

Universidad Simón Bolívar

Ingeniería Geofísica

**UTILIZACIÓN DE JATS Y LÓGICA DIFUSA EN EL ANÁLISIS DE DOS
PERFILES DE REFRACCIÓN SÍSMICA EN EL ÁREA 75 DE BAUXILUM,
PUERTO ORDAZ, ESTADO BOLÍVAR**

Realizado por:

Mario Ángel González Farías

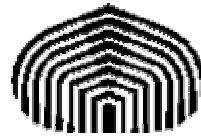
Proyecto de Grado

Presentado ante la Ilustre Universidad Simón Bolívar

Como requisito Parcial para optar al Título de

Ingeniero Geofísico

Sartenejas, Julio 2006



Universidad Simón Bolívar

Ingeniería Geofísica

**UTILIZACIÓN DE JATS Y LÓGICA DIFUSA EN EL ANÁLISIS DE DOS
PERFILES DE REFRACCIÓN SÍSMICA EN EL ÁREA 75 DE BAUXILUM,
PTO ORDAZ, EDO BOLÍVAR.**

Realizado por:

Mario Ángel González Farías

Con la asesoría de:

Dra. Milagrosa Aldana

Dr. Carlos Izarra

Proyecto de Grado

Presentado ante la Ilustre Universidad Simón Bolívar

Como requisito Parcial para optar al Título de

Ingeniero Geofísico

Sartenejas, Julio 2006



Este trabajo ha sido aprobado en nombre de la Universidad Simón Bolívar por el siguiente jurado

calificador:

Presidente



REFRACCIÓN SÍSMICA: ADQUISICIÓN, PROCESAMIENTO, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

Por:

Mario Ángel González Farías

RESUMEN

En el presente trabajo especial de grado se muestran los resultados del análisis de dos perfiles de refracción ubicados en la Zona 75 de Bauxilum en el estado Bolívar utilizando JaTS y lógica difusa. La detección de las primeras llegadas fue realizada manual y también automáticamente utilizando un algoritmo basado en lógica difusa. La aplicación de este algoritmo fue efectiva para registros que no presentaban mucho ruido, como el correspondiente al disparo 01L2N, por el contrario en registros ruidosos como el Dique08 el algoritmo detectaba como primeras llegadas ruido con amplitudes muy similares a las correspondientes a una primera llegada. Para realizar la tomografía de los perfiles de refracción de la zona 75 se generaron modelos iniciales para cada línea, basados en el modelado previo de dichas líneas mediante trazado de rayos, luego se recreó el dispositivo de adquisición utilizado y se generaron los archivos de tiempo de viaje. Para el perfil Laguna 2 Norte se observan velocidades para la primera capa de 1000m/s, mientras que para la segunda capa se muestran variaciones laterales de velocidad que van desde 3000 m/s hasta 5500 m/s. En el perfil Dique 3 Sur las velocidades para la primera capa se presentaban uniformes alrededor de 1000m/s mientras que en la segunda capa se observó una zona de baja velocidad en comparación a las velocidades a su alrededor, esta zona de baja velocidad tenía valores entre 2800 y 3000 m/s y sus alrededores tenían valores de velocidad aproximados a 4000 m/s. Esta zona de baja velocidad puede ser causada por filtraciones de fluidos provenientes de las lagunas que el dique separa. Adicionalmente, se generaron 2 modelos sintéticos para estudiar las posibilidades y alcances del programa JaTS utilizado para la inversión. El Modelo Sintético I era de capas inclinadas, aunque el modelo de entrada era de capas planas el modelo final de la inversión logró reproducir una leve inclinación en las capas, caso similar ocurrió con el Modelo Sintético II el cual presentaba unos altos o lomos en la segunda y tercera capa los cuales fueron reproducidos por el programa de inversión a pesar de que el modelo inicial era de capas planas.



DEDICATORIA

*A mis padres, Mario y Alida...todo lo que soy es resultado de su amor e infinita
paciencia*



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero dar gracias a Dios porque en Él encuentro refugio y consuelo en los momentos difíciles y regocijo cuando la alegría me invade.

A mis padres por hacer posible todo lo que soy, por apoyarme siempre y en todo y por todo lo que sacrifican día a día para que alcance mis metas...Muchas gracias, los amo.

A mis hermanos, María, Rosangel y Jorgito, cuando estamos juntos me siento simplemente FELIZ...estoy orgulloso de ser parte de esta familia.

A mi Mafer, amor gracias por tu paciencia y devoción, por obligarme a no echar carro y estar junto a mí todo el tiempo acompañándome en la realización de este proyecto, eres mi adoración. Te Amo...

Gracias a toda mi familia, por estar siempre pendientes de mi en especial a mi abuelita Paula.

A mis tutores, gracias por el apoyo brindado y la confianza que pusieron en mí, especialmente a Carlos por guiarme a través de esta investigación más que como un profesor, como un amigo...Gracias por confiar en mi.

A los amigos que a través del tiempo me han acompañado en mi carrera universitaria, siempre presentes en las buenas y en las no tan buenas, Edgar, Ircy, Pedro, Alicia, Alberto, Marianita, Vere y Gianni... los quiero mucho y gracias.

A mis panas geofísicos con quienes compartí no solo la realización de este proyecto sino el día a día, Luiselvic, Patty, Omar, Anasofi, Pedro, Walter, Chicho, Juancho, We, Marianto y Cucha, especialmente a ti Cuchita, me enseñaste la lógica difusa con pelos y señales, entre partidos de fútbol, cervezas e infinitas conversas.... Un millón de gracias!!!



A mis hermanos de la resi, Juanpe, Neo, Jan, El Negro, Juangui y Fran, gracias por ser mi segunda familia.

A mis panitas del grupo GPS, últimamente han sido mi familia, Julián, Sasha, mi hermano Javier, Mich y OP.

Un agradecimiento especial a los profesores Gilles Grandjean y Saje Sandrine de la Universidad de Liège, en Bélgica, creadores del JaTS, por su colaboración y por proveer la licencia educativa del software.



ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
ÍNDICE GENERAL	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Metodología.....	2
1.4. Localización del área de estudio:.....	3
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	5
2.1. Refracción Sísmica.....	5
2.1.1. Conceptos Básicos de Sísmica de Refracción:	6
2.1.2. Ley de Refracción:.....	7
2.1.3. Equipos de Medición:	8
2.1.4. Interpretación de datos de Sísmica de Refracción:.....	10
2.2. Lógica difusa	17
2.2.1. Historia y Antecedentes:.....	19
2.2.2. Conjuntos Difusos:	21
2.2.3. Funciones de Pertenencia:	22
2.2.4. Variables Lingüísticas:	24
2.2.5. Operaciones con Conjuntos Difusos:	26
2.2.6. Relaciones Difusas	27
2.2.7. Reglas Difusas:	28
2.2.8. Sistemas de Inferencia Difusa:	29
2.2.9. Modelo difuso de Takagi-Sugeno:	31
2.3. Tomografía Sísmica y JaTS.....	33
2.3.1. JaTS (Java Tomography Software)	34
CAPÍTULO 3: MARCO GEOLÓGICO	41
3.1. Geología Regional	41
3.1.1. Provincia Geológica de Imataca:	42
3.1.2. Estratigrafía Local:	42
CAPÍTULO 4: ADQUISICIÓN DE DATOS	44
CAPÍTULO 5: DETECCIÓN DE PRIMERAS LLEGADAS UTILIZANDO UN ALGORITMO DE LÓGICA DIFUSA	47



5.1.1. Selección de los Disparos a utilizar en el programa de Lógica Difusa:	47
5.1.2. Cambio del formato de los datos:.....	50
5.1.3. Modificación e implementación del Código propuesto por López (2005):.....	51
CAPÍTULO 6: TOMOGRAFÍA SÍSMICA	72
6.1. Casos de Estudio:	72
6.1.1. Laguna 2 Norte	72
6.1.2. Dique 3 Sur:.....	79
6.1.3. Pruebas Sintéticas:.....	82
CAPÍTULO 7: DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN	89
7.1. Detección de primeras llegadas	89
7.1.1. Experimento Nº 1:	89
7.1.2. Experimento Nº 2:	89
7.1.3. Experimento Nº 3:	90
7.2. Tomografía Sísmica:	91
7.2.1. Laguna 2 Norte:	91
7.2.2. Dique 3 Sur:.....	92
7.3. Modelos Sintéticos:	92
7.3.1. Modelo Sintético I:	92
7.3.2. Modelo Sintético II:.....	93
CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	94
8.1. Detección Automática de Primeras Llegadas:.....	94
8.2. Tomografía Sísmica:	94
CAPÍTULO 9: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Mapa Ubicación de la Zona 75 Planta de CVG Bauxilum. (Recuadro Rojo)	4
Figura 2.1: Esquema de adquisición de un perfil de refracción	6
Figura 2.2: Modelo acústico de dos capas planas.....	7
Figura 2.3: Propagación de las ondas en un medio acústico de 2 capas.....	8
Figura 2.4: Primeras llegadas en un Registro de Sísmica de Refracción	11
Figura 2.5: Curva Camino - Tiempo para un disparo directo de refracción.....	12
Figura 2.6: Grafica Camino-Tiempo para un perfil de refracción.....	13
Figura 2.7: Relación entre la distancia crítica y la profundidad en función del contraste de velocidades	14
Figura 2.8: Curvas camino-tiempo, tiempo de intercepto, pendiente de las dromocronas.....	16
Figura 2.9: Definición de Tiempo de Retardo para el receptor, $\Delta T_R = CD/V_1 - CD'/V_2$	17
Figura 2.10: Representación de una función de pertenencia	19
Figura 2.12: Tipos de funciones de pertenencia	23
Figura 2.13: Ejemplo de variables lingüísticas.....	25
Figura 2.14: Esquema general de un sistema basado en lógica difusa	30
Figura 2.15: Procesamiento general sistema difuso Takagi-Sugeno	32
Figura 2.16: Modelo Takagi-Sugeno.....	33
Figura 2.17. Modelo sintético (a), Frentes de Onda (b), Volumen de Fresnel 100Hz (c) Volumen de Fresnel 50 Hz (d).	37
Figura 2.18: Diagrama para el uso del programa JaTS, los pasos a seguir están enumerados.....	39
Figura 3.1: Provincias Litotectónicas del Escudo de Guayana, Venezuela.....	41
Figura 3.2: Columna Estratigráfica generalizada para el Área Industrial de CVG Bauxilum	43
Figura 3.3: (A) Capa de Arenas Arcillosas de la Formación Mesa, en Contacto Discordante con las Migmatitas de la Provincia Imataca (B).....	43
Figura 4.1: Plano Ubicación de la Zona 75 – Planta de CVG Bauxilum y la disposición de cada una de las Líneas sísmicas adquiridas.	46
Figura 5.1: En este disparo se nota en todas las trazas cierta cantidad de ruido, atribuido a las embarcaciones que navegan por el Orinoco	48
Figura 5.2: Disparo Laguna 2 Norte con buena relación señal/ruido.....	48
Figura 5.3: Disparo Ruidoso perteneciente a la Línea Dique 3 Sur	49



Figura 5.4: Disparo Ruidoso perteneciente a la Línea Dique 3 Sur	49
Figura 5.5: Modulo de REFLEXW para exportar datos.....	50
Figura 5.6: Disparo donde se muestra la función guía entre las trazas 1, 3, 7 ,10 y 12. El punto rojo representa el tiempo de la primera llegada ubicada manualmente.....	52
Figura 5.7: Disparo donde se muestra la función guía entre las trazas 1, 3, 7 ,10 y 12. (El punto rojo representa el tiempo de la primera llegada ubicada manualmente)	53
Figura 5.7: Función de Pertenencia de forma Gaussiana para el atributo Amplitud.....	57
Figura 5.8: Función de Pertenencia para el atributo Distancia Mínima.....	57
Figura 5.9: Editor de Reglas Difusas.....	58
Figura 5.10: Disparo 01L2N.....	59
Figura 5.11: Ventana de edición del Sistema de Inferencia Difuso	62
Figura 5.12: Edición de las Funciones de Pertenencia.	63
Figura 5.13: Función de Pertenencia Gaussiana para el atributo Amplitud	63
Figura 5.14: Funciones de pertenencia para los atributos Pendiente de la envolvente, Potencia promedio y Radio de potencia.....	64
Figura 5.15: Ventana de creación y edición de Reglas Difusas Experimento N° 2.....	65
Figura 5.16: Función de pertenencia asociada al atributo Distancia a una Función Guía.....	67
Figura 5.17: Ventana de creación y edición de Reglas Difusas Experimento N° 3.....	68
Figura 5.18: Disparo Dique08	70
Figura 6.1: Disparo 01L2N.....	72
Figura 6.2: Modelo inicial Laguna 2 Norte.	73
Figura 6.3: Creación de un modelo en JaTS.....	73
Figura 6.4: Modelo inicial Laguna 2 Norte, la velocidad de la primera capa se estableció en 1000m/s y la de la capa inferior en 3500m/s.....	74
Figura 6.5: Parámetros del Modelo inicial Laguna 2 Norte.	74
Figura 6.6: Ventana de Creación del Dispositivo de Adquisición	75
Figura 6.7: Topografía Laguna 2 Norte.....	76
Figura 6.8: Grafico de los tiempos de viaje para la Línea Laguna 2 Norte.....	76
Figura 6.9: Parámetros a introducir en el Módulo de Inversión Tomográfica	77
Figura 6.10: Función de Convergencia para 97 iteraciones	78
Figura 6.11: Modelo Final para la línea Laguna 2 Norte	78



Figura 6.12: Número Total de Iteraciones y Convergencia alcanzada.....	79
Figura 6.13: Modelo inicial Dique 3 Sur.....	79
Figura 6.14: Modelo inicial para la Línea Dique 3 Sur. La velocidad de la primera capa se estableció en 900m/s y la de la capa inferior en 3000m/s.	80
Figura 6.15: Topografía Dique 3 Sur.....	81
Figura 6.16: Grafico de los tiempos de viaje para la Línea Dique 3 Sur.....	81
Figura 6.17: Modelo final para la línea Dique 3 Sur.	82
Figura 6.18: Modelo sintético de Capas Inclinadas (Modelo sintético I).....	82
Figura 6.19: Modelo Sintético II	83
Figura 6.20: Dispositivo de Adquisición de 5 Disparos	83
Figura 6.21: Disparos Sintéticos generados para el Modelo Sintético II	84
Figura 6.22: Curvas Camino-Tiempo Modelo Sintético I.....	85
Figura 6.23: Modelo inicial para la inversión del Modelo Sintético I.....	85
Figura 6.24: Modelo Final después de la inversión del Modelo Sintético I.....	86
Figura 6.25: Curvas Camino-Tiempo Modelo Sintético II.....	87
Figura 6.26: Modelo inicial para la inversion del Modelo Sintético II	87
Figura 6.27: Modelo final invertido con 5 disparos.	88
Figura 6.28: Modelo final invertido con el diseño tradicional (Disparo-Contradisparo).....	88



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1: Geometría de las líneas de refracción adquiridas en campo.....	45
Tabla 5.1: Atributos pertenecientes al disparo 01L2N obtenidos para cada candidato a primera llegada organizado por trazas.....	55
Tabla 5.2: Atributos calculados para el disparo 01L2N sin establecer el umbral de Amplitud	60
Tabla 5.3: Experimento N° 1. Primeras llegadas calculadas manualmente y calculadas con el programa de Lógica Difusa.....	61
Tabla 5.4: Atributos Calculados para el disparo 01L2N en el Experimento N° 2.....	62
Tabla 5.5: Candidatos a Primeras Llegadas calculados automáticamente y el valor asignado por el SID. Los recuadros rojos muestran candidatos erróneos.....	66
Tabla 5.6: Atributos calculados para el disparo 01L2N incorporando el atributo Distancia Mínima	67
Tabla 5.7: Resultados del Experimento N° 3. los recuadros en rojo muestran candidatos erróneos.	69
Tabla 5.8: Atributos Calculados para el Disparo Dique08.....	70
Tabla 5.9: Candidatos a primeras llegadas Calculados para el disparo Dique08.....	71
Tabla 6.1: Velocidades y espesores calculados para el Modelo Sintético 1.....	85
Tabla 6.2: Velocidades y espesores para la creación del modelo inicial II.....	86
Tabla 7.1: primera llegada calculada manualmente, candidatos calculados por el SID, valor que el SID asigna a cada candidato y resta entre las primeras llegadas calculadas manual y automáticamente	90



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo especial de grado se muestran los procesos involucrados en el análisis de dos perfiles de refracción ubicados en la Zona 75 de Bauxilum en el estado Bolívar utilizando JaTS y lógica difusa, entre los cuales están la detección de los primeros quiebres, la generación de modelos previos a partir de curvas camino-tiempo, y por último la generación de modelos de espesores y velocidades mediante la inversión tomográfica.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Área 75 de BAUXILUM es destinada al depósito de substancias tóxicas (lodos rojos), en lagunas artificiales para su posterior separación por decantación y evaporación. Varios de los diques que conforman estas lagunas han sufrido a través del tiempo alteraciones produciendo filtraciones de sustancias y sedimentos tóxicos hacia el Río Orinoco, así como hacia lagunas naturales cercanas a los diques (CVG-TECMIN y FUNINDES-USB, 2005). Debido a esto ha sido necesario realizar estudios geológicos, geotécnicos y geofísicos, entre otros, que otorguen la información necesaria para solventar estos problemas

En Julio de 2005 la Universidad Simón Bolívar fue contratada por CVG-TECMIN a través de su Fundación FUNINDES-USB, para realizar un estudio de refracción sísmica con el objetivo de delimitar las posibles capas presentes en el subsuelo y estimar el valor de velocidad de onda P hasta los 50m de profundidad o hasta donde las condiciones de las rocas del subsuelo así lo permitiesen. Teniendo en cuenta que la tomografía sísmica muestra imágenes del subsuelo donde son apreciables variaciones laterales de velocidades y espesores se decidió como parte de esta investigación llevar a cabo la inversión tomográfica de 2 perfiles de refracción sísmica para verificar el modelado realizado previamente con trazado de rayos.



Debido a la naturaleza ruidosa de los registros de refracción obtenidos, se decidió como parte de este trabajo implementar el algoritmo basado en lógica difusa propuesto por López 2005 para la detección de primeras llegadas, y así automatizar el proceso y verificarlo con las primeras llegadas calculadas previamente de forma manual.

1.2. OBJETIVOS

Generar modelos de velocidades y espesores usando tomografía sísmica para 2 perfiles de refracción en la Zona 75 de Bauxilum; así como también realizar tomografías a modelos sintéticos para estudiar y evaluar el funcionamiento del programa de inversión y sus alcances.

Adicionalmente se pretende implementar un algoritmo de detección de primeras llegadas basado en lógica difusa en los registros de refracción seleccionados

1.3. METODOLOGÍA

- Recopilación bibliográfica sobre refracción sísmica, lógica difusa y tomografía sísmica
- Modificación e implementación del algoritmo basado en lógica difusa para la detección de las primeras llegadas.
- Generación de los modelos de velocidades y espesores mediante tomografía sísmica para las Líneas Laguna 2 Norte y Dique 3 Sur.
- Creación e inversión tomográfica de modelos sintéticos.



1.4. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO:

El área de estudio de este trabajo esta ubicada en Puerto Ordaz, en la zona industrial de Matanzas, específicamente en la Zona 75 de la planta de CVG-Bauxilum. Esta planta se ubica al margen izquierdo del río Orinoco, antes del punto de la desembocadura del río Caroní en el río Orinoco (Figura 1.1). Sus linderos físicos son los siguientes:

Al Norte: El margen derecho del río Orinoco

Al Sur: las colinas alineadas que caracterizan el relieve del norte de Puerto Ordaz y la vía expresa Matanzas-Angosturita.

Al Este: La planicie de inundación del río Orinoco, donde está asentado actualmente el Relleno Sanitario y Barrio Cambalache.

Al Oeste: El margen derecho del río Orinoco y las plantas físicas de las empresas Ferro-Atlántica, Cemex y la avenida Norte-Sur.

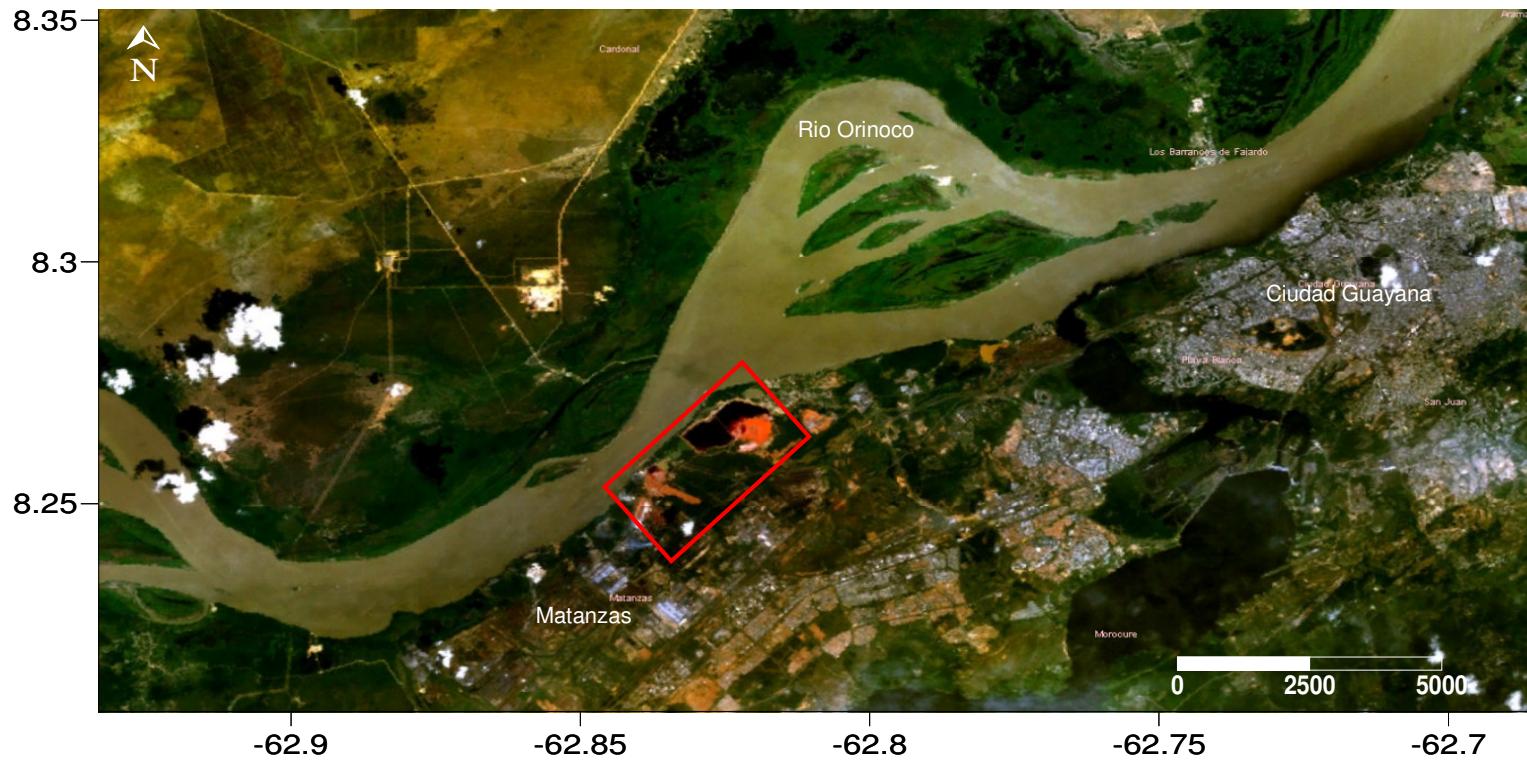


Figura 1.1: Mapa Ubicación de la Zona 75 Planta de CVG Bauxilum. (Recuadro Rojo)



CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. REFRACCIÓN SÍSMICA

La exploración sísmica emplea las ondas elásticas que se propagan a través del subsuelo y que han sido generadas artificialmente. Su objetivo es el estudio del subsuelo en general, lo cual permite obtener información geológica de los materiales que lo conforman. La prospección sísmica es una herramienta de investigación poderosa, ya que con ella se puede inspeccionar con buena resolución desde los primeros metros del terreno (sísmica superficial) hasta varios kilómetros de profundidad (sísmica profunda). Así, para la sísmica profunda se utilizan fuentes de energía muy potentes (explosivos o camiones vibradores) capaces de generar ondas elásticas que llegan a las capas profundas del subsuelo, mientras que para la sísmica superficial se utilizan martillos de impacto, rifles sísmicos y explosivos de baja energía. De manera que el diseño de una campaña sísmica (equipo y material a utilizar) está en función del objetivo del estudio. Según esto, la sísmica profunda se emplea en la detección de reservorios petrolíferos (ya sea terrestre o marítima), grandes estructuras geológicas (plegamientos montañosos, zonas de subducción, etc.), yacimientos minerales, domos salinos, etc. Mientras que la sísmica superficial tiene mucha aplicación en la obra pública y la ingeniería civil (Boyd, 1999)

Las aplicaciones más comunes de la refracción sísmica en la ingeniería civil son para la determinación de la profundidad del basamento en los proyectos de construcción de represas, edificaciones y otras obras civiles, así como la determinación de las condiciones (meteorización, fractura) y competencia de la roca en donde se asentarán las estructuras; siendo muy útil también en la detección de fallas geológicas. En el caso de contextos urbanos la refracción resulta útil en



la obtención de perfiles de velocidades de onda P y S y para la extrapolación lateral de perforaciones puntuales de suelos (Rosales, 2001).

2.1.1. Conceptos Básicos de Sísmica de Refracción:

El método de refracción sísmica se basa en la medición del tiempo de viaje de las ondas refractadas críticamente en las interfaces entre las capas con diferentes propiedades físicas, fundamentalmente por contraste entre impedancias acústicas ($i = \rho.v$; en donde ρ es la densidad y v la velocidad de la capa). La energía sísmica se genera mediante un impacto controlado en superficie (o a una determinada profundidad) que va propagándose en forma de onda elástica a través del subsuelo interaccionando con las distintas capas, de manera que una parte de la energía se refleja y permanece en el mismo medio que la energía incidente, y el resto se transmite al otro medio con un fuerte cambio de la dirección de propagación debido al efecto de la interfase (refracción). De esta interacción, la sísmica de refracción sólo 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 (Figura 2.1).

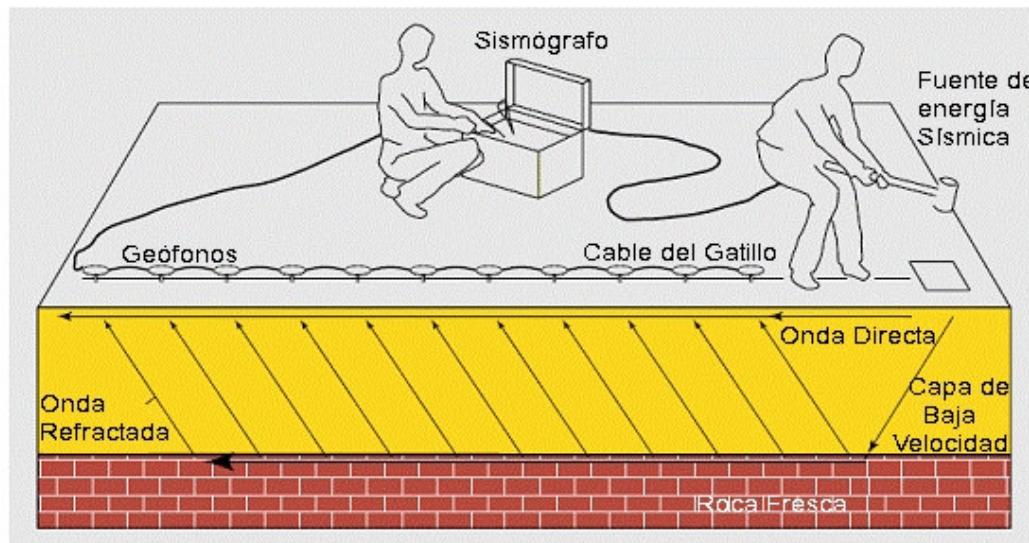


Figura 2.1: Esquema de adquisición de un perfil de refracción. (Modificado de Benson et al, 1983)



La distancia desde los receptores al punto de tiro y el arreglo de los receptores debe ser planeado considerando el objetivo del estudio, es decir, el diseño del dispositivo de adquisición depende de cuán profundo queremos llegar con los perfiles de refracción. Para estudios someros un tendido de refracción de unas decenas de metros es suficiente, en cambio para hacer refracción profunda se pueden tener perfiles de centenas de metros.

2.1.2. Ley de Refracción:

Como consecuencia del Principio de Huygens y/o del principio de Fermat, la Ley de refracción dice que el seno del ángulo incidente es al seno del ángulo de refracción como la velocidad de la onda incidente es a la velocidad de la correspondiente onda refractada.

$$\frac{\operatorname{Sen}(\theta_1)}{\operatorname{Sen}(\theta_2)} = \frac{v_1}{v_2} \quad (1)$$

Para explicar la trayectoria de las ondas en el método de la Refracción sísmica, consideremos un medio, con Velocidad v_1 , que suprayace un medio semi-infinito, con velocidad v_2 , mayor que v_1 (Figura 2.2). Una vez que se han generado las ondas en el punto de disparo, éstas empiezan a viajar por el medio superior conformando unos frentes de onda en el espacio.

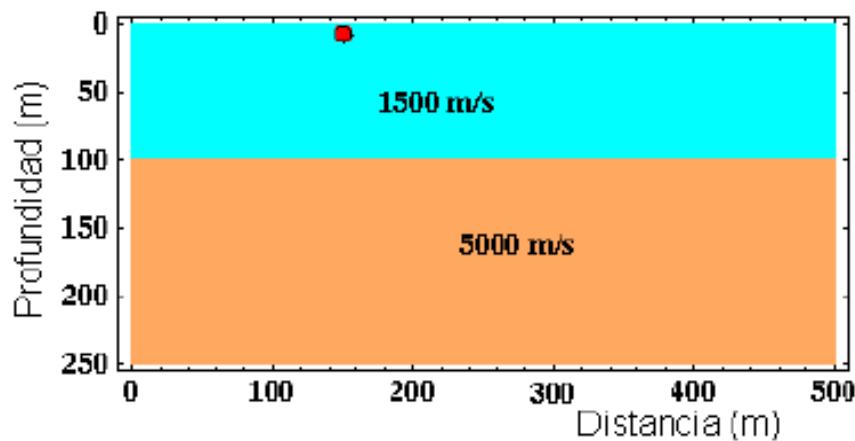


Figura 2.2: Modelo acústico de dos capas planas (Modificado de Boyd, 1999)



Al hacer un corte vertical en el punto del disparo el frente de onda luciría como se muestra en la parte (a) de la figura 2.3. En la parte (b), (c) y (d) de la misma se muestra la evolución en tiempo del frente de onda. El frente de onda refractado hacia el medio superior se genera cuando los rayos provenientes de la fuente alcanzan con ángulo crítico, θ_c , la interfaz entre los medios. La refracción a 90° del ángulo crítico, ilustrada en la Figura 2.3d, implica que las ondas no se propagan por la capa inferior, sino por el contacto entre ambas capas, es decir por la superficie de refracción, con la velocidad v_2 de la capa inferior, siguiendo la ley de los recorridos mínimos o Principio de Fermat (Boyd, 1999; Masuda, 1983 *en* Rosales, 2001).

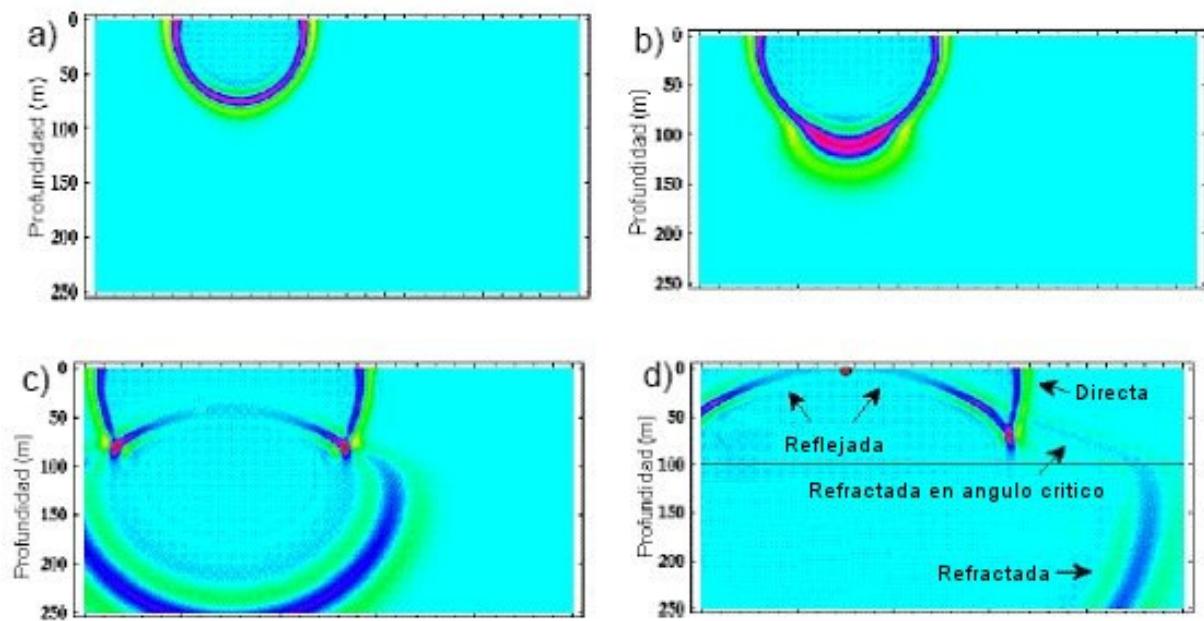


Figura 2.3: Propagación de las ondas en un medio acústico de 2 capas. (Modificado de Boyd, 1999)

2.1.3. Equipos de Medición:

Las componentes del equipo de medición de refracción sísmica son:

Fuente de generación de ondas:

Las ondas que se utilizan en refracción son generadas por una perturbación artificial instantánea, que se conoce como impulso sísmico. Lo que se busca con éste es generar el tipo de



ondas sísmicas (de volumen y superficiales), producidas por un único “evento” de duración “instantánea”, para que no haya superposición de ondas (de diferentes eventos) en los movimientos del terreno detectados por los geófonos. Para esto se buscan fuentes de generación que se puedan controlar en términos del tiempo de inicio y localización (Jakosky, 1950; Cantos, 1980 *en* Rosales, 2001)

Existen 3 tipos de fuentes para la generación de ondas:

Fuentes de impacto: Generalmente martillos o mandarrias. Como la energía transmitida al suelo por este tipo de fuente no es muy grande, se apilan varias decenas de golpes para modelar mejor las llegadas y suprimir el ruido. También se utilizan otros medios mecánicos, por ejemplo dejando caer un gran peso de una altura de 2 – 3 metros. La energía asociada con cada uno de los golpes depende la energía cinética (E) que relaciona la masa del martillo (m) y la velocidad

aplicada al martillo (V), obteniendo $E = \frac{1}{2}m * V^2$

Cargas explosivas: De mayor energía, son usadas especialmente para prospección petrolera. La explosión puede ocurrir en un tiempo de micro a milisegundos, dependiendo de la naturaleza y cantidad del explosivo y del material que rodea sitio de explosión.

