

**USO DE TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN GLOBAL PARA RESOLVER
PROBLEMAS DE INVERSIÓN SÍSMICA - SEGUNDO GRUPO DE
EXPLORACIÓN**

**JAIR ABRAHAM BELEÑO DAVILA
LIBARDO ANDRÉS ESCALANTE ROJAS
YUDY ANDREA SARMIENTO LÓPEZ**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2015

**USO DE TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN GLOBAL PARA RESOLVER
PROBLEMAS DE INVERSIÓN SÍSMICA - SEGUNDO GRUPO DE
EXPLORACIÓN**

**JAIR ABRAHAM BELEÑO DAVILA
LIBARDO ANDRÉS ESCALANTE ROJAS
YUDY ANDREA SARMIENTO LÓPEZ**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
ELECTRÓNICO**

DIRECTORES:

**Dr.Ing. OSCAR MAURICIO REYES TORRES
Ph.D(c) SERGIO ALBERTO ABREO CARRILLO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2015

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de grado a Dios y a mis padres. A Dios porque ha estado conmigo a cada paso que doy, cuidándome y dándome fortaleza para continuar, a mis padres, quienes a lo largo de mi vida han velado por mi bienestar y educación siendo mi apoyo en todo momento. Es por ellos que soy lo que soy ahora. Los amo con mi vida.

Andrea

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de grado con todo mi amor y mi cariño para las personas que hicieron todo en la vida para que yo pudiera lograr y alcanzar este sueño, por motivarme, por su paciencia y comprensión, sacrificaron su tiempo para que yo pudiera cumplir con el mío, por entregarme su apoyo cuando sentía que el camino se terminaba.

Mi eterna gratitud a esas personas importantes en mi vida, que siempre estuvieron listas para brindarme toda su ayuda, ahora me toca regresar un poco de todo lo inmenso que me han otorgado. A mi querida madre Lucila, quien me ha entregado el regalo de la vida y su incansable amor que me hace sentir el hijo más afortunado. A mis bellos hermanos, Diana y Camilo, quienes representan mis pilares en la vida, son mi mayor alegría y siempre estaremos juntos. A mi príncipe de ojos azules, Santiago, quien desde el día de su nacimiento me entrego la luz de su sonrisa. A el amor de mi vida, Jainy, quien lloró y rió en cada momento junto a mí y fue capaz de contenerme cuando todo iba mal. Gracias por amarme como solo tú lo puedes hacer, por entregarme esa hermosa sonrisa con la que iluminas todos y cada uno de mis días, por hacer de mi el hombre más feliz y por vivir este amor tan hermoso.

Son mi familia, son mi razón de vivir, son los que hacen que mi vida tenga algún significado y me brindan su amor y eso es lo más valioso para mi. Por y para siempre vivirán en mi corazón. Los amo demasiado. Cinco sonrisas. Cinco corazones.

“Antes de que el mundo fuera creado, ya existía la palabra. La palabra era la fuente de vida, y esta vida trajo la luz a la humanidad. La luz brilla en la oscuridad, y la oscuridad nunca ha sido apagada”. - Hiroya Oku.

Jair

DEDICATORIA

*Al buen Dios de amor que cada día no encontró qué excusas inventarse para llamar mi atención, para conquistarme y mostrar su respaldo y amor. Para Él, que nos habilitó con salud, sabiduría y paciencia para afrontar cada reto. Por su sostenimiento y cuidado cuando se decidió partir de nuestros hogares para afrontar esta nueva etapa de la vida. Porque nunca Él fue escaso y dejó que siempre disfrutáramos de su compañía. Por dejarme cada día respirar y parpadear...
¡Infinitas gracias Viejo!*

A mi Papá Libardo Escalante Quintero que me enseñaba a nunca bajar la guardia y me recordaba que tenía muchas capacidades para afrontar cada situación. A mi mamá Maria Delia Rojas, que cada día me recordaba .^{Es}tar de rodillas delante de Dios para estar de pie delante de los hombres". Para ellos quienes nunca dejaron de estar al pie del cañón, no teniendo en cuenta el tiempo ni la distancia, ni los recursos, ni aun cuando pensamos en desfallecer, ellos estuvieron ahí esperanzados en que la recompensa sería muy grande. Por amarme, apoyarme y orar cada día por mi vida, gracias.

A mis abuelitas, Elodia Quintero y Etelvina Díaz, quienes a pesar de sus limitaciones y la distancia, nunca dejaron de preguntar con ternura "¿Ya casi termina?", buscando siempre así una respuesta alentadora y esperando volver a disfrutar tiempo juntos.

A la familia Esparza Escalante, Martín, mi hermana Mayra, sus hijas, Salito y Luci, quienes me acogieron en su hogar no midiendo nada, sino por el contrario, gracias por aportar esa cuota de compañía y amor. De igual forma a las familias Escalante, Rojas, Rangel, Borja, Giraldo, gracias por su apoyo y por sus recursos.

Al movimiento estudiantil y profesional Alfa y Omega, y la familia del CENTI, representados en líderes, discípulos y hermanos en la fe, que me acogieron como un integrante más permitiéndome compartir un vínculo Eterno. Por sus oraciones y compañía, gracias.

A mis amigos y hermanos, gracias por su apoyo, por hacer que su compañía y cada encuentro, fuera un factor importante para recobrar fuerzas.

A mis profesores, grupo de investigación CPS, director y co-director de proyecto, gracias por sus aportes y por dar lo mejor en esa hermosa labor.

“Será como árbol plantado junto a corrientes de aguas, Que da su fruto en su tiempo, Y su hoja no cae; Y todo lo que hace, prosperará”. Salmo 1:3. Para ti, Gracias.

“Una sola vida tenemos y esta hay que invertirla”. - Néstor Chamorro Pesantes.

Libardo

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado con la dedicación y la ilusión de lograr un objetivo, de llevar a cabo un sueño y hacerlo realidad.

Agradecemos a Dios por habernos guiado por el camino de la felicidad hasta ahora. También, a cada uno de los que son parte de nuestras familias por su fuerza y apoyo incondicional que nos han ayudado y llevado hasta donde estamos ahora. Por último a nuestros compañeros de tesis porque en esta armonía grupal lo hemos logrado.

Y agradecemos a los profesores Oscar Reyes Y Sergio Abreo por apoyarnos y entregarnos su confianza en el transcurso del trabajo.

Andrea, Jair y Libardo

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	19
1 DESCRIPCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL SEMINARIO	22
1.1 INTRODUCCIÓN	22
1.2 DESCRIPCIÓN DEL SEMINARIO.	23
1.3 MODELO MATEMÁTICO EMPLEADO.	28
1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	30
2 MODELADO Y ADQUISICIÓN	32
2.1 INTRODUCCIÓN	32
2.2 CONSTRUCCIÓN DE MODELOS GEOFÍSICOS EN SU.	32
2.3 ADQUISICIÓN SÍSMICA EN SU	37
2.3.1 Trazado de rayos	37
2.3.2 Adquisición y trazas sísmicas.	42
3 MÉTODOS DE SOLUCIÓN METAHEURÍSTICOS	44
3.1 INTRODUCCIÓN	44
3.2 MÉTODOS DE SOLUCIÓN	44

3.3	SIMULATED ANNEALING	48
3.3.1	Descripción de parámetros	49
3.3.2	Diagrama de flujo de SA	50
3.3.3	Descripción e implementación de las funciones de prueba en SA	52
3.4	ARTIFICIAL BEE COLONY	57
3.4.1	Descripción de parámetros	58
3.4.2	Diagrama de flujo de ABC	61
3.4.3	Descripción e implementación de las funciones de prueba en ABC	64
3.5	INTERFAZ ENTRE MATLAB Y SEISMIC UNIX	66
3.5.1	SA y ABC implementados en el problema de inversión sísmica	69
4	PRUEBAS Y RESULTADOS.	71
4.1	METODOLOGÍA	71
4.2	RESULTADOS	72
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	79
5.1	CONCLUSIONES.	79
5.2	RECOMENDACIONES	80
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

BIBLIOGRAFÍA	88
ANEXOS	90

LISTA DE FIGURAS

1	Descripción de los temas abordados a nivel geofísico.	23
2	Modelo del subsuelo	25
3	Conjunto de trazas sísmicas	26
4	Descripción del seminario de investigación	28
5	Primer Modelo	29
6	Modelos de dos capas paralelas	34
7	Modelos de cuatro capas paralelas	35
8	Modelos de cuatro capas no uniformes	36
9	Modelos de cuatro capas no uniformes con una variante	37
10	Trazado de rayos sobre el modelo de capas paralelas	39
11	Trazado de rayos sobre el modelo 3, modelo de 4 capas del subsuelo	40
12	Trazado de rayos sobre el modelo 4, modelo de 4 capas con intrusión	41
13	Representaciones de las trazas sísmicas	42
14	Descripción de los métodos de solución	46
15	Diagrama de flujo de SA	51
16	Funciones prueba en SA	54

17	Diagrama de flujo de <i>ABC</i>	63
18	Diagrama de comunicación entre <i>MATLAB</i> y <i>SU</i>	68
19	Promedio de los coeficientes de la correlación cruzada con respecto al número de iteraciones en la primera prueba con <i>SA</i>	74
20	Promedio de los coeficientes de la correlación cruzada con respecto al número de geófonos en la primera prueba con <i>SA</i>	75
21	Promedio de <i>sloths</i> en la segunda prueba con <i>SA</i>	76
22	Promedio de los coeficientes de la correlación cruzada con respecto al número de geófonos en la segunda prueba con <i>SA</i>	76

LISTA DE TABLAS

1	Velocidades sísmicas	33
2	Valores de <i>sloth</i> para cada una de las capas del tercer modelo	36
3	Tabla de funciones prueba	53
4	Especificaciones del equipo de cómputo usado en los experimentos sobre las funciones de prueba	55
5	Parámetros bajo los cuales se obtuvieron los mejores resultados en la implementación de <i>SA</i> en el conjunto de funciones de prueba	56
6	Promedios y desviación de las funciones prueba de <i>SA</i>	56
7	Parámetros bajo los cuales se obtuvieron los mejores resultados en la implementación de <i>ABC</i> en el conjunto de funciones de prueba	64
8	Promedios y desviación de las funciones prueba de <i>ABC</i>	65
9	Especificaciones del equipo de cómputo usado en los experimentos sobre el proceso de inversión sísmica	73
10	Parámetros de la primera prueba con <i>SA</i>	74
11	Alimento obtenido por la colonia en la prueba realizada con <i>ABC</i>	77
12	Soluciones exploradas por la colonia en la prueba realizada con <i>ABC</i>	77
13	Soluciones exploradas por la colonia en la prueba realizada con <i>ABC</i>	78

14 Comparación de *sloths* finales entre *SA* y *ABC* con respecto al modelo de referencia 78

RESUMEN

TITULO: USO DE TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN GLOBAL PARA RESOLVER PROBLEMAS DE INVERSIÓN SÍSMICA - SEGUNDO GRUPO DE EXPLORACIÓN *

AUTORES: JAIR ABRAHAM BELEÑO DAVILA
LIBARDO ANDRÉS ESCALANTE ROJAS
YUDI ANDREA SARMIENTO LÓPEZ**

PALABRAS CLAVES: Implementación, Metaheurística, Modelo, Optimización, Sísmica, Técnica.

DESCRIPCIÓN:

Este libro contiene el desarrollo del trabajo de grado bajo la metodología de seminario de investigación llamado *Uso de técnicas de optimización global para resolver problemas de inversión sísmica*, donde el objetivo principal consiste en el estudio, implementación y análisis de técnicas metaheurísticas, aplicadas a problemas de inversión sísmica.

Como inicio hacia la comprensión del problema propuesto, se investiga la definición de conceptos básicos en geofísica, en inversión sísmica, en optimización global y sus técnicas metaheurísticas. Adicionalmente se presenta el modelo matemático y sus parámetros. Asimismo, se presenta la caracterización e implementación de dos técnicas metaheurísticas denominadas como Optimización mediante Recocido Simulado y Colonia Artificial de Abejas, las cuales fueron probadas sobre funciones matemáticas de prueba. Una vez el funcionamiento de las técnicas son ajustadas, se define una métrica de comparación para aplicar las técnicas metaheurísticas adecuando los datos modelados con respecto a los datos observados.

Los resultados de mayor importancia en la implementación de las técnicas metaheurísticas sobre el problema propuesto, se registran mediante tablas, gráficas y bases de datos digitales. Se presenta un análisis, discusiones, recomendaciones y conclusiones. Se generan unos documentos adicionales conformados por actas y memorias que describen los temas tratados en cada sesión del seminario y anexos que contienen el desarrollo de los códigos implementados. Estos documentos y archivos constituyen un conjunto de referencias para la realización de trabajos futuros en esta área.

*Trabajo de Grado en la Modalidad de Seminario de Investigación.

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director Dr. Ing. Oscar Mauricio Reyes Torres. Codirector PhD(c). Sergio Alberto Abreo Carrillo.

ABSTRACT

TITLE: USING GLOBAL OPTIMIZATION TECHNIQUES TO SOLVE SEISMIC INVERSION PROBLEMS - SECOND GROUP OF EXPLORATION*

AUTHORS: JAIR ABRAHAM BELEÑO DAVILA
LIBARDO ANDRÉS ESCALANTE ROJAS
YUDI ANDREA SARMIENTO LÓPEZ**

KEYWORDS: Implementation, Metaheuristic, Model, Optimization, Seismic, Technical.

This book contains the development of the project work under the methodology of research seminar called *Using global optimization techniques for solving seismic inversion*, where the main objective is the study, implementation and analysis of metaheuristic techniques, applied to seismic inversion problems.

To understand the proposed problem, the definition of basic concepts in geophysics, seismic inversion, global optimization and metaheuristic techniques are investigated. Additionally mathematical models and their parameters are presented. Also, the characterization and implementation of two metaheuristic optimization techniques called Simulated Annealing and Artificial Bee Colony were tested on math test functions. Once operating techniques are adjust, a metric of comparison is defined to implement the metaheuristic techniques modeled to fit the data with respect to the observed data.

The results of major importance in the implementation of metaheuristic techniques on the proposed problem were register using tables, graphs and digital databases. Analysis, discussions, recommendations and conclusions are presented. An additional document is provided by made up of records and reports describing the topics covered in each seminar session and annexes containing the development of codes generated implemented. These documents and files are a set of references for conducting future work in this area.

*Project Work in Seminar Research Mode.

**Faculty of Physicomechanical Engineers. School of Electrical Engineers, Electronics and Telecommunications. Director Dr.Ing. Oscar Mauricio Reyes Torres. Codirector PhD(c). Sergio Alberto Abreo Carrillo.

INTRODUCCIÓN

El contenido de este documento presenta el desarrollo del trabajo de grado bajo la modalidad de seminario de investigación llamado *Uso de técnicas de optimización global para resolver problemas de inversión sísmica*, propuesto con el objetivo de estudiar, analizar e implementar algoritmos de optimización global basados en estas técnicas metaheurísticas para ser aplicados a problemas de inversión sísmica.

Este documento está constituido por cinco capítulos en donde se presenta el trabajo realizado para solucionar la problemática identificada; la cual corresponde a la incorporación de dos algoritmos de optimización global para resolver el problema de inversión sísmica. Durante el desarrollo del seminario de investigación se definen conceptos necesarios para el entendimiento de la geofísica para identificar las características del subsuelo. Además, de poder revisar técnicas para la comparación de datos sísmicos, implementar técnicas metaheurísticas de optimización global y aplicar el procesamiento de señales para la comparación de las señales digitales para obtener la estructura litológica de una porción de corteza terrestre. Con base en esto se realizan conclusiones y recomendaciones que se complementan en los anexos para presentar en detalle los temas expuestos por medio de códigos implementados y bases de datos conformadas por actas y memorias.

El primer capítulo expone los conceptos básicos en geofísica, inversión sísmica, optimización y técnicas metaheurísticas, para poder comprender el planteamiento del problema que se discute posteriormente, esto con el fin de aclarar el contexto bajo el cual se desarrolla este seminario de investigación.

En el segundo capítulo se presenta a *Seismic Unix* como una de las herramientas computacionales necesarias para llevar a cabo el seminario de investigación, sabiendo que ésta contribuye de manera significativa en las simulaciones enfocadas al área de la geofísica; teniendo como objetivo principal el desarrollo de modelos de velocidades de una sección del subsuelo y la adquisición sísmica a implementar sobre el mismo.

En el tercer capítulo se revisan generalidades y conceptos básicos de las técnicas metaheurísticas seleccionadas, las cuales son *Simulated Annealing (SA)* y *Artificial Bee Colony (ABC)*. Cada una de ellas se centra en aspectos como: la analogía que tiene cada una con la naturaleza, la parametrización, su respectiva evaluación sobre funciones de prueba y su empalme con el proceso de inversión sísmica.

El cuarto capítulo está conformado por las simulaciones y pruebas realizadas en el transcurso del seminario de investigación con *SA* y *ABC* en el proceso de inversión sísmica. El quinto y último capítulo comprende las conclusiones y recomendaciones relacionadas con los resultados obtenidos en la implementación de las técnicas metaheurísticas en el problema de inversión sísmica.

Finalmente se anexan de forma digital los documentos que evidencian el proceso del seminario de investigación que hacen referencia a actas semanales en donde se explican brevemente los temas tratados, las discusiones generadas, los compromisos correspondientes a las próximas sesiones, los asistentes, expositores y relatores en cada sesión. Por otra parte, se encuentran las memorias que presentan los temas tratados durante cada sesión, junto con el análisis y desarrollo de los avances presentados. La estructura de cada memoria consta de una introducción, temas tratados, implementación, análisis de resultados, discusión y conclusiones.

Como documentos auxiliares se encuentran los apéndices, que contienen conceptos básicos, la secuencia de los códigos implementados, y pruebas realizadas con las implementaciones para cada algoritmo. Dichos apéndices se presentan como una extensión de las memorias y a su vez como información complementaria del documento principal.

La metodología llevada a cabo a lo largo del seminario de investigación consistió en una sesión semanal durante el semestre con duración de dos horas cada una. En cada una de ellas se presentaron las bases teóricas e implementaciones que se iban requiriendo a medida que se avanzaba en la solución del problema conforme al cronograma estipulado para el desarrollo del seminario de investigación. Cada sesión contó con espacios de presentación de la temática a tratar acompañada de discusión, análisis y ajustes en relación con el contenido presentado. De igual manera, contó con los aportes propuestos por los directores y los asistentes a dichas sesiones.

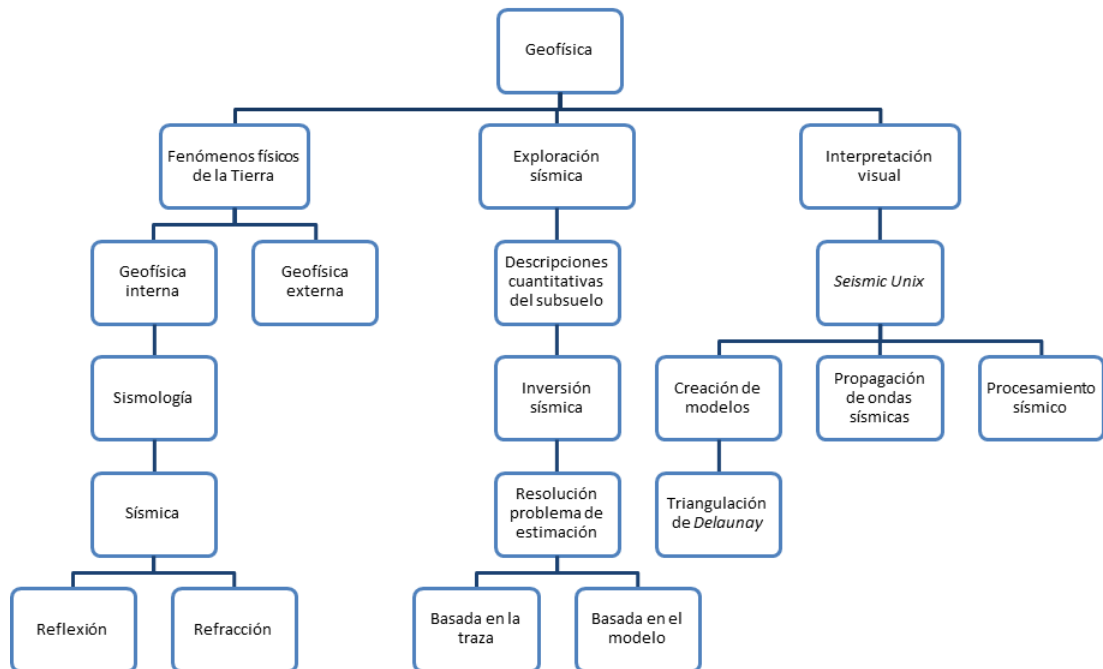
1. DESCRIPCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL SEMINARIO

1.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo contiene los principios necesarios (con base en una revisión bibliográfica de conceptos y definiciones básicas) que permiten entender el problema discutido en el seminario de investigación. La descripción se hace de una manera gráfica para facilitarle al lector la comprensión de los conceptos en geofísica y la forma en que se trabajó durante el seminario. La primera parte de la revisión se hace de manera secuencial, donde se presentan algunas definiciones de las ciencias correspondientes al tema de estudio (Figura 1) y a continuación se expone el modelo matemático que se utiliza durante todo el seminario de investigación. Finalmente se presenta el planteamiento del problema para comprender de manera general el trabajo que se realizó.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL SEMINARIO

Figura 1. Descripción de los temas abordados a nivel geofísico.



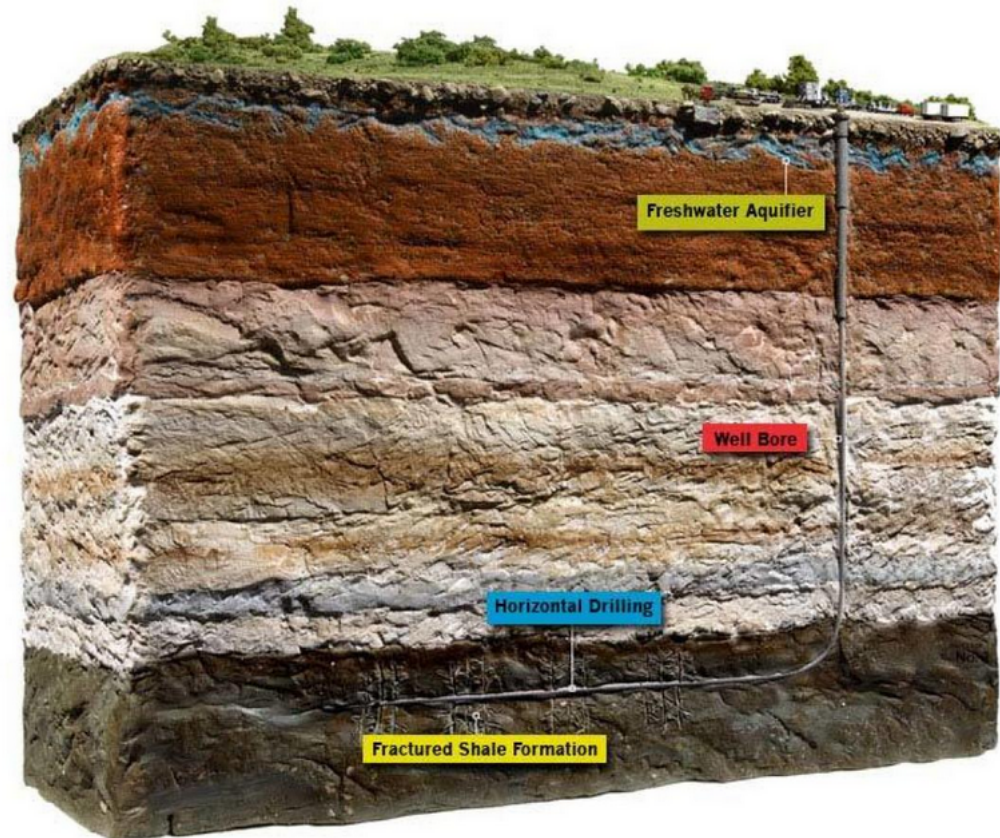
La geofísica estudia los fenómenos físicos de la Tierra, donde se comprenden dos ramas principales, las cuales son la geofísica interna y la geofísica externa. La segunda estudia las propiedades físicas del entorno terrestre. La primera es necesaria para el análisis del interior de la corteza terrestre. Una de sus ramas, la sismología, es aquella que comprende el estudio de la propagación de las ondas sísmicas naturales que viajan a través del subsuelo. Con la sismología viene anidado un proceso de generación de ondas artificiales la cual es denominada sísmica, donde su teoría abarca gran cantidad de conceptos; entre ellos se encuentra la ley de la elasticidad, impedancia elástica e impedancia acústica, velocidades sísmicas (ondas P, ondas S, ondas de *Rayleigh* y ondas *Love*) y ángulos de incidencia, entre

otros. El objetivo principal de la sísmica es la localización de yacimientos de hidrocarburos para la industria del petróleo. Sus principales métodos empleados son la sísmica de reflexión y sísmica de refracción; métodos de gran importancia para la exploración del subsuelo en el descubrimiento de estos yacimientos (Anexo A).

La exploración sísmica es el método geofísico que permite realizar descripciones cuantitativas del subsuelo a través de la generación de ondas sísmicas artificiales usando algún tipo de agente externo (fuente). La exploración sísmica está dividida en cuatro etapas que son: la etapa topográfica que es la encargada del estudio para la ubicación de los sensores (geófonos) y fuentes (martillo, vibro, etc.); la etapa de perforación, se encarga de crear pequeños pozos para la ubicación de los sensores y las fuentes; la etapa de registro en donde se lleva a cabo la recolección de la información por medio de los sensores y finalmente se efectúa la etapa de restauración de la zona en donde el proceso de exploración fue desarrollada.

El propósito de la exploración sísmica es el registro de datos e información del subsuelo. A partir de ellos se puede conseguir un modelo de impedancias el cual es el objetivo principal de la inversión sísmica, donde un problema puede ser planteado en términos de hallar una función no lineal multidimensional o función objetivo. El propósito de la inversión sísmica es la transformación de observaciones sísmicas en propiedades cuantitativas de rocas que describan un reservorio y/o yacimiento. Por lo tanto, el principio de la inversión sísmica se basa en la resolución de un problema de estimación de parámetros, sabiendo que éstos dan una serie de características (por ejemplo, la elasticidad de los materiales que conforman cierta porción de tierra) con las cuales se modelan las capas del subsuelo (Figura 2).

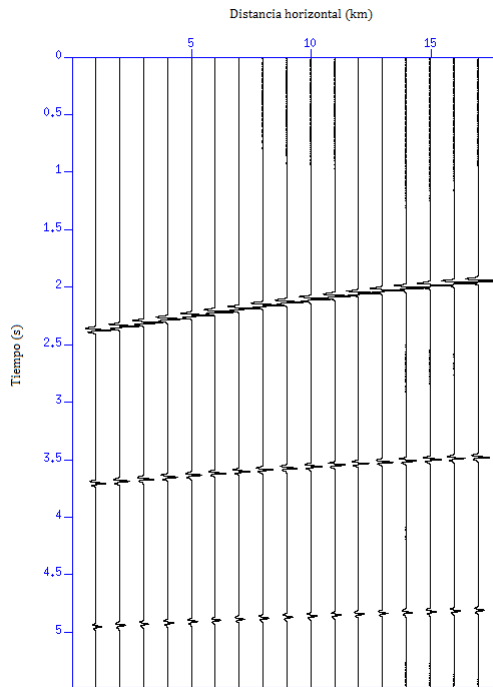
Figura 2. Modelo de capas del subsuelo.



Fuente: Editora Digital on Mirror. ¿Qué es el fracking y cómo afecta al medio ambiente? Disponible en: <http://www.ecoosfera.com/2013/12/que-es-el-fracking-y-como-afecta-al-medio-ambiente> Consultado el 15 de Febrero de 2015.

Una traza sísmica es la representación gráfica de la transición de diferentes frentes de ondas que viajan desde un emisor (fuente) hasta un receptor (geófono) a través del subsuelo. Por esto, para cada receptor ubicado a lo largo de una distancia horizontal existe un tiempo recepción de datos y cuando se agrupan se tiene un conjunto de trazas sísmicas (Figura 3). Este conjunto puede interpretarse como, en qué instante de tiempo y cuán fuerte (amplitud) los receptores perciben perturbaciones por parte del frente de onda que regresa a la superficie.

