSNR = 18,2652 (dB).

La figura 39, representa algunos factores de ruido producidos en algunas actividades u objetos.

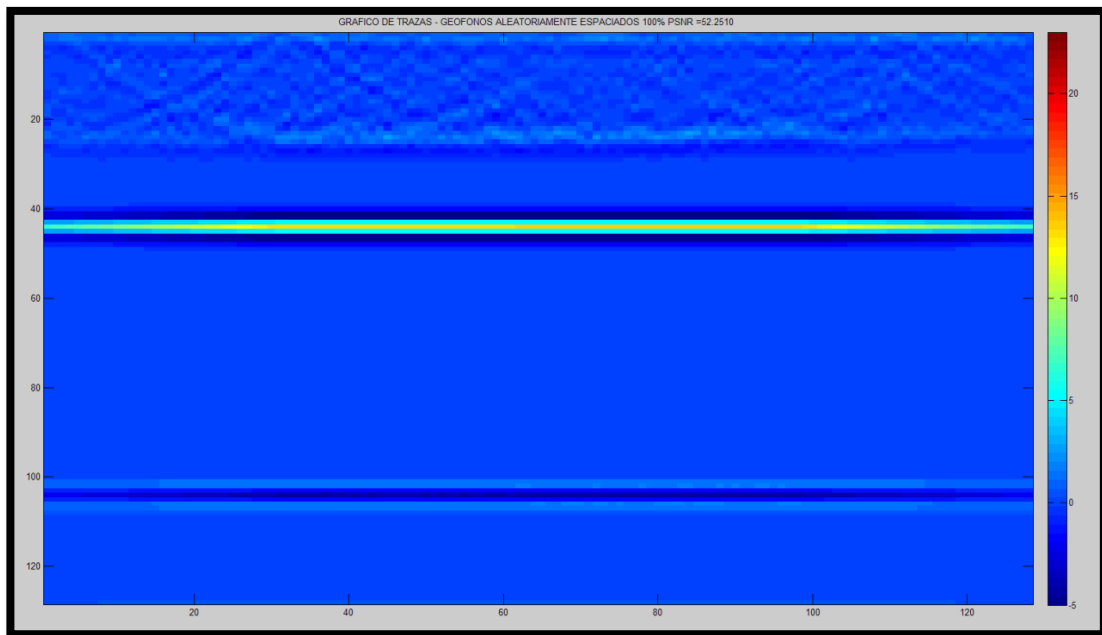
Figura 39: Factores de ruido en decibeles.



Fuente: Modificado de [5]

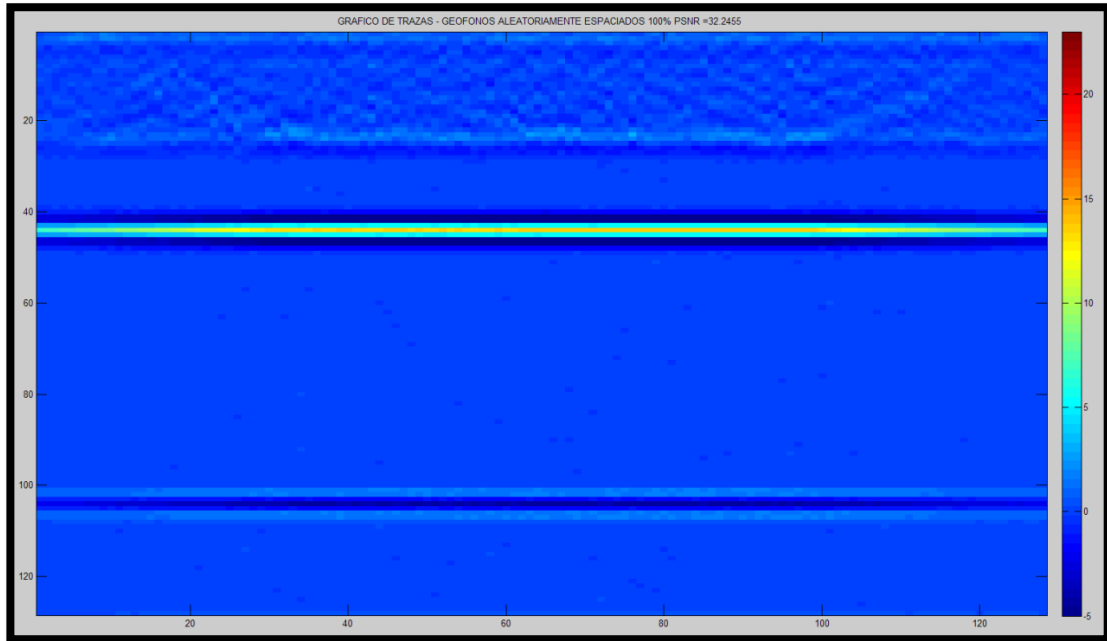
Las imágenes del subsuelo obtenidas usando una adquisición aleatoria en los 3 tipos de ambientes con ruido se muestran en las figuras 40, 41 y 42.

Figura 40: Reconstrucción de los reflectores – Ruido SNR = 52,2510 dB.



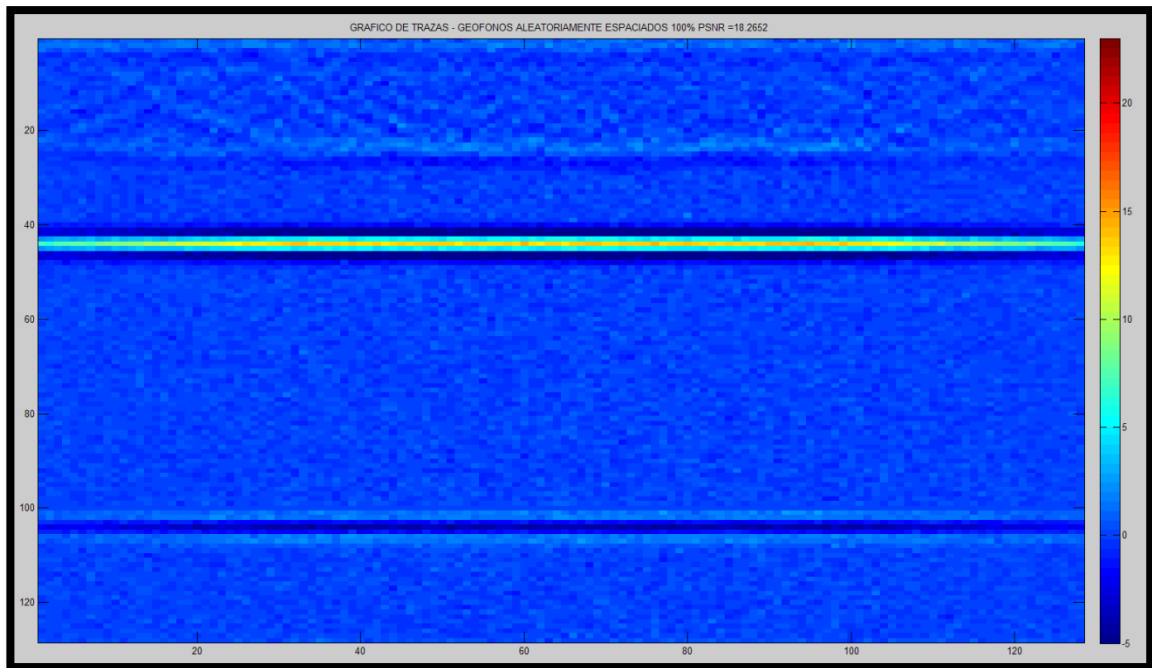
Fuente: Autor

Figura 41: Reconstrucción de los reflectores – Ruido SNR = 32,2455 dB.