Disparos: Se utilizan balas o cartuchos de fogeo disparados por rifles sísmicos. La energía es mayor que la generada por martillo.

Grabación:

A través de geófonos de una componente vertical, la energía producida por la fuente sísmica es detectada en diferentes puntos a lo largo del tendido de refracción sísmica. Actualmente se usan 12, 24 ó 48 geófonos dependiendo de la resolución espacial y la longitud del tendido. Éstos sensores exigen mayor resistencia mecánica que aquellos usados en la



sismología tradicional (Jakosky, 1950 *en* Rosales, 2001) debido a que en refracción se requiere geófonos con frecuencias naturales de vibración mucho mayores, entre 8 y 40 Hz.

Adquisición y almacenamiento.

Las partes que componen el equipo de adquisición y almacenamiento son:

Unidad de apilamiento y digitalización: Corresponde a la unidad donde se adquiere, digitaliza y procesan los datos. Tiene puertos especializados para recibir las señales enviadas por los geófonos; a cada geófono le corresponde un canal y sus señales son filtradas y digitalizadas de acuerdo con las opciones definidas por el usuario.

Cables sísmicos: Comúnmente se usan dos cables para conectar en cada uno la mitad de los geófonos. Cada cable contiene a su vez cableado para llevar la señal de cada geófono a la unidad de adquisición; a cada uno de estos se le llama canal.

Gatillo “Trigger”: Cable conectado apropiadamente a la fuente sísmica, de tal manera que en el instante en que se golpea el suelo con el martillo o cuando la carga explosiva es detonada, el sistema de registro empieza a grabar.

2.1.4. Interpretación de datos de Sísmica de Refracción:

Al interpretar datos de sísmica de refracción se busca crear un modelo de velocidades y espesores del subsuelo en su parte somera; para ello es necesario realizar una serie de procedimientos como la selección de las primeras llegadas, graficar las curvas camino-tiempo para cada perfil de refracción, realizar el cálculo de velocidades, espesores, profundidades, etc.

Selección de las primeras llegadas (Picking):

Este proceso es de mucha importancia, ya que a partir de esa selección se realizarán las gráficas camino tiempo que nos proveerán las ecuaciones a resolver para interpretar nuestro perfil de refracción.



La primera llegada en una traza sísmica se caracteriza por un aumento pronunciado en amplitud y luego una disminución de ésta, pero nunca menor que el nivel inicial. El cálculo de las primeras llegadas en un registro sísmico de refracción se hace generalmente de forma manual ya que visualmente no es complicado reconocerla en una traza sísmica si la calidad del registro es buena.

En la figura a continuación se muestra un registro sísmico de refracción con 12 trazas, señalando en cada una de ellas la primera llegada con el símbolo “”

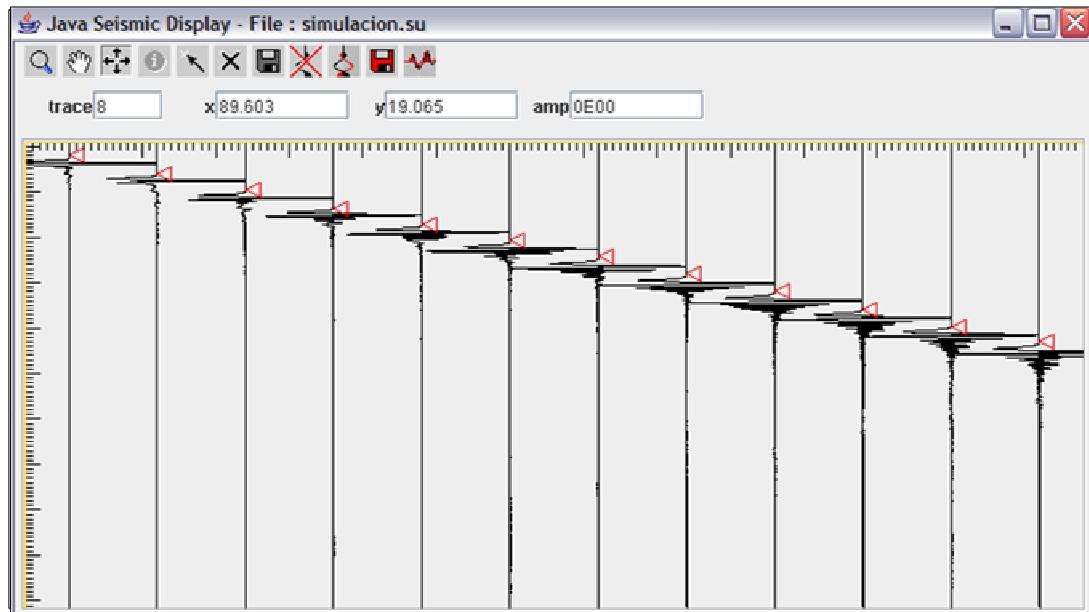


Figura 2.4: Primeras llegadas en un Registro de Sísmica de Refracción

Curvas Camino-Tiempo:

Las curvas camino-tiempo se construyen con los tiempos de las primeras llegadas de las ondas P (también se puede usar la llegada de la onda S) a cada uno de los geófonos, y la distancia de cada geófono al punto de disparo.



En la figura 2.5 se muestra la curva camino-tiempo para un disparo de refracción directo, en ésta se observa los tiempos de llegada de la onda directa y de la onda refractada y la distancia crítica.

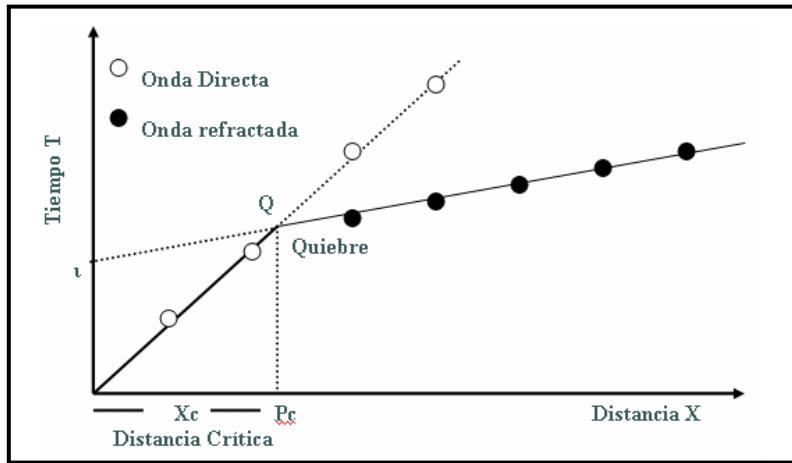


Figura 2.5: Curva Camino - Tiempo para un disparo directo de refracción.

Para tener información más detallada del subsuelo a analizar, se realizan tendidos de refracción conjugados, llamados tendido directo y reverso (Rosales, 2001). En el primero, el punto de disparo se ubica en un extremo del tendido a una distancia conocida, mientras que en el segundo el punto de disparo se ubica al otro extremo del tendido; la curva camino-tiempo de un tendido como éste se muestra en la figura 2.6.

Distancia crítica:

La distancia crítica x_c es aquella medida entre el punto del disparo y el punto donde llegan al mismo tiempo la primera onda refractada y la onda que viaja por la superficie (onda directa). Dependiendo de las velocidades de la capa superior y del refractor o capa inferior, así como de la profundidad a éste, la distancia crítica puede ser o no menor que la longitud del tendido en observación.

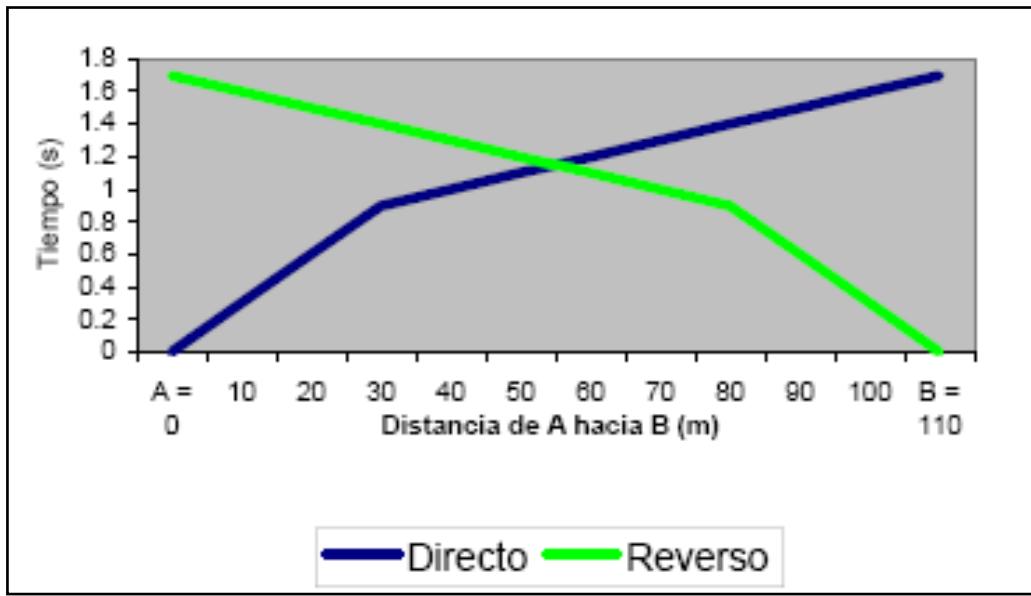


Figura 2.6: Grafica Camino-Tiempo para un perfil de refracción con disparos Directo y Reverso. (Tomado de Rosales, 2001)

La distancia crítica, la profundidad y las velocidades v_1 y v_2 están relacionadas por la siguiente ecuación:

$$Z_l = \frac{x_c}{2} \frac{\left(1 - \frac{v_1}{v_2}\right)}{\cos\left(\operatorname{sen}^{-1} \frac{v_1}{v_2}\right)} \quad (2)$$

donde Z_l es el espesor de la primera capa, x_c es la distancia crítica y v_1 y v_2 son las velocidades de la primera y segunda capa respectivamente. La figura 2.7 muestra la gráfica de la relación entre la distancia crítica y la profundidad de la primera capa (x_c/Z_l) en función del contraste de velocidades (v_2/v_1).

Una vez construidas las curvas camino-tiempo se procede a su interpretación. La tarea principal es identificar las secciones de las curvas que pertenecen a un mismo refractor. El conjunto de puntos que pertenecen a un refractor conforma lo que se conoce como **dromocrona** (Muños, 2003).

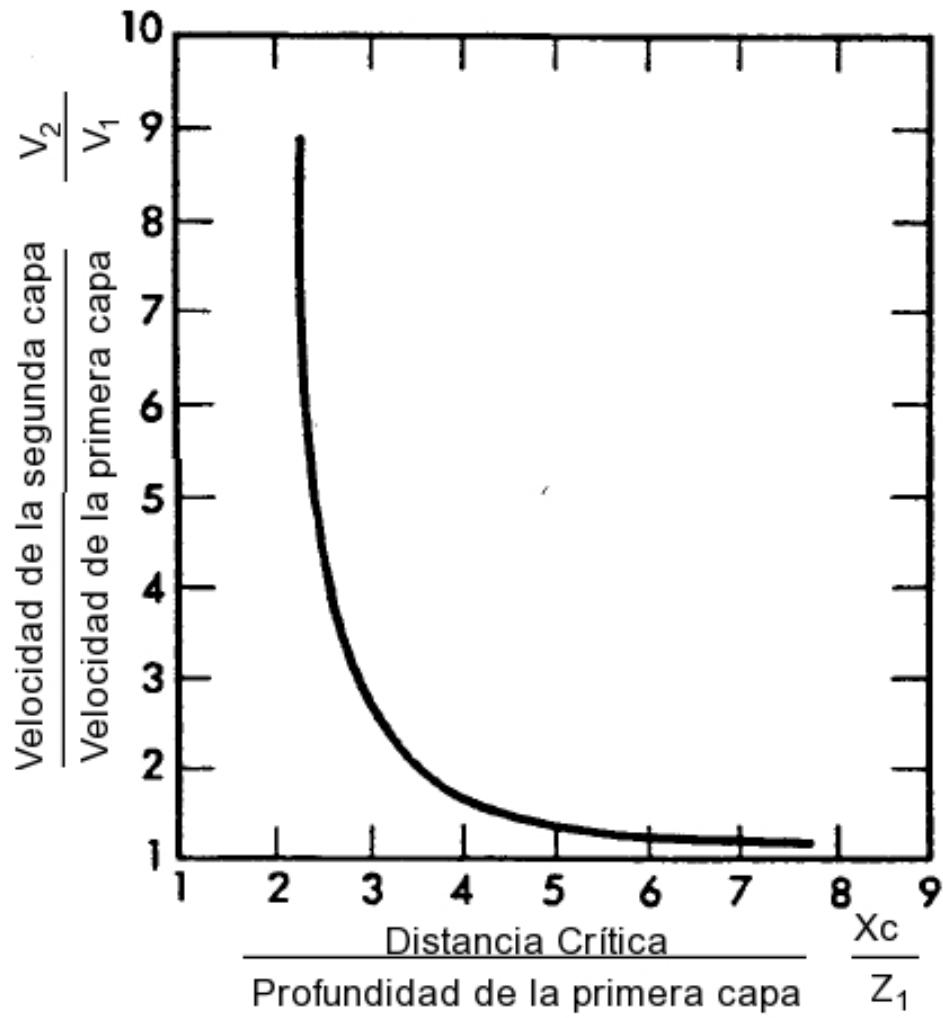


Figura 2.7: Relación entre la distancia crítica y la profundidad en función del contraste de velocidades.
(Modificado de Redpath, 1973)

Métodos para la interpretación de perfiles de refracción:

La interpretación de las curvas camino-tiempo y la resolución de las ecuaciones de velocidad y profundidad, se puede hacer de varias maneras; los métodos más comunes son:

- Tiempos de Intercepto.
- Velocidades Aparentes.
- Tiempos de Retardo.
- Trazado de Rayos, entre otros.



En general, estos métodos se diferencian por las suposiciones que implican y los modelos del subsuelo que estudian, así como por sus capacidades de aproximarse mejor a la topografía real de los refractores y al perfil de velocidades. (Cantos, 1973 *en* Rosales, 2001)

A continuación se describen brevemente cada uno de los métodos:

Tiempos de Intercepto: Las ondas originadas en el punto de disparo una vez refractadas en los contactos de los medios, determinan los tiempos de llegada de las ondas en los geófonos en superficie. Estos tiempos se incrementan con la distancia y la profundidad de penetración de las ondas. De la curva camino-tiempo, el método utiliza la pendiente de las dromocronas para calcular la velocidad de los refractores y los tiempos de intercepto de las dromocronas con el eje del tiempo para calcular las profundidades. Este método es usado para modelos de un refractor plano o múltiples refractores planos (Figura 2.8).

Velocidades Aparentes: La ley de las velocidades aparentes dice que la velocidad con que aparenta transmitirse una onda en un cierto punto de la superficie del suelo (V_a) es igual al cociente entre la velocidad superficial (V_0) y el seno del ángulo de emergencia ($\operatorname{sen}(\theta_0)$), tomados ambos en dicho punto, donde el ángulo de emergencia es aquel formado por la onda emergente con la superficie (Cantos, 1973 *en* Rosales, 2001).

$$V_a = \frac{V_0}{\operatorname{sen}(\theta_0)} \quad \text{con } V_a > V_0 \quad (3)$$

Este método se utiliza para identificar velocidades y profundidades en modelos con capas inclinadas paralelas, para ello se utilizan los tiempos de intercepto con el origen de un tendido directo y su reverso.

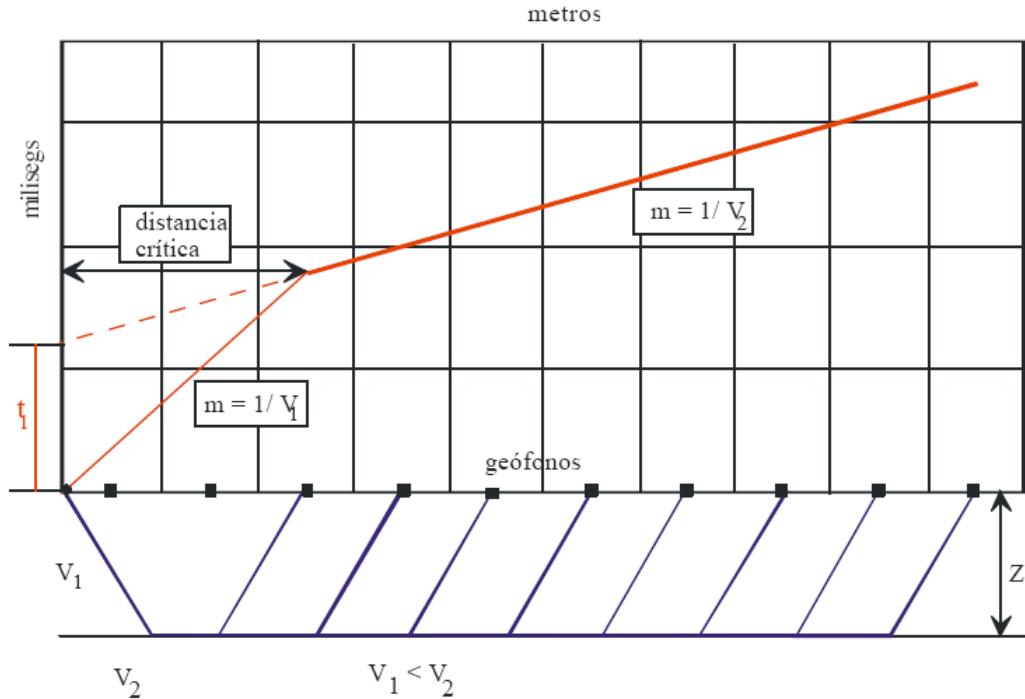


Figura 2.8: Curvas camino-tiempo, tiempo de intercepto, pendiente de las dromocronas.
(Tomado de Muños, 2003)

Tiempos de Retardo: Este es un método útil en el caso de refractores con topografías que no son muy accidentadas. Utiliza la definición del tiempo de retardo como la diferencia entre el tiempo que requiere la onda para recorrer la trayectoria entre el punto de disparo y el refractor, con el ángulo crítico dentro del medio superior y con su propia velocidad, v_1 , y el tiempo requerido por la misma onda para recorrer la proyección de esa misma trayectoria, pero con velocidad de refractor v_1 (Figura 2.9). A continuación se muestran las ecuaciones del tiempo de retraso para el detector (ΔT_D) (Redpath, 1973).

$$\Delta T_D = \frac{Z_D}{V_1 \cos \alpha} - \frac{Z_D \tan \alpha}{V_2} \quad (4)$$

Despejando la profundidad del detector de la ecuación (4) se tiene:



$$Z_D = \frac{\Delta T_D V_1}{\cos(\operatorname{sen}^{-1} V_1 / V_2)} \quad (5)$$

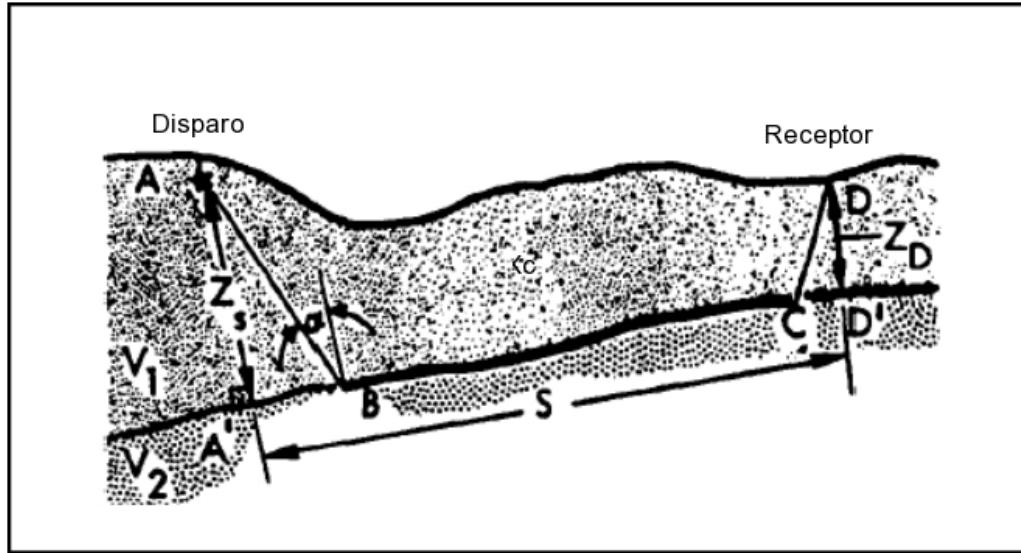


Figura 2.9: Definición de Tiempo de Retardo para el receptor, $\Delta T_R = CD/V_1 - CD'/V_2$.
(Tomado de Redpath, 1973.)

Trazado de Rayos: Es el método más implementado en los programas especializados de computación. Éste es un método interactivo e iterativo que debe partir de un modelo de capas, velocidades y profundidades determinadas, calculadas a partir de algunos de los métodos mencionados anteriormente (por ejemplo tiempo de retardo) para empezar a calcular diferentes modelos a partir del trazado de rayos sísmicos desde los puntos de disparo (Rosales, 2001).

2.2. LÓGICA DIFUSA

La *lógica difusa* ha cobrado importancia en los últimos años por la variedad de sus aplicaciones, las cuales van desde el control de complejos procesos industriales, hasta el diseño de dispositivos artificiales de deducción automática, pasando por la construcción de artefactos



electrónicos de uso doméstico y de entretenimiento, así como también sistemas de diagnóstico (López, 2005).

Aunque la lógica clásica ha modelado satisfactoriamente una gran parte del razonamiento ``natural'', es cierto que el razonamiento humano utiliza valores de verdad que no necesariamente son ``deterministas''. Por ejemplo, al calificar que ``el cielo es azul'' uno está tentado a graduar qué tan ``azul'', en efecto, es el cielo, e igualmente, si ``un vehículo se mueve rápido'', también se está obligado a considerar qué tan rápido es el vehículo, aunque esto último no implique necesariamente cuantificar la velocidad del vehículo con toda precisión.

La lógica difusa trata de crear aproximaciones matemáticas en la resolución de ciertos tipos de problemas, pretende producir resultados exactos a partir de datos imprecisos, por lo cual es particularmente útil en aplicaciones electrónicas o computacionales; también permite representar el conocimiento común, que es en su mayoría del tipo lingüístico cualitativo, en un lenguaje matemático a través de la teoría de conjuntos difusos y funciones características asociadas a ellos, por lo cual el aspecto central de los sistemas basados en la teoría de la lógica difusa es que (a diferencia de los basados en la lógica clásica) tienen la capacidad de reproducir de manera aceptable los modos usuales de razonamiento, considerando que la certeza de una proposición es cuestión de grado (Pérez, 2005).

Así pues, las características más atractivas de la lógica difusa son su flexibilidad, su tolerancia con la imprecisión, su capacidad para modelar problemas no lineales y su base en el lenguaje natural.

La lógica difusa (Fuzzy Logic) descansa en la idea de que en un instante dado, no es posible precisar el valor de una variable X , sino tan solo conocer el grado de pertenencia de cada



uno de los conjuntos en que se ha particionado el rango de variación de la variable (Figura 2.10).

El grado de pertenencia se cuantifica mediante la función de pertenencia $\mu(x)$. (López, 2005)

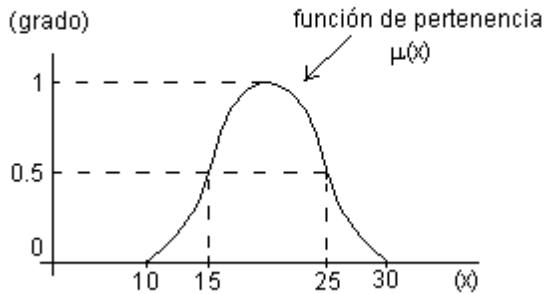


Figura 2.10: Representación de una función de pertenencia (Modificado de Finol et al., 2001)

2.2.1. Historia y Antecedentes:

La lógica difusa tiene su origen en la Universidad de California, donde en 1965 el Dr. Lofti A. Zadeh publicó su artículo “Conjuntos Difusos” (Fuzzy Sets); en este trabajo describió a través de la teoría matemática de conjuntos, cómo poder trabajar matemáticamente con expresiones imprecisas, tal como lo hacen los seres humanos (Drakos, 1997). Bajo este pensamiento, introdujo la idea de que los elementos sobre los que se construye el pensamiento humano no son números sino etiquetas lingüísticas.

Aunque la lógica difusa es conocida así desde que Zadeh la bautizó en 1965 sus orígenes se remontan hasta 2500 años atrás. Los filósofos griegos, Aristóteles entre ellos, consideraban que existían ciertos grados de veracidad y falsedad, pero fue Platón quien creó las bases de lo que luego sería denominado lógica difusa, indicando que existía una tercera región, más allá de Verdadero y Falso donde estos conceptos se cruzaban.

Fueron los aportes de pensadores de diversas disciplinas, como la paradoja del conjunto de Bertrand Russell, el principio de incertidumbre de la física cuántica de W. Heisenberg, la teoría de los conjuntos vagos de Max Black, además de la contribución fundamental del polaco J.



Lukasiewicz, creador de la lógica multivaluada, los que influyeron para que Zadeh publicase su famoso ensayo “Fuzzy Sets” en 1965 y más tarde “Fuzzy Algorithm” en 1968 (Pérez, 2005).

A principio de la década de los 70 se establecen varios grupos de investigación en lógica difusa en algunas pequeñas universidades japonesas, los profesores Terano y Shibata en Tokio y los profesores Tanaka y Asai en Osaka. En 1974, el Británico Ebrahim H. Mamdani, demuestra la aplicabilidad de la lógica difusa en el campo del control. Desarrolla el primer sistema de control difuso práctico, la regulación de un motor de vapor. Las aplicaciones de la lógica difusa en el control no pudieron ser implementadas con anterioridad a estos años debido a la poca capacidad de cómputo de los procesadores de esa época (Gómez, 2004).

Paralelamente al desarrollo de las aplicaciones de la lógica difusa, en los años 80, investigadores teóricos como Takagi y Sujeno trabajan en la primera aproximación para construir reglas difusas a partir de datos de entrenamiento, y aunque en el principio no tiene mucha repercusión, más tarde será el punto de partida para investigar la identificación de modelos difusos (Pérez, 2005).

En la década de los 90, además de las redes neuronales y los sistemas difusos, aparecen los algoritmos genéticos; estas tres técnicas computacionales pueden combinarse de múltiples maneras y se pueden considerar complementarias, lo que las convierte en herramientas de trabajo muy potentes en el campo de los sistemas de control.

Hoy en día el control difuso ha sido aplicado con éxito en muchas ramas tecnológicas, por ejemplo en la metalurgia, robots para la fabricación, controles de maniobras de aviones, lavadoras, acondicionadores de aire, sistema de frenado para automóviles, etc.



2.2.2. Conjuntos Difusos:

Se le denomina conjunto a una porción del universo que cumple con una serie de características específicas, es decir, un *conjunto* en el universo es, desde un punto de vista intuitivo, una colección de objetos en el discurso tal que es posible decidir cuándo un objeto del universo está o no en esa colección. Se puede considerar que un conjunto es exactamente una función del universo en el conjunto de valores $0,1$ que asocia precisamente el valor 1 a los objetos que estén en el conjunto y el valor 0 a los que no (Drakos, 1997).

Un *conjunto difuso* es una función que asocia a cada objeto del universo un valor en el intervalo $[0,1]$. Si x es un objeto en el universo y $y=C(x)$ es el valor asociado a x , se dice que y es el *grado de pertenencia* del objeto x al conjunto difuso C . Mientras más cercano al 1 es el valor asociado a x , entonces mayor es la pertenencia (Zadeh, 1965).

Uno de los primeros ejemplos utilizados por Zadeh para ilustrar los conjuntos difusos, fue el conjunto de los “hombres altos”. Dándole un enfoque con la lógica clásica se puede decir que los hombres que miden más de 1,80 m pertenecerían al grupo de los “hombres altos” ¿pero qué hay de los que miden 1,79 m? Zadeh no concebía la idea de que un hombre con 1,81 m de estatura estuviese dentro del conjunto, pero uno con 1,79 m de estatura no fuese miembro de ese conjunto por escasos 2 cm.

El enfoque de la lógica difusa considera que el conjunto de los “hombres altos” es tal que no tiene una frontera clara para pertenecer o no pertenecer a él ya que mediante una función que define la transición de “alto” a “no alto” se asigna a cada valor de altura un grado de pertenencia al conjunto entre 0 y 1. Así por ejemplo una persona con estatura de 1,79 m podría pertenecer al conjunto difuso de los “hombres altos” con un grado 0,8 de pertenencia, mientras que uno que mida 1,85 de estatura pertenecería con un grado menor; de esta manera, a medida que la estatura



disminuye, así también disminuye el grado de pertenencia hasta el punto de no pertenecer al conjunto difuso de los “hombres altos” (Figura 2.11).

Así pues, los conjuntos difusos pueden ser considerados como una generalización de los conjuntos clásicos; la teoría clásica de conjuntos sólo contempla la pertenencia o no pertenencia de un elemento a un conjunto, sin embargo la teoría de conjuntos difusos contempla la pertenencia parcial de un elemento a un conjunto, es decir, cada elemento presenta un grado de pertenencia a un conjunto difuso que puede tomar cualquier valor entre 0 y 1 (Pérez, 2005).



Figura 2.11: Lógica clásica versus lógica difusa (Tomado de Pérez, 2005)

2.2.3. Funciones de Pertenencia:

Cada elemento del universo es miembro en alguna medida del conjunto difuso; la función que asigna a cada elemento del universo un valor de pertenencia a dicho conjunto se denomina *función de pertenencia o membresia* $\mu(x)$. Formalmente, un conjunto clásico A, en un universo U, se puede definir de varias formas, enumerando los elementos que pertenecen al conjunto, especificando las propiedades que deben cumplir los elementos que pertenecen a ese conjunto o, en términos de la función de pertenencia $\mu_A(x)$:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in A \\ 0 & \text{si } x \notin A \end{cases} \quad (1)$$



Podemos además decir que el conjunto A es matemáticamente equivalente a su función de pertenencia característica $\mu_A(x)$, ya que conocer $\mu_A(x)$ es lo mismo que conocer A. Un conjunto difuso en el universo U se caracteriza por una función de pertenencia $\mu_A(x)$ que tomas valores en el intervalo [0,1] y puede representarse como un conjunto de pares ordenados de un elemento x y su de pertenencia al conjunto:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in U\} \quad (2)$$

La función de pertenencia $\mu_A(x)$ proporciona una medida del grado de similitud de un elemento de U con el conjunto difuso. La forma de la función de pertenencia utilizada depende del criterio aplicado en la resolución de cada problema y variará dependiendo de la posición geográfica, época o punto de vista del usuario. La única condición que debe cumplir una función de pertenencia es que tome valores entre 0 y 1, con continuidad. Las funciones de pertenencia más utilizadas por su simplicidad matemática y por su manejabilidad son: triangular, trapezoidal, gaussiana, sigmoidal, etc (figura 2.12).

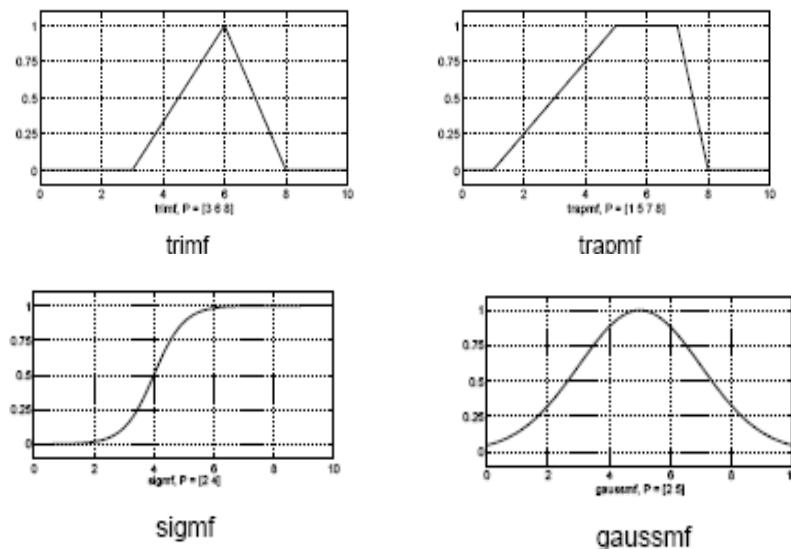


Figura 2.12: Tipos de funciones de pertenencia (Tomado de Fuzzy Logic Toolbox, The Mathworks Inc, 2000)



El número de funciones de pertenencia asignadas a cada variable depende del intérprete: mientras mayor sea el número de funciones de pertenencia, mayor será la resolución, pero también será mayor la complejidad computacional. Además estas funciones pueden estar solapadas o no; dicho solapamiento pone de manifiesto un hecho clave de la lógica difusa: una variable puede pertenecer con diferentes grados a varios conjuntos difusos a la vez, es decir, "el vaso puede estar medio lleno y medio vacío a la vez".

2.2.4. Variables Lingüísticas:

Como en las variables algebraicas se utilizan números para establecer valores, así también se pueden utilizar palabras o frase para designar valores (Zadeh in Zimmermann, 1991).

Una variable lingüística, como su nombre lo indica, es una variable cuyos valores son palabras u oraciones en lenguaje natural o sintético. Por ejemplo, la edad es una variable lingüística si sus valores lingüísticos son joven, viejo, muy viejo, no muy joven, etc. De manera general las variables lingüísticas pueden ser vistas como un microlenguaje de *gramática de contexto libre* y de *semántica de gramática atribuida*.