Figura 3. Conjunto de trazas sísmicas.



La inversión sísmica se divide en dos procesos fundamentales, la inversión basada en la traza y la inversión basada en el modelo matemático; ambas tienen un objetivo final común que es la estimación de un modelo de capas del subsuelo que pueda simular los datos con el menor error posible en comparación a un modelo geológico.

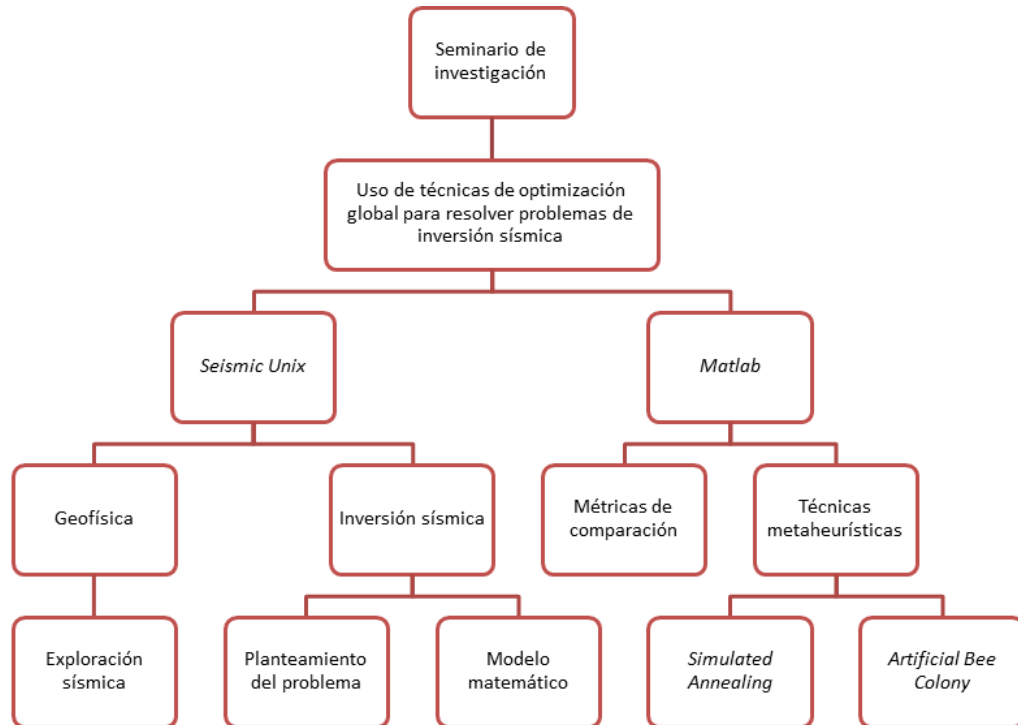
El estudio de la geofísica y en especial el estudio de la sismología, puede realizarse mediante una interpretación visual por medio de herramientas computacionales como es el caso de *Seismic Unix (SU)*, diseñado por el Centro de Fenómenos Ondulatorios (*CWP*) de la Escuela de Minas de Colorado. *SU* es una herramienta que tiene un conjunto de rutinas de cómputo científico, donde se elaboran diversas tareas de índole geofísico, entre ellas, el modelado de la propagación de ondas sísmicas, adquisiciones sísmicas y el procesamiento de datos sísmicos. La plata-

forma de funcionamiento usa entornos *UNIX*, donde su programación es basada en *shell-scripts* los cuales brindan una reducción en el tiempo de cómputo ya que se ejecutan rutinas que no requieren entornos gráficos.

Para la generación de modelos del subsuelo, *SU* utiliza la triangulación de *Delau-nay*, la cual permite representar de manera acertada estructuras simples o complejas del subsuelo. Este método es altamente utilizado para la generación de gráficos e imágenes digitales. Asimismo, su mayor ventaja es la simplicidad en el cálculo de tiempos de viaje y caminos de las ondas sísmicas. Para más información a lo relacionado con *SU*, consultar el anexo B.

En la Figura 4 se presenta el resumen de las etapas del seminario de investigación. El cual se desarrolló sobre dos columnas vertebrales, representadas en un componente geofísico y uno computacional. El primero, corresponde a las implementaciones sobre el software *Seismic Unix*. Sabiendo que previo a esto, se abarcan conceptos básicos en geofísica (orientado a los procesos de exploración sísmica) e inversión sísmica; estas integraciones presentes en el componente geofísico, están descritas con mayor detalle en el anexo 5.2. El segundo componente hace referencia al uso de las técnicas de optimización global, las cuales se evidencian en el capítulo 3 de este documento.

Figura 4. Descripción del seminario de investigación.



1.3 MODELO MATEMÁTICO EMPLEADO

El modelo matemático es representado a través de la ecuación:

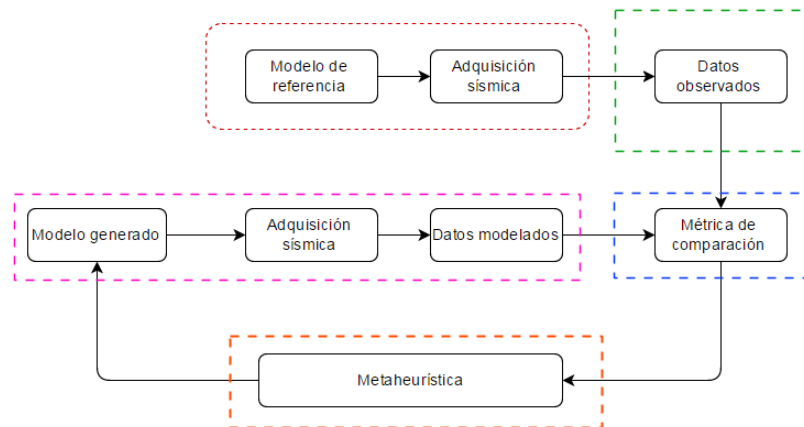
$$(\partial_x \Theta)^2 + (\partial_y \Theta)^2 + (\partial_z \Theta)^2 = \frac{1}{C^2} \quad (1)$$

que corresponde a la aproximación no lineal de la ecuación *Eikonal*, Θ representa el frente de onda y C es la velocidad de propagación de los frentes de onda en las capas del subsuelo. Esta ecuación es sobre la cual se desarrolla el proceso de

la adquisición sísmica [1].

Es necesario conocer el papel de la adquisición sísmica en el proceso de inversión (véase Figura 5), en este documento se resume en cuatro etapas. La primera corresponde a los datos observados, que son el punto de partida durante un proceso de inversión y serán los “datos de referencia” a comparar (recuadro verde). Debido a que no se poseen estos datos de referencia, se hace necesario implementar un modelado del subsuelo y realizar un primer proceso de adquisición sísmica (recuadro rojo), para así obtener los datos de referencia.

Figura 5. Descripción del proceso de inversión sísmica.



Para la segunda etapa (recuadro fucsia), se parte de un modelo generado, que es lo aconsejado como guía para garantizar que las velocidades iniciales sean números positivos y mayores a cero; posteriormente se realizan un proceso de adquisición y obtención de datos modelados. Sabiendo que los mencionados en la etapa anterior pertenecen a la generación de los datos de referencia.

La tercera etapa (recuadro azul) está marcada por la comparación entre los datos observados y los datos modelados a través de la métrica de comparación seleccionada (correlación cruzada); esta fue objetivo de discusión durante el transcurso del seminario ya que existen diferentes formas de comparar señales digitales. Esta métrica se caracteriza porque entrega un vector o un escalar que representa la variación entre las trazas sísmicas de los datos observados y los modelados.

Por último (recuadro anaranjado), la técnica metaheurística necesita del resultado entregado por la métrica comparación, para así minimizar la variación entre los datos observados y los modelados. Sabiendo que si existe variación, es necesario que la técnica evolucione para realizar una búsqueda de nuevos valores de velocidades. Es en esta sección donde se aporta el trabajo de las técnicas de optimización global en un proceso de inversión sísmica. De esta manera busca repetirse el ciclo y generar modelos hasta que se cumpla el criterio de parada, asumiendo que el modelo obtenido no presenta variaciones y es el más cercano al de referencia.

1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los principales objetivos de la inversión sísmica es encontrar modelos aproximados de las capas que conforman el subsuelo, para que así más adelante puedan ser estudiados con la ayuda de interpretaciones de expertos. En este contexto, la inversión sísmica consiste en encontrar un modelo de velocidades minimizando la diferencia entre los datos modelados y observados a partir de la modificación de los parámetros del modelo matemático. El modelo geológico se construye a través de parámetros físicos que caracterizan las propiedades de las capas de ro-

ca; principalmente, entre ellos pueden encontrarse la velocidad de onda P, velocidad de onda S, impedancia elástica e impedancia acústica [2].

Uno de los objetivos que se trabajó fue aplicar e implementar dos métodos de optimización global a problemas geofísicos. Aunque hacemos hincapié en los aspectos de la aplicación de estos algoritmos, se presentan también los fundamentos teóricos suficientes para que los asistentes al seminario entiendan los principios subyacentes en que se basan estos algoritmos.

Otro de los objetivos es describir con suficiente detalle los fundamentos de dos métodos de optimización con aplicación a la inversión sísmica, explorando y comparando diferentes alternativas de implementación.

2. MODELADO Y ADQUISICIÓN

2.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo contiene las etapas de aprendizaje y desarrollo con respecto al manejo del software *Seismic Unix (SU)* en los procesos de modelado y adquisición sísmica. Se presentan de manera precisa los pasos realizados en el proceso de creación de cuatro modelos del subsuelo con características diferentes. Además, se da a conocer una serie de componentes necesarios para generar un proceso de adquisición sísmica sobre los modelos desarrollados en el transcurso del seminario de investigación.

2.2 CONSTRUCCIÓN DE MODELOS GEOFÍSICOS EN SU

El objetivo principal en esta etapa, es proveer al lector las herramientas necesarias para el manejo del software *Seismic Unix (SU)* en la creación de modelos del subsuelo en 2D y en el proceso de adquisición sísmica. Con *SU* se crearon cuatro modelos diferentes del subsuelo, el cual uno de ellos es tomado como modelo de referencia. Los modelos construidos presentan el mismo procedimiento en la generación del código fuente, pero todos son distintos. Los modelos desarrollados se consideran capas homogéneas e isotrópicas, cada una de las capas posee una velocidad de onda acústica (Onda P), donde la información relevante entre cada una de las capas es el valor del *sloth* (velocidad), el cual está definido en la ecuación 2.1

y sus unidades son $[s^2/m^2]$. El valor de *sloth* es la característica de mayor relevancia en el modelado del subsuelo, constituye la parte fundamental en la analogía de los modelos con respecto a una zona de la Tierra.

$$s = \frac{1}{V^2} \quad (2)$$

V representa la velocidad con la que viaja una onda acústica a través de un medio, sus unidades son $[m/s]$. Distintos valores de velocidades se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Velocidades sísmicas

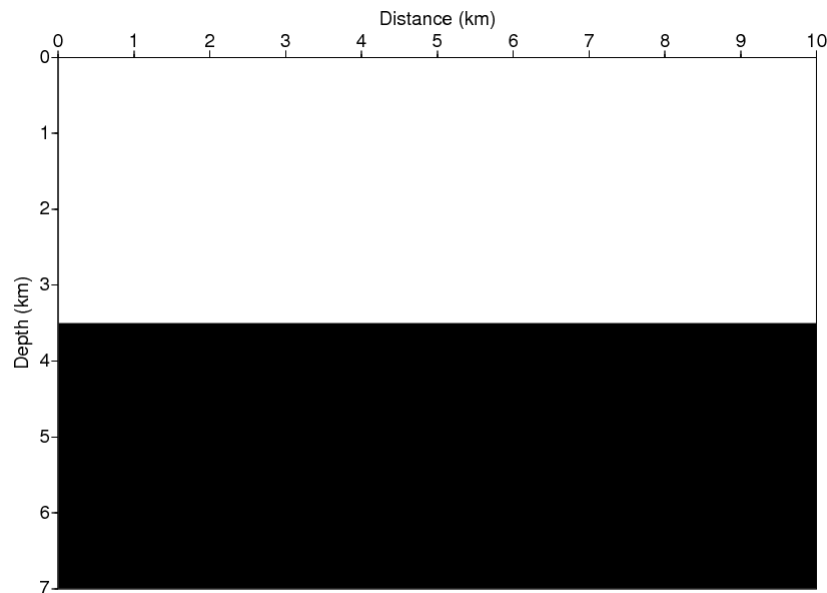
Material	$V[m/s]$
Capa Meteorizadas	300-900
Aluviones Modernos	350-1500
Arcillas	1000-2000
Areniscas	1400-4500
Conglomerados	2500-5000
Calizas	4000-6000
Dolomias	5000-6000
Sal	4500-6500

Los modelos creados fueron los siguientes: el primero de ellos está constituido de dos capas paralelas; el segundo con cuatro capas paralelas; el tercer modelo está constituido por cuatro capas no uniformes y el último presenta una lente asociada a domos salinos, trampas de rocas, entre otros en el interior de una de sus capas. Todos los modelos fueron desarrollados en una extensión (*distance*) de 0 a 10 kilómetros con respecto al eje x y una profundidad (*depth*) de 0 a 7 kilómetros con respecto al eje z . La explicación del código fuente utilizado para la generación

de los modelos se puede observar en el anexo C.

El primer modelo creado, consta de dos capas isotrópicas y homogéneas en forma paralela (Figura 6). La primera capa esta limitada entre 0 y 3,5 km de profundidad, con un valor de *sloth* de $0,9 [s^2/m^2]$. De igual manera, la segunda capa esta definida entre 3,5 y 7 km de profundidad y su valor de *sloth* fue de $0,3 [s^2/m^2]$. La finalidad de este diseño es obtener el conocimiento básico del código fuente para la generación del modelo.

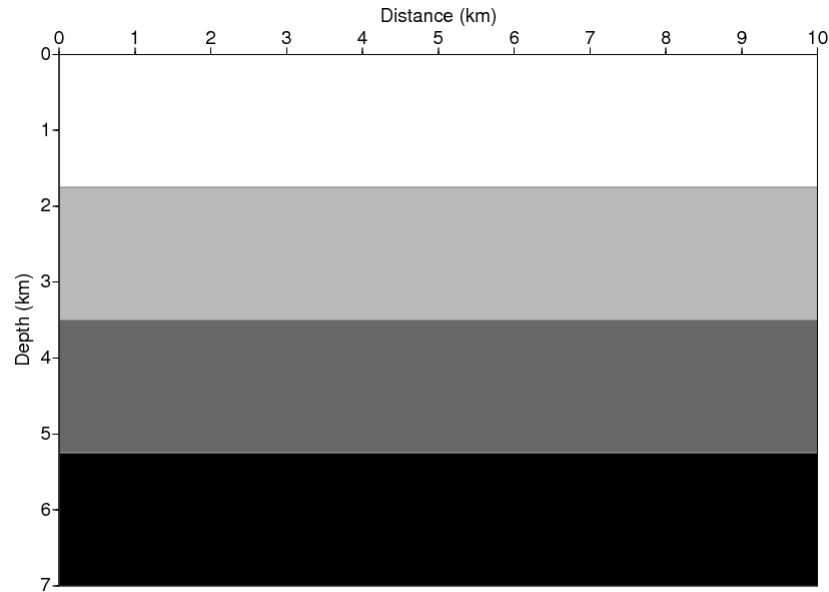
Figura 6. Modelos de dos capas paralelas.



El segundo modelo consta de cuatro capas isotrópicas y homogéneas en forma paralela (Figura 7). La estructura de las capas y los respectivos valores de velocidad son los siguientes: la primera está comprendida entre 0 y 1,8 km y el valor del *sloth* es de $0,9 [s^2/m^2]$; la segunda capa entre 1,8 y 3,5 km y un valor de velocidad de $0,7 [s^2/m^2]$; la tercera capa entre 3,5 y 5,3 km con un valor de velocidad de $0,5 [s^2/m^2]$

de *sloth* y la última capa está definida entre 5,3 y 7 km con un valor de velocidad de 0,3 [s^2/m^2]. El propósito de este modelo era desarrollar una modificación al adicionar dos capas uniformes y paralelas al primer modelo.

Figura 7. Modelos de cuatro capas paralelas.



El tercer modelo está constituido por cuatro capas no uniformes (Figura 8) con diferentes valores de velocidad. Fue el modelo de referencia implementado en el proceso de inversión sísmica en el seminario de investigación. Las capas estas constituidas por coordenadas en un plano (x;z). En la tabla 2 se aprecian los valores de *sloth* utilizados en el modelo del subsuelo de cuatro capas no uniformes y las coordenadas de cada una de las capas.

Figura 8. Modelos de cuatro capas no uniformes.

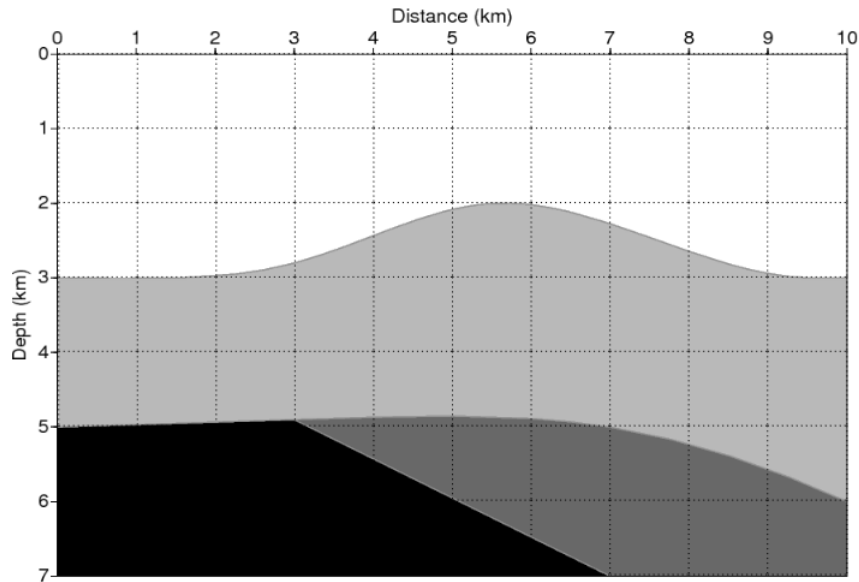
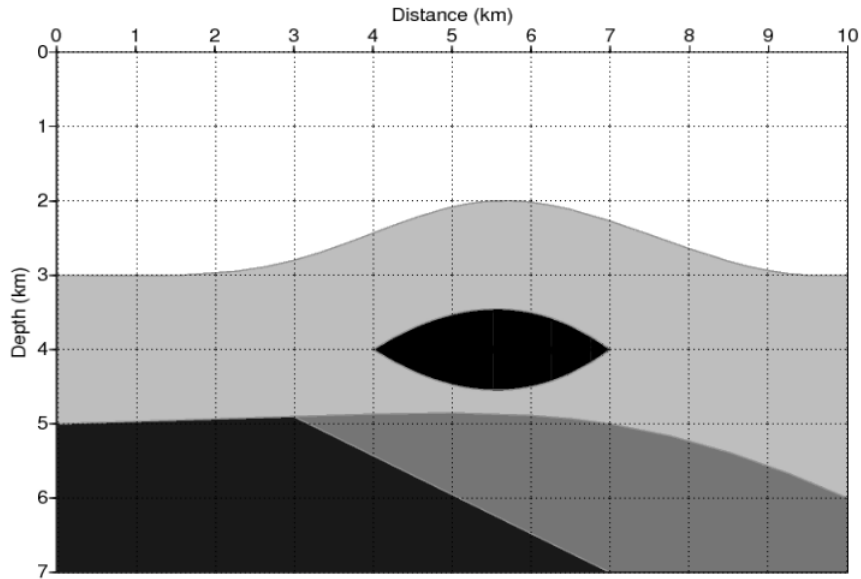


Tabla 2. Valores de *sloth* para cada una de las capas del tercer modelo

Capas	Sloth [s^2/m^2]	Coordenadas (x;z)
Capa uno	0,9	(0;3),(0;0),(10;0),(10;3), (9,5;3), (5,5;2) y (3;2,8)
Capa dos	0,7	(0;3), (3;2,8), (5,5;2), (9,5;3), (10;3), (10;6), (7;5), (3;4,9) y (0;5)
Capa tres	0,5	(3;4,9), (7;5), (10;6), (10;7) y (7;7)
Capa cuatro	0,3	(0;5), (3;4,9), (7;7) y (0;7)

El último modelo desarrollado (Figura 9) presenta las mismas características del modelo descrito anteriormente, con una diferencia detallada por una burbuja o domo salino ubicado en la segunda capa que ésta constituido por las siguientes coordenadas: (4;4), (5,5;3,5), (7;4) y (5,5;4,5).

Figura 9. Modelos de cuatro capas no uniformes con una variante.



2.3 ADQUISICIÓN SÍSMICA EN SU

Durante esta sección se abarca la simulación de procesos de adquisición sísmica desde el software *SU*. Entonces, el objetivo principal es brindar los conceptos y las herramientas computacionales disponibles para la generación de trazados de rayos y seguidamente, para el posicionamiento de fuentes de perturbación y sus receptores durante la obtención de una adquisición sísmica.

2.3.1. Trazado de rayos

El trazado de rayos sísmicos es ampliamente utilizado como una forma de exploración del subsuelo. Se fundamenta en determinar el recorrido que realiza una onda sísmica desde un punto donde es generada (fuente perturbadora o sólo fuente) has-

ta el receptor (geófono). Entonces, este trazado permite ver el comportamiento de la onda que viaja por el subsuelo, siendo así la primera experiencia de observación en cuanto a las condiciones del terreno.

En *SU*, el comando para el trazado de rayos es *triray*. Para la generación de los rayos, *triray* requiere de un parámetro de entrada: siendo el modelo generado en la sección 2.1 del presente capítulo (véase Figura 8. Después de ingresarlo se definen los ángulos de disparo, y a través de triangulación se obtiene el trazado, teniendo entonces que:

- *triray*: trazado dinámico de rayos para modelos basados en triangulación [3].
triray < modelfile > rayends [parámetros opcionales].

Cabe aclarar que la ventaja de usar *triray* es que pueden encontrarse errores en la etapa de modelado, como por ejemplo, que hayan superficies no cerradas o construídas inadecuadamente. Por esto se utiliza esta herramienta brindada por *SU* y de forma más detallada, se citan los parámetros opcionales de *triray* [3]:

- *xs*: coordenada de la fuente en dirección del eje horizontal (superficie de la tierra).
- *zs*: coordenada de la fuente en dirección del eje vertical *nangle*, número de ángulos de salida.
- *fangle*: primer ángulo de salida (en grados).
- *langle*: último ángulo de salida (en grados).
- *nxz*: número de coordenadas (x,z) en el archivo de rayo.

- *nangle*: número de ángulos que se desean observar.

Seguido del trazado, viene la etapa de agrupación de los rayos con el modelo generado (sección de modelado de capas) y para esto se utilizan los siguientes comandos:

- *psgraph*: El cual crea un archivo PostScript(.eps) en base a un archivo binario.
- *psmerge*: Encargado de unir archivos PostScript.

Esto quiere decir que al final de esta etapa se hace un empalme entre el modelo de capas y el trazado generado. Durante esta operación se crea la imagen de cómo posiblemente se propagarán las ondas durante la adquisición. A continuación se presenta el trazado de rayos sobre 3 modelos de capas del subsuelo (véanse las Figuras 10, 11 y 12), los cuales presentan ciertas similitudes pero el último tiene un lente o intrusión.

Figura 10. Trazado de rayos sobre el modelo de capas paralelas.

(a) Trazado con ángulos de igual apertura- (b) Trazado con una dirección específica.

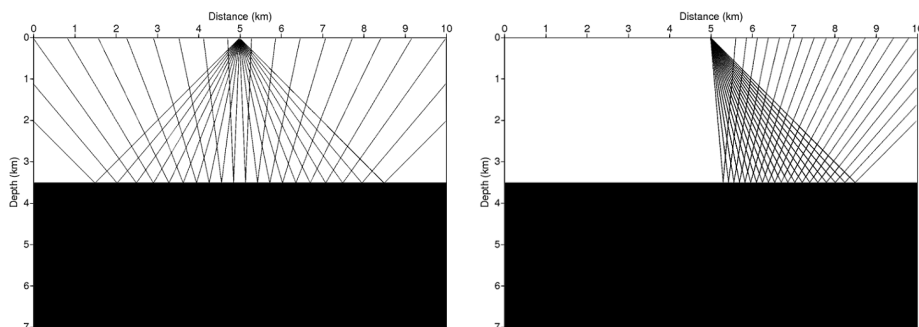
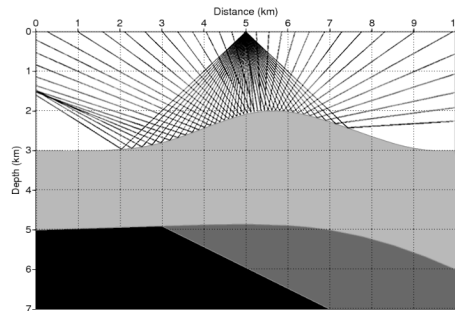
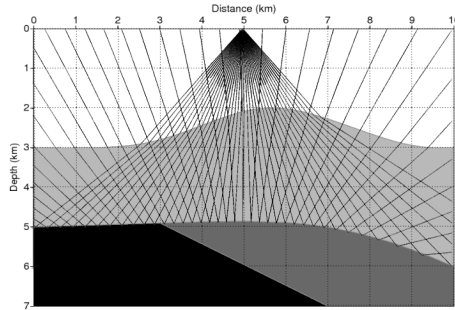


Figura 11. Trazado de rayos sobre el modelo 3 (modelo de 4 capas del subsuelo).

(a) Trazado sobre la primera capa del modelo 3.



(b) Trazado sobre la segunda capa del modelo 3.



(c) Trazado sobre la tercera capa del modelo 3.

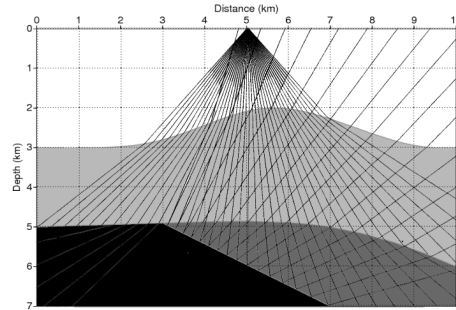
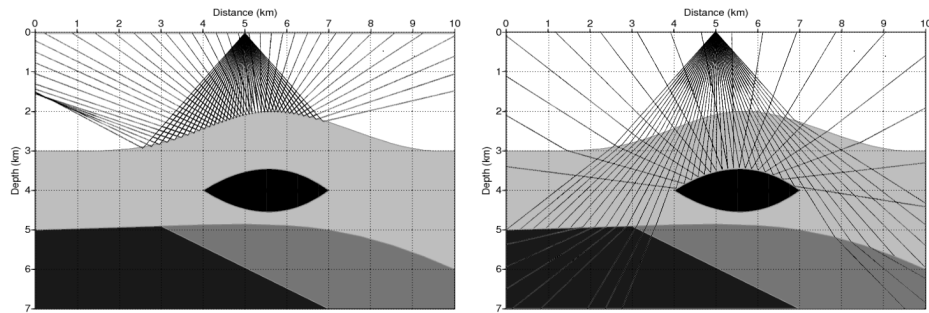
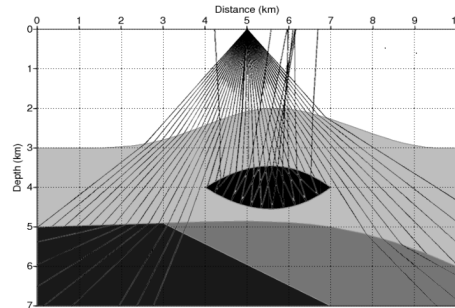


Figura 12. Trazado de rayos sobre el modelo 4 (modelo de 4 capas con intrusión).