Fuente: Autor

Figura 42: Reconstrucción de los reflectores – Ruido SNR = 18,2652 dB.

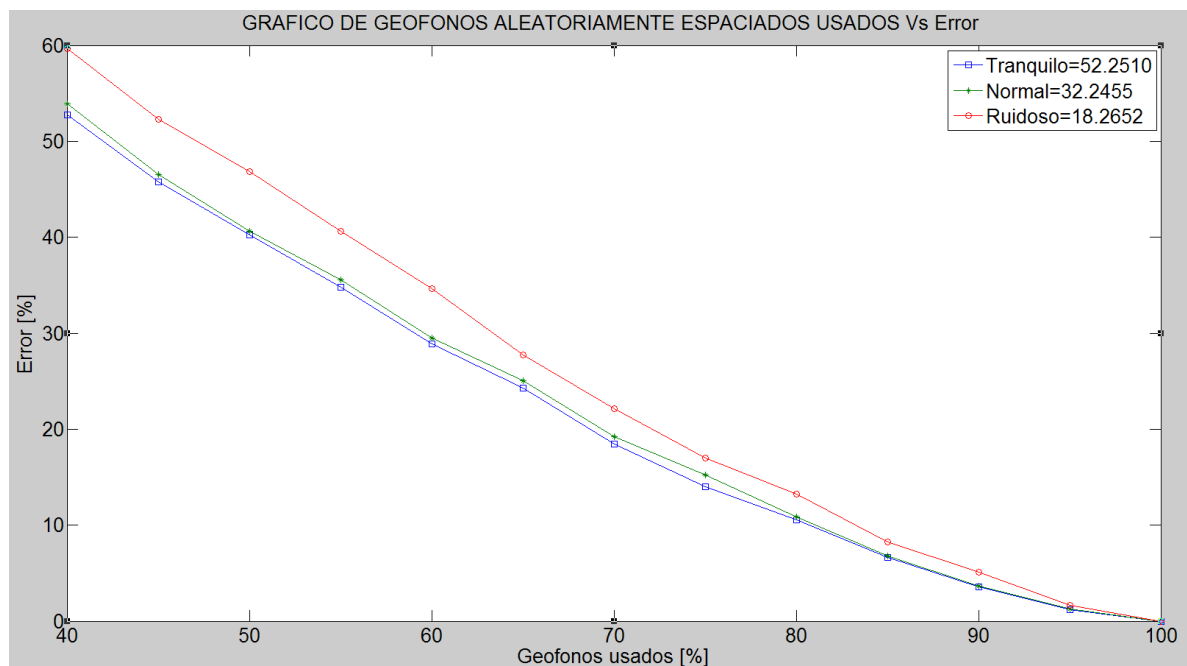


Fuente: Autor

En los resultados presentados en las figuras 40, 41 y 42, se puede concluir que a medida que el ruido aumenta, es más difícil localizar los reflectores del subsuelo. Sin embargo, debido a la simplicidad del caso geológico de estudio, donde los reflectores son horizontales, aún se pueden visualizar los reflectores en la imagen con una baja relación señal a ruido. En zonas geológicas más complejas, el ruido puede eliminar completamente los reflectores de interés.

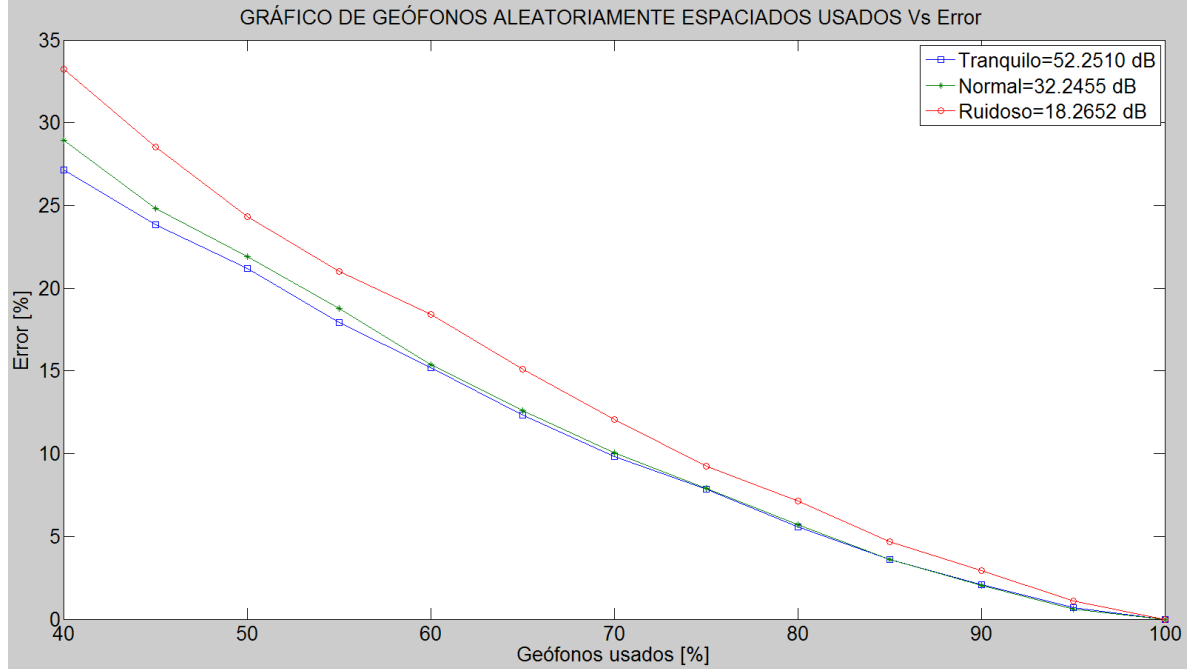
El uso de un gran número de sensores es costoso. En algunos casos la ubicación de estos receptores no es necesario pero obligatorio para el uso del método convencional. El método aleatorio, permite la ubicación de mayor cantidad de sensores donde sea de mayor interés y reducir la cantidad de sensores donde la información no es tan relevante. Por este motivo se realiza un análisis de cantidad de sensores usados vs. el error en la imagen obtenida del subsuelo.

