

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**GENERACIÓN DE UN MODELO DE VELOCIDAD 3D DE ONDAS DE
CORTE (V_s), INTEGRANDO MÉTODOS GEOFÍSICOS SOMEROS EN UN
BLOQUE DEL CAMPO JUNÍN, FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Vargas F. Romar A.
Para optar al Título
de Ingeniero Geofísico

Caracas, 2012

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

GENERACIÓN DE UN MODELO DE VELOCIDAD 3D DE ONDAS DE CORTE (V_s), INTEGRANDO MÉTODOS GEOFÍSICOS SOMEROS EN UN BLOQUE DEL CAMPO JUNÍN, FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Jesús González.
TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Jaime Azuaje.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Vargas F. Romar A.
Para optar al Título
de Ingeniero Geofísico

Caracas, 2012

ACTA DE APROBACIÓN

Caracas, 19 de junio de 2012

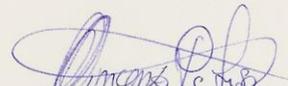
ACTA DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Romar Vargas, titulado:

“GENERACIÓN DE UN MODELO DE VELOCIDAD 3D DE ONDAS DE CORTE (V_s), INTEGRANDO MÉTODOS GEOFÍSICOS SOMEROS EN UN BLOQUE DEL CAMPO JUNÍN, FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Geofísico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.


Prof. José Cavada
Jurado


Prof. Vincenzo De Lisa
Jurado


Prof. Jesús González
Tutor Académico

DEDICATORIA

*A Dios por darme la fortaleza para seguir hacia adelante,
a mi madre por su amor y gran apoyo incondicional en todo momento,
a mi hermano por su ayuda en momentos difíciles,
a mi padre, mi hermana y mi novia por creer en mí.*

AGRADECIMIENTOS

A la ilustre Universidad Central de Venezuela por ser la casa de estudio que me permitió desarrollarme profesionalmente y al Departamento de Geofísica de la Facultad de Ingeniería por su apoyo.

A PDVSA Intevep por permitirme realizar este trabajo especial de grado en sus instalaciones.

Al Ing. Jaime Azuaje por haberme otorgado la oportunidad de formar parte de su grupo de trabajo y ser la persona guía en todo momento. Al Ing. Raúl Cova por todas las dudas aclaradas a lo largo de la tesis. A Henry Duque y su equipo por la adquisición de los datos.

Al Prof. Jesús González por haber aceptado ser mi tutor académico y brindarme toda su ayuda y esmero para realizar este trabajo.

A mi madre María Isabel por ser el pilar fundamental en mi vida, gracias por el amor y apoyo en todo momento. A mi hermano y gran amigo Adrián que siempre pude contar contigo en los momentos más difíciles. A mi padre Germán y a mi hermana Gerisbel por creer en mí y a mi novia Fabiana por su apoyo, amor y comprensión.

A mis amigos y colegas universitarios: Isaías, Napo, Melwin, Gerardo, Darwin, Luis, Orlando, Rubén, Wilmer (hueco), Angelvis, Gustavo (caballo), entre otros; gracias por su amistad y muestra de compañerismo.

Vargas F., Romar A.

GENERACIÓN DE UN MODELO DE VELOCIDAD 3D DE ONDAS DE CORTE (Vs), INTEGRANDO MÉTODOS GEOFÍSICOS SOMEROS EN UN BLOQUE DEL CAMPO JUNÍN, FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO

Tutor Académico: Prof. Jesús González. Tutor Industrial: Ing. Jaime Azuaje.

Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 2012, 113 p.

Palabras Claves: Dispersión de ondas *Rayleigh*, método MASW y método ReMi.

Resumen. Actualmente se están realizando nuevas metodologías para obtener una mejor imagen del subsuelo, utilizando la información de la velocidad de ondas de corte en la capa meteorizada, para el análisis de ondas convertidas; por tal razón, en esta investigación se plantea construir un modelo de velocidad 3D de ondas de corte (Vs) en las primeras capas del subsuelo mediante la integración de los métodos geofísicos someros de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) y sísmica de microtemores (ReMi), en un área aproximada de 4,608 km² en un bloque del campo Junín de la faja petrolífera del Orinoco.

En este trabajo se generaron 21 perfiles Vs por el método MASW, 21 perfiles Vs por el método ReMi y se realizó la integración mediante la inversión conjunta de los perfiles entre ambos métodos. Los perfiles Vs por MASW presentan un mejor detalle de las primeras capas del subsuelo con valores de velocidades más precisos, pero no alcanzan grandes profundidades, influenciados a las altas frecuencias; mientras que los perfiles generados por el método ReMi muestran baja resolución en las primeras capas, pero con profundidades mayores de investigación y velocidades Vs superiores, debido a que es un método que registra bajas frecuencias, las cuales penetran más en el subsuelo.

El modelo de velocidad 3D de ondas de corte (Vs) integrado por los métodos MASW y ReMi resulta ser el modelo óptimo para obtener las velocidades Vs de la zona en estudio, que los modelos generados al utilizar los métodos por separado, ya que es generado con la influencia tanto de bajas como altas frecuencias. Las velocidades en superficie más altas están hacia el noreste en un rango de 370 m/s a 420 m/s asociado a sedimentos de arenas de granos gruesos compactadas o gravas, las velocidades más bajas se presentan en el centro-norte con valores entre 200 m/s y 250 m/s, pudiendo ser arcillas, limos o arenas sueltas y las velocidades que predominan en la superficie están entre 270 m/s y 320 m/s aproximadamente, que pudiese corresponder a arenas de granos finos y medios. Los valores de Vs son directamente proporcionales a la profundidad, con un rango general de 270 m/s a 480 m/s aproximadamente, que pudiese representar a tipos de sedimentos desde arcillas hasta gravas muy duras de granos gruesos.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
ACTA DE APROBACIÓN.....	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS	xvi
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo general	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
1.3 Justificación.....	3
1.4 Ubicación del área en estudio	3
CAPÍTULO II. MARCO GEOLÓGICO	5
2.1 Cuenca oriental de Venezuela.....	5
2.2 Evolución geodinámica y tectónica de la cuenca oriental de Venezuela.....	6
2.2.1 Fase prerift (Paleozoico)	6
2.2.2 Fase rift	7
2.2.3 Fase de margen pasivo.	8
2.2.4 Sistema rumbo-deslizante y compresivo-transpresivo.....	9
2.3 Rasgos generales de la faja petrolífera del Orinoco.....	9
2.4 Síntesis estratigráfica	10
2.4.1 Formación Las Piedras (Terciario: Mioceno Tardío-Plioceno)	10
2.4.2 Formación Mesa (Cuaternario: Pleistoceno).....	11
CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO.....	12
3.1 Ondas sísmicas	12
3.1.1 Ondas de cuerpo.....	12
3.1.2 Ondas superficiales	13
3.1.2.1 Dispersión de ondas <i>Rayleigh</i>	14
3.2 Módulos elásticos.....	17

	Página
3.2.1 Relación de Poisson	18
3.2.2 Módulo de rigidez	18
3.2.3 Módulo de Young	18
3.2.4 Módulo de volumen	19
3.3 Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW)	19
3.3.1 Adquisición	21
3.3.1.1 Muestreo espacial.....	21
3.3.1.2 Muestreo temporal	23
3.3.2 Procesamiento	23
3.3.2.1 Curva de dispersión.....	24
3.3.2.2 Inversión de la curva de dispersión.....	24
3.3.3 Profundidad de investigación.....	25
3.3.4 Posibles problemas y errores.....	25
3.4 Sísmica de microtemores (ReMi)	26
3.4.1 Adquisición	27
3.4.1.1 Muestreo espacial.....	27
3.4.1.2 Muestreo temporal	28
3.4.2 Procesamiento	29
3.4.2.1 Análisis espectral de velocidad	29
3.4.2.2 Obtención de la curva de dispersión de las ondas <i>Rayleigh</i>	33
3.4.2.3 Modelado de la velocidad de ondas de corte	33
3.4.3 Profundidad de investigación.....	34
3.4.4 Posibles problemas y errores.....	35
CAPÍTULO IV. MARCO METODOLÓGICO	36
4.1 Descripción del área.....	36
4.2 Equipo utilizado para la adquisición de ambos métodos	36
4.3 Adquisición	37
4.3.1 Metodología de adquisición para el método MASW	39
4.3.2 Metodología de adquisición para el método ReMi	40
4.4 Procesamiento	41
4.4.1 Pasos para el procesamiento de los registros mediante el método MASW.....	42
4.4.2 Pasos para el procesamiento de los registros mediante el método ReMi.....	53
4.4.3 Pasos para la inversión conjunta entre el método MASW y el método ReMi.....	61
4.5 Metodología para la creación de modelos de velocidad de ondas de corte (Vs) en 3D mediante el programa <i>Gocad</i>	66
CAPÍTULO V. RESULTADOS Y ANÁLISIS	70
5.1 Registros de prueba con distintos tipos de fuente (mandarria de 20 lb y masa de 150 kg).....	70

	Página
5.2 Perfiles de velocidad de ondas de corte generados por los métodos MASW y ReMi.....	73
5.3 Perfiles de velocidad de ondas de corte obtenidos por los métodos MASW y ReMi con geófonos de distintas frecuencias (4,5 Hz y 10 Hz).....	75
5.3.1 Perfiles MASW de 4,5 Hz y 10Hz con <i>offset</i> mínimo de -2,5 m.....	75
5.3.2 Perfiles MASW de 4,5 Hz y 10Hz con <i>offset</i> máximo de 237,5 m.....	77
5.3.3 Perfiles ReMi de 4,5 Hz y 10Hz	78
5.4 Perfiles de velocidad de ondas de corte generados mediante la inversión conjunta entre los métodos MASW y ReMi	80
5.5 Modelo de velocidad 3D de ondas de corte (Vs) por el método MASW	84
5.6 Modelo de velocidad 3D de ondas de corte (Vs) por el método ReMi.....	86
5.7 Modelo de velocidad 3D de ondas de corte (Vs) integrado por los métodos MASW y ReMi	88
CONCLUSIONES	91
RECOMENDACIONES	94
BIBLIOGRAFÍA	95
APÉNDICES.....	98

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1. Ubicación nacional, campo Junín y bloque Petrocedeño dentro de la faja petrolífera del Orinoco (tomado y modificado del informe técnico de división Junín PDVSA 2008).	4
Figura 2.1. Cuencas petrolíferas de Venezuela basada en la distribución de sus provincias sedimentarias (Schlumberger, 1997)	5
Figura 2.2. Mapa de distribución de terrenos alóctonos en el norte de Sudamérica, en los cuales hay rocas paleozoicas (Schlumberger, 1997)	7
Figura 2.3. Distribución de las rocas jurásicas en Venezuela (Schlumberger, 1997)...	8
Figura 2.4. Distribución de las facies sedimentarias dominantes al norte del cratón de Guayana durante el Cretácico Temprano (Schlumberger, 1997).....	8
Figura 2.5. Marco geológico regional para la sedimentación en el flanco norte de la cuenca oriental de Venezuela durante el Oligoceno (Schlumberger, 1997)	9
Figura 3.1. Onda P (tomado y modificado de Hayashi, 2003).....	13
Figura 3.2. Onda S (tomado y modificado de Hayashi, 2003).....	13
Figura 3.3. Onda <i>Love</i> (tomado y modificado de Hayashi, 2003)	14
Figura 3.4. Onda <i>Rayleigh</i> (tomado y modificado de Hayashi, 2003).....	14
Figura 3.5. Concepto de dispersión en la transmisión de las ondas <i>Rayleigh</i> (Granda et al., 2005).....	15
Figura 3.6. Dispersión de ondas <i>Rayleigh</i> en medio heterogéneo (tomado y modificado de Hayashi, 2003).	16
Figura 3.7. a) Diagrama de velocidad de fase <i>versus</i> frecuencia; b) Curva de dispersión. (En ambas se muestra el modo fundamental, el modo superior y el ruido) (tomado y modificado de Hayashi, 2003).	17
Figura 3.8. Esquema del desplazamiento definido por el módulo de rigidez o cizalla (G) (Manilla, 2003)	18
Figura 3.9. Esquema del desplazamiento definido por el módulo de Young (E) (Manilla, 2003).....	19

	Página
Figura 3.10. Esquema del cambio de volumen definido por el módulo de Bulk (K) (Manilla, 2003).....	19
Figura 3.11. Técnica MASW (Linares, 2005)	20
Figura 3.12. Diversos tipos de dispositivos para la ejecución de las medidas por el método ReMi (Granda <i>et al.</i> , 2005).	28
Figura 3.13. Esquema del procesado de los registros con el método ReMi (Granda <i>et al.</i> , 2005).	29
Figura 4.1. Algunos equipos utilizados en la adquisición: a) Sismógrafo Geometrics Stratavisor XP de 48 canales, batería de 12 v y cables, b) geófonos de 4,5 Hz (rojos) y 10 Hz (azules), c) mandarina de 20 lb, d) masa de acero de 150 kg y e) vehículo pick-up con estructura metálica	37
Figura 4.2. Área en estudio (perfiles representados por las líneas rojas).....	39
Figura 4.3. Esquema de procesamiento de datos de MASW y ReMi	41
Figura 4.4. Módulo <i>Surface Wave Analysis Wizard</i> de <i>SeisImager</i>	42
Figura 4.5. Ventana para seleccionar el método de fuente activa 1D MASW	42
Figura 4.6. Módulo <i>Pickwin</i> de <i>SeisImager</i>	42
Figura 4.7. Ventana de <i>Pickwin</i> versión 4.2.0.0.....	42
Figura 4.8. Registro con <i>offset</i> de -2,5 m	43
Figura 4.9. Registro con <i>offset</i> de 237,5 m	44
Figura 4.10. Valor máximo de velocidad y frecuencia de las ondas superficiales para la transformación a la velocidad de fase-frecuencia para MASW	44
Figura 4.11. Gráfico de velocidad de fase <i>versus</i> frecuencia y ventana donde se introduce el valor mínimo y máximo de frecuencia para MASW.	45
Figura 4.12. Máximas amplitudes de cada frecuencia representadas por puntos rojos para MASW.	46
Figura 4.13. Generación de la curva de dispersión con <i>offset</i> de -2,5 m para MASW	47
Figura 4.14. Curva de dispersión con un <i>offset</i> de -2.5 m.....	48
Figura 4.15. Curva de dispersión con un <i>offset</i> de 237,5 m.....	48

	Página
Figura 4.16. Promedio de frecuencias de las curvas de dispersión con <i>offset</i> de -2,5 m y 237,5 m.....	48
Figura 4.17. Curva de dispersión original para MASW	48
Figura 4.18. Configuración de la calidad de la curva de dispersión para MASW	49
Figura 4.19. Curva de dispersión definitiva para MASW.....	49
Figura 4.20. Creación del modelo inicial Vs para MASW	50
Figura 4.21. Modelo inicial Vs para MASW	51
Figura 4.22. Curva de dispersión adquirida por MASW (línea roja), curva de dispersión calculada por el programa (línea negra) y el error RMSE, antes de realizar la inversión	51
Figura 4.23. Selección del número de iteraciones para realizar la inversión para MASW.	51
Figura 4.24. Perfil Vs para MASW.....	52
Figura 4.25. Curva de dispersión adquirida por MASW (línea roja), curva de dispersión calculada por el programa (línea negra) y el error RMSE, después de realizar la inversión	52
Figura 4.26. Archivo “.txt” con los valores del perfil Vs para MASW	52
Figura 4.27. Ventana para seleccionar el método de fuente pasiva (Microtremor) 1D MAM.....	53
Figura 4.28. Selección de los datos de entrada para ReMi.	54
Figura 4.29. Registro ReMi en el dominio de frecuencia.	55
Figura 4.30. Registro ReMi en el dominio de tiempo.....	55
Figura 4.31. Configuración de la geometría espacial para ReMi.....	56
Figura 4.32. Valor máximo de velocidad y frecuencia de las ondas superficiales para la transformación a la velocidad de fase-frecuencia para ReMi.	56
Figura 4.33. Gráfico de velocidad de fase <i>versus</i> frecuencia y ventana donde se introduce el valor mínimo y máximo de frecuencia para ReMi.....	57
Figura 4.34. Máximas amplitudes de cada frecuencia representadas por puntos rojos para ReMi.....	57

	Página
Figura 4.35. Generación de la curva de dispersión para ReMi	58
Figura 4.36. Creación del modelo inicial Vs para ReMi.....	59
Figura 4.37. Modelo inicial Vs para ReMi	59
Figura 4.38. Curva de dispersión adquirida por ReMi (línea roja), curva de dispersión calculada por el programa (línea negra) y el error RMSE, antes de realizar la inversión.....	59
Figura 4.39. Selección del número de iteraciones para realizar la inversión para ReMi.....	60
Figura 4.40. Perfil Vs para ReMi	60
Figura 4.41. Curva de dispersión adquirida por ReMi (línea roja), curva de dispersión calculada por el programa (línea negra) y el error RMSE, después de realizar la inversión.....	60
Figura 4.42. Archivo “.txt” con los valores del perfil Vs para ReMi	61
Figura 4.43. Módulo <i>WaveEq (Surface Wave Analysis)</i>	61
Figura 4.44. Selección del archivo de la curva de dispersión original obtenida por el método MASW.	62
Figura 4.45. Selección del archivo de la curva de dispersión original adquirida por el método ReMi.....	62
Figura 4.46. Promedio de frecuencias de las curvas de dispersión original obtenidas por MASW-ReMi.	63
Figura 4.47. Curva de dispersión original obtenida mediante MASW-ReMi	63
Figura 4.48. Eliminación de los datos de baja calidad de la curva de dispersión para MASW-ReMi.....	63
Figura 4.49. Creación del modelo inicial Vs para MASW-ReMi.....	64
Figura 4.50. Modelo inicial Vs para MASW-ReMi.....	64
Figura 4.51. Curva de dispersión adquirida por MASW-ReMi (línea roja), curva de dispersión calculada por el programa (línea negra) y el error RMSE, antes de realizar la inversión.....	64

	Página
Figura 4.52. Selección del número de iteraciones para realizar la inversión para MASW-ReMi.....	65
Figura 4.53. Perfil Vs para MASW-ReMi.	65
Figura 4.54. Curva de dispersión adquirida por MASW-ReMi (línea roja), curva de dispersión calculada por el programa (línea negra) y el error RMSE, después de realizar la inversión.....	65
Figura 4.55. Archivo “.txt” con los valores del perfil VS para MASW-ReMi.....	66
Figura 4.56. Distribución de los perfiles Vs mediante el programa <i>Gocad</i>	67
Figura 4.57. Superficie de topografía y superficie de máxima profundidad de los perfiles.....	67
Figura 4.58. Creación del <i>grid</i>	68
Figura 4.59. Generación del modelo de velocidad 3D de ondas de corte (Vs).....	69
Figura 5.1. Registro con mandarina de 20 lb.....	71
Figura 5.2. Registro con masa de 150 kg.....	71
Figura 5.3. Frecuencias del registro con mandarina de 20 lb	72
Figura 5.4. Frecuencias del registro con masa de 150 kg	72
Figura 5.5. Frecuencias del registro 47 con <i>offset</i> -2,5 m por el método MASW.....	73
Figura 5.6. Frecuencias del registro 47 por el método ReMi.....	74
Figura 5.7. Perfil Vs 47 con geófonos de 4,5 Hz obtenido mediante el método MASW	75
Figura 5.8. Perfil Vs 47 con geófonos de 4,5 Hz obtenido mediante el método ReMi.....	75
Figura 5.9. Perfil Vs prueba_1 con geófonos de 4,5 Hz obtenido por MASW (<i>offset</i> -2,5 m).....	76
Figura 5.10. Perfil Vs prueba_1 con geófonos de 10 Hz obtenido por MASW (<i>offset</i> -2,5 m).....	76
Figura 5.11. Perfil Vs prueba_2 con geófonos de 4,5 Hz obtenido por MASW (<i>offset</i> 237,5 m)	78

	Página
Figura 5.12. Perfil Vs prueba_2 con geófonos de 10 Hz obtenido por MASW (<i>offset</i> 237,5 m)	78
Figura 5.13. Perfil Vs prueba con geófonos de 4,5 Hz obtenido por ReMi.....	80
Figura 5.14. Perfil Vs prueba con geófonos de 10 Hz obtenido por ReMi	80
Figura 5.15. Perfil Vs 3 con geófonos de 4,5 Hz obtenido mediante el método MASW.	82
Figura 5.16. Perfil Vs 3 con geófonos de 4,5 Hz obtenido mediante el método ReMi.....	82
Figura 5.17. Perfil Vs 3 integrado de velocidad de ondas de corte obtenido mediante la inversión conjunta entre el método MASW y ReMi.....	83
Figura 5.18. Modelo de Vs 3D por el método MASW, a) vista 1 y b) vista 2	85
Figura 5.19. Modelo de Vs 3D por el método ReMi, a) vista 1 y b) vista 2.....	87
Figura 5.20. Modelo de Vs 3D integrado por los métodos MASW y ReMi, a) vista 1 y b) vista 2.....	89
Figura 5.21. Vistas de planta del modelo Vs 3D integrado	90

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW)	98
Tabla 2. Sísmica de microtremores (ReMi)	102
Tabla 3. Inversión conjunta entre los métodos MASW y ReMi	109

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

La faja petrolífera del Orinoco, fuente de reservas de hidrocarburos pesados y extrapesados más grande del mundo, está situada geográficamente en el extremo sur de la cuenca oriental de Venezuela, comprendida entre el norte del río Orinoco y el sur de los estados Guárico, Anzoátegui y Monagas; con una extensión de 55.314 km² y un área de explotación actual de 11.593 km².

El futuro del negocio petrolero a nivel mundial descansa en buena medida en base a la exploración sísmica. Es por ello que el país está invirtiendo en nuevas tecnologías geofísicas, principalmente en relación al método de sísmica de reflexión, que es el único método de prospección desde la superficie, que permite obtener información detallada del subsuelo mediante imágenes, y así poder estudiar y reconstruir las estructuras geológicas presentes a profundidades de interés económico.

Uno de los obstáculos que hay que superar para obtener imágenes de la geología del subsuelo es el efecto de las capas someras. Normalmente estas son capas de baja velocidad y con propiedades heterogéneas que resultan afectadas por la meteorización y la depositación de sedimentos, lo que contribuye a distorsionar la imagen de los estratos de interés más profundos. El método sísmico de exploración utiliza técnicas para contrarrestar los efectos mencionados anteriormente, conocidas en la industria como corrección estática.

En la actualidad, se están desarrollando nuevas metodologías a nivel mundial para obtener una mejor imagen del subsuelo, utilizando la información de la velocidad de ondas de corte en la capa meteorizada, para el análisis de ondas convertidas; que generan soluciones estáticas precisas (Soumya *et al.*, 2010). Por lo antes expuesto, esta investigación plantea construir un modelo de velocidad 3D de ondas de corte (Vs) en las primeras capas del subsuelo mediante la integración de los métodos geofísicos someros de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) y sísmica de microtremores (ReMi), en un área aproximada de 4,608 km² en un bloque del campo Junín de la faja petrolífera del Orinoco con el propósito de mejorar la obtención de imágenes de los estratos de interés para contribuir en el incremento de la producción de hidrocarburos y generar progreso y desarrollo socioeconómico en nuestro país, y a su vez aportaría información para calcular los parámetros geotécnicos de la zona con el fin de mitigar el riesgo geológico.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Proponer un modelo de velocidad 3D de ondas de corte (Vs), integrando métodos geofísicos someros en un bloque del campo Junín, faja petrolífera del Orinoco.

1.2.2 Objetivos específicos

- Comparar la señal de los registros adquiridos en términos de amplitud, frecuencia y relación S/R con distintos tipos de fuentes.
- Generar perfiles de velocidad de ondas de corte (Vs) para el método de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) y sísmica de microtremores (ReMi).

- Comparar los perfiles de velocidad de ondas de corte (Vs) con los métodos estudiados.
- Relacionar los perfiles de velocidad de ondas de corte (Vs) mediante MASW y ReMi con geófonos de distintas frecuencias naturales de vibración.
- Estudiar métodos de inversión conjunta para la generación de perfiles de velocidad de ondas de corte (Vs).

1.3 Justificación

La generación del modelo de velocidad 3D de ondas de corte (Vs) en las capas someras, es de suma importancia en el área del método de reflexión para el campo de procesamiento de los datos sísmicos, ya que permitiría calcular la corrección estática del área en estudio con ondas convertidas debido al aporte de velocidad de la onda S y así obtener la mejor señal posible del subsuelo para localizar zonas de mayor interés económico para la industria petrolera.

Con la información del modelo de velocidad de ondas de corte (Vs), se podría calcular los parámetros geotécnicos del suelo (módulo de Poisson, módulo de Young, módulo de resistencia al corte, etc.) y evaluar las condiciones para contribuir a mitigar el riesgo geológico y tener mayor confiabilidad sobre las futuras instalaciones de la industria petrolera que se pudiesen construir en la zona, garantizando la prolongación de su vida útil y por ende el incremento de su productividad.

1.4 Ubicación del área en estudio

La zona en estudio está ubicada en el Municipio José Gregorio Monagas del estado Anzoátegui, en un área aproximada de 4,608 km² en el bloque Petrocedeño del campo Junín de la faja petrolífera del Orinoco (figura 1.1).



Figura 1.1. Ubicación nacional, campo Junín y bloque Petrocedeño dentro de la faja petrolífera del Orinoco (tomado y modificado del informe técnico de división Junín PDVSA 2008).

CAPÍTULO II

MARCO GEOLÓGICO

2.1 Cuenca oriental de Venezuela

La historia geológica de la faja petrolífera del Orinoco está estrechamente ligada con la historia geológica de la cuenca oriental de Venezuela. Esta cuenca forma una depresión topográfica y estructural, que comprende los estados Guárico, Anzoátegui y Monagas, la extensión meridional del estado Sucre y el Delta Amacuro, y se prolonga hacia la plataforma Deltana y el sur de Trinidad, cubriendo un área aproximada de 170.000 km² (figura 2.1). Está limitada por el geotectoclinal de la cordillera de la Costa al norte, el estado Guayana al sur siguiendo la dirección del río Orinoco y al oeste, está separada de la cuenca de Barinas por el arco de El Baúl (González de Juana *et al.*, 1980).

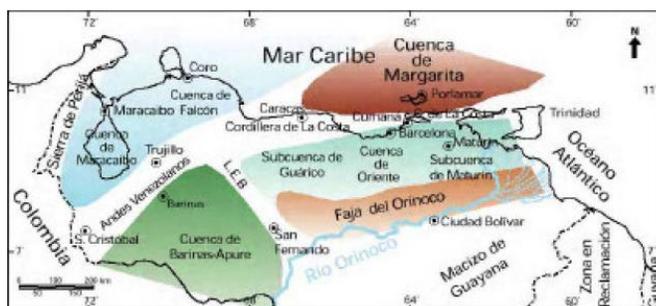


Figura 2.1. Cuencas petrolíferas de Venezuela basada en la distribución de sus provincias sedimentarias (Schlumberger, 1997).

Operacionalmente la cuenca ha sido subdividida en dos subcuencas debido a características sedimentológicas, tectónicas y estratigráficas que pueden ser diferenciadas entre ambas zonas. Estas subcuencas son las de Guárico y Maturín (González de Juana *et al.*, 1980).

La subcuenca de Maturín está ubicada al este de la cuenca oriental, es alargada de dirección N50°E paralela a la Serranía del Interior, asimétrica, posee un flanco sur

pasivo apoyado en el escudo de Guayana y un flanco norte activo. Además la región ha recibido sedimentos casi de forma ininterrumpida desde el Cretácico Inferior al reciente. La subcuenca se formó a partir del Eoceno, encima de una cuenca de margen pasivo, en ella se presentan cambios de facies y discordancias. La cuenca es de carácter marino dominante con algunas turbiditas en el flanco norte, depósitos sedimentarios sintectónicos y continentales.

La subcuenca de Guárico limita al norte con la faja piemontina de la cordillera del Caribe, al sur con el escudo de Guayana, al oeste con el arco de El Baúl y al este con la subcuenca de Maturín. El eje estructural actual de la subcuenca está cubierto por los corrimientos del norte del estado Guárico y su rumbo varía de noroeste–sureste en el Cretácico y norte–sur en el Mioceno. Al igual que la subcuenca de Maturín, también es asimétrica, con el flanco norte sobrecorrido por terrenos alóctonos compuestos principalmente por sedimentos y rocas metamórficas del Mesozoico, Paleoceno y Eoceno de la cordillera del Caribe.

2.2 Evolución geodinámica y tectónica de la cuenca oriental de Venezuela

La evolución geodinámica y tectónica de esta cuenca puede dividirse en 4 etapas (Parnaud, *et al.*, 1995), que comprenden:

2.2.1 Fase prerift (Paleozoico)

Esta megasecuencia tuvo lugar en el Paleozoico y está asociada a las formaciones Hato Viejo y Carrizal de la subcuenca de Guárico, las cuales fueron depositadas en ambientes marinos costeros a neríticos.

Los depósitos del Paleozoico presentes en esta fase (figura 2.2) han sido identificados en las bases de los registros sísmicos, donde se observa que los sedimentos de las formaciones Hato Viejo y Carrizal son de un espesor muy delgado. La secuencia

Paleozoica alcanza unos espesores de unos 1.5, 2 segundos (tiempo doble de viaje) lo que representa unos 3 a 5 km, y no presentan rocas madres (Talwani, 2002).

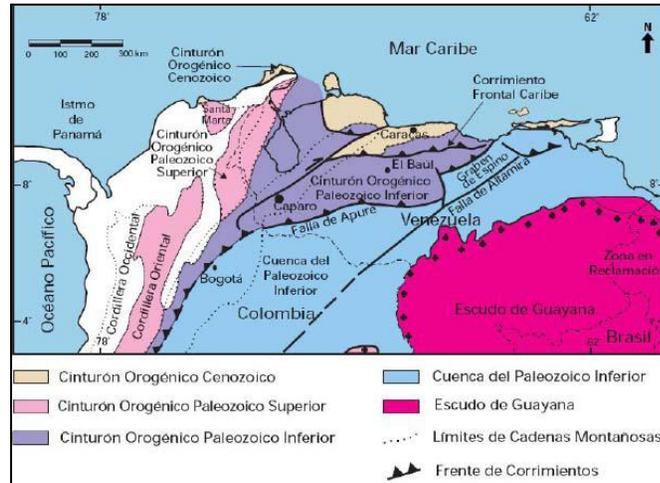


Figura 2.2. Mapa de distribución de terrenos alóctonos en el norte de Sudamérica, en los cuales hay rocas paleozoicas (Schlumberger, 1997).

2.2.2 Fase rift

Esta fase tuvo su origen durante el Jurásico y el Cretácico Temprano. Cuando Norteamérica se separó de Gondwana se creó un sistema extensional que separó a Yucatán del norte de la placa suramericana (Talwani, 2002). Esta fase está caracterizada por el levantamiento vertical del borde cratónico, actividad volcánica en el macizo de El Baúl y por un largo período de erosión sobre la mayor parte de la cuenca oriental. La transgresión está bien representada por la sedimentación de clásticos y calizas marinas de la formación Barranquín y la depositación hacia el sur del grupo Temblador con la formación Canoa de ambiente continental. A su vez, está evidenciada en el basamento oriental de Venezuela por los basaltos y capas rojas del Jurásico Medio Temprano depositados en el graben de Espino (figura 2.3). Durante esta fase el principal evento tectónico fue un sistema de fallas rumbo deslizantes o transformantes.

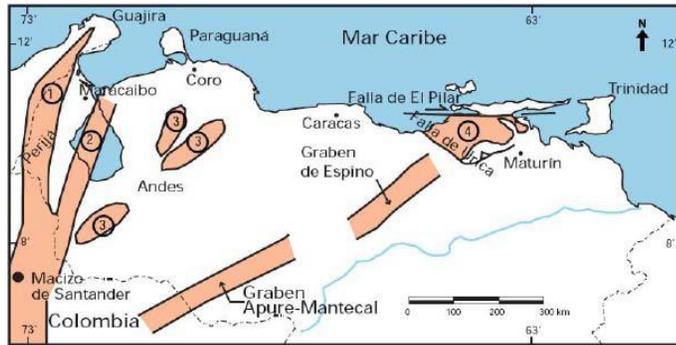


Figura 2.3. Distribución de las rocas jurásicas en Venezuela (Schlumberger, 1997).

2.2.3 Fase de margen pasivo.

Esta se caracteriza por la subsidencia del margen norte de Suramérica, desde el Jurásico Tardío-Cretácico Temprano al Eoceno. En esta etapa se depositan de 3 a 4 km de rocas clásticas marinas, entre las que destacan la formación Querecual y la formación San Antonio, las cuales son generadoras de petróleo pesado (Parnaud *et al.*, 1995). Este período se caracteriza por la depositación del grupo Temblador (Cretácico) como se observa en la figura 2.4.

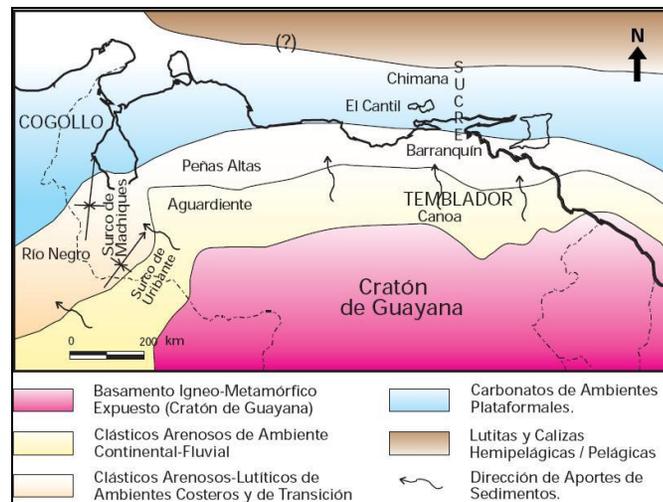


Figura 2.4. Distribución de las facies sedimentarias dominantes al norte del cratón de Guayana durante el Cretácico Temprano (Schlumberger, 1997).