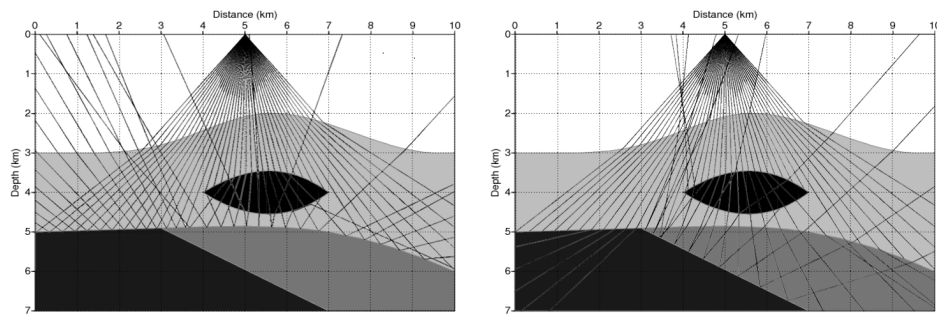
(a) Trazado sobre la primera capa del (b) Trazado sobre la segunda capa del modelo 4.



(c) Trazado sobre la tercera capa del modelo 4.



(d) Trazado sobre la cuarta capa del (e) Trazado sobre la quinta capa del modelo 4.

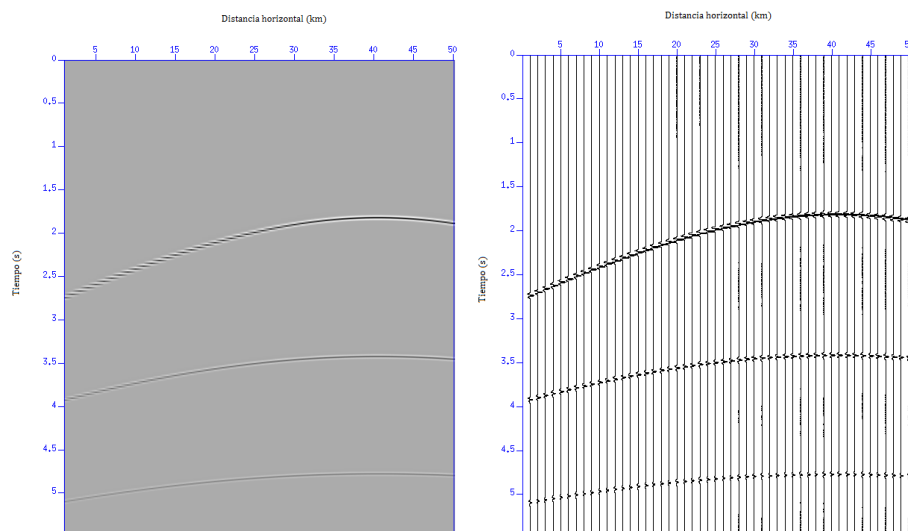


2.3.2. Adquisición y trazas sísmicas

Esta sección se enfoca en a la obtención los datos sísmicos, o sea que aquí es cuando se tendrá la primera simulación de perturbación y obtención de datos sísmicos. Por esto se siguen los fundamentos plasmados en el el libro *Seismic Data Processing with Seismic Unix* [3] donde pueden encontrarse el diseño de la adquisición, los parámetros a tener en cuenta y la obtención de trazas sísmicas sobre un modelo de capas. Entonces se siguen algunos de los ejemplos contenidos allí pero aclarando que, para nuestro seminario sólo se efectuará una adquisición con un disparo y sin ninguna inclinación específica en cuanto a la dirección de las ondas sísmicas. El objetivo de la adquisición entonces es, brindar información de los cambios de velocidades que experimentó la onda sísmica desde el momento en que salió de la fuente hasta llegar al receptor o geófono; ese resultado se puede evidenciar a través de las trazas sísmicas, por ejemplo, a continuación se presentan dos formas en las que *SU* permite visualizarlas (Figura 13).

Figura 13. Representaciones de las trazas sísmicas.

(a) Trazas sísmicas en forma de imagen sencilla. (b) Trazas sísmicas en forma de mapas de bits.



En esta se relaciona la cantidad de tiempo que han grabado cada uno de los geófonos, o sea que su eje horizontal se sitúan cada uno de ellos y en su eje vertical los instantes de tiempo en que se captaron las perturbaciones. Aunque para las representaciones utilizan los mismos datos, las diferencias entre las trazas se fundamentan en la interpretación bajo las cuales se esté realizando el análisis geofísico. Por ejemplo, la representación sencilla es comúnmente utilizada cuando se realizan análisis de propagaciones con frente de onda (permite identificar la forma de las ondas reflejadas y las difractadas), mientras que en forma de bits se utiliza para el trazado de rayos (permite determinar qué está captando cada geófono en forma específica).

En el anexo D se presentan: el código utilizado para realizar el proceso de adquisición sísmica a través de *SU*, los parámetros de mayor relevancia de este proceso y algunas trazas sísmicas obtenidas.

3. MÉTODOS DE SOLUCIÓN METAHEURÍSTICOS

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan dos técnicas metaheurísticas: *Simulated Annealing (SA)* y *Artificial Bee Colony (ABC)*, utilizadas en el seminario de investigación. Se realiza una descripción de las características principales de *SA* y *ABC*, como lo son, sus analogías físicas, descripción de los parámetros de mayor relevancia, diagramas de flujo y sus respectivos pseudocódigos. De igual manera, se desarrolla la evaluación de ambas técnicas metaheurísticas en funciones matemáticas multidimensionales para verificar su funcionamiento, obtener los parámetros principales y realizar la implementación en el proceso de inversión sísmica. Finalizando, se muestran los pasos en el proceso de vinculación entre *MATLAB* y *SU* para resolver el problema planteado en seminario de investigación.

3.2 MÉTODOS DE SOLUCIÓN

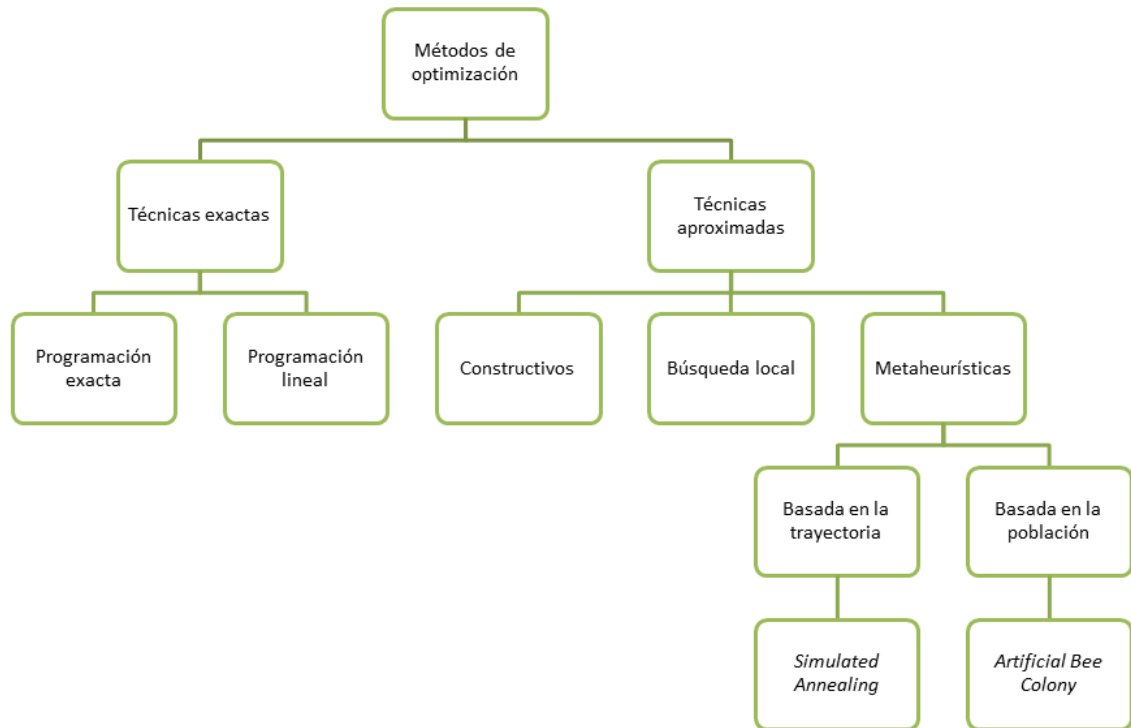
Los problemas de optimización pueden resolverse a través de métodos exactos y métodos heurísticos¹. En los métodos exactos se conoce la función objetivo, la continuidad de la función y su respectiva derivada. No obstante, si no se cumple con alguna de las condiciones mencionadas se procede a utilizar un método heurístico.

¹Son una metodología y/o conjunto de pasos ordenado, son basados en el uso de reglas empíricas para la búsqueda de una solución aproximada de un problema en particular

Los métodos heurísticos permiten encontrar soluciones que dependen de su punto de partida y presenta un avance evolutivo con cada paso iterativo.

Para la optimización de problemas y cálculos de alta complejidad se han desarrollado múltiples técnicas, éstas son clasificadas en exactas y aproximadas. Las exactas se caracterizan por garantizar la búsqueda de la solución óptima en cualquier problema, su principal inconveniente es el crecimiento exponencial del tiempo de cómputo en su resolución. Las aproximadas sacrifican la garantía de encontrar el resultado óptimo de un problema a cambio de obtener una buena solución en un tiempo razonable. Durante las tres últimas décadas se desarrollaron y utilizaron tres tipos de técnicas aproximadas, se les conoce como: métodos constructivos, que parten de una solución vacía y en su evolución se construye su estructura; métodos de búsqueda local que usan el concepto de vecindario y recorren el espacio de búsqueda hasta encontrar un mínimo local y las técnicas metaheurísticas se fundamentan en la combinación de diferentes métodos heurísticos para conseguir una exploración del espacio de búsqueda más eficiente. En la Figura 14 se ubica el esquema que relaciona los métodos de solución con las técnicas metaheurísticas que son el objetivo principal de este capítulo.

Figura 14. Descripción de los métodos de solución.



Existe una gran variedad de formas para la clasificación de las técnicas metaheurísticas, como lo son: basadas en la naturaleza (algoritmos bioinspirados) o no basados en ella, basadas en la memoria o sin memoria, con función objetivo estática o dinámica, entre otras. Las técnicas metaheurísticas pueden utilizar un único punto de partida o trabajar sobre un conjunto o población en un espacio de búsqueda, estas técnicas se dividen en dos ramas, las cuales son las técnicas basadas en la trayectoria y las técnicas basadas en la población. Las técnicas basadas en la trayectoria son aquellas que parten de un punto inicial y generan un proceso de actualización mediante la exploración del vecindario, formando una trayectoria. Por otro lado, las técnicas basadas en la población trabajan con un conjunto de individuos que representan varias soluciones en el espacio de búsqueda, su resultado depende fundamentalmente en la evolución de la población en cada paso o itera-

ción.

A lo largo de toda la revisión bibliográfica que se realizó antes de dar inicio al seminario de investigación, se encontraron gran cantidad de técnicas metaheurísticas, como lo son: *Simulated Annealing* [4], *Artificial Bee Colony* [5], *Particle Swarm Optimization* [6], *Genetic Algorithms* [7] y *Intelligent Water Drops* [8]. A cada una de ellas se le hizo su respectiva analogía física, el estudio de su estructura y su funcionamiento. Por medio de este análisis se pudo seleccionar las técnicas adecuadas para implementarlas en el problema de inversión sísmica. Las técnicas seleccionadas fueron *Simulated Annealing (SA)* y *Artificial Bee Colony (ABC)*. En el caso de *SA* ya había sido aplicado en un problema de inversión sísmica en una dimensión por *Mrinal* y *Stoffa* en el año 1995 [9]. También, fue estudiado e implementado por el grupo CEMOS² en un trabajo de investigación sobre el desarrollo de sistemas de ecuaciones. [10]. Igualmente, el algoritmo de *ABC* también ha sido implementado por el grupo CEMOS en algunos trabajos de investigación [11], [12] y [13] pero no aplicado a la problemática de la inversión sísmica. La elección de las técnicas *SA* y *ABC* fue basada en la información previa obtenida por medio de la revisión bibliográfica, por las implementaciones ya realizadas en problemas de optimización global, por la programación de *script* en la plataforma *MATLAB* y para efectuar un análisis comparativo entre una técnica de búsqueda basada en trayectoria con un solo punto o partícula (*SA*) y una técnica de búsqueda basada en un conjunto de puntos o población (*ABC*).

Recientemente, como consecuencia de la evolución de los computadores, los métodos de optimización global se han aplicado a varios problemas geofísicos. A diferencia de los métodos de optimización local, estos tratan de encontrar el mínimo

²Grupo de Investigación en control, electrónica, modelado y simulación de la Universidad Industrial de Santander

global de la función objetivo. Algunos de los algoritmos de optimización global son de naturaleza estocástica y utilizan información más general dentro del espacio de búsqueda para actualizar su posición. Si bien la convergencia de estos métodos no está garantizada para cada problema de optimización, algoritmos como *SA*, ha reportado resultados relativamente confiables en la solución del problema de inversión sísmica [9]. De igual manera, el algoritmo *ABC* presenta características interesantes como la especialización de agentes y la posibilidad de identificar regiones óptimas [14].

3.3 SIMULATED ANNEALING

La técnica de *SA* fue formulada por *Scott Kirkpatrick, Daniel Gellat y Mario Vecchi* en el año de 1983 [4]. Esta técnica está inspirada en el proceso de enfriamiento de los materiales. En este proceso, a medida que baja la temperatura el material va modificando su configuración y cada una de las configuraciones tiene asociada una energía determinada. El algoritmo de *SA* proviene del proceso de recocido³ del acero y cerámicas. Se inicia con un calentamiento en los sólidos que causa que los átomos aumenten su energía y puedan desplazarse de sus posiciones iniciales. Un enfriamiento lento presenta mayores probabilidades de alcanzar una configuración de cristalización. Mientras que, con una velocidad de enfriamiento rápida se logran obtener sólidos no cristalinos a causa de que partiendo de estados energéticos elevados la temperatura desciende rápidamente y las moléculas no pueden adoptar una configuración más estable.

³Tratamiento térmico donde su finalidad es el ablandamiento y la recuperación de estructuras en los materiales

3.3.1. Descripción de parámetros

SA resuelve gran cantidad de problemas de optimización, para ellos es necesario ser precisos a la hora de escoger las etapas del algoritmo, las ecuaciones y variables específicas. El éxito de SA depende del uso de sus parámetros propios, como lo son: las probabilidades iniciales y finales, de ellas se generan la temperatura inicial y final las cuales dan inicio y terminación al proceso de recocido (en las ecuaciones 3 y 4 se muestran la relaciones entre la temperatura inicial y final con respecto a las probabilidades iniciales (p_i) y finales (p_f) y el factor de enfriamiento, el cual es el encargado de disminuir la temperatura en cada paso evolutivo de SA(ecuación 5).

$$T_i = \frac{-1}{\log(p_i)} \quad (3)$$

$$T_f = \frac{-1}{\log(p_f)} \quad (4)$$

$$Frac = \left(\frac{T_f}{T_i} \right)^{\frac{1}{n-1}} \quad (5)$$

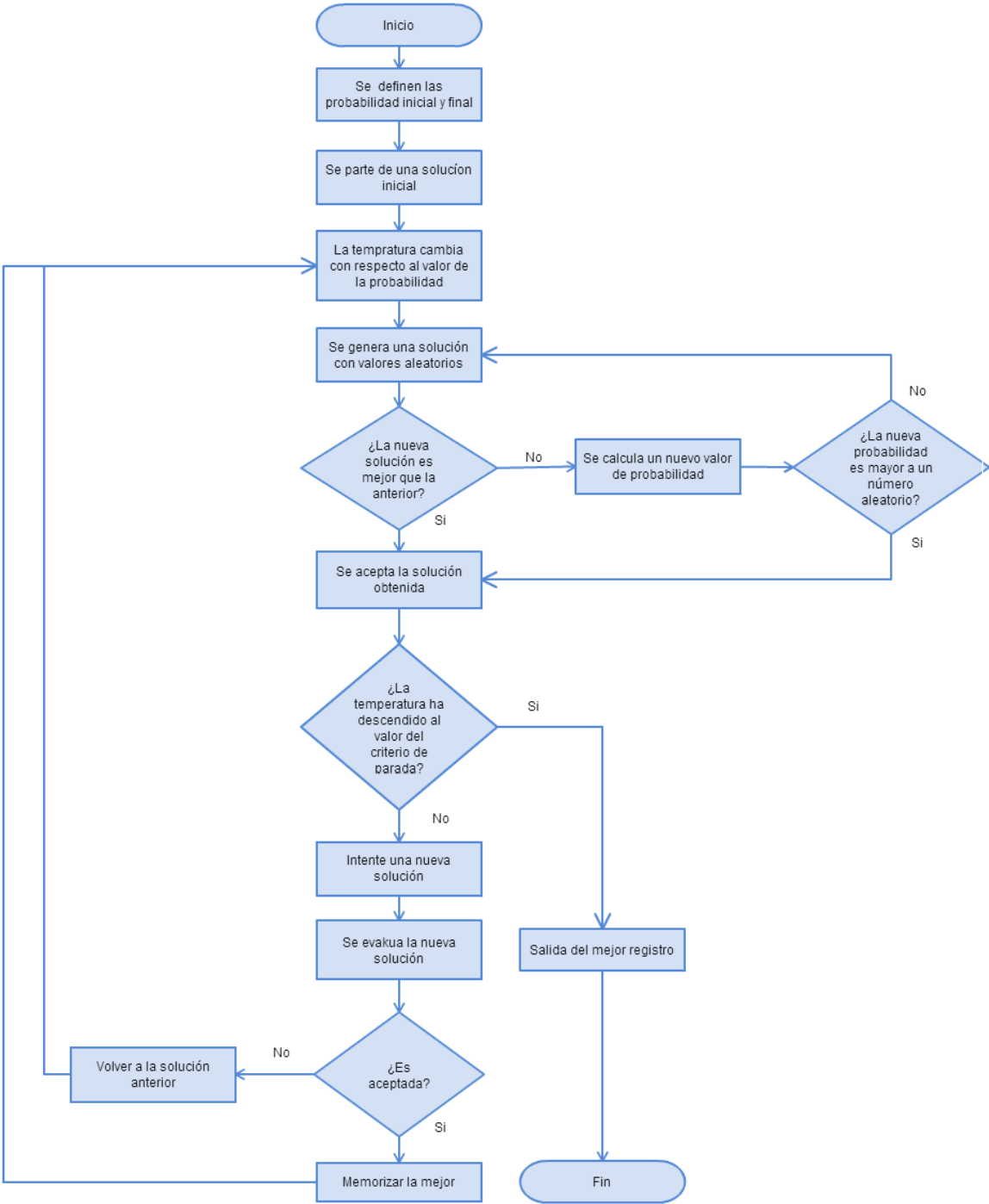
Las iteraciones se hacen de forma sucesiva, evaluando los estados vecinos hasta encontrar una aproximación óptima, la cual debe cumplir con los requisitos específicos del problema. En cada nueva iteración el parámetro de temperatura va disminuyendo simulando el proceso de enfriamiento de un sólido (metal) hasta llegar a una configuración cristalina, que en nuestro caso representa el mínimo global de una función objetivo.

3.3.2. Diagrama de flujo de SA

Los pasos para el desarrollo del código se ilustran de manera gráfica (Figura 15) y se nombran a continuación:

- Definir los valores de la probabilidad inicial y la probabilidad final.
- Generar un nuevo vecino.
- Evaluar el vecino.
- Hallar la diferencia entre la nueva evaluación y la evaluación actual.
- Aceptar o rechazar la nueva solución.
- En caso de rechazar la nueva solución, hallar un valor de probabilidad.
- Generar un número aleatorio entre $[0,1]$.
- Comparar el valor de la nueva probabilidad y el número aleatorio para aceptar o rechazar la nueva solución.
- La temperatura disminuye con cada nueva iteración.
- El proceso llega a su final cuando alcanza el criterio de parada.
- Se entrega la solución obtenida.

Figura 15. Diagrama de flujo de SA.



3.3.3. Descripción e implementación de las funciones de prueba en SA

En la Tabla 3 se presentan las características de las funciones de prueba [15] utilizadas para comprobar el funcionamiento de SA. En la tabla se incluye el nombre de cada una de las funciones, su formulación, su rango y valor óptimo, esto con el fin de presentar mayor información sobre las funciones prueba y poder analizar de mejor manera los resultados obtenidos. Estas funciones presentan algunas diferencias y similitudes en ciertos aspectos. Una de las diferencias se puede evidenciar con la función *Ratrigin*, que presenta gran variedad de mínimos locales y la función *Rosenbrock*, que es la constitución de un valle.

Para lograr un buen funcionamiento de SA aplicado en el problema de inversión sísmica el primer paso es comprobarlo mediante un número determinado de funciones de prueba, con las cuales se verifica la eficiencia en alcanzar el mínimo global establecido por dichas funciones.

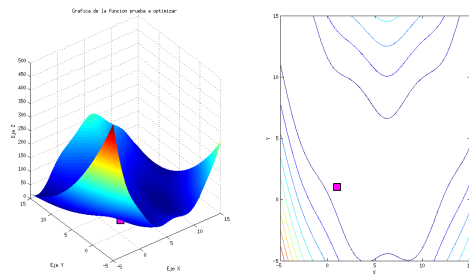
Tabla 3. Tabla de funciones prueba

Función	Formulación	Rango	Óptimo
<i>Booth</i>	$f_1(x, y) = (x + 2y - 7)^2 + (2x + y - 5)^2$	$-10 \leq (x, y) \leq 10$	$f(1, 3) = 0$
<i>Branin</i>	$f_2(x, y) = a(y - bx^2 - cx - r)^2 + s(1 - t)\cos(x) + s$ $a = 1; b = \frac{5,1}{4\pi^2}; c = \frac{5}{\pi}; r = 6; s = 10; t = \frac{1}{8\pi}$	$-10 \leq x \leq 10$ $0 \leq y \leq 15$	$f(9.42478, 2.475) = 397887$
<i>Bukin</i>	$f_3(x, y) = \sqrt[100]{ y + 0,01x^2 } + 0,01 x + 10 $	$-15 \leq x \leq -5$ $-3 \leq y \leq 3$	$f(-10, 1) = 0$
<i>Rastrigin</i>	$f_5(x_i) = 10n + \sum_{i=1}^n [x_{i+1}^2 - 10\cos(2\pi x_i)]$	$-5,12 \leq x \leq 5,12$	$f(0, 0) = 0$
<i>Rosenbrock</i>	$f_6(x_i) = \sum_{i=1}^{n-1} [100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (1 - x_i)^2]$	$-\infty \leq x \leq \infty$	$f(1, 1) = 0$

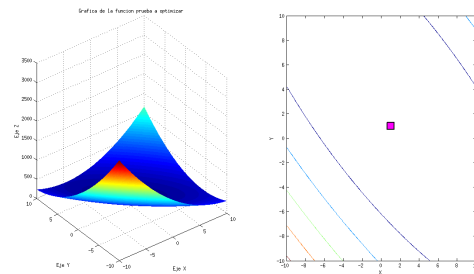
Los parámetros de importancia en el algoritmo son: la probabilidad inicial, el valor de normalización, número de iteraciones, número de ensayos por cada iteración y la probabilidad final. El único parámetro establecido y modificado durante las pruebas realizadas fue el de la probabilidad inicial, la cual también puede ser conocida como la temperatura inicial para que el proceso de enfriamiento comience, con respecto a su analogía física. Las tres probabilidades usadas fueron: 0,2 (enfriamiento rápido), 0,5 (enfriamiento moderado) y 0,7 (enfriamiento lento), implementando SA en catorce funciones de prueba, entre las cuales se mencionan algunas de ellas como: *Branin*, *Booth*, *Rosenbrock*, *Rastrigin* y *Bukin* (tabla 3). Las pruebas en las cuales siempre se obtuvo el resultado correcto y esperado se muestran en la Figura 16.

Figura 16. Funciones prueba en SA

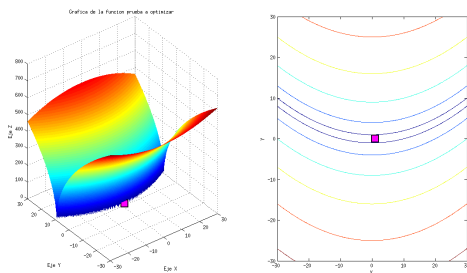
(a) Branin



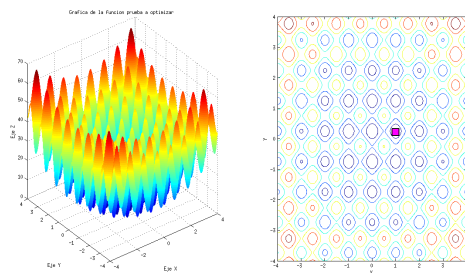
(b) Booth



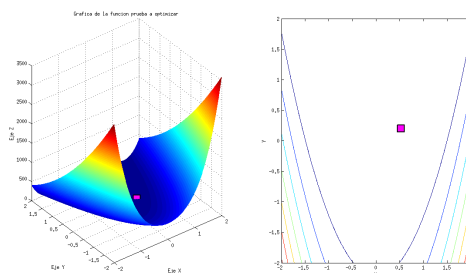
(c) Bukin



(d) Rastrigin



(e) Rosenbrock



Para el desarrollo del experimento con SA en la implementación con las funciones prueba para corroborar su óptimo funcionamiento en la localización del mínimo global, se utilizaron tres valores para la probabilidad inicial como punto de partida, se desarrollaron 10 repeticiones para cada una de las probabilidades iniciales, cada repetición constaba de 80 iteraciones. Cuando SA detecta que la variación en las temperaturas es cero el se detiene, siendo este el criterio de parada implementado. Se tomaron como datos de mayor relevancia para el criterio de selección de los va-

lores de los parámetros con mayor eficiencia, el tiempo de cómputo y la proximidad de la partícula a las coordenadas del mínimo global en cada una de las funciones prueba.

Para hacer la evaluación del algoritmo de *SA* se utilizó *MATLAB* y un equipo de cómputo cuyas características se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Especificaciones del equipo de cómputo usado en los experimentos sobre las funciones de prueba

Procesador	Intel®Core™i5-240M CPU @ 2.30GHz
RAM	4.00 GB
Sistema operativo	Microsoft®Windows®7 Home Premium de 64 bits
Alimentación	Conectado a la red eléctrica
Plan de energía	Alto rendimiento

En la Tabla 5 se muestran los parámetros bajo los cuales se obtuvieron los mejores resultados en la implementación de *SA* en el conjunto de funciones de prueba y en la Tabla 6 se presenta los promedios y desviaciones estándar de los experimentos realizados con cada una de las funciones de prueba. En el seminario de investigación se generó una discusión con cada una de las funciones con respecto a la selección de los parámetros que serán utilizados en el proceso de inversión sísmica con *SA*. Además, se encuentra que existe cierta tendencia del algoritmo para encontrar el mínimo de la manera más óptima bajo la probabilidad inicial entre 0,5 y 0,7, por esto se tiene como preferencia un valor entre estos para la siguiente fase del seminario.

Tabla 5. Parámetros bajo los cuales se obtuvieron los mejores resultados en la implementación de SA en el conjunto de funciones de prueba

Función	Probabilidad inicial	Probabilidad final
<i>Booth</i>	0,5	0,001
<i>Branin</i>	0,2	0,001
<i>Bukin</i>	0,7	0,001
<i>Rastrigin</i>	0,7	0,001
<i>Rosenbrock</i>	0,7	0,001

Tabla 6. Promedios y desviación de las funciones prueba de SA

Función	Probabilidad	Mínimo promedio	Desviación	Tiempo de cómputo [s]	Iteraciones
<i>Booth</i>	0,2	20	0	12,5893449	17,5
	0,5	20,07959	0,25168568	27,883298	39,1
	0,7	20	7	36,755046	51,7
<i>Branin</i>	0,2	27,7029	0	9,2844217	9,4
	0,5	27,7029	0	28,2459699	35,2
	0,7	27,7029	0	42,9912697	51,7
<i>Bukin</i>	0,2	6,20101	2,52656112	16,6805347	21,5
	0,5	3,98197	2,68709655	32,6001855	45,2
	0,7	5,08931	1,93219435	38,5398945	54
<i>Rastrigin</i>	0,2	-1,51411	0,02145773	9,3733725	7,1
	0,5	2,52316	1,3645464	37,4496792	35,4
	0,7	1,876054	1,51227954	51,7390166	51,6
<i>Rosenbrock</i>	0,2	1,775916	2,21133478	7,9211243	8,7
	0,5	3,906229	3,31564537	17,7830898	22,6
	0,7	2,919689	4,00180246	34,7112264	46,6

Con cada valor se determinó el número iteraciones que la partícula utiliza para alcanzar la proximidad a las coordenadas del mínimo global y el tiempo de cómputo que tarda dicha operación. Según sea la forma de la función de prueba, el algoritmo puede presentar similitudes con cada una de las probabilidades iniciales, sus únicos cambios se presentan en el número de iteraciones y el tiempo de cómputo utilizado en la simulación. En las funciones *Branin* y *Booth* (Figura 16a y 16b), donde el valor

de las coordenadas del mínimo global son (1,1), se presentó un comportamiento similar con respecto a cada valor de probabilidad usado con SA en las iteraciones y tiempo de cómputo empleado.