Figura 43: Método aleatorio - Fold = 30



Fuente: Autor

Figura 44: Método aleatorio - Fold = 20



Fuente: Autor

Se puede observar en las figuras 43 y 44, que a medida que usamos más porcentaje de geófonos (donde 100% corresponde a 128 geófonos), disminuye el error en la imagen del subsuelo. El eje vertical corresponde al error entre la imagen construida y la imagen original. La norma L2 del error está dado por:

$$Error = \frac{1}{N} || X - X_{reconstruida} ||_2 \quad (14)$$

Donde X es la imagen original y $X_{reconstruida}$ es la imagen reconstruida cuando se utiliza solo un porcentaje de geófonos. N equivale al número de píxeles de la matriz, para este caso es de 128^2 .

Este comportamiento es similar para todos los niveles de ruido y para los diferentes valores de *fold* utilizados en las simulaciones (*fold*=20 y *fold*=30).

6. CONCLUSIONES

Al finalizar este trabajo se logra cumplir con los objetivos propuestos y se puede concluir lo siguiente:

- Se diseñó un modelo geológico de 3 capas que permitió realizar el estudio de propagación de ondas en múltiples capas.
- Se simuló en MATLAB la imagen que se obtendría del modelo geológico usando un arreglo de geófonos uniformemente espaciados.
- Se simuló en MATLAB la imagen que se obtendría del modelo geológico usando un arreglo de geófonos aleatoriamente espaciados.
- Se compararon las imágenes sísmicas obtenidas con los dos métodos de distribución de los geófonos y se observó que la amplitud máxima se ubicaba en la profundidad de los reflectores cuando la adquisición se realiza en un ambiente normal o tranquilo. Sin embargo, la ubicación de la amplitud máxima no corresponde necesariamente al mismo pixel en las imágenes obtenidas con los dos métodos.
- La técnica de distribución no-uniforme de sensores desarrollada en la tesis, permite la ubicación de alta densidad de receptores en las zonas donde se requiere mayor resolución en las imágenes, y la ubicación de pocos receptores en las zonas donde no se necesita alta resolución.
- El uso de este método de distribución aleatorio de geófonos desarrollado en la tesis, cumpliría con el objetivo de ayudar a preservar el medio ambiente, ya que la reubicación de los receptores disminuirá la cantidad de deforestaciones necesaria en una adquisición real.

- La potencia del ruido influye notoriamente en los resultados obtenidos. Si la relación señal a ruido es baja, es más difícil localizar los reflectores en la imagen sísmica.
- El método aleatorio estudiado permite reducir costos de adquisición, ya que se podría reducir la cantidad de receptores y el tiempo requerido para la ubicación de los mismos en campo.

7. RECOMENDACIONES

- Se recomienda para un trabajo futuro estudiar esta técnica de adquisición aleatoria, utilizando un modelo de capas no horizontales.
- En un trabajo futuro se debe estudiar el factor de atenuación que ocurre durante la propagación de ondas acústicas del subsuelo.
- Se recomienda para próximos trabajos estudiar la influencia de otros factores que se observan en una adquisición sísmica real como: ondas Rayleigh, reflexiones múltiples y las ondas convertidas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Londoño y J. Pinto , «Metodología para la implementación de un proyecto de exploración sísmica terrestre en Colombia,» Bucaramanga, 2013.
- [2] Büel y Kjaer, «ENVIRONMENTAL NOISE,» [En línea]. Available: <http://www.bksv.com/doc/br1626.pdf>. [Último acceso: 05 01 2015].
- [3] H. Jakob y OTROS, «Acústica de pozo,» 2006. [En línea]. Available: http://www.slb.com/~/media/Files/resources/oilfield_review/spanish06/sum06/p36_45.pdf. [Último acceso: 24 10 2014].
- [4] H. Vera, «Procesamiento de datos de sísmica de reflexión de alta resolución para la obra: Plataforma del corredor Norte-Noroeste del tren de alta velocidad ubicado en Durense, Galdia, España,» Sartenesas, 2008.
- [5] H. Yajaira y OTROS, «Manual para la adquisición y procesamiento de sísmica terrestre y su aplicación en Colombia,» Bogota, 2010.
- [6] M. Diana, «Modelamiento geomecánico 3D a partir de un modelo de velocidad intervalica de alta resolución vertical usando inversión sísmica,» Tesis Grado, 2014.
- [7] O. Yilmaz, Seismic Data Analysis: Processing, Inversion and Interpretation of seismic data, Hardcover, 2001.
- [8] R. PhDst. Rodríguez, «Métodos Geofísicos,» Universidad Nacional de Colombia, Medellín, [En línea]. Available: <http://www.unalmed.edu.co/rrodriguez/geologia/sismica.htm>. [Último acceso: 30 10 2014].
- [9] Stemm, «STEMM,» STEMM EQUIPOS INDUSTRIALES, [En línea]. Available: http://www.stemm.com/espanol/pdf/tabla_densidades.pdf. [Último acceso: 4 11 2014].
- [10] SHERIFF y GELDART, EXPLORACIÓN SISMOLÓGICA - PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE DATOS, MEXICO: Noriega - LIMUSA, 1991.

- [11] V. Julian, «Adquisición y procesamiento de datos sísmicos someros 2D en la falla de bucaramanga en el área de Piedecuesta (Santander),» Bucaramanga, 2009.

ANEXOS

ANEXO A. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

El método convencional para adquirir datos sísmicos consiste en usar un arreglo de geófonos uniformemente espaciados localizados en superficie.

Para la realización de una adquisición sísmica, la industria del sector de hidrocarburos debe contar con planificaciones ambientales adecuadas. Existen algunos documentos guía, que fueron diseñados para prevenir efectos no deseables en el terreno durante la realización de actividades relacionadas con las adquisiciones sísmicas⁵.

Para poder entender un proceso de adquisición sísmica durante la exploración de hidrocarburos, es necesario estudiar algunas características de la propagación de ondas acústicas en el subsuelo.

A continuación se presenta una descripción de algunas de las características más importantes de esta tesis.

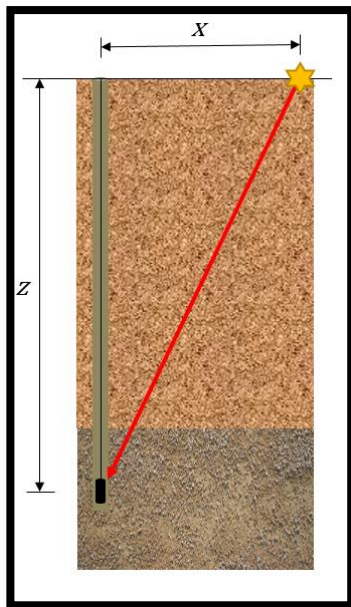
VELOCIDAD SÍSMICA.