La gramática de contexto libre define el valor legal de una variable, por ejemplo para el caso de la *edad*, los valores legales son joven, no muy joven, viejo, muy viejo, etc. Por otro lado la semántica de gramática atribuida proporciona un mecanismo para calcular la función de pertenencia para cualquier valor de la variable, por ejemplo el significado de *no muy joven* puede ser calculado como:

$$\mu_{\text{nomujoven}}(x) = 1 - (\mu_{\text{joven}}(x))^2 \quad (3)$$

donde *muy* toma el rol de un intensificador y *joven* es el término primario cuya función de pertenencia está especificada (Zadeh, 1994).



Una variable lingüística admite que sus valores sean etiquetas lingüísticas, que son términos lingüísticos definidos como conjuntos difusos (sobre cierto dominio subyacente). Sus valores son palabras o sentencias que van a enmarcarse en un lenguaje predeterminado. Ejemplo: Temperatura “Cálida”, o “aproximadamente 25°C”. (Wakefield et al., 2001).

Un valor concreto, como 25°C, es, en general, más específico que una etiqueta lingüística, ya que es un punto del conjunto, mientras que una etiqueta lingüística es una colección de puntos (temperaturas posibles) (ver figura 2.13).

Hay variables cuya definición es más compleja porque se mueven en dominios subyacentes poco claros y no es natural trasladarlos a valores numéricos: limpieza, sabiduría, verdor, etc. (Galindo, 1998).

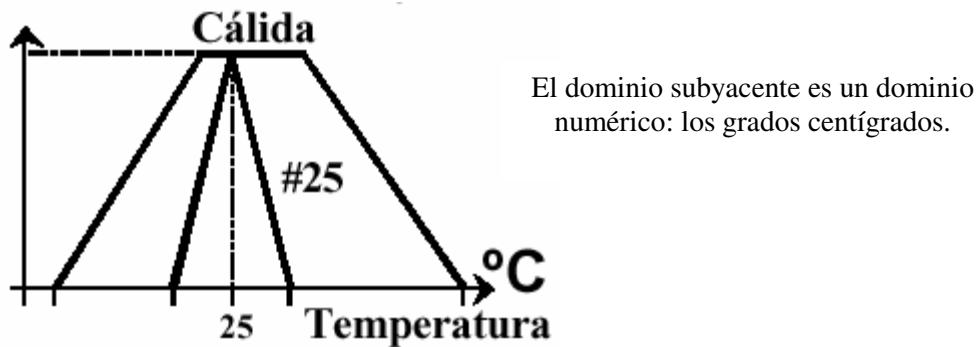


Figura 2.13: Ejemplo de variables lingüísticas (Tomado de Galindo, 1998)

La idea básica sugerida por Zadeh es que una etiqueta lingüística tal como "muy", "más o menos", "ligeramente", etc., puede considerarse como un operador que actúa sobre un conjunto difuso asociado al significado de su operando. También considera que las etiquetas lingüísticas pueden clasificarse en dos categorías que informalmente se definen como sigue:

- **Tipo I:** Las que pueden representarse como operadores que actúan en un conjunto difuso: “muy”, “más o menos”, “mucho”, “ligeramente”, “altamente”, “bastante”, etc.



- **Tipo II:** Las que requieren una descripción de cómo actúan en los componentes del conjunto difuso (operando): “esencialmente”, “técticamente”, “estictamente”, “prácticamente”, “virtualmente”, etc.

En otras palabras, las etiquetas lingüísticas pueden ser caracterizadas como operadores más que construcciones complicadas sobre las operaciones primitivas de conjuntos difusos (López, 2005).

2.2.5. Operaciones con Conjuntos Difusos:

Las operaciones básicas entre conjuntos difusos son las siguientes:

El conjunto complementario de \bar{A} de un conjunto difuso A es aquel cuya función característica viene definida por:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (4)$$

La unión de dos conjuntos difusos A y B es un conjunto difuso $A \cup B$ en U cuya función de pertenencia es:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (5)$$

La intersección de dos conjuntos difusos A y B es un conjunto difuso $A \cap B$ en U cuya función de pertenencia es:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (6)$$

Estas tres operaciones definidas para conjuntos difusos cumplen, al igual que en la teoría clásica de conjuntos, asociatividad, conmutatividad y distributividad así como las leyes de Morgan (Pérez, 2005)

Sin embargo también hay que destacar que existen dos leyes fundamentales de la teoría clásica de conjuntos como lo son el Principio de contradicción: $A \cup \bar{A} = U$, y el Principio de



exclusión: $A \cap \bar{A} = \Phi$ que no se cumplen en la teoría de conjuntos difusos; de hecho una manera de explicar en qué se diferencian la teoría clásica de conjuntos y la teoría difusa es demostrando que estos dos principios en términos de lógica difusa no se cumplen. En consecuencia, algunas de las teorías derivadas de la teoría de conjuntos, como la probabilidad, sería muy distinta planteada en términos difusos.

Las funciones que definen la unión y la intersección de conjuntos difusos pueden generalizarse, a condición de cumplir ciertas restricciones. Las funciones que cumplen estas restricciones se conocen como Conorma Triangular (T-Conorma) y Norma Triangular (T-Norma). En la mayoría de las aplicaciones a la ingeniería de la lógica difusa se usan como t-conorma el operador máximo y como t-norma los operadores mínimo y producto (Pérez, 2005)

2.2.6. Relaciones Difusas

Una relación difusa representa el grado de presencia o ausencia de asociación, interacción o interconexión entre elementos de dos o más conjuntos difusos, por ejemplo: “ x es mayor que y ”. Supongamos U y V dos universos del discurso; la relación difusa $R(U,V)$ es un conjunto difuso en el espacio producto $U \times V$ que se caracteriza por la función de pertenencia $\mu_R(x,y)$ donde x pertenece a U e y pertenece a V , es decir,

$$R(U,V) = \{(x,y), \mu_R(x,y) | (x,y) \in U \times V\} \quad (7)$$

en el caso de las relaciones difusas $\mu_R(x,y) \in [0,1]$ y en el caso de las relaciones clásicas $\mu_R(x,y) = 0$ ó 1 .

Como las relaciones difusas son en sí mismas un conjunto difuso en el espacio producto, las operaciones entre conjuntos y los operadores definidos anteriormente también pueden ser aplicadas a ellas. Supongamos $R(x,y)$ y $S(x,y)$ dos relaciones en el mismo espacio producto $U \times V$.



La intersección o unión entre R y S, que son composiciones entre las dos relaciones, se define como:

$$\mu_{R \cap S}(x, y) = \mu_R(x, y) * \mu_S(x, y) \quad (8)$$

$$\mu_{R \cup S}(x, y) = \mu_R(x, y) \oplus \mu_S(x, y) \quad (9)$$

donde * es cualquier t-norma y \oplus es cualquier t-conorma.

Si consideramos las relaciones difusas R y S que pertenecen a diferentes espacios producto $R(U, V)$ y $S(V, W)$, por ejemplo “x es mayor que y” y “y es cercano a z”, su composición difusa se define de forma análoga a la composición clásica teniendo en cuenta que en el caso difuso la relación difusa R tiene asociada una función característica $\mu_R(x, y)$ que toma valores en el intervalo [0,1] y la relación difusa S también tiene asociada una función característica $\mu_S(x, y)$ que de igual forma toma valores entre [0,1]. Entonces la composición difusa entre R y S, es decir, $R \circ S$, cuando R y S pertenecen a universos discretos del discurso, se define como una relación difusa en $U \times W$ cuya función de pertenencia viene dada por:

$$\mu_{R \circ S}(x, z) = \sup[\mu_R(x, y) * \mu_S(y, z)] \quad (10)$$

donde el operador *sup* es el máximo y el operador * puede ser cualquier t-norma (Pérez, 2005)

2.2.7. Reglas Difusas:

El comportamiento de cualquier sistema difuso está regido por reglas difusas. Estas reglas son un modo de representar estrategias o técnicas apropiadas cuando el conocimiento proviene de la experiencia o la intuición (careciendo de demostración matemática o física), es decir, las reglas utilizan variables lingüísticas como vocabulario (López, 2005)

Una regla difusa base es un conjunto de reglas SI-ENTONCES que pueden ser expresadas de la siguiente forma:



$$R^m = \text{Si } u_1 \text{ es } A_1^m \text{ y } u_2 \text{ es } A_2^m \text{ y } \dots u_p \text{ es } A_p^m; \text{ Entonces } v \text{ es } B^m; \quad \text{con } m=1,2,\dots,M$$

donde A_i^m y B^m son conjuntos difusos en $U_i \subset \mathbb{R}$ (números reales) y $V \subset \mathbb{R}$ respectivamente, $u=(u_1,u_2,\dots,u_n) \in U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n$ y $v \in V$, y $x=x_1,x_2,\dots,x_n \in U$ e $y \in V$ son los valores numéricos concretos de u y v , también respectivamente.(Pérez, 2005)

Vemos que esta regla tiene además la particularidad que es una regla multi-antecedente; este tipo de reglas, que combina varias variables en el antecedente, es el más utilizado en el diseño de sistemas difusos.

Existen dos caminos para obtener el conjunto de reglas correspondiente a un conjunto de datos numéricos:

1. Dejar que los datos establezcan los conjuntos difusos que aparecen en los antecedentes y consecuentes.
2. Predefinir los conjuntos difusos para antecedentes y consecuentes y luego asociar los datos a esos conjuntos.

2.2.8. Sistemas de Inferencia Difusa:

Los sistemas de inferencia difusa, FIS, se basan en un conjunto de reglas heurísticas donde las variables lingüísticas de las entradas y salidas se representan por medio de conjuntos difusos (Sáez, 2002). Se conoce como inferencia difusa, el proceso mediante el cual se representa a partir de una entrada, una salida, utilizando lógica difusa (Finol *et al.* 2001). Esta representación provee, entonces, la base sobre la que se pueden tomar decisiones o discernir patrones. Los sistemas de inferencia difusa han sido aplicados exitosamente en diversos campos como control automático, clasificación de datos, análisis de decisiones, etc. (Jang y Gulley, 1995).



Debido a su naturaleza multidisciplinaria, los sistemas de inferencia difusa son asociados con una gran variedad de nombres, tales como sistemas difusos expertos, modelado difuso, memoria difusa asociativa, controladores lógicos difusos, entre otros.



Figura 2.14: Esquema general de un sistema basado en lógica difusa (Tomado de Pérez, 2005)

Los sistemas difusos están compuestos generalmente como muestra la figura 2.14, y se pueden describir cada una de sus componentes de la siguiente manera:

Bloque difusor: en este bloque a cada variable de entrada se le asigna un grado de pertenencia a cada uno de los conjuntos difusos que se ha considerado, mediante las funciones características asociadas a estos conjuntos difusos. Las entradas a este bloque son valores concretos de las variables de entrada y las salidas son grados de pertenencia a los conjuntos difusos considerados.

Bloque de inferencia: bloque que, mediante los mecanismos de inferencia, relaciona conjuntos difusos de entrada y de salida y que representa a las reglas que definen el sistema. Las entradas a este bloque son conjuntos difusos (grados de pertenencia) y las salidas son también conjuntos difusos, asociados a la variable de salida.

Desdifusor: bloque en el cual a partir del conjunto obtenido en el mecanismo de inferencia y mediante los métodos matemáticos de desdiferenciación, se obtiene un valor concreto de la variable de salida.

El bloque desdifusor realiza la función contraria al difusor. El difusor tiene como entradas valores concretos de las variables de entrada y como salidas grados de pertenencia a



conjuntos difusos (entre 0 y 1). La entrada al bloque desdifusor es el conjunto difuso de salida, resultado del bloque de inferencia y la salida es un valor concreto de la variable de salida. Para obtener, a partir del conjunto difuso de salida (que resulta de la agregación de todas las reglas) un resultado escalar, se aplican métodos matemáticos (Pérez, 2005). Algunos de estos métodos matemáticos se presentan a continuación:

Método del Máximo: se elige como valor para la variable de salida aquel para el cual la función de pertenencia del conjunto difuso es máxima. En general no es un método óptimo, ya que éste valor máximo puede ser alcanzado por varias salidas.

Método del Centroide: utiliza como salida del sistema el centro de gravedad de la función característica de salida, matemáticamente:

$$\bar{y} = \left(\int y \mu_B(y) dy \right) / \left(\int \mu_B(y) dy \right) \quad (11)$$

Es el método más utilizado en aplicaciones de la lógica difusa a la ingeniería ya que se obtiene una solución única, aunque algunas veces es difícil de calcular.

Método de la Altura: se calcula para cada regla el centro de gravedad del conjunto difuso de salida B_m y después se calcula la salida del sistema como la media ponderada.

$$y_h = \left(\int \bar{y}_m \mu_{B_m}(\bar{y}_m) dy \right) / \left(\int \mu_{B_m}(\bar{y}_m) dy \right) \quad (12)$$

2.2.9. *Modelo difuso de Takagi-Sugeno:*

El modelo de Takagi-Sugeno, se ha convertido en un método de razonamiento lógico muy conocido y utilizado, debido a sus numerosas aplicaciones en sistemas difusos, controles difusos y en ingeniería difusa en general (Mastorakis, 2000). La mayor ventaja del modelo Takagi-Sugeno, es que es un modelo simple y puede ser utilizado en muchas aplicaciones prácticas para el modelado y control de sistemas complejos.

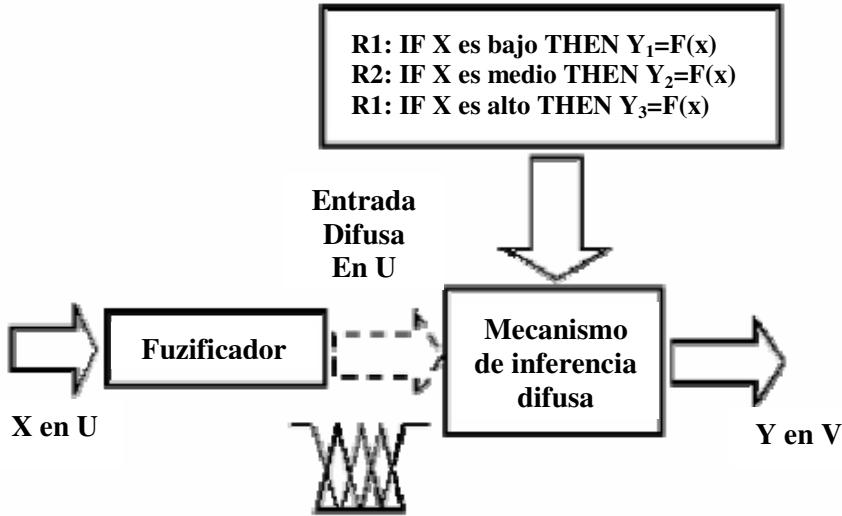


Figura 2.15: Procesamiento general sistema difuso Takagi-Sugeno (Tomado de Gómez, 2004)

Este modelo se caracteriza por relaciones basadas en reglas difusas, donde las premisas de cada regla representan subespacios difusos y las consecuencias son una relación lineal de entrada-salida (Takagi y Sugeno, 1995). Las variables de entrada en las premisas de cada regla son relacionadas por operadores "y", y la variable de salida es función de las variables de estado, en general, una función lineal (figura 2.15).

Las reglas de la base de conocimiento de un sistema Sugeno es diferente a las de los sistemas Mamdani pues el consecuente de estas reglas ya no es una etiqueta lingüística sino que es una *función de la entrada* que tenga el sistema en un momento dado, esto se ilustra a continuación:

IF La entrada es Baja THEN la Salida = F (Entrada)

En los sistemas difusos tipo Sugeno, los valores que arrojan los consecuentes de las diferentes reglas que se han activado en un momento determinado ya son valores numéricos, por



lo que no se necesita una etapa de defuzzificación. En la figura 2.16 se presenta el modelo de Takagi-Sugeno de dos reglas difusas, con dos variables de entrada y una de salida.

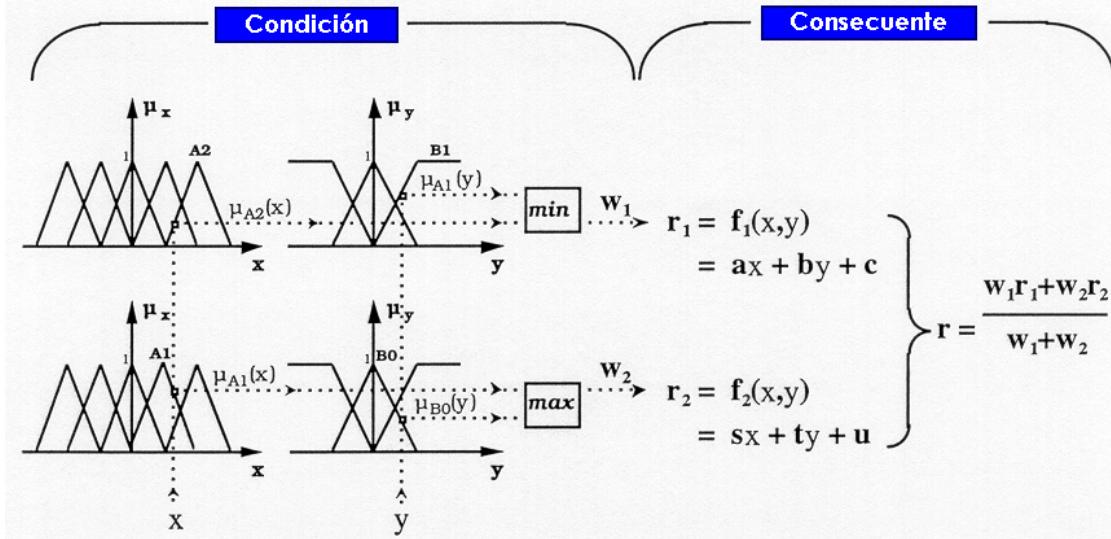


Figura 2.16: Modelo Takagi-Sugeno (Tomado de Takagi, 1983)

Debido a la dependencia lineal de cada regla en el sistema de variables de entrada, este modelo es ideal para actuar como supervisor interpolador de múltiples controladores lineales, que aplican en diferentes condiciones de operaciones de un sistema dinámico no lineal.

2.3. TOMOGRAFÍA SÍSMICA Y JATS

La mayoría de los problemas relacionados con geofísica ambiental, ingeniería civil, geotecnia, entre otros, requieren del estudio y entendimiento de las estructuras y comportamiento del subsuelo. Actualmente, gracias al desarrollo de la computación, se pueden manejar gran cantidad de datos sísmicos, así como aumentar la velocidad y capacidad de cómputo, lo que consecuentemente se refleja en el surgimiento de la tomografía sísmica como herramienta para el análisis de velocidades y espesores en estudios de refracción (Grandjean y Sage, 2004).

Los métodos tomográficos son un conjunto de técnicas cuyo objetivo consiste en construir una imagen de un medio a partir de datos que provienen de integrales de línea del



parámetro físico que se utiliza para construir la imagen. La tomografía sísmica es un problema no lineal cuya solución puede ser aproximada de manera iterativa, cambiando el modelo inicial donde se propagan las ondas sísmicas hasta que los tiempos de viaje observados se ajusten a los calculados (Grandjean y Sage, 2004)

La tomografía por tiempos de transito utiliza los tiempos de viaje fuente-receptor de una perturbación acústica para construir la imagen de un medio en términos de las heterogeneidades en la velocidad de propagación de las ondas elásticas. En las aplicaciones geofísicas, el medio está constituido por las rocas del subsuelo y las fuentes de energía pueden ser naturales (terremotos como es el caso de la sismología) o artificiales (Albano, 1996).

2.3.1. JaTS (*Java Tomography Software*)

JaTS es un software diseñado por Gilles Grandjean y Sandrine Sage de la Universidad de Liège, en Bélgica. Es una aplicación que trabaja bajo la plataforma JAVA y que contiene varios módulos, los cuales abarcan todo el proceso tomográfico y permite realizar varios procesos tales como: cargar los datos sísmicos en formato “su” (seismic unix), crear de un modelo previo de velocidades, hacer la escogencia de las primeras llegadas (picking) hasta realizar el proceso de tomografía propiamente dicho, mediante la inversión del campo de velocidades.

JaTS está basado en dos algoritmos que respectivamente trabajan para el cálculo de los tiempos de viaje y la reconstrucción del modelo de velocidades. El primero usa como herramienta el volumen de Fresnel para determinar el camino de las ondas (Husen y Kissling, 2001). La reconstrucción del modelo de velocidades esta basada en una Técnica de Reconstrucción Simultanea Iterativa (SIRT) originalmente descrita por Dines y Lytle (1979).



Cálculo de los tiempos de viaje:

JaTS utiliza un FMM (Fast Marching Method) de segundo orden propuesto por Sethian y Popovici (1999) para resolver la siguiente ecuación Eikonal:

$$|\nabla t(x, z)| = s(x, z), \quad (1)$$

donde t es el campo de los tiempos de viaje y s es la función de lentitud. Aplicando la aproximación de Sethian y Popovici al gradiente, el cálculo de los tiempos de viaje en (1) requiere la solución de la ecuación:

$$\max(D_{ij}^{-x}t, 0)^2 + \min(D_{ij}^{+x}t, 0)^2 + \max(D_{ij}^{-z}t, 0)^2 + \min(D_{ij}^{+z}t, 0)^2 = s_{ij}^2 \quad (2)$$

donde $D_{ij}^{-x}t$ puede ser expresado como un operador diferencia invertido en x ($t_{i-1,j} - t_{ij} / \Delta x$) en la celda (i, j) y S_{ij} es la lentitud en la celda (i, j). Numéricamente, este esquema consiste en la búsqueda sucesiva de los puntos del mallado en los cuales el frente de onda se ha de propagar empezando en la fuente; luego se calculan los tiempos de viaje en puntos cercanos a ésta donde cada uno actúa como una nueva fuente y así sucesivamente hasta cubrir la totalidad del mallado. Este procedimiento puede ser entendido como otra expresión del principio de Huygen (Grandjean y Sage, 2004)

El volumen de Fresnel:

Cerveny y Soares (1992) usaron la “teoría de rayo paraxial” para definir el volumen de Fresnel. En un medio se define el volumen de Fresnel entre la fuente y el receptor como el conjunto de puntos \mathbf{P} , donde las ondas están retrasadas menos de la mitad del período después del tiempo de viaje más corto t_{SR} . Esas ondas pueden así ser sumadas constructivamente para formar la primera llegada de la onda. Esta aproximación considera la frecuencia de la onda en el análisis, permitiendo así la evaluación de la resolución y reduciendo la dispersión del rayo.



Usando esta aproximación Watanabe et al. (1999) propusieron un algoritmo para calcular el volumen de Fresnel.

1. Calcular los tiempos de viaje de la fuente al receptor en cada punto **P** de la grilla ($t_{SPR} = t_{SP} + t_{RP}$)
2. Estimar para cada punto **P** de la grilla la diferencia Δt entre t_{SPR} y t_{SR} , siendo t_{SR} el tiempo de viaje más corto (Harlan, 1990)
3. Probar para cada punto **P** de la grilla si Δt es menor que la mitad del período

$$\Delta t = t_{SP} + t_{RP} - t_{SR} < \frac{1}{2f}, \quad (3)$$

donde f es la frecuencia de la onda que se propaga. Watanabe et al. (1999) también propuso una definición numérica del volumen de Fresnel, caracterizada por una función de pesos ω la cual depende directamente de Δt (3)

$$\omega = \begin{cases} 1 - 2f - \Delta t, & \left(0 < \Delta t < \frac{1}{2f} \right) \\ 0 & \frac{1}{2f} < \Delta t \end{cases} \quad (4)$$

Como un ejemplo en la Figura 2.17, se muestra un modelo acústico sintético (2.17.a) y la función que describe los frentes de onda calculados con FMM (2.17.b). También se muestran en (2.17.c) y (2.17.d) los volúmenes de fresnel para frecuencias de 100 Hz y 50 Hz respectivamente.

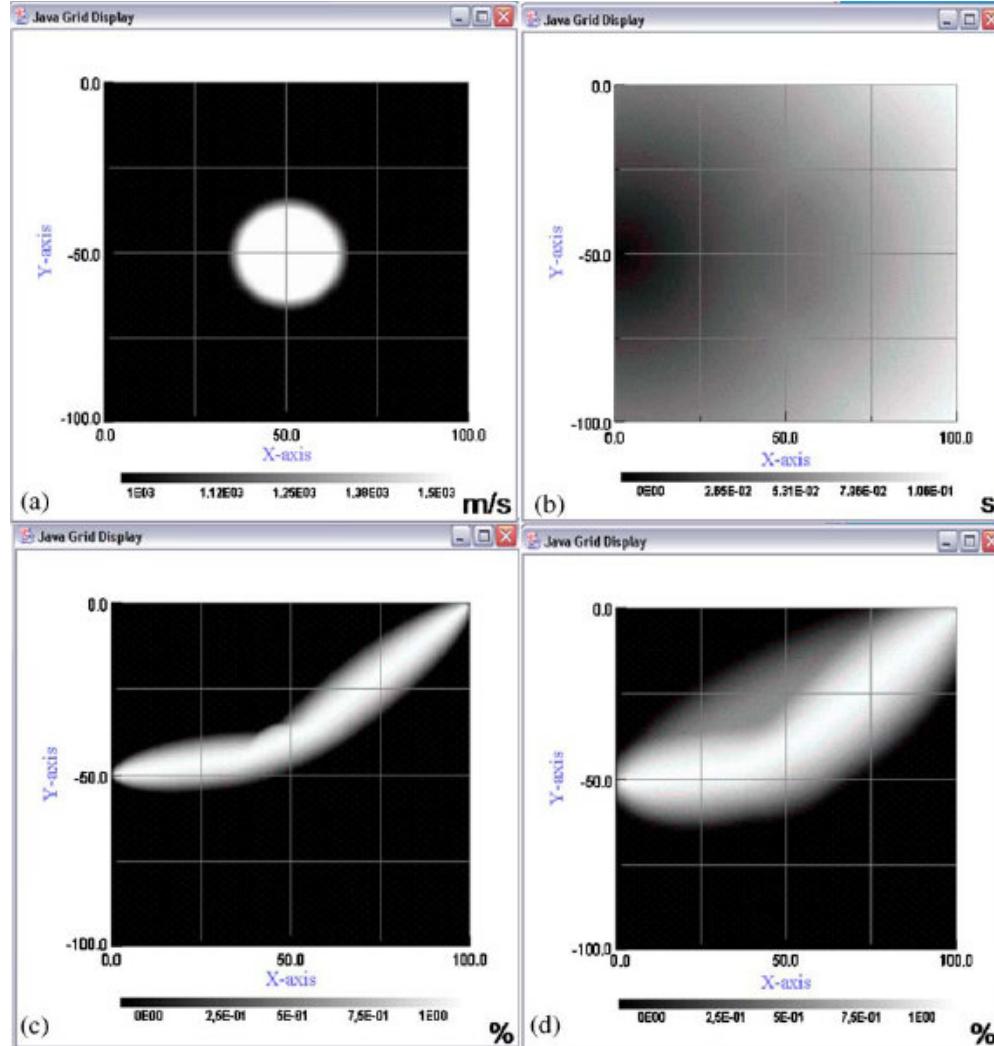


Figura 2.17. Modelo sintético (a), Frentes de Onda (b), Volumen de Fresnel 100Hz (c) Volumen de Fresnel 50 Hz (d). (Tomado de Grandjean y Sage, 2004)

En el ejemplo mostrado en la figura anterior se muestra como la frecuencia determina la propagación de las ondas en el medio. En el caso de la frecuencia de 100 Hz la onda es refractada en la anomalía circular del modelo sintético, en cambio con la frecuencia de 50 Hz la onda es parcialmente refractada, la otra parte es transmitida directamente de la fuente al receptor.



Reconstrucción del Modelo de Velocidades (SIRT):

El algoritmo de reconstrucción SIRT calcula el valor actualizado de lentitud promedio para cada celda en el mallado que sea atravesada por el volumen de Fresnel el cual esta definido por:

$$\Delta S_{ij} = S_j \frac{\Delta t}{t^c} \frac{w_{ij}}{\sum_{j=1}^m w_{ij}} \quad (5)$$

éste asume que cada volumen de Fresnel que tenga el mismo peso total definido por

$$\sum_{i=1}^M \omega_{ij} \quad (6)$$

tiene igual probabilidad para explicar el Δt entre los tiempos de viaje observados y calculados.

Luego de tener calculados los valores actualizados de lentitud (ΔS) para cada celda, se hace una interpolación lineal para propagar los valores ω hasta aquellas zonas donde las celdas del mallado no son tocadas por el volumen de Fresnel (zonas sombreadas), después las zonas sombreadas son entonces limitadas y la reconstrucción es estabilizada.

El éxito de la inversión depende de la similitud que exista entre los tiempos de viaje observados y los calculados, para ello una función de probabilidad es usada para calcular el criterio de semejanza. Esta cantidad representa el ajuste entre los valores observados y calculados de tiempo de viaje en la Norma L_2 y esta definida como

$$L = \left(-\sum_N \left(\frac{t^c - t^o}{\sigma} \right)^2 \right) / 2 \quad (7)$$

donde los superíndices c y o se refieren a calculado y observado respectivamente, y σ es la incertidumbre en los tiempos de viaje observados. Idealmente la solución es completa cuando la



función de probabilidad alcanza el valor “1”, aunque para evitar divergencias en caso de datos erróneos o limitar el número de iteraciones, el usuario tiene control sobre el número de iteraciones y el valor de convergencia deseado.

Procesamiento de Datos:

El programa JaTS contiene la mayoría de las utilidades necesarias para la realización de tomografía sísmica, su implementación es simple y se puede mostrar un esquema sintetizado de los pasos a seguir para realizar un proyecto (Figura 2.18).

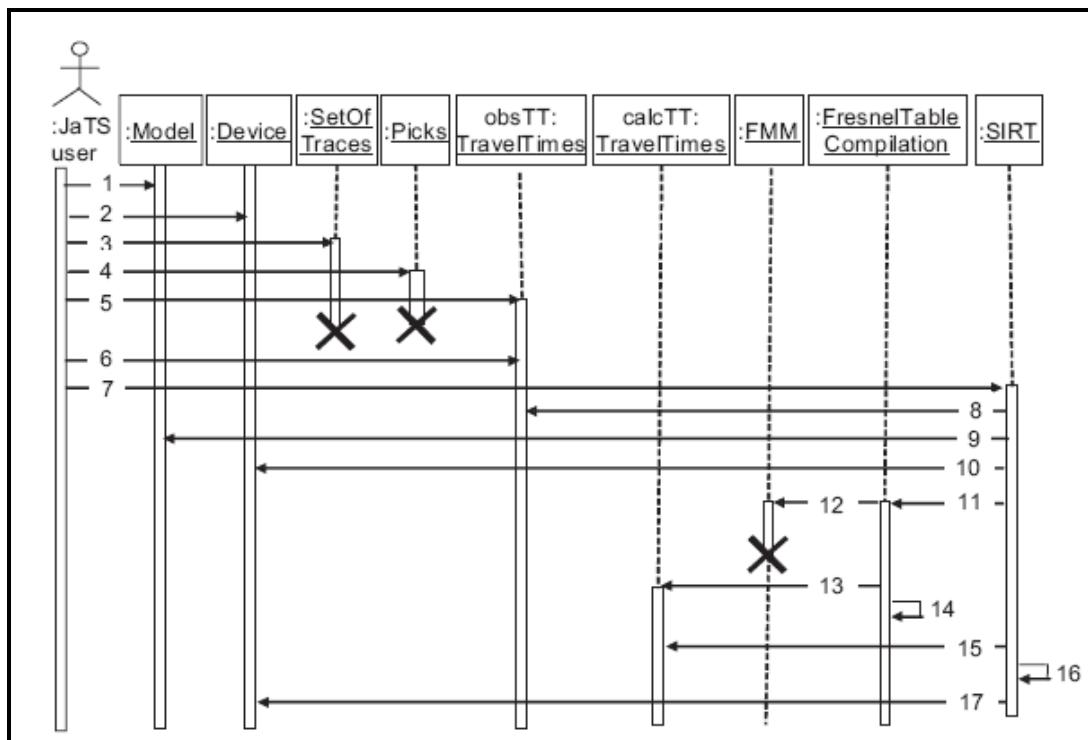


Figura 2.18: Diagrama para el uso del programa JaTS, los pasos a seguir están enumerados.
(Tomado de Grandjean y Sage, 2004)

Como fue mencionado anteriormente, el programa importa los datos en formato “SG2” y los transforma a formato “SU” y los trabaja de esta manera. El primer paso en el procesamiento consiste en analizar el contenido de frecuencia del conjunto de datos y luego realizar la escogencia de las primeras llegadas para obtener los tiempos de viaje. El segundo paso esta



dirigido a la creación del modelo acústico inicial que será usado para el cálculo de los tiempos de viaje, en esta etapa también se reproduce el arreglo fuente-receptor usado en la adquisición. El último paso viene dado por el proceso de inversión, donde usando el módulo “SIRT” se inicia la reconstrucción del modelo de velocidades.



CAPÍTULO 3: MARCO GEOLÓGICO

3.1. GEOLOGÍA REGIONAL

Está localizada al Sur de Venezuela y está constituida por el Escudo de Guayana, que en Venezuela se compone de cuatro provincias geológicas, a saber: Imataca, Pastora, Cuchivero-Amazonas y Roraima, (Mendoza, 1968) (Figura 3.1). La Provincia Geológica de Imataca, ocupa casi toda la parte Norte del Estado Bolívar, donde está insertada el área industrial de CVG-BAUXILUM Planta.