La probabilidad inicial de 0,7 fue la que presentó una mayor cobertura con la cercanía de las coordenadas al valor del mínimo global, el número de iteraciones es un valor cercano al límite establecido de 80, demostrando el funcionamiento del criterio de parada establecido con el valor de la probabilidad final. El tiempo de cómputo no excede los 60 segundos para lograr la localización con mayor proximidad a las coordenadas al mínimo global (Tabla 6). Se advierte que en algunos casos la probabilidad inicial de 0,2 presenta un gran acercamiento al mínimo global, pero dado el caso de su proceso de un enfriamiento rápido, la exploración que realiza es rápida y puede ocasionar algún tipo de estancamientos en un mínimo local (ver las Tablas E 4, E 5 y E 6 del Anexo E).

3.4 ARTIFICIAL BEE COLONY

En la naturaleza muchas especies de insectos viven en grupos de colonias o enjambres, lo que les facilita realizar sus tareas colectivas. Si bien, cada miembro del grupo presenta capacidad limitada para realizar tareas, la colonia exhibe un comportamiento emergente que surge de la interacción entre los individuos [5].

ABC es un algoritmo de inteligencia de enjambre desarrollado por *Dervis Karaboga* en 2005 [5], que busca emular el comportamiento de búsqueda y explotación de fuentes de alimento de las abejas con el fin de encontrar

buenas soluciones a problemas de optimización de alta complejidad (técnicas metaheurísticas). El algoritmo recrea una colmena artificial conformada por tres tipos de abejas *employed*, *scouts* y *onlookers* (obreras, exploradoras y observadoras) que establecen una zona de comunicación e implementan un proceso de recolección de alimento (polen). El proceso de búsqueda de las fuentes de alimento es de manera aleatoria.

3.4.1. Descripción de parámetros

ABC es una técnica metaheurística diseñada para localizar el mínimo global de una función objetivo en un espacio determinado, conocido como espacio de búsqueda. El representa y corresponde a un entorno y cada punto de ese entorno representa una posible solución (fuente de alimento), que el grupo de abejas artificiales pueden utilizar. De igual forma, el *fitness* (calidad) del polen de una fuente de alimento representa la cercanía a una posible solución. Dentro de la colonia artificial existen tres tipos de abejas:

- *Employed*: Explotan cada una de las fuentes específicas de alimento que han sido exploradas con anterioridad y comparten la información sobre la calidad y cantidad de alimento al resto de la colonia.
- *Scouts*: Son las abejas encargadas de la búsqueda de nuevas fuentes de alimento en un espacio aleatorio.
- *Onlookers*: Son las responsables de recibir la información acerca de las fuentes de alimento y escogen una según la información de la calidad y cantidad.

La mitad de población de la colonia artificial esta constituida por *employed* y la segunda mitad por *scouts* y *onlookers*. Cada uno de los ciclos de búsqueda en *ABC*

consiste en tres pasos: el envío de *employed* a las respectivas fuentes de alimento para medir el *fitness* (en la ecuación 6 se expresa su formulación matemática) de cada una de ellas; la selección de las fuentes de alimento por parte de las *onlookers* después de compartir la información obtenida de las *employed* para determinar la cantidad alimento de las fuentes y la fijación de las *scouts* para ser enviadas a posibles nuevas fuentes de alimento.

$$fit_i = \begin{cases} \frac{1}{1+f_i} & \text{si } f_i \geq 0 \\ 1 + |f_i| & \text{si } f_i < 0 \end{cases} \quad (6)$$

f_i , corresponde al valor de la función objetivo evaluada en los puntos del espacio de búsqueda donde el *fitness* del alimento es el mejor.

ABC genera una población inicial con una distribución aleatoria de i soluciones, donde $i = 1, \dots, SN$, $j = 1, \dots, D$, donde SN es el número de fuentes de alimento e indica el tamaño de la población y D es el numero de parámetros que se requieren optimizar. En cada ciclo del algoritmo, en el espacio de búsqueda definido entre $x_{min} \leq x \leq x_{max}$, cada una de las *employed* determina una nueva fuente de alimento vecina a su fuente actual y calcula la cantidad de alimento que la nueva fuente posee mediante la ecuación 7.

$$v_{ij} = x_{ij} + \theta_{ij}(x_{ij} - x_{ki}) \quad (7)$$

θ_{ij} es un número aleatorio entre $[-1,1]$, $k \neq i \in \{1,2,\dots,D\}$, x_{ij} es el parámetro j -ésimo de una solución x_i que fue seleccionada para ser modificada. Si la cantidad de néctar de esta nueva fuente de alimento es mayor a la actual, la *employed* se mueve a su nueva fuente de alimento. De lo contrario se mantiene.

A las fuentes de alimento que han sido olvidadas se les denomina abandonadas, y si transcurren muchas iteraciones sin que la solución mejore, la *employed* ubicada en esa fuente se convierte en una *scout*. En esta posición una nueva solución es generada aleatoriamente para la *scout*, ecuación 8:

$$x_i^j = x_{min}^j + u(x_{max}^j - x_{min}^j) \quad (8)$$

j se determina de manera aleatoria y debe ser diferente de i y u , es un número aleatorio entre $[-1,1]$.

Una *onlooker* elige una fuente de alimento dependiendo del valor de probabilidad (p_i) asociado con esta última (ecuación 9).

$$p_i = \frac{fit_i}{\sum_{n=1}^{SN} fit_n} \quad (9)$$

donde SN , como ya se mencionó, es el número de fuentes de alimento, y fit_i es el valor del *fitness* de la solución.

Una vez que todas las *employed* culminan el proceso de búsqueda, comparten la información de cada una de las fuentes de alimento y su respectiva ubicación con las *onlookers*, quienes sean encargadas de seleccionar la fuente de alimento en función del *fitness*. Las *employed* y *scouts* retienen la posición de la fuente que ofrece mayor alimento a la colonia.

Finalmente, las *scouts* se encargan de reemplazar todas las fuentes de alimento que ya han sido agotadas con nuevas fuentes seleccionadas al azar. El algoritmo asume que en cada ciclo de trabajo realizado, una única fuente puede ser agotada y la *employed* pasa a ser una *scouts*, por lo que, si más de una fuente ha excedido el valor límite para ser abandonada y olvidada, debe ser elegida aquella fuente que tiene el mayor valor [16].

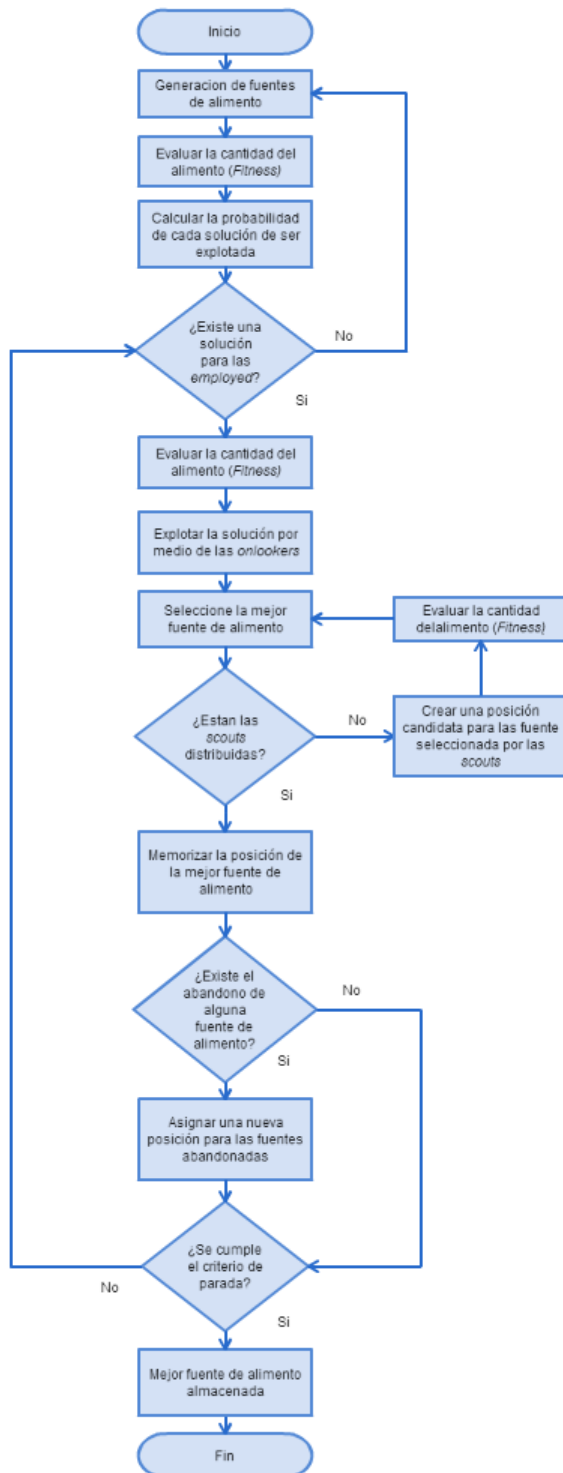
3.4.2. Diagrama de flujo de ABC

Los pasos para el desarrollo del código se ilustran de manera gráfica (Figura 17) y se nombran a continuación:

- Generar un conjunto (población) de soluciones (individuos) al problema.
- Evaluar cada solución en la función objetivo.
- Seleccionar las mejores soluciones de la población según el valor del *fitness*.
- Generar nuevas soluciones a partir de las mejores según su valor de *fitness*.
- Evaluar las nuevas soluciones.
- Escoger las soluciones que entrarán a la siguiente iteración.
- Preguntar acerca de la distribución de las *scouts*.

- Memorizar la mejor solución.
- Verificar si existen fuentes abandonadas y asignar un nuevo punto si existen.
- Preguntar si el criterio de parada se ha cumplido para concluir el proceso. De lo contrario el proceso retorna a buscar una mejor solución.

Figura 17. Diagrama de flujo de ABC.



3.4.3. Descripción e implementación de las funciones de prueba en ABC

La versión utilizada del algoritmo de *ABC* es la propuesta por *Karaboga* [17].

El proceso de verificación del funcionamiento de *ABC* se se desarrollo en catorce funciones de prueba , entre las cuales se mencionan algunas de ellas como: *Brainin*, *Both*, *Rosenbrock*, *Rastrigin* y *Bukin* como se han mencionado en la sección de descripción e implementación de funciones prueba en *SA*(Figura 16 y Tabla 3).

En la Tabla 7 se muestran los parámetros bajo los cuales se obtuvieron los mejores resultados en la implementación de *ABC* en el conjunto de funciones de prueba y en la Tabla 8 se presenta los promedios y desviaciones estándar de los experimentos realizados con cada una de las funciones de prueba. Los valores de la tabla generaron discusiones con respecto a la selección de los parámetros que serian utilizados en el proceso de inversión sísmica con *ABC*. Las discusiones se encuentran en las memorias digitales del documento. En las discusiones se resaltaron los valores de las tres pruebas realizadas con las poblaciones de 10, 20 y 30 abejas.

Tabla 7. Parámetros bajo los cuales se obtuvieron los mejores resultados en la implementación de *ABC* en el conjunto de funciones de prueba

Función	Tamaño de la población
<i>Booth</i>	30
<i>Branin</i>	30
<i>Bukin</i>	30
<i>Rastrigin</i>	20
<i>Rosenbrock</i>	30

Tabla 8. Promedios y desviación de las funciones prueba de *ABC*

Función	Población	Mínimo promedio	Desviación	Iteraciones promedio	Tiempo promedio [s]
<i>Booth</i>	10	1,12919007	1,146559107	23,2	0,647
	20	0,23016737	0,051349396	22,1	0,906
	30	0,012744912	0,013532305	19,8	1,137
<i>Branin</i>	10	0,36216399	0,352536372	25,9	0,696
	20	0,21329765	0,15553577	22,3	0,878
	30	0,22446724	0,132097387	19,5	1,165
<i>Bukin</i>	10	8,6784274	7,758857266	18,5	0,638
	20	7,5289446	6,937159233	16,3	0,795
	30	3,5909497	2,656896372	16,4	0,997
<i>Rastrigin</i>	10	1,48556586	1,478197364	21,9	0,643
	20	0,665324746	1,013439495	25,3	0,925
	30	0,204889333	0,21624768	24	1,176
<i>Rosenbrock</i>	10	2,4230653	2,771242645	15,6	0,597
	20	1,72072109	1,98449941	14,7	0,748
	30	0,333023497	0,758225293	15,3	0,978

El único parámetro que exige el algoritmo para su funcionamiento es el de seleccionar un tamaño de población adecuada para el proceso de exploración y búsqueda dentro del algoritmo, siendo la principal característica de *ABC*, donde solo con el número de abejas necesarias se logra alcanzar el mínimo global de la función objetivo en un tiempo no superior a los 2 [s] y siempre con una aproximación a las coordenadas del mínimo de la función de prueba. Esta cercanía de la población a las coordenadas del mínimo global de la función fue la selección de criterio de eficiencia del parámetro de población inicial en cada prueba realizada, puede observarse en el anexo F.

Para el desarrollo del experimento de evaluación de *ABC* con el grupo de funciones de pruebas previamente seleccionadas, donde su objetivo es el de encontrar su óptimo funcionamiento en la localización del mínimo global en cada una de las funciones de prueba. Se utilizaron tres valores para el tamaño de la población, se desarrollaron 10 ensayos para cada una de las poblaciones seleccionadas, en cada

ensayo se producía una rutina de 5 repeticiones, cada una constaba de 1000 iteraciones como límite en el desarrollo del algoritmo, el tiempo de cómputo y la proximidad a las coordenadas del mínimo son los factores más importantes en la toma de los resultados obtenidos en cada una de las simulaciones realizadas.

Los valores de la población seleccionados fueron de: 10, 20 y 30 abejas, con cada valor de población se tomaron los datos con respecto al número de iteraciones que el algoritmo utiliza para alcanzar el mínimo, la proximidad de la partícula al mínimo global y el tiempo de todo el proceso de la simulación. El tiempo de cómputo es un dato relevante a causa de la gran velocidad de convergencia de *ABC* en comparación con *SA*. La población indicada para una excelente búsqueda y exploración en cualquier función objetivo es entre 20 y 30 abejas, con estos números se apreciaron los resultados con mayor precisión como puede apreciarse en las funciones *Branin*, *Booth*, *Rastrigin* y *Rosenbrock* (Ver Tabla 8).

3.5 INTERFAZ ENTRE MATLAB Y SEISMIC UNIX

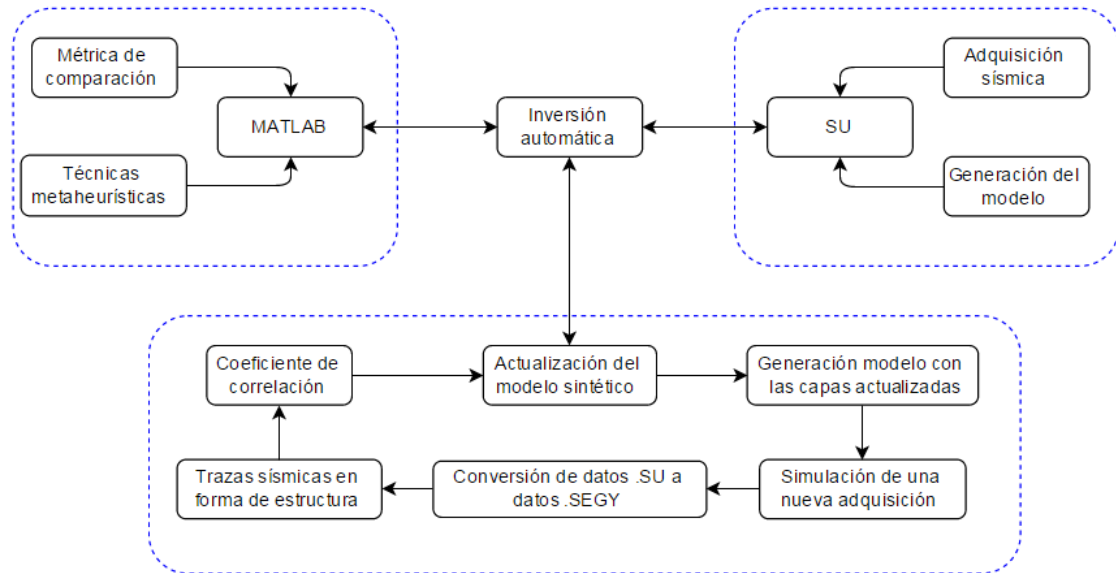
En el desarrollo del seminario de investigación se creó y se modificó la función encargada de la comunicación entre *MATLAB* y *SU*. Dicha función fue denominada inversión automática, está descrita en el anexo G. Cabe aclarar que este tipo de función es creada en el entorno de programación de *MATLAB* y es un complemento para los códigos de *SA* y *ABC* con la función *fitness* (Anexos H, I y J).

El puente de comunicación entre *MATLAB* y *SU* se realiza a través de la función *inversión automática*, quien es la encargada de realizar los cambios en las líneas de

código en la terminal de *UBUNTU* necesitarías para realizar los procesos de creación de un modelo, su respectiva adquisición y su comparación entre las trazas sísmicas. La característica del puente de comunicación es de carácter unidireccional desde *MATLAB* a *SU* y la forma en que se transforma en un puente bidireccional se hace en primera medida por medio de los comandos de operaciones matemáticas que ofrece el paquete de *SU*. A partir de esto se procede a convertir la cadena de caracteres que son entregados por *SU* a un formato decimal de tal forma que *MATLAB* pueda leer el indicador de comparación.

El diagrama de de interfaz entre *MATLAB* y *SU* se presenta en la Figura 18. Donde la métrica de comparación y las técnicas metaheurísticas son desarrolladas a través de *MATLAB*. La generación de modelos y el proceso de adquisición sísmica son realizados por medio de *SU*. El canal de comunicación como ya se menciono anteriormente es la función *inversión automática*, esta función es la encargada de realizar la actualización del modelo sintético, de generar el nuevo modelo con las capas actualizadas, de realizar una nueva adquisición sísmica, el procesamiento de los datos *.SEGY* y *.SU*, convertir las trazas sísmicas en formas de estructuras y obtener el coeficiente correlación de las trazas sísmicas de referencia con las obtenidas en la nueva adquisición. Posteriormente, las técnicas metaheurísticas realizan un proceso de minimizar el valor de la función objetivo que es representado por el vector que la métrica de comparación entrega en cada nueva iteración.

Figura 18. Diagrama de comunicación entre *MATLAB* y *SU*.



Otra modificación entre la comunicación de *MATLAB* y *SU* se hace a causa de la manipulación de las trazas sísmicas, las cuales están limitadas por los comandos que ofrece *SU*. Por esta razón, la manipulación de las trazas sísmicas es implementada en *MATLAB*, de tal modo que se permita no solo recibir un indicador de comparación de trazas por parte de *SU*, sino la posibilidad de implementar una métrica de comparación que manipule las trazas sísmicas y arroje los datos más dicientes a *SA* y *ABC*. Finalmente, al llamar a la función inversión automática por el código principal, ella tiene la capacidad de hacer de manera automática las siguientes funciones (Figura 18):

- Se actualiza el modelo sintético para la partícula (*SA*) o una población de partículas (*ABC*) de acuerdo a los *sloths* iniciales.
- Se genera el modelo del subsuelo con las capas actualizadas.
- Se simula la adquisición para obtener las trazas sintéticas.

- Se realiza la conversión del formato *.SU* a *.SEG Y* y viceversa.
- Se importan las trazas sísmicas sintéticas y reales a *MATLAB* en forma de estructura.
- Se calculan los coeficientes de correlación entre las trazas sísmicas sintéticas y reales.

3.5.1. SA y ABC implementados en el problema de inversión sísmica

En el transcurso del seminario de investigación surgieron cambios en la adaptación con respecto al número de dimensiones de los algoritmos de *SA* y *ABC* que fueron utilizados para la evaluación de sus respectivos funcionamientos en funciones de prueba. Las modificaciones realizadas corresponden a la adaptación de *SA* y *ABC* con la función *inversión automática*. La versión final de *SA* y *ABC* utilizados en el proceso de inversión sísmica están localizados en los anexos H y I.

En primer lugar se realizaron las implementaciones de los algoritmos *SA* y *ABC*, que se encargaba de buscar un modelo sintético por medio de las coordenadas localizadas por la partícula o el conjunto de partículas, la cual se presenta como la analogía a la búsqueda del mínimo global de modo que presenten alguna coincidencia con los valores de *slotts* del modelo de referencia. Segundo, se implementó la correlación cruzada como métrica de comparación. La métrica de comparación entrega un vector, el cual está constituido por los máximos coeficientes de correlación, que han sido obtenidos mediante la comparación entre las trazas del modelo de referencia y las trazas del modelo sintético. Finalmente, se procedió a realizar un número de pruebas con *SA* y *ABC*, estas pruebas se muestran en el capítulo 4 y en el anexo K. En el desarrollo de las pruebas se efectuaron variaciones con relación a los parámetros de *SA* (probabilidades,

temperaturas, iteraciones, ensayos, entre otros) y de *ABC* (población, iteraciones y rutinas). En consecuencia, el objetivo de esta variación es el de encontrar el mejor conjunto de parámetros, que permitan hallar los *sloths* correspondientes a un modelo sintético que presente una solución aproximada con relación al modelo usado como referencia, el cual está ubicado en el capítulo 2, en la sección 2.1 y en la Figura 8.

4. PRUEBAS Y RESULTADOS

En la etapa final del seminario se realizaron las pruebas y simulaciones con *SA* y *ABC*. Además, se hizo la implementación y emparejamiento de las técnicas metaheurísticas con el proceso de inversión sísmica para encontrar el modelo de velocidades óptimo del subsuelo. Por consiguiente, en este capítulo se habla de las simulaciones realizadas y los resultados obtenidos.

4.1 METODOLOGÍA

En el proceso de las simulaciones se abarcan aquellos parámetros definitivos que fueron seleccionados a través de las simulaciones realizadas con las funciones pruebas, aplicadas en *SA* y *ABC*. Los parámetros son de crucial importancia como se observo en las Tablas 6 y 8 en el capítulo 3, donde se puede observar el comportamiento de los algoritmos sobre las funciones de prueba en el proceso de minimización. Teniendo en cuenta los resultados de los experimentos aplicados en las funciones de prueba (ver Anexos E y F) los parámetros de funcionamiento de *SA* para dar comienzo son: una probabilidad inicial de 0,7, una probabilidad final de 0,0001 y un número de iteraciones variable. Para el caso de *ABC*, todo el algoritmo radica en la selección del tamaño de la población, este número es de 30 abejas. A diferencia de los trabajos realizados con *ABC* por el grupo CEMOS [11], [12], [13] donde el número de la población era de un valor superior en comparación a nuestra selección. Los valores utilizados en los trabajos de grado desarrollados por el grupo CEMOS fueron descartados a causa del funcionamiento que presento *ABC* sobre

las funciones de prueba con una población de 30 abejas (véase Tabla 8).

El procedimiento de las simulaciones realizadas para *SA* y *ABC* fue el siguiente: de las cuatro capas del modelo principal creado a través de *SU* los valores de *sloths* iniciales del modelo de referencia son 0,77; 0,50; 0,26 y 0,12, se tomó como base a las pruebas que se realizaron, y por último se llevó el registro de cada uno de los respectivos casos (Anexo K).

El algoritmo que presentó las principales modificaciones en los valores de los parámetros fue *SA*, donde el valor de 0,7 en su probabilidad inicial no presentaba resultados significativos. Por consiguiente, este parámetro fue cambiando como se pudo observar en la Tabla 10 y la Tabla K 1 ubicada en el anexo K de complementos. Las variaciones de los valores iniciales de las capas al igual que sus respectivos puntos de inicio en el desarrollo de todas las simulaciones.

4.2 RESULTADOS

Los datos de *SA* arrojados por las pruebas realizadas, se presentan de la siguiente forma: para su interpretación las pruebas relevantes que contienen los datos arrojados se encuentran ubicados en una tabla. La tabla contiene los parámetros utilizados y que fueron variados, como lo son: la probabilidad inicial, la probabilidad final o criterio de parada, la temperatura inicial, la temperatura final y el paso de reducción en cada iteración. La métrica utilizada fue la correlación cruzada. Las especificaciones de la maquina de cómputo utilizada para el desarrollo de las pruebas sobre el proceso de inversión sísmica se aprecian en la Tabla 9. Las pruebas que se

presentan parten de un punto cercano para así observar la convergencia que presenta el algoritmo de SA bajo el proceso de inversión sísmica. En lo que respecta a ABC, se realiza una prueba diferente, ya que aquí no se tiene la búsqueda de una partícula alrededor de un campo, sino que es una colonia o grupo de puntos que son evaluados y que seguidamente buscan nuevas soluciones que dependen de un valor de rendimiento o *fitness*.

Para la primera prueba desarrollada mediante SA se usaron los parámetros contenidos en la Tabla 10. En esta primera prueba se tienen que cuatro de los cinco intentos realizados, donde cada intento constaba 5 iteraciones, la partícula presento un movimiento cercano del valor exacto; que para el caso de la primera capa tiene el valor de 0,77. Con esto presente, se tiene que el valor de la correlación no es el adecuado, ya que con cada iteración presenta un alejamiento del valor de 1 el cual es el valor ideal. El alejamiento se puede evidenciar en la Figura 20, donde cada geófono es utilizado sobre la adquisición sísmica y como en cada iteración (Figura 19 realizada en el transcurso de la prueba para encontrar el valor de la primera capa.

Tabla 9. Especificaciones del equipo de cómputo usado en los experimentos sobre el proceso de inversión sísmica

Procesador	Intel®Xeon®CPU ES-2609 @ 2.40GHz
Memoria RAM	DDR3 de 8.00 GB
Sistema operativo	debian 8 de 64 bits

Tabla 10. Parámetros de la primera prueba con SA

Parámetros	Prueba 1	Prueba 2
Intentos	5	5
Iteraciones	5	10
Probabilidad inicial	0,7	0,7
Probabilidad final	0,001	0,001
Temperatura inicial	2,8037	2,8037
Temperatura final	0,1448	0,1448
Paso de reducción	0,3	0,3
Tiempo de cómputo [s]	30,11	58,85

En las Figuras 19 y 20 se observa la variación del coeficiente de correlación cruzada que se presentó en la prueba realizada con respecto al número de iteraciones y géofonos. El valor ideal del coeficiente es igual a uno, pero en esta prueba se puede evidenciar que los parámetros que se utilizaron con SA no son los indicados a causa de la lejanía a los valores del coeficiente de correlación cruzada y el valor de *sloth* en la primera capa.

Figura 19. Promedio de los coeficientes de la correlación cruzada con respecto al número de iteraciones en la primera prueba con SA.

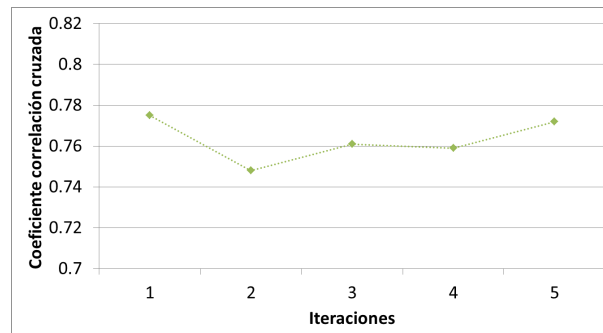
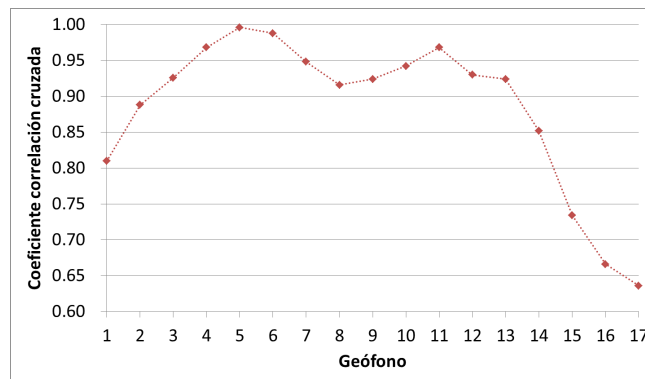


Figura 20. Promedio de los coeficientes de la correlación cruzada con respecto al número de geófonos en la primera prueba con SA.