2.2.4 Sistema rumbo-deslizante y compresivo-transpresivo

Esta fase ocurre desde el Eoceno Temprano-Medio al presente, y como consecuencia de la colisión oblicua que generó un sistema rumbo-deslizante y compresivo-transpresivo entre la placa Caribe y la placa Suramericana, se creó una cuenca antepaís (*foreland*). En ella los depósitos característicos de esta cuenca suprayacen a los de la etapa de margen pasivo y se crean las trampas asociadas a fallas. Como consecuencia de la carga litoestática generada por las napas producidas por la colisión (al norte), ocurre una flexión isoestática de la litosfera, que provocó el levantamiento de la zona sur de la cuenca, exponiéndola a la erosión (figura 2.5) (Schlumberger, 1997).

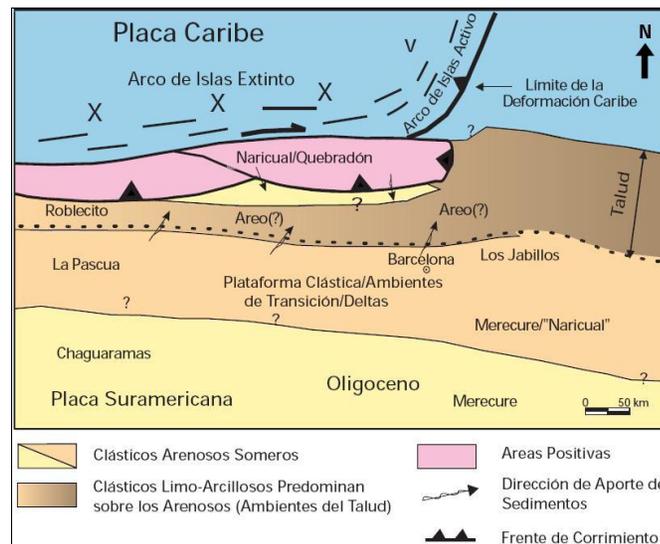


Figura 2.5. Marco geológico regional para la sedimentación en el flanco norte de la cuenca oriental de Venezuela durante el Oligoceno (Schlumberger, 1997).

2.3 Rasgos generales de la faja petrolífera del Orinoco

La faja petrolífera del Orinoco, fuente de reservas de hidrocarburos pesados y extrapesados más grande del mundo, está situada geográficamente en el extremo sur de la cuenca oriental de Venezuela, comprendida entre el norte del río Orinoco y el sur de los estados Guárico, Anzoátegui y Monagas; con una extensión de 55.314 km²

y un área de explotación actual de 11.593 km², dividida en cuatro bloques, que de este a oeste son: Carabobo, Ayacucho, Junín y Boyacá.

La exploración en faja petrolífera del Orinoco descubrió cuatro grandes acumulaciones de hidrocarburos, que yacen principalmente en arenas de origen deltáico cuya edad es de Mioceno Inferior. Estas fueron sedimentadas al comienzo de una invasión marina durante la cual se sedimentó la formación Oficina; esa secuencia arenosa basal descansa en contacto discordante sobre el Cretácico y sobre rocas ígneas y metamórficas del macizo Guayanés.

Según Talwani (2002), la estructura de la faja se describe como un homoclinal suave, con buzamientos de 3 a 4 grados hacia el norte, cortado por fallas normales de rumbo predominante noreste y un sistema más joven de dirección noroeste. Los rasgos regionales predominantes permiten identificar dos provincias tectónicas separadas por el sistema de fallas de Hato Viejo. La provincia de Carabobo y Ayacucho, y la provincia de Junín y Boyacá.

2.4 Síntesis estratigráfica

A continuación se describen brevemente las formaciones geológicas existentes en la zona de acuerdo al alcance del estudio, las más importantes son la formación Las Piedras y la formación Mesa ya que el estudio es a nivel somero.

2.4.1 Formación Las Piedras (Terciario: Mioceno Tardío-Plioceno)

A nivel superficial la formación aflora en la porción septentrional de los estados Anzoátegui y Monagas. En el subsuelo al este hasta Pedernales, Delta Amacuro y golfo de Paria. Hacia el sur, llega a las cercanías del río Orinoco en la faja petrolífera.

Según González de Juana *et al.*, (1980) está conformada principalmente por sedimentos finos mal consolidados, que incluyen areniscas y limolitas, más o menos carbonosas, lutitas arcillosas, arcillitas y lignitos. También se encuentran algunas calizas arenosas duras. Los espesores de la formación varían de unos cientos de metros hasta aproximadamente 1525 m (Hedberg *et al.*, 1947).

Parnaud *et al.*, (1995) establece que la formación fue depositada en ambientes deltáicos y marinos poco profundos, que desarrollaron el *foredeep* en el período Plioceno- Pleistoceno. El contacto es aparentemente concordante y transicional con la formación Mesa (González de Juana *et al.*, 1980).

2.4.2 Formación Mesa (Cuaternario: Pleistoceno)

Hedberg *et al.*, (1947) otorgaron este nombre a la formación debido a que cubre las extensas mesas fisiográficas características en la parte este de la cuenca oriental de Venezuela. Se extiende por los llanos centro-orientales y orientales, abarcando los estados Guárico, Anzoátegui y Monagas, encontrándose algunos afloramientos en los estados Sucre y Bolívar. Litológicamente consiste en arenas y gravas muy duras de grano grueso, cementadas con cemento ferruginoso y conglomerados ferruginosos (González de Juana *et al.*, 1980).

González de Juana *et al.*, (1980) establece que, en líneas generales, el espesor de la formación Mesa disminuye de norte a sur, como resultado del cambio en la sedimentación fluvio-deltáica. En cambio, de este a oeste el espesor aumenta, gracias a la migración del delta hacia el este, hasta llegar a su actual posición hoy día. El espesor máximo de 275 m se encuentra hacia la mesa de Maturín, mientras que en el estado Bolívar rara vez llega a los 20 m. La formación Mesa suprayace en contacto concordante y transicional a la formación Las Piedras.

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

3.1 Ondas sísmicas

Las ondas sísmicas son ondas que se propagan a través de la tierra como ondas elásticas. La prospección geofísica con métodos sísmicos consiste en explorar el subsuelo mediante ondas sísmicas. El método involucra un elemento generador de ondas sísmicas denominado fuente, un medio de propagación (rocas, aire, agua) y un elemento detector-registrador de las ondas denominado receptor. Analizando las ondas registradas se espera obtener información de las propiedades elásticas y morfológicas del medio de propagación. Según el espacio en que se propagan existen ondas de cuerpo y ondas superficiales.

3.1.1 Ondas de cuerpo

Las ondas corporales son la fuente de información usada para representar el interior de la tierra, ya que se propagan a través de todo el volumen del material elástico. Cuando el material del subsuelo es isótropo sólo pueden propagarse dos tipos de ondas de cuerpo: las ondas P y las ondas S.

Las ondas P son llamadas también ondas primarias u ondas compresionales, en materiales isótropos se caracterizan porque el movimiento de las partículas es en la misma dirección que la de propagación de la onda. Como ellas presentan siempre mayor velocidad que las ondas S y que las ondas superficiales, son siempre las primeras en llegar a cualquier distancia de la fuente (figura 3.1).

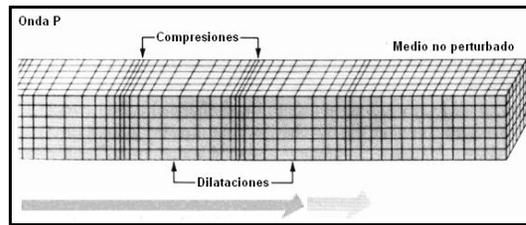


Figura 3.1. Onda P (tomado y modificado de Hayashi, 2003).

Las ondas S, también llamadas ondas secundarias u ondas de corte, debido a que se propagan más lento que las ondas P a través de un medio. En estas ondas las partículas del suelo se mueven en una dirección ortogonal a la dirección en que se propaga la onda (figura 3.2).

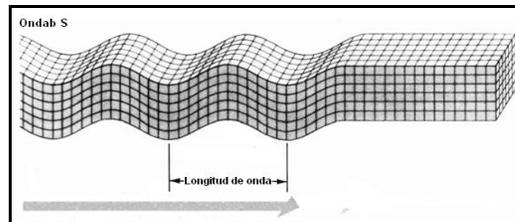


Figura 3.2. Onda S (tomado y modificado de Hayashi, 2003).

3.1.2 Ondas superficiales

Las ondas superficiales sólo se originan y propagan a lo largo de la superficie de la tierra entre dos medios con propiedades elásticas distintas. Las más importantes son las ondas *Love* y las ondas *Rayleigh*. Estas son las causantes de los daños producidos por los terremotos y también las que mayores problemas causan en los registros de prospección sísmica por reflexión, porque debido a su gran amplitud ocultan las débiles reflexiones en las capas a mayor profundidad.

Las ondas *Love* son ondas superficiales que solo se observan cuando hay una capa de baja velocidad superpuesta a un medio en el cual tienen mayor velocidad las ondas elásticas. El movimiento de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación de la perturbación, pero solo ocurre en el plano de la superficie terrestre (figura 3.3)

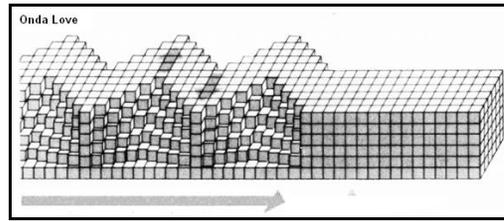


Figura 3.3. Onda *Love* (tomado y modificado de Hayashi, 2003).

Las ondas *Rayleigh* son ondas superficiales que viajan a lo largo de una superficie “libre”, tal como las interfaces tierra-aire o tierra-agua (Xia *et al.*, 1999). Estas ondas se caracterizan por tener, relativamente, baja velocidad, baja frecuencia, y gran amplitud. Son el resultado de la interferencia de ondas P y SV. En un medio homogéneo, el movimiento de las partículas de estas ondas es en una elipse vertical paralela a la dirección de propagación, que es a lo largo de la superficie y con dirección retrógrada (figura 3.4). La amplitud del movimiento decrece exponencialmente con la profundidad por debajo de la superficie.

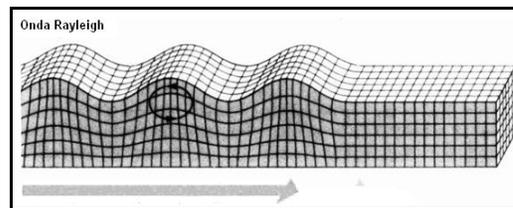


Figura 3.4. Onda *Rayleigh* (tomado y modificado de Hayashi, 2003).

El *ground roll* es un tipo particular de ondas *Rayleigh* y viaja a lo largo o cerca de la superficie del suelo, aunque es considerado ruido en estudios de ondas corporales, sus propiedades dispersivas son utilizadas para inferir propiedades elásticas cercanas a la superficie (Park *et al.*, 1999).

3.1.2.1 Dispersión de ondas *Rayleigh*

La dispersión es un concepto fundamental en la transmisión de las ondas *Rayleigh* por el terreno y a la forma en que el método de la sísmica pasiva, al igual que otros

métodos (SASW y MASW) basados en el estudio de las ondas superficiales puede resolver y caracterizar las diferentes capas sísmicas del terreno.

Según Park (2005), describe perfectamente este concepto mediante el esquema que se observa en la figura 3.5, en donde se define como dispersión el cambio de velocidad de propagación de las ondas *Rayleigh* (CR) en función de la longitud de onda (λ) o de la frecuencia (f). Este fenómeno solamente se manifiesta cuando el medio no es homogéneo en términos de la distribución de los valores de Vs según la vertical. En un medio con valores de Vs crecientes con la profundidad las componentes de alta frecuencia (menor longitud de onda) se transmiten a menor velocidad de fase (CR) que las de baja frecuencia (mayor longitud de onda) que además profundizan más en el terreno.

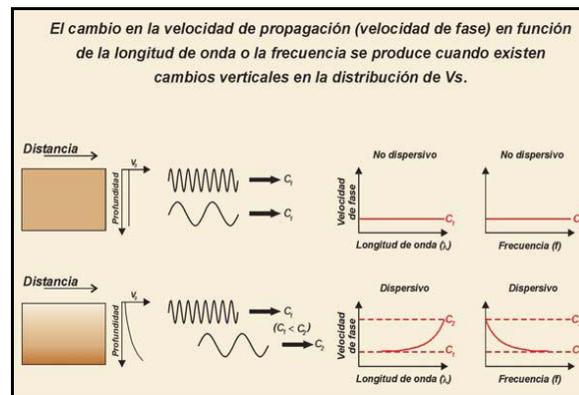


Figura 3.5. Concepto de dispersión en la transmisión de las ondas *Rayleigh* (Granda et al., 2005).

En la mayoría de los estudios sísmicos superficiales, cuando se usa una fuente de ondas compresionales, más de dos tercios de la energía sísmica generada es impartida en ondas *Rayleigh*. Suponiendo que existen variaciones verticales de velocidad, cada componente de frecuencia (f) de una onda superficial tiene una velocidad de propagación diferente (llamada velocidad de fase, C_f). Esta característica única da como resultado una longitud de onda diferente (λ_f) por cada frecuencia propagada. Esta propiedad es llamada dispersión (Park *et al.*, 1999). Como se observa en la figura 3.6, la velocidad del subsuelo aumenta con la profundidad, obteniendo para las

longitudes de ondas cortas menor velocidad debido a una menor penetración, mientras que para las longitudes de ondas largas penetran a una mayor profundidad con una mayor velocidad de fase.

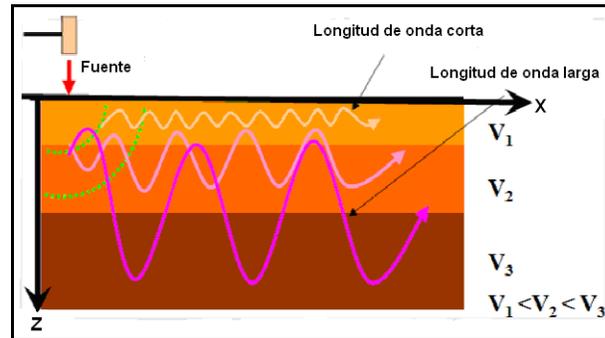


Figura 3.6. Dispersión de ondas *Rayleigh* en medio heterogéneo (tomado y modificado de Hayashi, 2003).

Para una frecuencia dada existirán un número de modos cada uno de los cuales con distintas velocidades aparentes. La existencia de los modos puede explicarse físicamente por la presencia de interferencias constructivas entre curvas de pasos de rayos por la continua variación de los medios heterogéneos y entre las ondas reflejadas y transmitidas para una capa media. La presencia de muchos modos de propagación proporciona un caso muy complejo, ya que la energía activa que introduce la fuente en un medio es propagada lejos con una superposición de los diferentes modos. No se puede decir a priori cual es el modo dominante. Por esta razón el caso de una fuente impulsiva es particularmente complejo. No obstante, por lo general, para un perfil normalmente dispersivo y en ausencia de grandes saltos de rigidez, el modo fundamental de propagación predomina en el campo de ondas. En tal caso la velocidad de fase efectiva prácticamente coincide con la velocidad de fase del modo fundamental de la onda *Rayleigh*, en donde los modos superiores “*higher mode*” y el ruido no son de interés para el análisis (figura 3.7) (Shearer, 1999).

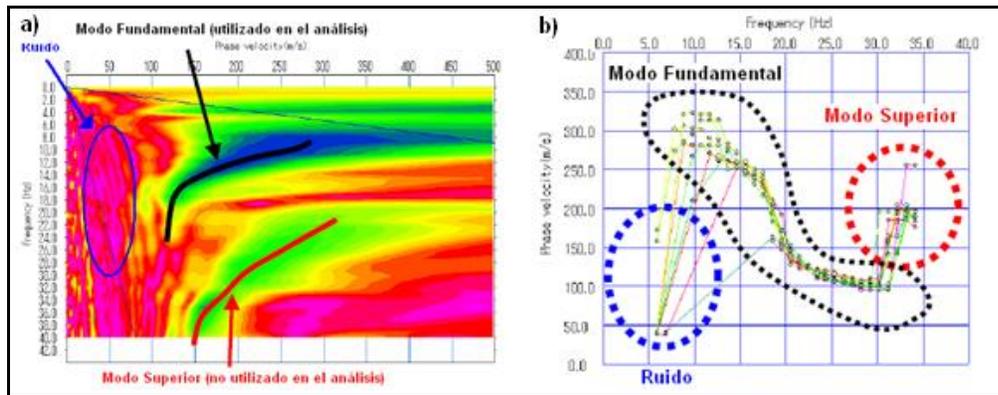


Figura 3.7. a) Diagrama de velocidad de fase *versus* frecuencia; b) Curva de dispersión (En ambas se muestra el modo fundamental, el modo superior y el ruido) (tomado y modificado de Hayashi, 2003).

3.2 Módulos elásticos

Cuando se aplican fuerzas externas a un cuerpo, se establecen dentro del mismo unas fuerzas internas equilibradas. El esfuerzo es una medida de la intensidad de estas fuerzas internas. Un cuerpo sujeto a esfuerzo sufre un cambio de forma y/o tamaño denominado deformación, esta se relaciona de un modo lineal con el esfuerzo aplicado y se denomina deformación elástica (Ley de Hooke); esta ley explica que el comportamiento de la deformación es proporcional a la cantidad de esfuerzo que le fue impuesto (Manilla, 2003).

$$\sigma = E \varepsilon \quad (3.1)$$

Donde E es el módulo de Young (ó módulo elástico) del material, ε es la deformación y σ es el esfuerzo aplicado.

Según Manilla (2003), la deformación (ε) que experimentan los cuerpos conformados por materiales geológicos idealmente homogéneos e isotrópicos se puede descomponer matemáticamente por un tensor de deformación, el cual tiene constantes que dependen de sus propiedades elásticas, las cuales pueden ser caracterizadas mediante los módulos elásticos dinámicos. Los más usados en el estudio de los materiales son cuatro:

3.2.1 Relación de Poisson (ν): también llamado radio de Poisson, este número define la relación entre los cambios unitarios de área de la sección transversal y la deformación longitudinal.

$$\nu = \frac{(V_p / V_s)^2 - 2}{2(V_p / V_s)^2 - 2} \quad (3.2)$$

Donde V_p es la velocidad de la onda P y V_s es la velocidad de la onda S.

3.2.2 Módulo de rigidez (G): es la relación entre el esfuerzo transversal unitario y el desplazamiento relativo de los planos de desplazamiento. Es una medida a la deformación cortante (figura 3.8).

$$G = \rho V_s^2 \quad (3.3)$$

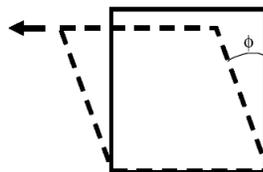


Figura 3.8. Esquema del desplazamiento definido por el módulo de rigidez o cizalla (G) (Manilla, 2003).

3.2.3 Módulo de Young (E): es la relación entre el esfuerzo unitario y la deformación longitudinal unitaria (figura 3.9).

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (3.4)$$

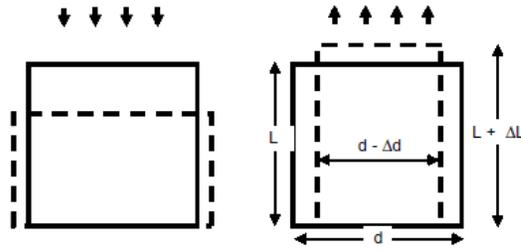


Figura 3.9. Esquema del desplazamiento definido por el módulo de Young (E) (Manilla, 2003).

3.2.4 Módulo de volumen (K): es la relación entre la presión hidrostática ejercida y el cambio de volumen unitario sufrido (figura 3.10).

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (3.5)$$

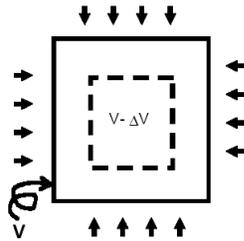


Figura 3.10. Esquema del cambio de volumen definido por el módulo de volumen (K) (Manilla, 2003).

3.3 Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW)

La técnica multicanal de ondas superficiales MASW ha sido desarrollada para optimizar el concepto del método SASW, el cual ha sido aplicado desde los mediados de los años 1.980, usando el análisis espectral del *ground roll*, generado por una fuente impulsiva y grabado por un par de receptores de baja frecuencia (1-4,5 Hz), ubicados a distancia variables entre sí. En cambio el método MASW utiliza los registros simultáneos de 12 o más receptores en distancias cortas (1-2 m) o largas (50-100 m), energizados por una fuente impulsiva o vibratoria, que proporcionan una redundancia estadística para medir velocidades de fase. Los datos multicanales muestran un formato de frecuencia variable con el tiempo, además permiten la

identificación y rechazo de modos no fundamentales de ondas *Rayleigh* y otro ruido coherente, elementos que representan las limitaciones del SASW.

La configuración de campo básica y la rutina de adquisición para el MASW generalmente es la misma que se usa en los estudios convencionales refracción y de CMP (Punto Medio Común) con reflexiones de ondas corporales como se muestra en la figura 3.11. Es un método sólido cuya única limitación, en su forma activa, es representada por la necesidad de una fuente apropiada que, como en el caso de la refracción, garantice la llegada de la señal a los últimos geófonos. Esto claramente limita el largo de los tendidos y por ende la profundidad de investigación. El desarrollo de configuraciones pasivas (especialmente la lineal), ofrece mayor flexibilidad y una parcial solución al problema (Park *et al.*, 1999).

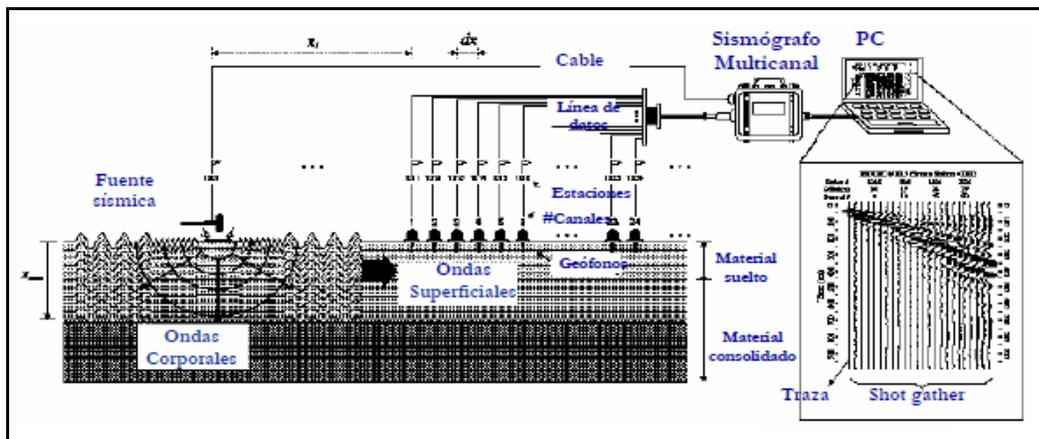


Figura 3.11. Técnica MASW (Linares, 2005).

Si los datos de ondas superficiales son adquiridos en forma de CMP, se puede generar una sección 2D de velocidades de onda S, mediante un mallado en el programa computacional, colocando cada perfil de onda S (V_s versus profundidad) en el medio del tendido del geófono con el cual fue calculado. El método MASW no sólo provee velocidades precisas de onda S cercanas a la superficie, sino también es la única forma sísmica superficial para obtener información de velocidades de onda S en algunos escenarios geológicos (Xia *et al.*, 2000).

3.3.1 Adquisición

3.3.1.1 Muestreo espacial

Longitud del arreglo

La longitud del arreglo afecta la resolución del número de onda Δk y por lo tanto la posibilidad de la separación modal (Socco y Strobbia, 2004).

Otro aspecto que se debe considerar en relación a la longitud de la ventana espacial, es la máxima longitud de onda observable. Teóricamente, ningún límite superior en la longitud de onda se impone para la longitud del arreglo: se pueden observar longitudes más largas que el arreglo, y la máxima depende principalmente en el comportamiento global del sitio y en el contenido de frecuencia de la propagación de la señal. Sin embargo, se prefieren los arreglos largos debido a que mejoran la separación modal y que cuando se tratan del número de canales, ellos reducen las incertidumbres en los datos. Por otro lado, los arreglos cortos son menos sensibles a las variaciones laterales, producen una mejor relación S/R, se afectan menos por la atenuación de las altas frecuencias y, dado el número de canales, producen menos *aliasing* espacial severo (Socco y Strobbia, 2004).

Espaciamiento de los receptores

La transformada $f-k$ de una señal $t-x$ es simétrica con $A(f,k)=A(-f,-k)$. Por el teorema de muestreo de *Nyquist*, el número de onda máximo que se puede identificar, depende de la tasa de muestreo espacial (el espaciamiento del receptor es ΔX) (Socco y Strobbia, 2004).

$$K_{\text{Nyq}} = \frac{1}{2} \frac{2\pi}{\Delta x} = \frac{\pi}{\Delta x} \quad (3.6)$$

Toda la energía asociada con $k^* > k_{Nyq}$ estará en *aliasing* en $k^* - 2k_{Nyq}$. En configuraciones *end-off*, toda la energía coherente viaja en la dirección positiva y está asociada con números de onda positivos. En el cuadrante negativo del espectro, están presentes el ruido y los eventos con *aliasing* y, entonces, es posible recuperar la información con *aliasing* con un “*unwrapping*” horizontal de $2k_{Nyq}$. La longitud mínima detectable es entonces $\lambda_{min} = \Delta X$ (Socco y Strobbia, 2004).

Números de receptores

El número de receptores se relaciona obviamente a la longitud del arreglo y espaciamiento del receptor, afectando la propagación de las incertidumbres sobre los datos. La incertidumbre en el número de onda estimado (y por lo tanto en la velocidad de fase) depende en la incertidumbre en la fase de cada componente de frecuencia, pero también en el número y posición de receptores. Para evaluar la propagación de incertidumbre en las fases de las trazas sobre el estimado final de la velocidad, se puede usar la matriz de covarianza unitaria (UCM) que permite que la varianza del número de onda estimado se exprese como función de la longitud del arreglo total y del número de receptores, para un valor dado de incertidumbre de fase. Para una cierta longitud del arreglo, el aumento del número de receptores reduce la incertidumbre (Socco y Strobbia, 2004).

Offset de la fuente

Para planear un óptimo *offset* de la fuente, tienen que ser considerados dos aspectos principales: en pequeñas distancias, los efectos de campo cercano contaminan la señal en bajas frecuencias, mientras que a grandes distancias la atenuación reduce la relación S/R de las trazas, especialmente en la banda de alta frecuencia. Estos dos fenómenos son fuertemente dependientes del sitio y de las condiciones experimentales, y en general, no pueden ser predichas para determinar la mejor separación fuente-*offset* (Socco y Strobbia, 2004).

3.3.1.2 Muestreo temporal

Los parámetros de muestreo temporal tienen un efecto menor con respecto al muestreo espacial. La tasa de muestreo se escoge dependiendo de la frecuencia más grande que será adquirida de acuerdo al teorema de muestreo de *Nyquist*. La ventana del tiempo tiene que ser lo suficientemente larga para grabar la onda superficial completa en todas las trazas (Park *et al.*, 1999).

3.3.2 Procesamiento

El objetivo del procesamiento es derivar los registros enteros de formas de onda (toda la información sobre la propagación de la onda superficial), para estimar la incertidumbre, y para probar si el sitio se ajusta al modelo 1D supuesto. El procesamiento, de hecho, extrae de los datos los factores que son comparados con las simulaciones dentro del proceso de inversión (Socco y Strobbia, 2004).

Las transformaciones del campo de onda, se usan ampliamente para realizar el análisis en dominios en donde las ondas superficiales sean identificadas fácilmente, así como sus propiedades. La transformada frecuencia-número de onda ($f-k$) tiene la ventaja de ser una aproximación natural al análisis de los eventos sísmicos. De hecho, el campo de onda “ideal” relacionado con ondas superficiales, puede ser descrito a través de su energía localizada sobre los autovalores (líneas en el dominio $f-k$); la observación produce una expansión de la energía que es constante en el dominio completo $f-k$. Un campo de onda “real” tendrá, en adición, la energía del ruido arbitrario y coherente. Esta energía adicional se puede separar en el dominio $f-k$ o producirá una distorsión en los datos procesados si se sobrepone a la energía de las ondas superficiales. Sin embargo, existen otras transformaciones, por ejemplo las transformadas $f-p$ o $f-v$ obtenidas del *slant-stack*, que pueden ser equivalentes completamente (Socco y Strobbia, 2004).

Cuando se obtiene una buena imagen de la densidad de energía de la propagación, tiene que ser realizado el análisis de la máxima de energía, con una búsqueda automática del máximo. Cuando éste ha sido identificado en el dominio $f-k$, se calculan las velocidades simplemente con $v=2 \pi f/k$ (Socco y Strobbia, 2004).

La serie de todas las posiciones de los máximos absolutos en cada frecuencia, conocida como la curva de dispersión, puede tener a veces más de la información requerida, pero la curva obtenida está limitada a un rango de frecuencia, puede que no sea continua, puede que no coincida con ninguna rama de las curvas modales, y frecuentemente puede estar relacionada con los “*higher modes*”. Se pueden superponer varios modos, y la identificación de la posición de éstos puede no ser posible simplemente buscando el máximo.

3.3.2.1 Curva de dispersión

La generación de una curva de dispersión es uno de los pasos más críticos para generar un perfil de velocidad de onda de cizalla preciso. Las curvas de dispersión se muestran, generalmente, como la velocidad de fase *versus* la frecuencia. Esta relación se puede establecer calculando la velocidad de fase a partir de la pendiente lineal de cada componente del registro de frecuencia. La precisión de una curva de dispersión se puede aumentar haciendo el análisis y remoción del ruido sobre los datos del *ground roll* (Park *et al.*, 1999).

3.3.2.2 Inversión de la curva de dispersión

Como un punto inicial para el proceso de inversión iterativa, es necesario especificar un modelo inicial de la tierra. Este modelo presenta parámetros de velocidades (de ondas P y S), densidad y espesor. Entre estos cuatro parámetros, V_s es el que tiene el mayor efecto significativo en la convergencia confiable del algoritmo (Park *et al.*, 1999).

Los datos que se invierten usualmente consisten en la velocidad de las ondas *Rayleigh* como función de la frecuencia, pero pueden además incluir otras propiedades de propagación, como el espectro de potencia o la distribución de la energía como función de la frecuencia a lo largo de un modo. Los datos de alta frecuencia pueden ser usados para estimar las propiedades en profundidades someras, pero, por otra parte, las propiedades en profundidades someras afectan los datos de todas las frecuencias, haciendo que la inversión de los datos que son adquiridos, por ejemplo, en pavimentos, sea particularmente compleja (Socco y Strobbia, 2004).

3.3.3 Profundidad de investigación

El rango de la profundidad de investigación depende del rango de propagación de las longitudes de onda y está por lo tanto relacionado con la disposición de la adquisición y con los efectos de sitio. En general, la mínima profundidad depende de la mínima longitud de onda muestreada. Si no se puede grabar información en altas frecuencias, las propiedades de las capas superficiales del modelo pueden ser influenciadas por una capa delgada que no está muestreada; en este caso, es necesario incorporar *a priori* información acerca de esta capa. La máxima profundidad de investigación depende de la máxima longitud de onda estimada confiablemente; diferentes autores sugieren, como un modo empírico, limitar la máxima profundidad a un medio de la longitud de onda máxima. Grandes longitudes de onda corresponden a pequeños números de onda, para lo cual la amplificación de la incertidumbre es más grande (Socco y Strobbia, 2004).

3.3.4 Posibles problemas y errores

Una de las principales fuentes de errores es la mala interpretación de algunas características de los datos, en particular relacionadas con la no consideración de la naturaleza modal de la propagación de las ondas superficiales. Además, no es fácil predecir *a priori* si un sitio es normalmente dispersivo (Socco y Strobbia, 2004).

También se debe considerar que no es posible, sólo a partir de los datos experimentales, reconocer si el patrón de dispersión obtenido es debido a la superposición modal o a un solo modo y, más aún, si un modo es el primero o uno mayor. Un posible procedimiento para chequear el resultado es usar el modelo final como entrada a un modelado a seguir multimodal, para evaluar la importancia relativa de los diferentes modos (Socco y Strobbia, 2004).

Otros errores debido a la superposición modal pueden ser causados por la presencia de un “*higher mode*” cercano al primer modo en una banda de frecuencia central. Otro aspecto a ser considerado es el efecto de las variaciones laterales. Si su presencia no se reconoce, la inversión producirá modelos finales incorrectos (Socco y Strobbia, 2004).

3.4 Sísmica de microtemores (ReMi)

La técnica *Refraction Microtremor* (ReMi) (Louie, 2001) o sísmica de microtemores, es un método para obtener, a través del calculo unidimensional de perfiles de ondas de corte, representables también en forma bidimensional, información de volúmenes grandes del subsuelo. Las bases teóricas del método son las mismas que los métodos SASW y MASW. La fuente sísmica consiste únicamente en ruido sísmico ambiental (microtemores), cuya contribución (pasiva) es principalmente en la parte de baja frecuencia del espectro lentitud-frecuencia, o en su combinación con métodos activos para la generación de señal de más alta frecuencia (percusiones con martillos o fuentes vibratorias) que proveen información sobre los niveles intermedios y más superficiales. Esta posibilidad de combinar fuentes de señal diferentes es la mejor ventaja del método.