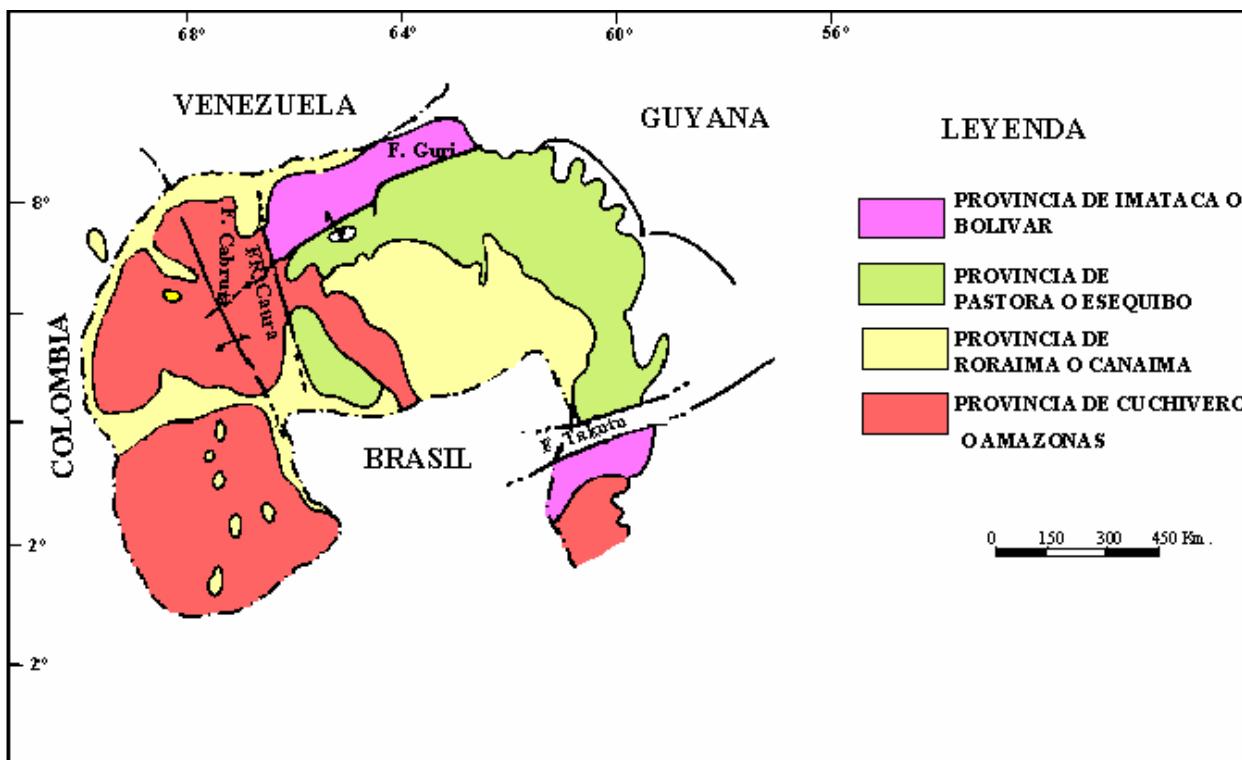


Figura 3.1: Provincias Litotectónicas del Escudo de Guayana, Venezuela. (Tomado de CVG-TECMIN y FUNINDES-USB, 2005)



3.1.1. Provincia Geológica de Imataca:

La Provincia de Imataca se extiende en dirección SO-NE unos 550 Km desde las proximidades del río Caura hasta el Delta del Orinoco y en dirección NO-SE aflora desde el curso del río Orinoco hasta la Falla de Guri por unos 80 km.

Litológicamente la Provincia de Imataca está formada por gneises graníticos y granulitas félsicas (60% - 75%), anfibolitas y granulitas máficas y ultramáficas (15% - 20%), y cantidades menores complementarias de formaciones bandeadas de hierro (BIF), dolomitas, charnockitas, anortositas y granitos intrusivos más jóvenes y remanentes erosionales menos metamorfizados y más jóvenes.

3.1.2. Estratigrafía Local:

La estratigrafía del área de CVG Bauxilum Planta está marcada por la ocurrencia de rocas del Complejo de Imataca como unidad estratigráfica dominante; suprayacente a ésta se encuentra un hiato cronológico representado por unidades sedimentarias de Cuaternario a Reciente (Figura 3.2).

Estas unidades sedimentarias del cuaternario están representadas por la Formación Mesa, la cual se extiende por los llanos centro-orientales y orientales (estados Guárico, Anzoátegui, Monagas). Se encuentran algunos afloramientos en los estados Sucre y Bolívar, inmediatamente al sur de del río Orinoco. Su composición litológica es básicamente arenas de grano grueso, gravas, conglomerados, dependiendo de la zona (Figura 3.3). El espesor de esta formación es muy variable, pero en términos generales disminuye de norte a sur, alcanzando un espesor máximo de 275 m en la Mesa de Maturín, mientras que en el estado Bolívar raramente alcanza los 20 m.

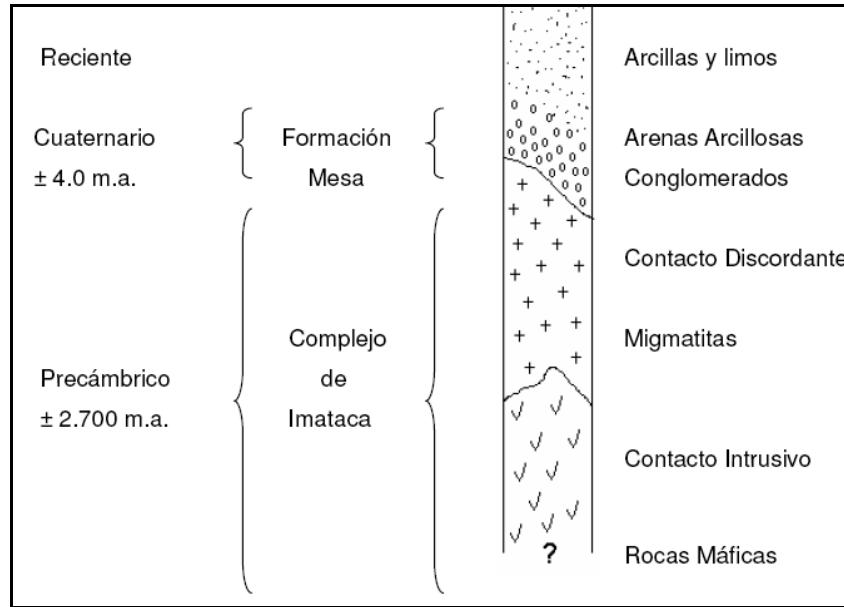


Figura 3.2: Columna Estratigráfica generalizada para el Área Industrial de CVG Bauxilum Planta – Matanzas. (Tomado de CVG-TECMIN y FUNINDES-USB, 2005)

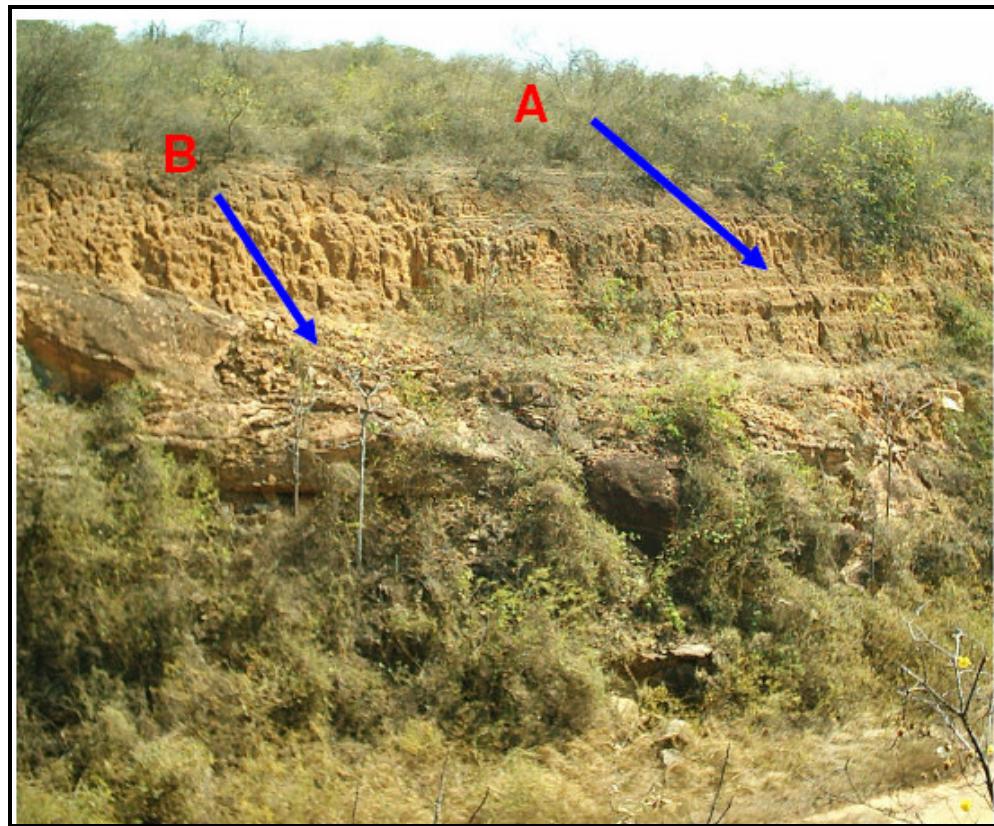


Figura 3.3: (A) Capa de Arenas Arcillosas de la Formación Mesa, en Contacto Discordante con las Migmatitas de la Provincia Imataca (B). (Tomado de CVG-TECMIN y FUNINDES-USB, 2005)



CAPÍTULO 4: ADQUISICIÓN DE DATOS

La adquisición de los datos fue llevada a cabo por la Universidad Simón Bolívar como parte de un proyecto para el cual fue contratada por CVG-TECMIN a través de FUNINDES-USB. El proyecto se basaba en un estudio de refracción sísmica con el objetivo de delimitar las posibles capas presentes en el subsuelo y estimar el valor de velocidades de onda P hasta los 50 m de profundidad o hasta donde las condiciones de las rocas del subsuelo así lo permitiesen por razones de absorción y/o dispersión de energía sísmica.

La adquisición de los datos se inició el día 20 de Junio de 2005 en la Zona 75 de la planta CVG-BAUXILUM en Puerto Ordaz, Estado Bolívar.

Equipos Utilizados

- Sismógrafo Geometrics SmartSeis de 24 Canales,
- 2 cables sísmicos de 12 canales con espaciamiento entre conectores de 15 metros.
- 26 geófonos de 10 Hz OYO GEOSPACE
- Gps Modelo Trimble Geoexplorer 3.
- Fuentes sísmicas: pólvora, cartuchos calibre 12.
- 1 cable con Gatillo (Triguer) modelo Geometrics.
- Cable conector Sismógrafo - Batería
- Batería de 12 V

Se realizó la adquisición de 84 perfiles de refracción sísmica de doble tiro (lo que implica un total de 168 registros de trazas sísmicas de componente vertical) con un solape entre ellos de 30 metros, para mantener y asegurar la continuidad lateral de los estratos en el procesamiento e interpretación de los modelos realizados. Estos han sido identificados en 10 líneas mayores (CVG-TECMIN y FUNINDES-USB, 2005)



- Línea Cinta Noreste (7 perfiles sísmicos de doble disparo).
- Línea Dique 3 Sur (14 perfiles sísmicos de doble disparo).
- Línea Laguna 2 norte (7 perfiles sísmicos de doble disparo).
- Línea Laguna 2 Oeste (7 perfiles sísmicos de doble disparo).
- Línea Laguna 3 Norte (6 perfiles sísmicos de doble disparo).
- Línea Montaña Sur (17 perfiles sísmicos de doble disparo).
- Línea Orinoco (6 perfiles sísmicos de doble disparo).
- Línea Portón 3 (9 perfiles sísmicos de doble disparo).
- Línea Puente PDVSA (5 perfiles sísmicos de doble disparo).
- Línea Cambalache (6 perfiles sísmicos de doble disparo).

La geometría de las líneas de adquisición se muestran en la tabla 4.1

Tabla 4.1: Geometría de las líneas de refracción adquiridas en campo. (Tomado CVG-TECMIN y FUNINDES-USB, 2005)

GEOMETRIA DE ADQUISICIÓN DE LAS LÍNEAS	
NUMERO DE CANALES	12
DISTANCIA ENTRE CANALES	15
DISTANCIA FUENTE 1º RECEPTOR	15
NUMERO DE PEFILES / LINEA	2
LONGITUD DEL PERFIL	180m
LONGITUD TOTAL DE LA LINEA	195m
TIPO DE FUENTE	Pólvora / Cartucho cal. 12
NUMERO DE FUENTES / LINEA	2
DISTANCIA ENTRE FUENTES	195m
INTERVALO DE MUESTREO	0.250ms
LONGITUD DEL REGISTRO	512ms
FILTROS NOTCH	NO
FILTROS CORTE BAJO	NO
FILTROS CORTE ALTO	NO
POLARIDAD DE LA ONDICULA	POSITIVA

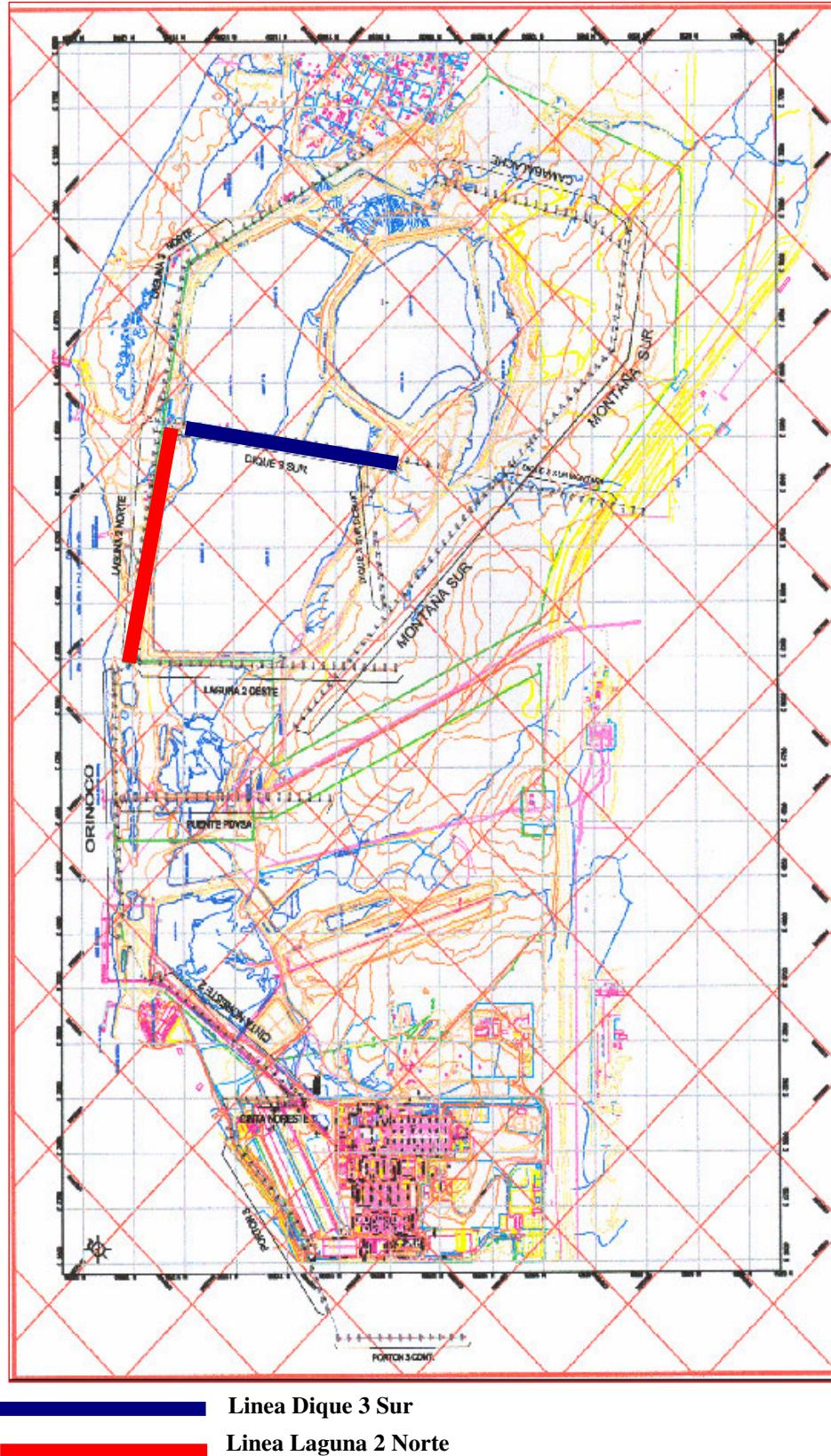


Figura 4.1: Plano Ubicación de la Zona 75 – Planta de CVG Bauxilum y la disposición de cada una de las Líneas sísmicas adquiridas. (Tomado de CVG-TECMIN y FUNINDES-USB, 2005)



CAPÍTULO 5: DETECCIÓN DE PRIMERAS LLEGADAS UTILIZANDO UN ALGORITMO DE LÓGICA DIFUSA

Durante el desarrollo de este capítulo se revisaran varias etapas que se llevaron a cabo para la aplicación del algoritmo de selección de primeras llegadas, entre ellas tenemos:

- Selección de las Líneas Sísmicas a utilizar en el programa de Lógica Difusa.
- Cambio del formato de los datos.
- Modificación e implementación del Código propuesto por López (2005) para la Detección de Primeras Llegadas en datos de VSP y Check Shots usando Lógica Difusa.

5.1.1. Selección de los Disparos a utilizar en el programa de Lógica Difusa:

El proceso para seleccionar a cuáles disparos se les aplicaría el programa de Lógica Difusa se llevo a cabo de manera cualitativa, es decir, en ningún momento se calculó la relación señal/ruido a las trazas sísmicas, sino que se visualizaron los disparos de refracción correspondientes a las Líneas Sísmica en el Software ReflexW y a partir de esto se hizo la selección.

Línea Laguna 2 Norte presentó algunos disparos ruidosos (Figura 5.1), lo que se atribuye a las embarcaciones que navegan por el Río Orinoco (CVG-TECMIN y FUNINDES-USB, 2005) y que se detecta en los receptores debido a la cercanía del río con la línea. Por el contrario, otros disparos resultaron limpios como es el caso del mostrado en la Figura 5.2.

El caso opuesto ocurrió con la *Línea Dique 3 Sur* en su parte Norte, donde la mayoría de los disparos resultaron ruidosos (Figuras 5.3 y 5.4) producto de tuberías subterráneas y en superficie que transportan fluidos que desembocan en las lagunas de oxidación encontradas a



ambos lados del dique, además del relleno propio con el cual fue realizado el dique, siendo éste muy heterogéneo y presentando zonas de cantos de gran tamaño alternado con relleno de arenas, arcillas y rocas de tamaños variados (CVG-TECMIN y FUNINDES-USB, 2005)

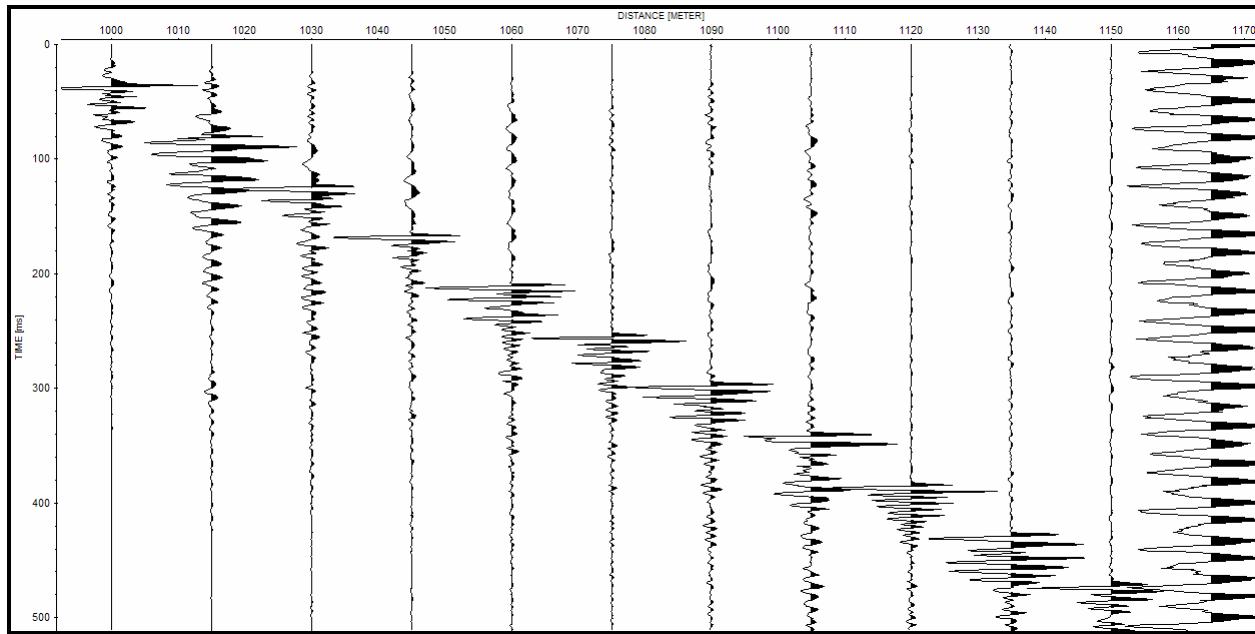


Figura 5.1: En este disparo se nota en todas las trazas cierta cantidad de ruido, atribuido a las embarcaciones que navegan por el Orinoco

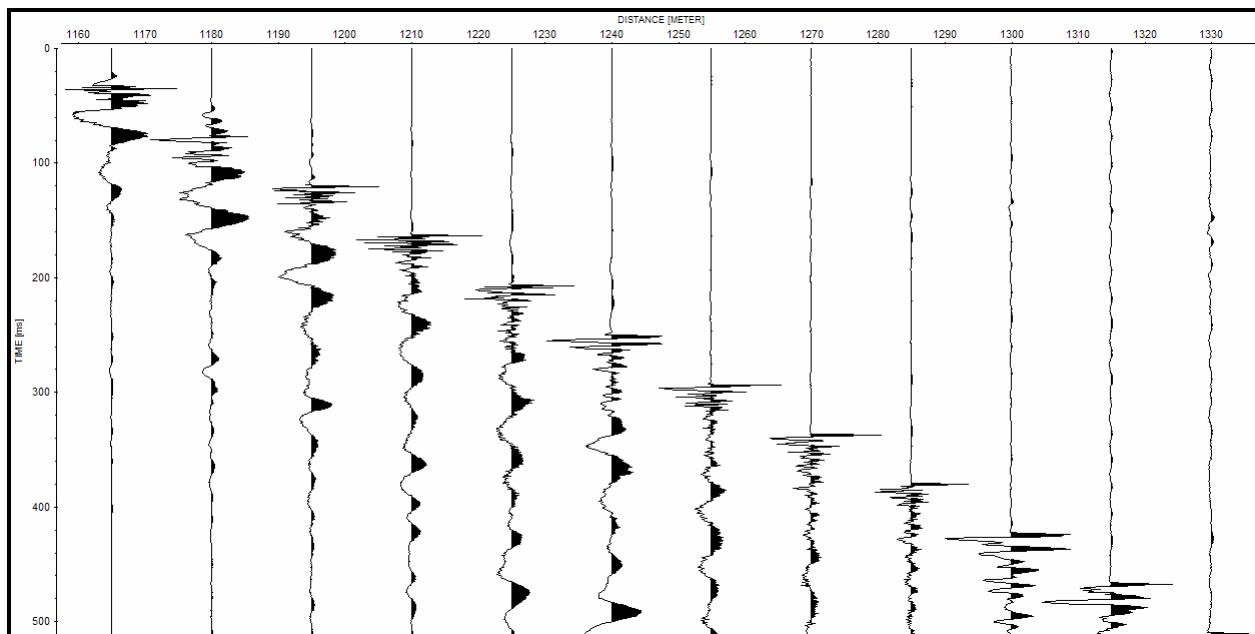


Figura 5.2: Disparo Laguna 2 Norte con buena relación señal/ruido

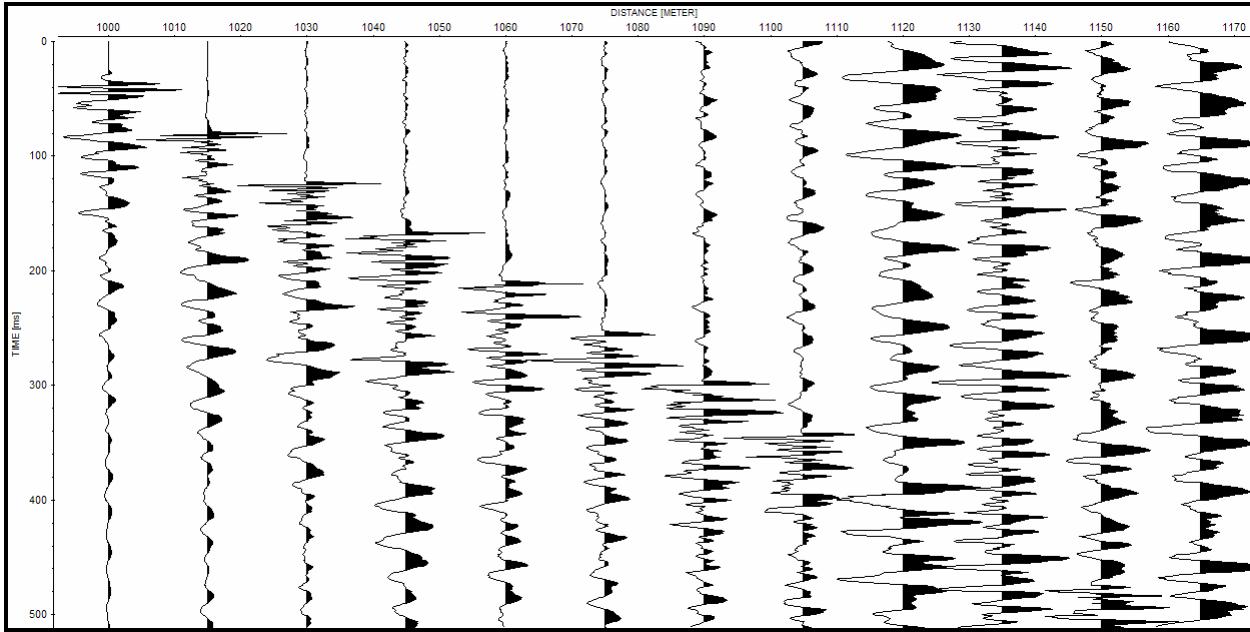


Figura 5.3: Disparo Ruidoso perteneciente a la Línea Dique 3 Sur

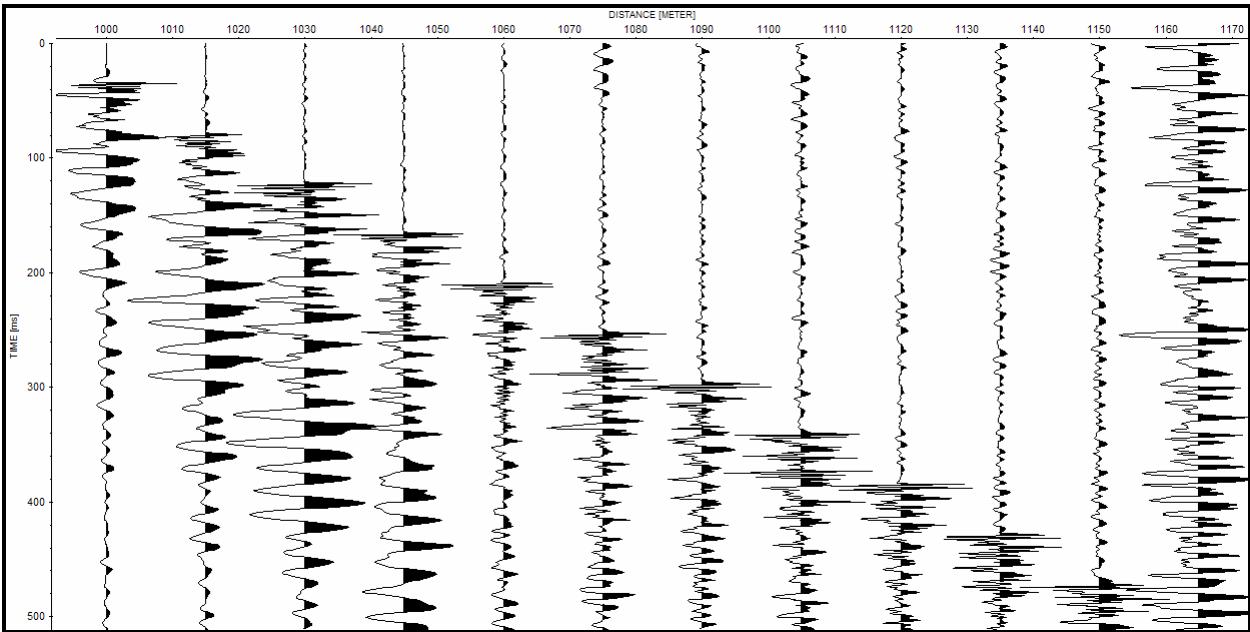


Figura 5.4: Disparo Ruidoso perteneciente a la Línea Dique 3 Sur

Un fenómeno que se nota en cada traza, independientemente de la línea a la cual pertenezca, es una *primera llegada aparente*; se denominó aparente por su forma, es decir, por el aumento brusco de amplitud lo que da la impresión de un primer quiebre, pero al analizar los



tiempos de arriba de estas amplitudes queda descartada esta posibilidad porque se detectan primeros quiebres falsos hasta 500 milisegundos de grabación y este estudio es de sísmica de refracción somera. La explicación a este fenómeno no fue estudiada aunque se piensa que se debe a una reverberación o un múltiple ya que se repite de traza en traza con un desfasaje de 40 a 50 milisegundos.

5.1.2. Cambio del formato de los datos:

Cuando se hace la adquisición, el sismógrafo almacena los datos en distintos formatos, para el caso de este estudio en formato SEG2. Para poder implementar el programa de lógica difusa los datos deben ser llevados a formato ASCII. Este proceso de cambiar el formato se llevó a cabo con la ayuda del programa REFLEXW y el módulo para exportar datos (Figura 5.5).

El formato de salida escogido fue ASCII-MATRIX(TRACE/COL) en el que cada columna representa una traza y de esta forma el programa de lógica difusa desarrollado en Matlab[®] puede leer los datos.

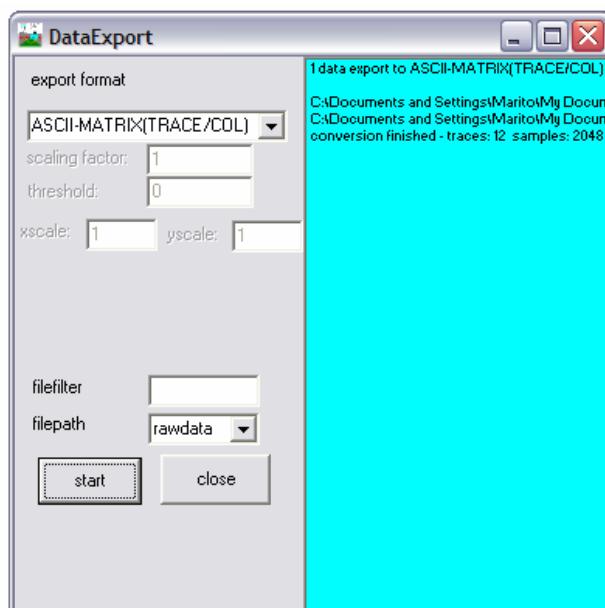


Figura 5.5: Modulo de REFLEXW para exportar datos



5.1.3. Modificación e implementación del Código propuesto por López (2005):

El código en Matlab® desarrollado por López estaba dirigido a la detección de primeras llegadas utilizando lógica difusa en datos de VSP y Check Shots y por tanto fue necesaria una modificación en el código para adaptarlo al conjunto de datos de refracción a utilizar. Principalmente las modificaciones fueron hechas para que el programa funcionase con unos datos con mucho más ruido.

Una vez que el programa carga los datos (esto se hace por disparos) pregunta al usuario cual será el umbral de amplitud a utilizar, este valor que introduce el usuario es el valor mínimo de amplitud que tendrá un pico en una traza para ser escogido como candidato a primera llegada.

Para determinar este umbral de amplitud se examinaron los disparos, se observaron las amplitudes características de las primeras llegadas en las trazas de la mitad del registro (trazas 6 y 7) y a partir de eso se estableció para cada disparo el umbral de amplitud. Con este umbral de amplitud lo que se pretende es eliminar la posibilidad que amplitudes muy pequeñas consideradas ruido sean candidatas a primeras llegadas.

Disminución del número de candidatos a primeras llegadas.

Originalmente el programa estaba diseñado para analizar entre seis posibles candidatos y elegir uno como primera llegada; este número de candidatos fue disminuido a tres ya que era bastante difícil encontrar más de tres picos consecutivos que tuviesen amplitud mayor o igual a la establecida como umbral.

Antes de hacer el cambio al código lo que ocurría era que se seleccionaban los seis candidatos unos muy cercanos al tiempo de ocurrencia de la primera llegada y otros distanciados más de 20 milisegundos. Una vez realizado el cambio, los tres candidatos están muy cercanos al



tiempo de la primera llegada y el análisis de lógica difusa elegirá cuál de ellos es la primera llegada.

Creación de una Función Guía.

Este proceso se refiere a la creación de ciertos segmentos de recta en los disparos que intercepten las primeras llegadas en las trazas de entrenamiento y como su nombre lo dice, guían al programa en la detección de las primeras llegadas (Cheng-Kuang y Mendel, 1994). Para implementar esta técnica se ubicaron manualmente las primeras llegadas en varias trazas (Trazas de Entrenamiento) y a partir de estos puntos se crearon los segmentos de recta (Figura 5.6).