Para la segunda prueba se aumentaron las iteraciones con respecto a los parámetros de funcionamiento de SA, obteniendo así que tres de los cinco intentos culminan muy cercanos al valor de *sloth* real de la primera capa, quedando como un factor determinante a la hora de seleccionar parámetros para futuros procesos de inversión. Esa cercanía se ve entonces reflejada en algunos valores del comportamiento de la función correlación, pero aquellos que se encuentran lejos de la solución intentan volver al valor real; no descartando entonces que ese factor exploratorio tiende a regresar después de cierta cantidad de iteraciones.

En las Figuras 21 y 22 se observan las variaciones tanto del valor de los *sloths* de la primera capa como los coeficientes de correlación cruzada que se presentaron en la prueba realizada con respecto al número de iteraciones y geófonos.

En el anexo K se encuentran ubicadas las pruebas complementarias con respecto a SA.

Figura 21. Promedio de *sloths* en la segunda prueba con SA.

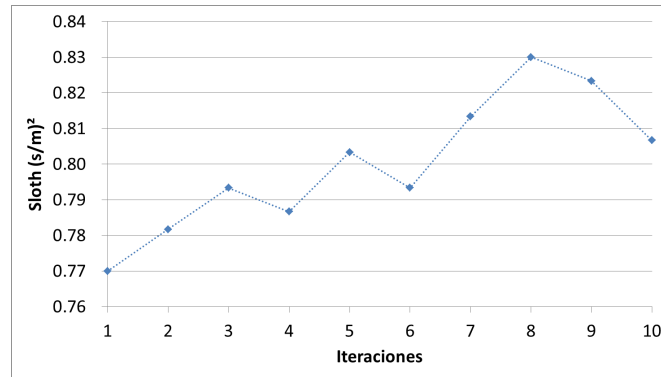
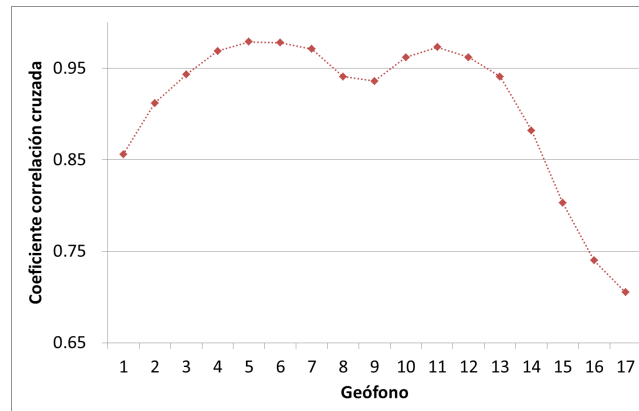


Figura 22. Promedio de los coeficientes de la correlación cruzada con respecto al número de geófonos en la segunda prueba con SA.



Con *ABC* se realiza una prueba diferente, ya que aquí no se tiene la búsqueda de una partícula alrededor de un campo, sino que es una colonia o grupo de puntos que son evaluados y que seguidamente buscan nuevas soluciones basados en un vector de rendimiento (*fitness*), o sea que el espacio de soluciones está delimitado pero en constante movimiento y selección. Por algunas cuestiones de tiempo sobre el cronograma del seminario de investigación, sólo se realiza un seguimiento guiado (dando valores aleatorios a la primera capa, pero cercanos a la solución de la misma) a la convergencia del algoritmo. Por ejemplo, a continuación: en la Tabla 11, se presenta el cambio del alimento obtenido por la colonia para la primera capa mientras las demás se mantienen en un valor estático; en la Tabla 12, se presentan

las soluciones exploradas por la colonia para la primera capa y en la Tabla 13, se muestra la mejor solución encontrada por la colonia. La prueba fue realizada con una colonia de 30 abejas, donde aquella que tiene un valor más cercano al real es guardado para que aleatoriamente la colonia se mueva y así se busquen soluciones, y si dado el caso no aparece un mejor valor se selecciona el más cercano como solución. Esta información se observa en la quinta columna, donde se guarda ese primer valor de capa y uno de los demás es cambiado aleatoriamente, pero si el entregado como nuevo valor 0,8375, no es mejor que 0,7942, el que estaba previamente se deja como el mejor vector solución encontrado. Por esto, la convergencia del algoritmo de *ABC* estaría limitada y sujeta al tamaño de la colonia y a la cantidad de abejas que se cambian en el proceso de búsqueda de nuevos puntos aleatorios.

Tabla 11. Alimento obtenido por la colonia en la prueba realizada con *ABC*

Alimento	Valores				
Primera capa	0,7986	0,8021	0,7314	0,7377	0,7942
Segunda capa	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000
Tercera capa	0,2600	0,2600	0,2600	0,2600	0,2600
Cuarta capa	0,1200	0,1200	0,1200	0,1200	0,1200

Tabla 12. Soluciones exploradas por la colonia en la prueba realizada con *ABC*

Soluciones exploradas	Valores				
Primera Capa	0,8375	0,8021	0,7314	0,7377	0,7942
Segunda Capa	0,7000	0,7000	0,7000	0,7000	0,7000
Tercera Capa	0,7000	0,7000	0,7000	0,7000	0,7000
Cuarta Capa	0,7000	0,7000	0,7000	0,7000	0,7000

Tabla 13. Soluciones exploradas por la colonia en la prueba realizada con *ABC*

Sloths finales	Valores
Primera Capa	0,7942
Segunda Capa	0,5000
Tercera Capa	0,2600
Cuarta Capa	0,1200

En síntesis, *SA* presenta un funcionamiento con la probabilidad inicial de 0,7 pero el algoritmo debe presentar un mayor número de iteraciones para que el valor de los coeficientes de cada geófono obtengan una mayor cercanía al valor ideal de 1. En lo que respecta a *ABC*, la población de 30 abejas es un número adecuado pero el algoritmo debe ser simulado con un mayor número de iteraciones para poder apreciar con mayor detalle el trabajo realizado por toda la colonia.

Finalmente es necesario contrastar los valores finales de los modelos de velocidades obtenidos mediante el uso de *SA*, *ABC* y el modelo sintético de referencia (tabla 14); aquí se presentan los *sloths* finales de pruebas para cada algoritmo (valores tomados de la Figura 19 y la Tabla 13. Todo esto con el objetivo de dar indicios (así se haya partido de la solución y sólo variara la primera capa) del comportamiento y evolución de las técnicas metaheurísticas durante el proceso de inversión sísmica.

Tabla 14. Comparación de *sloths* finales entre *SA* y *ABC* con respecto al modelo de referencia

Capas del modelo	Sloth modelo de referencia	SA	ABC
Primera Capa	0,77	0,775	0,794
Segunda Capa	0,50	0,50	0,50
Tercera Capa	0,26	0,26	0,26
Cuarta Capa	0,12	0,12	0,12

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones de lo desarrollado con las técnicas metaheurísticas aplicadas en un problema de inversión sísmica, en el transcurso del seminario de investigación.

5.1 CONCLUSIONES

Se encuentra que el comportamiento de las técnicas metaheurísticas en la obtención del modelo de velocidades del subsuelo, está directamente relacionado con los parámetros de la probabilidad inicial de 0,7 para *SA* y una población de 30 abejas para *ABC* sobre los cuales operan estas técnicas, sobre todo en lo que concierne a la capacidad exploratoria de soluciones en estos algoritmos.

Por ejemplo, durante la evaluación de las funciones de prueba, una población de 30 en una técnica como *ABC* permite tener más información del espacio de búsqueda, lo cual aumenta las probabilidades de encontrar con mayor precisión una posible solución. De igual manera, representa una reducción notable en el número de iteraciones realizadas y en el tiempo de cómputo.

Un valor de probabilidad inicial de 0,2 para *SA* y un valor de población inferior a 10 abejas para *ABC*, representa un convergencia prematura como puede eviden-

ciarse en los experimentos realizados sobre las funciones de prueba.

La carencia de una estrategia en la realización de los experimentos, conlleva a una interpretación errónea de los resultados del algoritmo en donde se cree que el funcionamiento es erróneo e incompleto como lo sucedido en las pruebas realizadas con *SA* y *ABC* en el capítulo 4.

Se entregan las herramientas teórico-prácticas de todo lo desarrollado en el transcurso del seminario de investigación, estas herramientas se presentan en memorias digitales que contienen los *scripts* de *MATLAB* de las dos técnicas metahrurísticas, los modelos generados en *SU*, las memorias y actas de cada sesión.

5.2 RECOMENDACIONES

Para trabajos posteriores en la implementación de los dos algoritmos de optimización global, sería de gran utilidad hacer un programa en *MATLAB* que realice una variación de todos los parámetros que contienen los algoritmos, con la idea de que automáticamente se puedan obtener resultados de todas las combinaciones posibles. Con base en esto, es posible obtener una base de datos que contenga información importante de las pruebas, en donde se permita hacer un estudio detallado del comportamiento de los algoritmos en relación con los valores de los parámetros, para determinar cuál es la combinación de parámetros que arrojaría resultados más precisos, en cuanto al hallazgo del mínimo global en funciones prueba de 2D y la

mejor combinación de *sloths* en lo referente a inversión sísmica.

Reducir las líneas de código de los algoritmos con la finalidad de optimizar recursos computacionales, por ejemplo, las líneas de código que hacen la actualización de las ecuaciones de posición y *fitness* del alimento en el algoritmo *ABC*, podrán reducirse al asignar una matriz que represente en sus columnas y filas los valores necesarios para actualizar estas ecuaciones, quitando un ciclo de repetición que recorre cada una de las dimensiones para la respectiva actualización.

En futuros trabajos relacionados con la implementación de algoritmos en problemas de inversión sísmica, se podrá ahondar en las temáticas requeridas para hacer que la combinación de *sloths* esperada no corresponda a un modelo con geometría fija como se trabajó durante este seminario, sino que por el contrario, generar modelos con mayor complejidad y con características con mayor similitud a la superficie terrestre.

La implementación de métricas de comparación de trazas sísmicas fueron enfocadas en la comparación de señales en toda su extensión, estas fueron, correlación y correlación cruzada de sismogramas. Sin embargo, no se utilizó una métrica que tuviera en cuenta la energía de la señal dado que se planteó en una de las sesiones la necesidad de considerar este parámetro en vista de que el primer arribo de las trazas contiene una mayor energía que podría opacar el valor de las capas más profundas, por eso es recomendable buscar una que lo haga con el fin de permitir una nueva alternativa de comparación.

Hacer pruebas en las que se combinen las métricas de comparación, ya que es posible que en la ejecución de los algoritmos se requiera la utilización de varias métricas como es el caso de la correlación cruzada y la diferencia de mínimos cuadrados, que permitan una mejor comparación en los diferentes momentos de la implementación.

Realizar el proceso de una adquisición sintética a partir de la ecuación de onda y no de trazado de rayos como se realizó. Asimismo, aumentar el número de fuentes y geófonos en el proceso de adquisición en SU para obtener una mejor resolución en las trazas sísmicas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CAICEDO, Mario y MORA Plácido. Temas de propagación de ondas. Universidad Simón Bolívar, 2004.
- [2] PÉREZ, Carlos, MATEO Mónica y MACIÁ Antonio. Aplicación de tomografía de refracción sísmica y análisis de microtemores como técnicas de prospección geofísicas en estudios geotécnicos en edificación. En: Informes de la Construcción [en línea] vol.65, abril-junio, 2013. http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/33408/1/2013_Perez_Mateo_Macia_InformesConstr.pdf Revisado el 20 de Marzo de 2014.
- [3] FOREL, David, BENZ Thomas y PENNINGTON Waybe. Seismic data processing with Seismic Un*x. Society of Exploration Geophysicists, 2005.
- [4] KIRKPATRICK, Scott, GELATT Daniel y VECCHI Mario. Optimization by Simulated Annealing. American Association for the Advancement of Scienci, 1983, vol.220.
- [5] KARABOGA, Dervis. An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization. Technical Report, 2005, vol.6.
- [6] KENNEDY, James y EBERHART Russell. Particle Swarm Optimization. Purdue School of Engineering and Technology, Indianapolis, 1995, vol.95,. p. 1942-1948.
- [7] MITCHELL, Melanie. An introduction to genetic algorithms. Massachusetts Institute of Technology, 1998.
- [8] SHAA-HOSSEINI, Hamed. An Approach to Continuos Optimization by the Intelligent Water Drops Algorithm. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2001, vol.32,. p. 224-229.

- [9] MRINAL, Sen y STOFFA Paul. Global optimization methods in geophysical inversion. Advances in exploration geophysics. Austin, Texas. Elsevier Science, 1995.
- [10] ROMERO, Jorge y SUAREZ John. Solución de las ecuaciones que describen el comportamiento de los modos híbridos de una guía de onda Rectangular parcialmente llena mediante el método de Optimización Recocido Simulado (Simulated Annealing). Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander, 2013.
- [11] CELIS, Julieth y RINCÓN Francis. Evaluación y comparación entre los métodos Newton Raphson y Artificial Bee Colony (ABC) para el análisis del flujo de carga de un sistema de potencia. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander, 2013.
- [12] FUENTE, Rafael y PETRO Elkin. Mantenimiento preventivo básico de un desfibrilador monofásico mediante los métodos de Enjambre de Partículas Mejorado y Colonia Artificial de Abeja. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander, 2013.
- [13] ÁVILA, José y NAVARRO Orlando. El método de Colonia Artificial de Abejas y el criterio de mínima entropía para el diseño óptimo de un dissipador de calor. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander, 2014.
- [14] REZA, Seyyed, MALEKI Isa, HOJJATKHAH Sohrab y BAGHERINIA Ali. Evaluation the efficiency of artificial bee colony and the firefly algorithm in solving the continuous optimization problem. En: International Journal on Computational & Applications (IJCSA) [en línea] vol.3, agosto, 2013. <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1310/1310.7961.pdf> Revisado el 20 de Enero de 2014.

- [15] Bioinformatics Laboratory. Test functions for optimization needs [en línea] <http://www.bioinformaticslaboratory.nl/twikidata/pub/Education/NBICResearchSchool/Optimization/VanKampen/BackgroundInformation/TestFunctions-Optimization.pdf> Revisado el 1 de Marzo de 2014.
- [16] AKAY, Bahriye and KARABOGA Dervis. A Modified Artificial Bee Colony Algorithm for Real-parameter Optimization. Information Sciences, 2012, vol.192, p. 120-142.
- [17] Intelligent Systems Research Group, Departament of Computer Engineering, Erciyes University, Turkiye. Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm Homepage [en línea] <http://mf.erciyes.edu.tr/abc/index.htm> Revisado el 10 de Mayo de 2014.
- [18] Wikipedia, La enciclopedia libre. Geofísica [en línea] <http://es.wikipedia.org/wiki/Geofisica> Revisado el 2 de Agosto de 2014.
- [19] Ecopetrol. Proyecto exploratorio Siriri-Catleya. Adquisición datos sísmicos [en línea] <http://www.ecopetrol.com.co/especiales/siriri/docs/0042.pdf> Revisado el 8 de Mayo de 2014.
- [20] RUIZ, Cristina. Inversión sísmica y estudio de atributos sísmicos post apilamiento de los niveles i3 y tu de la formación oficina en el campo guico guara, Estado Anzoategui. Universidad Simón Bolívar, 2007.
- [21] Física en Línea por Elba Sepúlveda. Ley de Hooke [en línea] <https://sites.google.com/site/timesolar/fuerza/ley-de-hooke> Revisado el 18 de Agosto de 2014.
- [22] Schlumberger Oilfiel Glosary. Seismic velocity [en línea] http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/sseismic_velocity.aspx Revisado el 18 de Agosto de 2014.

- [23] Laboratorio de Procesado de Imagen. Ondas [en línea] http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_06_07/io3/public_html/Ondas/Ondas.html Revisado el 20 de Agosto de 2014.
- [24] Schlumberger Oilfiel Glosary. Impedancia elástica [en línea] http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/e/elastic_impedance.aspx Revisado el 18 de Agosto de 2014.
- [25] Schlumberger Oilfiel Glosary. Impedancia acústica [en línea] http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/a/acoustic_impedance.aspx Revisado el 18 de Agosto de 2014.
- [26] Schlumberger Oilfiel Glosary. Ángulo de incidencia [en línea] http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/a/angle_of_incidence.aspx Revisado el 18 de Agosto de 2014.
- [27] Universitat Politècnica de Catalunya. Procesado de Sísmica de Reflexión Superficial [en línea] <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3404/7/41205-7.pdf> Revisado el 10 de Marzo de 2014.
- [28] Schlumberger. Inversión sísmica: Lectura entre líneas. En: Oilfield Review [en línea] vol.20, enero, 2008 http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish08/sum08/inversion_sismica.pdf Revisado el 2 de Julio de 2014.
- [29] GARCÍA, Víctor. Aplicación de un algoritmo de inversión sísmica bayesiana pre-apilamiento para estimación de propiedades elásticas en un yacimiento gasífero costa afuera, Trinidad & Tobago. Universidad Simón Bolívar, 2006.
- [30] MONCAYO, Edward. Inversión sísmica mediante un algoritmo genético/Seismic inversion with a genetic algorithm. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia, 2010.

- [31] LARA, José y CAICEDO Mario. Modelado sísmico con seismic unix. Universidad Simón Bolívar, 2010.
- [32] HALE, Dave y COHEN Jack. Triangulated models of earth's subsurface. School of Mines, Center of Wave Phenomena, Colorado, 1991.

BIBLIOGRAFÍA

- ÁVILA, José y NAVARRO Orlando. El método de Colonia Artificial de Abejas y el criterio de mínima entropía para el diseño óptimo de un disipador de calor. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander, 2014.
- CELIS, Julieth y RINCÓN Francis. Evaluación y comparación entre los métodos Newton Raphson y Artificial Bee Colony (ABC) para el análisis del flujo de carga de un sistema de potencia. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander, 2013.
- FOREL, David, BENZ Thomas y PENNINGTON Waybe. Seismic data processing with Seismic Un*x. Society of Exploration Geophysicists, 2005.
- FUENTE, Rafael y PETRO Elkin. Mantenimiento preventivo básico de un desfibrilador monofásico mediante los métodos de Enjambre de Partículas Mejorado y Colonia Artificial de Abeja. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander, 2013.
- KARABOGA, Dervis. An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization. Technical Report, 2005, vol.6.
- KIRKPATRICK, Scott, GELATT Daniel y VECCHI Mario. Optimization by Simulated Annealing. American Association for the Advancement of Scienci, 1983, vol.220.
- MRINAL, Sen y STOFFA Paul. Global optimization methods in geophysical inversion. Advances in exploration geophysics. Austin, Texas. Elsevier Science, 1995.

- ROMERO, Jorge y SUAREZ John. Solución de las ecuaciones que describen el comportamiento de los modos híbridos de una guía de onda Rectangular parcialmente llena mediante el método de Optimización Recocido Simulado (Simulated Annealing). Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander, 2013.

ANEXOS

ANEXO A. CONCEPTOS BÁSICOS

A.1. GEOFÍSICA La geofísica es la ciencia encargada del estudio de la estructura, condiciones físicas y evolución de la corteza terrestre. Para su estudio, usa métodos cuantitativos físicos naturales o diseñados por el hombre, como son la reflexión y refracción de ondas mecánicas, la gravedad, campos electromagnéticos, magnéticos o eléctricos, fenómenos físicos y radiactivos. La geofísica abarca dos grandes ramas: la geofísica interna y externa [18].

A.1.1. Geofísica interna Es la encargada de analizar el interior de la Tierra y los principales temas que estudia son [18]:

- **Sismología:** Su objetivo de estudiar los fenómenos generados al interior de la Tierra producto de la propagación de ondas elásticas.
- **Geodinámica:** Se encarga de estudiar aquellas modificaciones que sufre la corteza terrestre.

A.1.2. Geofísica externa Estudia las propiedades físicas del entorno terrestre, entre ellas se encuentran el geomagnetismo, paleomagnetismo, gravimetría, oceanografía, meteorología, aeronomía y climatología, pero debido a que ese campo de la geofísica no es nuestro objeto de estudio, no se abarcará en este documento [18].

A.2. SÍSMICA Es la generación artificial de ondas las cuales penetran el interior de la de la Tierra, atravesando las diferentes capas geológicas, produciendo pequeños ecos que son detectados en la superficie por instrumentos altamente sensibles. La información captada es procesada con herramientas de computación e interpretada geológicamente para entender la configuración y geometría interna de la corteza terrestre [19].

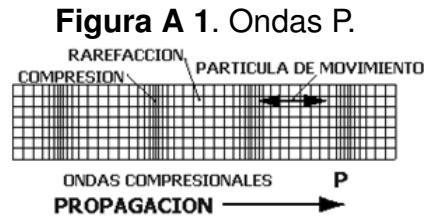
La sísmica dentro de la industria petrolera tiene como principal objetivo localizar aquellas trampas que contengan hidrocarburo. Existen ciertos ambientes que tienen estructuras que brindan las condiciones necesarias para encontrar excelentes trampas, sin embargo éstas necesariamente no contienen hidrocarburo, por esta razón se trata de extraer la mayor cantidad de información posible de los datos sísmicos, para tratar de descifrar las propiedades del área de estudio [20].

A.2.1. Teoría Sísmica: Conceptos Básicos

- **Ley de la elasticidad de Hooke:** Establece la relación entre el alargamiento o estiramiento longitudinal y la fuerza aplicada, siendo entonces, una propiedad física en la que los objetos son capaces de cambiar de forma cuando actúa una fuerza de deformación sobre ellos [21].
- **Velocidades sísmicas:** Es la velocidad con la que viaja una onda acústica a través de un medio, es decir, distancia dividida por el tiempo de viaje; esta puede determinarse a partir de perfiles sísmicos verticales o a partir del análisis de velocidad de los datos sísmicos. Además se presentan variaciones en sentido vertical, lateral y azimutal, en los medios anisotrópicos como las rocas; las cuales tienden a incrementarse con la profundidad en la Tierra porque la compactación reduce la porosidad [22].

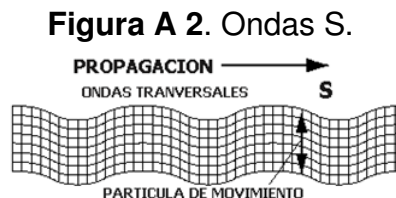
En un terremoto se transmiten ondas que viajan por el interior de la tierra, siguiendo caminos curvos debido a la variada densidad y composición del interior de la Tierra. A este tipo de ondas se llaman ondas internas, centrales o de cuerpo, transmitidas por los temblores preliminares de un terremoto pero poseen poco poder destructivo. Este clase de ondas son divididas en dos grupos [23]:

- **Ondas P:** Las ondas P (Primarias) son ondas longitudinales, lo cual significa que el suelo es alternadamente comprimido y dilatado en la dirección de la propagación (Figura A 1).



Fuente: Laboratorio de Procesado de Imagen [23].

- **Ondas S:** Las ondas S (secundarias) son ondas transversales o de corte, es decir, el suelo es desplazado perpendicularmente a la dirección de propagación, alternadamente hacia un lado y hacia el otro (Figura A 2). Las ondas S pueden viajar únicamente a través de sólidos y usualmente la onda S tiene mayor amplitud que la onda P.



Fuente: Laboratorio de Procesado de Imagen [23].

A.2.2. Impedancia elástica e impedancia acústica La impedancia elástica es el producto entre la densidad de un medio y la velocidad de su onda de corte (onda S) [24]. En cambio la impedancia acústica es el producto de la densidad por la velocidad sísmica, ésta varía entre las diferentes capas de rocas y se indica generalmente con el símbolo Z; teniendo en cuenta que las diferencias de impedancia acústica entre las capas de rocas afecta el coeficiente de reflexión [25].

A.2.3. Ángulo de Incidencia Es el ángulo agudo en el que una trayectoria sísmica choca con una línea normal a una interface; en geofísica, es similar a una onda sísmica que choca con los estratos. La ley de *Snell* describe la relación entre el ángulo de incidencia y el ángulo de refracción de una onda, teniendo entonces que el ángulo de refracción depende de la velocidad de la onda en ese medio [26].

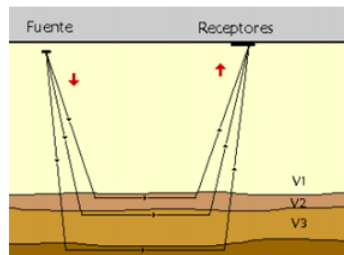
A.2.4. Coeficiente de reflexión El coeficiente de reflexión describe la amplitud (o la intensidad) de una onda reflejada respecto a la onda incidente. Se supone que la onda incidente tiene una magnitud de uno, la reflejada R y la transmitida 1-R. El coeficiente de Reflexión (R) es una función de las velocidades y las densidades de dos medios adyacentes a una interfaz [20].

A.2.5. Sísmica de refracción La sísmica de refracción realizó un gran aporte a la prospección (exploración del subsuelo encaminada a descubrir yacimientos minerales, petrolíferos, arqueológicos) sísmica en sus comienzos. Hasta la década de los 60 fue extremadamente popular, especialmente en la exploración de cuencas sedimentarias⁴ donde condujo al descubrimiento de grandes campos de petróleo.

⁴Cuenca sedimentaria: Es una zona deprimida presente en la corteza terrestre que se caracteriza por la acumulación de sedimentos.

El método se basa principalmente en la medición del tiempo de viaje de las ondas refractadas críticamente en las interfaces del subsuelo con diferentes propiedades físicas; fundamentalmente por el contraste entre las impedancias acústicas (Figura A 3). La sísmica de refracción solo considera las refracciones con ángulo crítico ya que son las únicas ondas refractadas que llegan a la superficie y pueden ser captadas por los geófonos [27].

Figura A 3. Sísmica de refracción.

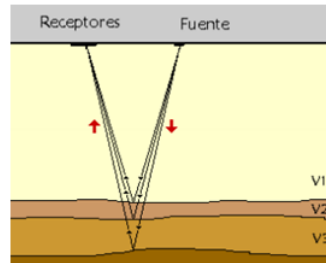


Fuente: Universitat Politècnica de Catalunya. Procesado de Sísmica de Reflexión Superficial [27].

Debido a su menor costo y al tipo de información que proporciona la sísmica de refracción, es un potente método que actualmente se emplea en estudios de estructuras profundas.

A.2.6. Sísmica de reflexión Este método se basa en las reflexiones del frente de onda sísmica sobre las distintas interfaces del subsuelo, responden al igual que en la refracción, a contrastes de impedancias que posteriormente se relacionaran con las distintas capas del subsuelo. Las reflexiones son detectadas por los receptores (geófonos) que se ubican en la superficie y que están alineados con la fuente emisora (Figura A 4).

Figura A 4. Sísmica de reflexión.



Fuente: Universitat Politècnica de Catalunya. Procesado de Sísmica de Reflexión Superficial [27].

Este método es una de las técnicas de prospección geofísica más utilizada, debido a que su resultado es una imagen denominada sección sísmica en donde se aprecia la geometría de las estructuras geológicas [27].

A.3. INVERSIÓN SÍSMICA Para la industria de Energía y Petróleo (*E & P*), muchas mediciones son basadas en procesos de inversión para su interpretación. Entonces, queriendo llegar a ella se necesitan estimaciones de una serie de resultados, pero ese ámbito es muy inestable ya que se necesitan mediciones múltiples (las cuales se realizan a condiciones diferentes, con diferentes operarios e incluso con recursos científicos diferentes) las cuales arrojan una relación matemática que no tendrá una única solución. Por esto, la inversión sísmica es una forma matemática que estima una respuesta basada en información previa y da la oportunidad de ser modificada hasta que sea aceptable.

El proceso de inversión, como su nombre lo indica, puede ser considerado como la inversa del modelo directo, al que a veces se refiere simplemente como modelado.

A.3.1 Modelado directo El modelo directo comienza con un modelo de las propiedades del subsuelo, luego simula matemáticamente un experimento o un

proceso físico por ejemplo, electromagnético, acústico, nuclear, químico u óptico en el modelo del subsuelo y finalmente provee como salida una respuesta modelada. Si el modelo y los supuestos son precisos, la respuesta modelada se asemeja a los datos reales.