La técnica de sísmica de microtemores está basada en dos ideas fundamentales. La primera idea, es que el equipo común de registro de refracción sísmica se coloca en una forma casi idéntica a las mediciones de refracción de ondas P, pudiendo grabar

efectivamente ondas superficiales en frecuencias tan bajas como 2 Hz. La segunda idea es que una simple transformada 2D de lentitud-frecuencia (p - f) de un registro de microtemores, puede separar ondas *Rayleigh* de otras llegadas sísmicas, y permite la distinción de la velocidad de fase verdadera de las velocidades aparentes (Louie, 2001). Combinaciones de arreglos de diferentes separaciones entre los transductores, variación de la frecuencia de geófonos entre 2 Hz y 40 Hz, y el uso de diferentes fuentes de señal permiten gran flexibilidad en el diseño de la caracterización del subsuelo con una vasta gama de resolución y excelente profundidad de investigación (Louie, 2001).

3.4.1 Adquisición

3.4.1.1 Muestreo espacial

Una de las ventajas del método ReMi es que las medidas sobre el terreno pueden hacerse con instrumentación sísmica relativamente convencional, empleando sismógrafos multicanal de 12 o más canales.

Una de las formas de registrar microtemores, con el fin de estimar el efecto de sitio, es utilizar arreglos instrumentales; estos arreglos instrumentales, llamados arreglos de microtemores, son disposiciones geométricas de sensores, equipos digitalizadores, algunas veces amplificadores y equipos de cómputo para el registro digital de la información. La geometría de los arreglos debe mantener una misma distancia entre sensores, debido a que hay métodos que sólo pueden ser aplicados a registros de sensores equidistantes.

Los sensores sísmicos pueden disponerse sobre el terreno según diversas configuraciones: lineal, en L, triangular, circular, etc. Cada una de ellas tiene ventajas e inconvenientes dependiendo de los objetivos del estudio, aunque normalmente las diferencias entre los resultados no son relevantes tal como demuestran estudios

recientes como los de Koichi Hayashi (2005). En la figura 3.12 se reproducen algunos de sus resultados.

Los espaciamientos y longitudes de los tendidos a emplear dependerán de la profundidad de investigación y nivel de resolución deseados, y normalmente se encuentran desde 1 m (estudios someros de alta resolución) hasta más de 10 m para estudios profundos.

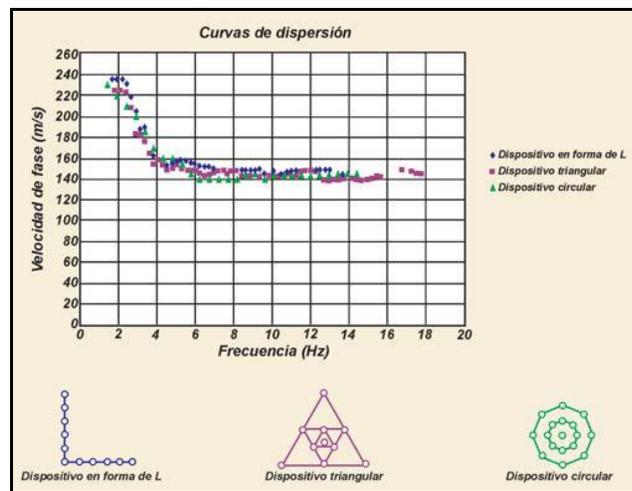


Figura 3.12. Diversos tipos de dispositivos para la ejecución de las medidas por el método ReMi (Granda *et al.*, 2005).

3.4.1.2 Muestreo temporal

Se pueden adquirir de 5 a 10 registros de ruido de fondo, cada uno de 15 a 30 segundos de longitud. El intervalo de muestreo habitual en estas medidas, que deben obtenerse sin ningún tipo de filtrado y sin referencia de tiempo cero en los registros, es del orden de 2 ms. Dependiendo del rango de profundidad a estudiar se pueden utilizar geófonos con una frecuencia natural variable entre 4,5 Hz y 15 Hz aproximadamente.

3.4.2 Procesamiento

Una vez realizadas las medidas sobre el terreno, el objetivo final del estudio es obtener a partir de los registros sísmicos un modelo con la distribución de los valores de V_s del terreno en la zona de medida. Para ello el procesamiento ReMi involucra tres pasos: análisis espectral de velocidad, obtención de la curva de dispersión de las ondas *Rayleigh* y modelado de la velocidad de ondas de corte (figura 3.13).

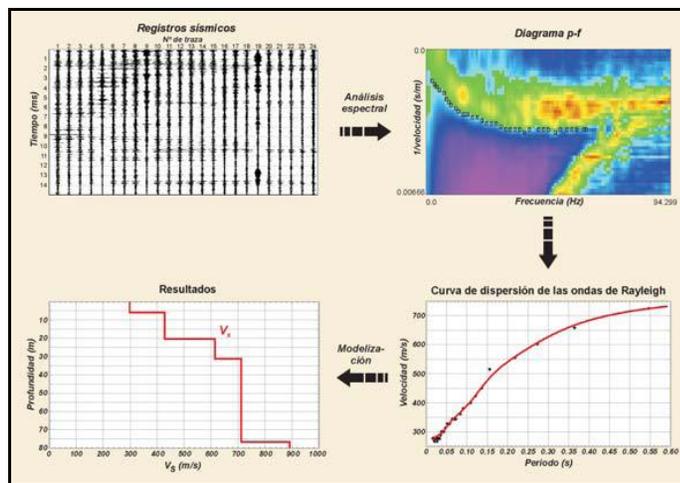


Figura 3.13. Esquema del procesamiento de los registros con el método ReMi (Granda *et al.*, 2005).

3.4.2.1 Análisis espectral de velocidad

El diagrama de velocidad de fase en función de la frecuencia, llamado también el diagrama p - f (donde p es el inverso de la velocidad), se obtiene mediante el análisis espectral (Louie, 2001), el cual se divide a su vez en tres apartados: a) la transformada de p - τ (Thorson y Claerbout, 1985), b) la transformada de Fourier (McMechan y Yedlin, 1981) y c) el análisis espectral de velocidad (espectro de energía) (Louie, 2001).

El análisis espectral de velocidad está basado en la transformación p - t , o “slant-stack”, descrito por Thorson y Claerbout (1985). Esta transformación toma una sección de registros de sismogramas múltiples, con amplitudes relacionadas con la

distancia y el tiempo ($x-t$), y las convierte a amplitudes relacionadas con el parámetro de rayo p (el inverso de la velocidad aparente), y un intercepto en el tiempo t .

La transformada p - τ es una integral de línea a lo largo de un registro sísmico $A(x,t)$ en una distancia x y un tiempo t :

$$A(p,\tau) = \int_x A(x,t = \tau + px)dx \quad (3.7)$$

donde la pendiente de la línea $p = dt/dx$ es el inverso de la velocidad aparente V_a en la dirección de x . En práctica x está discretizada en intervalos nx con espaciamiento finito dx (usualmente 8-20 metros), así que $x = jdx$, con j como un entero. Del mismo modo, el tiempo está discretizado con $t = idt$ (con dt usualmente 0.001-0.01 segundos), dando una forma discreta de la transformada p - τ para positivos y negativos $p = p_0 + ldp$ y $\tau = kdt$ llamado el slant-stack (Louie, 2001).

$$A(p = p_0 + ldp, \tau = kdt) = \sum_{j=0, nx-1} A(x = jdx, t = idt = \tau + px) \quad (3.8)$$

Comenzando con un $p_0 = -p_{max}$. Donde p_{max} define el inverso de la velocidad mínima que se encontrará, usualmente se coloca en 200 m/s, pero se encuentra en 100 m/s o menos para sitios suaves particulares, np se coloca efectivamente para que sea uno a dos veces nx . Aquí dp puede variar entre 0,0001-0,0005 s/m, y se coloca para que cubra el intervalo desde $-p_{max}$ a p_{max} en incrementos de lentitud de $2np$. Esto analizará la energía que se propaga en ambas direcciones a lo largo de la línea receptora de refracción. Las amplitudes en tiempos $t = \tau + px$, que varían entre los puntos de tiempo muestreados, son estimados por interpolación lineal (Louie, 2001).

En el próximo paso, se toma cada traza p - τ en $A(p, \tau)$ (ecuación 3.8) y se calcula su transformada de Fourier compleja $F_A(p, f)$ en la dirección de τ o tiempo de intercepción:

$$F_A(p, f) = \int_{\tau} A(p, \tau) e^{-i2\pi f \tau} d\tau \quad (3.9)$$

para el cual, la transformada de Fourier discreta con $f = m df$ es

$$F_A(p, f = mdf) = \sum_{k=0, nT-1} A(p, \tau = kdt) e^{-i2\pi mdf k dt} \quad (3.10)$$

El espectro de potencia $S_A(p, f)$ es la magnitud cuadrada de la transformada de Fourier compleja:

$$S_A(p, f) = F_A^*(p, f) F_A(p, f) \quad (3.11)$$

en donde el $*$ denota la conjugada compleja. Este método suma conjuntamente dos transformadas p - τ de un registro, a lo largo de la línea receptora, ya sea en las direcciones *forward* (hacia delante) o *reverse* (hacia atrás) de la misma (Louie, 2001). Para sumar la energía en esas direcciones, en un eje de lentitud, que representa el valor absoluto de $p/|p|$, se suma alrededor de $p=0$ con

$$S_A(|p|, f) = [S_A(p, f)]_{p \geq 0} + [S_A(-p, f)]_{p < 0} \quad (3.12)$$

Esto completa la transformada de un registro desde el espacio distancia-tiempo ($x t$) al de p -frecuencia (p - f). El parámetro de rayo p para estos registros es el componente horizontal de lentitud (inverso de la velocidad) a lo largo del arreglo. Para analizar más de un registro, a partir de un arreglo de *Refraction Microtremor*, las imágenes p - f

de los registros individuales $S_{An}(l/p/f)$ son sumados punto por punto en un imagen de potencia (Louie, 2001).

$$S_{total}(l/p/f) = \sum_n S_{An}(l/p/f) \quad (3.13)$$

De esta forma, el análisis lentitud-frecuencia ha producido un registro de la energía espectral total en todos los registros de un sitio, el cual es graficado en ejes lentitud-frecuencia ($p-f$). Si se identifican tendencias dentro de esos ejes donde una fase coherente (ondas *Rayleigh*) tenga una energía significativa, entonces se puede seleccionar, en base a esas tendencias, una curva de dispersión que se podrá analizar posteriormente (Louie, 2001).

En la imagen resultante al aplicar la transformada, las fases dispersivas muestran la curva típica de los modos normales en capas superficiales de baja velocidad: bajando desde altas velocidades de fase (baja lentitud) a frecuencias bajas, hasta velocidades de fase menores (alta lentitud) a frecuencias más altas. Esta pendiente distintiva representa la ventaja real del análisis $p-f$. Otros eventos que son grabados en los registros de microtemores, como ondas de cuerpo o de aire, no pueden tener tal pendiente. Incluso, si la mayoría de la energía en un registro sísmico es otra fase diferente a las ondas *Rayleigh*, el análisis $p-f$ mostrará dicha energía (en la imagen lentitud-frecuencia) lejos de las curvas de dispersión que con esta técnica se interpretan (Louie, 2001). Al grabar con muchos canales, con sismogramas verticales completos, y empleando la transformada $p-f$, este método puede analizar exitosamente la dispersión de las ondas *Rayleigh* en situaciones donde otros métodos de análisis de ondas superficiales no pueden.

3.4.2.2 Obtención de la curva de dispersión de las ondas *Rayleigh*

Este procedimiento se realiza manualmente sobre el diagrama $p-f$ y consiste en seleccionar específicamente las velocidades de fase correspondientes al modo fundamental sin tener en cuenta envolventes correspondientes a otras tendencias en el gráfico de dispersión (*higher modes*) que podrían llevar a resultados erróneos en el posterior proceso de inversión. Otras curvas de dispersión del tipo *higher mode* pueden aparecer en el diagrama $p-f$ como tendencias de dispersión si tienen un nivel energético semejante a la correspondiente al modo fundamental. Se diferencian no obstante de esta última por ser la correspondiente a los menores valores de la velocidad aparente de fase.

Como el modo más grande de las ondas *Rayleigh* tiene velocidades de fase por encima de las que tienen modo fundamental, la técnica de sismica de microtemores produce las velocidades con modos fundamentales. Los modos más grandes pueden aparecer como tendencias de dispersión separadas en las imágenes $p-f$, si son lo cercanamente energéticas como las fundamentales (Louie, 2001).

Finalmente hay que llamar la atención sobre los denominados *artifícios de cálculo* de los que el más relevante es el producido por el efecto *spatial aliasing*. Se pueden identificar fácilmente en el diagrama $p-f$ porque producen tendencias con pendiente de sentido contrario a la correspondiente al modo fundamental de las ondas *Rayleigh* y no tienen ningún interés para nuestros objetivos.

3.4.2.3 Modelado de la velocidad de ondas de corte

La obtención de la distribución de los valores de V_s del terreno mediante el modelado de la curva de dispersión de las ondas *Rayleigh* consiste en realizar iteraciones sucesivas en la velocidad de fase para cada frecuencia, a partir de un modelo inicial establecido en base a la información geológica disponible.

El método de sismica de microtemores sigue modelos interactivos que parten de los datos de dispersión de modo normal, que fueron escogidos de las imágenes $p-f$. El modelo itera sobre la velocidad de fase en cada período (o frecuencia), reporta cuándo una solución no ha sido encontrada dentro de los parámetros de iteración, y puede modelar inversiones de la velocidad con la profundidad (Louie, 2001).

El modelo, seguido interactivamente de una curva de dispersión, realizado por una persona experta puede producir más información de la velocidad en una zona específica, que un procedimiento de inversión automatizada. El modelado interactivo puede evitar el mínimo local en la función de error objetiva, además de evitar los casos de inversiones de velocidades falsas, debido al problema equivalente, que es inherente a la naturaleza integradora de las velocidades de ondas superficiales.

Otro factor para modelar las curvas de dispersión *Rayleigh*, es la falta de información de las velocidades de la onda P o las densidades. Sin embargo, los experimentos que se han realizado utilizando la herramienta de modelado interactiva, muestran que aunque hayan grandes cambios en el módulo de Poisson o en la densidad, las velocidades de cizalla modeladas sólo cambiarán en menos de un 10 % en el proceso de ajuste del espectro de velocidad de la onda *Rayleigh* (Louie, 2001). Por lo tanto, es razonable indicar que las curvas de dispersión *Rayleigh* son buenas indicadores de la estructuración de la velocidad de la onda de cizalla y pobres indicadores de la estructura superficial de la velocidad de la onda P.

3.4.3 Profundidad de investigación

Dependiendo de las propiedades de los materiales en el subsuelo, arreglo geométrico y tipos de sensores (distancia y frecuencia de geófonos), ReMi puede determinar velocidades de ondas de corte a profundidades mínimas de 30 m y hasta un máximo de 100 m de profundidad (Optim LLC, 2003).

La profundidad de investigación que puede alcanzar fácilmente los 100 m, depende de la longitud del dispositivo de medida conformado por los sensores. Por su parte, la separación entre los geófonos así como su frecuencia natural, condicionan la capacidad de resolución para los niveles superficiales en los resultados finales del estudio.

3.4.4 Posibles problemas y errores

Puesto que uno de los principales ámbitos de aplicación de este método es el de los estudios en medios urbanos, un problema por resolver en cada caso es conseguir un buen acoplamiento de los sensores con el terreno. En zonas asfaltadas o pavimentadas es efectivo instalar los geófonos sobre placas metálicas que puedan desplazarse fácilmente arrastrándolas sobre el suelo. Es importante señalar que las medidas pueden hacerse incluso en el interior de edificios, aunque en todo caso el emplazamiento de los sensores debe cumplir algunas condiciones en cuanto a la linealidad del dispositivo y a la verticalidad de cada uno de ellos.

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO

En el presente capítulo se describe la metodología de adquisición y procesamiento utilizada para los métodos de ondas superficiales MASW y ReMi.

4.1 Descripción del área

La zona en estudio está conformada en su mayoría por terrenos llanos con vegetación típica de sabana, pastos bajos y árboles de mediana estatura, sin embargo se observa la presencia de farallones y morichales en los cuales la vegetación cambia abruptamente dando presencia de moriches y vegetaciones con mayor necesidad hídrica.

Entre los procesos de erosión se observa el viento como el elemento más importante y constante con una fuerza media a fuerte. Las diferencias de temperatura entre el día y la noche, al igual que los períodos de lluvia intensa que se presentan en la época de invierno producen cambios en la distensión del material logrando resquebrajamientos.

4.2 Equipo utilizado para la adquisición de ambos métodos

- 2 Sismógrafos Geometrics Stratavisor XP de 48 canales.
- 48 geófonos marca OYO Geospace de componente vertical de 4,5 Hz.
- 48 geófonos marca OYO Geospace de componente vertical de 10 Hz
- 2 geófonos de 10 Hz para las funciones del *trigger* (método MASW).
- Cables de conexión para los geófonos.
- Cables de corriente del sismógrafo.
- Cables para la señal de sincronismo (cables para *trigger*, método MASW).
- Cintas métricas.

- 2 Baterías de 12 v.
- Fuentes generadoras de señales para el método MASW (mandarria de 20 lb y masa de acero de 150 kg).
- Placa metálica.
- Vehículo pick-up 4x4 doble cabina.
- Estructura metálica con güinche para sostener la masa de 150 kg.
- Libreta de anotaciones.
- Sistema de posicionamiento global (2 GPS diferencial) marca Trimble, modelo R8.



Figura 4.1. Algunos equipos utilizados en la adquisición: a) Sismógrafo Geometrics Stratavisor XP de 48 canales, batería de 12 v y cables, b) geófonos de 4,5 Hz (rojos) y 10 Hz (azules), c) mandarria de 20 lb, d) masa de acero de 150 kg y e) vehículo pick-up con estructura metálica.

4.3 Adquisición

Para realizar la adquisición en campo, se estudió la zona en búsqueda de las mejores condiciones para llevar a cabo la investigación, donde el terreno fuese lo más plano posible para no tener efectos de topografía y que no existiesen tantos morichales ni farallones. El área de trabajo es aproximadamente 4,608 km² en donde se realizaron 21 perfiles por el método MASW y 21 perfiles por el método ReMi, ubicados en la misma posición, excepto con el perfil 8 en donde solo se realizó ReMi y en el perfil 46 que se adquirió solamente MASW, como se observa en la figura 4.2.

Antes de comenzar la adquisición, primero se hicieron pruebas con dos tipos de fuentes: una mandarria de 20 lb y una masa de 150 kg en caída vertical a una altura de 2,5 m aproximadamente. Y al visualizar los registros obtenidos de dichas pruebas

se determinó utilizar la masa de 150 kg en toda la adquisición para el método MASW, ya que los tendidos son de gran distancia y con la mandarina de 20 lb la señal generada no era registrada por los últimos geófonos.

También se realizaron pruebas para cada método, utilizando geófonos de distintas frecuencias (4,5 Hz y 10 Hz). Para el método MASW se dispuso de dos tendidos en la misma zona con igual separación entre geófonos (5 m) e igual longitud del tendido (240 m), cada tendido conectado a su sismógrafo (ambos sismógrafos exactamente iguales) con su respectiva batería de 12 v, en donde la única diferencia era la frecuencia de los geófonos, un tendido con geófonos de 4,5 Hz y el otro con geófonos de 10 Hz. En cada tendido se realizaban dos puntos de disparo con la masa de 150 kg, uno al principio de *offset* -2,5 m (hacia el norte del tendido) y el otro con *offset* de 237,5 m (hacia el sur del tendido). Se pudo observar que existía una pequeña diferencia en la señal entre ambos tendidos y por cuestiones de tiempo se determinó utilizar para toda la adquisición tantos los geófonos de 4,5 Hz como los de 10 Hz. De igual forma se realizaron las pruebas para el método ReMi, en el cual los dos sismógrafos de ambos tendidos registraban la señal exactamente al mismo tiempo, y así grabar el mismo ruido ambiental. Este método al utilizar una fuente pasiva (ruido ambiental) que genera señales con bajas frecuencias, se prefirió utilizar en la mayoría de los tendidos los geófonos de 4,5 Hz para obtener mejores registros.

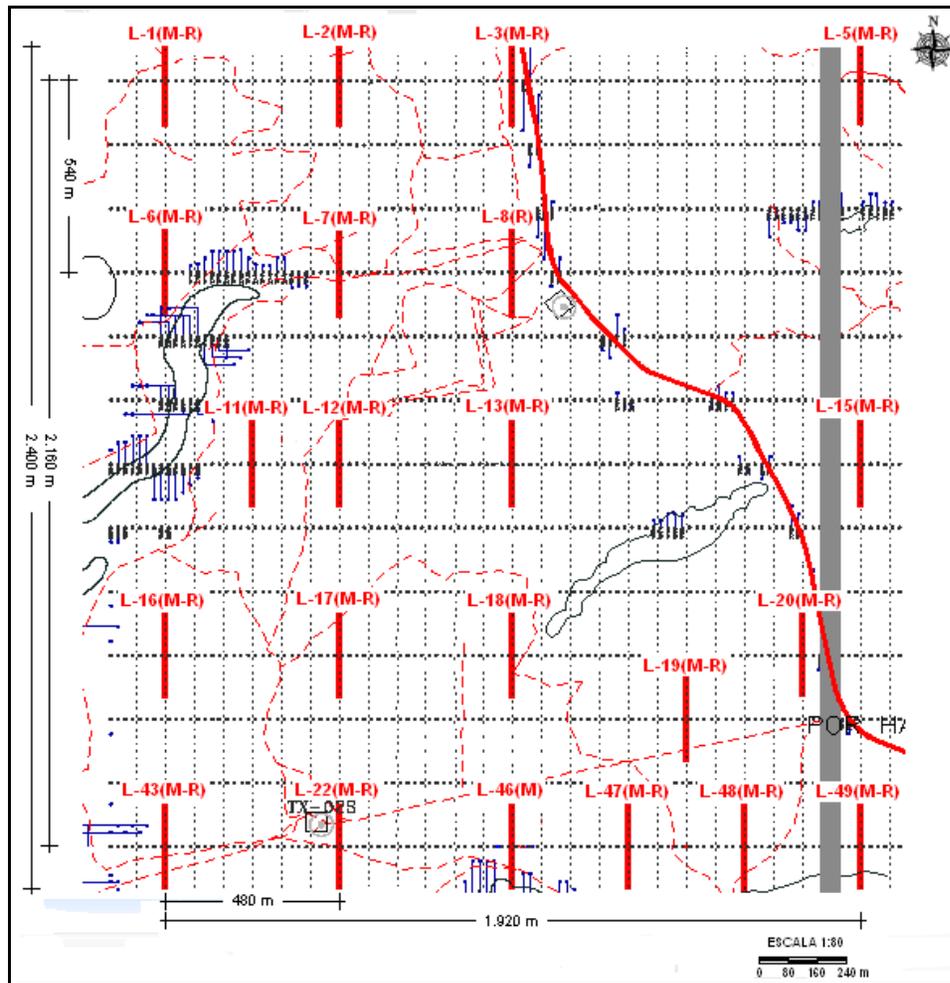


Figura 4.2. Área en estudio (perfiles representados por las líneas rojas).

4.3.1 Metodología de adquisición para el método MASW

La adquisición de los datos en campo constó de 21 perfiles MASW con una longitud de 240 m con una orientación N-S, generalmente espaciadas entre sí 480 m en dirección E-W y 540 m en dirección N-S desde el punto central de cada tendido, existen tendidos ubicados fuera de dichos parámetros de espaciamentos por condiciones del terreno (presencia de morichales y zonas quebradas) (figura 4.2).

La configuración de la metodología utilizada fue la llamada “*end - on*” con puntos de disparo o fuente al principio y al final del tendido, es decir, para cada perfil MASW

se adquirieron dos (2) registros de acuerdo a la posición de la fuente, el primer registro con un *offset* mínimo de -2,5 m (hacia el norte del tendido) y otro registro con un *offset* máximo de 237,5 m (hacia el sur del tendido). Se dispuso de 48 geófonos de componente vertical de frecuencia 4,5 Hz y 48 geófonos de componente vertical de frecuencia de 10 Hz orientados en línea recta, conectados por medio de un cable al sismógrafo, con un espaciamiento entre geófonos de 5 m, y se utilizó 1 geófono de 10 Hz para las funciones del *trigger*, el cual se colocaba a 40 cm aproximadamente de la fuente, e iba igualmente conectado al sismógrafo a través de un cable. Se utilizó una batería de 12 v conectado por cables al sismógrafo para el funcionamiento del mismo.

El sismógrafo se configuró para un intervalo de muestreo de 125 μ s y una longitud de grabación de 2 s. La onda se realizó con el uso de una masa de acero de 150 kg en caída libre al suelo de una altura aproximada de 2,5 m, utilizando una estructura metálica resistente con un güinche, la cual estaba sujeta a la cabina de una camioneta pick-up; realizando entre 1 a 3 disparos por cada punto de tiro dependiendo de la calidad del registro, con la finalidad de que el sismógrafo realice la suma o apilamiento de las trazas obtenidas y con esto acentuar las respuestas generadas por las características del subsuelo. Los registros generados por cada disparo eran guardados en el sismógrafo en una carpeta, en formato SEG-2 para luego procesarlos.

4.3.2 Metodología de adquisición para el método ReMi

Se adquirieron 21 perfiles ReMi de 235 m de longitud cada uno, con orientación N-S y espaciadas igualmente a la adquisición por el método MASW (figura 4.2).

Se utilizaron 48 geófonos de componente vertical con frecuencias de 4,5 Hz en la mayoría de los tendidos, separados entre sí a una distancia de 5 m, los cuales

registraban el movimiento vertical de los canales individualmente; los cables usados permitían la conexión entre ellos en línea recta y la conexión al sismógrafo.

En esta investigación se obtenían 10 registros de 48 canales con un intervalo de muestreo de 2 ms y una longitud de grabación de 30 s para cada perfil ReMi. La fuente generadora de señales fue solamente ruido ambiental y para comenzar a grabar se seleccionaba en el sismógrafo la opción de *trigger* manualmente. Cada registro obtenido era guardado en una carpeta llamada “ruido ambiental”, en formato SEG-2 para su posterior procesamiento.

4.4 Procesamiento

Por medio de la herramienta computacional *SeisImager* de *Geometrics* se realizó el procesamiento de la data para el método MASW y ReMi.

El procesamiento de ambos métodos se llevó a cabo mediante la secuencia descrita en la figura 4.3.

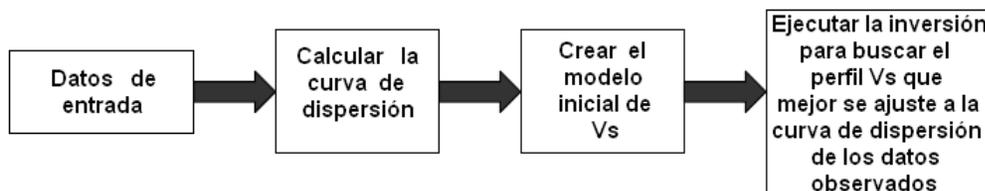


Figura 4.3. Esquema de procesamiento de datos de MASW y ReMi.

A continuación se especifican cada uno de los pasos para la creación de los perfiles de velocidades de ondas de corte (V_s) para los métodos MASW y ReMi:

4.4.1 Pasos para el procesamiento de los registros mediante el método MASW

- Activación del programa

Existen dos maneras de activar el programa para comenzar con el procesamiento: la primera es haciendo doble click al programa *Surface Wave Analysis Wizard* del paquete *SeisImager* (figura 4.4), luego se abre una ventana como se muestra en la figura 4.5 y se selecciona el modo *Active Source 1D MASW*, y posteriormente se abre de forma automática el programa *Pickwin* para abrir los registros.

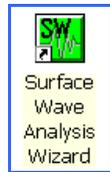


Figura 4.4. Módulo *Surface Wave Analysis Wizard* de *SeisImager*.

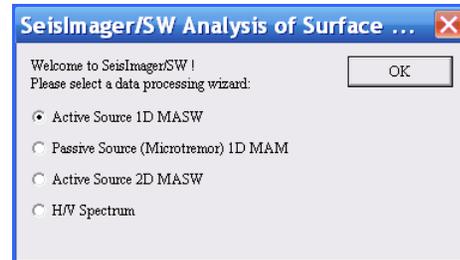


Figura 4.5. Ventana para seleccionar el método de fuente activa 1D MASW.

La segunda manera para activar el programa es de forma directa, haciendo doble click en el programa *Pickwin* (*Pick First Breaks or Dispersion Curves*) del paquete *SeisImager* (figura 4.6), para el inicio del procesamiento de cada registro. La versión de *Pickwin* es la 4.2.0.0 como se muestra en la figura 4.7.



Figura 4.6. Módulo *Pickwin* de *SeisImager*.

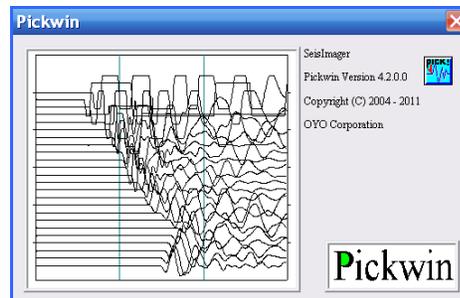


Figura 4.7. Ventana de *Pickwin* versión 4.2.0.0.

Para esta investigación, en cada perfil de Vs del método MASW se tomaron dos registros de acuerdo a la posición de la fuente: uno con la fuente a - 2.5 m (figura 4.8) y otro con la fuente a 237,5 m (figura 4.9). En donde se eliminan las dos primeras trazas marcadas en color rojo porque en ellas las amplitudes son muy grandes con poca dispersión y contienen frecuencias altas de onda directa y reflexión, ya que están muy cercanas a la fuente y por ello degradan el análisis de la onda superficial. Los registros se procesan individualmente, y para optimizar la observación de la data se puede modificar la configuración de la pantalla mediante las siguientes funciones básicas:

Ganancia de amplitud 

Magnitud en el eje horizontal 

Magnitud en el eje vertical 

Normalizar 

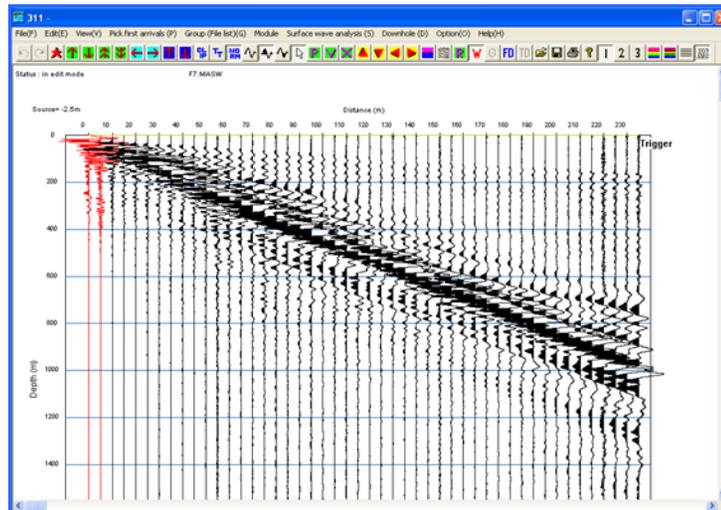


Figura 4.8. Registro con *offset* de -2,5 m.

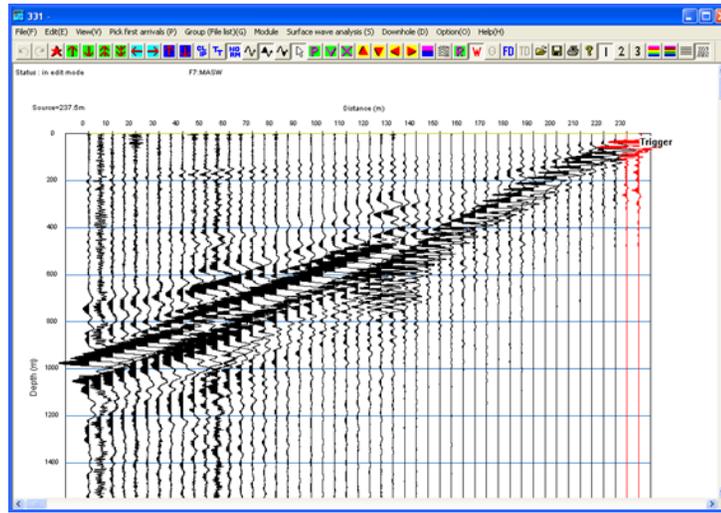


Figura 4.9. Registro con *offset* de 237,5 m

Se selecciona el botón  para visualizar la velocidad aparente de ondas superficiales mediante el ratón moviendo una línea de color verde, y así poder estimar la velocidad máxima, el valor es mostrado en la parte superior izquierda de la pantalla. Luego con la tecla F7 se crea la entrada al modo MASW y se abre una ventana donde se introduce el valor máximo de velocidad (600 m/s) y frecuencia (40 Hz) de las ondas superficiales que se estima de la zona en estudio para la transformación a la velocidad de fase-frecuencia (figura 4.10).