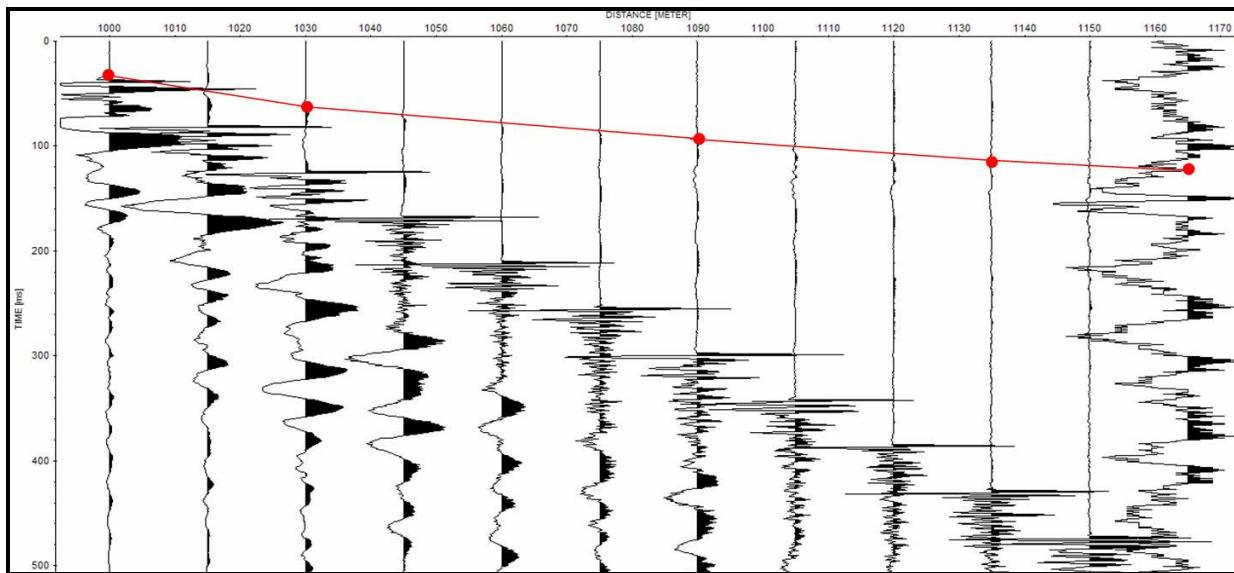


Figura 5.6: Disparo donde se muestra la función guía entre las trazas 1, 3, 7, 10 y 12. El punto rojo representa el tiempo de la primera llegada ubicada manualmente

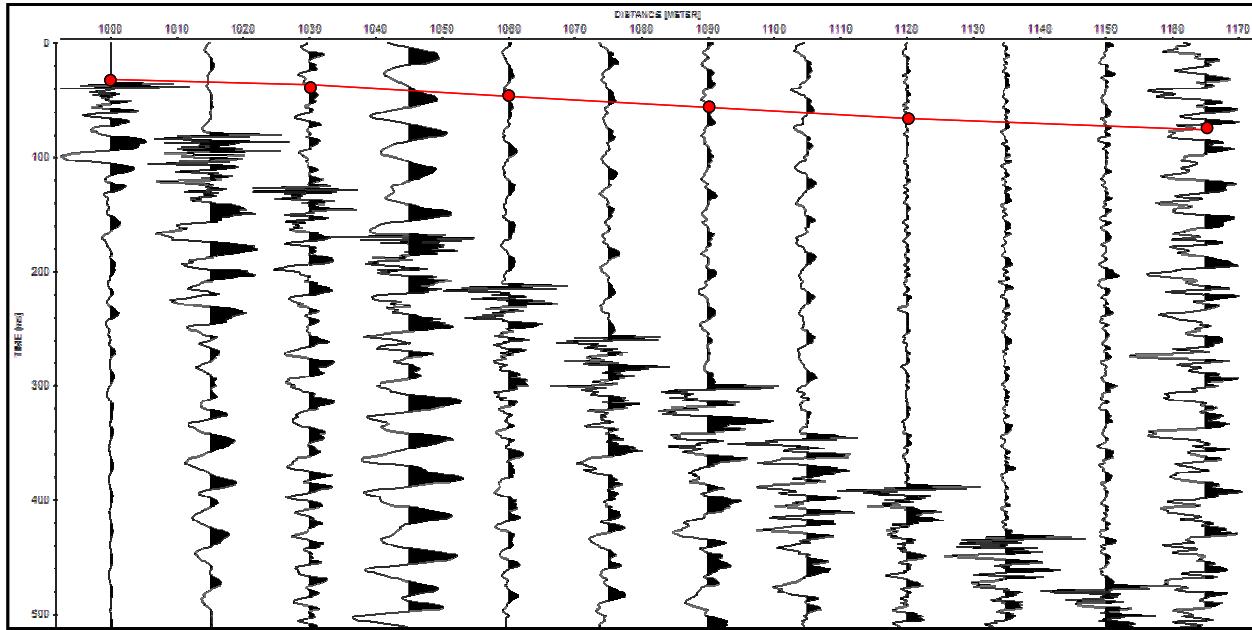


Figura 5.7: Disparo donde se muestra la función guía entre las trazas 1, 3, 7 ,10 y 12. (El punto rojo representa el tiempo de la primera llegada ubicada manualmente)

La idea de generar esta función guía para cada disparo es hacer que las rectas pasen por las primeras llegadas calculadas manualmente, de esta manera el intérprete incorpora información previa al sistema difuso para el cálculo automatizado de las primeras llegadas.

Extracción de Atributos a introducir en el Sistema Difuso.

Cuando se diseñan algoritmos para realizar tareas específicas, en este caso la detección de primeras llegadas en datos sísmicos, los procedimientos se basan en propiedades particulares de la parte de la traza sísmica que contiene la primera llegada.

Cinco atributos son introducidos al sistema para obtener mejores resultados. Estos atributos son: pendiente de la envolvente en el punto, potencia promedio en el punto, tasa de potencia en el punto, amplitud en el punto y distancia a una función guía (Cheng-Kuang y Mendel, 1994).



Los tres primeros atributos fueron calculados de acuerdo a las ecuaciones propuestas por Veezhinathan *et al.*, 1991, para la detección de primeras llegadas usando un sistema de redes neuronales. Las ecuaciones utilizadas se presentan a continuación:

$$\text{Potencia promedio: } MPL(t) = \frac{1}{10} \sum_{t=5}^{t+5} E^2(t) \Delta(t) \quad (1)$$

$$\text{Tasa de potencia: } PR(t) = \frac{MPL(t+2)}{MPL(t-2)} \quad (2)$$

$$\text{Pendiente de la envolvente: } ES = \frac{\Delta E(t)}{\Delta(t)} \quad (3)$$

donde: $\Delta E(t) = E(t) - E(t-1)$ (4)

E denota la envolvente de la traza, y se calcula de la siguiente manera:

$$E(t) = \left(f^2(t) + g^2(t) \right)^{1/2} \quad (5)$$

donde $f(t)$ denota la traza sísmica y $g(t)$ su transformada de Hilbert

Algunos de los atributos mostrados, están relacionados a la transformada de Hilbert de la traza sísmica $f(t)$ y se conocen como atributos de Hilbert; fueron propuestos por Taner *et al.*, 1979.

Creación de una función para el cálculo de la distancia mínima a una función guía.

La distancia mínima a una función guía es otro atributo importante a extraer de los posibles candidatos a primeras llegadas, ya que este atributo será un dato de entrada al sistema difuso. Para la realización de este proceso se hizo una pequeña modificación del código original ya que los tiempos de muestreo de los datos de VSP y Check Shots era de 1 ms y la sísmica de refracción esta muestreada cada 0,25 ms.

Para hacer el cálculo de esta distancia se obtuvieron las ecuaciones de los segmentos de recta, donde los valores de x estaban dados por el número de traza mientras que y estaba



determinado por los tiempos de las primeras llegadas. Luego se restaba el valor de las llegadas de cada candidato al valor de la función en cada traza y estos valores se almacenaban para luego ser utilizados como datos de entrada en el sistema difuso.

El otro atributo a utilizar es la amplitud de cada candidato y ésta es leída directamente por el código desde los datos y luego se normaliza y almacena.

Una vez obtenidos los 5 atributos para cada candidato se realiza un cuadro como el que se muestra en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Atributos pertenecientes al disparo 01L2N obtenidos para cada candidato a primera llegada organizado por trazas.

Atributos	Trazas											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Amplitud	0.09146 0.99296 0.34297	0.021663 0.025532 0.004642	0.012073 0.013648 0.0052493	0.011912 0.013103 0.013699	0.0098644 0.0006165 0.0024661	0.010368 0.01131 0.0094251	0.012821 0.020513 0.017949	0.010309 0.012887 0.018041	0.012077 0.0024155 0.0024155	0.010504 0.0084034 0.0084034	0.011407 0.0076046 0.0095057	0.28571 0.28571 0.14286
Pendiente de la envolvente	0.49748 5.0997 -3.6769	0.11598 0.021883 -0.11817	0.047512 0.0089084 -0.047512	0.020215 0.0067384 0.0033692	0.010463 -0.052314 0.010463	0.047985 0.0053316 -0.058648	0.043514 0.043514 -0.014505	0.029159 0.01458 0.029159	0.013664 -0.054656 0	0.011884 -0.011884 0	0.032263 -0.021509 0.010754	0.80812 0 -0.80812
Potencia Promedio	0.000419 0.049718 0.0556	2.44E-05 5.70E-05 5.81E-05	8.31E-06 1.76E-05 1.90E-05	1.27E-05 2.13E-05 3.07E-05	9.29E-06 9.31E-06 9.62E-06	5.60E-06 1.20E-05 1.20E-05	1.08E-05 3.19E-05 4.80E-05	9.63E-06 1.79E-05 3.42E-05	1.23E-05 1.25E-05 1.28E-05	1.26E-05 1.61E-05 1.96E-05	8.86E-06 1.17E-05 1.63E-05	0.0091837 0.013265 0.014286
Radio de Potencia	1.14E+05 55177 145.73	6.42E+01 2.80E+04 1.33E+03	5.52E+01 3.25E+01 5.79E+00	1.43E+01 5.46E+00 2.42E+00	7.91E+00 2.28E+00 1.22E+00	2.71E+02 5.50E+01 2.25E+00	3.65E+01 1.94E+01 4.73E+00	1.14E+01 1.07E+01 4.83E+00	4.40E+01 2.65E+00 1.17E+00	5.56E+00 2.91E+00 1.65E+00	2.25E+01 7.00E+00 2.37E+00	3.5 3 1.7778
Dist minima	2.25 0 2.25	0.33333 0.83333 4.5833	0 0.58333 1.5833	0.75 1 1.25	0.58333 1.5833 2.1667	1.5833 1.6667 2.1667	0 1 1	0.58333 1.1667 2.3333	0.66667 1.4167 2.9167	0 1.25 1.25	0.875 2.125 2.375	0 1 1.5
Trazas de entrenamiento	1 0 0		1 0 0				1 0 0			1 0 0		

Los atributos calculados anteriormente, para cada candidato a primera llegada, constituyen las variables de entrada del sistema. A partir de éstos, se realizará el cálculo de las primeras llegadas.



Funciones de pertenencia

Las funciones de pertenencia definen cómo cada punto en el espacio de entrada representa un valor de pertenencia (o grado de pertenencia) entre 0 y 1. Para obtener mejores resultados, se aplicaron dos funciones de pertenencia denominadas Alto y Bajo, donde:

- a. Función de pertenencia Alto: Corresponde a la función de pertenencia que comprende los valores de los atributos más característicos o representativos de las primeras llegadas.
- b. Función de pertenencia Bajo: Representa aquéllos valores de los atributos de entrada que no son característicos de las primeras llegadas.

De esta manera, cada valor de entrada estará dentro del rango de alguna de estas funciones y, dependiendo del grado de pertenencia de cada valor en la función, se obtendrá un resultado parcial.

Para los atributos amplitud, nivel medio de potencia, tasa de potencia y pendiente de la envolvente, la función de pertenencia utilizada fue la Gaussiana (Figura 5.7); ya que mediante una función de este tipo se logró restringir en el interior de la gaussiana “Alto” los valores de interés (aquellos valores característicos de las primeras llegadas) y los valores que no son de interés también son limitados dentro de otra función de este tipo (Bajo) para ser incorporados luego al sistema difuso. Para el atributo distancia a una función guía, se utilizó una función específica que depende directamente de la distancia entre los candidatos a primeras llegadas y la función guía para delimitar los valores característicos de las primeras llegadas (Alto) y una función trapezoidal para encerrar los valores que no son de interés (Bajo) (Figura 5.8).

Mediante el uso del comando ***mfedit*** de Matlab se entra en la interfase que permite modificar las funciones de pertenencia del archivo FIS. Se escribe ***mfedit(a)*** en la ventana de comandos (Command Windows) para editar el archivo predeterminado. Se inicializa una nueva ventana mostrando todas las funciones de pertenencia del sistema. Es en esta interfase donde el



intérprete comienza el entrenamiento del FIS modificando las funciones de pertenencia de acuerdo al comportamiento de los atributos de las trazas de entrenamiento.

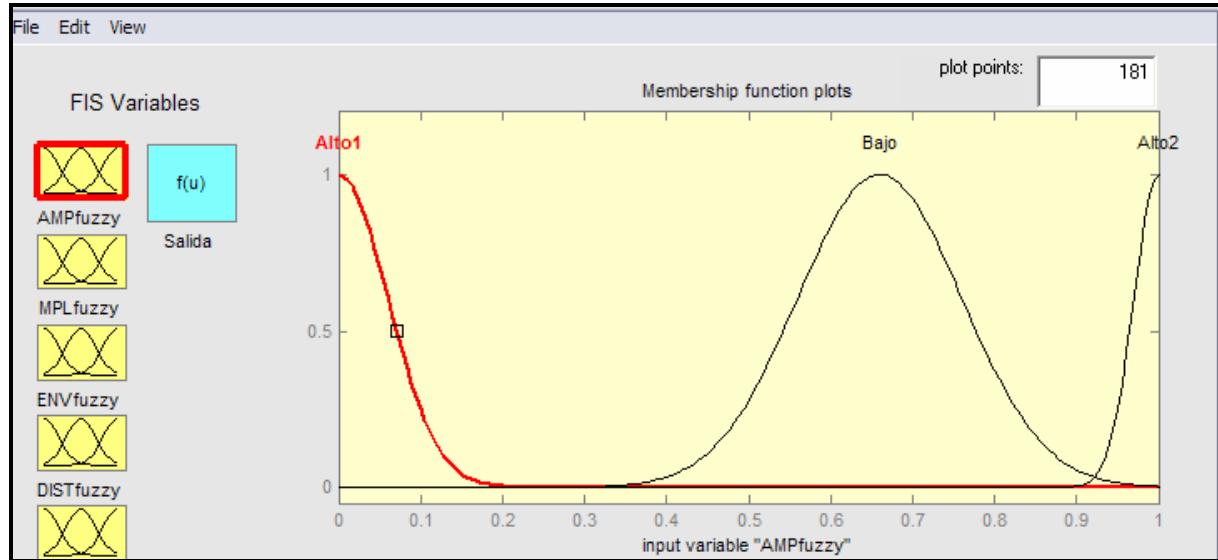


Figura 5.7: Función de Pertenencia de forma Gaussiana para el atributo Amplitud.

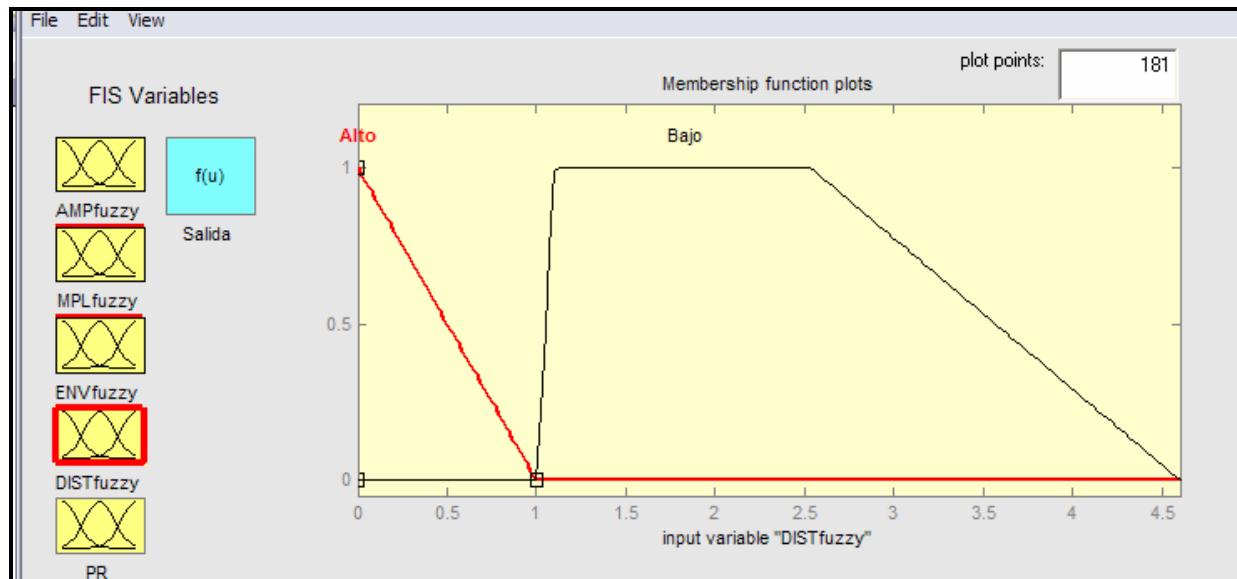


Figura 5.8: Función de Pertenencia para el atributo Distancia Mínima.



Reglas difusas

El sistema de inferencia difusa es de orden cero, es decir, la estructura de las reglas difusas es de la siguiente forma: *Si* el atributo x es X (variable lingüística), *entonces* $y = a$, donde a es una constante. El valor de a será igual a 1, si el candidato efectivamente resulta primera llegada y será igual a 0 si ocurre el caso contrario.

En teoría, la cantidad de reglas difusas que debe contener el programa está determinada por el producto resultante de la multiplicación del número de entradas y la cantidad de funciones de pertenencia, aunque éste es un valor relativo que depende del criterio del operador.

Desde la ventana “Command Windows” se tiene acceso al editor de reglas difusas ingresando allí Edit\Rules. Desde esta ventana, el intérprete crea las reglas difusas que utilizará el sistema difuso para determinar las primeras llegadas (Figura 5.9). Las reglas son creadas en base a la información que proveen las trazas de entrenamiento. Las reglas se agregan determinando el conectivo, AND (en este caso) e indicando la salida esperada si se cumple la regla.

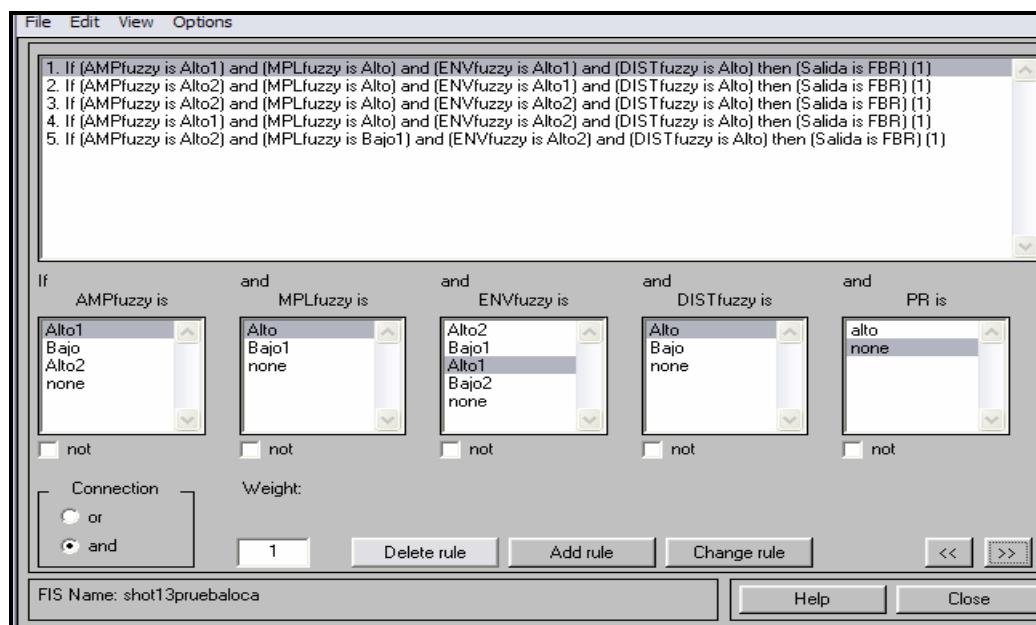


Figura 5.9: Editor de Reglas Difusas



La aplicación del código se llevó a cabo mediante tres experimentos:

Experimento N° 1:

Se aplica el código al disparo 01L2N (Figura 5.10) sin establecer el umbral de amplitud característica de las primeras llegadas, lo cual deja libre el rango de amplitudes para que el programa calcule los atributos y luego los candidatos a primeras llegadas.

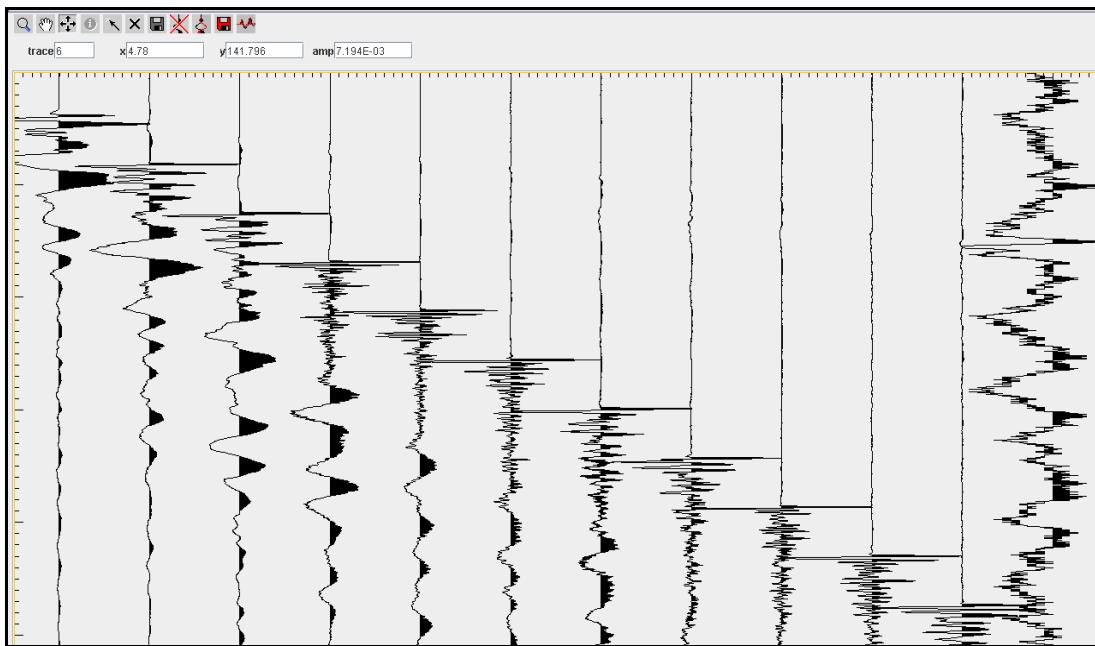


Figura 5.10: Disparo 01L2N

La Tabla 5.2 muestra los atributos calculados por el programa sin establecer el umbral de amplitud y la Tabla 5.3 la Salida del programa, que consta de los candidatos a primera llegada y las primeras llegadas calculadas manualmente, además del peso que el programa asigna a cada candidato.

En este experimento no se entrena el sistema de inferencia difusa ya que el cálculo de los candidatos a primeras llegadas es erróneo.

**Tabla 5.2: Atributos calculados para el disparo 01L2N sin establecer el umbral de Amplitud**

Atributos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Trazas											
Amplitud	0.002736	0.001547	0.00052493	0.00059559	0.001233	0.00094251	0.0025641	0.0025773	0.0024155	0.0063025	0.0019011	0.28571
	0.002931	0.001934	0.00052493	0.00059559	0.001233	0.00094251	0.0025641	0.0025773	0.0024155	0.0084034	0.0019011	0.28571
	0.003127	0.002321	0.0010499	0.00059559	0.0018496	0.00094251	0.0025641	0.0025773	0.0024155	0.0042017	0.0019011	0.14286
Pendiente de la envolvente	0.004422	0.002188	-0.0029695	0	0	0	0	0	0	0.011884	0	0.80812
	0.001106	0.002188	0	0	0	0	0	0	0	0.011884	0	0
	0.001106	0.002188	0.0029695	0	0.0034876	0	0	0	0	-0.023768	0	-0.80812
Potencia Promedio	6.59E-07	1.95E-07	5.65E-07	3.19E-07	1.71E-07	2.67E-07	1.97E-06	9.96E-07	8.75E-07	3.75E-06	5.42E-07	0.0091837
	1.09E-06	3.82E-07	5.79E-07	3.37E-07	2.47E-07	3.11E-07	2.30E-06	1.33E-06	1.17E-06	7.28E-06	7.23E-07	0.013265
	1.58E-06	6.51E-07	6.34E-07	3.55E-07	4.18E-07	3.55E-07	2.63E-06	1.66E-06	1.46E-06	8.17E-06	9.04E-07	0.014286
Radio de Potencia	1.69E+01	8.70E+01	1.28E+00	1.25E+00	2.20E+01	2.00E+00	2.00E+00	5.00E+00	5.00E+00	9.25E+00	5.00E+00	3.5
	7.7181	9.60E+00	1.18E+00	1.24E+00	1.22E+00	3.33E+00	2.67E+00	1.67E+00	3.33E+00	2.33E+00	2.65E+00	3
	638.19	3.85E+00	1.24E+00								3.33E+00	1.7778

Experimento Nº 2:

En este experimento se ejecuta el programa al mismo disparo 01L2N pero esta vez se introduce como umbral de amplitud el valor correspondiente a la amplitud de la primera llegada calculada manualmente en la traza # 6 del registro. La amplitud de la primera llegada calculada manualmente y por lo tanto del umbral de amplitud es 0,01.

Luego de extraer los nuevos atributos de este disparo (Tabla 5.4) se procedió al entrenamiento del Sistema de Inferencia Difusa (FIS) modificando las funciones de pertenencia y las reglas difusas según las primeras llegadas calculadas manualmente en las trazas de entrenamiento.

**Tabla 5.3: Experimento N° 1. Primeras llegadas calculadas manualmente y calculadas con el programa de Lógica Difusa.**

# de Traza	Primeras Llegadas Calculadas Manualmente (ms)	Candidatos a Primeras Llegadas (ms)	Valor que el SID asigna a cada Candidato
1	34.355304	10	0.66667
		10.5	0.5
		11.25	0.5
2	48.473373	3.25	0.5
		3.75	0.5
		5.75	0.5
3	58.571991	6.5	0.66667
		7.5	0
		8	0
4	69.680473	4	0
		5	0
		6.5	0.5
5	76.749512	6.5	0.66667
		7.25	0
		8.25	0
6	84.8284	4	0
		15	0.5
		16.25	0.5
7	90.887573	7.5	0.66667
		9.75	0.5
		10.5	0.5
8	103.00592	18.5	0
		19.5	0
		21.25	0
9	110.074951	9.75	0.5
		18.5	0.5
		24	0.5
10	118.153847	5.25	0.66667
		6.25	0.5
		7.5	0.5
11	125.222885	8.75	0
		9.75	0
		10.5	0.5
12	130.272186	6.5	0.5
		8.5	0.5755
		9.25	0.5432



Tabla 5.4: Atributos Calculados para el disparo 01L2N en el Experimento N° 2.

Atributos	Trazas											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Amplitud	0.09146 0.99296 0.34297	0.021663 0.025532 0.004642	0.012073 0.013648 0.0052493	0.011912 0.013103 0.013699	0.0098644 0.0006165 0.0024661	0.010368 0.01131 0.00094251	0.012821 0.020513 0.017949	0.010309 0.012887 0.018041	0.012077 0.0024155 0.0024155	0.010504 0.0084034 0.0084034	0.011407 0.0076046 0.0095057	0.28571 0.28571 0.14286
Pendiente de la envolvente	0.49748 5.0997 -3.6769	0.11598 0.021883 -0.11817	0.047512 0.0089084 -0.047512	0.020215 0.0067384 0.0033692	0.010463 -0.052314 0.010463	0.047985 0.0053316 -0.058648	0.043514 0.043514 -0.014505	0.029159 0.01458 0.029159	0.013664 -0.054656 0	0.011884 -0.011884 0	0.032263 -0.021509 0.010754	0.80812 0 -0.80812
Potencia Promedio	0.000419 0.049718 0.0556	2.44E-05 5.70E-05 5.81E-05	8.31E-06 1.76E-05 1.90E-05	1.27E-05 2.13E-05 3.07E-05	9.29E-06 9.31E-06 9.62E-06	5.60E-06 1.20E-05 1.20E-05	1.08E-05 3.19E-05 4.80E-05	9.63E-06 1.79E-05 3.42E-05	1.23E-05 1.25E-05 1.28E-05	1.26E-05 1.61E-05 1.96E-05	8.86E-06 1.17E-05 1.63E-05	0.0091837 0.013265 0.014286
Radio de Potencia	1.14E+05 55177 145.73	6.42E+01 2.80E+04 1.33E+03	5.52E+01 3.25E+01 5.79E+00	1.43E+01 5.46E+00 2.42E+00	7.91E+00 2.28E+00 1.22E+00	2.71E+02 5.50E+01 2.25E+00	3.65E+01 1.94E+01 4.73E+00	1.14E+01 1.07E+01 4.83E+00	4.40E+01 2.65E+00 1.17E+00	5.56E+00 2.91E+00 1.65E+00	2.25E+01 7.00E+00 2.37E+00	3.5 3 1.7778
Trazas de entrenamiento	1 0 0		1 0 0					1 0 0			1 0 0	0 1 0

Como se puede notar sólo se calcularon 4 atributos (Tabla 5.4), por lo tanto en las variables de entrada al sistema de inferencia difuso solo se muestran los atributos Amplitud, Potencia promedio, Radio de Potencia y Pendiente de la envolvente (Figura 5.11).

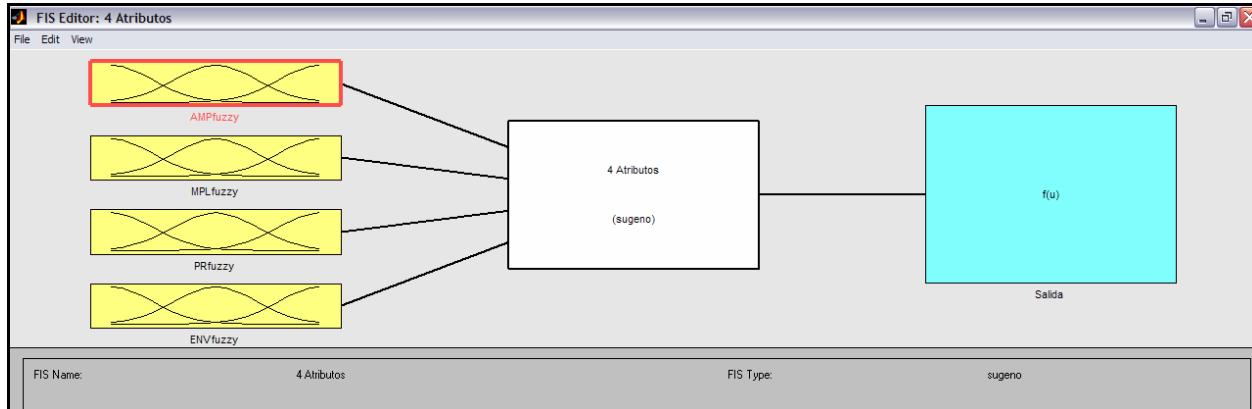


Figura 5.11: Ventana de edición del Sistema de Inferencia Difuso

La modificación de las funciones de pertenencia se realiza mediante el comando Edit/Membership Function en la ventana de edición del SID (Figura 5.12).

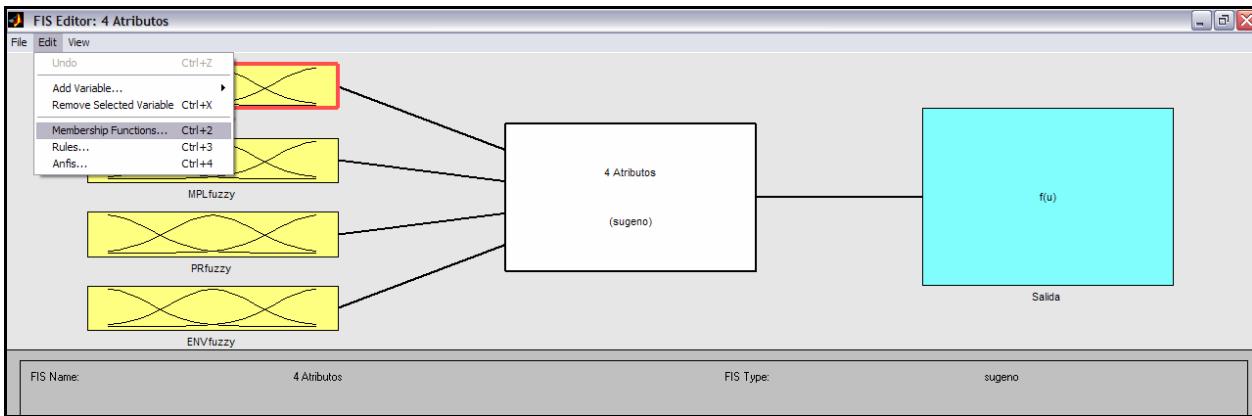


Figura 5.12: Edición de las Funciones de Pertenencia.

Dependiendo de los valores característicos de primera llegada para cada atributo observados en la Tabla 5.4 se modifican las funciones de pertenencia. El atributo Amplitud estaba dentro del rango [0,01 : 0,29] por lo tanto se ajustaron las funciones Gaussianas para este atributo de manera que los valores de interés queden dentro de la función de pertenencia “Alto” (Figura 5.13)

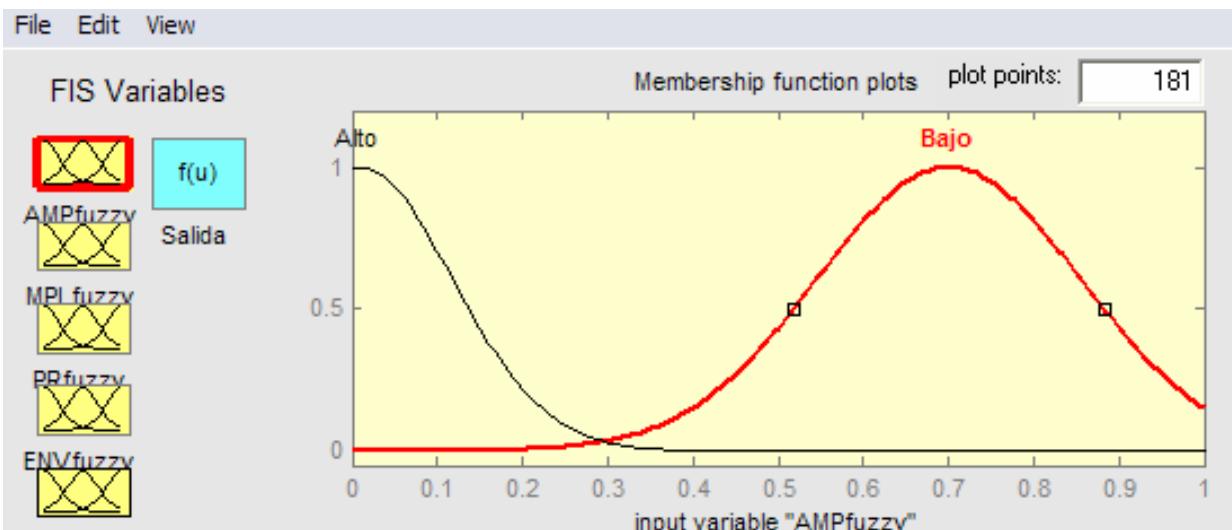


Figura 5.13: Función de Pertenencia Gaussiana para el atributo Amplitud

Así como para el atributo amplitud se modificaron sus funciones de pertenencia, lo mismo ocurrió para los otros atributos (Figura 5.14), lo cual representan las variables de entrada al sistema difuso, lo cual, aunado al conjunto de reglas difusas creadas por el intérprete,



representan las herramientas de la lógica difusa para hacer la discriminación entre los valores que representan primeras llegadas y los que no.