A.3.2 Modelado inverso El modelado inverso hace lo contrario, o sea que comienza con los datos medidos reales, aplica una operación que retrocede el proceso a través de un experimento físico y produce un modelo del subsuelo. Si la inversión se realiza correctamente, el modelo del subsuelo es semejante al subsuelo real.

El proceso de inversión es utilizado por muchas disciplinas de Energía & Petróleo y puede aplicarse en una amplia gama de escalas y con niveles de complejidad variables. Entre ellas se encuentran [28]:

- Extracción de las litologías de las capas y las saturaciones de fluidos a partir de mediciones de registros múltiples.
- Interpretación de volúmenes de gas, petróleo y agua utilizando registros de producción.
- Inferencia de la permeabilidad y los límites del yacimiento derivados de los datos de presiones transitorias.
- Mapeo de los frentes de fluidos a partir de mediciones electromagnéticas entre pozos.

A.4. GENERALIDADES El objetivo principal en la inversión sísmica es tratar de obtener un modelo de impedancia del subsuelo a partir de la combinación de datos sísmicos e información de pozo. De esta forma, se crea un modelo cuantitativo del

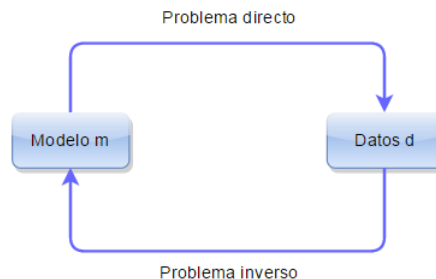
reservorio que nos permite caracterizar el mismo y establecer criterios óptimos de gerencia y explotación con el menor riesgo posible.

A.4.1. Teoría del Problema Inverso En geofísica, uno de los principales objetivos es hacer descripciones cuantitativas acerca del subsuelo, entonces, la finalidad principal de la inversión es transformar las observaciones sísmicas en propiedades cuantitativas de rocas que describan un reservorio.

Matemáticamente, un modelo es un espacio que se construye por medio de parametrizaciones de diferentes propiedades del subsuelo. Este espacio es llamado espacio del modelo y se denota como “ m ”. De igual forma se tiene un sistema de datos obtenidos experimentalmente, los cuales, por medio del modelado directo, se obtienen modelos del subsuelo.

Los datos observados correspondientes residen en un espacio matemático llamado espacio de los datos y se denota como “ d ”(Figura A 5).

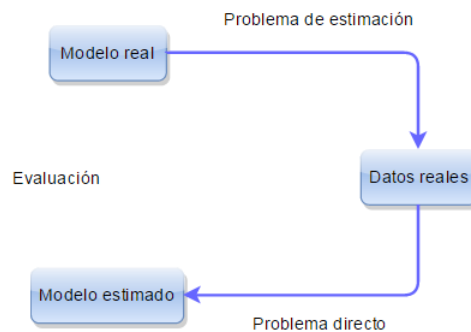
Figura A 5. Diagrama convencional del problema inverso.



En general, los modelos creados son funciones continuas del espacio con infinitos grados de libertad que describen el subsuelo. Paralelo a esto, los datos son funciones discretas ya que estos representan valores obtenidos experimentalmente. Por lo tanto, la inversión se enfoca hacia la resolución de un problema de evaluación del modelo estimado en base del modelo real (Figura A 6).

Una rápida comparación de ambas variables muestra que el paso de los datos a un modelo no puede ser único; es decir, que deben existir elementos del espacio del modelo que no tienen influencia alguna en el espacio de los datos. Esta carencia de unicidad representa la idea principal en la solución del problema inverso. Teniendo entonces que, se puede obtener un número infinito de modelos que pueden reflejar respuestas semejantes. El proceso de inversión entonces, se basa principalmente en la resolución de un problema de estimación, partiendo de un conjunto de datos observados; el objetivo es estimar el modelo que pueda simular estos datos con el menor error posible en comparación con el modelo real del subsuelo.

Figura A 6. Esquema del problema inverso.



Una forma de controlar la no unicidad en las soluciones en un proceso de inversión puede ser restringir los modelos con distribuciones a priori, las cuales incluyen

información adicional a los datos observados d y se basan tanto en conocimientos previos del interprete, como en datos geológicos y macro modelos construidos a partir de correlaciones con registros de pozos.

Finalmente el objetivo es minimizar el error entre los datos y los datos creados a partir de un modelo m . La función que describe este error es llamada función objetivo. Por lo tanto, el modelo final será aquel en donde la función objetivo asociada “ondícula - modelo - datos sísmicos” sea mínima. Esta minimización representa el propósito principal del proceso de optimización en la inversión sísmica [29].

A.4.2. Inversión basada en la traza Con la inversión basada en la traza, el proceso parte esencialmente de los datos sísmicos con la probabilidad de usar algunos datos no - sísmicos como por ejemplo, la tendencia de las frecuencias bajas derivadas de las velocidades de los pozos. Entonces se requiere un conjunto de métodos que usen las trazas sísmicas para calcular las frecuencias altas de la serie de reflectividad, ese es el objetivo principal de este método. [30].

A.4.3. Inversión basada en el modelo En este tipo de inversión, el proceso comienza con un modelo y se da un peso adicional a los datos no sísmicos. Estos datos no están limitados a la información de pozo, por ejemplo, las distribuciones estadísticas también pueden ser consideradas en el modelo inicial.

El término “inversión basada en un modelo” hace referencia a un conjunto de métodos que intentan obtener como resultado una resolución igual o mayor que la obtenida en la sísmica, dando un peso importante a información a priori que la ma-

yoría de las veces consiste en registros de pozo.

El valor de la impedancia depende del valor de la reflectividad y del valor de la impedancia de la capa previa, por lo que pequeños errores crean error acumulado en la inversión. Adicionalmente, debido a la no unicidad de la solución, diferentes modelos pueden producir una traza sintética que sea muy similar a la traza sísmica, es decir diferentes modelos de impedancias pueden obtener un error mínimo sin ser el modelo más cercano a la realidad [30].

A.5. OPTIMIZACIÓN GLOBAL Es un procedimiento mediante el cual se determina el mejor valor o conjunto de valores de una función o procesos en particular. Por lo general, la optimización busca minimizar o maximizar funciones por medio de la obtención del punto correspondiente a dicha característica.

ANEXO B. INTRODUCCIÓN A SU

B.1. SU: PROCESAMIENTO Y MODELADO SÍSMICO Para finales de la década de los 80's, específicamente para 1987, en el Centro de Fenómenos Ondulatorios de la Escuela de Minas de Colorado, se estaba formando un grupo de trabajo, liderado por *Jack Cohen* y *Shuki Ronen*, destinado a la generación de un conjunto de herramientas computacionales para las tareas relativas al procesamiento sísmico, todas estas herramientas pensadas para trabajar en un ambiente tipo *UNIX*. Es así como nace *SU*, el cual es un paquete de tipo software libre que trabaja como extensión del *shell* de *UNIX* (o cualquier derivación de éste) [31].

B.2. PRINCIPIOS EN LINUX Y SHELL-SCRIPTING En el capítulo 2 se mencionó que el programa que utilizaremos en el seminario para el modelado será *SU*. Todas las aplicaciones de *SU* corren en el sistema operativo *UNIX*, lo que hace necesario manejar los fundamentos básicos de redirecciones y tuberías que se emplean en el manejo del *shell* (terminal) de *UNIX*.

Linux Es un sistema operativo, mantenido por miles de programadores del todo el mundo que, provee al usuario de una interfaz para interactuar de algún modo con el software (las aplicaciones que corren a nivel de usuario) y el hardware (dispositivos físicos) de la máquina. *Linux* es sólo el *kernel* (núcleo) de la máquina, que permite la interacción entre el hardware y el software, y fue creado por *Linus Torvalds*. Formalmente, todas las distribuciones que existen actualmente del sistema operativo *Linux* deberían ser llamadas *GNU/Linux*; sin embargo, se ha popularizado

el nombre del segundo miembro de esta unión [31].

Linux Es un sistema operativo de *open source* (código abierto), lo que implica que su código fuente está disponible para sus usuarios, y puede ser modificado o alterado a criterio de los mismos para mejorar, crear u optimizar ciertas y determinadas tareas que el sistema requiera. El hecho que *Linux* sea *open source* ha incentivado a la formación de una comunidad mundial de programadores [31].

El terminal de *Linux* es quien realiza la interpretacion de los comandos que permite la comunicación con el *kernel* de la máquina e interactuar con los dispositivos lógicos que controlan el hardware.. Básicamente lo que se puede hacer a través del entorno gráfico, se puede hacer por el terminal. Además, una vez aprendido los comandos básicos y al ganar cierta agilidad realizando tareas rutinarias en el terminal, se hace mas eficiente el trabajo por medio de un entorno gráfico [31].

La programación de *shell-scripts* es fundamental a la hora de trabajar de manera efectiva en el terminal. Los llamados *scripts* (guiones) son simplemente archivos de texto, que contienen un número determinado de comandos (enlazados o no) que son ejecutados al momento de ser interpretados por el *shell* [31].

El lenguaje de *shell-scripting* más ampliamente usado es *Bash*, el cual viene del acrónimo *Bourne-Again-Shell*. En la mayoría de las derivaciones de *UNIX*, *Bash* es el lenguaje por defecto del *shell*. El uso de *shell-scripting* nos facilita de una manera mas rápida de resolver ciertos problemas computacionales [31].

Para trabajar con *SU* los *scripts* son esenciales para aprovechar al máximo el alcance del paquete. Mediante los *scripts* son realizadas las mayorías de las tareas importantes que se pueden hacer con *SU*, sobre todo en aquellas donde trabajar directamente en el *shell* se puede convertir en algo poco funcional e inefectivo [31].

B.3. CREACIÓN DE MODELOS DEL SUBSUELO La necesidad de los humanos de apreciar y captar la información a través de sus receptores como lo son los sentidos (vista, oído, olfato, tacto y gusto). Uno de los receptores de información más importantes es la vista. A través de la vista se ubican, se asocian, se interpreta y se entiende gran parte de las tareas, sucesos y demás escenarios en los que nos desenvolvemos. La dependencia que tenemos sobre las computadoras, ha obligado a que se desarrollen maneras eficientes, y computacionalmente viables, de representar gráficamente objetos, cuya interpretación visual es importante al momento de la resolución de un problema dado [31].

B.3.1 Triangulación de Delaunay Existen muchas herramientas de visualización que cumplen con este último propósito, entre ellas tenemos se puede mencionar la Triangulación de *Delaunay*. La triangulación de *Delaunay* es un método ampliamente utilizado en la computación para la generación de gráficos (Figura B 1), esta no es mas que la unión de un conjunto de puntos a través de triángulos. Sin embargo, estos triángulos deben cumplir una condicióna especial: la condición de *Delaunay* [32].

Figura B 1. Triangulación de la fotografía de una iglesia.



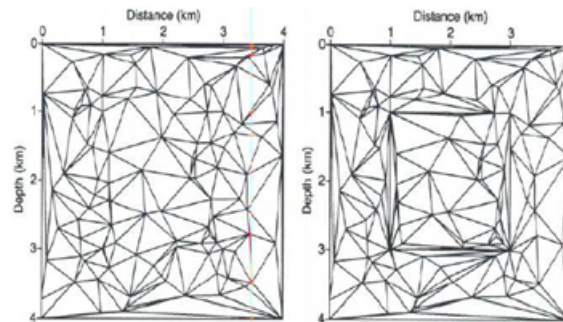
Fuente: Inversión sísmica mediante un algoritmo genético/Seismic inversion with a genetic algorithm [31].

Esta condición dice: el interior de la circunferencia que circunscribe a cada uno de los triángulos debe ser vacía. La triangulación es única y si solo 3 vértices entran en la circunferencia que circunscriben cualquier triángulo. Esta formalidad es insignificante en aplicaciones prácticas [32].

En la geofísica la interpretación visual juega un papel de muy importante y las acertadas consideraciones que pueden o no tomarse en cuenta a la hora del estudio pertinente. En el modelado sísmico, específicamente en el modelado de los perfiles de velocidades, no sólo la visualización es de gran utilidad, sino también el adecuado ajuste de las propiedades físicas respectivas a cada coordenada del modelo. Que sea necesario que se represente de la manera más fiel posible, las condiciones reales del subsuelo para así obtener una respuesta sísmica comparable con la respuesta sísmica real [31].

En la triangulación de *Delaunay* simple se puede observar que los triángulos tienen a ser más equiláteros que en la triangulación ajustada (Figura B 2), además que en esta última se puede cuestionar si los vértices más cercanos a los bordes del cuadrado cumplen o no efectivamente con la condición de *Delaunay* [31].

Figura B 2. Triangulación de Delaunay simple (izquierda) y ajustada (derecha).



Fuente: Triangulated models of earth's subsurface [32].

Por medio de este método se pueden representar, de manera acertada estructuras del subsuelo simples y/o complejas. Sin embargo, no es la única ventaja que tiene el método. Una ventaja que presentan los moldeos triangulares es la simplicidad que ofrecen a la hora de calcular tiempos de viaje y caminos de rayos cuando se hacen por medio del trazado de rayos [32].

ANEXO C. CÓDIGO PARA GENERAR UN MODELO EN SU

En las siguientes líneas se presenta el código utilizado para la generación de los modelos del subsuelo en *SU*:

```
1.#! /bin/sh
2.# Modelo de práctica: Sesión 3. Seminario de Investigación.
3.
4.# model number
5.model=1
6.
7.# data directory (optional, if not set data will go into current directory)
8.psfile=model$model.eps
9.datafile=model$model.dat
10.
11.trimodel xmin=0 zmin=0 xmax=10.0 zmax=7.0
12.      1 xedge=0.0,10.0
13.      zedge=0.0,0.0
14.      sedge=0,0
15.      2 xedge=0.0,3.0,5.5,9.5,10.0
16.      zedge=3.0,2.8,2.0,3.0,3.0
17.      sedge=0,0,0,0,0
18.      3 xedge=0.00,3.0,7.0,10.00
19.      zedge=5.00,4.9,5.0,6.00
20.      sedge=0,0,0,0
21.      4 xedge=3.00,7.00
22.      zedge=4.90,7.00
```

```

23.          sedge=0,0
24.          5 xedge=0.00,7.0,10.00
25.          zedge=7.00,7.0,7.00
26.          sedge=0,0,0
27.kedge=1,2,3,4,5
28.v1          sfill=0.01,1.01,0.0,0,4.02,0.0,0.0
29.          sfill=0.01,4.00,0.0,0,3.70,0.0,0.0
30.          sfill=5.00,5.50,0.0,0,2.00,0.0,0.0
31.          sfill=0.10,6.00,0.0,0,1.40,0.0,0.0
32.>$datafile
33.spsplot < $datafile > $psfile
34.          gedge=0.5 gtri=2.0 n=0 gmax=1
35.          title="Mi primer Modelo"
36.          labelz="Depth (km)"labelx="Distance (km)"
37.          dxnum=1 dznum=1 wbox=10 hbox=7
38. exit 0

```

En el *script* se identifican las siguientes lineas:

Sistema: Linea 1, llama al *shell* y la linea 38 sale del *shell*.

Variables:

- En la linea 5 podemos ver un número por cada vez que corre correctamente el programa.
- En la linea 9 le asignamos un nombre a la salida del modelo binario y es usado en la linea 32.
- En la linea 8 a la salida .eps y es usada en la linea 33.

Programa trimodel: Lineas 11-32 crean el modelo. Trimodel llena el modelo con triángulos de $(1/\text{velocidad}^2)$, mientras $(1/\text{velocidad})$ es llamado "*slowess*", $(1/\text{velocidad}^2)$ es llamado "*sloth*".

El uso de trimodel puede dividirse en 3 partes:

- La linea 11 define las dimensiones del modelo.
- Los cinco paquetes de *xedge*, *zadge* y *sedge* son una tripleta que definen los limites de la capa y los gradientes de velocidad. Hay un requerimiento importante y es que cada parte de la tripleta tenga el mismo número de valores. Es decir, la tripleta para la capa uno superior del modelo tiene dos valores para cada *xedge*, *zadge* y *sedge* (lineas 12-14), mientras que para la capa dos hay cinco valores para cada tripleta (lineas 15-17).
- La linea de *sedge* esta siempre de ceros porque todas las capas son isotropicas y homogeneas.

Programa spsplot: Lineas 33-37 crean el archivo del programa .eps.

ANEXO D. CÓDIGO PARA GENERAR UNA ADQUISICIÓN EN SU

El código utilizado para realizar las adquisiciones en *SU*, es el siguiente:

```
#!/bin/sh # File: acq1.sh # Set messages on # #set -x

# Assign values to variables

num=1 nangle=201 fangle=-65 langle=65 nt=1370 dt=0.0073

# Name input model file inmodel=model num.dat

# Name output seismic file outseis=seis num.su

#=====

# Create the seismic traces with "triseis"

# i-loop = 40 source positions (disparos)

# j-loop = 60 geophone positions (split-spread)

#           per shot position

# k-loop = layers 2 through 10

#           (do not shoot layers 1 and 11)

# fs= fuentes

# sx= posición de la fuente
```

```

# flrd= cabecera número de disparos

# fg= posición del geófono

# gx= posición de la fuente

# traci= secuencia numérica de las trazas

# tracf= secuencia numérica de los disparos

echo " --Begin looping over triseis."

done

i=0

while [ "$i" -ne "1" ]

do

    fs='bc -l << - END

    $i * 0.1

    END'

    sx='bc -l << - END

    $i * 100

    END'

    fldr='bc -l << - END

```

```

$i + 1

END'

j=0

while [ "$j" -ne "60" ]

do

    fg='bc - l << - END

    $i * 0.1 + $j * 0.1

    END'

    gx='bc - l << - END

    $i * 100 + $j * 100 - 2950

    END'

    offset='bc - l << -END

    $j * 100 - 2950

    END'

    tracl='bc - l << - END

    $i * 60 + $j + 1

    END'

```

```
tracf='bc - l << - END
```

```
$j + 1
```

```
END'
```

```
echo " Sx=$sx Gx=$gx fldr=$fldr Offset=$offset tracl=$tracl \
```

```
fs=$fs fg=$fg"
```

```
k=2
```

```
while [ "$k" -ne "5"]
```

```
do
```

```
triseis < inmodel xs=5,7.9 xg=1.05,10.4 zs=0,0 zg=0,0 \
```

```
nangle=$nangle fangle=$fangle langle=$langle \
```

```
kreflect=$k krecord=1 fpeak=12 lscale=0.5 \
```

```
ns=1 fs=$fs ng=1 fg=$fg nt=$nt dt=$dt |
```

```
suaddhead nt=$nt |
```

```
sushw
```

```
key=dt,tracl,tracr,fldr,tracf,trid,offset,sx,gx \
```

```
a=4000,$tracl,$tracl,$fldr,$tracf,1,$offset,$sx,$gx
```

```
>> temp k
```

```

        k='expr $k + 1'

    done

    j='expr $j + 1'

done

i='expr $i + 1'

echo " --End looping over triseis."

#=====

# Sum contents of the "temp"files

echo " --Sum files."

susum temp2 temp3 > tempa

susum tempa temp4 > outseis

# Remove temp files

echo " --Remove temp files."

rm -f temp*

# Exit politely from shell script

echo " --Finished!"

exit

```

Hay algunos parámetros que se requieren para realizar este proceso de adquisición, entre ellos se encuentran:

- Offset máximo: El cual hace relación a la distancia más lejana en la cual se encuentra el último receptor.
- Intervalo entre puntos de disparo Δs : Es la separación de las posiciones de las fuentes (esto aplica cuando se realizan varias perturbaciones, para nuestro seminario sólo se hará una).
- Intervalo entre grupos de receptores Δg : Es la separación entre los geófonos.
- Tiempo de grabación t_{max} : Es la cantidad de tiempo en que los geófonos se encuentran grabando o tomando información.

Pero en el proceso de adquisición también son necesarios parámetros del subsuelo, los cuales son:

- Longitud del modelo (L_x): El cual hace referencia a la extensión horizontal del modelo.
- Profundidad del modelo (L_z).

Ahora bien, se hace necesario determinar los últimos parámetros de la adquisición, los cuales desarrollan un trabajo computacional especial en medio del proceso iterativo, los cuales son:

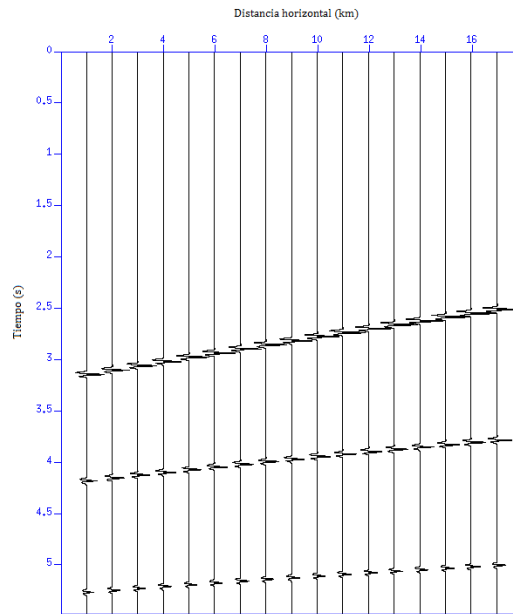
- Longitud del tendido $L_t = 2 * \text{offset max.}$
- Número de grupos de receptores $n_g = L_t / \Delta g + 1$.

- Número de Disparos n_s valor ajustado según la longitud del modelo, la longitud del tendido y el intervalo entre disparos. $n_s = (L - L_t) / \Delta g$.
- Offset máx = (numero de geófonos /2) * Δg - $\Delta g/2$
- En cada adquisición se simuló el número de muestras por traza fue de 1370 y el intervalo de muestreo en tiempo de 7,3 milisegundos, con el objetivo de que cuando se haga el producto de estos dos valores se tenga un tiempo de grabación de 10 segundos.
- En todos los casos el tipo de levantamiento fue *split-spread* o sea que se ubicaron 18 geofónos (9 a cada lado).

Con esto presente, se realizan unas adquisiciones previas al empalme con los métodos de optimización global, las pruebas realizadas se presentan en la siguiente figura, allí se observa cómo varía el proceso de adquisición dependiendo de la posición de la fuente; aclarando que a lado y lado de la fuente se encuentran 9 geófonos.

En la Figura D 1. se pueden observar el conjunto de trazas sísmicas obtenidas por medio de la adquisición realizada en *SU*.

Figura D 1. Adquisición con la fuente en 6 Km.



ANEXO E. FUNCIONES DE PRUEBA DE SA

Tabla E 1. Función Booth con Probabilidad Inicial de 0,2 y Probabilidad Final de 0,001.

Ensayo	Iteraciones	Mínimo	Coordenadas	Tiempo[s]
1	20	20	(1,1)	17,031446
2	11	20	(1,1)	8,861365
3	4	20	(1,1)	4,347865
4	20	20	(1,1)	5,993299
5	7	20	(1,1)	5,468934
6	13	20	(1,1)	10,868697
7	25	20	(1,1)	19,490887
8	15	20	(1,1)	11,834478
9	19	20	(1,1)	13,53582
10	41	20	(1,1)	28,460658
Promedios	17,5	20		12,5893449

Tabla E 2. Función Booth con Probabilidad Inicial de 0,5 y Probabilidad Final de 0,001.

Ensayo	Iteraciones	Mínimo	Coordenadas	Tiempo[s]
1	49	20	(1;1)	35,538999
2	40	20	(1;1)	27,003056
3	42	20	(1;1)	29,854818
4	49	20	(1;1)	34,428368
5	24	20	(1;1)	18,197358
6	33	20	(1;1)	23,840078
7	32	20	(1;1)	23,91782
8	37	20	(1;1)	26,344367
9	36	20	(1;1)	24,474879
10	49	20	(1;1)	35,233237
Promedios	39,1	20,7959		27,883298

Tabla E 3. Función Booth con Probabilidad Inicial 0,7 y Probabilidad Final de 0,001.

Ensayo	Iteraciones	Mínimo	Coordenadas	Tiempo[s]
1	53	20	(1;1)	36,53786
2	55	20	(1;1)	37,807911
3	52	20	(1;1)	36,40299
4	53	20	(1;1)	37,06048
5	49	20	(1;1)	35,174376
6	51	20	(1;1)	36,918083
7	48	20	(1;1)	34,979867
8	48	20	(1;1)	35,127478
9	56	20	(1;1)	40,890218
10	52	20	(1;1)	36,651197
Promedios	51,7	20		36,755046

Tabla E 4. Función Branin con Probabilidad Inicial de 0,2 y Probabilidad Final de 0,001.

Ensayo	Iteraciones	Mínimo	Coordenadas	Tiempo[s]
1	7	27,7029	(1;1)	7,727915
2	11	27,7029	(1;1)	10,309123
3	11	27,7029	(1;1)	10,398984
4	15	27,7029	(1;1)	13,446883
5	13	27,7029	(1;1)	13,592214
6	4	27,7029	(1;1)	4,572768
7	15	27,7029	(1;1)	13,593751
8	5	27,7029	(1;1)	5,953403
9	9	27,7029	(1;1)	8,135886
10	4	27,7029	(1;1)	5,11329
Promedios	9,	27,7029		9,2844217

Tabla E 5. Función Branin con Probabilidad Inicial de 0,5 y Probabilidad Final de 0,001.

Ensayo	Iteraciones	Mínimo	Coordenadas	Tiempo[s]
1	45	27,7029	(1;1)	34,966416
2	26	27,7029	(1;1)	23,02947
3	26	27,7029	(1;1)	20,822068
4	32	27,7029	(1;1)	25,23541
5	34	27,7029	(1;1)	29,565843
6	32	27,7029	(1;1)	24,825044
7	41	27,7029	(1;1)	32,377747
8	31	27,7029	(1;1)	23,61659
9	45	27,7029	(1;1)	36,037825
10	40	27,7029	(1;1)	31,983286
Promedios	35,2	27,7029		28,2459699

Tabla E 6. Función Branin con Probabilidad Inicial de 0,7 y Probabilidad Final de 0,001.

Ensayo	Iteraciones	Mínimo	Coordenadas	Tiempo[s]
1	50	27,7029	(1;1)	40,25355
2	48	27,7029	(1;1)	36,093901
3	49	27,7029	(1;1)	39,30691
4	51	27,7029	(1;1)	41,910134
5	56	27,7029	(1;1)	41,400628
6	51	27,7029	(1;1)	67,181626
7	53	27,7029	(1;1)	42,316341
8	54	27,7029	(1;1)	41,627265
9	50	27,7029	(1;1)	38,727369
10	55	27,7029	(1;1)	41,094973
Promedios	51,7	27,7029		42,9912697

Tabla E 7. Función Bukin con Probabilidad Inicial de 0,2 y Probabilidad Final de 0,001.

Ensayo	Iteraciones	Mínimo	Coordenadas	Tiempo[s]
1	17	5,6231	(-0,34446; 0,0042408)	12,781861
2	21	5,6469	(-0,727; 0,0022004)	18,36951
3	26	4,4757	(1; 0,011906)	18,826173
4	17	1,8116	(-0,30898; 0,00066607)	13,588849
5	17	8,9005	(0,57008; 0,010985)	13,518162
6	26	10,5613	(1; -0,00092307)	17,969944
7	30	4,6036	(-1; 0,012037)	23,224338
8	21	8,5317	(-0,82665; 0,013957)	15,97413
9	20	5,6685	(0,24785; 0,0037124)	15,984975
10	20	6.1872	(0,51001; 0,0063003)	16,567405
Promedios	21,5	6,20101		16,6805347

Tabla E 8. Función Bukin con Probabilidad Inicial de 0,5 y Probabilidad Final de 0,001.

Ensayo	Iteraciones	Mínimo	Coordenadas	Tiempo[s]
1	39	3,126	(-0,4157; 0,0026462)	29,583638
2	48	5,6533	(1 ; 0,069272)	33,585756
3	45	2,2892	(-0,68862; 0,0042597)	31,445226
4	44	2,2338	(0,18091; -0,00012724)	32,853332
5	42	1,7582	(-0,10658; 0,00038889)	31,770657
6	47	2,3494	(0,76718; 0,0063881)	33,303359
7	44	10,8293	(-0,41356, -0,0098104)	30,179863
8	42	3,7697	(-0,64412; 0,0027975)	30,697145
9	52	3,2041	(0,96859; 0,0010567)	36,711151
10	49	4,6067	(0,012022; 0,96059)	35,871728
Promedios	45,2	3,98197		32,6001855

Tabla E 9. Función Bukin con Probabilidad Inicial de 0,7 y Probabilidad Final de 0,001.