La velocidad sísmica es uno de los factores más relevantes en la propagación de ondas acústicas en el subsuelo. Las velocidades de propagación de las ondas acústicas en una adquisición sísmica, se pueden obtener por medio de registros de pozos anteriores cercanos, o utilizando el método convencional. Este método consiste en realizar una perforación profunda colocando un geófono dentro de él por medio de un cable luego se realizan varios disparos (que pueden ser dinamita o a través de martillos) y

⁵ Guía básica ambiental para programas de exploración sísmica terrestre. Santafé de Bogotá, 1997. Disponible: < http://codechoco.gov.co/files/GUIA_EXPLORACION_SISMICA%281%29.pdf > [CONSULTA: 1/11/2014]

se registra el tiempo que requiere la onda para viajar desde la fuente ubicada en la superficie cerca del pozo hasta el geófono dentro del pozo.

Figura 45: Ejemplo de perforación (velocidades de las capas).



Fuente: Modificado de [1].

En las capas terrestres, el valor de las velocidades de propagación de onda longitudinal depende de las constantes elásticas y la densidad. La densidad de una roca depende directamente de los materiales que la componen. Además ambos factores dependen de la porosidad de la roca, las propiedades de los fluidos internos, la presión, la profundidad, la cementación y el grado de compactación de la roca. Altos valores de densidad comúnmente corresponden a altas velocidades de propagación de onda. También, a mayor porosidad menor el valor de la velocidad de onda P. estas características pueden visualizarse en la figura 8.

$$V_p = \text{Función (\%Porosidad)}$$

$$V_p = \text{Función (Profundad)}$$

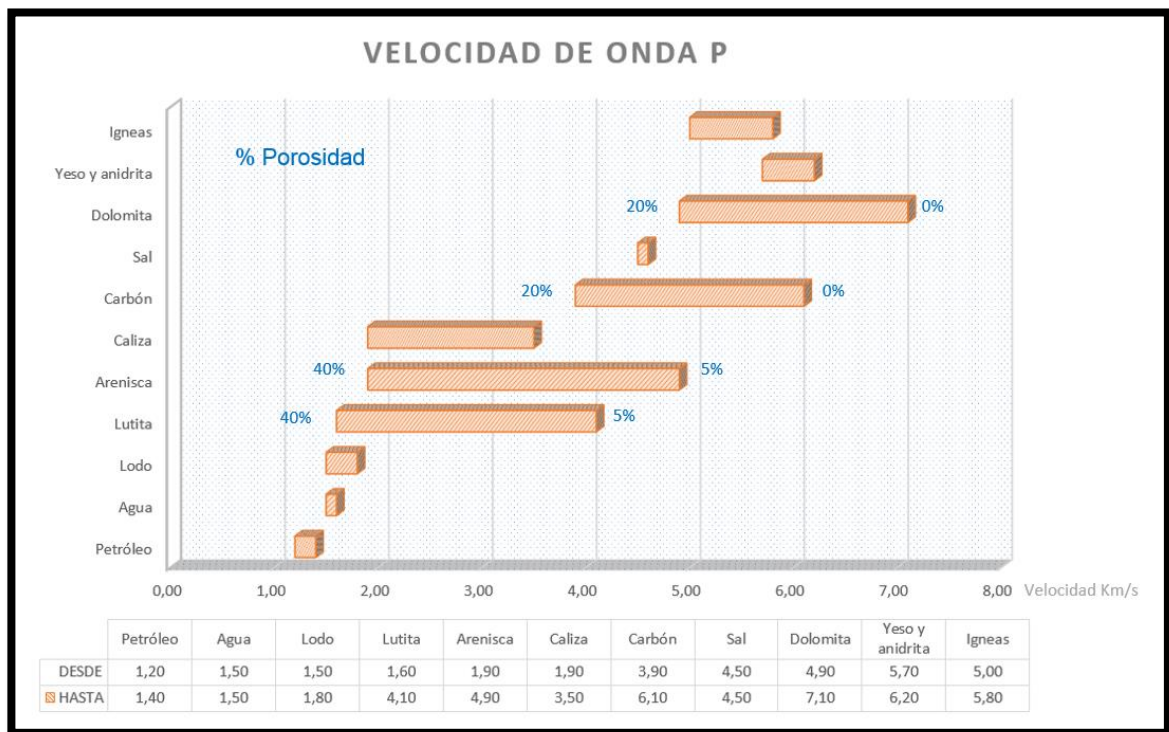
En un medio isotrópico y homogéneo⁶ la velocidad de propagación de las ondas P puede tener un comportamiento:

$$v_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}}$$

K = modulo de compresibilidad
 μ = modulo de rigidez
 ρ = densidad del material

Para algunos tipos de roca se tiene predeterminado unos valores de velocidad de propagación de onda P (Figura 8) teniendo en cuenta las características anteriormente mencionada.

Figura 46: Velocidad de onda P.



Fuente: Modificado de [1].

⁶ Un medio isotrópico y homogéneo se refiere a propiedades idénticas en todas las direcciones de las capas.

El valor de la velocidad de propagación de las ondas acústicas también puede variar de alguna manera con la temperatura y el fluido interno en la roca. Por ejemplo la velocidad puede tener un decremento del 5% al 6% por cada 100°C⁷.

La roca también puede estar saturada con fluido. Este fluido puede ser cantidades variadas de agua salada, petróleo o gas que modifican, según la cantidad de fluido presente, las características de las rocas y con esto la velocidad de propagación de la onda sobre ellas.

DENSIDAD.

Los valores de la densidad dependen de los compuestos de la roca. Estos valores al igual que la velocidad de propagación se pueden encontrar en diferentes textos para algunos tipos de materiales. Ver la tabla 1, donde se presentan algunos valores de densidad que serán usados en este trabajo.

Tabla 1. Densidades de rocas representativas⁸.

Materia	Densidades	
	Rango	Media
	<i>g/cm³</i>	
Granito	2.51 - 2.81	2.67
Diorita	2.68 - 2.96	2.84
Diabasa	2.85 - 3.12	2.98
Gabro	2.86 - 3.11	2.96
Gneiss	2.59 - 3.06	2.71
Esquisito	2.70 - 3.03	2.80
Arenisca	2.17 - 2.70	2.42
Caliza	2.37 - 2.77	2.60
Lutita	2.06 - 2.66	2.38

Fuente: Tomado de [1].

⁷ R.E. Sheriff y L.P. Geldart, Procesamiento e interpretación de datos – 1991

⁸ Daly y colaboradores, DENSIDADES DE ROCAS REPRESENTATIVAS, 1966.

Para otros tipos de materiales que no se encuentran en la tabla 1 y que pueden llegar a ser relevantes para esta tesis, se encuentran las siguientes densidades:

- ✓ **Arcilla:** 1 – 1.9 [g/cm³]. *Tomado de [2]*
- ✓ **Carbón mineral:** 1,2 – 1,5 [g/cm³]. *Tomado de [2]*

TIPOS DE ONDAS SÍSMICAS.