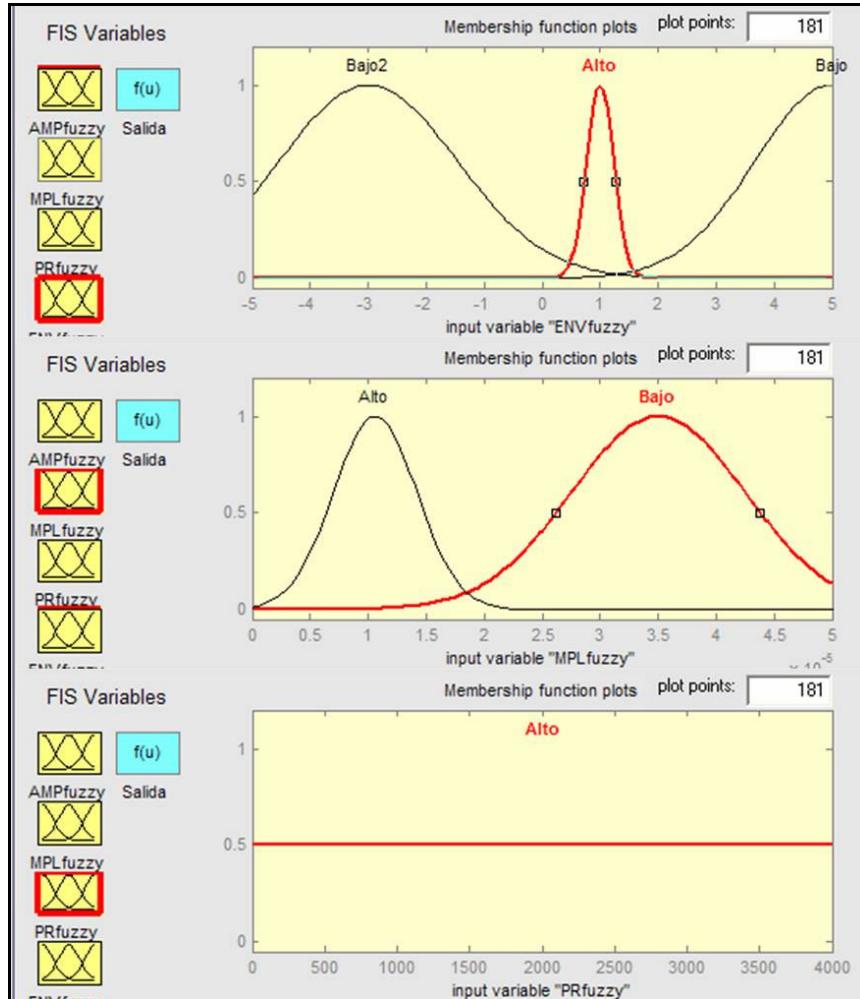


Figura 5.14: Funciones de pertenencia para los atributos Pendiente de la envolvente, Potencia promedio y Radio de potencia.

La creación del conjunto de reglas difusas es el paso siguiente en la aplicación del programa, para tener acceso al editor de reglas se va al menú Edit/ Rules de la ventana de edición del FIS; una vez allí se presenta una pantalla con todas las variables de entrada y la salida deseada; las cuales el interprete combina para lograr automatizar el proceso de selección de las primeras llegadas (Figura 5.15).

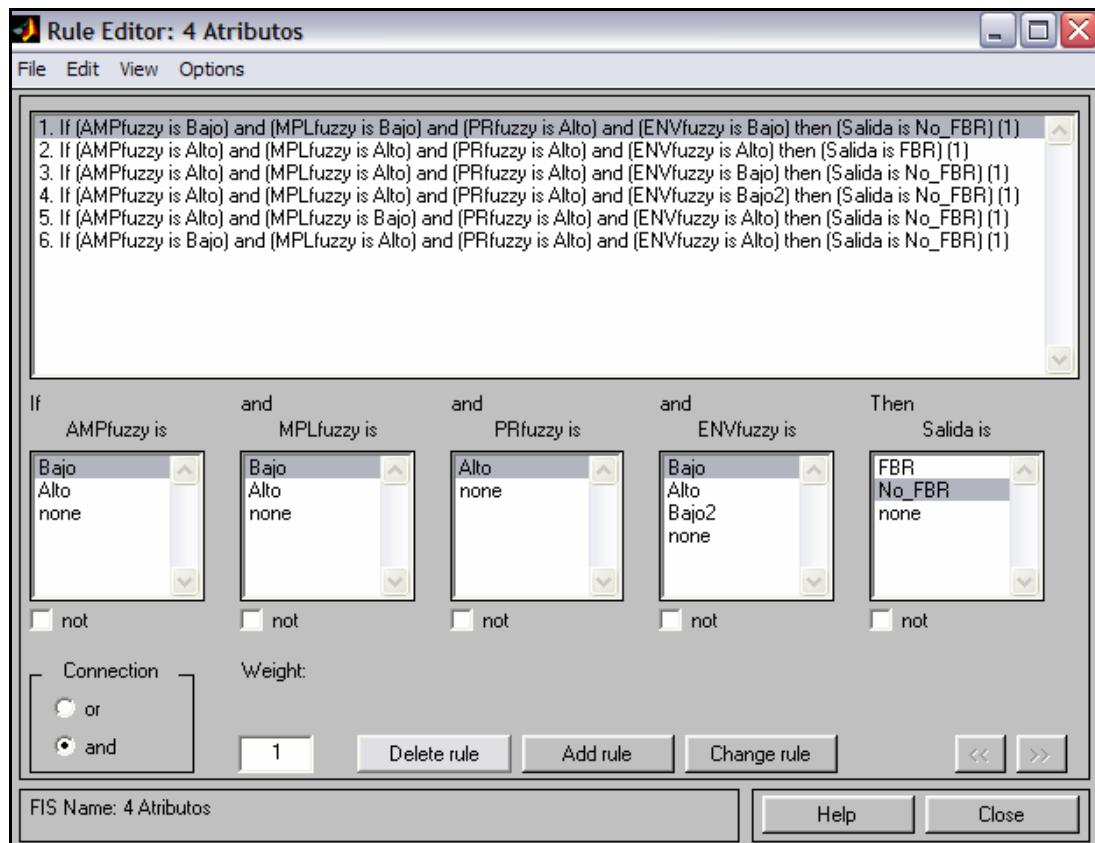


Figura 5.15: Ventana de creación y edición de Reglas Difusas Experimento N° 2.

Se crearon 6 reglas difusas que se observan en la figura 5.15. Con este conjunto de reglas y con las funciones de pertenencia modificadas anteriormente se calcularon los candidatos a primera llegada con el peso que le asigna el sistema de inferencia difuso (Tabla 5.5). Los valores en rojo señalan un cálculo erróneo de los candidatos a primeras llegadas.

Experimento N° 3:

En este experimento se le añade al experimento N° 2 el atributo: Distancia a una Función Guía.



Tabla 5.5: Candidatos a Primeras Llegadas calculados automáticamente y el valor asignado por el SID. Los recuadros rojos muestran candidatos erróneos.

# de Traza	Primeras Llegadas Calculadas Manualmente (ms)	Candidatos a Primeras Llegadas (ms)	Valor que el SID asigna a cada Candidato
1	34.355304	37.25	1
		42.25	0.5
		52	0.5
2	48.473373	48.25	0.66667
		50	0.5
		80.75	0.5
3	58.571991	59.5	0.66667
		60.5	0
		85.5	0
4	69.680473	69.75	0
		70.25	0
		71.25	0.5
5	76.749512	213.75	0.5
		217	0
		219.75	0
6	84.8284	85.25	0.66667
		86	0.5
		100	0.5
7	90.887573	92.5	0.66667
		93.5	0.5
		94.5	0.5
8	103.00592	101.25	0
		102.5	0
		103.5	0.5
9	110.074951	113.25	0.66667
		127.5	0.5
		128.25	0.5
10	118.153847	121.5	0.66667
		122.5	0.5
		124	0.5
11	125.222885	131.25	0
		132.25	0
		133	0.5
12	130.272186	6.5	0.5
		8.5	0.5755
		9.25	0.5432

Se ubica el tiempo de las primeras llegadas en las trazas de entrenamiento que en este caso fueron las trazas: 1, 3, 7, 10 y 12. Se construye una función a trozos con estos valores y luego se calcula la distancia de cada candidato a ésta función (Tabla 5.6). Este atributo luego es incorporado al sistema difuso como una variable de entrada y se le asocia una función de pertenencia (Figura 5.16).



Tabla 5.6: Atributos calculados para el disparo 01L2N incorporando el atributo Distancia Mínima

Atributos	Trazas											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Amplitud	0.09146 0.99296 0.34297	0.021663 0.025532 0.004642	0.012073 0.013648 0.0052493	0.011912 0.013103 0.013699	0.0098644 0.0006165 0.0024661	0.010368 0.01131 0.0094251	0.012821 0.020513 0.017949	0.010309 0.012887 0.018041	0.012077 0.0024155 0.0024155	0.010504 0.0084034 0.0084034	0.011407 0.0076046 0.0095057	0.28571 0.28571 0.14286
Pendiente de la envolvente	0.49748 5.0997 -3.6769	0.11598 0.021883 -0.11817	0.047512 0.0089084 -0.047512	0.020215 0.0067384 0.0033692	0.010463 -0.052314 0.010463	0.047985 0.0053316 -0.058648	0.043514 0.043514 -0.014505	0.029159 0.01458 0.029159	0.013664 -0.054656 0	0.011884 -0.011884 0	0.032263 -0.021509 0.010754	0.80812 0 -0.80812
Potencia Promedio	0.000419 0.049718 0.0556	2.44E-05 5.70E-05 5.81E-05	8.31E-06 1.76E-05 1.90E-05	1.27E-05 2.13E-05 3.07E-05	9.29E-06 9.31E-06 9.62E-06	5.60E-06 1.20E-05 1.20E-05	1.08E-05 3.19E-05 4.80E-05	9.63E-06 1.79E-05 3.42E-05	1.23E-05 1.25E-05 1.28E-05	1.26E-05 1.61E-05 1.96E-05	8.86E-06 1.17E-05 1.63E-05	0.0091837 0.013265 0.014286
Radio de Potencia	1.14E+05 55177 145.73	6.42E+01 2.80E+04 1.33E+03	5.52E+01 3.25E+01 5.79E+00	1.43E+01 5.46E+00 2.42E+00	7.91E+00 2.28E+00 1.22E+00	2.71E+02 5.50E+01 2.25E+00	3.65E+01 1.94E+01 4.73E+00	1.14E+01 1.07E+01 4.83E+00	4.40E+01 2.65E+00 1.17E+00	5.56E+00 2.91E+00 1.65E+00	2.25E+01 7.00E+00 2.37E+00	3.5 3 1.7778
Dist minima	0 5 14.75	2 3.75 18	0 1 1	0.25 1 1.5	0 0.5 0.75	0.75 1.25 1.75	0 1.25 1.25	0 0.75 1	2 2.75 4	0 1.25 1.75	0.25 0.75 1.25	0.007 0 0
Trazas de entrenamiento	1 0 0			1 0 0				1 0 0			1 0 0	0 1 1

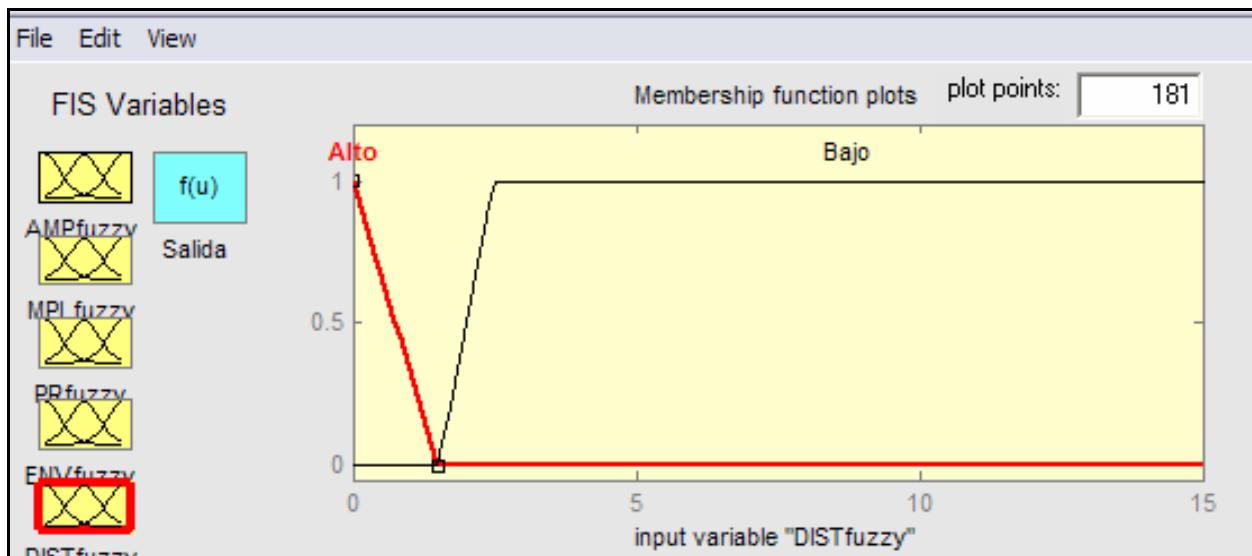


Figura 5.16: Función de pertenencia asociada al atributo Distancia a una Función Guía.

Debido a la forma de esta función de pertenencia, el sistema difuso otorga un valor mayor en peso a las distancias que se encuentran dentro de la función “Alto”, es decir, las distancias más cercanas a cero.



La generación de las reglas difusas para este experimento fue una ampliación de las ya realizadas en el Experimento N° 2 pero con la adición de la nueva variable (Distancia a una función Guía) (Figura 5.17).

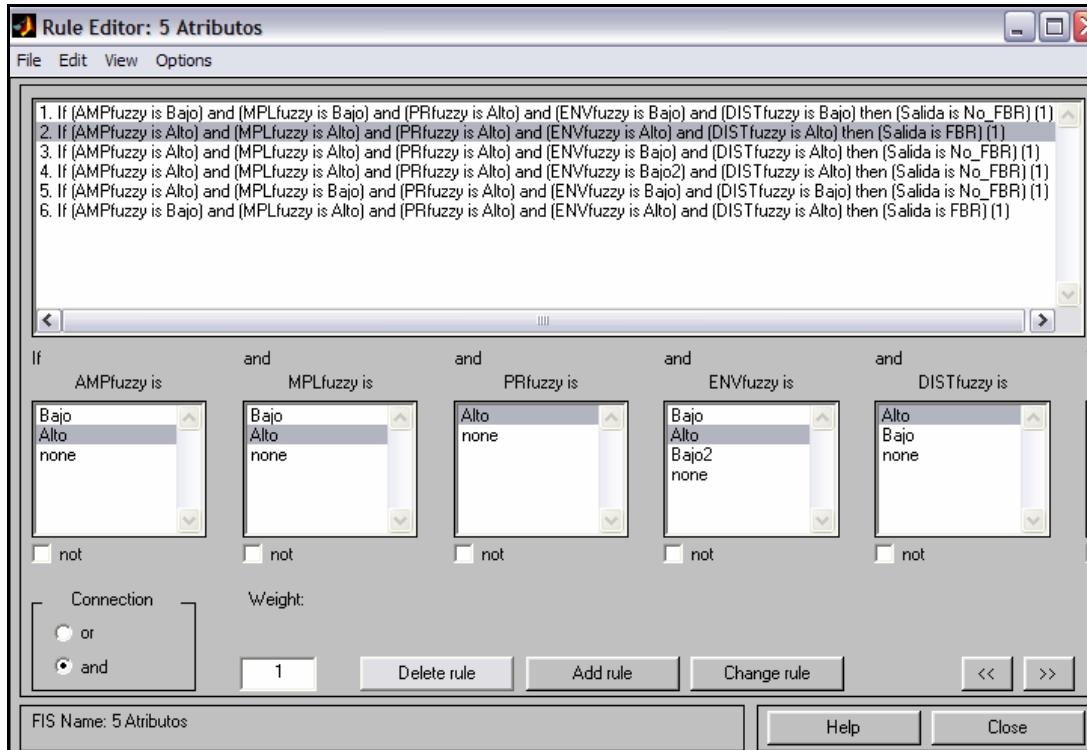


Figura 5.17: Ventana de creación y edición de Reglas Difusas Experimento N° 3.

Con la incorporación del atributo *distancia a una función guía* en el sistema de inferencia difusa (SID) se tiene una variable más para discriminar de una mejor manera los posibles candidatos a primeras llegadas. La Tabla 5.7 muestra los resultados del experimento 3.

Tabla 5.7: Resultados del Experimento Nº 3. Los recuadros en rojo muestran candidatos erróneos.

# de Traza	Primeras Llegadas Calculadas Manualmente (ms)	Candidatos a Primeras Llegadas (ms)	Valor que el SID asigna a cada Candidato
1	34.355304	37.25	1
		42.25	0.5
		52	0.5
2	48.473373	48.25	0.887
		50	0.5
		80.75	0.0020689
3	58.571991	59.5	0.887
		60.5	0
		85.5	0
4	69.680473	69.75	0
		70.25	0
		71.25	0.887
5	76.749512	213.75	0.5
		217	0.5
		219.75	0.5
6	84.8284	85.25	0.887
		86	0.5
		100	0
7	90.887573	92.5	0.887
		93.5	0.5
		94.5	0
8	103.00592	101.25	0
		102.5	0
		103.5	0.887
9	110.074951	113.25	0.887
		127.5	0
		128.25	0.0014907
10	118.153847	121.5	1
		122.5	0.00085127
		124	0
11	125.222885	131.25	0.5
		132.25	0
		133	0.887
12	130.272186	6.5	0.5
		8.5	0.5
		9.25	0.5

Este experimento se repitió para otro disparo “Dique08” (Figura 5.18), como umbral de amplitud se tomó el valor de la primera llegada calculada manualmente en la Traza 6 (0.021).

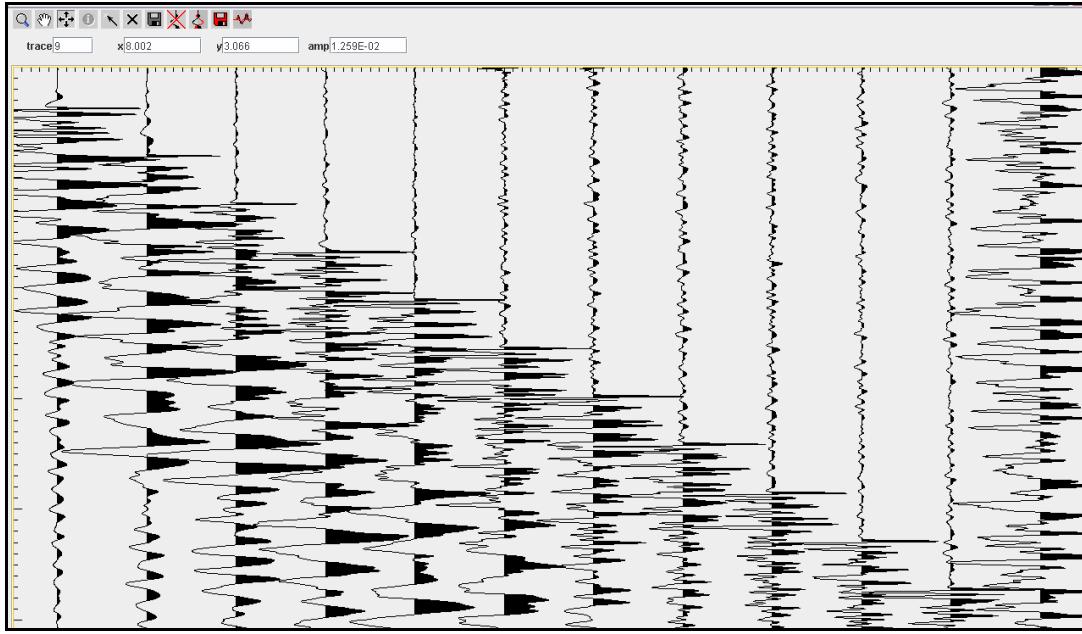


Figura 5.18: Disparo Dique08

Se tomó como Sistema de inferencia difusa el mismo utilizado para el disparo 01L2N, aunque se hicieron unas variaciones en los rangos de las funciones de pertenencia ya que los atributos calculados presentan otros valores (Tabla 5.8), pero se mantuvieron las reglas difusas.

Tabla 5.8: Atributos Calculados para el Disparo Dique08

Atributos	Trazas											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Amplitud	0.060699 0.094266 0.056876	0.032273 0.014878 0.033417	1 0.44916 0.20366	0.022328 0.022694 0.018302	0.021249 0.021893 0.022537	0.34428 0.2214 0.31484	1 0.59088 0.30895	0.020735 0.24599 0.22337	0.027368 0.030526 0.029474	0.04265 0.04265 0.041742	0.064935 0.073593 0.075758	0.43038 0.50633 0.5443
Pendiente de la envolvente	0.24262 0.18988 -0.21151	0.12171 -0.098403 0.10488	5.5999 -3.116 -1.3888	0.074541 0.0020706 -0.024847	0.10563 0.0036425 0.0036425	1.8803 -0.69509 0.52853	5.5868 -2.3143 -1.5949	0.03199 1.2743 -0.12796	0.023818 0.017864 -0.0059546	0.020533 0 -0.0051333	0.048977 0.048977 0.012244	0 0.42963 0.21482
Potencia Promedio	0.00020037 0.00064467 0.00080642	5.88E-05 6.99E-05 1.26E-04	5.00E-02 6.01E-02 6.22E-02	3.27E-05 5.84E-05 7.52E-05	2.32E-05 4.72E-05 7.26E-05	5.94E-03 8.39E-03 1.33E-02	5.00E-02 6.75E-02 7.22E-02	4.04E-05 3.07E-03 5.56E-03	8.64E-05 1.33E-04 1.76E-04	2.18E-04 3.08E-04 3.96E-04	4.09E-04 6.80E-04 9.67E-04	0.024804 0.037622 0.052436
Radio de Potencia	2.43E-01 0.18988 -0.21151	1.22E-01 -9.84E-02 1.05E-01	5.60E+00 -3.12E+00 -1.39E+00	7.45E-02 2.07E-03 -2.48E-02	1.06E-01 3.64E-03 3.64E-03	1.88E+00 -6.95E-01 5.29E-01	5.59E+00 -2.31E+00 -1.59E+00	3.20E-02 1.27E+00 -1.28E-01	2.38E-02 1.79E-02 -5.95E-03	2.05E-02 0.00E+00 -5.13E-03	4.90E-02 4.90E-02 1.22E-02	0 0.42963 0.21482
Dist minima	2.25 5.25 7.5	4.8333 6.1667 9.8333	7.3333 7.4167 9.1667	0.25 1.25 2	3.4167 4.6667 6.9167	4.9167 5.4167 6.1667	0 0.75 1.5	0.16667 0.66667 1.0833	3.8333 6.0833 7.3333	0 2 3	0.25 0.5 1.5	-0.079 0 0
Trazas de entrenamiento	1 0 0			1 0 0			1 0 0			1 0 0		0



Los resultados de aplicar el algoritmo de lógica difusa al disparo Dique08 se muestran en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9: Candidatos a primeras llegadas Calculados para el disparo Dique08

# de Traza	Primeras Llegadas Calculadas Manualmente (ms)	Candidatos a Primeras Llegadas (ms)	Valor que el SID asigna a cada Candidato
1	22.216963	12.5	0.0021708
		17.75	0.5
		25.25	0.0022992
2	29.285995	21.25	0.0010596
		32.25	0.00090468
		37.25	0
3	37.364891	4.5	0
		5.5	0
		7.25	0.5
4	43.424065	9.25	0
		10	0.5
		11	0.5
5	49.483234	3.75	0.5
		5	0.5
		6.25	0.5
6	59.581856	3.25	0.5
		4.5	0.5
		5.5	0.5
7	63.621304	2.25	0.5
		3	0.5
		4.5	0.5
8	72.71006	4.25	0.5
		4.75	0.5
		6	0.5
9	76.749512	2.75	0
		3.5	0
		4.5	0
10	87.857986	16.75	0.5
		17.5	0
		19	0.5
11	91.897438	27.75	0.5
		29.25	0.5
		31.25	0.5
12	99.976334	2.75	0.5
		4	0.5
		5	0.5



CAPÍTULO 6: TOMOGRAFÍA SÍSMICA

En este capítulo se describen todo los pasos involucrados en el proceso de inversión tomográfica, desde el cambio en el formato de los datos, la creación de un modelo previo y del arreglo de adquisición hasta aplicar el modulo de inversión y alcanzar la cantidad de iteraciones necesarias para obtener la convergencia deseada.

6.1. CASOS DE ESTUDIO:

6.1.1. Laguna 2 Norte

Datos:

En el proceso de adquisición los datos fueron almacenados en formato SEG2 pero para realizar el proceso de inversión se requiere que los datos estén en formato .SU (Seismic Unix); este cambio de formato se realizó con una función del JaTS “Convert SG2 to SU”. Luego que los 14 disparos (7 disparos y 7 contradisparos) fueron cambiados de formato se visualizaron para confirmar que no se había perdido información durante la conversión (figura 6.1).

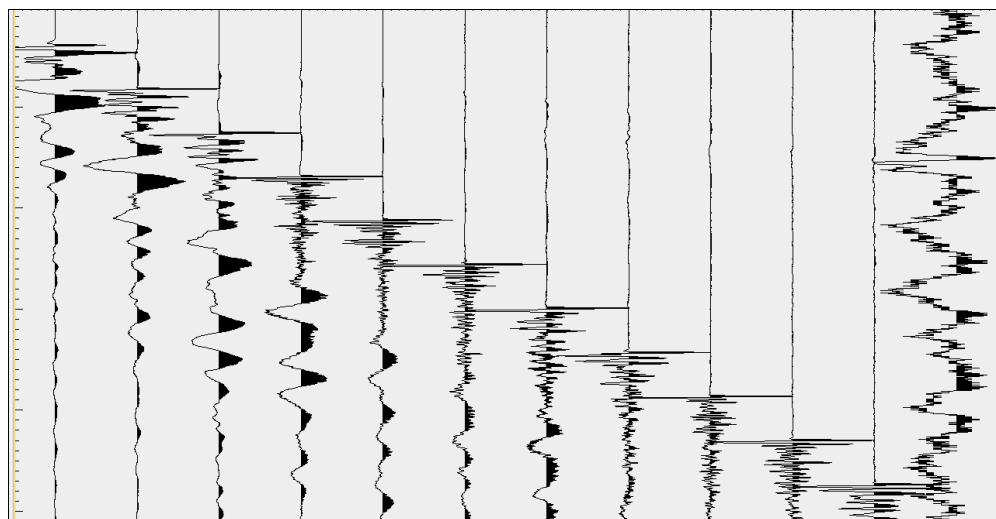


Figura 6.1: Disparo 01L2N



Creación de un modelo inicial:

El modelo preliminar a utilizar para la línea sísmica Laguna 2 Norte fue el resultante del modelado directo realizado para CVG-Tecmin por parte de USB-FUNINDES en Julio de 2005, el modelado se realizó con el software RAYINVR (Figura 6.2)

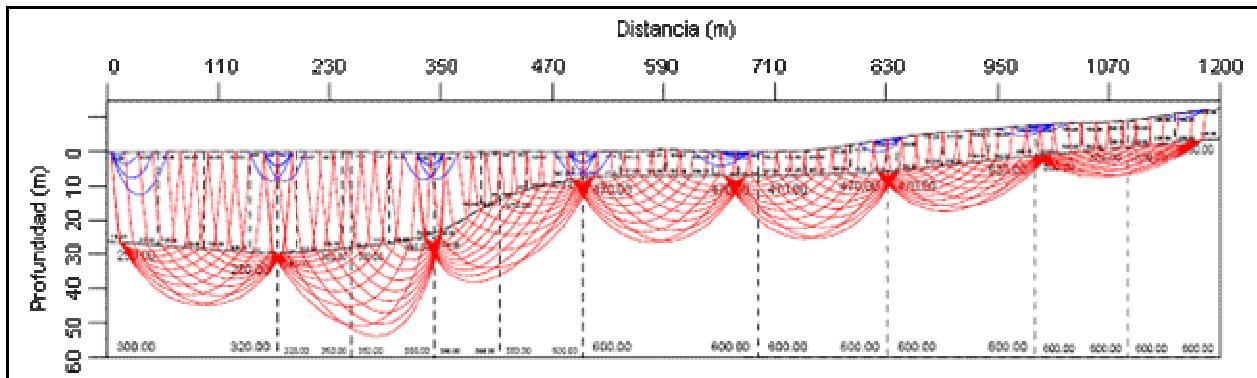


Figura 6.2: Modelo inicial Laguna 2 Norte. (Tomado de CVG-TECMIN y FUNINDES-USB, 2005)

A partir de este modelo se creó en JaTS el modelo inicial para la inversión; para esto se va al menú “Model”/Create a model, y una vez allí se especifica las dimensiones del modelo tanto en X como en Y, la frecuencia de la sísmica, las velocidades, densidades de las capas, etc. (Figura 6.3)

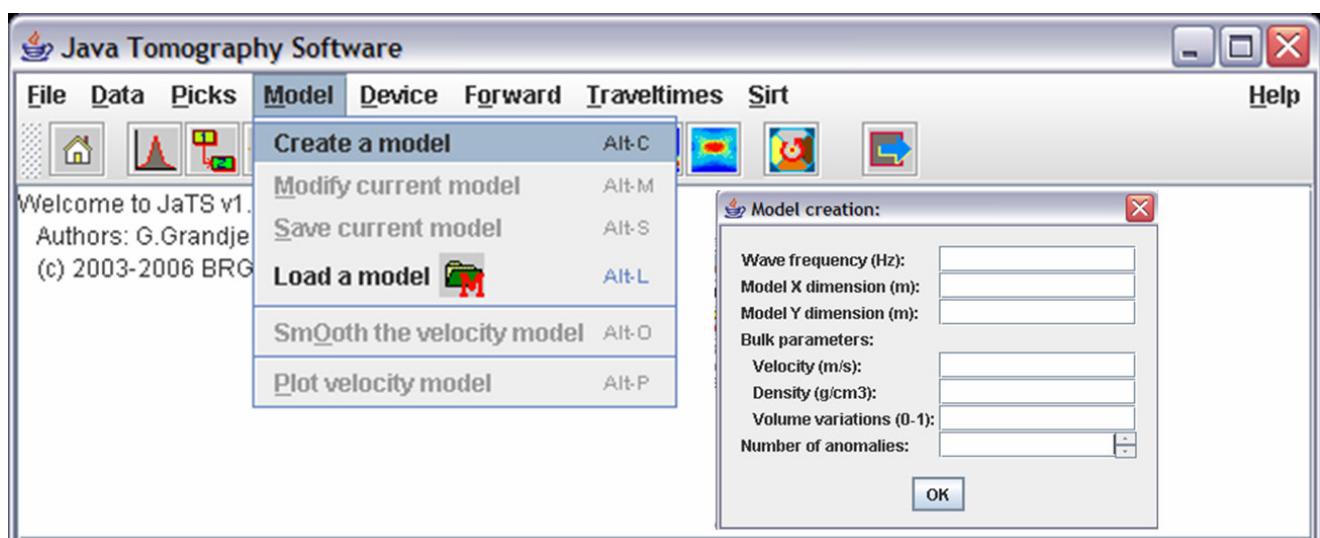


Figura 6.3: Creación de un modelo en JaTS



Con la ayuda del modelo generado en RAYINVR se reprodujo un modelo preliminar muy similar (Figura 6.4), cuyas características se presentan en la Figura 5.

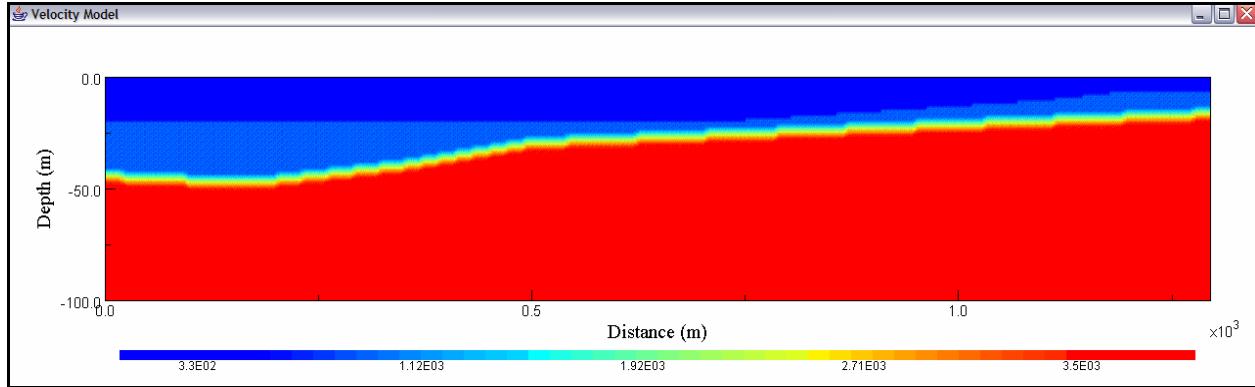


Figura 6.4: Modelo inicial Laguna 2 Norte, la velocidad de la primera capa se estableció en 1000m/s y la de la capa inferior en 3500m/s.

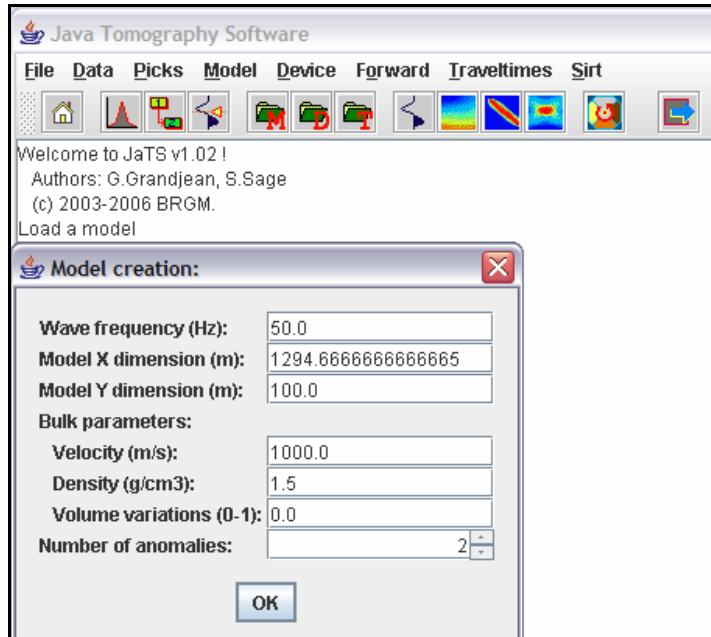


Figura 6.5: Parámetros del Modelo inicial Laguna 2 Norte.