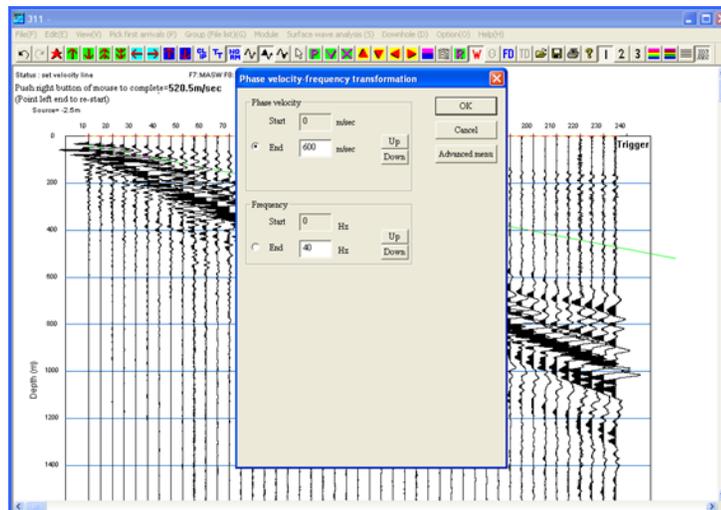


Figura 4.10. Valor máximo de velocidad y frecuencia de las ondas superficiales para la transformación a la velocidad de fase-frecuencia para MASW.

- Generación de la curva de dispersión

Luego al seleccionar el botón OK se muestra la gráfica de velocidad de fase *versus* frecuencia, y al marcar la tecla F7 se abre una ventana donde se introduce el valor mínimo (1 Hz) y máximo (40 Hz) de frecuencia para obtener las velocidades de fase (figura 4.11).

La curva de dispersión se observa mejor a color, para ello se utiliza el botón de contorno de color , para cambiar la gráfica a color y para optimizar mejor la vista se utilizan los botones antes descritos.

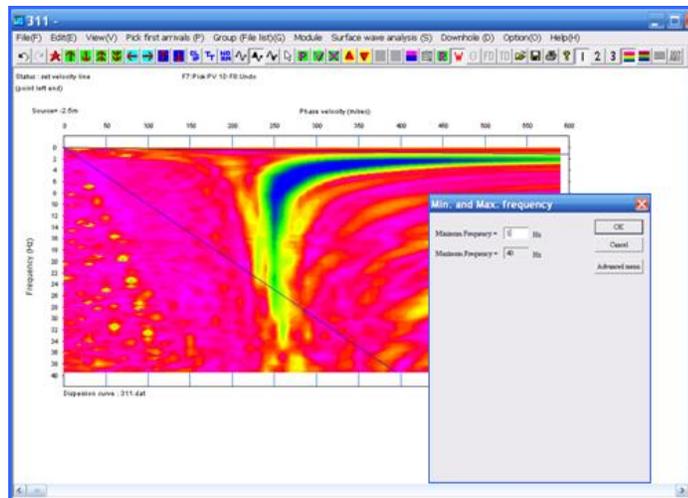


Figura 4.11. Gráfico de velocidad de fase *versus* frecuencia y ventana donde se introduce el valor mínimo y máximo de frecuencia para MASW.

Luego al marcar nuevamente el botón OK el programa de forma automática escoge matemáticamente las amplitudes máximas para cada frecuencia (puntos rojos), los cuales definen la curva de dispersión (figura 4.12).

Si es necesario, también se pueden seleccionar los puntos manualmente, ya que podrían existir puntos que estén fuera de la curva de dispersión y se ubican haciendo click con el mouse en el lugar indicado sobre la gráfica.

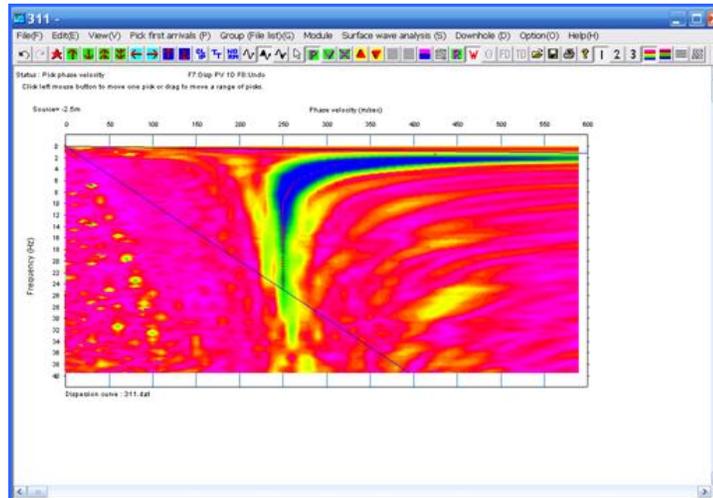


Figura 4.12. Máximas amplitudes de cada frecuencia representadas por puntos rojos para MASW.

El procesamiento que utiliza el programa *SeisImager* de *Geometrics* para la obtención de la curva de dispersión es el siguiente:

- I. Se realiza la transformada rápida de Fourier (FFT) (Dziewonski, 1983) en el tiempo, donde se transforma la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia con la siguiente ecuación:

$$F(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot e^{-i\omega t} dt \quad (4.1)$$

Obteniendo una función dependiente de la posición y la frecuencia, la cual muestra la componente de fase de cada señal.

- II. Se procede a la determinación de la curva de dispersión, en donde el programa calcula la transformada directa de Fourier. Y se determina la velocidad de fase para cada Δx .

$$F(c, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(x, \omega) \cdot e^{-i\omega \frac{x}{c}} dx \quad (4.2)$$

Donde la velocidad de fase es:

$$c(\omega) = \frac{\omega \cdot \Delta x}{\Delta \phi_f(\omega)} \quad (4.3)$$

Siguiendo con el procesamiento, al presionar la tecla F7 y se abre una nueva ventana con el módulo *WaveEq (Surface Wave Analysis)* de *SeisImager*, que muestra una gráfica de frecuencia *versus* velocidad de fase, la cual contiene dos curvas: la curva roja en la parte inferior es la curva de dispersión generada con los puntos seleccionados y la curva punteada en la parte superior es una curva que indica la calidad de la curva de dispersión como se observa en la figura 4.13.

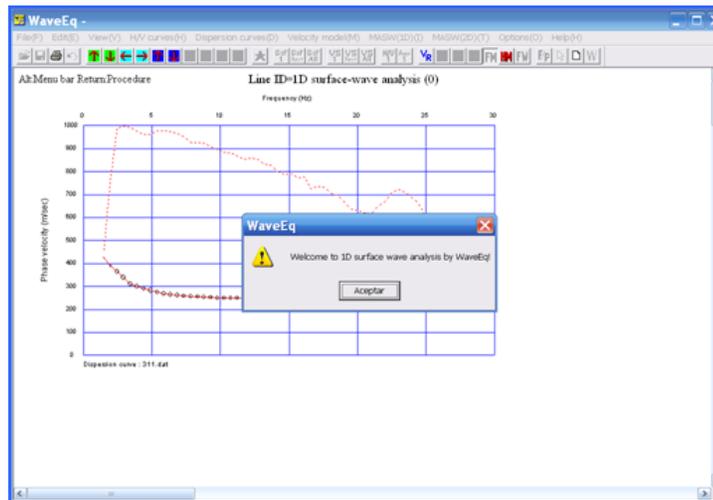


Figura 4.13. Generación de la curva de dispersión con *offset* de -2,5 m para MASW.

La información de la curva de dispersión se guarda como un archivo “.rst”, que representa la curva de dispersión del registro con un *offset* de -2,5 m (figura 4.14) y posteriormente se obtiene la curva de dispersión para el registro con un *offset* de 237,5 m, realizando el mismo procedimiento anterior (figura 4.15).

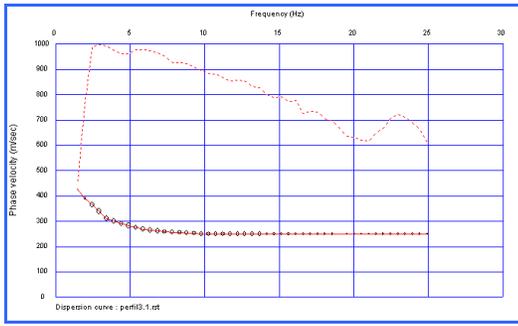


Figura 4.14. Curva de dispersión con un *offset* de -2.5 m.

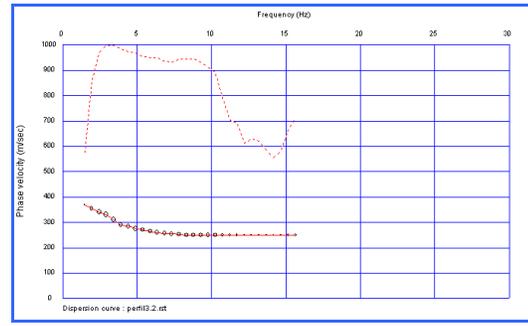


Figura 4.15. Curva de dispersión con un *offset* de 237,5 m.

Luego de obtener la curva de dispersión para cada registro, se utiliza el programa *WaveEq* de *SeisImager* para generar la curva de dispersión de cada perfil MASW mediante la unión de las dos curvas de dispersión con *offset* distintos, de la siguiente manera:

Se abren los dos archivos uno seguido del otro, en donde el programa añade la data de ambas curvas (figura 4.16) y luego se ajusta la información de los valores promedio de frecuencias en una sola curva de dispersión y se guarda en un archivo “.rst”. Esta curva, es la curva de dispersión original obtenida para cada perfil MASW, que muestra todos los datos (figura 4.17).

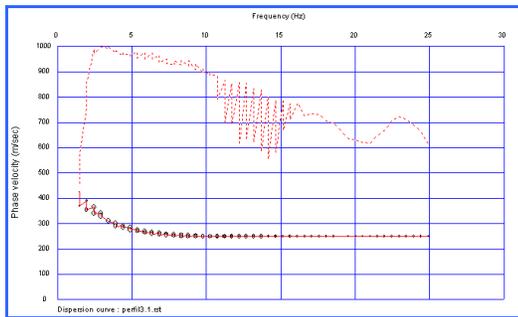


Figura 4.16. Promedio de frecuencias de las curvas de dispersión con *offset* de -2,5 m y 237,5 m.

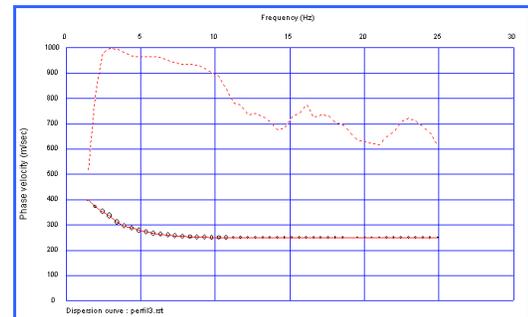


Figura 4.17. Curva de dispersión original para MASW.

Una vez obtenida la curva de dispersión original, se procede a eliminar los datos de baja calidad, configurando a un valor de calidad aceptable de 0.7 como se observa en

la figura 4.18, en donde el valor 1 representa la máxima calidad de la curva de dispersión.

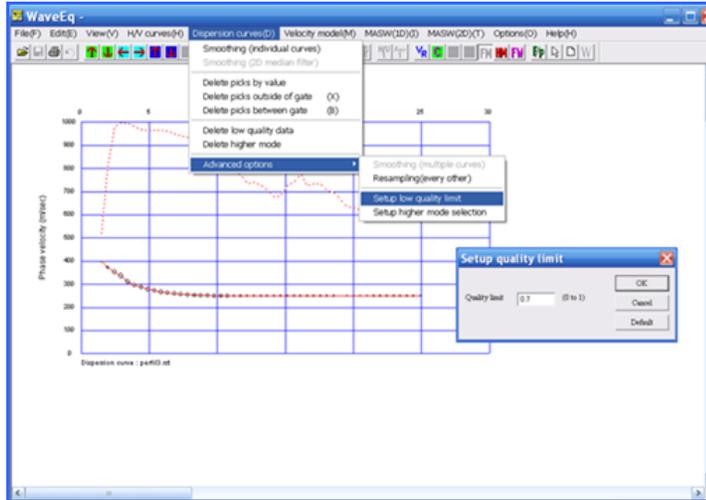


Figura 4.18. Configuración de la calidad de la curva de dispersión para MASW.

En la figura 4.19 se observa la misma curva de dispersión original, pero ya eliminados los datos de baja calidad, la cual es la curva de interés definitiva para la generación del perfil Vs para MASW.

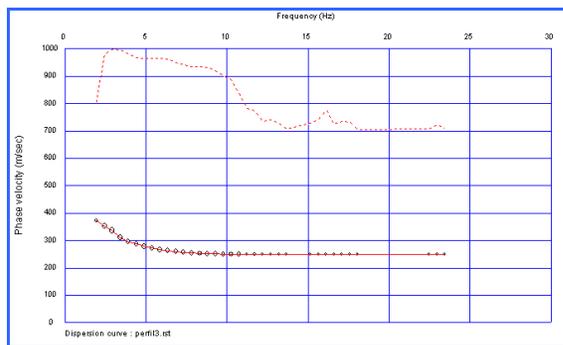


Figura 4.19. Curva de dispersión definitiva para MASW.

-Generación del perfil de velocidad de ondas de corte (Vs)

Para crear el perfil Vs con la profundidad, primero se crea un modelo inicial Vs introduciéndole al programa tanto el valor de la profundidad (100 m) como el número de capas (5 capas) como se muestra en la figura 4.20.

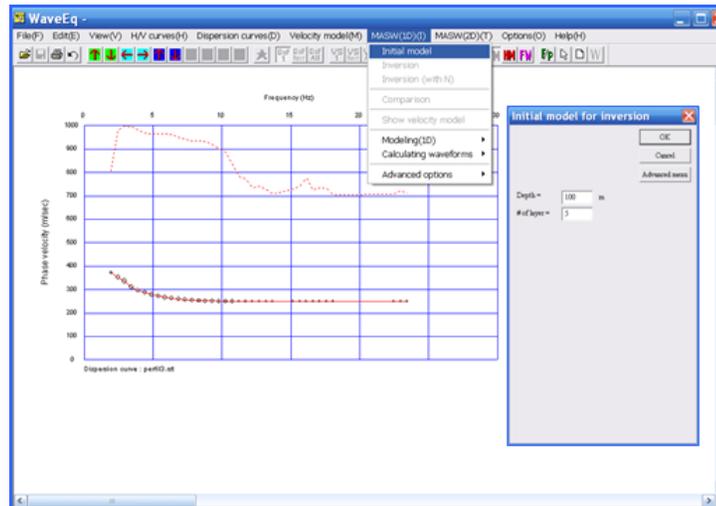


Figura 4.20. Creación del modelo inicial Vs para MASW.

Luego al seleccionar OK se muestra el modelo inicial de Vs (figura 4.21) en donde se muestra los valores de velocidad de ondas de corte para cada capa del subsuelo (los valores de Vs son confiables hasta la profundidad observada en color gris). Y mediante el botón  se muestra la curva de dispersión adquirida por el método MASW (línea roja) y la curva de dispersión calculada por el programa (línea negra) con el error RMSE, que es el error de coincidencia entre ambas curvas de dispersión (figura 4.22).

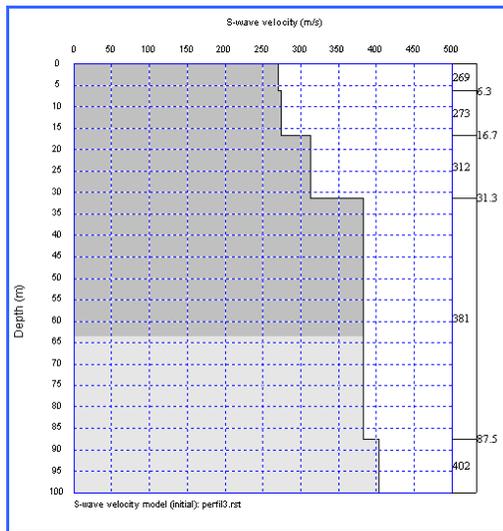


Figura 4.21. Modelo inicial Vs para MASW.

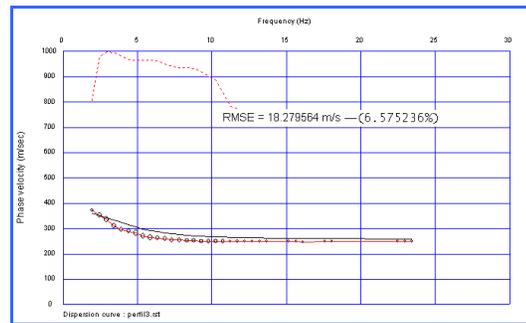


Figura 4.22. Curva de dispersión adquirida por MASW (línea roja), curva de dispersión calculada por el programa (línea negra) y el error RMSE, antes de realizar la inversión.

El siguiente paso es realizar la inversión de la curva de dispersión para generar el perfil Vs, seleccionando el número de iteraciones (en este caso de 30 iteraciones) con una estimación robusta, como se observa en la figura 4.23.

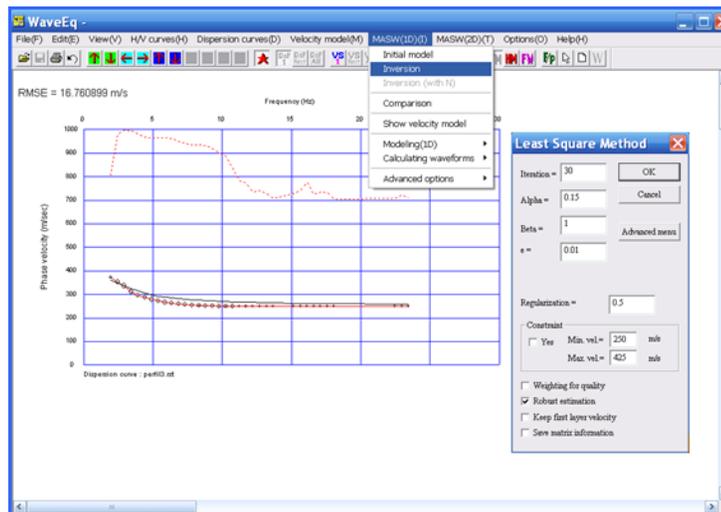


Figura 4.23. Selección del número de iteraciones para realizar la inversión para MASW.

Al seleccionar OK el programa realiza el ajuste por medio de mínimos cuadrados, generando el perfil de velocidad de ondas de corte (Vs) con respecto a la profundidad (figura 4.24). Por medio del botón  se observa como las curvas se ajustan reduciendo significativamente el error de coincidencia RMSE después de realizar la

inversión (figura 4.25). Este error se muestra en la gráfica en (m/s) y se obtiene también en (%) mediante un archivo llamado “RMSE.txt” que se guarda en la carpeta de datos al finalizar la inversión.

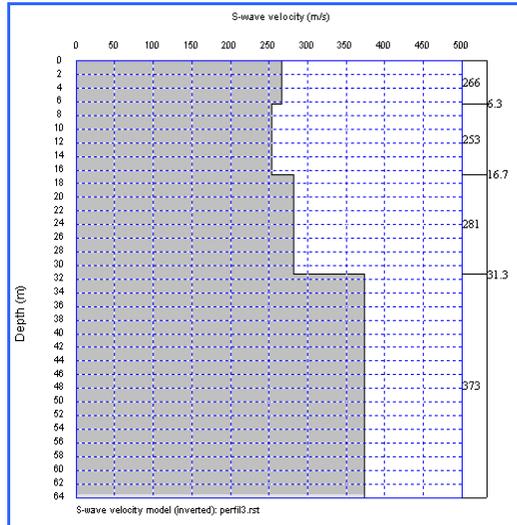


Figura 4.24. Perfil Vs para MASW.

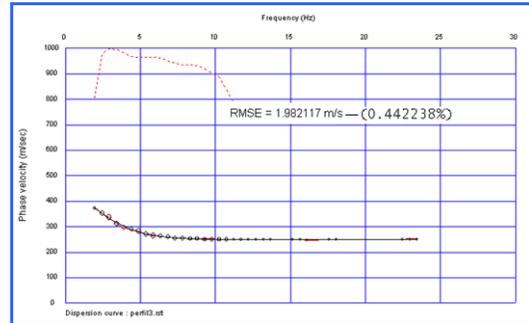


Figura 4.25. Curva de dispersión adquirida por MASW (línea roja), curva de dispersión calculada por el programa (línea negra) y el error RMSE, después de realizar la inversión.

Y por último se guardan los valores obtenidos del perfil Vs en un archivo “.txt” (figura 4.26), en donde los datos de interés son los valores de la velocidad de ondas de corte (Vs) y los valores de la profundidad.

perfil-masw-3 - Bloc de notas				
Archivo Edición Formato Ver Ayuda				
Depth(m)	S-wave velocity(m/s)	P-wave velocity(m/s)	Density(g/cc)	N
0.000000	266.934961	4166.373730	2.459992	0.759649
6.250000	253.451794	4151.306152	2.460770	0.644058
16.666668	281.940639	4183.100700	2.468638	0.904184
31.250000	373.330235	4284.499645	2.482265	2.210989
87.499999	465.151876	4386.023045	2.486298	4.453812

Figura 4.26. Archivo “.txt” con los valores del perfil Vs para MASW.

4.4.2 Pasos para el procesamiento de los registros mediante el método ReMi

- Activación del programa

Igualmente que el método MASW, existen dos maneras de activar el programa para el método ReMi: la primera es haciendo doble click al programa *Surface Wave Analysis Wizard* de *SeisImager*, donde se abre una ventana como se muestra en la figura 4.27 y se selecciona el modo *Passive Source (Microtremor) 1D MAM*, y luego se abre de forma automática el programa *Pickwin* para abrir los archivos. Y la segunda es activar de manera directa el programa *Pickwin*.

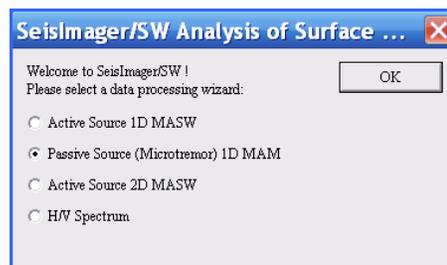


Figura 4.27. Ventana para seleccionar el método de fuente pasiva (Microtremor) 1D MAM.

El procesamiento por el método ReMi es similar al procesamiento de MASW, la única diferencia es el número de archivos y la manera como se introducen al programa. En este trabajo se realizaron 10 registros para cada perfil ReMi.

Se abren los 10 archivos que se desean procesar de manera conjunta correspondientes a cada perfil, los cuales están guardados en una carpeta llamada “ruido ambiental” como se muestra en la figura 4.28.

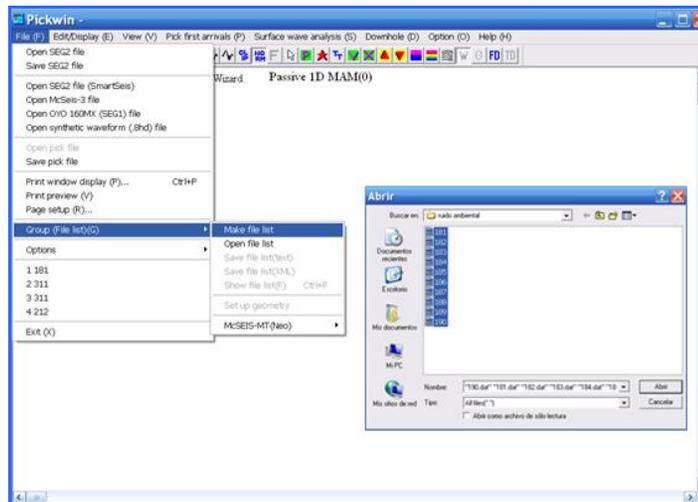


Figura 4.28. Selección de los datos de entrada para ReMi.

Una vez abierto los registros se puede modificar la configuración de la pantalla para mejorar la observación mediante las mismas funciones básicas del método MASW.

A diferencia de los datos de origen activos (MASW), por lo general es difícil evaluar la calidad de los datos de origen pasivos (ReMi), ya que los registros no se obtienen a través de un disparo en el dominio del tiempo. Para poder evaluar la calidad de los datos de la fuente pasiva es necesario visualizar el contenido de las mismas frecuencias de rastreo de cada traza y la energía dominante, para ello se utiliza el botón de dominio de frecuencia **FD** para llevar los registros del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia como se observa en la figura 4.29.

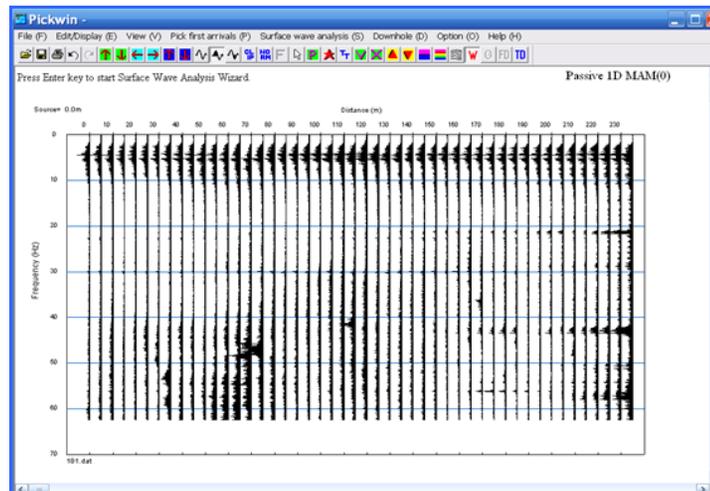


Figura 4.29. Registro ReMi en el dominio de frecuencia.

Luego se vuelve al dominio del tiempo utilizando el botón de dominio de tiempo  para seguir con el procesamiento (figura 4.30).

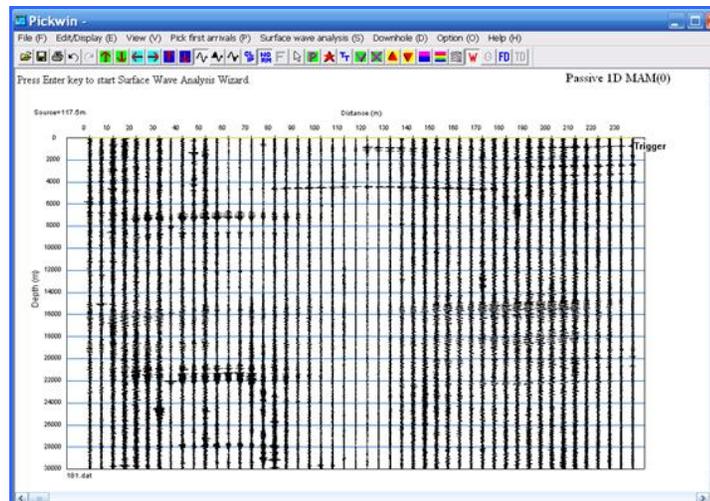


Figura 4.30. Registro ReMi en el dominio de tiempo.

El siguiente paso es establecer la geometría espacial, en donde se selecciona el arreglo lineal y se coloca el espaciamiento de los receptores (5 m) y el número de canales (48 canales) como se muestra en la figura 4.31.

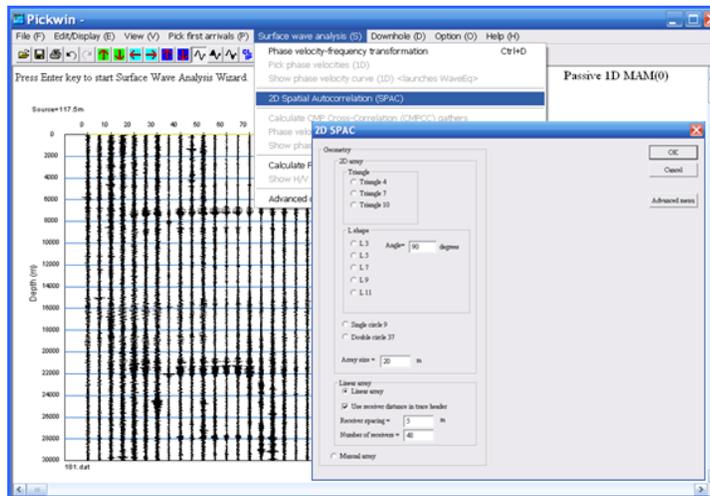


Figura 4.31. Configuración de la geometría espacial para ReMi.

- Generación de la curva de dispersión

Ya establecida la geometría espacial se selecciona el botón OK y se muestra la coherencia de los registros, la cual permite definir que intervalo de frecuencias se utilizará en los cálculos de velocidad de fase. Luego se selecciona la opción de la transformación a la velocidad de fase-frecuencia, donde se introduce el valor máximo de velocidad (600 m/s) y el valor máximo de frecuencia (15 Hz) (figura 4.32).

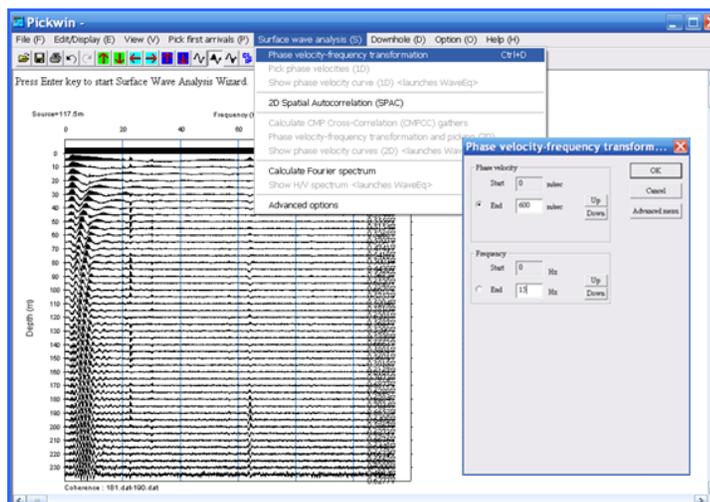


Figura 4.32. Valor máximo de velocidad y frecuencia de las ondas superficiales para la transformación a la velocidad de fase-frecuencia para ReMi.

Y nuevamente al marcar el botón OK se muestra la gráfica de velocidad de fase *versus* frecuencia, posteriormente para obtener las velocidades de fase se introduce al programa el valor mínimo (1 Hz) y máximo (15 Hz) de frecuencia (figura 4.33).

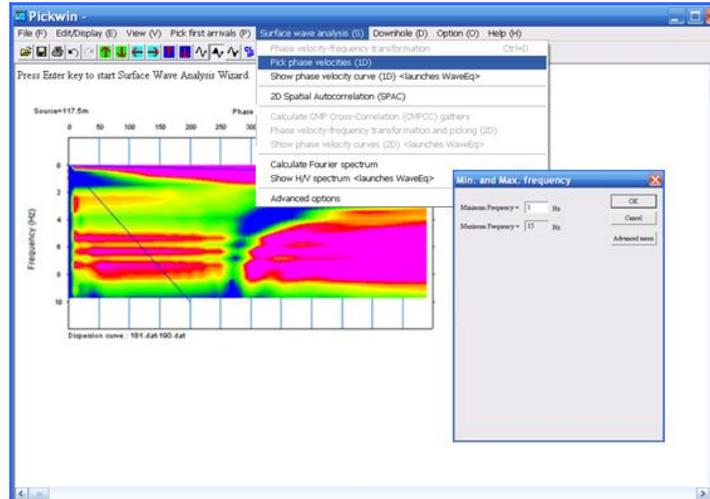


Figura 4.33. Gráfico de velocidad de fase *versus* frecuencia y ventana donde se introduce el valor mínimo y máximo de frecuencia para ReMi.

Seguidamente se define la curva de dispersión, en donde el programa de manera automática elige matemáticamente las amplitudes máximas para cada frecuencia (puntos rojos) como se observa en la figura 4.34, también se pueden seleccionar los puntos manualmente, ya que podrían existir puntos que estén fuera de la curva.

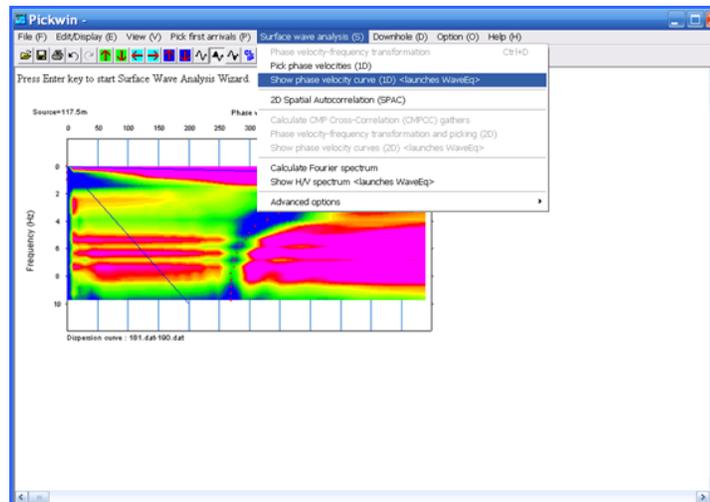


Figura 4.34. Máximas amplitudes de cada frecuencia representadas por puntos rojos para ReMi.

Al seleccionar la opción de mostrar la velocidad de fase de la curva, se abre una nueva ventana con el módulo *WaveEq (Surface Wave Analysis)* de *SeisImager*, que muestra la curva de dispersión original de perfil ReMi (figura 4.35), en donde se eliminan los datos de baja calidad exactamente igual que el método MASW y se guarda en un archivo “.rst” para después generar el perfil de velocidad de ondas de corte (V_s).