La exploración sísmica utiliza fuentes acústicas artificiales como martillo, explosivos o vibradores al momento de realizar una adquisición sísmica. Las ondas acústicas generadas por la fuente se propagan el interior de la tierra y su estudio es muy importante para la búsqueda de reflectores en el subsuelo. Las ondas que viajan en el interior del subsuelo se clasifican en:

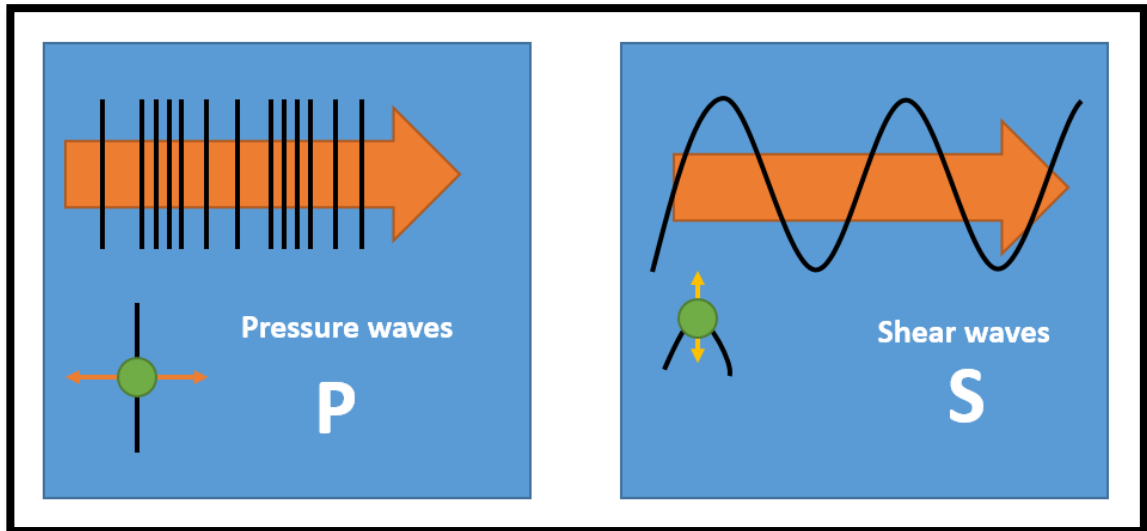
- **Ondas de compresión:**

También conocidas como ondas P, son ondas longitudinales que viajan en el subsuelo de forma paralela a la dirección de propagación, como su nombre lo dice comprimiendo y dilatando el medio en donde se propagan (figura 9a). Son las ondas que se propagan más rápido y su interpretación es más sencilla. Por esta razón, este tipo de ondas son de mayor interés para esta investigación.

- **Ondas transversales:**

También conocidas como ondas S o de corte, como su nombre lo dice son ondas transversales que viajan de forma perpendicular a la dirección de propagación (figura 9b). Son ondas más lentas que las ondas P y su aplicación no es estudiada en esta tesis.

Figura 47: Tipo de ondas internas. A) Ondas de compresión. B) Ondas transversales.



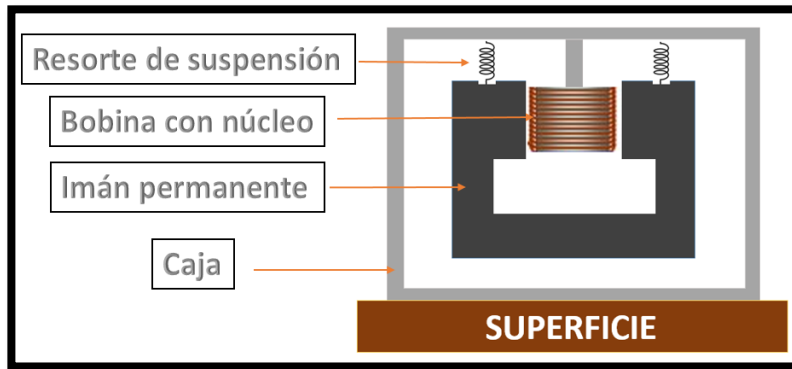
Fuente: Modificado de [3]

GEÓFONOS

Los geófonos son sensores que convierten el movimiento físico del paso de una onda sísmica en señales eléctricas, que posteriormente son procesadas e interpretadas por expertos geofísicos. Existe una variedad de geófonos y se clasifican según la estructura que lo conforma.

El geófono electromagnético es el más simple de todos. Este geófono está compuesto por una bobina con núcleo, un imán, un resorte de suspensión y un cuerpo o caja. El principio de funcionamiento de este geófono es el siguiente: cuando la onda producida por la fuente llega al geófono el cuerpo se desplaza verticalmente en diferente tiempo que el imán. Esto produce un movimiento interno entre imán y bobina, y por consiguiente una variación de potencial de la bobina. (Ver figura10).

Figura 48: Geófono electromagnético.



Fuente: Modificado de [3]

La sensibilidad del dispositivo depende de la fuerza del imán, además del número de espirales que tiene la bobina y la configuración del sistema ya sea con resortes o amortiguador. Este tipo de dispositivo también puede verse en otra forma, un imán fijo y una bobina móvil.

PROPAGACIÓN DE ONDAS SÍSMICAS EN EL SUBSUELO.

Las ondas P se propagan en las capas del subsuelo dependiendo de la composición y características de las rocas en donde se propagan. En un medio homogéneo se puede aproximar a una propagación de onda uniforme en todas las direcciones de la capa.

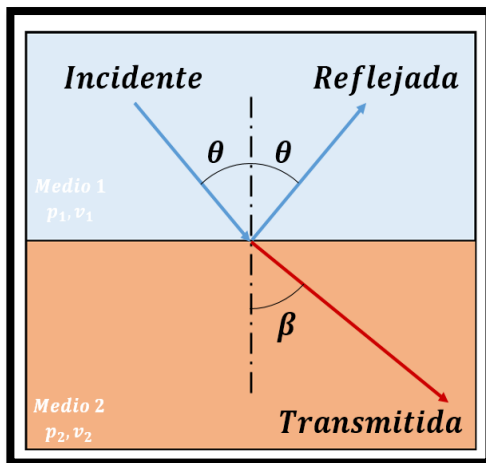
- **Capa primaria.**

El comportamiento de la onda sobre una sola capa es de forma uniforme siempre y cuando el medio en el que se propaga sea homogéneo. La trayectoria de la onda tiene un comportamiento de forma lineal en toda la capa propagada.

- **Múltiples capas**

En un medio de múltiples capas, en el instante en el cual una onda atraviesa de una capa con unas características a otra capa con características sísmicas diferentes, la onda que viaja por la primera capa se refracta y se refleja. (Ver figura 11). El comportamiento de la trayectoria y la energía de la onda anterior está definido por la ley de Snell, el cual afirma que cuando una onda elástica encuentra un cambio de propiedades elásticas del medio, parte de la energía se refleja (onda reflejada) y el resto se transmite al otro medio (onda transmitida), con cambios en la dirección de la propagación y en la velocidad.

Figura 49: Análisis en múltiples capas.