Creación del dispositivo de adquisición:

El dispositivo de adquisición se creó siguiendo los parámetros y características del utilizado para la adquisición de los datos; para el perfil Laguna 2 Norte se adquirieron 1300 m de refracción distribuidos en 7 líneas, cada una de 2 perfiles (disparo y contradisparo). La creación del dispositivo se hizo mediante el menú “Device/ Create a device” (Figura 6.6).

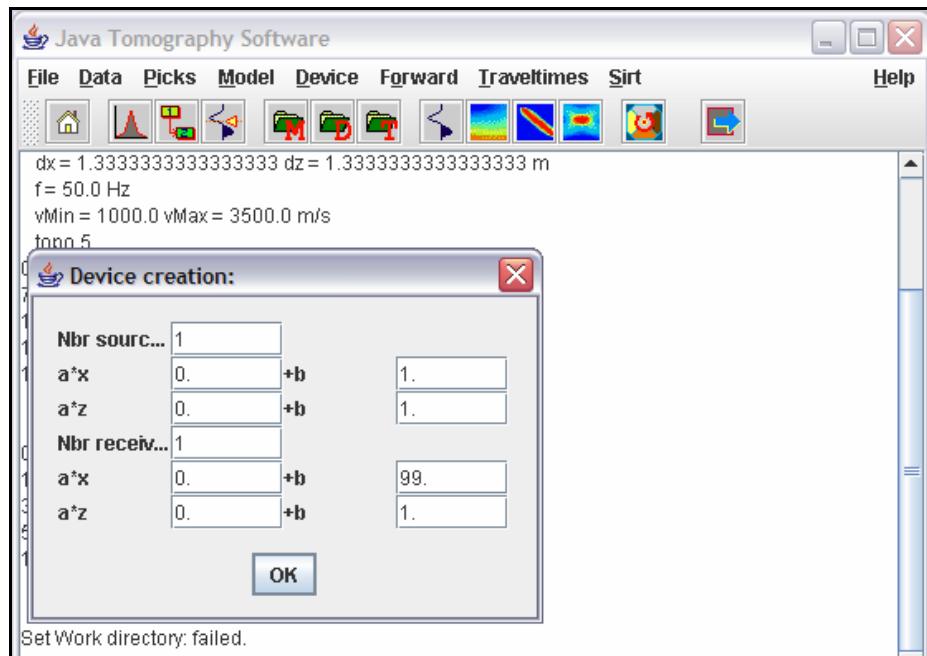


Figura 6.6: Ventana de Creación del Dispositivo de Adquisición

En dicha ventana se introduce el número de fuentes y receptores, así como la posición de cada fuente a lo largo del eje x y del eje y . La posición en el eje y se obtuvo de los perfiles de topografía para la Línea Laguna 2 Norte (Figura 6.7)

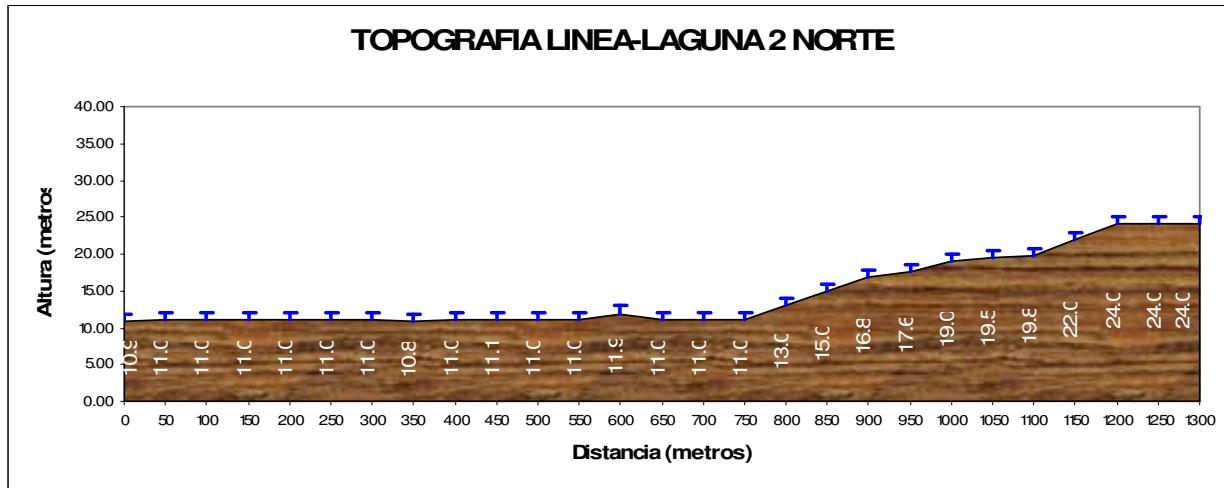


Figura 6.7: Topografía Laguna 2 Norte. (Tomado de CVG-TECMIN y FUNINDES-USB, 2005).

Creación de los archivos de Tiempos de Viaje:

Para la creación de los archivos de tiempo de viaje primero se deben cargar los datos del “picking” (primeras llegadas) para cada disparo; los cuales fueron calculados manualmente y tomados de los datos para el modelado directo realizado con RAYINVR para el informe preliminar realizado CVG-TECMIN y FUNINDES-USB, 2005.

Luego que los datos son cargados en el programa de inversión se crea un archivo que agrupa todas las primeras llegadas para los 14 disparos (7 disparos y 7 contra-disparos) en tiempos de viaje (.tvt) y se carga en el programa y luego se hace la verificación graficando los tiempos de viaje (Figura 6.8)

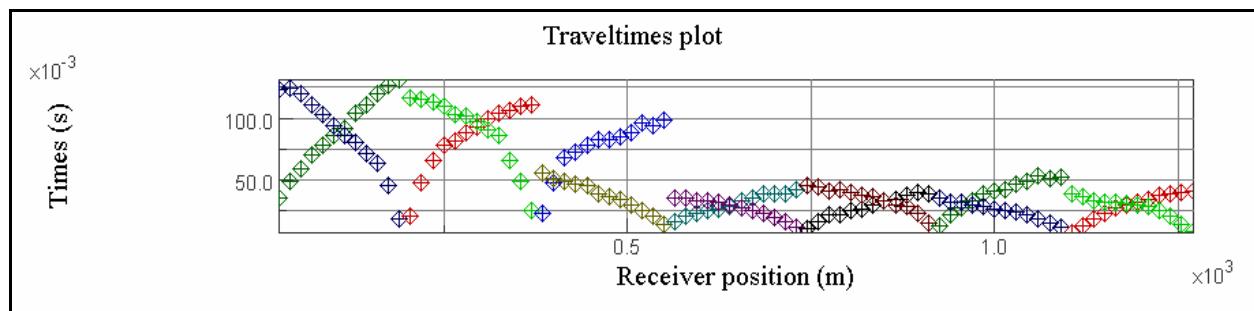


Figura 6.8: Grafico de los tiempos de viaje para la Línea Laguna 2 Norte



Modulo de Inversión Tomográfica SIRT

Una vez que se ha creado el modelo inicial, el dispositivo de adquisición y el archivo de tiempo de viaje, se procede a realizar la inversión tomográfica, para esto se ejecuta el SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) el cual nos permite realizar el proceso tomográfico.

Para ejecutar este módulo de inversión se va al menú SIRT/ Run SIRT y una vez allí se introducen una serie de parámetros necesarios para correr la inversión; estos parámetros comprenden: número de iteraciones, criterio de convergencia, precisión en la primera llegada y porcentaje (%) de actualización para las velocidades (Figura 6.9).

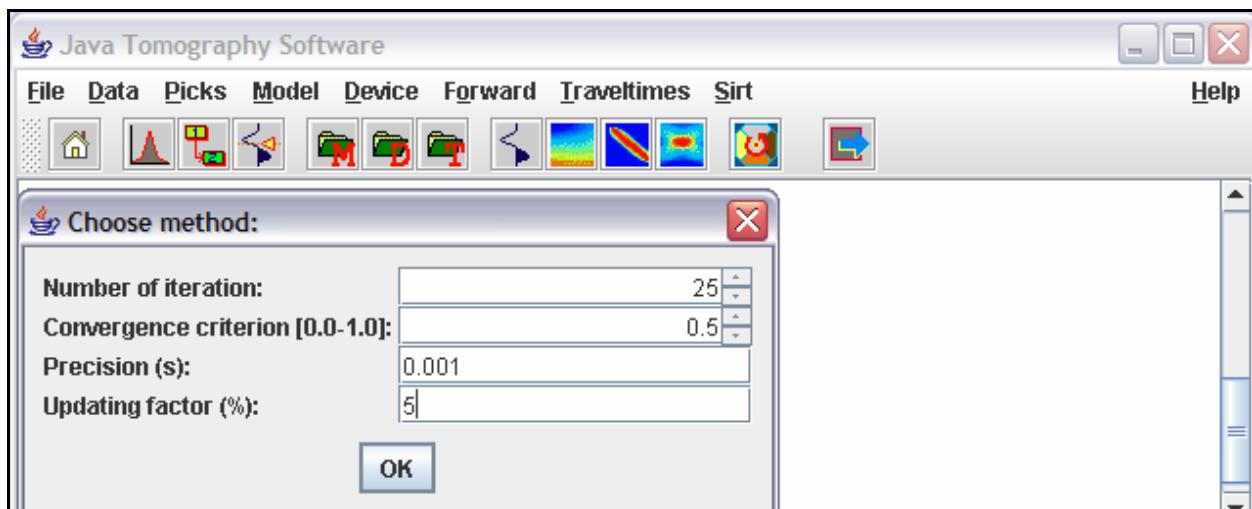


Figura 6.9: Parámetros a introducir en el Módulo de Inversión Tomográfica

Una vez que el programa de inversión empieza a iterar, el modelo original experimenta cambios de velocidades y espesores hasta alcanzar el criterio de convergencia establecido (Figura 6.10). El modelo final resultante de la inversión tomográfica se presenta en la Figura 6.11, para alcanzar este modelo se realizaron 97 iteraciones y la convergencia alcanzada fue de 4.90×10^{-13} (Figura 6.12)

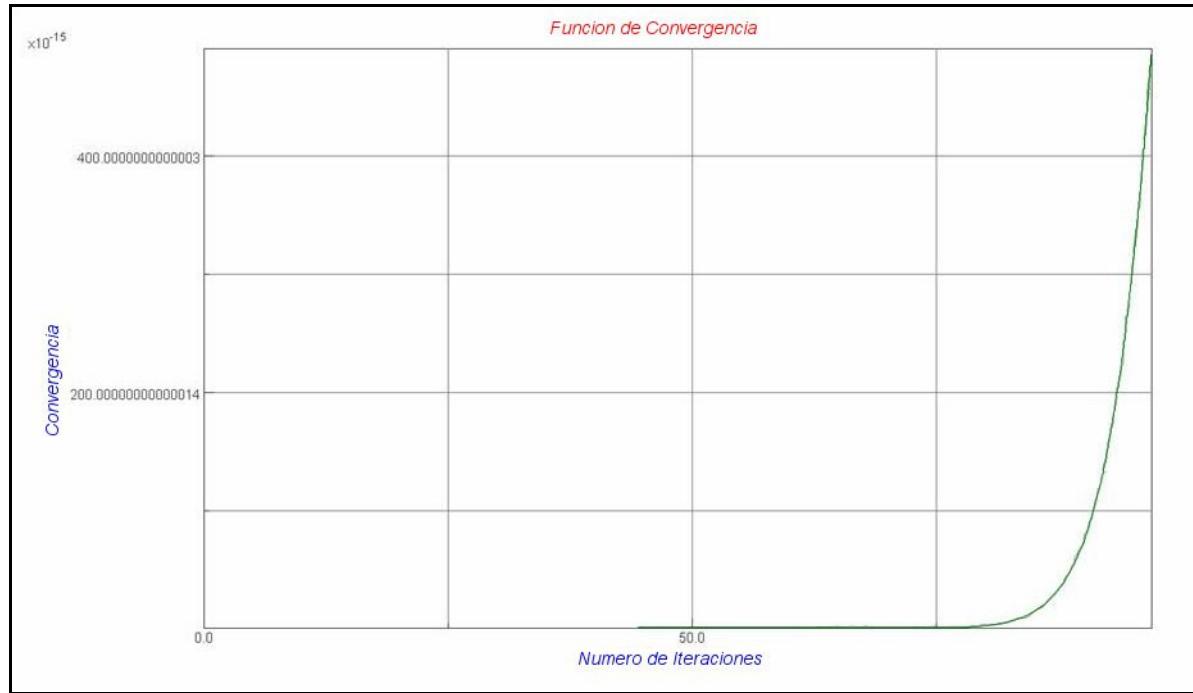


Figura 6.10: Función de Convergencia para 97 iteraciones

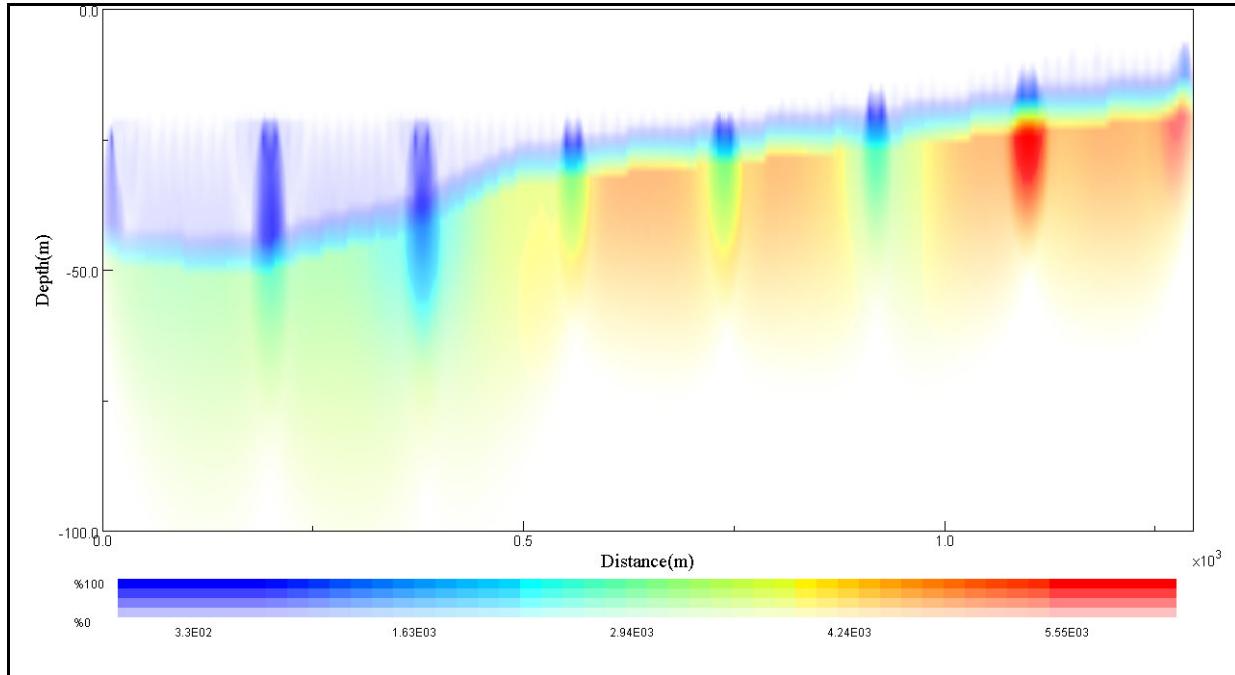


Figura 6.11: Modelo Final para la línea Laguna 2 Norte



```
ITERATION28
303.6551552900298 < a < 6341.3528364767935
Traveltimes computation ... OK.
Convergence : 2.9417457979880483E-13
ITERATION29
303.48835173676974 < a < 6346.586808850322
Traveltimes computation ... OK.
Convergence : 3.813354433871215E-13
ITERATION30
303.32494864496215 < a < 6351.761408254211
Traveltimes computation ... OK.
Convergence : 4.901260499515791E-13
***** Total number of iterations 97
Saving velocity model...
Saving likelihood function evolution...
```

Figura 6.12: Número Total de Iteraciones y Convergencia alcanzada.

6.1.2. Dique 3 Sur:

Para la realización del modelo de velocidades y espesores usando tomografía sísmica para esta línea se repitieron los mismos procedimientos que en el caso de la línea Laguna 2 Norte.

Creación del modelo inicial:

El modelo inicial este basado igual que en el caso anterior, en la salida del programa de modelado directo RAYINVR (Figura 6.13).

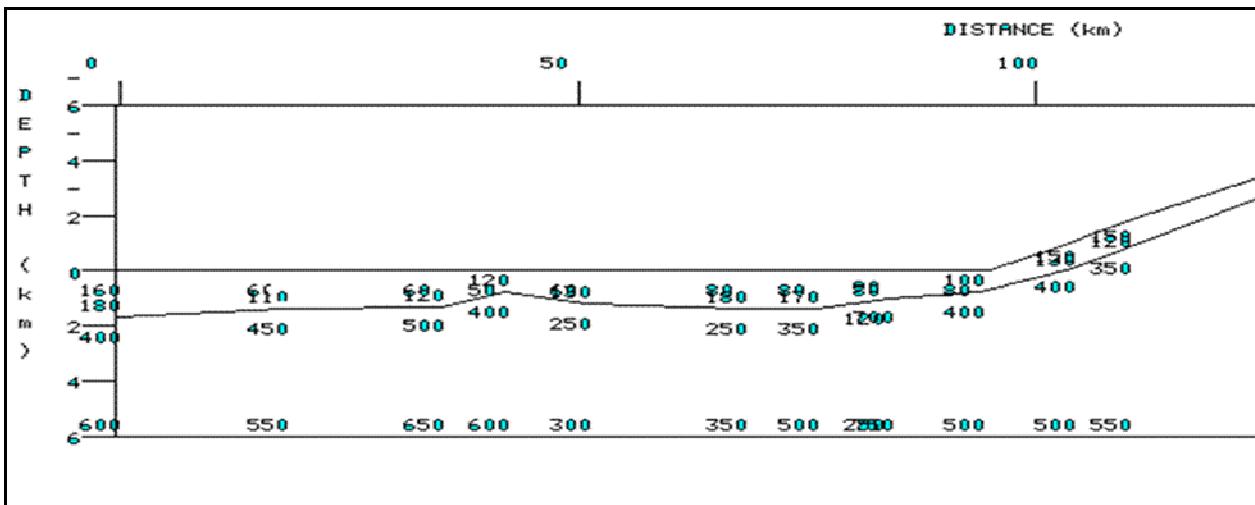


Figura 6.13: Modelo inicial Dique 3 Sur. Tomado de CVG-TECMIN y FUNINDES-USB, 2005



El modelo inicial que se generó en el programa JaTS para la inversión de la línea Dique 3 Sur se muestra en la Figura 6.14, las dimensiones de esta línea son similares a los de la línea Laguna 2 Norte, 1300 m de longitud y 100 m de profundidad.

Se creó un modelo de 2 capas, la capa superior con una velocidad de 900 m/s y la capa inferior con una velocidad de 3000m/s.

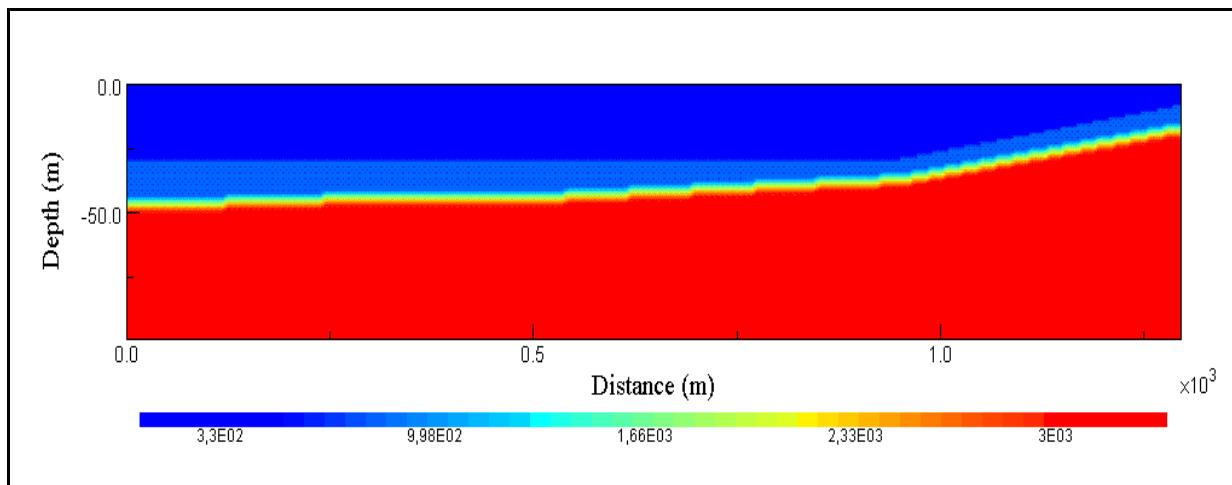


Figura 6.14: Modelo inicial para la Línea Dique 3 Sur. La velocidad de la primera capa se estableció en 900m/s y la de la capa inferior en 3000m/s.

Creación del dispositivo de adquisición:

Se utilizó el mismo dispositivo que para la línea Laguna 2 Norte en cuanto al número de canales y la separación entre fuentes, pero la topografía (Figura 6.15) fue extraída del informe preliminar CVG-TECMIN y FUNINDES-USB, 2005.

Creación de los archivos de Tiempo de Viaje:

De la misma manera que para el caso anterior, primero se cargaron los archivos correspondientes a las primeras llegadas calculadas manualmente y luego se genera el archivo de tiempo de viaje (Figura 6.16).

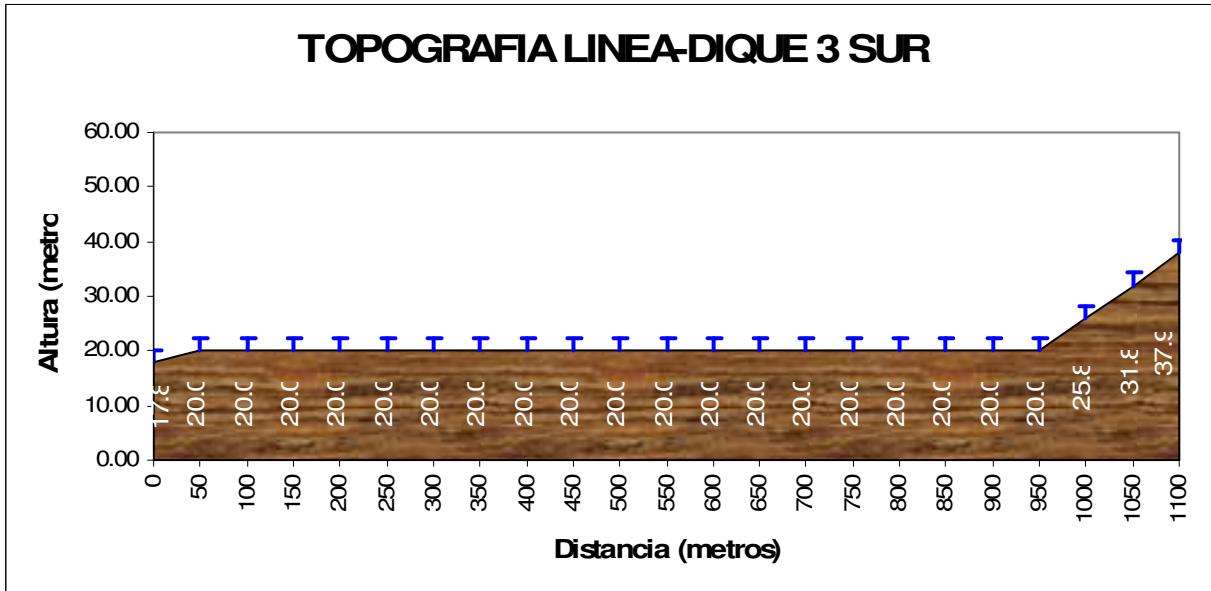


Figura 6.15: Topografía Dique 3 Sur. (Tomado de CVG-TECMIN y FUNINDES-USB, 2005).

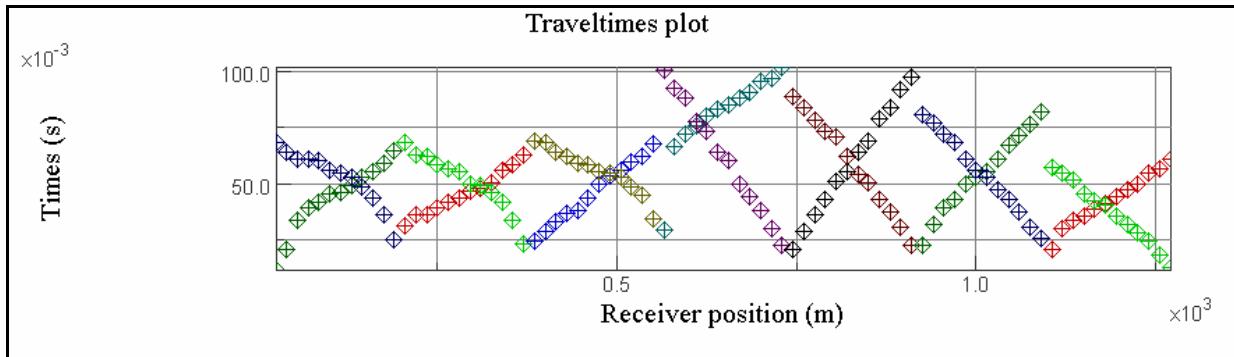


Figura 6.16: Grafico de los tiempos de viaje para la Línea Dique 3 Sur.

Modulo de Inversión Tomográfica SIRT :

Para el caso del Dique 3 Sur, la convergencia se obtuvo en menos iteraciones (85), los parámetros para correr la inversión fueron los mismos que para la línea Laguna 2 Norte. La convergencia se fijo en 0,5 y el % de actualización de las velocidades en 5%.

En la figura 6.17 se muestra el modelo final después de 85 iteraciones y con una convergencia de 2.08×10^{-7}

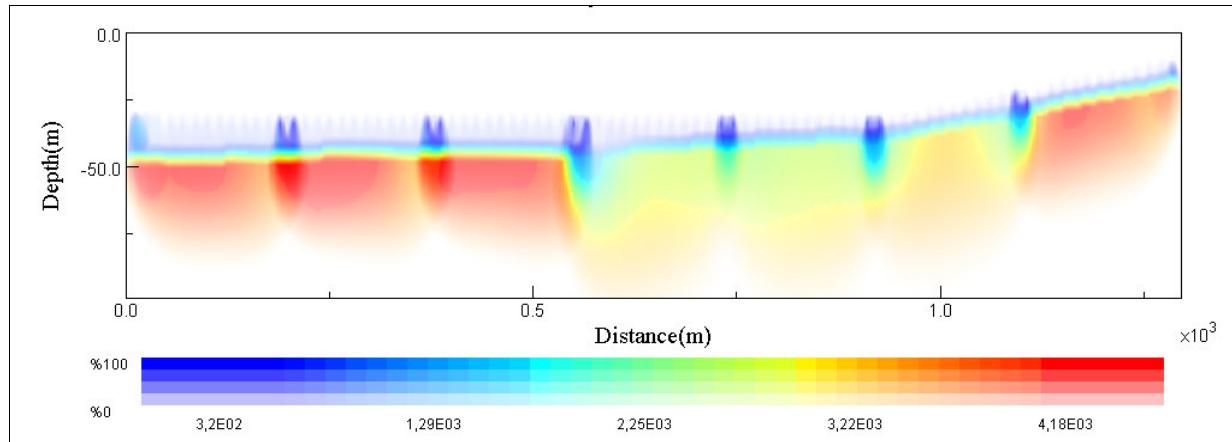


Figura 6.17: Modelo final para la línea Dique 3 Sur.

6.1.3. Pruebas Sintéticas:

En esta parte del capítulo se realizaron 2 experimentos sintéticos para analizar el proceso de refracción y de tomografía probando un dispositivo de adquisición de “cinco disparos”.

La creación de los modelos sintéticos se llevo a cabo en el programa JaTS; se generaron 2 modelos y se muestran en la figura 6.18 y 6.19. Luego de generar los modelos se diseño un dispositivo de adquisición de 5 disparos con la siguiente geometría: 190 m de longitud, 2 perfiles dobles (disparo y contra-disparo) a los extremos de la línea y un disparo central, 16 receptores separados 10 m entre ellos (Figura 6.20).

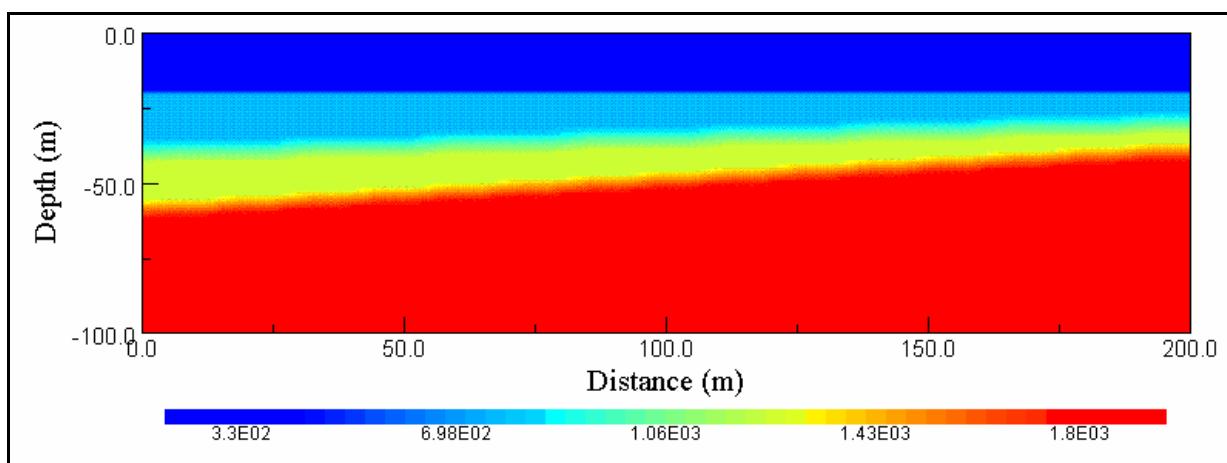


Figura 6.18: Modelo sintético de Capas Inclinadas (Modelo sintético I)



Para la generación de los registros sintéticos (Figura 6.21) se aplica la herramienta “Compute a seismic Shot” del programa JaTS. Luego se realizó la detección de las primeras llegadas con el mismo programa y se generaron los archivos de tiempo de viaje (Figura 6.24).

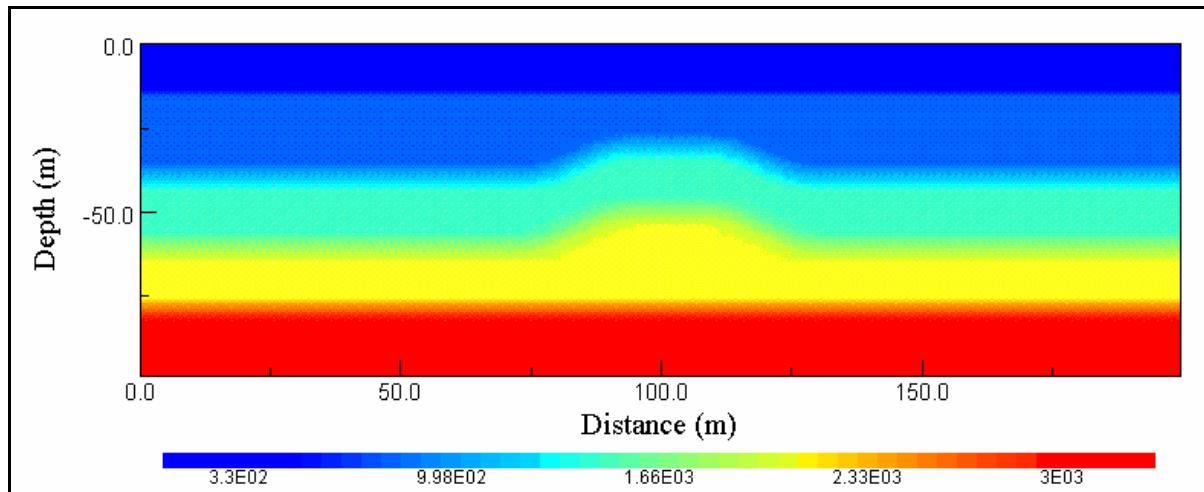


Figura 6.19: Modelo Sintético II

A partir de las curvas camino tiempo utilizando el método del “tiempo intercepto” se generaron modelos iniciales de velocidades y espesores, los cuales representan la entrada para el proceso de inversión tomográfica.