Ensayo	Iteraciones	Mínimo	Coordenadas	Tiempo[s]
1	55	3,3701	(-0,0174464; -0,0010144)	38,998613
2	54	3,9934	(-1; 0,0084764)	38,429666
3	55	4,1099	(-0,54346; -0,0015788)	39,667287
4	53	5,5084	(-0,40041; -0,0013262)	37,953047
5	53	6,6325	(-0,45812; 0,0063721)	36,865758
6	53	4,9635	(1; 0,0076443)	38,712096
7	53	4,2089	(0,89911; 0,0097649)	37,237366
8	56	9,3724	(-1; 0,018616)	41,078588
9	53	6,0623	(0,29119; -0,0027035)	37,714282
10	55	2,6717	(0,25085; 0,0012893)	38,742242
Promedios	54	3,75305		38,5398945

Tabla E 10. Función Rastrigin con Probabilidad Inicial de 0,2 y Probabilidad Final de 0,001.

Ensayo	Iteraciones	Mínimo	Coordenadas	Tiempo[s]
1	11	2,1312	(-0,98248; -0,79885)	13,815474
2	11	3,3239	(-1; -0,65024)	12,980391
3	15	3,643	(0,96166; -0,64731)	17,173177
4	3	1,9997	(0,99718; 0,1814)	5,212816
5	2	1,1731	(0,021583; -0,69467)	4,166601
6	3	2,6714	(1; -0,82165)	5,148462
7	4	2,2105	(1; -0,68854)	6,599362
8	2	1,4721	(-0,96652; 0,28468)	4,180385
9	15	1,7476	(1; -0,71537)	17,318136
10	5	3,8004	(-1; -0,63735)	7,138921
Promedios	7,1	2,41729		9,3733725

Tabla E 11. Función Rastrigin con Probabilidad Inicial de 0,5 y Probabilidad Final de 0,001.

Ensayo	Iteraciones	Mínimo	Coordenadas	Tiempo[s]
1	2	1,5279	(-1; 0,29736)	4,021771
2	41	2,8622	(0,075733; -0,82416)	42,708105
3	47	1,524	(0,00263345; -0,81634)	48,563944
4	42	1,0283	(-0,019248, 0,31629)	49,79108
5	28	1,9937	(-1;, 0,1764)	29,465846
6	45	4,8499	(-1; 0,39146)	45,824459
7	32	3,6888	(-0,8918; -0,72224)	33,525393
8	37	1,5896	(-1; 0,3005)	37,112577
9	47	1,6931	(0,9396; 0,23515)	48,772617
10	33	4,4741	(1; 0,38372)	34,711
Promedios	35,4	2,52316		37,4496792

Tabla E 12. Función Rastrigin con Probabilidad Inicial de 0,7 y Probabilidad Final de 0,001.

Ensayo	Iteraciones	Mínimo	Coordenadas	Tiempo[s]
1	47	1,3024	(0,012979; 0,16989)	46,332541
2	52	2,1926	(0;057069; 0,16087)	52,456074
3	50	1,5239	(-1; 0,29715)	49,984358
4	53	3,857	(0,95595; 0,1339)	52,282793
5	47	1,1846	(1; 0,2736)	47,901148
6	56	5,2316	(-0,90328; -0,64206)	55,875822
7	51	1,0627	(-1; 0,25037)	51,627547
8	50	0,58696	(-0,0051408; 0,30011)	49,924146
9	56	1,2056	(1; 0,22182)	57,238527
10	54	0,61318	(0,014077; -0,75469)	53,76721
Promedios	51,6	1,876054		51,7390166

Tabla E 13. Función Rosenbrock con Probabilidad Inicial de 0,2 y Probabilidad Final de 0,001.

Ensayo	Iteraciones	Mínimo	Coordenadas	Tiempo[s]
1	9	2,1261	(-0,66937; 0,59)	8,192266
2	17	0,23849	(0,56256; 0,33819)	12,630277
3	8	0	(1; 1)	7,479052
4	6	6,9289	(-0,0055381; -0,24323)	5,662937
5	6	1,9449	(-0,22385; 0,11697)	6,135395
6	11	1,7764	(0,63764; 0,53485)	10,144735
7	2	0	(1;1)	2,997208
8	9	0,82797	(0,69101; 0,39191)	8,51312
9	5	0	(1;1)	5,449873
10	14	3,9164	(-0,60615; 0,25181)	12,00638
Promedios	8,7	1,775916		7,9211243

Tabla E 14. Función Rosenbrock con Probabilidad inicial de 0,5 y Probabilidad Final de 0,001.

Ensayo	Iteraciones	Mínimo	Coordenadas	Tiempo[s]
1	2	1,5279	(-1; 0,29736)	4,021771
2	41	2,8622	(0,075733; -0,82416)	42,708105
3	47	1,524	(0,00263345; -0,81634)	48,563944
4	42	1,0283	(-0,019248; 0,31629)	49,79108
5	28	1,9937	(-1; 0,1764)	29,465846
6	45	4,8499	(-1; 0,39146)	45,824459
7	32	3,6888	(-0,89188; -0,72224)	33,525393
8	37	1,5896	(-1; 0,3005)	37,112577
9	47	1,6931	(0,9396; 0,23515)	48,772617
10	33	4,4741	(1; 0,38372)	34,711
Promedios	35,4	2,52316		37,4496792

Tabla E 15. Función Rosenbrock con Probabilidad inicial de 0,7 y Probabilidad Final de 0,001.

Ensayo	Iteraciones	Mínimo	Coordenadas	Tiempo[s]
1	47	1,3024	(0,01297; 0,16989)	46,332541
2	52	2,1926	(0,057069; 0,16087)	52,456074
3	50	1,5239	(-1; 0,29715)	49,984358
4	53	3,857	(0,95595; 0,1339)	52,282793
5	47	1,1846	(1; 0,2736)	47,901148
6	56	5,2316	(-0,90328; -0,64206)	55,875822
7	51	1,0627	(-1; 0,25037)	51,627547
8	50	0,58696	(-0,0051408; 0,30011)	49,924146
9	56	1,2056	(1; 0,22182)	57,238527
10	54	0,61318	(0,014077; -0,75469)	53,76721
Promedios	51,6	1,876054		51,7390166

ANEXO F. FUNCIONES DE PRUEBA DE ABC

Tabla F 1. Función Booth con un Tamaño de población de 10.

Ensayo	Iteraciones	Tiempo[s]	Mínimo promedio	Desviación estándar
1	21	0,627928	0,207973	0,393534
2	17	0,599649	0,562272	0,966198
3	20	0,576885	0,0848997	0,12107
4	19	0,670745	1,34586	2,05576
5	23	0,625248	0,293219	0,402777
6	19	0,627221	0,480007	0,540871
7	35	0,656699	1,40349	1,12775
8	21	0,674627	1,30273	2,30914
9	18	0,642411	1,64886	2,96756
10	39	0,776886	3,96259	6,00768
Promedios	23,2	0,6478299		

Tabla F 2. Función Booth con un Tamaño de población de 20.

Ensayo	Iteraciones	Tiempo[s]	Mínimo promedio	Desviación estándar
1	15	0,808465	0,00220355	0,000314121
2	24	0,858929	0,00755903	0,0085583
3	22	0,965008	0,000995091	0,001693
4	28	0,87541	0,162044	0,120316
5	29	1,026993	0,000110482	0,000226
6	18	0,902882	0,051898	0,0688626
7	23	0,862608	0,00142141	0,0019895
8	21	0,953311	0,00342254	0,0054137
9	24	0,989224	0,000363	0,000811695
10	17	0,82366	0,000150267	0,00033
Promedios	22,1	0,906649		

Tabla F 3. Función Booth con un Tamaño de población de 30.

Ensayo	Iteraciones	Tiempo[s]	Mínimo promedio	Desviación estándar
1	26	1,398023	0,00683423	0,006556
2	14	1,017035	0,004006267	0,0069635
3	28	1,189788	0,0441296	0,04027
4	13	0,943701	0,001355	0,00302988
5	19	1,03381	0,0272755	0,597006
6	21	1,167543	0,0154997	0,019057
7	20	1,201479	0,00822195	0,0065976
8	21	1,21231	0,0131186	0,0261644
9	19	1,20449	0,00105739	0,0017456
10	17	1,009865	0,00595088	0,0106864
Promedios	19,8	1,1378044		

Tabla F 4. Función Branin con un Tamaño de población de 10.

Ensayo	Iteraciones	Tiempo[s]	Mínimo promedio	Desviación estándar
1	27	0,642256	0,993819	1,35432
2	25	0,639292	0,2116	0,296968
3	19	0,963216	0,0803623	0,179696
4	20	0,633387	0,651061	0,418038
5	25	0,674732	0,907386	0,737599
6	35	0,676721	0,201872	0,28258
7	27	0,693487	0,0797342	0,178291
8	23	0,720508	0,162313	0,222322
9	34	0,704135	0,253239	0,231616
10	24	0,621747	0,0802534	0,179452
Promedios	25,9	0,6969481		

Tabla F 5. Función Branin con un Tamaño de población de 20.

Ensayo	Iteraciones	Tiempo[s]	Mínimo promedio	Desviación estándar
1	24	0,894075	0,169776	0,233075
2	31	0,964737	0,0795777	0,177941
3	24	0,781096	0,161871	0,2216784
4	17	0,843716	0,28357	0,268687
5	16	0,863056	0,161203	0,220741
6	34	1,066318	0,615778	0,211027
7	19	0,838531	0,258179	0,237825
8	24	0,881517	0,0799318	0,178733
9	19	0,80001	0,160073	0,219194
10	15	0,854382	0,163017	0,23223
Promedios	22,3	0,8787438		

Tabla F 6. Función Branin con un Tamaño de población de 30.

Ensayo	Iteraciones	Tiempo[s]	Mínimo promedio	Desviación estándar
1	15	1,005547	0,40538	0,00813793
2	28	1,485296	0,0797275	0,178276
3	13	1,049545	0,324866	0,181702
4	23	1,365495	0,399116	0,00211089
5	26	1,250349	0,079647	0,178096
6	19	1,123669	0,0797559	0,17834
7	23	1,098408	0,22054	0,230146
8	16	1,128752	0,336165	0,190369
9	10	0,922161	0,159295	0,218123
10	22	1,226955	0,16018	0,21934
Promedios	19,5	1,1656168		

Tabla F 7. Función Bukin con un Tamaño de población de 10.

Ensayo	Iteraciones	Tiempo[s]	Mínimo promedio	Desviación estándar
1	16	0,665159	20,2703	18,1745
2	13	0,575441	24,1911	2,58944
3	19	0,601846	2,87323	6,42474
4	16	0,602976	3,542374	5,08724
5	17	0,635585	6,14425	9,84178
6	20	0,637515	10,2145	9,54007
7	15	0,643211	1,46505	1,78629
8	28	0,670389	2,29925	3,53864
9	18	0,638906	6,48498	10,007
10	23	0,71502	9,29924	11,0564
Promedios	18,5	0,6386048		

Tabla F 8. Función Bukin con un Tamaño de población de 20.

Ensayo	Iteraciones	Tiempo[s]	Mínimo promedio	Desviación estándar
1	15	0,756931	5,90494	4,47574
2	13	0,717696	9,17411	7,46124
3	15	0,73103	12,6827	10,3719
4	16	0,758678	0,289246	0,646774
5	16	0,821151	1,99366	2,91593
6	19	0,87101	2,6722	1,56575
7	17	0,845718	14,5974	8,72356
8	20	0,840134	21,8381	15,7532
9	15	0,81758	2,88613	2,18956
10	17	0,798047	3,25096	4,04522
Promedios	16,3	0,7957975		

Tabla F 9. Función Bukin con un Tamaño de población de 30.

Ensayo	Iteraciones	Tiempo[s]	Mínimo promedio	Desviación estándar
1	15	1,008591	7,29274	4,60071
2	18	1,013786	7,92102	3,585996
3	12	0,869272	3,02457	4,69554
4	18	1,069895	2,64524	3,99678
5	13	0,933024	0,858328	1,91928
6	12	0,879774	3,66688	3,6021
7	16	1,101706	0,533579	1,19312
8	22	1,050762	1,43853	2,02503
9	14	0,981611	2,32733	2,49255
10	24	1,069933	6,20128	4,95076
Promedios	16,4	0,9978354		

Tabla F 10. Función Rastrigin con un Tamaño de población de 10.

Ensayo	Iteraciones	Tiempo[s]	Mínimo promedio	Desviación estándar
1	31	0,684543	4,33021	3,05743
2	14	0,605824	1,81963	2,6258423
3	23	0,670606	0,498027	0,681531
4	26	0,633755	0,209434	0,468309
5	26	0,643395	0,0150346	0,0336183
6	20	0,651303	2,32723	2,08013
7	19	0,626677	1,17222	1,11418
8	13	0,614568	0,605687	0,899586
9	28	0,645789	3,47266	2,33551
10	19	0,660467	0,405526	0,555289
Promedios	21,9	0,6436927		

Tabla F 11. Función Rastrigin con un Tamaño de población de 20.

Ensayo	Iteraciones	Tiempo[s]	Mínimo promedio	Desviación estándar
1	29	1,043412	0,0396587	4,47574
2	24	0,971173	0,643202	0,0819043
3	18	0,840069	0,466004	0,770038
4	26	0,8743	1,25742	0,700969
5	16	0,84731	0,410546	0,575045
6	29	0,913259	0,0219638	0,043007
7	35	0,902152	6,03388*e-7	1,34992*e-6
8	23	0,913628	0,000198715	0,000444341
9	28	1,029203	0,0156295	0,0344245
10	25	0,870698	3,1333	2,31464
Promedios	25,3	0,9205204		

Tabla F 12. Función Rastrigin con un Tamaño de población de 30.

Ensayo	Iteraciones	Tiempo[s]	Mínimo promedio	Desviación estándar
1	32	1,196334	0,000212319	0,000474459
2	39	1,316803	0,00496159	0,0103685
3	15	1,034993	0,513015	0,7300748
4	34	1,243897	0,384496	0,483485
5	16	1,096165	0,35538	0,427005
6	24	1,275771	0,0327445	0,0,49975
7	20	1,030727	0,485644	0,998241
8	23	1,41999	0,00694052	0,0154
9	19	1,072445	0,0080354	0,0179677
10	18	1,07576	0,257464	0,438388
Promedios	24	1,1762885		

Tabla F 13. Función Rosenbrock con un Tamaño de población de 10.

Ensayo	Iteraciones	Tiempo[s]	Mínimo promedio	Desviación estándar
1	16	0,636362	0,0850987	0,190287
2	17	0,592263	0,7009136	0,859342
3	9	0,562416	3,26463	4,38528
4	18	0,60259	1,10827	2,47817
5	14	0,593234	2,90247	4,83953
6	16	0,577023	2,76233	3,23293
7	17	0,628695	0,06566	0,135343
8	21	0,655905	9,40164	11,4295
9	15	0,559082	3,22297	5,02619
10	13	0,571911	0,689083	1,44936
Promedios	15,6	0,5979481		

Tabla F 14. Función Rosenbrock con un Tamaño de población de 20.

Ensayo	Iteraciones	Tiempo[s]	Mínimo promedio	Desviación estándar
1	11	0,697612	0,978903	2,18889
2	19	0,798947	0,0569814	0,118452
3	11	0,671397	2,91043	3,30841
4	16	0,751023	0,054773	0,122476
5	15	0,763198	0,0270995	0,0605963
6	18	0,793177	4,54917	4,03817
7	12	0,773375	3,72498	3,47252
8	23	0,768195	4,58192	4,09884
9	13	0,793086	0,144857	0,211715
10	9	0,672811	0,178097	0,251738
Promedios	14,7	0,7482821		

Tabla F 15. Función Rosenbrock con un Tamaño de población de 30.

Ensayo	Iteraciones	Tiempo[s]	Mínimo promedio	Desviación estándar
1	20	1,050322	0,0860868	0,192496
2	17	0,988424	0,0975121	0,161486
3	14	0,982141	0,251952	0,373073
4	17	1,037878	0,0303004	0,0677538
5	14	0,919991	0,00228247	0,00510376
6	13	0,935498	0,071211	0,143139
7	8	0,79611	0,151366	0,262939
8	20	1,025568	0,0630777	0,141046
9	16	1,073455	0,0943065	0,0881474
10	14	0,977257	2,48214	3,68793
Promedios	15,3	0,9786644		

ANEXO G. FUNCIÓN AUTOMÁTICA

```
1 function [z]=inversion_automatica(x)
2
3 %k=[0.77 0.5 0.26 0.12]; %Valor sloths modelo de referencia
4
5 %1. Creo el archivo que modificara al modelo
6 str6=strcat('/home/User/inversion_matlab/',num2str(i),'capas.sh');
7 fileID=fopen(str6,'w');
8
9 fprintf(fileID,'v1      sfill=0.01,1.01,0.0,0,%f,0.0,0.0 %s\n',x(1),' ');
10 fprintf(fileID,'      sfill=0.01,4.00,0.0,0,%f,0.0,0.0 %s\n',x(2),' ');
11 fprintf(fileID,'      sfill=5.00,5.50,0.0,0,%f,0.0,0.0 %s\n',x(3),' ');
12 fprintf(fileID,'      sfill=0.10,6.00,0.0,0,%f,0.0,0.0 %s\n',x(4),' ');
13 fclose(fileID);
14
15 %2. Borro el modelo actualizado.sh para luego modificarlo
16 str7=strcat('export LD_LIBRARY_PATH=/usr/lib64 ;
17 cd /home/User/inversion_matlab ; ./Clean.sh ');
18 d= unix(str7);
19
20 %3. Escribo la primera parte de el archivo de modelo actualizado
21 str8=strcat('export LD_LIBRARY_PATH=/usr/lib64 ;
22 cd /home/User/inversion_matlab ; cat modelado1.sh |
23 %sed -n "1,27p" >> modelo\_actualizado.sh ');
24 d= unix(str8);
25
26 %4. Escribo las lines nuevas con los nuevos valores de slowness
27 str9=strcat('export LD_LIBRARY_PATH=/usr/lib64 ;
28 cd /home/User/inversion_matlab ; cat capas.sh |
29 sed -n "1,4p" >> modelo\_actualizado.sh ');
30 d= unix(str9);
31
32 %5. Escribo la tercera parte del archivo del modelo actualizado
33 str10=strcat('export LD_LIBRARY_PATH=/usr/lib64 ;
34 cd /home/User/inversion_matlab ; cat modelado1.sh |
35 sed -n "32,38p" >> modelo\_actualizado.sh ');
36 d= unix(str10);
37
38 %6. Genero el modelo
39 str1=strcat('export LD_LIBRARY_PATH=/usr/lib64 ;
```

```

40 cd /home/User/inversion_matlab/; sh modelo\_actualizado.sh');
41 d= unix(str1);
42
43 %7. Simulo la adquisicion y obtengo las trazas
44 str2=strcat('export LD\_LIBRARY\_PATH=/usr/lib64 ;
45 cd /home/User/inversion_matlab/; sh acq1.sh');
46 d= unix(str2);
47
48 %8. Para ver las trazas sismicas
49 str3=strcat('export LD\_LIBRARY\_PATH=/usr/lib64 ;
50 cd /home/User/inversion_matlab/; suxwigg < seis1.su');
51 d= unix(str3);
52
53 %9. Para ver el sismograma
54 str4=strcat('export LD\_LIBRARY\_PATH=/usr/lib64 ;
55 cd /home/User/inversion_matlab/; suximage < seis1.su');
56 d= unix(str4);
57
58 %10. Cambio de formato SU a SEG Y para la traza actualizada
59 str5=strcat('export LD\_LIBRARY\_PATH=/usr/lib64 ; ...
60 cd /home/User/inversion_matlab/; sh sutosegy');
61 d= unix(str5);
62
63 %11. Copiar la traza\_actualizada.sgy en la carpeta de la particula
64 str6=strcat('export LD\_LIBRARY\_PATH=/usr/lib64 ; ...
65 cd /home/User/inversion_matlab/ ', num2str(i), ', ...
66 cp Trazas\_actualizadas.sgy /home/User/Libardo\_inversion_matlab/ ', num2str(i), '/');
67 d= unix(str6);
68
69 %12. Importo las trazas a matlab en forma de estructuras
70 str7=strcat('/home/User/inversion_matlab/ ', num2str(i), '/Trazas\_actualizadas.sgy');
71 estructura1=read_segy_file(str7);
72 str8=strcat('/home/User/inversion_matlab/ ', num2str(i), '/Trazas\_reales.sgy');
73 estructura2=read_segy_file(str8);
74
75 %13. Grafica de las trazas real y actual s_wplot(estructura1.traces);
76 s_wplot(estructura2.traces);
77
78 %14. Calculo los coeficientes de correlacion entre las trazas sinteticas y reales.
79 for j=1:17
80 w=estructura1.traces(:,j);
81 y=estructura2.traces(:,j);
82 %calcula el coeficiente de correlacion cruzada

```

```
83 coeficientes(:,j)=xcorr(w,y,'coeff');  
84 end  
85  
86 for k=1:17  
87     max_coef(k,1)=max(coeficientes(:,k));  
88 end  
89  
90 z=max_coef;
```

Listing 1. Inversion_Automatica.m

ANEXO H. ALGORITMO PARA SIMULATED ANNEALING

```
1  clc; clear all; close all;
2  %addpath ('/home/User_cps/SeisLab_10.0301/S4M/Geophysics_3.0');
3  %% Algoritmo Simulated Annealing
4  % Grupo 2.
5  % Seminario de investigacion: Implementacion de tecnicas de
6  %optimizacion global en problemas de inversion sismica.
7  %%Fecha y hora
8  S = date;
9  %Se inicializa el tiempo de computo que se va a utilizar
10 elapsedTime = 0;
11 tic
12 %%Superficie
13 %Designando variables para los puntos de la grafica.
14 Xmin=0; %Limite inferior en la capa 1
15 Xmax=1; %Limite superior en la capa 1
16 Ymin=0; %Limite inferior en la capa 2
17 Ymax=1; %Limite superior en la capa 2
18 Zmin=0; %Limite inferior en la capa 3
19 Zmax=1; %Limite superior en la capa 3
20 Hmin=0; %Limite inferior en la capa 4
21 Hmax=1; %Limite superior en la capa 4
22
23 %Definicion fronteras
24 bnd=[Xmin Xmax
25      Ymin Ymax
26      Zmin Zmax
27      Hmin Hmax];
28
29 %Posicion Inicial
30 X_ini(1,:)=bnd(:,1) + rand(size(bnd,1),1).*(bnd(:,2) - bnd(:,1)); %Modo aleatorio
31 %de asignar las capas
32
33 %Seccion para fijar capas manualmente
34 %X_ini(1,2)=0.5;
35 X_ini(1,3)=0.26;
36 X_ini(1,4)=0.12;
37
38 %Valores de las velocidades de referencia
39 %X_ini=[0.77 0.5 0.26 0.12];
```

```

40
41 %% Simulated Annealing
42 %Numero de iteraciones
43 n = 5;
44 %Numero de ensayos por ciclo
45 m = 5; %n = 50;
46 %Numero de soluciones aceptadas
47 na = 1.0;
48 %Normalizacion
49 dt=0.1;
50 %Probabilidad de aceptar la peor solucion al inicio.
51 p1 = 0.7; %%
52 %Probabilidad de aceptar la peor solucion al final.
53 p50 = 0.001; %p50 = 0.001;
54 %Temperatura Inicial
55 t1 = -1.0/log(p1);
56 %temperatura final
57 t50 = -1.0/log(p50);
58 %Contador para saber cuantas veces acepta valores.
59 contador=0;
60 %fraccion de reducion por cada ciclo
61 frac = (t50/t1)^(1.0/(n-1.0));
62
63 %Inicializacion de x
64 x(1,:) = X_ini;
65
66 %Mejores resultados actuales por el momento.
67 xc = X_ini;
68 fc = inversion_automat3(xc); %Evaluacion en la inversion.
69 fs = zeros(n+1,17); %Almacena cada uno de los valores fc aprobados
70 % por ser la primera evaluacion, es guardado directamente como punto de partida).
71 fs(1,:) = fc;
72
73 %Temperatura actual.
74 t = t1;
75
76 %Inicializacion de DeltaE para el avance
77 DeltaE = 0.1;
78
79 %Promedio de DeltaE (Para normalizar el exponente de la exponencial
80 %decreciente de temperatura.
81 DeltaE_avg = DeltaE;
82

```

```

83 %Matriz de unos para encontrar el error medio cuadratico.
84 unos=ones(17,1);
85
86 %Seguimiento, para enterarse de cuantas veces ingresa a las iteraciones cuando
87 %decrece la exponencial.
88 contador_aceptadas_igualesque_cero=0;
89 contador_aceptadas_menoresque_cero=0;
90 for i=1:n
91     if (t > t50)
92         for j=1:m
93             %Generacion de nuevos puntos de exploracion para dos capas fijas y
94             %dos aleatorias
95             xi(1) = xc(1) + (rand() - 0.5)*dt;
96             xi(2) = xc(2) + (rand() - 0.5)*dt;
97             xi(3) = 0.26;
98             xi(4) = 0.12;
99
100             %     xi(3) = xc(3) + (rand() - 0.5)*dt;
101             %     xi(4) = xc(4) + (rand() - 0.5)*dt;
102
103             %Acotamiento de fronteras para los valores maximos y minimos.
104             %Lmites superiores e inferiores
105             xi(1) = max(min(xi(1),1.0),0);
106             xi(2) = max(min(xi(2),1.0),0);
107             xi(3) = max(min(xi(3),1.0),0);
108             xi(4) = max(min(xi(4),1.0),0);
109
110             %Interaccion con el proceso de inversion. "inversion_automatica3"
111             %es el archivo modificado suministrado por el profesor Abreo.
112             %Recordando que este devuelve un valor de correlacion cruzada.
113             momentaneo=inversion_automatica3(xi);
114
115             restas2=unos-abs(momentaneo);
116             error_medio_actual=sqrt(sum(restas2.^2)/17);
117
118             %Evaluacion de los puntos previos para comparar. Sabiendo que fc
119             %es el punto que ciclo a ciclo va quedando como el mas apropiado.
120             restas=unos-abs(fc);
121             error_medio_anterior=sqrt(sum(restas.^2)/17);
122
123             %Matriz de avance para determinar la posicion del gradiente
124             %on las evaluaciones en la inversion y los nuevos puntos.
125             Matriz_de_avance(i,j)=(error_medio_actual-error_medio_anterior);

```

```

126
127     %Utilizado para la normalizacion.
128     DeltaE = error_medio_actual-error_medio_anterior;
129
130     %%Para el caso donde el error medio actual es menor que el anterior ,
131     %%quiere decir que se tiene un valor mejor, o sea que es tomado y evaluado.
132     if (error_medio_actual - error_medio_anterior <= 0),
133
134         xc2(1) = xi(1);
135         xc2(2) = xi(2);
136         xc2(3) = xi(3);
137         xc2(4) = xi(4);
138
139         %Bandera para contar los puntos aceptados.
140         contador_aceptadas_menoresque_cero=contador_aceptadas_menoresque_cero+1;
141
142         fc = inversion_automatica3(xc2);
143
144         %%Para el caso donde se tiene un peor valor de error de correlacion ,
145         %%no descarta el peor punto, sino que genera una probabilidad de aceptacion
146         %%de ese punto basado en el valor aleatorio rand generado.
147
148     else
149
150         %GENERA LA PROBABILIDAD DE ACEPTACION.
151         p1 = exp(-(DeltaE/(DeltaE_avg * t))); %
152
153         %Determinacion de cual es el punto que se acepta.
154         if (rand() < p1)
155
156             %Aceptacion de la peor solucion
157             accept = true;
158
159         else
160
161             %No acepta la peor solucion.
162             accept = false;
163
164         end
165
166         if (accept==true)
167
168     %Actualiza cada punto en la solucion aceptada.