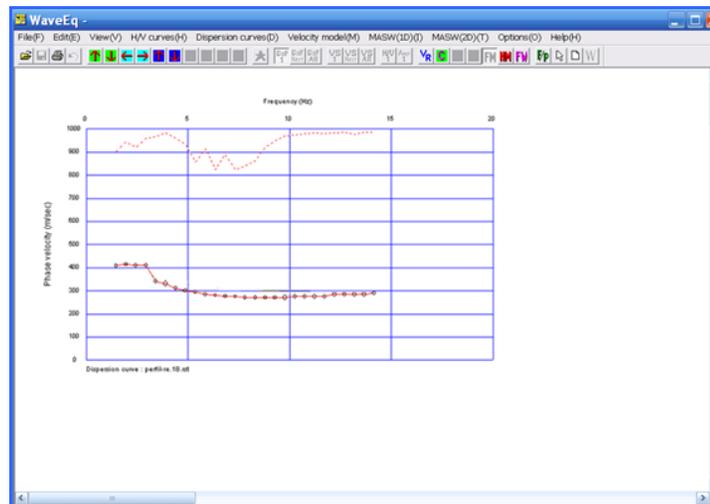


Figura 4.35. Generación de la curva de dispersión para ReMi.

- Generación del perfil de velocidad de ondas de corte (V_s)

El perfil V_s con la profundidad se genera de igual manera que el método MASW, se crea primero un modelo inicial V_s introduciéndole al programa el valor de la profundidad (100 m) y el número de capas (10 capas) como se muestra en la figura 4.36.

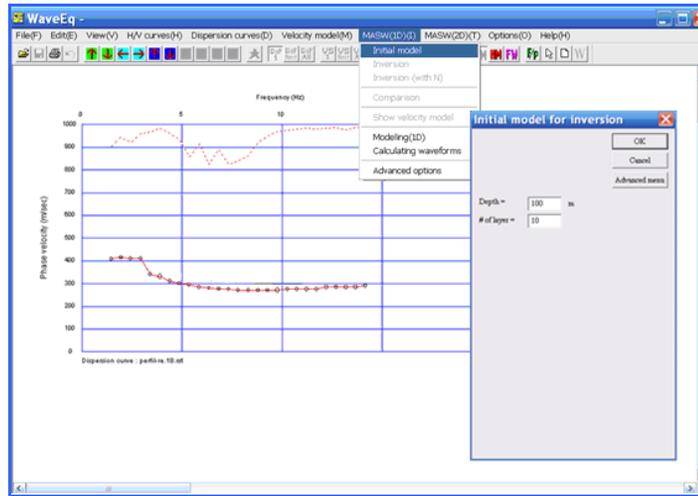


Figura 4.36. Creación del modelo inicial Vs para ReMi.

Al marcar OK se muestra el modelo inicial de Vs (figura 4.37), y seleccionando el botón  se observa la curva de dispersión adquirida por el método ReMi (línea roja) y la curva de dispersión calculada por el programa (línea negra) con el error RMSE (figura 4.38).

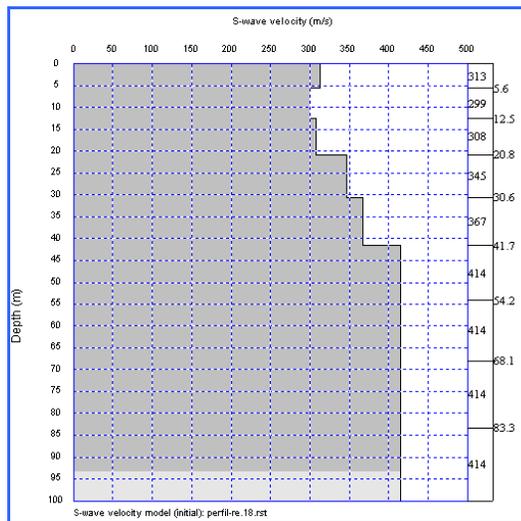


Figura 4.37. Modelo inicial Vs para ReMi.

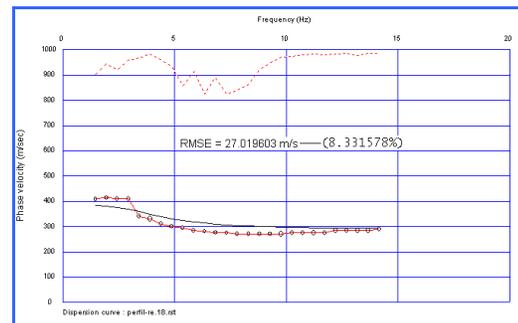


Figura 4.38. Curva de dispersión adquirida por ReMi (línea roja), curva de dispersión calculada por el programa (línea negra) y el error RMSE, antes de realizar la inversión.

Posteriormente se realiza la inversión para generar el perfil Vs, insertándole al programa el número de iteraciones (en este caso de 30 iteraciones) con una estimación robusta, como se observa en la figura 4.39.

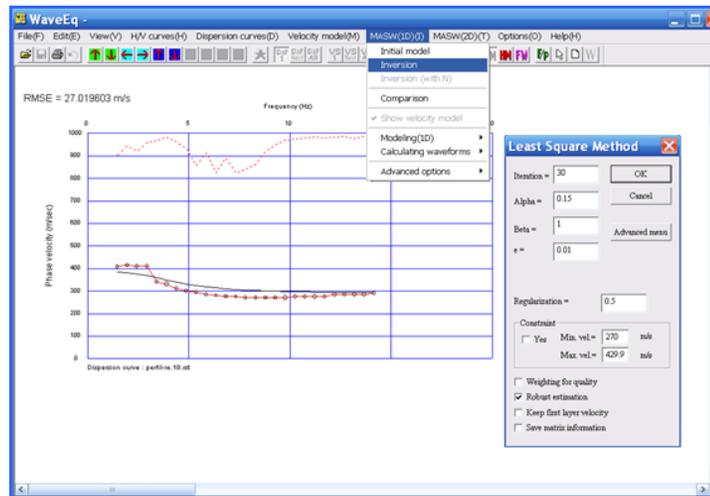


Figura 4.39. Selección del número de iteraciones para realizar la inversión para ReMi.

Y seleccionando el botón OK el programa realiza el ajuste por medio de mínimos cuadrados, creando el perfil de Vs con la profundidad (figura 4.40). Luego con el botón  se observa como las curvas se ajustan y se reduce el error de coincidencia RMSE (figura 4.41).

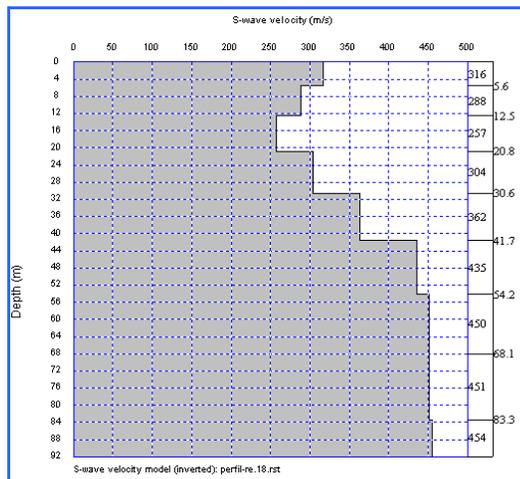


Figura 4.40. Perfil Vs para ReMi.

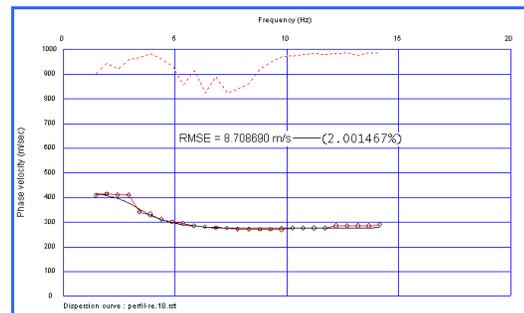


Figura 4.41. Curva de dispersión adquirida por ReMi (línea roja), curva de dispersión calculada por el programa (línea negra) y el error RMSE, después de realizar la inversión.

Finalmente se guardan los valores obtenidos del perfil Vs en un archivo “.txt” (figura 4.42).

perfil-re-18 - Bloc de notas					
Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda	
Depth(m)	S-wave velocity(m/s)	P-wave velocity(m/s)	Density(g/cc)	N	
0.000000	316.148221	4220.603466	2.468746	1.302095	
5.555556	288.080305	4189.650059	2.465965	0.968396	
12.500000	257.845849	4156.631947	2.467666	0.680296	
20.833334	304.311603	4207.952976	2.475187	1.153094	
30.555556	362.768263	4272.335529	2.479444	2.017868	
41.666668	435.069680	4352.312565	2.488678	3.599652	
54.166667	450.836569	4369.673252	2.488678	4.031784	
68.055555	451.441616	4370.623112	2.488678	4.049041	
83.333336	454.473585	4374.337673	2.488678	4.136285	
133.333340	454.473585	4374.337673	2.488678	4.136285	

Figura 4.42. Archivo “.txt” con los valores del perfil Vs para ReMi.

4.4.3 Pasos para la inversión conjunta entre el método MASW y el método ReMi

La inversión conjunta se realiza para alcanzar un mayor rango de frecuencias en un solo perfil y así obtener información de las velocidades de ondas de corte con mejor resolución tanto para las primeras capas como para las profundidades mayores, y se realiza mediante la curva de dispersión original obtenida por el método MASW y la curva de dispersión original adquirida por el método ReMi para el mismo perfil.

Se utiliza el programa *WaveEq (Surface Wave Analysis)* de SeisImager (figura 4.43) para abrir los archivos (“.rst”) de las curvas de dispersión.



Figura 4.43. Módulo *WaveEq (Surface Wave Analysis)*.

Se abre primero el archivo correspondiente a la curva de dispersión original obtenida por el método MASW (figura 4.44).

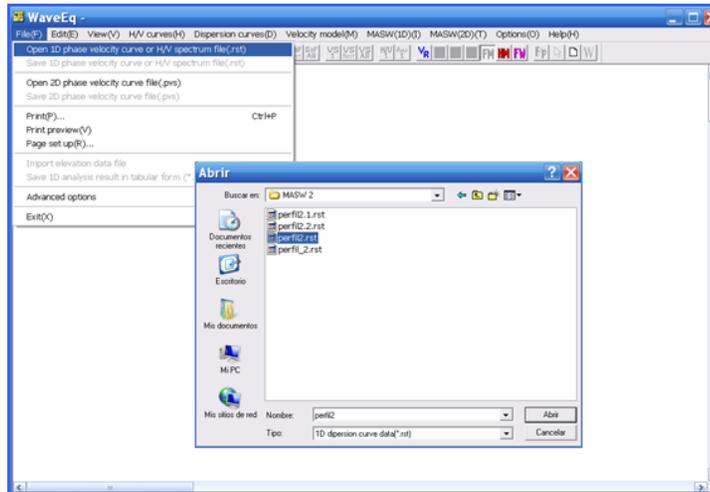


Figura 4.44. Selección del archivo de la curva de dispersión original obtenida por el método MASW.

Seguidamente se abre el archivo de la curva de dispersión original adquirida por el método ReMi como se muestra en la figura 4.45.

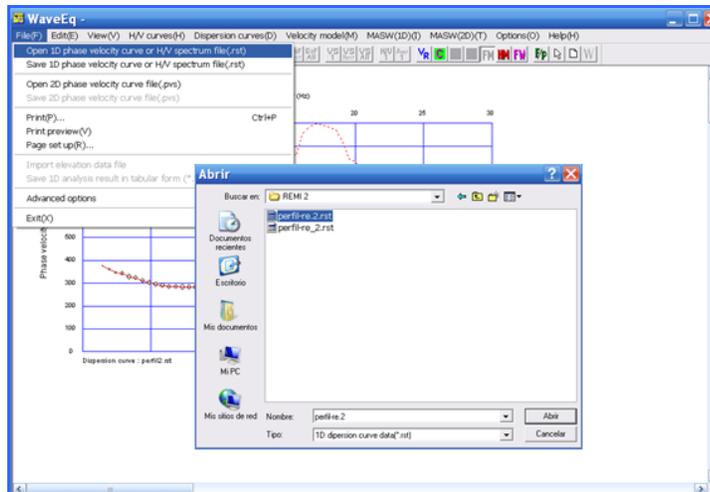


Figura 4.45. Selección del archivo de la curva de dispersión original adquirida por el método ReMi.

Luego el programa agrega la data de ambas curvas (figura 4.46) y se obtiene una sola curva de dispersión ajustando los valores promedio de frecuencias (figura 4.47), la cual es guardada en un archivo (“.rst”).

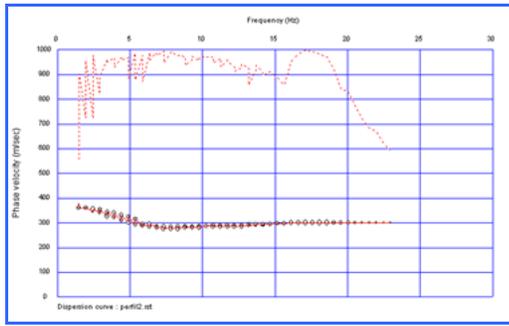


Figura 4.46. Promedio de frecuencias de las curvas de dispersión original obtenidas por MASW-ReMi.

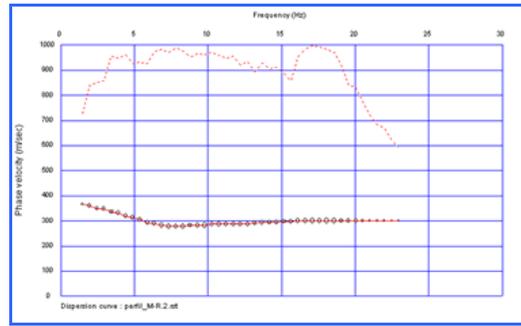


Figura 4.47. Curva de dispersión original obtenida mediante MASW-ReMi.

Al igual que el procesamiento para el método MASW y ReMi, se realiza la eliminación de los datos de baja calidad (figura 4.48), con una configuración de calidad de 0.7.

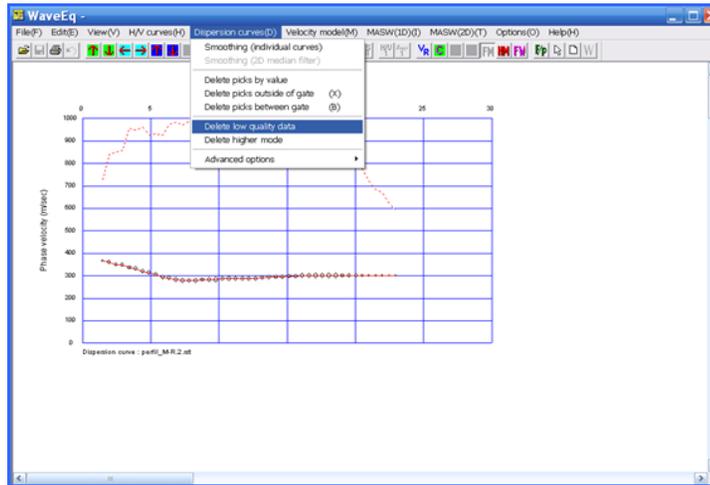


Figura 4.48. Eliminación de los datos de baja calidad de la curva de dispersión para MASW-ReMi.

Una vez eliminados los datos de baja calidad se procede a generar el modelo inicial V_s , en donde se asigna el valor de la profundidad (100 m) y el valor de número de capas (10 capas) como se observa en la figura 4.49.

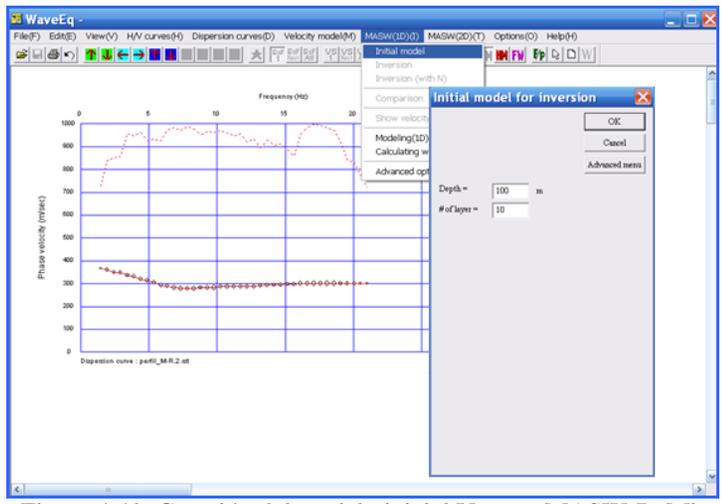


Figura 4.49. Creación del modelo inicial Vs para MASW-ReMi.

Al seleccionar el botón OK se muestra el modelo inicial Vs (figura 4.50), y por medio del botón  se muestra la curva de dispersión adquirida por la inversión conjunta de los métodos MASW y ReMi (línea roja) y la curva de dispersión calculada por el programa (línea negra) con el error RMSE (figura 4.51).

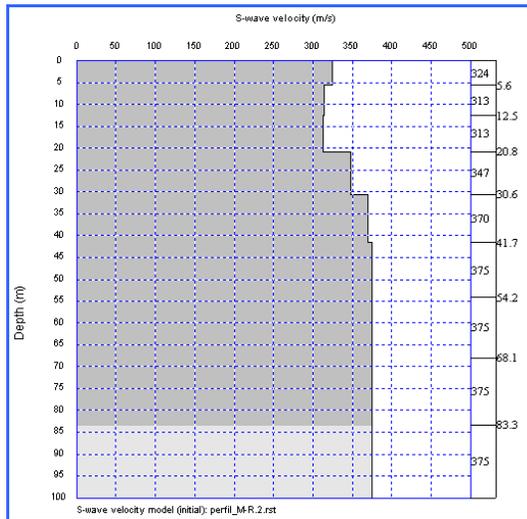


Figura 4.50. Modelo inicial Vs para MASW-ReMi.

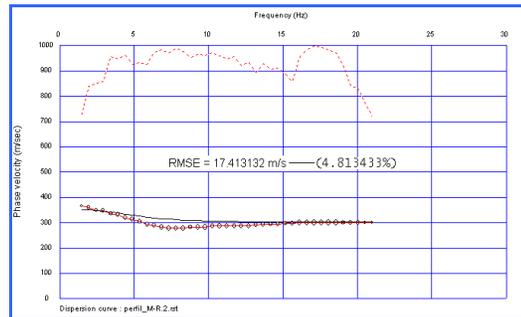


Figura 4.51. Curva de dispersión adquirida por MASW-ReMi (línea roja), curva de dispersión calculada por el programa (línea negra) y el error RMSE, antes de realizar la inversión.

Luego se realiza la inversión para generar el perfil Vs, para ello se selecciona el número de iteraciones (en este caso de 30 iteraciones) con una estimación robusta, como se observa en la figura 4.52.

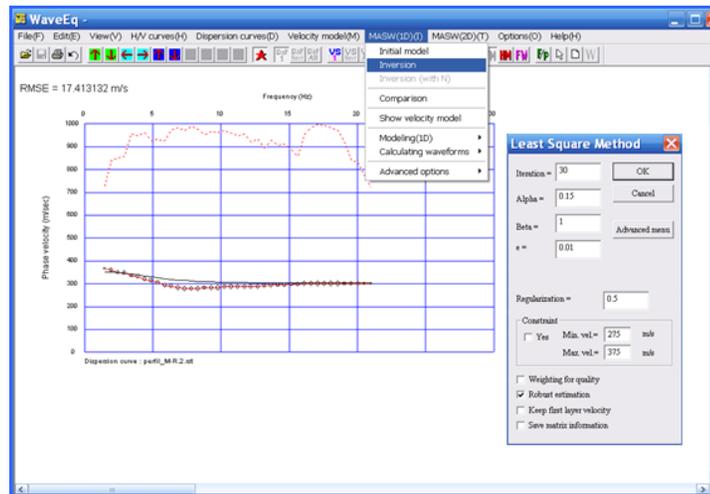


Figura 4.52. Selección del número de iteraciones para realizar la inversión para MASW-ReMi.

Al marcar el botón OK el programa realiza el ajuste por medio de mínimos cuadrados, generando el perfil de velocidad de ondas de corte con respecto a la profundidad (figura 4.53). Y con el botón  se observa como las curvas se ajustan y se disminuye el error de coincidencia RMSE (figura 4.54).

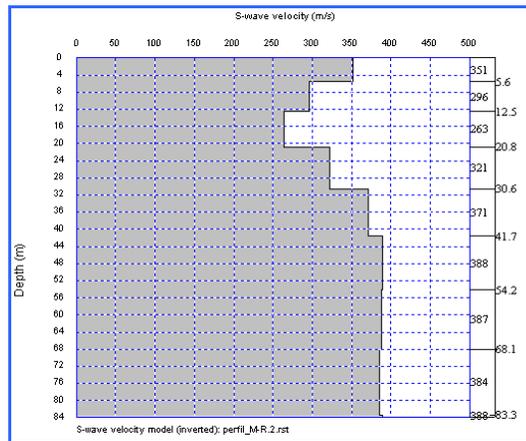


Figura 4.53. Perfil Vs para MASW-ReMi.

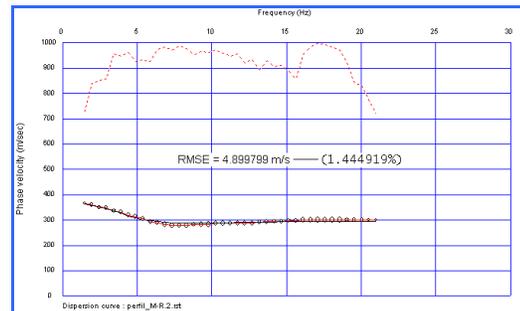


Figura 4.54. Curva de dispersión adquirida por MASW-ReMi (línea roja), curva de dispersión calculada por el programa (línea negra) y el error RMSE, después de realizar la inversión.

Y el último paso es guardar los valores obtenidos del perfil Vs en un archivo “.txt” (figura 4.55).

perfil-M-R-2 - Bloc de notas					
Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda	
Depth(m)	S-wave velocity(m/s)	P-wave velocity(m/s)	Density(g/cc)	N	
0.000000	351.673454	4260.086060	2.470901	1.827813	
5.555556	296.301365	4199.087143	2.468836	1.059181	
12.500000	263.553977	4162.692070	2.468692	0.729429	
20.833334	321.340770	4226.480484	2.475543	1.371433	
30.555556	371.346474	4282.039165	2.479974	2.173790	
41.666668	388.976961	4301.708698	2.480901	2.519836	
54.166667	387.516975	4300.338268	2.480901	2.489839	
68.055555	384.698063	4297.292233	2.480901	2.432614	
83.333336	388.575733	4301.309586	2.480901	2.511567	
133.333340	390.655428	4303.509712	2.480901	2.554628	

Figura 4.55. Archivo “.txt” con los valores del perfil VS para MASW-ReMi.

4.5 Metodología para la creación de modelos de velocidad de ondas de corte (Vs) en 3D mediante el programa *Gocad*

Generados todos los perfiles Vs tanto para cada método como los obtenidos de la inversión conjunta entre ambos, se procede a crear los modelos de velocidad 3D de ondas de corte con el programa *Gocad* de *Paradigm*. Primero se crea un archivo en *Excel* de todos los perfiles Vs con los siguientes datos: nombre, coordenadas este, coordenadas norte, cota, profundidad, velocidad de ondas de corte y TVD que significa “*true vertical depth*”, ya que el programa acepta los valores de profundidad vertical verdadera tomando como punto referencial el nivel del mar, en donde los valores con signos negativos (-) representan valores que están por encima del nivel del mar y los valores positivos (+) representan los valores por debajo del nivel del mar (apéndice A, B y C). Posteriormente el archivo de *Excel* se guarda como un archivo “.txt” para que el programa pueda admitirlo.

Luego se importan los valores al programa *Gocad* y se generan los perfiles con la propiedad de velocidad de ondas de corte (Vs) como se observa en la figura 4.56.

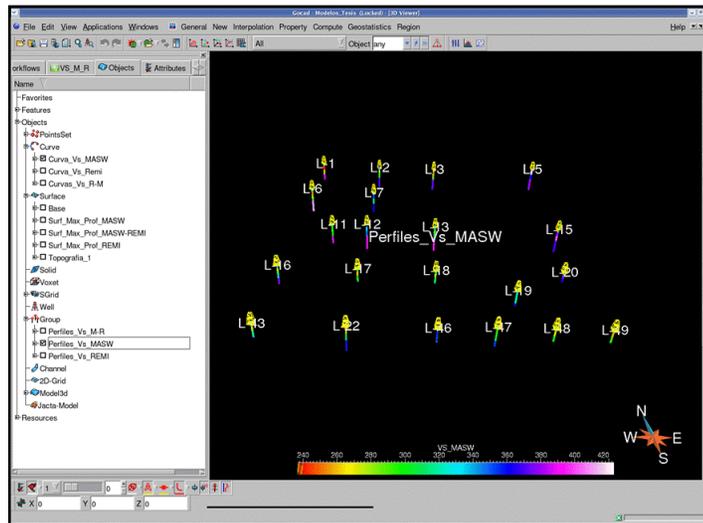


Figura 4.56. Distribución de los perfiles Vs mediante el programa Gocad.

Para continuar con la generación del modelo en 3D, se crean dos superficies: una primera superficie que representa a la topografía del área en estudio y una segunda superficie que se obtiene a través de los valores máximos de profundidad alcanzados de los perfiles (figura 4.57).

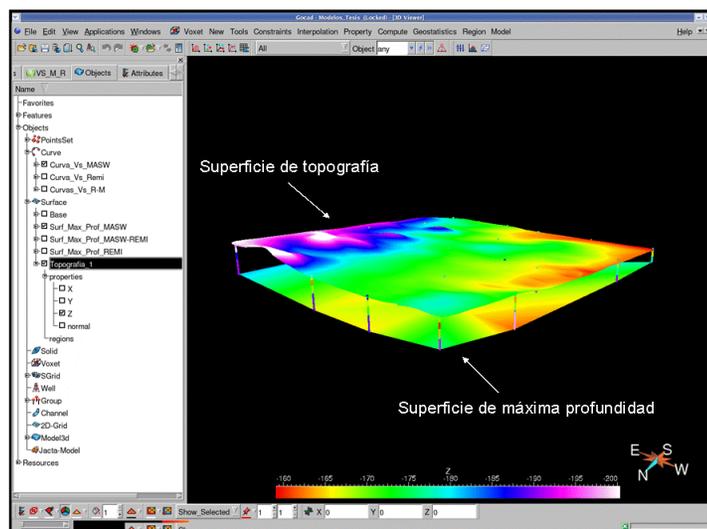


Figura 4.57. Superficie de topografía y superficie de máxima profundidad de los perfiles.

Seguidamente se crea un *grid* que tiene como límite tope la superficie de topografía y como límite base la superficie de máxima profundidad alcanzada de los perfiles, con 100 celdas en dirección norte, 100 en dirección este y 50 celdas en dirección de la

profundidad (figura 4.58), en donde se cargan todos los perfiles con los valores de velocidad de ondas de corte para realizar la interpolación.

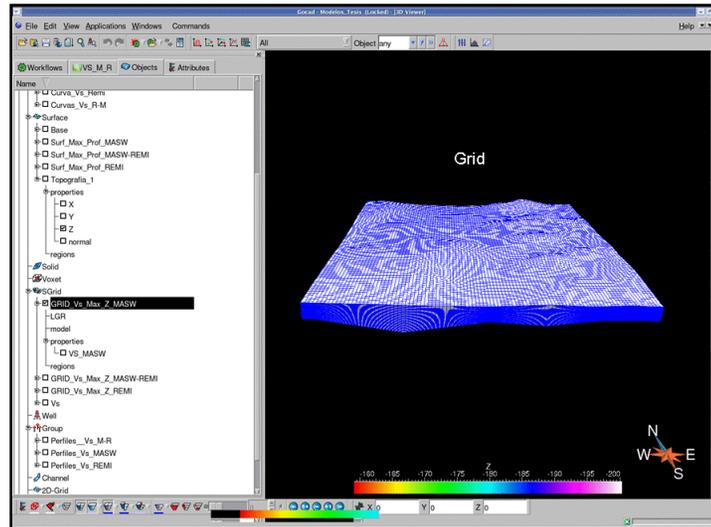


Figura 4.58. Creación del *grid*.

Y por medio del método DSI (*discrete smooth interpolation* o interpolación suave discreta) de la plataforma computacional *Gocad* de *Paradigm* se realiza la interpolación de los datos y finalmente se genera el modelo de velocidad 3D de ondas de corte (figura 4.59).

El algoritmo de interpolación más utilizado en *Gocad* es el método DSI, que permite la interpolación de superficies y líneas en 3D, teniendo en cuenta los tipos de datos diferentes. El enfoque se basa en una discretización de los objetos modelados como un conjunto de nodos interconectados que se han definido las geometrías y propiedades físicas. El principio de la DSI es una triangulación adaptada que especifica la forma deseada para proporcionar la solución más óptima y generar modelos con un mejor ajuste. Aplicando DSI se cambia la localización de todos los puntos *libres* para minimizar la rugosidad del objeto.

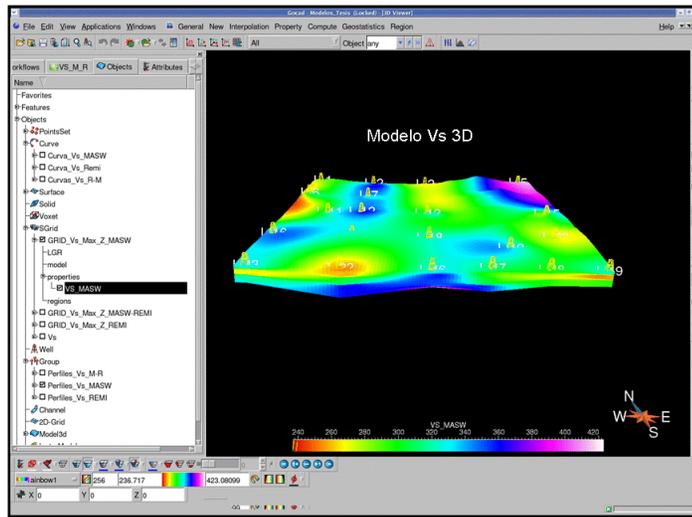


Figura 4.59. Generación del modelo de velocidad 3D de ondas de corte (V_s).

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación se presentan los resultados obtenidos del área en estudio de acuerdo a los objetivos planteados, los cuales incluyen registros de prueba para comparar la señal en términos de amplitud, frecuencia y relación S/R con distintos tipos de fuentes (mandarria de 20 lb y masa de 150 kg). Se comparan los perfiles de velocidad de ondas de corte (V_s) adquiridos con cada uno de los métodos estudiados (MASW y ReMi), así como también los perfiles obtenidos con geófonos de distintas frecuencias (4,5 Hz y 10 Hz) de cada método. Se generaron perfiles V_s por medio de la inversión conjunta entre ambos métodos y se realizaron modelos de velocidad 3D de ondas de corte para el método MASW, ReMi y para la integración entre ambos.

5.1 Registros de prueba con distintos tipos de fuente (mandarria de 20 lb y masa de 150 kg)

En la figura 5.1 que representa un registro adquirido con la mandarria de 20 lb, se observa claramente el gran contenido de ruido y la señal obtenida no es bien registrada por los últimos canales, es decir, que al impactar la mandarria con la placa metálica entre 3 y 5 veces para el apilamiento, el frente de ondas generado no es bien grabado por los últimos geófonos debido a la distancia de los tendidos. En el registro adquirido por la masa de 150 kg (figura 5.2) se muestra que la señal esta bien grabada por los canales a lo largo de todo el registro con menor contenido de ruido, con mayores amplitudes y las trazas están mejor definida visualmente. Ambos registros fueron adquiridos bajo la misma configuración de los tendidos, con una separación entre geófonos de 5 m, longitud total de 237,5 m y geófonos con frecuencia de 10 Hz.

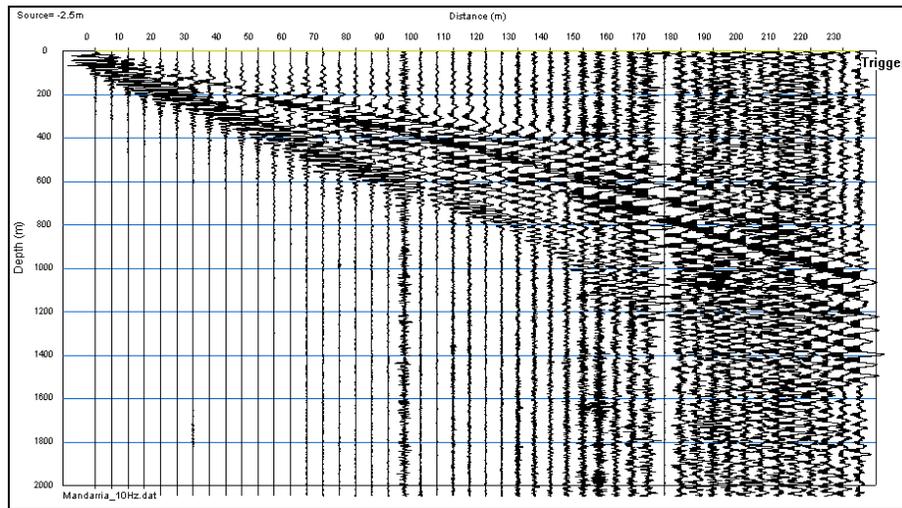


Figura 5.1. Registro con mandarina de 20 lb.