Fuente: Autor

Ecuación de Snell:

$$\frac{\sin\theta}{v_1} = \frac{\sin\beta}{v_2} = P$$

ANEXO B. CODIGO EN MATLAB PARA MODELO UNIFORME

```
%*****
% MODELO DE TRAZAS UNIFORME
%*****

%PROPIEDADES Y CARACTERISTICAS DE LAS CAPAS

v1=1800; P1=1.45; %Propiedades de la arcilla.
v2=4000; P2=2.42; %propiedades de la arenisca.
v3=5000; P3=1.35; %propiedades de carbon mineral.
h1=160; % Profundidad primera capa
h2=480; % Profundidad Segunda capa

% CARACTERISTICAS EN LA ADQUISICION

F=30; % es el valor en donde tendremos mejores resultados de la muestra
A=0; % valor porcentaje de geofonos sin mostrar.

tic
matlabpool open 4

parfor E=1:128;
[G1,
x,G1D(:, :, E)]=Modelo_de_tiempos_uniformes(E,h1,h2,v1,v2,v3,P1,P2,P3);
[G2(:, :, E),G3(:, :, E),Error_1(E,:),T0_1,tiempo_1]=correccion_modelovel_unif
orme(E,G1,x,v1,v2,h1,h2);
end

%%%SUMA DE CORRECCIONES DE LAS DOS CAPAS%%%

G4=G2+G3; %SUMA DE LAS DOS CORRECCIONES

save G4(uniforme) G4 %%%%..... SEGUN EL VALOR DE H CAMBIAR EL VALOR
DENTRO DEL ().....%%%%%%%%

nx=128; nz=128;
Q=1*ones(nx,nz);
Y=round(1.28*A);

for i=1:128;
    Q=1*ones(nx,nz);
    Y=round(1.28*A);
    v=randi([1,128],1,Y);
    for j=1:Y;
        Q(:,v(j))=0;
    end
    G5(:, :, i)=Q(:, :).*G4(:, :, i);
end
```

```

% Suma de trazas con Fold
M=0*ones(nx,nz);

for j=1:128;
    if j<(F+1);
        for i=1:(F+j)
            M(:,i,j)=1;
        end
    end
    if (F+1)<j && j<(128-F+1);
        for i=(j-F):(F+j)
            M(:,i,j)=1;
        end
    end
    if (128-F)<j;
        for i=(j-F):128
            M(:,i,j)=1;
        end
    end
end

for i =1:128
    C= M(:, :, i).*G5(:, :, i);
    D(:, :, i) = C;
end

for j=1:128;
for i=1:128;
    E(:, j, i)=D(:, i, j);
end
end

for j=1:128
for i=1:128
    G6(i, j)=sum(E(i, :, j));
end
end

GfinU=G6;
save GfinU GfinU

t0_1=(2*(h1/(v1*0.004)));
t0_2=(2*((h1/(v1*0.004))+(h2/(v2*0.004))));

clc

Vert(1,1)=(h1/t0_1);    %Valor inicial de toma de datos en distancia
vertical
horiz(1,1)=-640;    %Valor inicial de toma de datos en distancia
horizontal

for i=2:1:128;

```

```

horiz(1,i)=horiz(1,i-1)+(10);

if i<((t0_1+1))
    Vert(i,1)=Vert((i-1),1)+((h1/t0_1));
end

if i>(t0_1) && i<(t0_2+1);
    Vert(i,1)=Vert((i-1),1)+((h2)/(t0_2-t0_1));
end
if i>(t0_2)
    Vert(i,1)=Vert((i-1),1)+(10.0813);
end
end

toc
matlabpool close
clims = [-5 , 23];
plotseismic (G1D(:, :, 64));

plotseismic (G5(:, :, 64),Vert,horiz);
title('CORRECCIÓN DE TRAZAS - GEOFONOS UNIFORMEMENTE ESPACIADOS')
xlabel('DISTANCIA [mts]')
ylabel('PROFUNDIDAD [mts]')

plotseismic(GfinU,Vert,horiz);
title('GRAFICO DE TRAZAS - GEOFONOS UNIFORMEMENTE ESPACIADOS')
xlabel('DISTANCIA [mts]')
ylabel('PROFUNDIDAD [mts]')

figure, imagesc (GfinU,clims)
title('GRAFICO DE TRAZAS - GEOFONOS UNIFORMEMENTE ESPACIADOS')

```

ANEXO C. MODELO DE TIEMPOS UNIFORME.

```
function
[G1,x,G1D,Tim_1,Tim_2]=Modelo_de_tiempos_uniformes(E,h1,h2,v1,v2,v3,P1,P2
,P3)

I_1=((v2*P2)-(v1*P1))/((v2*P2)+(v1*P1));
I_2=((v3*P3)-(v2*P2))/((v3*P3)+(v2*P2));

tic;
dx=10; nx=128; nz=128; x=(0:nx-1)*dx;
Mtiempo=0*ones(nx,nz);
syms a b
for i=1:1:128;

    D(i) = abs(x(i)-x(E)); %Distancia entre la fuente y el geofono.

    T0(i)=round(D(i)/(v1*0.004));
    Tim_0(i)=T0(i);

    if Tim_0(i)==0;
        Mtiempo(1,(E))=I_1;
    else
        Mtiempo(Tim_0(i),i)=I_1;
    end

    T0_1=((2*h1)/(v1)); %Tiempo en la posición de la fuente.
    tiempo_1(i)=((2/v1)*sqrt(((D(i)/2)^2)+((h1)^2)));%Formula general
    Tim_1=round(tiempo_1/0.004);
    Mtiempo(Tim_1(i),i)=I_1;

    T0_2=round(((2*h1/(v1))+(2*h2/(v2)))/0.004);%Tiempo en la posición...
    ... de la fuente de la segunda capa.

    [sola, solb]=solve(((a^2+h1^2)*(v1/v2)*b^2)-(a^2*(b^2+h2^2)) , ...
        2*a+2*b==D(i),a,b);

    x1(i)=real(double(sola(2,1)));%Calculos de distancia X1
    x2(i)=real(double(solb(2,1)));%calculos de distancia X2

    D1(i)=sqrt((x1(i))^2+(h1^2)); %Trayectoria de la onda en la primera
capa
    D2(i)=sqrt((x2(i))^2+(h2^2));%Trayectoria de la onda en la segunda
capa

    T1(i)=2*D1(i)/v1; %Tiempo de la onda en la primera capa.
    T2(i)=2*D2(i)/v2; %Tiempo de la onda en la segunda capa.
    tiempo_2(i)=round((T1(i)+T2(i))/0.004); %Tiempo de muestreo2
    Tim_2=tiempo_2;
    Mtiempo(Tim_2(i),i)=I_2;
end
toc;
```

```
%plotseismic(Mtiempo,[],1:128);  
%save Mtiempo Mtiempo  
  
[w, tw]=ricker(0.004,40,0.2);  
%plot(tw,w); view([90,90]);  
  
for i=1:128;  
    C(:,i)=cconv(Mtiempo(:,i),w);  
end  
  
G1 = C (27:154,1:128);  
G1D = G1;
```