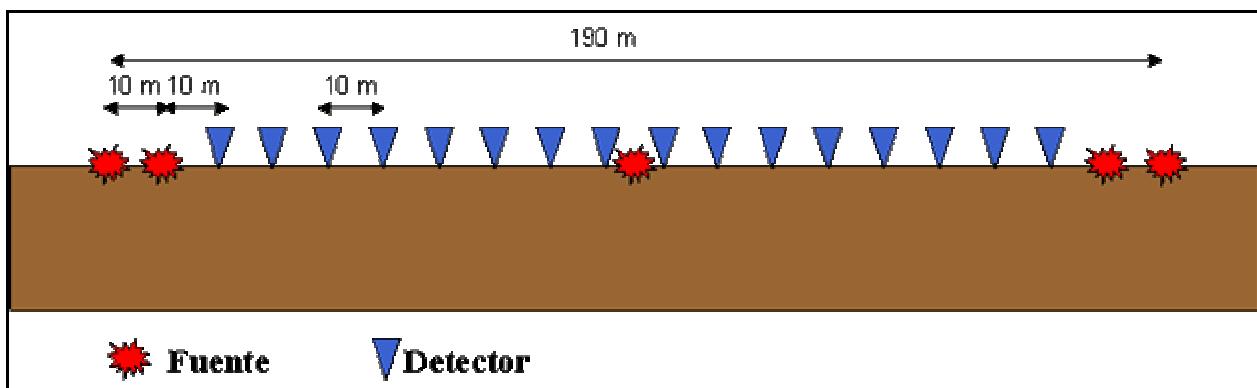


Figura 6.20: Dispositivo de Adquisición de 5 Disparos

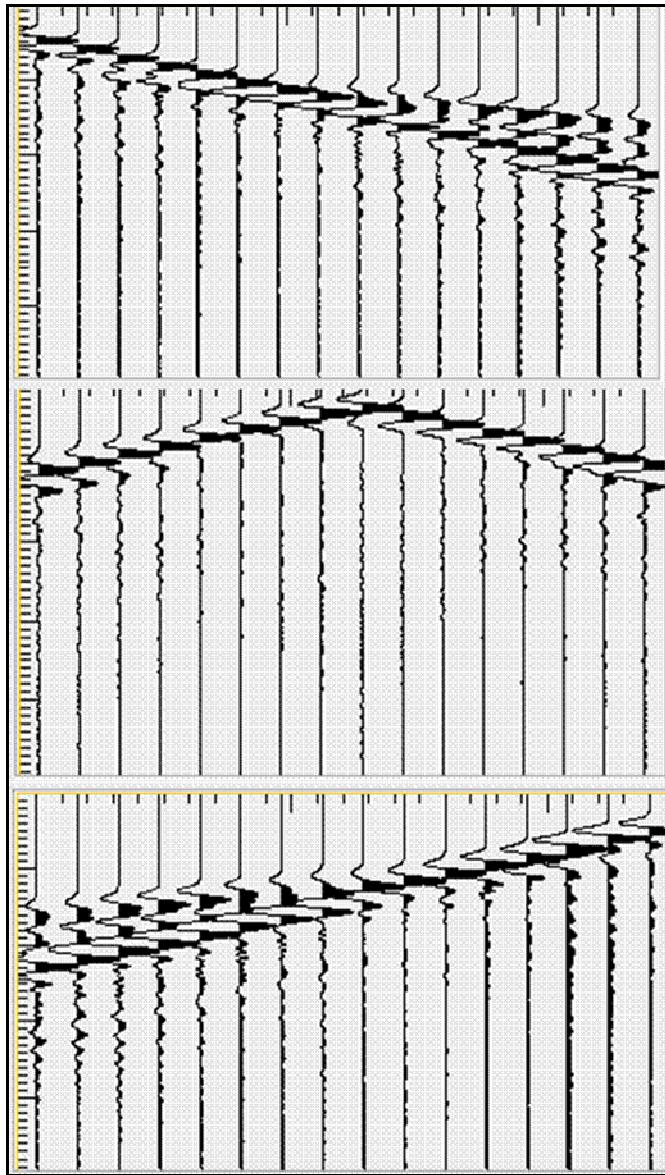


Figura 6.21: Disparos Sintéticos generados para el Modelo Sintético II

La idea de generar el modelo previo con las cinco curvas camino-tiempo era poder verificar el cálculo de las velocidades y profundidades, ya que con este diseño de adquisición se pueden corregir variaciones laterales en la velocidad y buzamientos. El resultado del cálculo de velocidades y profundidades para el Modelo Sintético I se muestra en la Tabla 6.1.

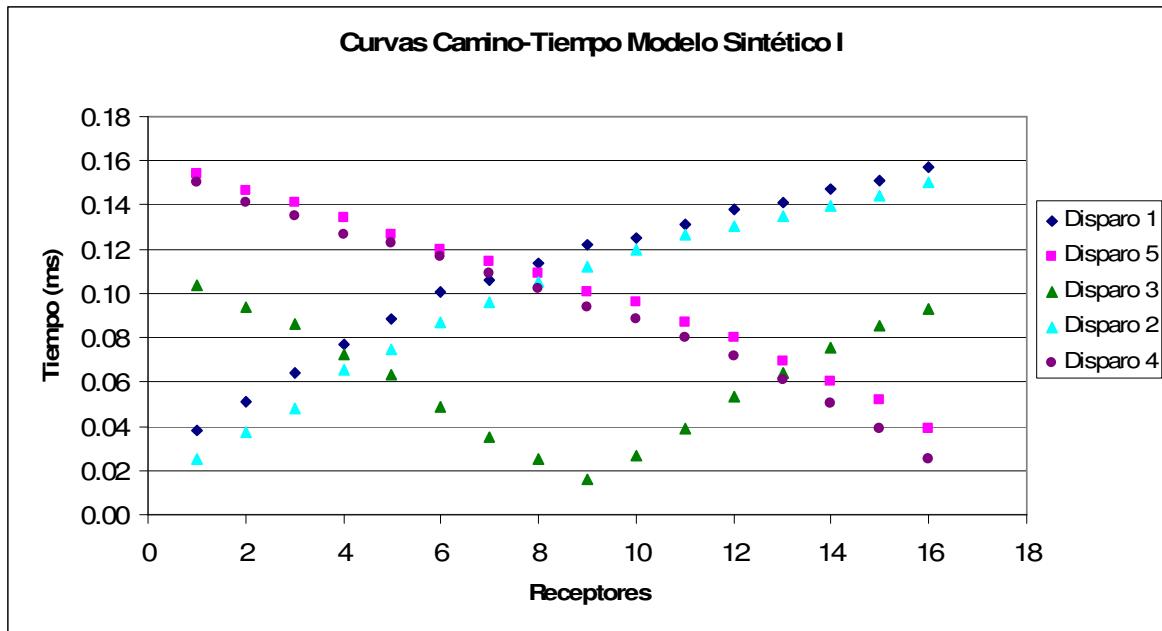


Figura 6.22: Curvas Camino-Tiempo Modelo Sintético I

Tabla 6.1: Velocidades y espesores calculados para el Modelo Sintético 1

V ₁	V ₂	V ₃	Z ₁	Z ₂
900 m/s	1100 m/s	1700 m/s	20 m	40 m

Con estos valores se construyó un modelo preliminar de capas planas y con velocidades muy similares al original (Figura 6.23). Luego de esto se procedió a la inversión

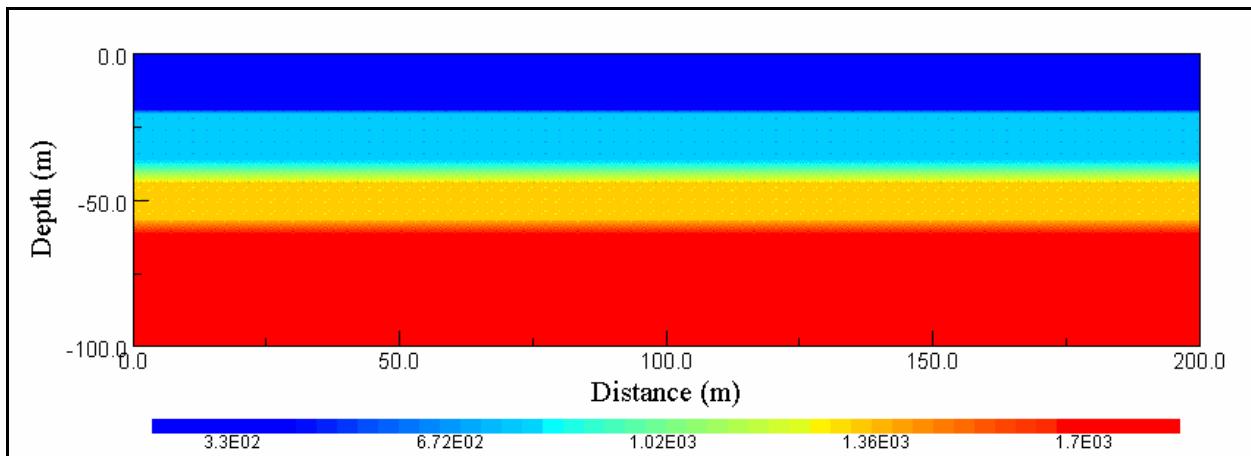


Figura 6.23: Modelo inicial para la inversión del Modelo Sintético I



El modelo final se muestra en la figura 6.24. Se alcanzó una convergencia de 7×10^{-7} , a pesar de que el modelo de entrada era de capas planas, por medio de la tomografía se logró una leve inclinación.

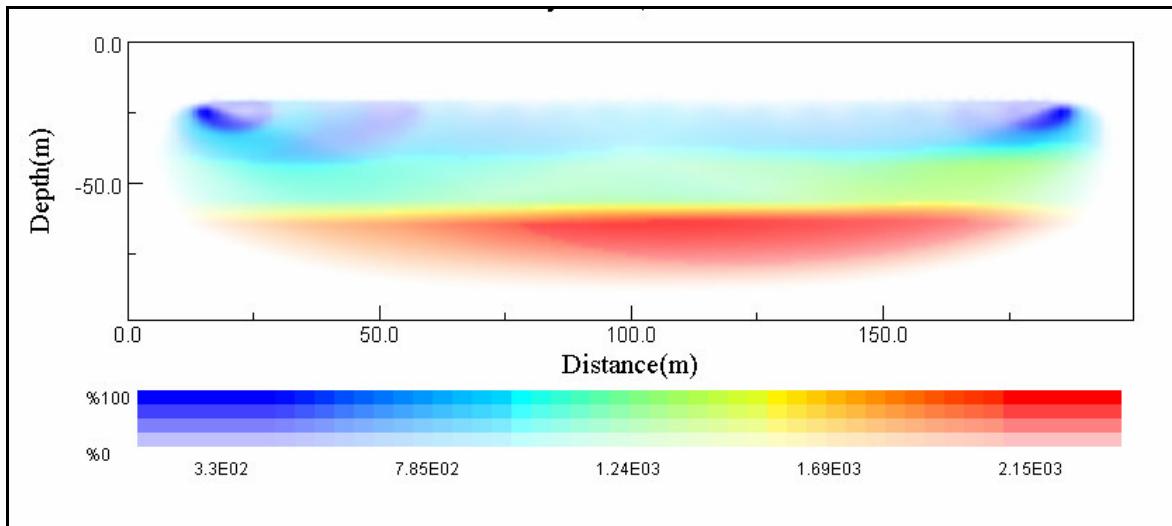


Figura 6.24: Modelo Final después de la inversión del Modelo Sintético I.

El otro modelo al cual se le aplicó la tomografía fue al Sintético II, al igual que para el caso anterior a partir del diseño de cinco disparos para la adquisición se logró generar un conjunto de curvas Camino-Tiempo de las cuales se obtuvo la información necesaria para realizar el cálculo de velocidades y espesores preliminares (Tabla 6.2) que servirían como entrada para la inversión, las curvas camino tiempo correspondientes a los primeros quiebres para este segundo modelo sintético se muestran en la figura 6.25.

Tabla 6.2: Velocidades y espesores para la creación del modelo inicial II

V ₁	V ₂	V ₃	Z ₁	Z ₂
950 m/s	1800 m/s	2500 m/s	25	45 m

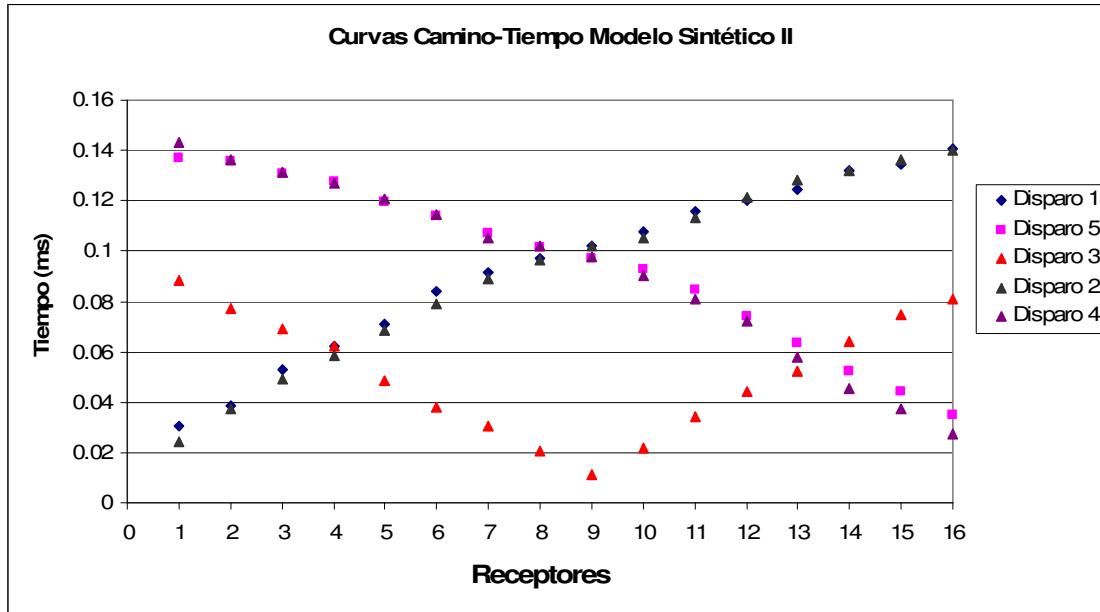


Figura 6.25: Curvas Camino-Tiempo Modelo Sintético II

El modelo inicial creado se muestra en la figura 6.26.

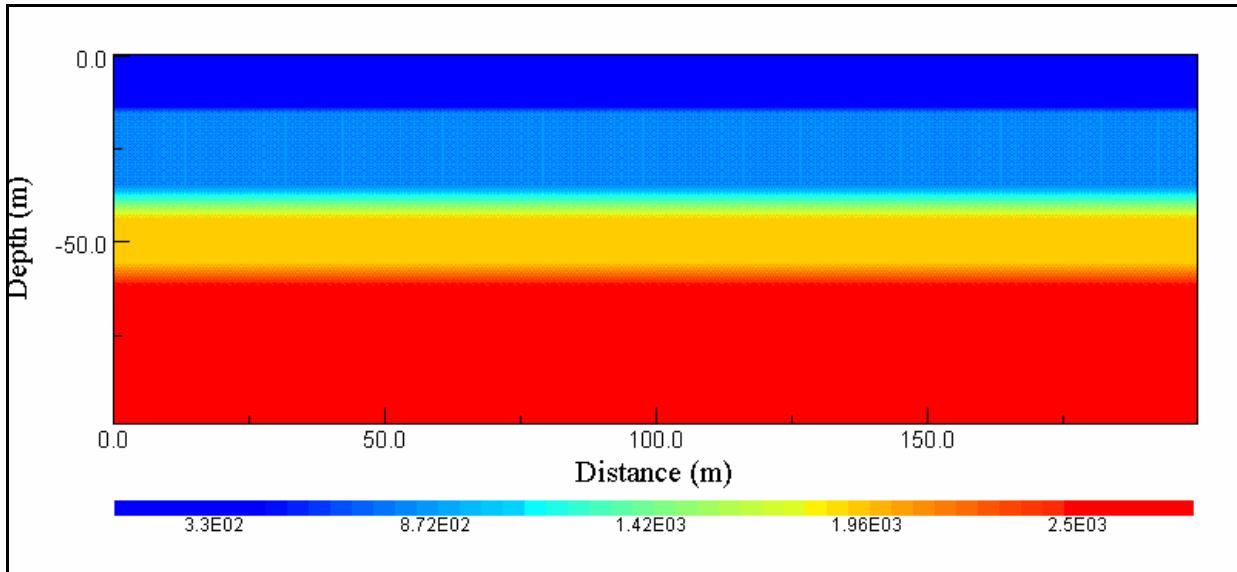


Figura 6.26: Modelo inicial para la inversión del Modelo Sintético II

Para este perfil se realizaron dos inversiones, una con el dispositivo de cinco disparos y otra con el dispositivo tradicional “disparo-contradisparo”. Luego de la primera inversión el



modelo final obtenido después de 137 iteraciones y con una convergencia de 0.192 se muestra en la figura 6.27:

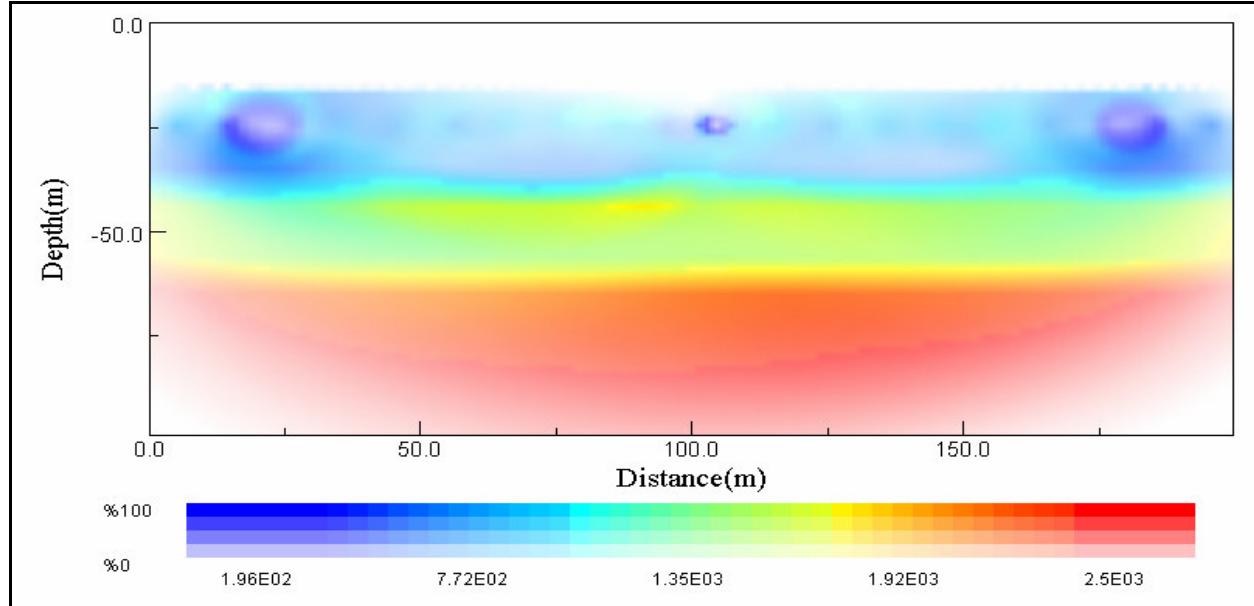


Figura 6.27: Modelo final invertido con 5 disparos.

El modelo final para la segunda inversión se obtuvo después de 200 iteraciones y se alcanzó una convergencia de 0,76 (Figura 6.28)

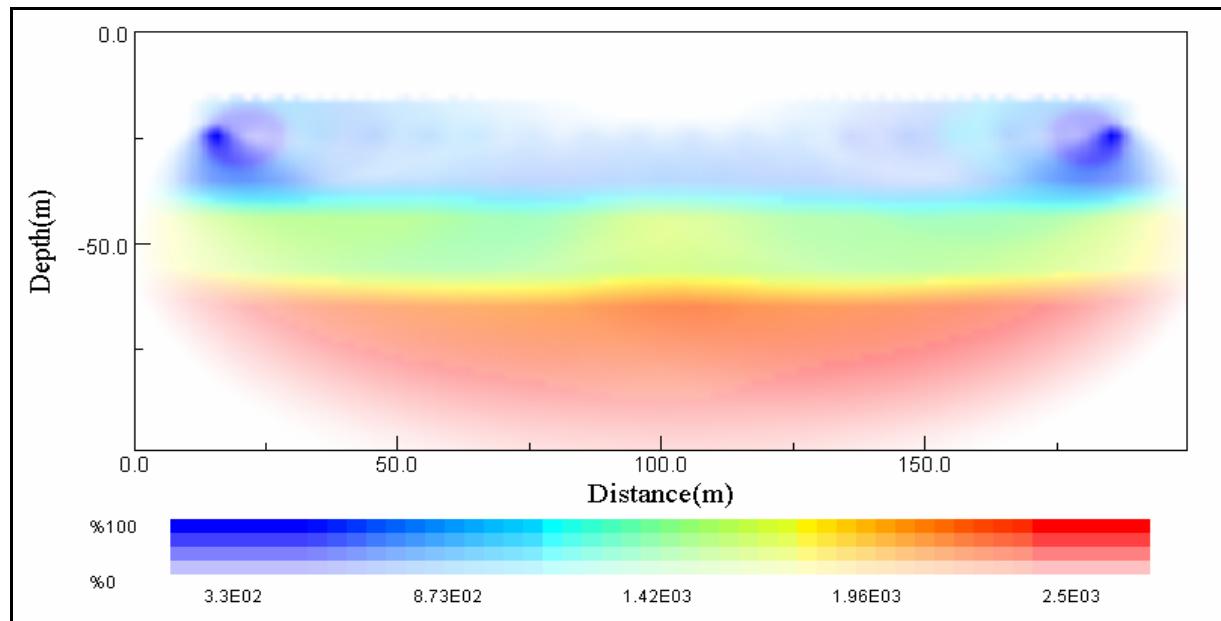


Figura 6.28: Modelo final invertido con el diseño tradicional (Disparo-Contradisparo)



CAPÍTULO 7: DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN

7.1. DETECCIÓN DE PRIMERAS LLEGADAS

7.1.1. *Experimento N° 1:*

En este experimento debido a que no se establece un umbral de amplitud, el programa detecta como candidatos a primeras llegadas los primeros 3 picos consecutivos con amplitud mayor a cero para cada traza; por lo tanto los supuestos candidatos a primeras llegadas tienen tiempos de arriba muy cercanos a cero.(Tabla 5.3)

7.1.2. *Experimento N° 2:*

Una vez ubicado el umbral de amplitud característico para una primera llegada en el registro se introduce al programa. Como resultado, los candidatos a primeras llegadas están muy cercanos a los calculados manualmente (Tabla 5.5) a excepción de los correspondientes a las trazas 5 y 12.

Para cuantificar la diferencia en milisegundos entre la primera llegada calculada manualmente y los candidatos calculados por el SID se creó la tabla 7.1. En ésta tabla se puede notar que en la mayoría de los casos el candidato al cual el SID le asigna el mayor valor es también el que en la resta tiene valor mas cercano a cero, a excepción de las trazas 4 y 11 y la 5 y 12.

Para las trazas 5 y 12 el cálculo de los posibles candidatos a primera llegada es erróneo, esto posiblemente se debe a que en estas trazas hay cierta cantidad de ruido con amplitud muy similar a la correspondiente a una primera llegada que el programa esta detectando como una auténtica primera llegada muy temprano en las trazas

**Tabla 7.1:** primera llegada calculada manualmente, candidatos calculados por el SID, valor que el SID asigna a cada candidato y resta entre las primeras llegadas calculadas manual y automáticamente

# de Traza	Primeras Llegadas Calculadas Manualmente (ms)	Candidatos a Primeras Llegadas (ms)	Valor que el SID asigna a cada Candidato	Resta entre los valores manuales y los calculados manualmente (ms)
1	34.355304	37.25	1	2.894696
		42.25	0.5	7.894696
		52	0.5	17.644696
2	48.473373	48.25	0.66667	-0.223373
		50	0.5	1.526627
		80.75	0.5	32.276627
3	58.571991	59.5	0.66667	0.928009
		60.5	0	1.928009
		85.5	0	26.928009
4	69.680473	69.75	0	0.069527
		70.25	0	0.569527
		71.25	0.5	1.569527
5	76.749512	213.75	0.5	137.000488
		217	0	140.250488
		219.75	0	143.000488
6	84.8284	85.25	0.66667	0.4216
		86	0.5	1.1716
		100	0.5	15.1716
7	90.887573	92.5	0.66667	1.612427
		93.5	0.5	2.612427
		94.5	0.5	3.612427
8	103.00592	101.25	0	-1.75592
		102.5	0	-0.50592
		103.5	0.5	0.49408
9	110.074951	113.25	0.66667	3.175049
		127.5	0.5	17.425049
		128.25	0.5	18.175049
10	118.153847	121.5	0.66667	3.346153
		122.5	0.5	4.346153
		124	0.5	5.846153
11	125.222885	131.25	0	6.027115
		132.25	0	7.027115
		133	0.5	7.777115
12	130.272186	6.5	0.5	-123.772186
		8.5	0.5755	-121.772186
		9.25	0.5432	-121.022186

7.1.3. Experimento N° 3:

Luego de insertar el atributo distancia a una función Guía, como otra variable en el sistema de inferencia difusa para el disparo L2N los candidatos a primeras llegadas fueron los mismos que en el Experimento N° 2, es decir, este atributo no interviene en el proceso de



escogencia de los candidatos; el proceso de escogencia de los candidatos depende únicamente del atributo amplitud.

En este experimento se muestra que cuando en el sistema difuso se introduce la variable distancia a una función guía éste modifica en algunos casos el peso que es asignado a cada candidato, aumentando o disminuyéndolo para que la discriminación sea más fácil (Tabla 5.7)

Cuando el experimento es repetido para el disparo Dique08 (Figura 5.18) los resultados de la Tabla 5.9 muestran que ningún candidato a primera llegada se corresponde con el calculo manual, esto podría atribuirse a que este disparo es muy ruidoso en la parte temprana del registro, observándose una especie de ruido de baja amplitud muy parecida a la de las primeras llegadas, por lo cual el sistema difuso las detecta y las muestra como posibles candidatos.

7.2. TOMOGRAFÍA SÍSMICA:

7.2.1. Laguna 2 Norte:

El resultado de esta inversión se aprecia en la figura 6.11, en este modelo de velocidades y espesores después de 97 iteraciones se alcanzó una convergencia de 4×10^{-13} . El modelo final es muy similar al obtenido con el programa de trazado de rayos y que se aprecia en la figura 6.2. En la primera capa los valores de velocidad parecen constantes en 1000 m/s, mientras que se observa una variación lateral de las velocidades de la segunda capa, desde el principio de la línea hasta los 500 m de longitud aproximadamente. Las velocidades están alrededor de los 3000m/s, después de los 500 m la velocidad de la segunda capa aumenta y se observan velocidades desde 4500 m/s hasta 5500 m/s en un punto anómalo. Este punto anómalo podría ser adjudicado a alguna intrusión. En este modelo también se aprecia un adelgazamiento de la primera capa que va desde aproximadamente 25 m en el inicio de la línea hasta 10 m en el final.



7.2.2. Dique 3 Sur:

El resultado final de la inversión tomográfica para este modelo se muestra en la figura 6.17, se alcanzo una convergencia de 2.08×10^{-7} en 85 iteraciones. En el modelo se nota claramente una zona de baja velocidad (aproximadamente 2800 m/s) en medio de una zona con velocidades de 4000 m/s aprox. Esta zona de baja velocidad podría estar relacionada a filtraciones en el dique provenientes de las lagunas 2 Norte y 3 Norte, que éste separa. Al igual que en el caso de la laguna este modelo también se parece mucho con su equivalente realizado con trazado de rayos.

En cuanto a los espesores de las capas, se muestra un adelgazamiento de la primera capa hacia el final de la línea mientras que el espesor de la segunda capa se mantiene relativamente constante (25 m aprox.)

7.3. MODELOS SINTÉTICOS:

7.3.1. *Modelo Sintético I:*

Aunque se eligió introducir un modelo inicial de capas planas (Figura 6.23) para la inversión, en el resultado final se puede observar una leve inclinación de las capas (Figura 6.24).reproducíendose de esa manera el modelo original. En cuanto a las velocidades, la 1^{era} capa muestra valores alrededor de los 800 m/s como el modelo original, lo mismo ocurre para la segunda capa, los valores de velocidades están entre 1200 y 1300 m/s. Para la tercera capa los valores de velocidad resultante de la inversión son más elevados que para el caso original, 1800m/s para el modelo original mientras que el modelo final de la inversión presenta valores de velocidad entre los 1900 y 2150 m/s.



7.3.2. **Modelo Sintético II:**

Para este modelo sintético mostrado en la figura 6.19 se hicieron 2 inversiones, la primera con el arreglo de 5 disparos diseñado (Figura 6.20) y la segunda con el diseño tradicional (Disparo-Contradisparo).

En el resultado de la primera inversión (Figura 6.27) se muestra un modelo de 3 capas, aunque en la parte central del modelo se pueden diferenciar las 4 capas del modelo original; en cuanto a los “lomos” presentes en las capas 2 y 3 del modelo original, en el modelo final se presentan ondulaciones en la topografía de la capa 2, no solo en el centro como en el modelo original. En cuanto a los valores de velocidades para cada una de las capas son bastante parecidos al modelo original y aunque se puede diferenciar una 4^{ta} capa la velocidad aproximada de ésta es de 2500m/s mientras que en el modelo inicial era de 3000m/s.

Con respecto a la segunda inversión del Modelo Sintético II realizada con el dispositivo tradicional de adquisición (Disparo-Contradisparo) se puede apreciar que el modelo resultante (Figura 6.28) es un modelo más suave que el resultante de la inversión anterior, la topografía de la capa 2 muestra una ondulación en el centro lo cual reproduce el “lomo” del modelo original, igual ocurre en la capa 3 donde la ondulación es menor pero es reconocible. Al igual que en la inversión anterior, a pesar de que el modelo inicial tenía 3 capas (figura 6.26), en el modelo final se puede diferenciar las 4 capas del modelo original; pero como en la inversión anterior la velocidad de esta 4^{ta} capa es menor que en el modelo original.



CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE PRIMERAS LLEGADAS:

El algoritmo basado en lógica difusa para la detección de primeras llegadas es una herramienta muy útil para el reconocimiento de los primeros quiebres; aunque el buen desempeño del programa está condicionado a la cantidad de ruido presente en el registro, sobre todo si el ruido tiene amplitudes similares a las correspondientes a las primeras llegadas, como se evidenció en el Experimento N° 3, donde los candidatos a primera llegada para el disparo correspondiente a la Línea 2 Norte fueron calculados y se corresponden con los obtenidos manualmente; mientras que para un disparo ruidoso como el Dique 08 los candidatos a primera llegada fueron calculados erróneamente.

Para trabajar con registros ruidosos se recomienda aplicarle cierto procesamiento o filtrado para tratar de reducir el ruido presente en las trazas, además se pueden hacer modificaciones al programa aumentando el número de trazas de entrenamiento, lo que lo haría más exacto en la elección de las primeras llegadas, pero a la vez el proceso dejaría de ser automático y el trabajo del intérprete aumentaría considerablemente.

8.2. TOMOGRAFÍA SÍSMICA:

Los resultados obtenidos aplicando la inversión tomográfica a las líneas Laguna 2 Norte y Dique Sur 3 se corresponden con el modelado previo realizado con Trazado de Rayos. El proceso de inversión es muy útil para la visualización de las variaciones laterales de velocidad; como ocurrió en la línea Dique 3 Sur donde se nota una disminución considerable de la



velocidad de la segunda capa, hecho que puede atribuirse a filtraciones en el dique con fluidos provenientes de las lagunas separadas por éste.

Con la inversión de los modelos sintéticos se muestra que el programa Jats puede reproducir buzamientos y la presencia de ciertas estructuras a partir de modelos iniciales de capas planas y con un arreglo convencional de adquisición (Disparo-Contradisparo).

La geometría de adquisición de 5 disparos fue muy útil para la construcción de curvas Camino-Tiempo que servirían en la determinación de las velocidades y espesores de las capas para los modelos previos, pero el modelo invertido donde se utilizó este arreglo no resultó ser el que mejor reproducía el modelo original.



CAPÍTULO 9: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albano L, 1996, Inversión Tomográfica a lo Largo de Zonas de Fresnel. Proyecto de Grado.

Universidad Simón Bolívar.

Benson, R. C., Glaccum, R. A. y Noel, M. R, 1983. Geophysical Techniques for Surveying Buried Wastes and Waste Investigation. Report 68-03-3050 Environmental Monitoring System Laboratory. Office of Research and Development. US EPA, Las Vegas.

Bezada M, 2005, Modelado Bidimensional de la Corteza en la Zona de Colisión Caribe-Suramérica, Región Occidental de Venezuela (Estados Falcón y Lara). Proyecto de Grado. Universidad Simón Bolívar.

Boyd T, 1999, Introduction to Geophysical Exploration, Colorado School of Mines, Note Outline: Refraction.

Cerveny V y Soares J, 1992, Fresnel volume ray-tracing. Geophysics 57 (7), 902–915.

Chung-Kuang C y Mendel J, 1994, First Break Refraction Event Picking Using Fuzzy Logic Systems. IEEE Transactions on Fuzzy System, Vol. 2 NO.4

CVG-TECMIN y FUNINDES-USB, 2005, Informe Preliminar Geología Superficie Planta CVG Bauxilum.

Dines K y Lytle R, 1979, Computerized geophysical tomography. Proceedings of the IEEE 67 (7), 1065–1073.

Grandjean G y Sandrine S, 2004, JaTS: a fully portable seismic tomography software based on Fresnel wavepaths and a probabilistic reconstruction approach. Computers & Geosciences v30 p. 925-935



- Holzschuh, J, 2002**, Low-cost geophysical investigations of a paleochannel aquifer in the Eastern Goldfields, Western Australia. *Geophysics* 67 (3), 690-700.
- Jang R y Golley N, 1995** “*Fuzzy logia toolbox for use with Matlab*”. The Math Works Inc.
- López C, 2005**, Determinación de Primeras Llegadas en Datos VSP y Check Shots usando Lógica Difusa. Proyecto de Grado. Universidad Simón Bolívar.
- Meza R y Sánchez J, 2002**, Estudio Geotécnico para la Determinación de Fracturas en Diques en el Área 75 de Bauxilum – C.V.G., Operadora de Alúmina. XI Congreso Venezolano de Geofísica. SOVG. Caracas.
- PDVSA Intevep, 2006**, Código estratigráfico de las Cuencas Petroleras de Venezuela.
- Pérez R, 2005**, Procesado y Optimización de Espectros Raman Mediante Técnicas de Lógica Difusa: Aplicación a la Identificación de Materiales Pictóricos. Proyecto de Grado, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Redpath B, 1973**, Seismic Refraction Exploration for Engineering Site Investigation. Explosive Excavation Research Laboratory Livermore, California.
- Rosales C, 2001**, Sobre el Comportamiento Sísmico de los Depósitos de los Suelos del Área de Cañaveralejo, Cali, Colombia. Proyecto de Grado. Universidad del Valle. Santiago de Cali, Colombia.
- Sánchez R, 2004**, Lógica Difusa. Trabajo Optativo. Inteligencia en Redes de Comunicaciones. Universidad Carlos III de Madrid.
- Sethian J y Popovici A, 1999**, 3-D travelttime computation using the fast marching method. *Geophysics* 64 (2), 516-523.
- Zadeh L, 1965**, Fuzzy Sets. Department of Electrical Engineering and Electronics Research Laboratory, University of California, Berkeley, California.
- Zadeh L, 1994**, Soft Computing and Fuzzy Logic. University of California, IEEE Software.



Zadeh L, 1996, Fuzzy Logic = Computing with Words. IEEE Transactions on Fuzzy System, Vol. 4, NO. 2.