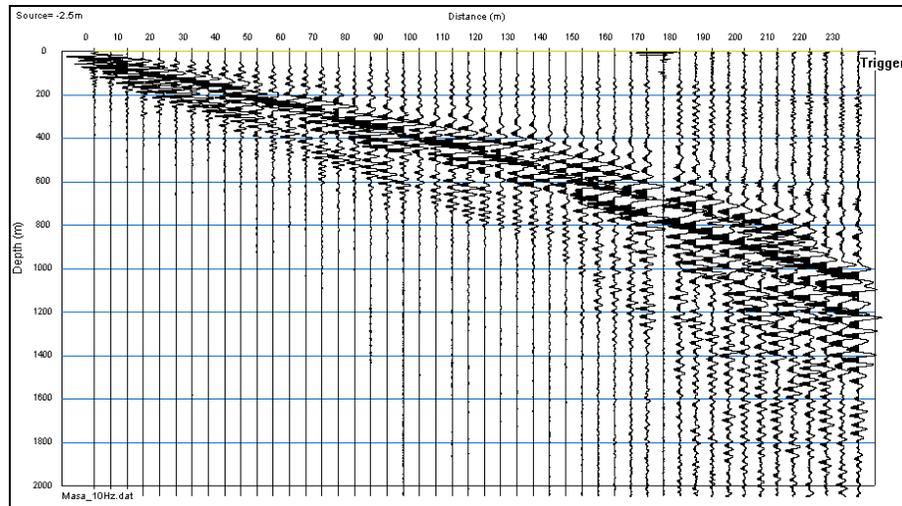


Figura 5.2. Registro con masa de 150 kg.

En términos de las frecuencias, en el registro obtenido con la mandarina de 20 lb (figura 5.3) se observa que en los primeros canales situados a pocos metros de la fuente, las frecuencias se encuentran en un rango entre 20 Hz y 100 Hz, y a medida que los canales están más alejados de la fuente, éstos registran la señal con un menor rango de frecuencias como se visualiza en los canales del medio del tendido, que graban la señal con un rango de frecuencias entre 5 Hz y 60 Hz, hasta alcanzar un rango aproximado de 5 Hz y 40 Hz para los últimos canales. También se observa el gran contenido de ruido registrado tanto por los canales centrales como en los

últimos, ya que la señal generada no es suficientemente fuerte para ser bien registrada por todos los geófonos. En la figura 5.4 que representa a las frecuencias obtenidas del registro realizado con la masa de 150 kg, se muestra que los rangos de frecuencias van desde 20 Hz a 80 Hz para los primeros canales hasta un rango entre 5 Hz y 40 Hz en los canales centrales y últimos aproximadamente, el contenido de ruido es mucho menor con una mejor relación S/R y se observan las trazas mejor definidas a lo largo del todo el registro con mayores amplitudes, por lo tanto la señal obtenida del registro realizado con la masa es de mejor calidad a la señal obtenida con mandarria.

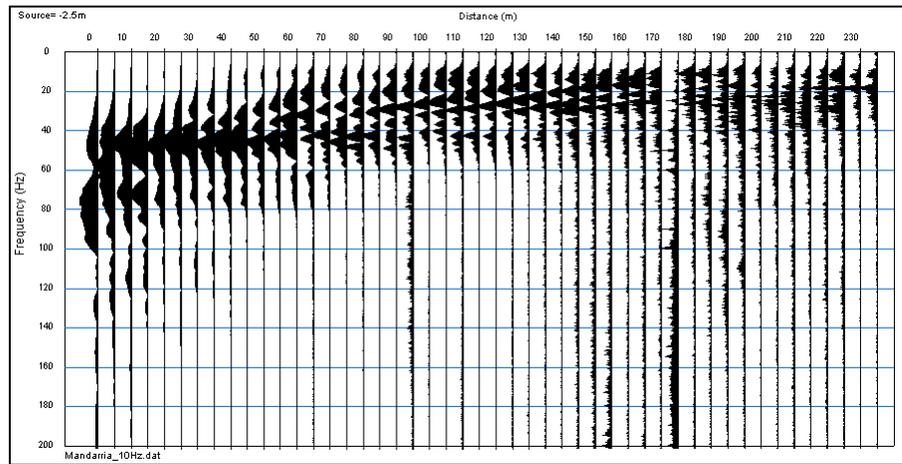


Figura 5.3. Frecuencias del registro con mandarria de 20 lb.

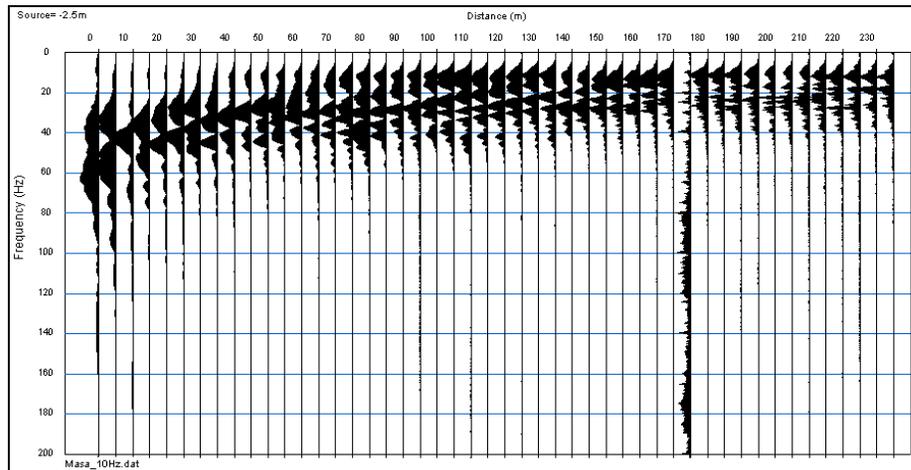


Figura 5.4. Frecuencias del registro con masa de 150 kg.

5.2 Perfiles de velocidad de ondas de corte generados por los métodos MASW y ReMi

En este trabajo se generaron 21 perfiles de velocidades de ondas de corte mediante el método MASW y 21 perfiles mediante el método ReMi, los cuales se ubicaron en la misma posición espacial para ambos métodos (excepto para los perfiles 8 y 46). En el apéndice A y B se muestran los valores de velocidades V_s con las profundidades.

Se toma como ejemplo el perfil V_s 47 para ser analizado mediante el método MASW y el método ReMi. Antes de comparar las velocidades de ondas de corte de los perfiles, es importante saber el rango de frecuencias característico que se obtienen por ambos métodos en la zona en estudio. La figura 5.5 muestra las frecuencias del perfil 47 con *offset* -2,5 m por el método MASW, con un rango aproximado entre los 7 Hz y 60 Hz para los primeros canales y a medida que los geófonos están más separados de la fuente las frecuencias disminuyen hasta alcanzar un rango entre 5 Hz y 40 Hz aproximadamente, en donde se eliminan las dos primeras trazas marcadas en color rojo para procesar la señal como se explica en el capítulo IV, y en la figura 5.6 se observan las frecuencias del perfil 47 adquiridas por el método ReMi, con valores aproximados entre 2 Hz y 10 Hz en todas las trazas del registro.

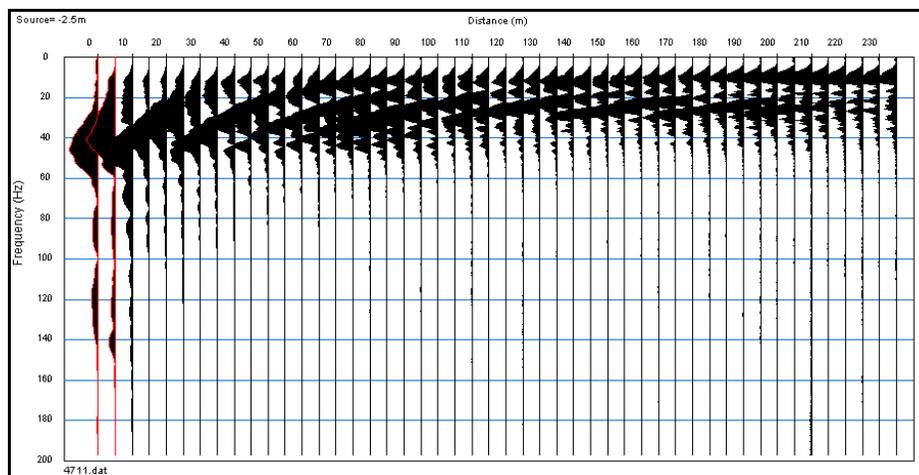


Figura 5.5. Frecuencias del registro 47 con *offset* -2,5 m por el método MASW.

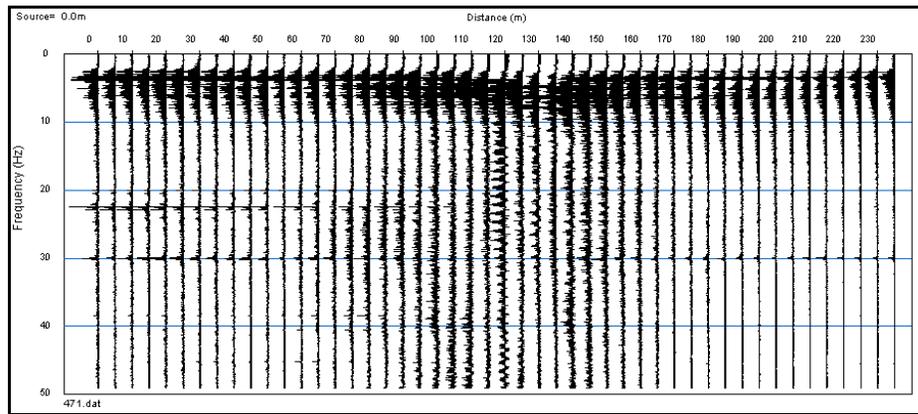


Figura 5.6. Frecuencias del registro 47 por el método ReMi.

En la figura 5.7 a) se muestra el perfil Vs 47 procesado por el método MASW, que fue adquirido hacia el sur del área de investigación y en donde la profundidad máxima alcanzada es de 44 m con un valor aproximado de velocidad de ondas de corte de 353 m/s, con un error RMSE mínimo de 1,5 m/s equivalente a 0,38 % (figura 5.7 b)); mientras que para el perfil Vs 47 obtenido por el método ReMi, adquirido en la misma zona, la profundidad de investigación es de 88 m con una velocidad de ondas de corte de 422 m/s aproximadamente (figura 5.8 a)) con un error RMSE de 1,10 % (figura 5.8 b)), existiendo una diferencia de profundidad entre ambos métodos de 44 m. Esto ocurre en la mayoría de los perfiles obtenidos.

Las condiciones del terreno donde fueron adquiridos los perfiles fueron las mismas, así como también las longitudes de las líneas sísmicas, las separaciones entre los geófonos y las frecuencias de los mismos. Esto implica, que con el método ReMi al ser un método que utiliza un tipo de fuente pasiva (ruido ambiental), que genera bajas frecuencias, los perfiles alcanzan una mayor profundidad de investigación con mayores velocidades de ondas de corte, que los perfiles obtenidos por el método MASW, el cual utiliza una fuente activa (masa de 150 kg), que origina frecuencias altas y por ende se obtienen valores de velocidades de ondas de corte menores, ya que alcanzan menos profundidades.

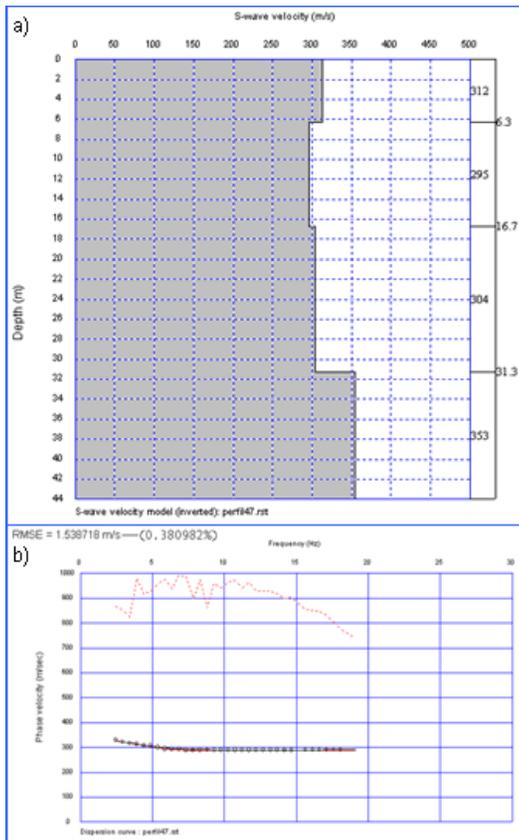


Figura 5.7. Perfil Vs 47 con geófonos de 4,5 Hz obtenido mediante el método MASW.

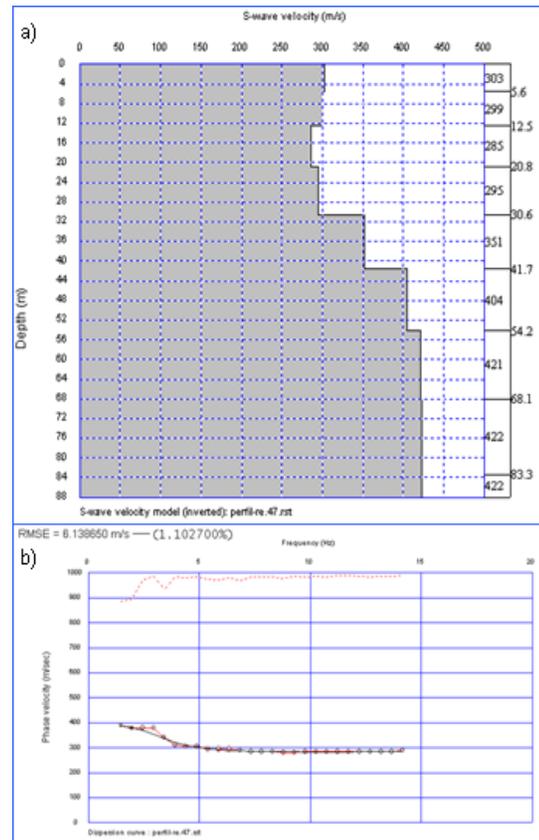


Figura 5.8. Perfil Vs 47 con geófonos de 4,5 Hz obtenido mediante el método ReMi.

5.3 Perfiles de velocidad de ondas de corte obtenidos por los métodos MASW y ReMi con geófonos de distintas frecuencias (4,5 Hz y 10 Hz)

5.3.1 Perfiles MASW de 4,5 Hz y 10Hz con *offset* mínimo de -2,5 m

En la figura 5.9 a) que representa el perfil Vs prueba_1 obtenido con geófonos de 4,5 Hz y *offset* de -2,5m se observa que para la primera capa con una profundidad de 12,5 m el valor de velocidad de ondas de corte es de 279 m/s, en la segunda capa con una profundidad de 33,3 m y de espesor 20,8 m la velocidad es de 318 m/s y para la tercera y última capa de 40 m de profundidad y 6,7 m de espesor la velocidad Vs es de 394 m/s, con 1,05 % de error RMSE (figura 5.9 b)). Mientras que para el perfil Vs prueba_1 obtenido con geófonos de 10 Hz y *offset* de -2,5 m como se observa en la figura 5.10 a), la velocidad Vs para la primera capa de 12,5 m es de 276 m/s y para

la segunda y última capa de aproximadamente 32 m de profundidad y de espesor 19,5 m la velocidad es de 316 m/s, con un error RMSE de 1,00 % (figura 5.10 b)).

Las diferencias de las velocidades Vs entre los dos perfiles son mínimas, en la primera capa existe una diferencia de apenas 3 m/s y para la segunda capa de 2 m/s; en relación a la profundidad alcanzada, para el perfil con geófonos de 4,5 Hz la profundidad es de 40 m, mientras que para el perfil con geófonos de 10 Hz la profundidad es de 32 m con una diferencia entre ambos perfiles de 8 m. Esta diferencia puede ser debido a que, al utilizar geófonos de 4,5 Hz se tiene un mayor rango para registrar las bajas frecuencias que con geófonos de 10 Hz y por tal razón se obtienen valores de velocidades de ondas de corte a una mayor profundidad.

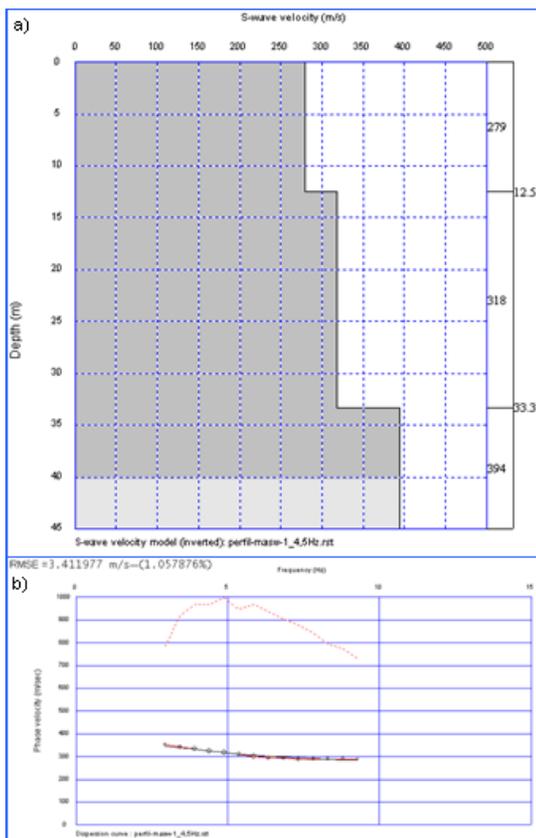


Figura 5.9. Perfil Vs prueba_1 con geófonos de 4,5 Hz obtenido por MASW (*offset* -2,5 m).

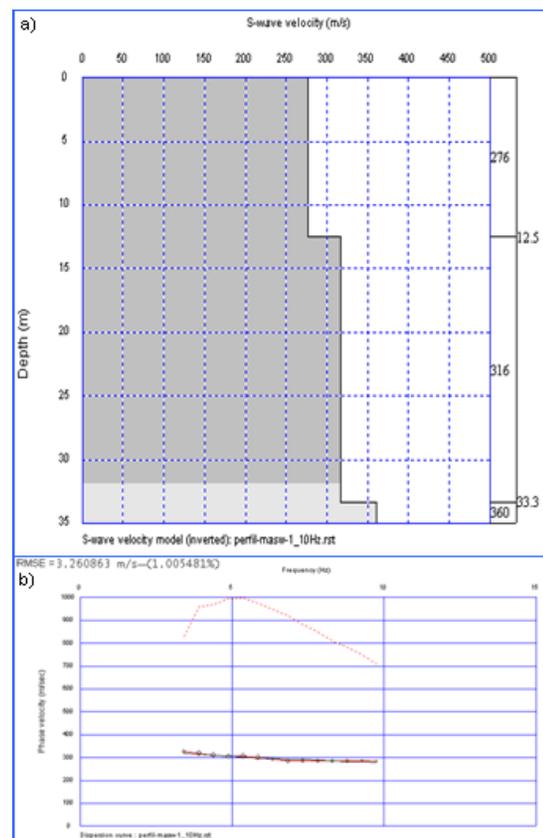


Figura 5.10. Perfil Vs prueba_1 con geófonos de 10 Hz obtenido por MASW (*offset* -2,5 m).

5.3.2 Perfiles MASW de 4,5 Hz y 10Hz con *offset* máximo de 237,5 m

En el perfil Vs prueba_2 obtenido con geófonos de 4,5 Hz y *offset* de 237,5 m, la primera capa de 12,5 m de profundidad tiene un valor de velocidad de ondas de corte de 275 m/s, en la segunda capa con 33,3 m de profundidad y espesor 20,8 m la velocidad Vs es de 320 m/s y para la última capa la velocidad es de 399 m/s con una profundidad de 41 m y 7,7 m de espesor como se muestra en la figura 5.11 a), con un error RMSE de 1,19 % (figura 5.11 b)). Para el perfil Vs prueba_2 con geófonos de 10 Hz y *offset* de 237,5 m, la velocidad de ondas de corte para la primera capa es de 273 m/s con una profundidad de 12,5 m y para la segunda y última capa la velocidad es de 325 m/s con una profundidad de investigación aproximada de 33 m y 20,5 m de espesor (figura 5.12 a)), con 1,12 % de error RMSE (figura 5.12 b)).

Al igual que los perfiles adquiridos con la fuente a un *offset* de -2,5 m, las diferencias entre las velocidades de ondas de corte de los perfiles obtenidos con la fuente con *offset* de 237,5 m son pequeñas, para la primera capa la diferencia es de 2 m/s y para la segunda capa es de 5 m/s. Con respecto a la profundidad, existe una diferencia entre los perfiles de 8 m, ya que el perfil con geófonos de 4,5 Hz la profundidad alcanzada es de 41 m, mientras que para el perfil con geófonos de 10 Hz la profundidad es de 33 m aproximadamente. Cabe destacar que esta diferencia de 8 m es la misma diferencia de profundidad que existe entre los perfiles Vs con *offset* de -2,5 m, por lo tanto se puede decir que los parámetros de adquisición y procesamiento son válidos, ya que el área en estudio esta conformada por sedimentos cuaternarios en donde las capas suelen ser uniformes.

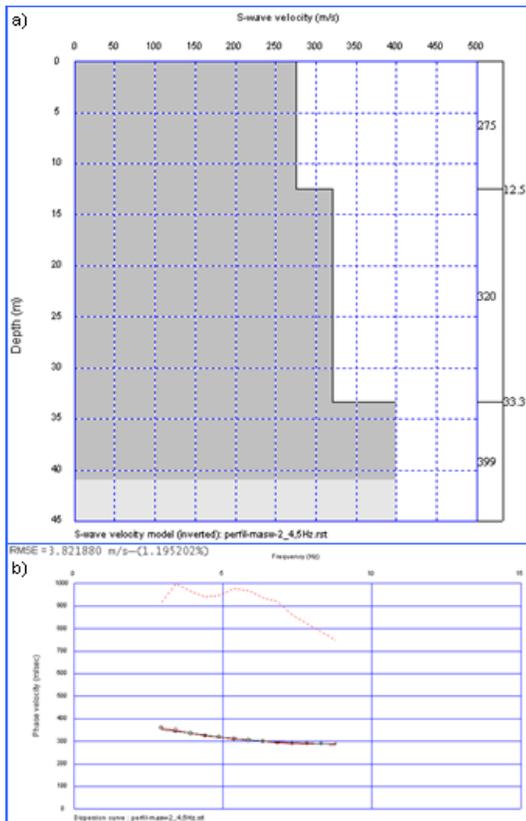


Figura 5.11. Perfil Vs prueba_2 con geófonos de 4,5 Hz obtenido por MASW (*offset* 237,5 m).

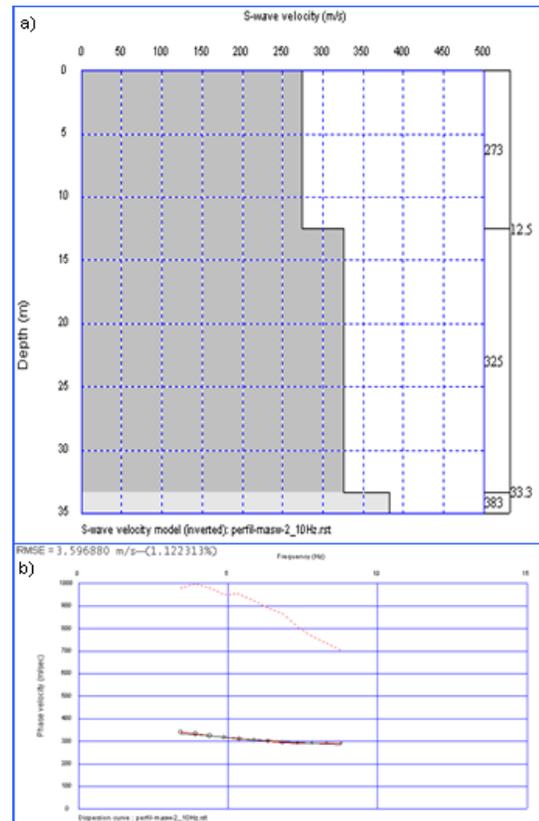


Figura 5.12. Perfil Vs prueba_2 con geófonos de 10 Hz obtenido por MASW (*offset* 237,5 m).

5.3.3 Perfiles ReMi de 4,5 Hz y 10 Hz

En la figura 5.13 a) se muestra el perfil Vs prueba con geófonos de 4,5 Hz obtenido por el método ReMi, en donde la velocidad de la primera capa es de 303 m/s con una profundidad de 5,6 m, para la segunda capa la velocidad se mantiene casi igual con un valor de 305 m/s con una profundidad de 12,5 m y de espesor 6,9 m, en la tercera capa la velocidad disminuye a 273 m/s con una profundidad de 20,8 m y 8,3 m de espesor, luego para la cuarta capa la velocidad aumenta con un valor de 301 m/s a una profundidad de 30,6 m y espesor 9,8 m, y así continua incrementando la velocidad a medida que aumenta la profundidad, para la quinta capa la una profundidad es de 41,7 m con 11,1 m de espesor la velocidad es de 366 m/s y para la capa final la velocidad es de 410 m/s con una profundidad de 52 m aproximadamente y espesor 10,3 m, con un error RMSE de 0,89 % (figura 5.13 b)). En el perfil Vs prueba con

geófonos de 10 Hz obtenido por ReMi, las velocidades V_s con respecto a las profundidades siguen el mismo comportamiento que el perfil generado con geófonos de 4,5 Hz como se muestra en la figura 5.14 a), en donde la primera capa con una profundidad de 5,6 m la velocidad es de 305 m/s, para la segunda capa con una profundidad de 12,5 m y de espesor 6,9 m la velocidad es 301 m/s, en la tercera capa con 20,8 m de profundidad y 8,3 m de espesor de la velocidad decrece a 270 m/s, para la cuarta capa la velocidad aumenta con un valor 310 m/s con una profundidad de 30,6 m y de espesor 9,8 y para la última capa de 40 m de profundidad y un espesor de 9,4 m la velocidad es de 376 m/s, con un 0,76 % de error RNSE (figura 5.14 b)).

Las diferencias de ambos perfiles en relación a las velocidades por capas son muy pequeñas, en la primera capa existe una diferencia de tan solo 2 m/s, para la segunda capa es de 4 m/s, en la tercera capa de 3 m/s, la cuarta capa la diferencia de velocidad V_s es de 9 m/s y para la quinta capa es de 10 m/s. Pero en cuanto a la profundidad alcanzada por ambos perfiles si se observa una variación. En el perfil obtenido con geófonos de 4,5 Hz la profundidad alcanzada es de 52 m, mientras que para el perfil con geófonos de 10 Hz la profundidad es de 40 m, existiendo una diferencia de 12 m de profundidad. Esta diferencia de profundidad puede deberse principalmente a las frecuencias de los geófonos, ya que los geófonos de 4,5 Hz registran mejor y con un mayor rango las frecuencias bajas del método pasivo, que los geófonos de 10 Hz.

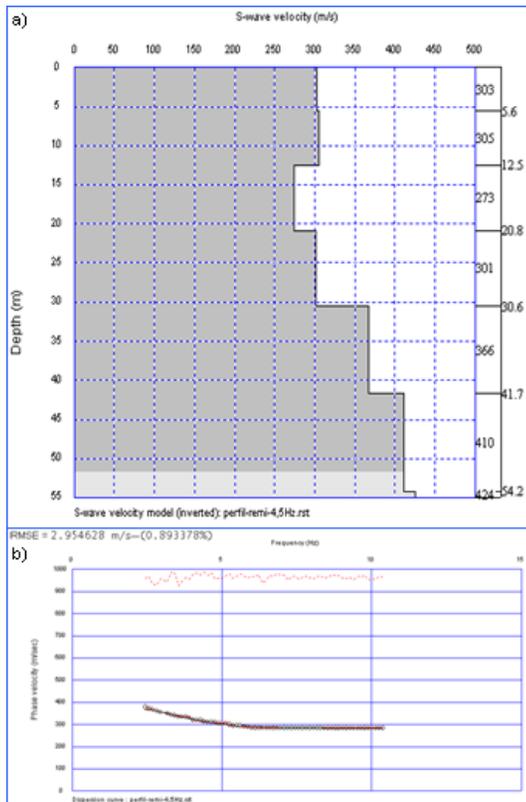


Figura 5.13. Perfil Vs prueba con geófonos de 4,5 Hz obtenido por ReMi.

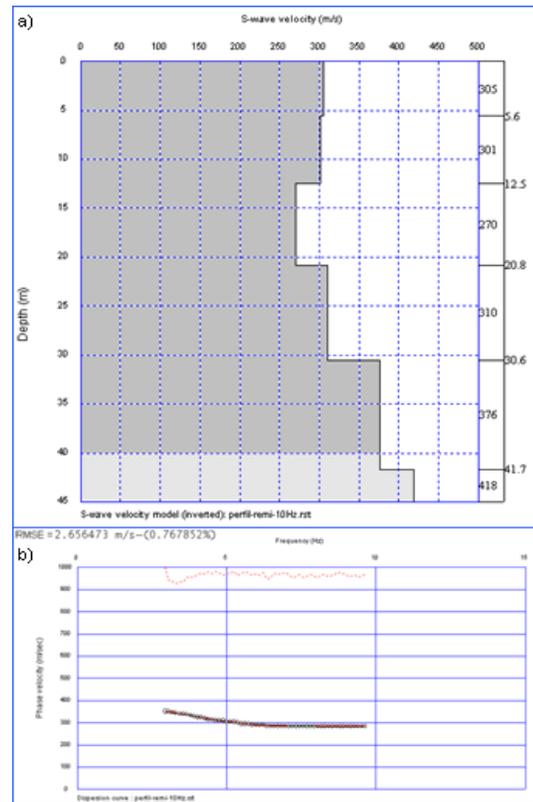


Figura 5.14. Perfil Vs prueba con geófonos de 10 Hz obtenido por ReMi.

5.4 Perfiles de velocidad de ondas de corte generados mediante la inversión conjunta entre los métodos MASW y ReMi

En el perfil Vs 3 con geófonos de 4,5 Hz generado por MASW (figura 5.15 a)), se observa que la primera capa de 6,3 m de profundidad la velocidad Vs es de 266 m/s, en la segunda capa la velocidad disminuye a 253 m/s con una profundidad de 16,7 m y un espesor de 10,4 m, luego para la tercera capa la velocidad aumenta a un valor de 281 m/s con 31,3 m de profundidad con un espesor 15 m y para la capa final de profundidad 64 m y 32,7 m de espesor la velocidad de ondas de corte es 373 m/s, con un error RMSE de 0,44 % (figura 5.15 b)). En el perfil Vs 3 con geófonos de 4,5 Hz obtenido mediante el método ReMi (figura 5.16 a)) se muestra que para las tres primeras capas hasta 20,8 m de profundidad las velocidades Vs son casi idénticas con valores de 249 m/s, 251 m/s y 256 m/s respectivamente, en la cuarta capa la

velocidad aumenta a 286 m/s a una profundidad de 30,6 m y de espesor 9,8 m, para la quinta capa con 41,7 m de profundidad y 11,1 m de espesor de la velocidad se incrementa a 351 m/s y para las últimas tres capas las velocidades se mantienen con valores de 376 m/s, 383m/s y 384 m/s respectivamente hasta alcanzar una profundidad de 84 m, con 0,99 % de error RMSE (figura 5.16 b)).

Al comparar ambos perfiles realizados por métodos diferentes de ondas superficiales (MASW y ReMi) adquiridos en la misma área de estudio, se observa que los valores de profundidad de las capas son diferentes, ya que en el procesamiento de los perfiles por el método MASW se asignó un número de 5 capas mientras que para los perfiles del método ReMi se asignó 10 capas. El número de capas se fijó de esta manera, ya que el método pasivo al registrar bajas frecuencias, la profundidad de investigación es mayor que la profundidad alcanzada por el método activo, por el concepto de dispersión de las ondas *Rayleigh*.

En relación a las velocidades de ondas de corte, en el perfil obtenido por MASW se muestra que en los primeros metros existe una capa de velocidad V_s de 266 m/s, mientras que en el perfil adquirido por ReMi esta capa no es visible. Luego en ambos perfiles se mantiene las velocidades en un rango entre 251 m/s y 256 m/s, posteriormente las velocidades aumentan en los dos perfiles a valores semejantes de 281 m/s y 286 m/s y finalmente, en el perfil por MASW existe una última capa de 373 m/s con una profundidad de 64 m, en cambio para el perfil ReMi existen tres capas finales con valores de V_s de 376 m/s, 383 m/s y 384 m/s respectivamente con una profundidad alcanzada de 84 m. Esto implica que al utilizar el método MASW se puede obtener una mejor resolución en los estratos más someros, ya que es un método activo en donde la señal adquirida contiene altas frecuencias y por tal razón se obtienen valores de velocidades de ondas de cortes más reales para los primeros metros del subsuelo que al utilizar ReMi. Luego existe un rango en donde las velocidades de ondas de corte por ambos métodos son semejantes con una profundidad aproximada entre 5 m y 6 m hasta 30 m y 31 m, y para las profundidades

mayores, con el método ReMi se obtienen las velocidades V_s con más detalles, con valores mayores y más certeras, y con una mayor profundidad de investigación que con el método MASW, debido a la dispersión de las ondas *Rayleigh*, ya que ReMi es un método pasivo en donde la señal registrada proviene de ondas de bajas frecuencias.

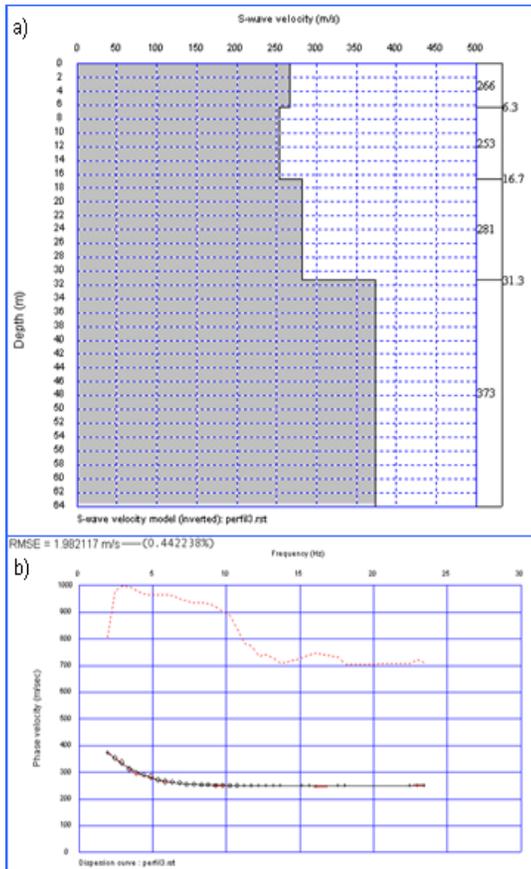


Figura 5.15. Perfil V_s 3 con geófonos de 4,5 Hz obtenido mediante el método MASW.