ANEXO D. CORRECCIÓN DEL MODELO UNIFORME.

```
function [G2,G3,Error_1,T0_1,tiempo_1]=
correcion_modelovel_uniforme(E,G1,x,v1,v2,h1,h2)

K=round((2*((h1/v1)+(h2/v2)))/0.004);

syms a b
for i=1:1:128;
    %%%CALCULO PARA CORRECCION DE LA PRIMERA CAPA%%%

    T0_1=round((2*h1)/(v1*0.004)); %Tiempo en la posición de la fuente.
    D(i) = abs(x(i)-x(E)); %Distancia entre la fuente y el geofono.

    tiempo_1(i)=round(((2/v1)*sqrt(((D(i)/2)^2)+((h1)^2)))/0.004);%Formula...
    ... general para obtener los tiempos de muestro.
    Error_1(i) = ((tiempo_1(i)-T0_1)); %Error de tiempos de propagacion
    ...
    ... entre el inicial y el obtenido.

    G2(1:K-4,i) = circshift ( G1(1:K-4,i) , (-Error_1(i))); %realizar la
    ...
    ... correccion a los valores del 1:85.
    G2(K-4:128,i)=0; %Coloca ceros en la matriz desde 85 al 128

    %%%CALCULO PARA CORRECCION DE LA SEGUNDA CAPA%%%

    T0_2=round(((2*h1/(v1)))+(2*h2/(v2)))/0.004);%Tiempo en la posición...
    ... de la fuente de la segunda capa.

    [sola, solb]=solve(((a^2+h1^2)*(v1/v2)*b^2)-(a^2*(b^2+h2^2)) , ...
        2*a+2*b==D(i),a,b);

    %(0.4375*b^2*a^2+230400*a^2-14400*b^2==0)
    %((sqrt(a^2+h1^2)*(v1/v2)*b)-(a*sqrt(b^2+h2^2))==0)
    %((a^2+h1^2)*(v1/v2)*b^2)-(a^2*(b^2+h2^2)) %GENERAL

    x1(i)=real(double(sola(2,1)));%Calculos de distancia X1
    x2(i)=real(double(solb(2,1)));%calculos de distancia X2

    D1(i)=sqrt((x1(i))^2+(h1^2)); %Trayectoria de la onda en la primera
    capa
    D2(i)=sqrt((x2(i))^2+(h2^2));%Trayectoria de la onda en la segunda
    capa

    T1(i)=2*D1(i)/v1; %Tiempo de la onda en la primera capa.
    T2(i)=2*D2(i)/v2; %Tiempo de la onda en la segunda capa.
    tiempo_2(i)=round((T1(i)+T2(i))/0.004); %Tiempo de muestreo2
    Error_2(i) = tiempo_2(i)-T0_2;
    G3((K-3):128,i) = circshift(G1(K-3:128,i),(-Error_2(i)));

end
```

ANEXO E. CODIGO EN MATLAB PARA MODELO ALEATORIO

```
%*****
% MODELO DE TRAZAS ALEATORIAS
%*****

%PROPIEDADES Y CARACTERISTICAS DE LAS CAPAS

v1=1800; P1=1.45; %Propiedades de la arcilla.
v2=4000; P2=2.42; %propiedades de la arenisca.
v3=5000; P3=1.35; %propiedades de carbon mineral.
h1=160; % Profundidad primera capa
h2=480; % Profundidad Segunda capa
H=0; %Valor de ruido en el terreno.

% CARACTERISTICAS EN LA ADQUISICION

F=30; % FOLD
A=0; % valor porcentaje de geofonos sin mostrar.

%GENERADOR ALEATORIO DE POSICIÓN DEL GEOFONO.

x(1)=0; %Valor inicial de x(1) en la primera
posición.
x(128)=1271; %Valor inicial de x(128) en la ultima
posición.
while x(128)>1270 || x(128)<1265; %Condición de limites de arreglo de
los geofonos.
    i=1;
    w=randi([5,15],1,128); %Generador de numeros aleatorios entre
el 5 y 15 para 128 posiciones.
    for i =2:128;
        x(i)=x(i-1)+w(i); %Posición aleatoria de geofonos % el
valor de x anterior se suma con el valor aleatorio w generado
anteriormente.
    end
end

tic
%matlabpool open 4 % Carga el uso de los 4 nucleos del computador.

parfor E=1:128;
[G1,G1D(:, :, E),peaksnr(E)]=Modelo_de_tiempos_aleatorios(E,h1,h2,v1,v2,v3,
x,P1,P2,P3,H)
[G2(:, :, E),G3(:, :, E),Error_1(E, :)] =correcion_modelovel_aleatorio(G1,E,x,v
1,v2,h1,h2)
end

%%%SUMA DE CORRECCIONES DE LAS DOS CAPAS%%%

G4=G2+G3; %SUMA DE LAS DOS CORRECCIONES
```

```

%save G4(005) G4 %%%%. . . . . SEGUN EL VALOR DE H CAMBIAR EL VALOR DENTRO
DEL () . . . . . %%%%.

nx=128; nz=128;
Q=1*ones(nx,nz);
Y=round(1.28*A);

% % De Geofonos para mostrar
for i=1:128;
    Q=1*ones(nx,nz);
    Y=round(1.28*A);
    v=randi([1,128],1,Y);
    for j=1:Y;
        Q(:,v(j))=0;
    end
    G5(:, :, i)=Q(:, :).*G4(:, :, i);
end

% Suma de trazas con fold
M=0*ones(nx,nz);

for j=1:128;
    if j<(F+1);
        for i=1:(F+j)
            M(:,i,j)=1;
        end
    end
    if (F+1)<j && j<(128-F+1);
        for i=(j-F):(F+j)
            M(:,i,j)=1;
        end
    end
    if (128-F)<j;
        for i=(j-F):128
            M(:,i,j)=1;
        end
    end
end

for i =1:128
    C= M(:, :, i).*G5(:, :, i);
    D(:, :, i) = C;
end

for j=1:128;
for i=1:128;
    E(:,j,i)=D(:,i,j);
end
end

for j=1:128
for i=1:128

```

```

    G6(i,j)=sum(E(i, :, j));
end
end

GfinA=G6;

%Calculo de los limites de muestra de los graficos

save GfinA GfinA
t0_1=(2*(h1/(v1*0.004)));
t0_2=(2*((h1/(v1*0.004))+(h2/(v2*0.004))));

clc

Vert(1,1)=(h1/t0_1);
horiz(1,1)=-640;

for i=2:1:128;

    horiz(i)=(x(i)-640);

    if i<((t0_1+1))
        Vert(i,1)=Vert((i-1),1)+((h1/t0_1));
    end

    if i>(t0_1) && i<(t0_2+1);
        Vert(i,1)=Vert((i-1),1)+((h2)/(t0_2-t0_1));
    end
    if i>(t0_2)
        Vert(i,1)=Vert((i-1),1)+(10.0813);
    end

end

toc
matlabpool close

% Graficar los resultados

clims = [-5 , 23];
plotseismic (G1D(:, :, 64), 1:128, horiz);
plotseismic (G5(:, :, 64), Vert, horiz);
title('CORRECCIÓN DE TRAZAS - GEOFONOS ALEATORIAMENTE ESPACIADOS')
    xlabel('DISTANCIA [mts]')
    ylabel('PROFUNDIDAD [mts]')

    plotseismic(GfinA, Vert, horiz);
title('GRAFICO DE TRAZAS - GEOFONOS ALEATORIAMENTE ESPACIADOS')
    xlabel('DISTANCIA [mts]')
    ylabel('PROFUNDIDAD [mts]')