```

```

169         xc2(1) = xi(1);
170         xc2(2) = xi(2);
171         xc2(3) = xi(3);
172         xc2(4) = xi(4);
173
174         contador=contador+1; %Contador de aceptaciones
175         %Incremento del numero de soluciones aceptadas
176         na = na + 1.0;
177         %Actualizacion DeltaE_avg
178         DeltaE_avg = (DeltaE_avg * (na-1.0) + DeltaE) / na;
179
180     elseif(accept == false)
181         xc2(1) = xc(1);
182         xc2(2) = xc(2);
183         xc2(3) = xc(3);
184         xc2(4) = xc(4);
185     end
186
187     end %error_medio_anterior >= error_medio_actual)
188
189     fc = inversion_automat3(xc2);
190
191 end %or j=1:m
192
193 convergencias(i)=contador;
194 contador_de_aceptaciones=convergencias';
195 contador=0;
196 xc=xc2; %Reemplazo del nuevo punto.
197
198 %Graba el mejor valor de X evaluado al final de cada intento.
199 x(i+1,1) = xc2(1);
200 x(i+1,2) = xc2(2);
201 x(i+1,3) = xc2(3);
202 x(i+1,4) = xc2(4);
203
204 %Almacenamiento de los puntos aceptados
205 fs(i+1,:) = fc;
206
207 %Reduccion de temperatura para el siguiente ciclo.
208 t = frac * t1;
209
210 time.horas=toc/3600;
211 time.minutos=toc/60;

```

```

212     time.segundos=toc;
213 %
214 %
215 SA(k) = struct('Fecha',S,...
216             'Algoritmo','SA',...
217             'Arquitectura','Osaka',...
218             'Valores_Parametros',[k;n;m;p1;p50;t1;t50;dt],...
219             'Tiempo_de_Computo_s',time,...
220             'Tipo_de_Metrica','Correlacion_cruzada',...
221             'Iteraciones_realizados',i,...
222             'Correlacion',fc,...
223             'Matriz_de_Correlcion',fs,...
224             'Matriz_de_avance',Matriz_de_avance,...
225             'Contador_de_aceptaciones_de_iteraciones',contador_de_aceptaciones,...
226             'Sloths_iniciales',X_ini,...
227             'Sloths_finales',x,...
228             'Observaciones','Pruebas de SA realizadas en Lenovo.
229             Criterio de parada modificado, se ha utilizado el proceso de
230             screen en la terminal de Ubuntu. El criterio de parada
231             no esta funcionando, se detiene solo por el numero
232             de iteraciones. ');
233 %
234 %
235 end %or i=1:n
236
237 save SA
238
239 %%Resultados
240 %Imprime la solucion
241
242 disp(['Valores de las velocidades iniciales: ',num2str(X_ini)])
243 disp(['Valores de las velocidades encontradas: ',num2str(x(end,:))])
244
245 %%Imagen del modelo obtenido por medio de SA
246 str1xx=strcat('export LD_LIBRARY_PATH=/usr/lib64 ;
247 cd /home/User/inversion_matlab/; evince model1.eps');
248 d= unix(str1xx);
249 end

```

Listing 2. SA.m

ANEXO I. ALGORITMO PARA ARTIFICIAL BEE COLONY

```
1 clear all;close all;clc
2 %% Algoritmo Artificial Bee Colony
3 % Seminario de investigacion: Implementacion de tecnicas de
4 %optimizacion global en problemas de inversion sismica.
5
6 %Fuente: Artificial Bee Colony Algorithm Homepage
7 %http://mf.erciyes.edu.tr/abc/
8
9 %%Control de los parametros globales de ABC
10 NP=10;                %Tamano de la colonia
11 FoodNumber=NP/2;     %Fuentes de alimento
12                    % (Mitad de la colonia)
13 limit=100;           %Limite de intentos para que la
14                    % obrera abandone la fuente de comida
15 maxCycle=10;         %Numero de iteraciones
16 NumGeof=17;          %Numero de geofonos.
17
18 %* Variables */
19
20 objfun='inversion\_automatica3'; %Funcion objetivo
21 D=4;                 %Numero de parametros a optimizar,
22                    %dimensiones
23 ub=ones(1,D)*1;      %Valores maximos de frontera
24 lb=ones(1,D)*(0);    %Valores minimos de frontera
25 runtime=1;           %Cantidad de veces que se ejecuta el
26                    % algoritmo
27
28 contador = 0;
29 S=date;
30
31 GlobalMins=zeros(1,runtime);
32
33 for r=1:runtime
34     tic
35     iter=1;
36     %Inicializacion de las fuentes de comida
37
38     %Variables inicializadas en el rango [lb,ub].
39
```

```

40 Range = repmat((ub-lb),[FoodNumber 1]);
41 Lower = repmat(lb, [FoodNumber 1]);
42 Foods = (rand(FoodNumber,D) .* Range + Lower)'; %Generacion
43 %de puntos aleatorios para la busqueda de soluciones,
44 %Matriz Alimento”
45
46
47 for s=1:FoodNumber, %Para pruebas estaticas y guiadas
48 %se reemplazan los valores que desee
49
50 %Foods(1,s)=0.77;
51 %Foods(2,s)=0.5;
52 Foods(3,s)=0.26;
53 Foods(4,s)=0.12;
54
55 end
56 for w=1:FoodNumber, %Evaluacion de las abejas en la funcion
57 %objetivo
58
59 ObjVal(:,w)=feval(objfun,Foods(:,w),w);
60
61 end
62
63
64 for q=1:FoodNumber, %Calculo del Fitness para cada
65 %componente de una abeja
66
67 Fitness_vector(:,q)=calculateFitness(ObjVal(:,q));
68
69 end
70
71 for z=1:FoodNumber, %Organizacion de cada Fitness
72 %por abeja evaluada
73
74 Fitness(:,z)=sqrt(sum((Fitness_vector(:,z)).^2)/NumGeof);
75
76 end
77 %Reinicio del contador de intentos
78 trial=zeros(1,FoodNumber);
79
80 %Mejor fuente de alimento memorizado hasta el momento
81
82 [GlobalMin, BestInd]=min(Fitness);

```

```

83
84 GlobalParams=Foods(:, BestInd); %Toma como parametros
85 %globales el minimo encontrado por ahora junto
86 %son los valores correspondiente de la matriz alimento
87
88
89 while ((iter <= maxCycle)),
90
91
92 %%FASE DE ABEJAS OBRERAS %%
93
94     for i=1:(FoodNumber)
95
96         %El parametro a cambiar es determinado
97         %aleatoriamente
98         Param2Change=fix(rand*D)+1;
99
100        %Seleccion de una solucion aleatoria vecina para
101        %producir una posible solucion
102        neighbour=fix(rand*(FoodNumber))+1;
103
104        %Posible caso donde aleatoriamente se toma
105        %a solucion "i" que se esta evaluando, buscando
106        %cambiarlo para que otra sea la que se evalue
107
108        while(neighbour==i)
109            neighbour=fix(rand*(FoodNumber))+1;
110        end;
111
112    sol(:, i)=Foods(:, i);
113
114    % Aplicacion de la ecuacion  $v_{ij}=x_{ij}+$ 
115    %  $\phi_{ij}*(x_{kj}-x_{ij})$ 
116    sol(Param2Change, i)=Foods(Param2Change, i)
117    +(Foods(Param2Change, i)-Foods(Param2Change, neighbour))
118    *(rand-0.5)*2;
119
120
121    % Acotamiento de las fronteras
122    sol= max(min(sol', ub(1))', lb(1));
123
124 %Evaluacion de la nueva solucion "mutante"
125     for e=1:FoodNumber,

```

```

126         ObjValSol(:,e)=feval(objfun,Foods(:,e),e);
127     end
128
129     for v=1:FoodNumber,
130         Fitness\_vectorSol(:,v)=calculateFitness
131             (ObjVal(:,v));
132     end
133
134     for h=1:FoodNumber,
135         FitnessSol(:,h)=sqrt(sum((Fitness\_vectorSol
136             (:,h)).^2)/NumGeof);
137     end
138
139     [GlobalMinSol,BestIndSol]=min(FitnessSol);
140     %minimo y su posicion del vector fitness
141     GlobalParamsSol=Foods(:,BestIndSol);
142     %Seleccion de aquel vector que tiene el mejor fitness
143
144     %Una seleccion prematura es aplicada entre la solucion
145     %actual y una mutante
146
147     if (GlobalMinSol < GlobalMin) %Si la solucion del
148         %mutante es mejor que la actual, reemplaza la solucion
149         %mutante y reinicia el contador de intentos
150         Foods(:,i)=sol(:,BestIndSol);
151         Foods_test(:,BestIndSol)=sol(:,BestIndSol);
152         Fitness(:,BestIndSol)=FitnessSol(:,BestIndSol);
153         ObjVal(:,BestIndSol)=ObjValSol(:,BestIndSol);
154         trial(i)=0;
155     else
156         trial(i)=trial(i)+1; %Si la solucion no mejora,
157             %incrementa en contador de intentos "trial"
158     end;
159 end;
160
161 %%Calculo de probabilidades %%
162
163 prob=(0.9.*Fitness./max(Fitness))+0.1;
164
165 %%%FASE DE ABEJAS OBSERVADORAS %%%
166 i=1;
167 t=0;
168 while (t<FoodNumber)

```

```

169     if (rand<prob)
170         t=t+1;
171
172         %El parametro a cambiar es determinado aleatoriamente
173         Param2Change=fix (rand*D)+1;
174
175         %Seleccion de una solucion aleatoria vecina
176         %para producir una posible solucion mutante
177         neighbour=fix (rand*(FoodNumber))+1;
178
179         %Posible caso donde aleatoriamente se tome la
180         %solucion i que se esta evaluando, busca cambiarlo
181         %para que otra sea la que se evalue
182         while (neighbour==i)
183             neighbour=fix (rand*(FoodNumber))+1;
184         end;
185
186         %Los puntos de Foods son utilizados para generar
187         %puntos aleatorios
188         sol (:, i)=Foods (:, i);
189
190         %Aplicacion de la ecuacion  $v_{ij}=x_{ij}+\phi_{ij}$ 
191         % $(x_{kj}-x_{ij})$ 
192         sol (Param2Change)=Foods (Param2Change, i)+
193         (Foods (Param2Change, i)-Foods (Param2Change, neighbour))
194         *(rand-0.5)*2;
195
196         %Acotamiento de las fronteras de los nuevos
197         % puntos generados
198         sol= max (min (sol', ub (1))', lb (1));
199
200
201         %Evaluacion de la nueva solucion en la
202         %funcion objetivo
203         for o=1:FoodNumber,
204             ObjValSol (:, o)=feval (objfun, Foods (:, o), o);
205         end
206
207         %Evaluacion de los nuevos valores de alimento
208         %en la funcion fitness
209         for b=1:FoodNumber,
210             Fitness_vectorSol (:, b)=calculateFitness (ObjVal
211             (:, b));

```

```

212     end
213
214     %Evaluaciones de los valores fitness , por cada uno
215     %de los alimentos
216     for l=1:FoodNumber,
217         FitnessSol(:,l)=sqrt(sum((Fitness\_-
218             vectorSol(:,l))
219             .^2)/NumGeof);
220     end
221
222     %Posicion y valor del minimo en el vector FitnessSol
223     [GlobalMinSol, BestIndSol]=min(FitnessSol); %lama
224     %el punto evaluado como minimo a traves de
225     %la posicion BestInd
226
227     %Seleccion de esa "mejor" abeja
228     GlobalParamsSol=Foods(:, BestIndSol);
229
230     %Una seleccion prematura es aplicada entre la
231     %solucion actual y una mutante
232     if (GlobalMinSol < GlobalMin) %Si la solucion
233     %del mutante es mejor que la actual , reemplaza
234     %a solucion mutante y reinicia el contador de
235     %intentos
236         Foods(:, i)=sol(:, BestIndSol);
237         Foods_test(:, BestIndSol)=sol(:, BestIndSol);
238         Fitness(:, BestIndSol)=FitnessSol(:, BestIndSol);
239         ObjVal(:, BestIndSol)=ObjValSol(:, BestIndSol);
240         trial(i)=0;
241     else
242         trial(i)=trial(i)+1; %Si la solucion no mejora,
243         %incrementa en contador de intentos trial
244     end;
245 end;
246
247 i=i+1;
248 if (i==(FoodNumber)+1)
249     i=1;
250 end;
251 end;
252
253 %La mejor fuente de comida es guardada
254

```

```

255         ind=BestIndSol;
256         if (GlobalMinSol < GlobalMin)
257             GlobalMin=GlobalMinSol;
258             GlobalParams=Foods(:, ind);
259         end;
260
261 GlobalMins_avg(r, iter)=GlobalMin;
262
263
264 %%%FASE DE ABEJAS BUSCADORAS %%%
265
266 %NOTA : En el ABC basico, solo una Scout es
267 %lanzada en cada ciclo */
268
269 %Determina si el contador de pruebas ha excedido la cantidad
270 %de intentos a traves del valor de trials.
271 ind=find(trial==max(trial)); %Tuvo la mayor
272 %cantidad de busquedas.
273 ind=ind(end);
274
275 if (trial(ind)>limit)
276     trial(ind)=0;
277     sol=(ub(1)-lb(1)).*rand(1,D)+lb;
278
279     for g=1:FoodNumber,
280         ObjValSol(:,g)=feval(objfun, Foods(:,g),g);
281     end
282
283     for f=1:FoodNumber,
284         Fitness_vectorSol(:,f)=calculateFitness(ObjVal
285             (:,f));
286     end
287
288     Foods(:, ind)=sol;
289     Fitness(:, ind)=FitnessSol(:, ind);
290     ObjVal(:, ind)=ObjValSol(:, ind);
291
292 end;
293
294 %Matriz de seguimiento de las mejores
295 %ubicaciones con sus mejores individuos
296 UbicacionMejoresIndividuos=BestIndSol;
297 MejoresIndividuos(:, r)=Foods(:, BestIndSol);

```

```

298
299 iter=iter+1;
300
301 end %Finaliza ABC
302
303 contador = 0;
304 GlobalMins(r)=GlobalMin;
305 SlothsMins(:,r)=BestIndSol;
306
307 time.horas=toc/3600;
308 time.minutos=toc/60;
309 time.segundos=toc;
310
311 end; %end of runs
312
313 %
314 %
315 ABC = struct('Fecha',S,...
316             'Algoritmo','ABC',...
317             'Arquitectura','Osaka',...
318             'Poblacion',NP,
319             'Dimensiones',D,
320             'Fuentes_de_comida',FoodNumber,
321             'Sloths_finales',Foods(:,BestIndSol),
322             'Minimos_por_iteracion',GlobalMins,
323             'Sloth_correspondientes_por_iteracion',SlothsMins,
324             'Ciclos_maximos',maxCycle,
325             'Rutinas',runtime,
326             'Iteraciones',iter,
327             'Tiempo_de_Computo_s',time,...
328             'Tipo_de_Metrica','Correlacion_cruzada',...
329             'Alimento',Fodds,...
330             'Parametros_globales',GlobalParams,...
331             'Fitness',Fitness,...
332             'Avance_fitness',FitnessSol,...
333             'Soluciones_exploradas',sol,...
334             'Observaciones','Pruebas de SA realizadas en Lenovo.
335             Criterio de parada modificado, se ha utilizado el proceso de
336             screen en la terminal de Ubuntu. Sin criterio de parada.');
```

```

337 %
338 %
339
340 save ABC

```

```
341
342 fprintf('\n minimo (Promedio de los intentos) = \n',mean(GlobalMins,r));
343 fprintf('\n minimo (Puntos) = \n',[Foods(:,BestInd)]);
```

Listing 3. ABC.m

ANEXO J. FUNCIÓN REALIMENTACIÓN

```
1 function fFitness=calculateFitness(fObjV)
2 fFitness=zeros(size(fObjV));
3 ind=find(fObjV>=0);
4 fFitness(ind)=1./(fObjV(ind)+1);
5 ind=find(fObjV<0);
6 fFitness(ind)=1+abs(fObjV(ind));
```

Listing 4. Fitness

ANEXO K. COMPLEMENTO DE RESULTADOS

En este anexo se presenta un complemento de las pruebas desarrolladas en el capítulo 4. Se realizan cuatro pruebas denominadas como: prueba a, prueba b, prueba c y prueba d. El parámetro del número de intentos es el único que presenta un cambio en cada una de las pruebas, y el tiempo de cómputo es tomado como un dato relevante en cada una de ellas (Tabla K 1). La probabilidad final (0,001), la temperatura inicial (2,8037), la temperatura final (0,1448) y el paso de reducción (0,3) son los parámetros estáticos en cada prueba. En las Figuras K 1 y K 2 se presentan los valores promedio de la correlación cruzada y de *sloths* de la prueba a.

Tabla K 1. Parámetros de la tercera prueba con SA.

Parámetros	Prueba a	Prueba b	Prueba c	Prueba d
Intentos	5	5	20	10
Probabilidad inicial	0,7	0,5	0,5	0,5
Tiempo de cómputo [s]	64,23	196,06	611,75	147,44

Figura K 1. Promedio de *sloths* en la tercera prueba con SA..

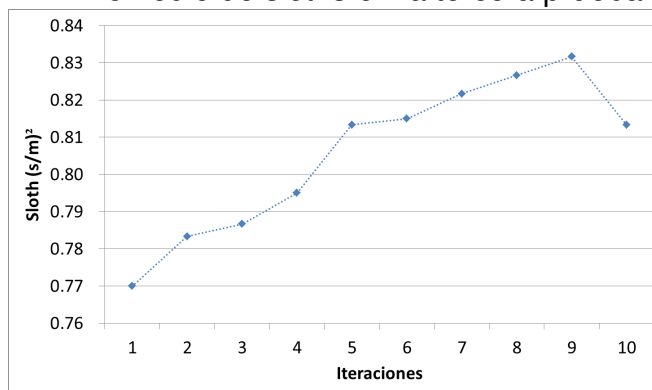
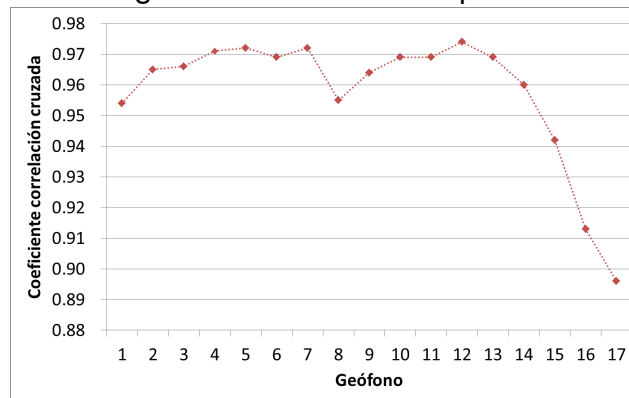


Figura K 2. Promedio de los coeficientes de la correlación cruzada con respecto al número de geófonos en la tercera prueba con SA.



Para la prueba b se mantienen los valores de iteración e intentos anteriores, pero se varía el valor de probabilidad de encontrar un nuevo punto de búsqueda aceptable. En las Figuras K 3 y K 4 se presentan los valores promedio de la correlación cruzada y de los *sloths*.

Debido a que la probabilidad de aceptación disminuye, se ve reflejado en la cercanía de los valores finales encontrados, ya que al menos cuatro de los cinco intentos realizados convergen a valores cercanos de la solución de la capa.

Figura K 3. Promedio de *sloths* en la cuarta prueba con SA.

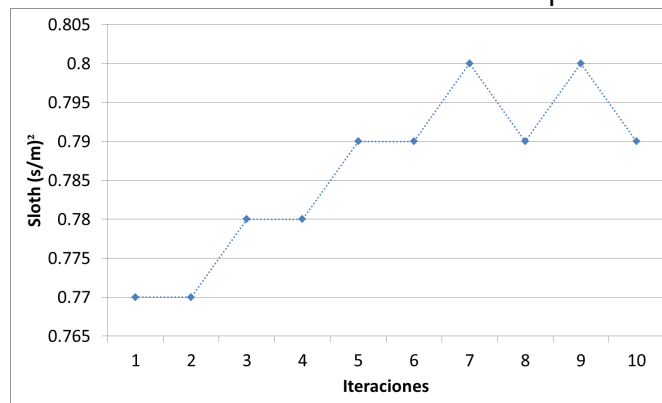
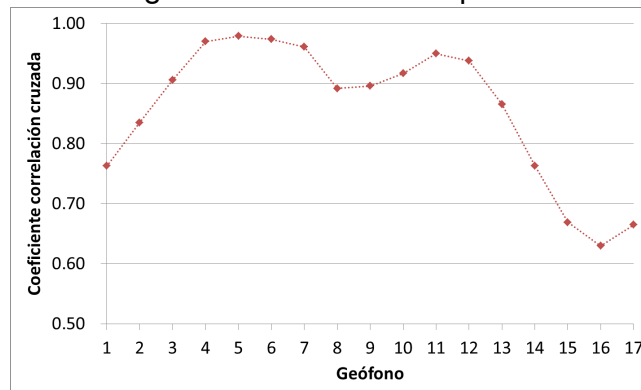


Figura K 4. Promedio de los coeficientes de la correlación cruzada con respecto al número de geófonos en la cuarta prueba con SA.



Para la prueba c se mantienen los parámetros anteriores a excepción de la cantidad de intentos, el cual toma ahora un valor de diez y que arroja un comportamiento similar a la prueba anterior, teniendo al menos ocho de diez intentos que convergen muy cerca al valor teórico de la capa. En las Figuras K 5 y K 6 se presentan los valores promedio de la correlación cruzada y de los *sloths*.

Figura K 5. Promedio de *sloths* en la quinta prueba con SA.

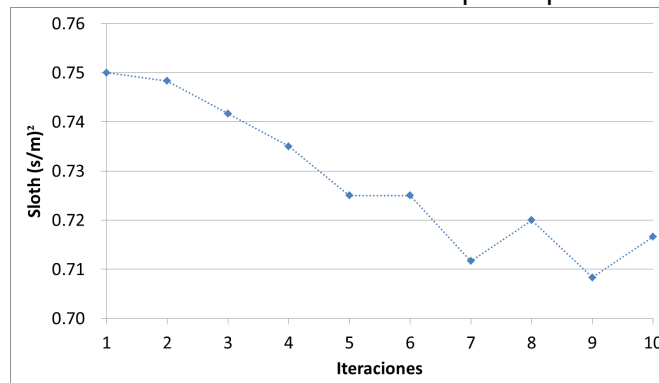
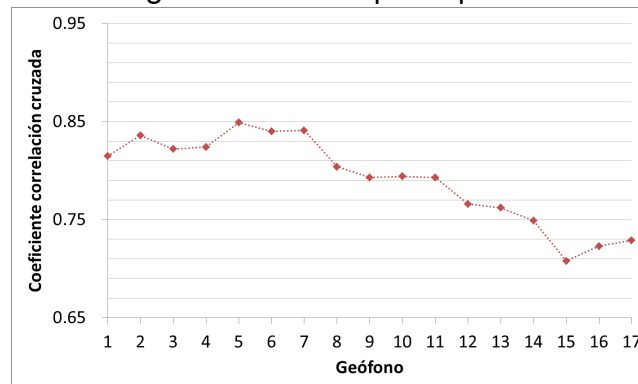


Figura K 6. Promedio de los coeficientes de la correlación cruzada con respecto al número de geófonos en la quinta prueba con SA.



Ahora bien, estas pruebas se realizaron partiendo de la solución exacta de las capas del modelo generado como guía, pero para la prueba d, se dejan los primeros dos valores de las capas aleatorias y las otras dos fijas. En las Figuras K 7, K 8 y K 9 se presentan los valores promedio de la correlación cruzada y de los *sloths*.

Para la primera capa (Figura K 7), se tiene un comportamiento ciertamente aleatorio pero tiene una oscilación muy cercana al valor exacto de ésta capa que es 0,77; pero puede decirse que es exploratorio pero no converge rápidamente el algoritmo bajo esas condiciones.

Ya para la segunda capa se tiene un comportamiento distinto (Figura K 8), éste si presenta valores más cercanos al real que es 0,5, pero a pesar de que parten de un valor cercano a él, después de ciertas iteraciones llegan a un valor muy cercano, siendo así que para la segunda capa se tiene un mejor comportamiento en comparación con la primera capa analizada anteriormente, pero que presentaban avances muy variables.

Figura K 7. Promedio de *sloths* de la primera capa en la sexta prueba con SA.

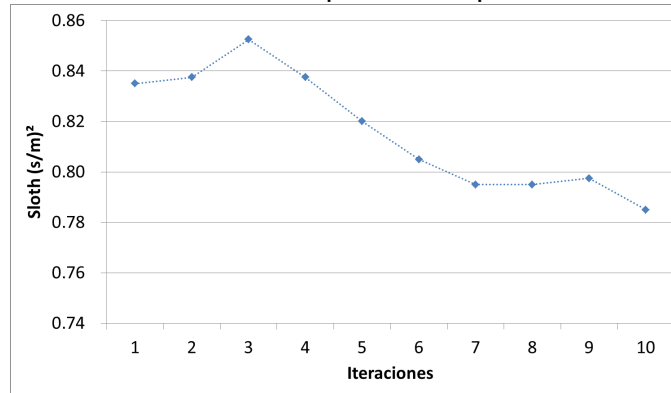
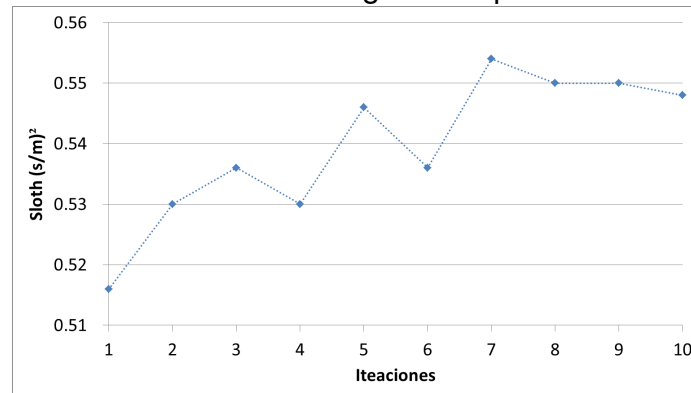


Figura K 8. Promedio de *sloths* de la segunda capa en la sexta prueba con SA.

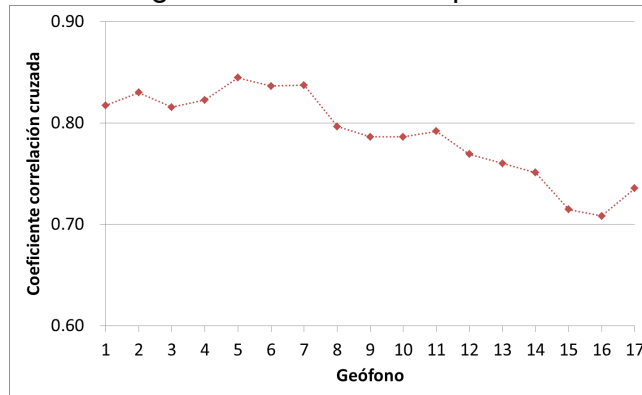


El análisis de la gráfica (Figura K 9) de correlación para esta prueba es muy particular, ya que, para el avance, no presenta valores cercanos a 1, pero si se puede inferir que ese valor oscilatorio de la primera capa es compensado por el valor de la segunda capa, que ciclo a ciclo, no deja que éste valor de capa cambie significativamente, sino que se tenga una tendencia a situarse alrededor de un valor cercano a 0,8.

Pero el comportamiento del valor de correlación se comporta de manera extraña, ya que a pesar de que algunos valores de la capa son muy cercanos, el valor de correlación se estanca en un aparente mínimo local y alrededor de ese valor, o sea que existe una tendencia ya que se sitúan al menos seis de los diez. Aunque no es

tan extraño este comportamiento, ya que si se interpreta lo que representa cada una de estas líneas, es el error medio cuadrático, teniendo así que, son la raíz cuadrada de suma de cada uno los puntos al cuadrado; debido a esa variabilidad, el valor que pudo entregar debió ser un valor cercano a uno, que es lo deseado teóricamente, pero sin tener en cuenta qué tanto estaba lejos la respuesta del valor deseado.

Figura K 9. Promedio de los coeficientes de la correlación cruzada con respecto al número de geófonos en la sexta prueba con SA.



Se observa un comportamiento muy similar a las primeras pruebas realizadas, por esto se determina que el parámetro que no se varía, que es la probabilidad, puede considerarse como un valor estándar a la hora de realizar futuras pruebas del algoritmo.

En cuanto a lo que corresponde a la correlación, se evidencia un comportamiento similar a la correlación anterior pero con mayor cantidad de líneas ya que se aumentaron los intentos, teniendo entonces que, la correlación tiene una tendencia a alejarse del valor ideal pero debido al valor entregado por el error medio cuadrático, puede ser cercano a 1 pero seguir avanzando sin tener en cuenta el valor de la capa.