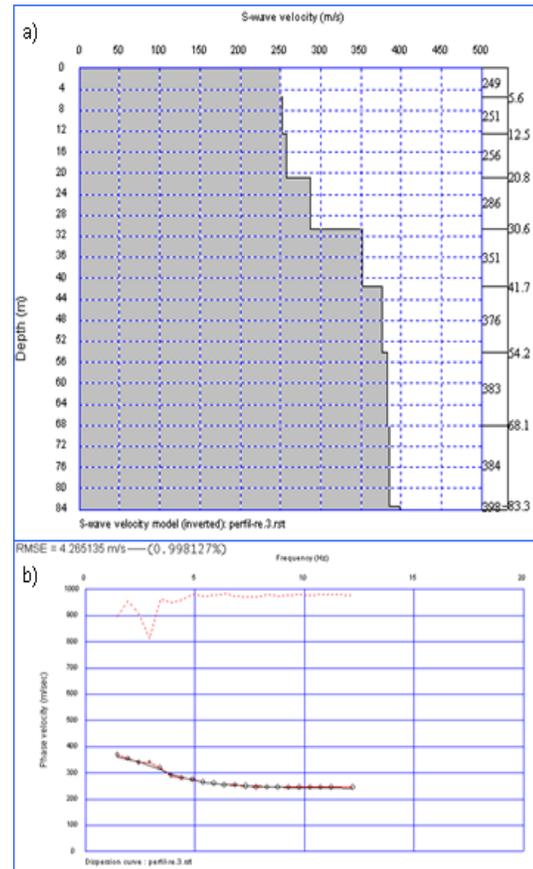


Figura 5.16. Perfil V_s 3 con geófonos de 4,5 Hz obtenido mediante el método ReMi.

El perfil V_s 3 integrado mediante los métodos MASW y ReMi (figura 5.17 a)), muestra que para la primera capa de 5,6 m de profundidad la velocidad V_s es de 270 m/s, para la segunda y tercera capa la velocidad disminuye a valores semejantes de 251 m/s y 256 m/s hasta los 20,8 m de profundidad, en la cuarta capa la velocidad aumenta a 291 m/s con una profundidad de 30,6 m y espesor de 9,8 m, para la quinta capa con una profundidad de 41,7 m y 11,1 m de espesor la velocidad es de 343 m/s,

en la sexta capa la velocidad es de 374 m/s con una profundidad de 54,2 m y un espesor de 12,5 m y para las últimas tres capas las velocidades se mantienen con valores de 400 m/s, 407 m/s y 415 m/s respectivamente alcanzando una profundidad de investigación de 88 m, con un error RMSE de 0,63 % (figura 5.17 b)).

Al generar el perfil integrado, en el cual se realiza la inversión conjunta entre los métodos activo y pasivo, se observa que en todo el perfil existe una buena resolución tanto en los primeros metros como en las profundidades mayores, obteniendo valores de velocidades de ondas de cortes más reales de la litología del área en estudio, debido a que dicho perfil se generó a través de las altas frecuencias del método MASW y de las bajas frecuencias del método ReMi. Esto sucede para la mayoría de los perfiles, en el apéndice C se muestran todos los perfiles Vs integrados con más detalles de las velocidades y las profundidades de investigación.

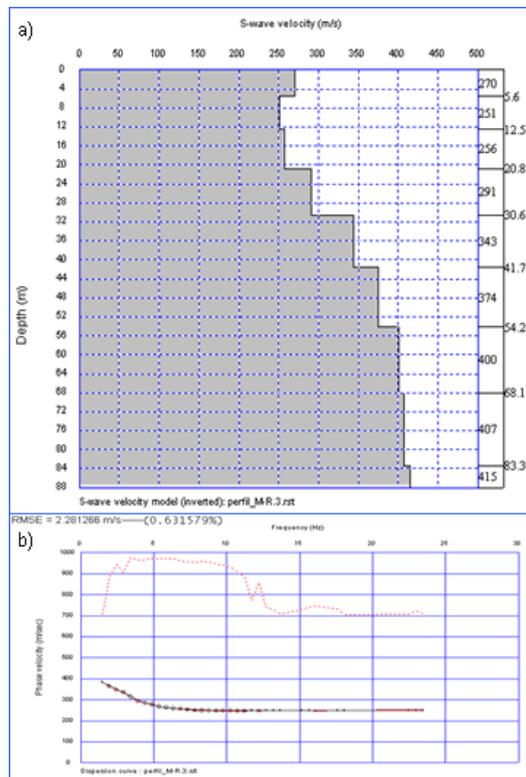


Figura 5.17. Perfil Vs 3 integrado de velocidad de ondas de corte obtenido mediante la inversión conjunta entre el método MASW y ReMi.

5.5 Modelo de velocidad 3D de ondas de corte (Vs) por el método MASW

El modelo de velocidad 3D de ondas de corte (V_s) obtenido por el método MASW (figura 5.18) muestra valores de velocidades en un rango entre 240 m/s y 420 m/s. En la figura 5.18 a) se contempla una mejor vista de V_s en superficie, en donde los valores más altos se observan en la zona noreste con un rango de 380 m/s a 410 m/s, los valores más bajos se presentan hacia la zona noroeste entre 240 m/s y 260 m/s y las velocidades predominantes del modelo en superficie se encuentran entre 280 m/s y 310 m/s con pequeñas áreas de 330 m/s a 370 m /s aproximadamente. La figura 5.18 b) presenta una mejor visual de la profundidad del modelo, donde los valores de velocidades aumentan a medida que aumenta la profundidad como se evidencia en la zona sur y en la zona oeste, en ésta zona en particular las velocidades abarcan todo el rango del modelo de V_s entre 240 m/s y 420 m/s.

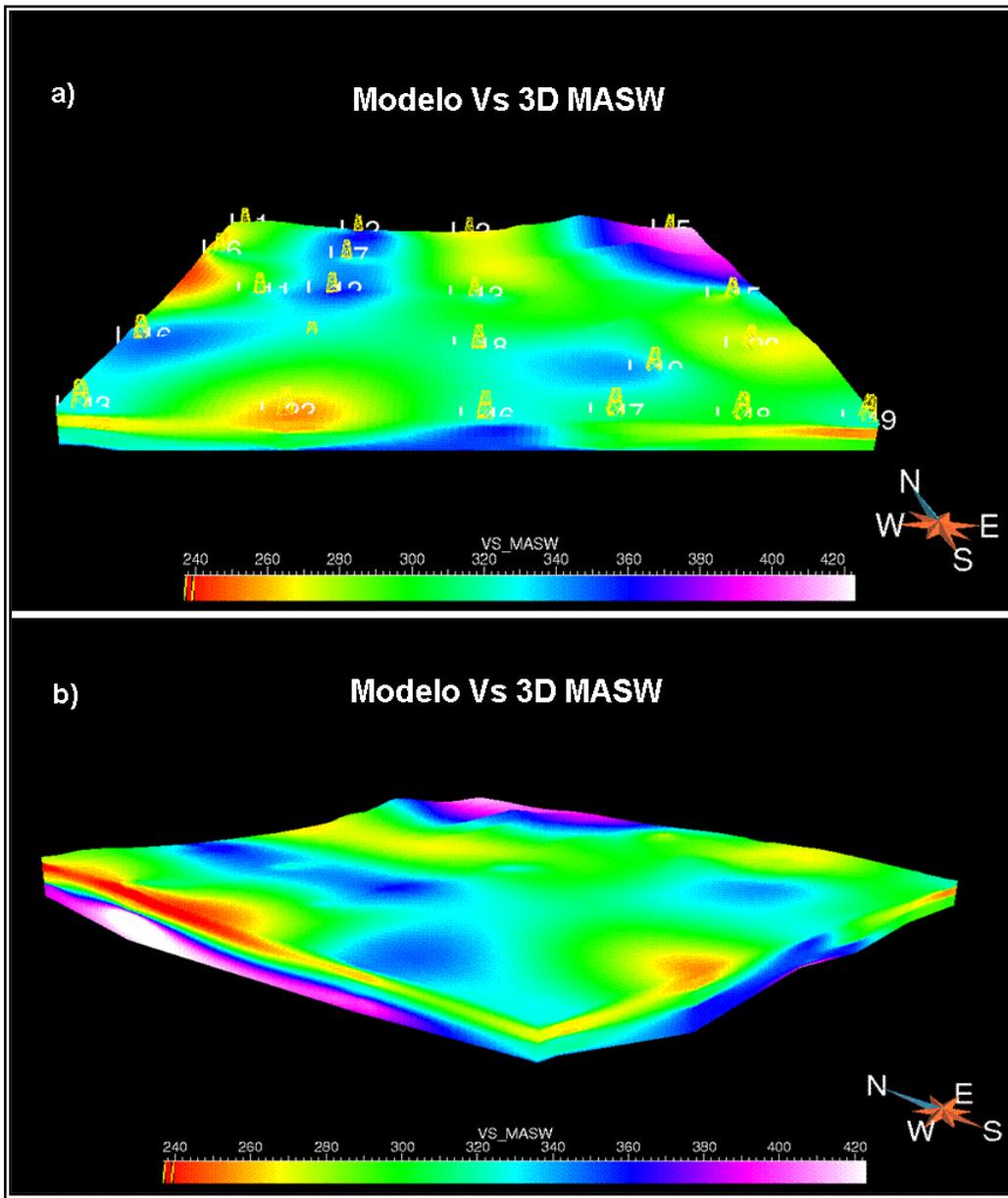


Figura 5.18. Modelo de Vs 3D por el método MASW, a) vista 1 y b) vista 2.

5.6 Modelo de velocidad 3D de ondas de corte (Vs) por el método ReMi

El rango de velocidades de ondas de cortes del modelo generado por el método ReMi (figura 5.19) se encuentra entre 200 m/s y 480 m/s. Los valores de Vs en superficie se muestra con un mejor ángulo en la figura 5.19 a), donde los valores más altos se presentan en áreas puntuales al noroeste y sureste con velocidades entre 330 m/s y 370 m/s, en la zona norte se observan las velocidades más bajas con un rango entre 200 m/s y 250 m/s y las velocidades que mayormente se encuentran en la superficie del modelo están en un rango aproximado de 260 m/s a 300 m/s. La visual de la profundidad se presenta mejor en la figura 5.19 b), donde las velocidades se encuentran entre 260 m/s y 450 m/s como se observa en la zona sur y oeste, en el cual a medida que la profundidad aumenta los valores de velocidad se incrementan.

Al comparar ambos modelos de velocidad de ondas de corte, se observa que existe una mejor resolución y un mejor detalle de las velocidades en la superficie del modelo obtenido por el método MASW, que las velocidades en la superficie del modelo generado por ReMi, mientras que el modelo de Vs por ReMi alcanza mayores profundidades con una mejor resolución y por lo tanto las velocidades son más altas que las obtenidas en el modelo de Vs por MASW. Esto puede deberse principalmente a la dispersión de las ondas *Rayleigh*, ya que la señal obtenida mediante el método activo contiene altas frecuencias (longitudes de ondas cortas) y en cambio para el método pasivo la señal adquirida contiene bajas frecuencias (longitudes de ondas largas).

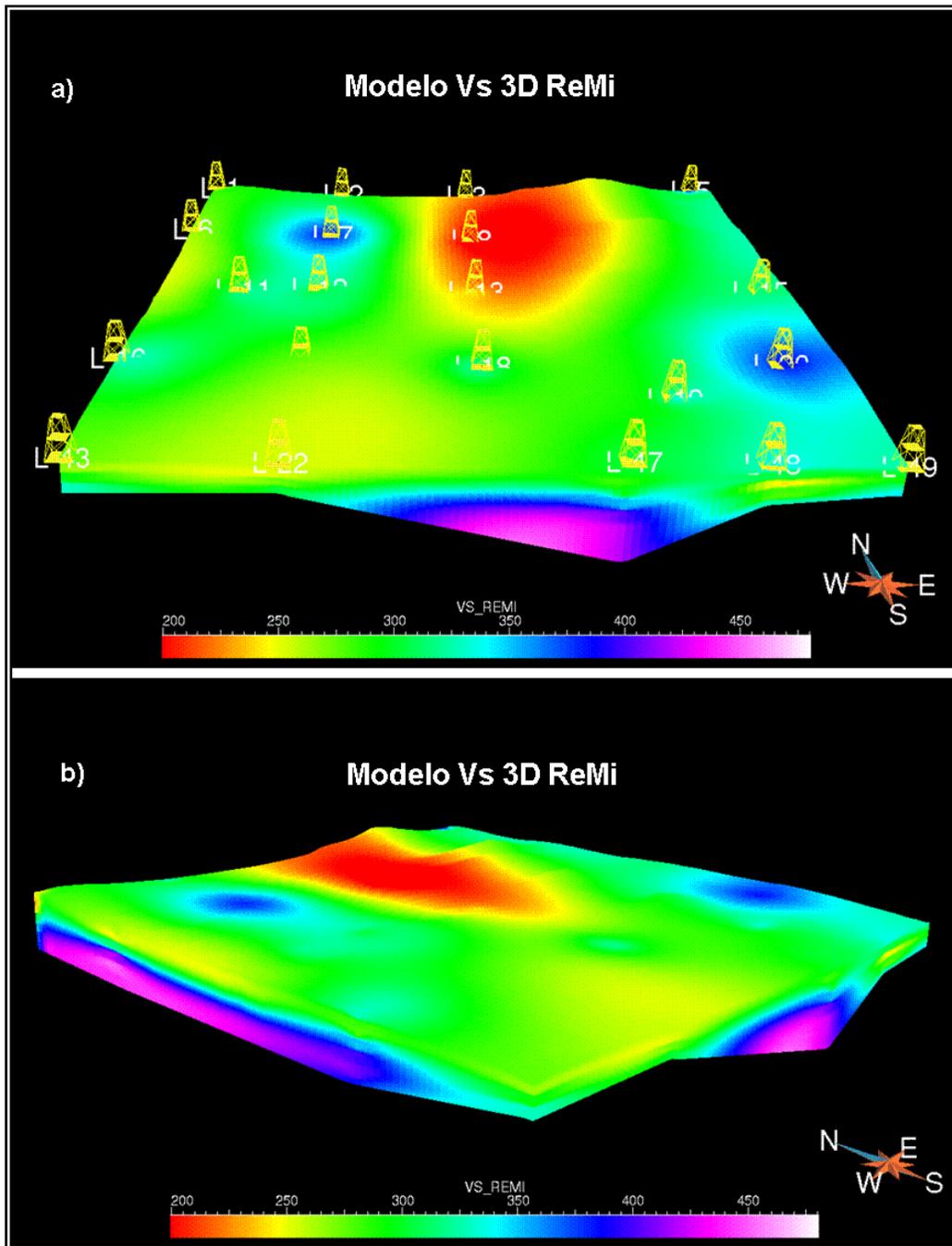


Figura 5.19. Modelo de Vs 3D por el método ReMi, a) vista 1 y b) vista 2.

5.7 Modelo de velocidad 3D de ondas de corte (Vs) integrado por los métodos MASW y ReMi

En la figura 5.20 se muestra el modelo de velocidad de ondas de cortes (Vs) integrado por los métodos MASW y ReMi con un rango de velocidades de 200 m/s a 480 m/s, asociados a los sedimentos cuaternarios presentes en el área en estudio. En la figura 5.20 a) se visualiza mejor las velocidades de ondas de corte en la superficie del modelo, con los valores más altos de Vs hacia la zona noreste en un rango de 370 m/s a 420 m/s que puede corresponder a un tipo de sedimento de arenas de tamaño de granos gruesos compactadas o gravas. Las velocidades más bajas se presentan en el centro-norte con valores entre 200 m/s y 250 m/s, pudiendo ser arcillas, limos o arenas sueltas y las velocidades que predominan en la superficie del modelo están entre 270 m/s y 320 m/s aproximadamente que pudiese asociarse principalmente a arenas de tamaño de granos finos y medios. La profundidad del modelo integrado se contempla mejor en la figura 5.20 b), donde los valores de Vs son directamente proporcionales a la profundidad como se observa en la zona sur y principalmente hacia el oeste del modelo, donde las velocidades se encuentran en un rango aproximado de 230 m/s a 480 m/s, que pudiese representar a tipos de sedimento desde arcillas hasta gravas muy duras de granos gruesos, a medida que aumenta la profundidad.

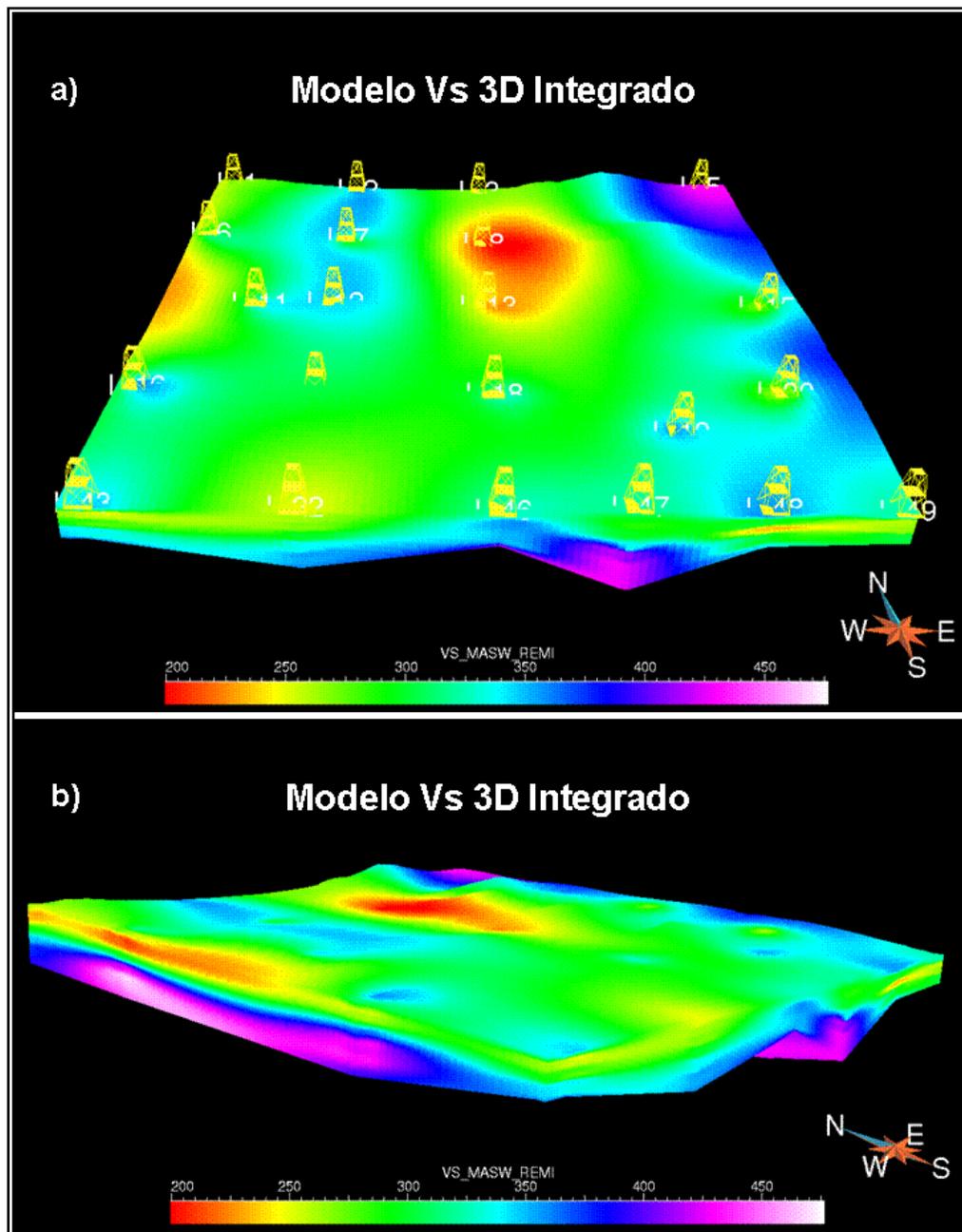


Figura 5.20. Modelo de Vs 3D integrado por los métodos MASW y ReMi, a) vista 1 y b) vista 2.

La dirección de la profundidad (z) en el modelo de velocidad de ondas de cortes se realizó con 50 celdas para obtener la interpolación de las velocidades y así generar dicho modelo como se menciona en el Capítulo IV. La figura 5.21 representa varias vistas de planta del modelo Vs 3D integrado, donde se muestran seis (6) planos, cada plano pertenece a un valor de celda en profundidad: el plano 1 representa el plano

para la primera celda que corresponde a la superficie del modelo de Vs, el plano 2 representa el plano para la celda 10, el plano 3 para la celda 20, el plano 4 para la celda 30, el plano 5 para la celda 40 y el plano 6 para la última celda. En dicha figura se evidencia que, a medida que los planos aumentan en profundidad las velocidades de ondas de corte se incrementan notablemente con un rango general de 270 m/s a 480 m/s aproximadamente.

En el modelo de velocidad 3D de ondas de corte (Vs) integrado por los métodos MASW y ReMi se obtienen las velocidades con una mejor resolución, con más detalles y con valores más reales en todo el modelo, que los modelos generados al utilizar los métodos por separados; ya que se integra en un solo modelo tanto el contenido de las altas frecuencias obtenidas por el método MASW como el contenido de las bajas frecuencias adquiridas por el método ReMi.

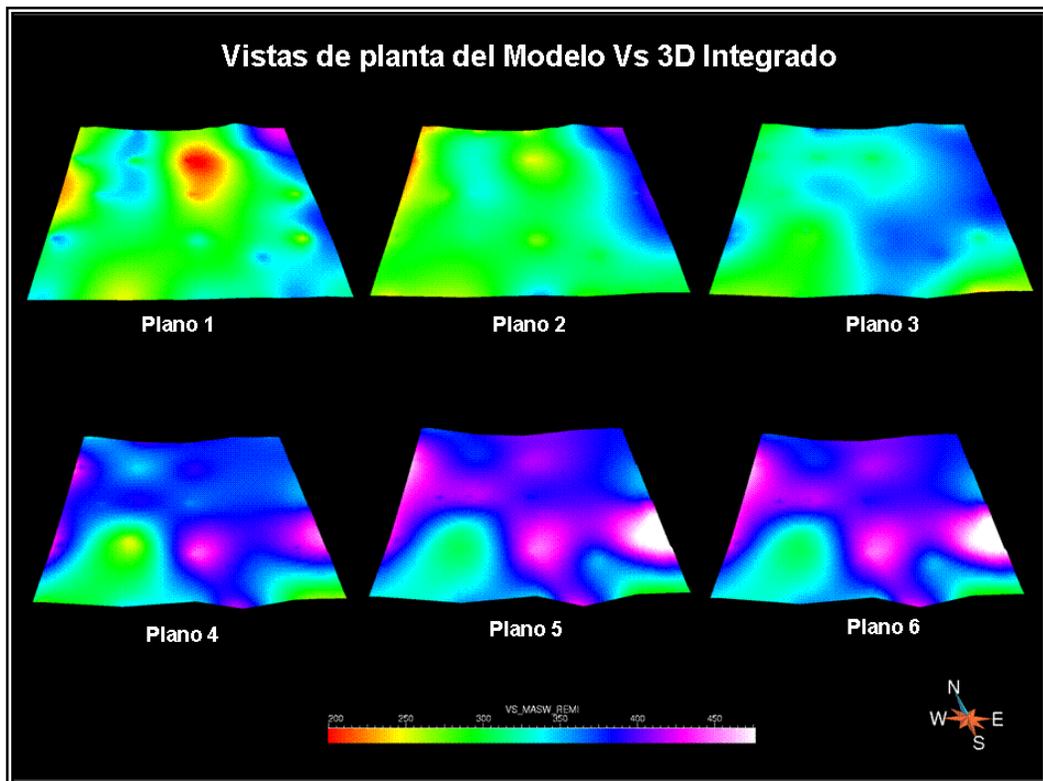


Figura 5.21. Vistas de planta del modelo Vs 3D integrado.

CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos después de utilizar ambos métodos de ondas superficiales (MASW y ReMi) para obtener las velocidades de ondas de corte (V_s) del área en estudio, se señalan las siguientes conclusiones:

- El registro obtenido por la masa de 150 kg presenta una mejor señal que el registro adquirido con la mandarina de 20 lb, donde las trazas se observan bien definidas en todo el registro, con mayores amplitudes, mejor relación señal/ruido y con rangos de frecuencias que disminuyen a medida que aumenta la separación de los canales con la fuente, desde 20 Hz a 80 Hz para los primeros canales hasta un rango entre 5 Hz y 40 Hz para los canales centrales y últimos aproximadamente.
- Los perfiles V_s obtenidos por el método MASW presentan un mejor detalle de las primeras capas del subsuelo con valores de velocidades más precisos, pero no alcanzan grandes profundidades de investigación; mientras que los perfiles generados por el método ReMi las profundidades de investigación son mayores con velocidades V_s superiores, pero con baja resolución en las primeras capas.
- En relación a los perfiles V_s obtenidos por MASW y ReMi mediante las pruebas realizadas con geófonos de diferentes frecuencias (4,5 Hz y 10 Hz), se observa que no hay grandes diferencias de los valores de velocidad de ondas de corte, pero con respecto a la profundidad de investigación si existe una variación, para el método MASW la diferencia de profundidad es de 8 m y para el método ReMi es de 12 m, debido principalmente a que los geófonos de 4,5 Hz poseen un mayor rango para registrar las bajas frecuencias (las cuales penetran más en el subsuelo), que los geófonos de 10 Hz.

- En el modelo de velocidad 3D de ondas de corte obtenido por el método MASW, las velocidades presentan una mejor resolución en los primeros metros de profundidad, debido a la influencia de las altas frecuencias. Los valores en superficie más altos se observan en la zona noreste con un rango de 380 m/s a 410 m/s, los más bajos hacia la zona noroeste entre 240 m/s y 260 m/s y las velocidades predominantes del modelo en superficie se encuentran entre 280 m/s y 310 m/s aproximadamente. La velocidad V_s aumentan a medida que aumenta la profundidad como se evidencia principalmente en la zona oeste, donde las velocidades abarcan todo el rango del modelo entre 240 m/s y 420 m/s.

- En el modelo de velocidad 3D de ondas de corte generado por el método ReMi, los valores de velocidad V_s en profundidad son mayores, asociado a las bajas frecuencias que profundizan más en el subsuelo. Los valores de V_s en superficie más altos se presentan en áreas puntuales al noroeste y sureste entre 330 m/s y 370 m/s, en la zona norte se observan las velocidades más bajas entre 200 m/s y 250 m/s y las velocidades que abarcan la mayor parte de la superficie del modelo están en un rango aproximado de 260 m/s a 300 m/s. Las velocidades en profundidad se encuentran en un rango entre 260 m/s y 450 m/s como se observa en la zona sur y oeste, en el cual a medida que la profundidad aumenta los valores de velocidad V_s se incrementan.

- El modelo de velocidad 3D de ondas de corte (V_s) integrado a través de la inversión conjunta de los métodos MASW y ReMi, resulta ser el modelo más óptimo para obtener las velocidades V_s de la zona en estudio, ya que es generado con la influencia de bajas y altas frecuencias. Las velocidades en superficie más altas están hacia el noreste en un rango de 370 m/s a 420 m/s asociado a un tipo de sedimento de arenas de tamaño de granos gruesos compactadas o gravas, las velocidades más bajas se presentan en el centro-norte con valores entre 200 m/s y 250 m/s, pudiendo ser arcillas, limos o

arenas sueltas y las velocidades que predominan en la superficie están entre 270 m/s y 320 m/s aproximadamente que pudiese corresponder principalmente a arenas de tamaño de granos finos y medios. Los valores de V_s son directamente proporcionales a la profundidad, donde las velocidades se encuentran en un rango general de 270 m/s a 480 m/s aproximadamente, que pudiese representar a tipos de sedimentos desde arcillas hasta gravas muy duras de granos gruesos.

- Los valores obtenidos de velocidad de ondas de cortes (V_s) pueden ser utilizados no solo para la corrección estática, sino también en la determinación de las propiedades dinámicas del suelo para la construcción de nuevos desarrollos en el área de la faja petrolífera del Orinoco.

RECOMENDACIONES

- Dependiendo del alcance del estudio, se recomienda utilizar el método multicanal de ondas superficiales (MASW) para obtener velocidades Vs con más detalles en las primeras capas y el método de sismica de microtemores (ReMi) para profundidades mayores.
- Integrar ambos métodos de ondas superficiales (MASW y ReMi) para obtener un perfil Vs óptimo tanto en los primeros metros como en los últimos.
- Utilizar geófonos de 4,5 Hz en los tendidos de adquisición para el método ReMi.
- Expandir la aplicación de los métodos, no destructivos, económicos, rápidos y sencillos, no solamente en el área de la geotecnia, sino también en la industria petrolera.

BIBLIOGRAFÍA

González de Juana, C.; Iturralde De Arozena, J y Picard, X. (1980). “*Geología de Venezuela y sus Cuencas Petrolíferas*”. Ediciones Foninves, Caracas. 1031 p.

Granda, A.; Granda, T. y Madrid , A. (2005). “*El método de la Sísmica Pasiva: Una herramienta fiable para la caracterización geotécnica del terreno en zonas urbanas*”. International Geophysical Technology, S.L. Revista INGEOPRES, 2005. p: 78-84. Pág. Web: www.igt-geofisica.com

Hayashi, K. (2003). “*Data Acquisition and Analysis of Active and Passive Surface Wave Methods*”. OYO Corporation. SAGEEP 2003.

Hayashi, K. (2005). “*Buried Channel Delineation using a Passive Surface Wave Method in Urban Area*”. 18th Annual Meeting, Environmental and Engineering Geophysical Society. Atlanta 2005.

Hedberg, H.; Sass, L. y Funkhouser, H. (1947). “*Oil fields of Greater Oficina Area, Central Anzoátegui*”, Venezuela. AAPG, 31(12): 2089-2169.

Linares, G. 2005. “*Introducción y aplicación del método de sísmica de microtemores en áreas urbanas*”. Tesis de Grado. Universidad Simón Bolívar.

Louie, J. (2001). “*Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays*”. Bulletin of the Seismological Society of America. Volumen 91. N°2. p: 347-364.

Louie, J. (2001). “*Refraction Microtremor (ReMi) field tutorial 30-meter shear velocity with two hours effort*”. Optim LLC.

Manilla, A. (2003). *“Evaluación de los Módulos Elásticos Dinámicos in-situ”*. 2nd International Course on Computational Geotechnics”. Santiago de Querétaro, Qro. SMMS.

Park, C. (2005). *“MASW Workshop”*. Atlanta. SAGEEP Meeting.

Park, C. y Miller, R. (1999). *“Seismic Characterization of Geotechnical Sites By Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) Method”*. Kansas Geological Survey, The University of Kansas, Lawrence, Kansas, USA, 23 pp.

Park, C.; Miller, R. y Xia, J. (1999). *“Multichannel analysis of surface waves”*. Geophysics. Volumen 64. N°3. p: 800-808.

Parnaud, F.; Gou, Y.; Pascual, J.; Truskowski, I.; Gallango, O.; Passalacqua, H. y Roure, F. (1995). *“Petroleum Geology of the Central Part of the Eastern Venezuelan Basin, in Petroleum Basins of South America”*. Editores Tankard, Suarez y Welsink. American Association of Petroleum Geologists (AAPG) Memoir 62, p. 741-756.

PDVSA-CVP División Junín (2008). Informe técnico final de división Junín.

Schlumberger (1997). *“Evaluación de pozos (WEC)”*. Capitulo I. Cuencas Petrolíferas. Versión Multimedia (CD).

Shearer, P. (1999) *“Introduction to Seismology”*. The University of Cambridge, United States of America, 256 pp.

Socco, L. y Strobbia, C. (2004). *“Surface-wave method for near-surface characterization: a tutorial”*. Near Surface Geophysics. p: 165-185.

Soumya, R; Stewart, R y Al Dulaijan, K. (2010). “*S-wave velocity and statics from ground-roll inversion*”. The Leading Edge, 1250-1257.

Talwani, M. (2002). “*The Orinoco Heavy Oil Belt in Venezuela (Or Heavy Oil to the rescue?)*”. The James A. Baker III Institute for Public Policy of Rice University. pp 5 – 7.

Xia, J.; Miller, R. y Park, C. (1999). “*Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves*”. Geophysics. Volumen 64. N°3. p: 691-700.

Xia, J.; Miller, R.; Park, C.; y Ivanov, J. (2000). “*Construction of 2-D vertical shear-wave velocity field by the multichannel analysis of surface wave technique*”. SAGEEP 2000.