```

```

    figure, imagesc (GfinA,clims)
    title('GRAFICO DE TRAZAS - GEOFONOS ALEATORIAMENTE ESPACIADOS')

load ('GfinU');

figure, imagesc (GfinU,clims)
    title('GRAFICO DE TRAZAS - GEOFONOS UNIFORMEMENTE ESPACIADOS')

save PSNR(005) peaksnr
figure, plot(peaksnr)
xlim([0 128]);
ylim([30 50]);
M=median(peaksnr);
%save M(005) M %%%%. . . . . SEGUN EL VALOR DE H CAMBIAR EL VALOR DENTRO DEL
() . . . . . %%%%.

H=(sum(peaksnr))/128;

```

ANEXO F. MODELO DE TIEMPOS ALEATORIOS.

```
function
[G1,G1D,peaksnr,Mtiempo]=Modelo_de_tiempos_aleatorios(E,h1,h2,v1,v2,v3,x,
P1,P2,P3,H)

tic;
I_1=((v2*P2)-(v1*P1))/((v2*P2)+(v1*P1));
I_2=((v3*P3)-(v2*P2))/((v3*P3)+(v2*P2));

nx=128; nz=128;
Mtiempo=0*ones(nx,nz);

syms a b
for i=1:1:128;

    D(i) = abs(x(i)-x(E)); %Distancia entre la fuente y el geofono.

    T0(i)=round(D(i)/(v1*0.004));
    Tim_0(i)=T0(i);

    if Tim_0(i)~=0;
        Mtiempo(Tim_0(i),i)=1;
    else
        Mtiempo(1,(E))=1;
    end

    T0_1=((2*h1)/(v1)); %Tiempo en la posición de la fuente.
    tiempo_1(i)=((2/v1)*sqrt(((D(i)/2)^2)+((h1)^2)));%Formula general
    Tim_1=round(tiempo_1/0.004);
    Mtiempo(Tim_1(i),i)=I_1;

    T0_2=round(((2*h1/(v1))+(2*h2/(v2)))/0.004);%Tiempo en la posición...
    ... de la fuente de la segunda capa.

    [sola, solb]=solve(((a^2+h1^2)*(v1/v2)*b^2)-(a^2*(b^2+h2^2)) , ...
        2*a+2*b==D(i),a,b);

    x1(i)=real(double(sola(2,1)));%Calculos de distancia X1
    x2(i)=real(double(solb(2,1)));%calculos de distancia X2

    D1(i)=sqrt((x1(i))^2+(h1^2)); %Trayectoria de la onda en la primera
capa
    D2(i)=sqrt((x2(i))^2+(h2^2));%Trayectoria de la onda en la segunda
capa

    T1(i)=2*D1(i)/v1; %Tiempo de la onda en la primera capa.
    T2(i)=2*D2(i)/v2; %Tiempo de la onda en la segunda capa.
    tiempo_2(i)=round((T1(i)+T2(i))/0.004); %Tiempo de muestreo2
    Tim_2=tiempo_2;
```

```

    Mtiempo(Tim_2(i),i)=I_2;
end

[w,tw]=ricker(0.004,40,0.2);

for i=1:128;
    C(:,i)=cconv(Mtiempo(:,i),w);
end
G2 = C (27:154,1:128); %trazas sin ruido
G1 = C (27:154,1:128)+H*randn(128); %Trazas con ruido
peaksnr=fun_PSNR(G2,G1); %comparacion de amplitud de potencia
G1D = G1;
toc;

```

ANEXO G. CORRECCIÓN DEL MODELO ALEATORIO.

```
function
[G2,G3,Error_1,T0_1,tiempo_1]=correccion_modelovel_aleatorio(G1,E,x,v1,v2,
h1,h2);

K=round((2*((h1/v1)+(h2/v2)))/0.004);

syms a b
for i=1:1:128;
    %%%CALCULO PARA CORRECCION DE LA PRIMERA CAPA%%%

    T0_1=round((2*h1)/(v1*0.004)); %Tiempo en la posición de la fuente.
    D(i) = abs(x(i)-x(E)); %Distancia entre la fuente y el geofono.

    tiempo_1(i)=round(((2/v1)*sqrt(((D(i)/2)^2)+((h1)^2)))/0.004);%Formula...
    ... general para obtener los tiempos de muestro.
    Error_1(i) =(tiempo_1(i)-T0_1); %Error de tiempos de propagacion ...
    ... entre el inicial y el obtenido.

    G2(1:K-4,i) = circshift ( G1(1:K-4,i) , (-Error_1(i))); %realizar la
    ...
    ... correccion a los valores del 1:85.
    G2(K-4:128,i)=0; %Coloca ceros en la matriz desde 85 al 128

    %%%CALCULO PARA CORRECCION DE LA SEGUNDA CAPA%%%

    T0_2=round(((2*h1/(v1)))+(2*h2/(v2)))/0.004);%Tiempo en la posición...
    ... de la fuente de la segunda capa.

    [sola, solb]=solve(((a^2+h1^2)*(v1/v2)*b^2)-(a^2*(b^2+h2^2)) , ...
        2*a+2*b==D(i),a,b);

    %(0.4375*b^2*a^2+230400*a^2-14400*b^2==0)
    %((sqrt(a^2+h1^2)*(v1/v2)*b)-(a*sqrt(b^2+h2^2))==0)
    %((a^2+h1^2)*(v1/v2)*b^2)-(a^2*(b^2+h2^2)) %GENERAL

    x1(i)=real(double(sola(2,1)));%Calculos de distancia X1
    x2(i)=real(double(solb(2,1)));%calculos de distancia X2

    D1(i)=sqrt((x1(i))^2+25600); %Trayectoria de la onda en la primera
    capa
    D2(i)=sqrt((x2(i))^2+230400);%Trayectoria de la onda en la segunda
    capa

    T1(i)=2*D1(i)/v1; %Tiempo de la onda en la primera capa.
    T2(i)=2*D2(i)/v2; %Tiempo de la onda en la segunda capa.
    tiempo_2(i)=round((T1(i)+T2(i))/0.004); %Tiempo de muestreo2
    Error_2(i) = tiempo_2(i)-T0_2;
    G3((K-3):128,i) = circshift(G1(K-3:128,i),(-Error_2(i)));

end
```