APÉNDICES

APÉNDICE A

Tabla 1. Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW)

NOMBRE	ESTE (X) (UTM)	NORTE (Y) (UTM)	COTA (Z) (m)	PROFUNDIDAD (m)	Vs (m/s)	TVD (m)
L-1	134242,540	768369,411	174	0,00	283,759	-174,00
L-1	134242,540	768369,411	174	5,75	283,759	-168,25
L-1	134242,540	768369,411	174	6,25	236,717	-167,75
L-1	134242,540	768369,411	174	16,17	236,717	-157,83
L-1	134242,540	768369,411	174	16,67	259,888	-157,33
L-1	134242,540	768369,411	174	30,75	259,888	-143,25
L-1	134242,540	768369,411	174	31,25	385,466	-142,75
L-1	134242,540	768369,411	174	48,00	385,466	-126,00
L-2	134722,477	768369,423	173	0,00	360,214	-173,00
L-2	134722,477	768369,423	173	5,75	360,214	-167,25
L-2	134722,477	768369,423	173	6,25	276,729	-166,75
L-2	134722,477	768369,423	173	16,17	276,729	-156,83
L-2	134722,477	768369,423	173	16,67	295,872	-156,33
L-2	134722,477	768369,423	173	30,75	295,872	-142,25
L-2	134722,477	768369,423	173	31,25	371,030	-141,75
L-2	134722,477	768369,423	173	60,00	371,030	-113,00
L-3	135201,736	768369,553	178	0,00	266,935	-178,20
L-3	135201,736	768369,553	178	5,75	266,935	-172,45
L-3	135201,736	768369,553	178	6,25	253,452	-171,95
L-3	135201,736	768369,553	178	16,17	253,452	-162,03
L-3	135201,736	768369,553	178	16,67	281,941	-161,53
L-3	135201,736	768369,553	178	30,75	281,941	-147,45
L-3	135201,736	768369,553	178	31,25	373,330	-146,95
L-3	135201,736	768369,553	178	64,00	373,330	-114,20
L-5	136082,569	768369,415	198,5	0,00	406,484	-198,50
L-5	136082,569	768369,415	198,5	5,75	406,484	-192,75
L-5	136082,569	768369,415	198,5	6,25	423,081	-192,25
L-5	136082,569	768369,415	198,5	16,17	423,081	-182,33
L-5	136082,569	768369,415	198,5	16,67	359,257	-181,83
L-5	136082,569	768369,415	198,5	30,75	359,257	-167,75
L-5	136082,569	768369,415	198,5	31,25	380,791	-167,25
L-5	136082,569	768369,415	198,5	66,00	380,791	-132,50
L-6	134241,719	767841,304	172	0,00	311,222	-172,00
L-6	134241,719	767841,304	172	5,75	311,222	-166,25
L-6	134241,719	767841,304	172	6,25	253,110	-165,75

NOMBRE	ESTE (X) (UTM)	NORTE (Y) (UTM)	COTA (Z) (m)	PROFUNDIDAD (m)	Vs (m/s)	TVD (m)
L-6	134241,719	767841,304	172	16,17	253,110	-155,83
L-6	134241,719	767841,304	172	16,67	282,011	-155,33
L-6	134241,719	767841,304	172	30,75	282,011	-141,25
L-6	134241,719	767841,304	172	31,25	411,061	-140,75
L-6	134241,719	767841,304	172	64,00	411,061	-108,00
L-7	134720,119	767840,734	171,8	0,00	325,464	-171,80
L-7	134720,119	767840,734	171,8	5,75	325,464	-166,05
L-7	134720,119	767840,734	171,8	6,25	352,670	-165,55
L-7	134720,119	767840,734	171,8	16,17	352,670	-155,63
L-7	134720,119	767840,734	171,8	16,67	313,961	-155,13
L-7	134720,119	767840,734	171,8	30,75	313,961	-141,05
L-7	134720,119	767840,734	171,8	31,25	362,352	-140,55
L-7	134720,119	767840,734	171,8	56,00	362,352	-115,80
L-11	134481,169	767304,444	165,8	0,00	326,413	-165,80
L-11	134481,169	767304,444	165,8	5,75	326,413	-160,05
L-11	134481,169	767304,444	165,8	6,25	290,999	-159,55
L-11	134481,169	767304,444	165,8	16,17	290,999	-149,63
L-11	134481,169	767304,444	165,8	16,67	297,418	-149,13
L-11	134481,169	767304,444	165,8	30,75	297,418	-135,05
L-11	134481,169	767304,444	165,8	31,25	388,486	-134,55
L-11	134481,169	767304,444	165,8	50,00	388,486	-115,80
L-12	134720,723	767302,655	170,8	0,00	359,981	-170,80
L-12	134720,723	767302,655	170,8	5,75	359,981	-165,05
L-12	134720,723	767302,655	170,8	6,25	334,125	-164,55
L-12	134720,723	767302,655	170,8	16,17	334,125	-154,63
L-12	134720,723	767302,655	170,8	16,67	347,755	-154,13
L-12	134720,723	767302,655	170,8	30,75	347,755	-140,05
L-12	134720,723	767302,655	170,8	31,25	393,818	-139,55
L-12	134720,723	767302,655	170,8	66,00	393,818	-104,80
L-13	135200,040	767301,087	173,4	0,00	324,862	-173,40
L-13	135200,040	767301,087	173,4	5,75	324,862	-167,65
L-13	135200,040	767301,087	173,4	6,25	284,643	-167,15
L-13	135200,040	767301,087	173,4	16,17	284,643	-157,23
L-13	135200,040	767301,087	173,4	16,67	311,549	-156,73
L-13	135200,040	767301,087	173,4	30,75	311,549	-142,65
L-13	135200,040	767301,087	173,4	31,25	394,912	-142,15
L-13	135200,040	767301,087	173,4	64,00	394,912	-109,40
L-15	136082,694	767283,740	188,4	0,00	283,022	-188,40
L-15	136082,694	767283,740	188,4	5,75	283,022	-182,65
L-15	136082,694	767283,740	188,4	6,25	378,892	-182,15
L-15	136082,694	767283,740	188,4	16,17	378,892	-172,23
L-15	136082,694	767283,740	188,4	16,67	402,624	-171,73
L-15	136082,694	767283,740	188,4	30,75	402,624	-157,65
L-15	136082,694	767283,740	188,4	31,25	368,655	-157,15
L-15	136082,694	767283,740	188,4	62,00	368,655	-126,40

NOMBRE	ESTE (X) (UTM)	NORTE (Y) (UTM)	COTA (Z) (m)	PROFUNDIDAD (m)	Vs (m/s)	TVD (m)
L-16	134238,340	766761,931	163,2	0,00	342,898	-163,20
L-16	134238,340	766761,931	163,2	5,75	342,898	-157,45
L-16	134238,340	766761,931	163,2	6,25	277,626	-156,95
L-16	134238,340	766761,931	163,2	16,17	277,626	-147,03
L-16	134238,340	766761,931	163,2	16,67	321,645	-146,53
L-16	134238,340	766761,931	163,2	30,75	321,645	-132,45
L-16	134238,340	766761,931	163,2	31,25	377,128	-131,95
L-16	134238,340	766761,931	163,2	46,00	377,128	-117,20
L-17	134718,345	766764,005	163,2	0,00	312,452	-163,20
L-17	134718,345	766764,005	163,2	5,75	312,452	-157,45
L-17	134718,345	766764,005	163,2	6,25	262,265	-156,95
L-17	134718,345	766764,005	163,2	16,17	262,265	-147,03
L-17	134718,345	766764,005	163,2	16,67	295,465	-146,53
L-17	134718,345	766764,005	163,2	30,75	295,465	-132,45
L-17	134718,345	766764,005	163,2	31,25	373,615	-131,95
L-17	134718,345	766764,005	163,2	32,00	373,615	-131,20
L-18	135198,985	766759,426	167,9	0,00	321,121	-167,90
L-18	135198,985	766759,426	167,9	5,75	321,121	-162,15
L-18	135198,985	766759,426	167,9	6,25	275,904	-161,65
L-18	135198,985	766759,426	167,9	16,17	275,904	-151,73
L-18	135198,985	766759,426	167,9	16,67	310,521	-151,23
L-18	135198,985	766759,426	167,9	30,75	310,521	-137,15
L-18	135198,985	766759,426	167,9	31,25	371,938	-136,65
L-18	135198,985	766759,426	167,9	32,00	371,938	-135,90
L-19	135681,082	766563,152	172,4	0,00	336,585	-172,40
L-19	135681,082	766563,152	172,4	5,75	336,585	-166,65
L-19	135681,082	766563,152	172,4	6,25	316,597	-166,15
L-19	135681,082	766563,152	172,4	16,17	316,597	-156,23
L-19	135681,082	766563,152	172,4	16,67	320,224	-155,73
L-19	135681,082	766563,152	172,4	30,75	320,224	-141,65
L-19	135681,082	766563,152	172,4	31,25	360,623	-141,15
L-19	135681,082	766563,152	172,4	38,00	360,623	-134,40
L-20	136002,479	766749,512	181,2	0,00	278,170	-181,20
L-20	136002,479	766749,512	181,2	5,75	278,170	-175,45
L-20	136002,479	766749,512	181,2	6,25	377,986	-174,95
L-20	136002,479	766749,512	181,2	16,17	377,986	-165,03
L-20	136002,479	766749,512	181,2	16,67	360,991	-164,53
L-20	136002,479	766749,512	181,2	25,00	360,991	-156,20
L-22	134720,978	766221,073	160,6	0,00	254,001	-160,60
L-22	134720,978	766221,073	160,6	5,75	254,001	-154,85
L-22	134720,978	766221,073	160,6	6,25	261,238	-154,35
L-22	134720,978	766221,073	160,6	16,17	261,238	-144,43
L-22	134720,978	766221,073	160,6	16,67	306,188	-143,93
L-22	134720,978	766221,073	160,6	30,75	306,188	-129,85
L-22	134720,978	766221,073	160,6	31,25	358,546	-129,35

NOMBRE	ESTE (X) (UTM)	NORTE (Y) (UTM)	COTA (Z) (m)	PROFUNDIDAD (m)	Vs (m/s)	TVD (m)
L-22	134720,978	766221,073	160,6	56,00	358,546	-104,60
L-43	134242,119	766222,643	159,2	0,00	327,547	-159,20
L-43	134242,119	766222,643	159,2	5,75	327,547	-153,45
L-43	134242,119	766222,643	159,2	6,25	268,224	-152,95
L-43	134242,119	766222,643	159,2	16,17	268,224	-143,03
L-43	134242,119	766222,643	159,2	16,67	320,360	-142,53
L-43	134242,119	766222,643	159,2	30,75	320,360	-128,45
L-43	134242,119	766222,643	159,2	31,25	368,376	-127,95
L-43	134242,119	766222,643	159,2	32,00	368,376	-127,20
L-46	135201,483	766221,771	163,3	0,00	327,881	-163,30
L-46	135201,483	766221,771	163,3	5,75	327,881	-157,55
L-46	135201,483	766221,771	163,3	6,25	356,086	-157,05
L-46	135201,483	766221,771	163,3	16,17	356,086	-147,13
L-46	135201,483	766221,771	163,3	16,67	352,552	-146,63
L-46	135201,483	766221,771	163,3	30,75	352,552	-132,55
L-46	135201,483	766221,771	163,3	31,25	413,798	-132,05
L-46	135201,483	766221,771	163,3	32,00	413,798	-131,30
L-47	135520,071	766221,632	170,2	0,00	312,663	-170,20
L-47	135520,071	766221,632	170,2	5,75	312,663	-164,45
L-47	135520,071	766221,632	170,2	6,25	295,573	-163,95
L-47	135520,071	766221,632	170,2	16,17	295,573	-154,03
L-47	135520,071	766221,632	170,2	16,67	304,345	-153,53
L-47	135520,071	766221,632	170,2	30,75	304,345	-139,45
L-47	135520,071	766221,632	170,2	31,25	353,580	-138,95
L-47	135520,071	766221,632	170,2	44,00	353,580	-126,20
L-48	135841,154	766227,238	170,8	0,00	299,819	-170,80
L-48	135841,154	766227,238	170,8	5,75	299,819	-165,05
L-48	135841,154	766227,238	170,8	6,25	273,736	-164,55
L-48	135841,154	766227,238	170,8	16,17	273,736	-154,63
L-48	135841,154	766227,238	170,8	16,67	296,819	-154,13
L-48	135841,154	766227,238	170,8	30,00	296,819	-140,80
L-49	136161,495	766222,182	173,4	0,00	320,118	-173,40
L-49	136161,495	766222,182	173,4	5,75	320,118	-167,65
L-49	136161,495	766222,182	173,4	6,25	256,464	-167,15
L-49	136161,495	766222,182	173,4	16,17	256,464	-157,23
L-49	136161,495	766222,182	173,4	16,67	294,290	-156,73
L-49	136161,495	766222,182	173,4	30,00	294,290	-143,40

APÉNDICE B

Tabla 2. Sísmica de microtemores (ReMi)

NOMBRE	ESTE (X) (UTM)	NORTE (Y) (UTM)	COTA (Z) (m)	PROFUNDIDAD (m)	Vs (m/s)	TVD (m)
L-1	134242,540	768369,411	174	0,00	239,902	-174,00
L-1	134242,540	768369,411	174	5,06	239,902	-168,94
L-1	134242,540	768369,411	174	5,56	230,640	-168,44
L-1	134242,540	768369,411	174	12,00	230,640	-162,00
L-1	134242,540	768369,411	174	12,50	238,855	-161,50
L-1	134242,540	768369,411	174	20,33	238,855	-153,67
L-1	134242,540	768369,411	174	20,83	303,610	-153,17
L-1	134242,540	768369,411	174	30,06	303,610	-143,94
L-1	134242,540	768369,411	174	30,56	349,338	-143,44
L-1	134242,540	768369,411	174	41,17	349,338	-132,83
L-1	134242,540	768369,411	174	41,67	372,164	-132,33
L-1	134242,540	768369,411	174	53,67	372,164	-120,33
L-1	134242,540	768369,411	174	54,17	376,159	-119,83
L-1	134242,540	768369,411	174	62,00	376,159	-112,00
L-2	134722,477	768369,423	173	0,00	327,920	-173,00
L-2	134722,477	768369,423	173	5,06	327,920	-167,94
L-2	134722,477	768369,423	173	5,56	288,773	-167,44
L-2	134722,477	768369,423	173	12,00	288,773	-161,00
L-2	134722,477	768369,423	173	12,50	263,021	-160,50
L-2	134722,477	768369,423	173	20,33	263,021	-152,67
L-2	134722,477	768369,423	173	20,83	341,174	-152,17
L-2	134722,477	768369,423	173	30,06	341,174	-142,94
L-2	134722,477	768369,423	173	30,56	390,137	-142,44
L-2	134722,477	768369,423	173	41,17	390,137	-131,83
L-2	134722,477	768369,423	173	41,67	402,632	-131,33
L-2	134722,477	768369,423	173	53,67	402,632	-119,33
L-2	134722,477	768369,423	173	54,17	387,450	-118,83
L-2	134722,477	768369,423	173	67,56	387,450	-105,44
L-2	134722,477	768369,423	173	68,06	367,439	-104,94
L-2	134722,477	768369,423	173	82,00	367,439	-91,00
L-3	135201,736	768369,553	178	0,00	249,469	-178,20
L-3	135201,736	768369,553	178	5,06	249,469	-173,14
L-3	135201,736	768369,553	178	5,56	251,871	-172,64
L-3	135201,736	768369,553	178	12,00	251,871	-166,20
L-3	135201,736	768369,553	178	12,50	256,809	-165,70
L-3	135201,736	768369,553	178	20,33	256,809	-157,87
L-3	135201,736	768369,553	178	20,83	286,842	-157,37
L-3	135201,736	768369,553	178	30,06	286,842	-148,14

NOMBRE	ESTE (X) (UTM)	NORTE (Y) (UTM)	COTA (Z) (m)	PROFUNDIDAD (m)	Vs (m/s)	TVD (m)
L-3	135201,736	768369,553	178	30,56	351,983	-147,64
L-3	135201,736	768369,553	178	41,17	351,983	-137,03
L-3	135201,736	768369,553	178	41,67	376,594	-136,53
L-3	135201,736	768369,553	178	53,67	376,594	-124,53
L-3	135201,736	768369,553	178	54,17	383,041	-124,03
L-3	135201,736	768369,553	178	67,56	383,041	-110,64
L-3	135201,736	768369,553	178	68,06	384,809	-110,14
L-3	135201,736	768369,553	178	82,83	384,809	-95,37
L-3	135201,736	768369,553	178	83,33	398,132	-94,87
L-3	135201,736	768369,553	178	84,00	398,132	-94,20
L-5	136082,569	768369,415	198,5	0,00	402,040	-198,50
L-5	136082,569	768369,415	198,5	5,06	402,040	-193,44
L-5	136082,569	768369,415	198,5	5,56	399,382	-192,94
L-5	136082,569	768369,415	198,5	12,00	399,382	-186,50
L-5	136082,569	768369,415	198,5	12,50	378,669	-186,00
L-5	136082,569	768369,415	198,5	20,33	378,669	-178,17
L-5	136082,569	768369,415	198,5	20,83	363,087	-177,67
L-5	136082,569	768369,415	198,5	30,06	363,087	-168,44
L-5	136082,569	768369,415	198,5	30,56	364,291	-167,94
L-5	136082,569	768369,415	198,5	41,17	364,291	-157,33
L-5	136082,569	768369,415	198,5	41,67	370,747	-156,83
L-5	136082,569	768369,415	198,5	53,67	370,747	-144,83
L-5	136082,569	768369,415	198,5	54,17	374,917	-144,33
L-5	136082,569	768369,415	198,5	60,00	374,917	-138,50
L-6	134241,719	767841,304	172	0,00	266,046	-172,00
L-6	134241,719	767841,304	172	5,06	266,046	-166,94
L-6	134241,719	767841,304	172	5,56	262,851	-166,44
L-6	134241,719	767841,304	172	12,00	262,851	-160,00
L-6	134241,719	767841,304	172	12,50	252,581	-159,50
L-6	134241,719	767841,304	172	20,33	252,581	-151,67
L-6	134241,719	767841,304	172	20,83	316,221	-151,17
L-6	134241,719	767841,304	172	30,06	316,221	-141,94
L-6	134241,719	767841,304	172	30,56	415,766	-141,44
L-6	134241,719	767841,304	172	41,17	415,766	-130,83
L-6	134241,719	767841,304	172	41,67	448,707	-130,33
L-6	134241,719	767841,304	172	53,67	448,707	-118,33
L-6	134241,719	767841,304	172	54,17	441,243	-117,83
L-6	134241,719	767841,304	172	66,00	441,243	-106,00
L-7	134720,119	767840,734	171,8	0,00	372,599	-171,80
L-7	134720,119	767840,734	171,8	5,06	372,599	-166,74
L-7	134720,119	767840,734	171,8	5,56	360,493	-166,24
L-7	134720,119	767840,734	171,8	12,00	360,493	-159,80
L-7	134720,119	767840,734	171,8	12,50	294,601	-159,30
L-7	134720,119	767840,734	171,8	20,33	294,601	-151,47
L-7	134720,119	767840,734	171,8	20,83	316,527	-150,97

NOMBRE	ESTE (X) (UTM)	NORTE (Y) (UTM)	COTA (Z) (m)	PROFUNDIDAD (m)	Vs (m/s)	TVD (m)
L-7	134720,119	767840,734	171,8	30,06	316,527	-141,74
L-7	134720,119	767840,734	171,8	30,56	353,095	-141,24
L-7	134720,119	767840,734	171,8	41,17	353,095	-130,63
L-7	134720,119	767840,734	171,8	41,67	384,261	-130,13
L-7	134720,119	767840,734	171,8	53,67	384,261	-118,13
L-7	134720,119	767840,734	171,8	54,17	388,738	-117,63
L-7	134720,119	767840,734	171,8	60,00	388,738	-111,80
L-8	135201,925	767820,373	175,8	0,00	199,429	-175,80
L-8	135201,925	767820,373	175,8	5,06	199,429	-170,74
L-8	135201,925	767820,373	175,8	5,56	237,072	-170,24
L-8	135201,925	767820,373	175,8	12,00	237,072	-163,80
L-8	135201,925	767820,373	175,8	12,50	257,594	-163,30
L-8	135201,925	767820,373	175,8	20,33	257,594	-155,47
L-8	135201,925	767820,373	175,8	20,83	306,511	-154,97
L-8	135201,925	767820,373	175,8	30,06	306,511	-145,74
L-8	135201,925	767820,373	175,8	30,56	382,944	-145,24
L-8	135201,925	767820,373	175,8	41,17	382,944	-134,63
L-8	135201,925	767820,373	175,8	41,67	414,015	-134,13
L-8	135201,925	767820,373	175,8	53,67	414,015	-122,13
L-8	135201,925	767820,373	175,8	54,17	419,501	-121,63
L-8	135201,925	767820,373	175,8	64,00	419,501	-111,80
L-11	134481,169	767304,444	165,8	0,00	316,465	-165,80
L-11	134481,169	767304,444	165,8	5,06	316,465	-160,74
L-11	134481,169	767304,444	165,8	5,56	294,864	-160,24
L-11	134481,169	767304,444	165,8	12,00	294,864	-153,80
L-11	134481,169	767304,444	165,8	12,50	272,249	-153,30
L-11	134481,169	767304,444	165,8	20,33	272,249	-145,47
L-11	134481,169	767304,444	165,8	20,83	318,195	-144,97
L-11	134481,169	767304,444	165,8	30,06	318,195	-135,74
L-11	134481,169	767304,444	165,8	30,56	380,355	-135,24
L-11	134481,169	767304,444	165,8	41,17	380,355	-124,63
L-11	134481,169	767304,444	165,8	41,67	409,108	-124,13
L-11	134481,169	767304,444	165,8	53,67	409,108	-112,13
L-11	134481,169	767304,444	165,8	54,17	410,209	-111,63
L-11	134481,169	767304,444	165,8	62,00	410,209	-103,80
L-12	134720,723	767302,655	170,8	0,00	307,063	-170,80
L-12	134720,723	767302,655	170,8	5,06	307,063	-165,74
L-12	134720,723	767302,655	170,8	5,56	339,459	-165,24
L-12	134720,723	767302,655	170,8	12,00	339,459	-158,80
L-12	134720,723	767302,655	170,8	12,50	338,908	-158,30
L-12	134720,723	767302,655	170,8	20,33	338,908	-150,47
L-12	134720,723	767302,655	170,8	20,83	344,071	-149,97
L-12	134720,723	767302,655	170,8	30,06	344,071	-140,74
L-12	134720,723	767302,655	170,8	30,56	380,538	-140,24
L-12	134720,723	767302,655	170,8	41,17	380,538	-129,63

NOMBRE	ESTE (X) (UTM)	NORTE (Y) (UTM)	COTA (Z) (m)	PROFUNDIDAD (m)	Vs (m/s)	TVD (m)
L-12	134720,723	767302,655	170,8	41,67	409,403	-129,13
L-12	134720,723	767302,655	170,8	53,67	409,403	-117,13
L-12	134720,723	767302,655	170,8	54,17	422,552	-116,63
L-12	134720,723	767302,655	170,8	64,00	422,552	-106,80
L-13	135200,040	767301,087	173,4	0,00	241,830	-173,40
L-13	135200,040	767301,087	173,4	5,06	241,830	-168,34
L-13	135200,040	767301,087	173,4	5,56	268,057	-167,84
L-13	135200,040	767301,087	173,4	12,00	268,057	-161,40
L-13	135200,040	767301,087	173,4	12,50	304,048	-160,90
L-13	135200,040	767301,087	173,4	20,33	304,048	-153,07
L-13	135200,040	767301,087	173,4	20,83	334,078	-152,57
L-13	135200,040	767301,087	173,4	30,06	334,078	-143,34
L-13	135200,040	767301,087	173,4	30,56	365,729	-142,84
L-13	135200,040	767301,087	173,4	41,17	365,729	-132,23
L-13	135200,040	767301,087	173,4	41,67	389,308	-131,73
L-13	135200,040	767301,087	173,4	46,00	389,308	-127,40
L-15	136082,694	767283,740	188,4	0,00	316,658	-188,40
L-15	136082,694	767283,740	188,4	5,06	316,658	-183,34
L-15	136082,694	767283,740	188,4	5,56	345,165	-182,84
L-15	136082,694	767283,740	188,4	12,00	345,165	-176,40
L-15	136082,694	767283,740	188,4	12,50	373,318	-175,90
L-15	136082,694	767283,740	188,4	20,33	373,318	-168,07
L-15	136082,694	767283,740	188,4	20,83	367,605	-167,57
L-15	136082,694	767283,740	188,4	30,06	367,605	-158,34
L-15	136082,694	767283,740	188,4	30,56	366,206	-157,84
L-15	136082,694	767283,740	188,4	41,17	366,206	-147,23
L-15	136082,694	767283,740	188,4	41,67	375,763	-146,73
L-15	136082,694	767283,740	188,4	48,00	375,763	-140,40
L-16	134238,340	766761,931	163,2	0,00	328,746	-163,20
L-16	134238,340	766761,931	163,2	5,06	328,746	-158,14
L-16	134238,340	766761,931	163,2	5,56	284,641	-157,64
L-16	134238,340	766761,931	163,2	12,00	284,641	-151,20
L-16	134238,340	766761,931	163,2	12,50	279,514	-150,70
L-16	134238,340	766761,931	163,2	20,33	279,514	-142,87
L-16	134238,340	766761,931	163,2	20,83	349,676	-142,37
L-16	134238,340	766761,931	163,2	30,06	349,676	-133,14
L-16	134238,340	766761,931	163,2	30,56	397,686	-132,64
L-16	134238,340	766761,931	163,2	41,17	397,686	-122,03
L-16	134238,340	766761,931	163,2	41,67	405,727	-121,53
L-16	134238,340	766761,931	163,2	53,67	405,727	-109,53
L-16	134238,340	766761,931	163,2	54,17	384,621	-109,03
L-16	134238,340	766761,931	163,2	60,00	384,621	-103,20
L-17	134718,345	766764,005	163,2	0,00	286,055	-163,20
L-17	134718,345	766764,005	163,2	5,06	286,055	-158,14
L-17	134718,345	766764,005	163,2	5,56	268,652	-157,64

NOMBRE	ESTE (X) (UTM)	NORTE (Y) (UTM)	COTA (Z) (m)	PROFUNDIDAD (m)	Vs (m/s)	TVD (m)
L-17	134718,345	766764,005	163,2	12,00	268,652	-151,20
L-17	134718,345	766764,005	163,2	12,50	266,450	-150,70
L-17	134718,345	766764,005	163,2	20,33	266,450	-142,87
L-17	134718,345	766764,005	163,2	20,83	306,170	-142,37
L-17	134718,345	766764,005	163,2	28,00	306,170	-135,20
L-18	135198,985	766759,426	167,9	0,00	316,148	-167,90
L-18	135198,985	766759,426	167,9	5,06	316,148	-162,84
L-18	135198,985	766759,426	167,9	5,56	288,080	-162,34
L-18	135198,985	766759,426	167,9	12,00	288,080	-155,90
L-18	135198,985	766759,426	167,9	12,50	257,846	-155,40
L-18	135198,985	766759,426	167,9	20,33	257,846	-147,57
L-18	135198,985	766759,426	167,9	20,83	304,312	-147,07
L-18	135198,985	766759,426	167,9	30,06	304,312	-137,84
L-18	135198,985	766759,426	167,9	30,56	362,768	-137,34
L-18	135198,985	766759,426	167,9	41,17	362,768	-126,73
L-18	135198,985	766759,426	167,9	41,67	435,070	-126,23
L-18	135198,985	766759,426	167,9	53,67	435,070	-114,23
L-18	135198,985	766759,426	167,9	54,17	450,837	-113,73
L-18	135198,985	766759,426	167,9	67,56	450,837	-100,34
L-18	135198,985	766759,426	167,9	68,06	451,442	-99,84
L-18	135198,985	766759,426	167,9	82,83	451,442	-85,07
L-18	135198,985	766759,426	167,9	83,33	454,474	-84,57
L-18	135198,985	766759,426	167,9	92,00	454,474	-75,90
L-19	135681,082	766563,152	172,4	0,00	330,359	-172,40
L-19	135681,082	766563,152	172,4	5,06	330,359	-167,34
L-19	135681,082	766563,152	172,4	5,56	290,476	-166,84
L-19	135681,082	766563,152	172,4	12,00	290,476	-160,40
L-19	135681,082	766563,152	172,4	12,50	341,796	-159,90
L-19	135681,082	766563,152	172,4	20,33	341,796	-152,07
L-19	135681,082	766563,152	172,4	20,83	394,444	-151,57
L-19	135681,082	766563,152	172,4	30,06	394,444	-142,34
L-19	135681,082	766563,152	172,4	30,56	383,638	-141,84
L-19	135681,082	766563,152	172,4	41,17	383,638	-131,23
L-19	135681,082	766563,152	172,4	41,67	348,976	-130,73
L-19	135681,082	766563,152	172,4	53,67	348,976	-118,73
L-19	135681,082	766563,152	172,4	54,17	378,674	-118,23
L-19	135681,082	766563,152	172,4	67,56	378,674	-104,84
L-19	135681,082	766563,152	172,4	68,06	400,624	-104,34
L-19	135681,082	766563,152	172,4	82,83	400,624	-89,57
L-19	135681,082	766563,152	172,4	83,33	426,179	-89,07
L-19	135681,082	766563,152	172,4	92,00	426,179	-80,40
L-20	136002,479	766749,512	181,2	0,00	376,803	-181,20
L-20	136002,479	766749,512	181,2	5,06	376,803	-176,14
L-20	136002,479	766749,512	181,2	5,56	361,004	-175,64
L-20	136002,479	766749,512	181,2	12,00	361,004	-169,20

NOMBRE	ESTE (X) (UTM)	NORTE (Y) (UTM)	COTA (Z) (m)	PROFUNDIDAD (m)	Vs (m/s)	TVD (m)
L-20	136002,479	766749,512	181,2	12,50	297,210	-168,70
L-20	136002,479	766749,512	181,2	20,33	297,210	-160,87
L-20	136002,479	766749,512	181,2	20,83	336,001	-160,37
L-20	136002,479	766749,512	181,2	30,06	336,001	-151,14
L-20	136002,479	766749,512	181,2	30,56	415,008	-150,64
L-20	136002,479	766749,512	181,2	41,17	415,008	-140,03
L-20	136002,479	766749,512	181,2	41,67	475,193	-139,53
L-20	136002,479	766749,512	181,2	53,67	475,193	-127,53
L-20	136002,479	766749,512	181,2	54,17	480,593	-127,03
L-20	136002,479	766749,512	181,2	68,00	480,593	-113,20
L-22	134720,978	766221,073	160,6	0,00	255,805	-160,60
L-22	134720,978	766221,073	160,6	5,06	255,805	-155,54
L-22	134720,978	766221,073	160,6	5,56	253,119	-155,04
L-22	134720,978	766221,073	160,6	12,00	253,119	-148,60
L-22	134720,978	766221,073	160,6	12,50	271,939	-148,10
L-22	134720,978	766221,073	160,6	20,33	271,939	-140,27
L-22	134720,978	766221,073	160,6	20,83	301,383	-139,77
L-22	134720,978	766221,073	160,6	26,00	301,383	-134,60
L-43	134242,119	766222,643	159,2	0,00	275,878	-159,20
L-43	134242,119	766222,643	159,2	5,06	275,878	-154,14
L-43	134242,119	766222,643	159,2	5,56	266,676	-153,64
L-43	134242,119	766222,643	159,2	12,00	266,676	-147,20
L-43	134242,119	766222,643	159,2	12,50	294,996	-146,70
L-43	134242,119	766222,643	159,2	20,33	294,996	-138,87
L-43	134242,119	766222,643	159,2	20,83	328,598	-138,37
L-43	134242,119	766222,643	159,2	30,00	328,598	-129,20
L-47	135520,071	766221,632	170,2	0,00	303,191	-170,20
L-47	135520,071	766221,632	170,2	5,06	303,191	-165,14
L-47	135520,071	766221,632	170,2	5,56	299,736	-164,64
L-47	135520,071	766221,632	170,2	12,00	299,736	-158,20
L-47	135520,071	766221,632	170,2	12,50	285,416	-157,70
L-47	135520,071	766221,632	170,2	20,33	285,416	-149,87
L-47	135520,071	766221,632	170,2	20,83	295,211	-149,37
L-47	135520,071	766221,632	170,2	30,06	295,211	-140,14
L-47	135520,071	766221,632	170,2	30,56	351,835	-139,64
L-47	135520,071	766221,632	170,2	41,17	351,835	-129,03
L-47	135520,071	766221,632	170,2	41,67	404,014	-128,53
L-47	135520,071	766221,632	170,2	53,67	404,014	-116,53
L-47	135520,071	766221,632	170,2	54,17	421,617	-116,03
L-47	135520,071	766221,632	170,2	67,56	421,617	-102,64
L-47	135520,071	766221,632	170,2	68,06	422,089	-102,14
L-47	135520,071	766221,632	170,2	82,83	422,089	-87,37
L-47	135520,071	766221,632	170,2	83,33	422,088	-86,87
L-47	135520,071	766221,632	170,2	88,00	422,088	-82,20
L-48	135841,154	766227,238	170,8	0,00	333,907	-170,80

NOMBRE	ESTE (X) (UTM)	NORTE (Y) (UTM)	COTA (Z) (m)	PROFUNDIDAD (m)	Vs (m/s)	TVD (m)
L-48	135841,154	766227,238	170,8	5,06	333,907	-165,74
L-48	135841,154	766227,238	170,8	5,56	305,675	-165,24
L-48	135841,154	766227,238	170,8	12,00	305,675	-158,80
L-48	135841,154	766227,238	170,8	12,50	252,249	-158,30
L-48	135841,154	766227,238	170,8	20,33	252,249	-150,47
L-48	135841,154	766227,238	170,8	20,83	284,146	-149,97
L-48	135841,154	766227,238	170,8	30,06	284,146	-140,74
L-48	135841,154	766227,238	170,8	30,56	323,028	-140,24
L-48	135841,154	766227,238	170,8	34,00	323,028	-136,80
L-49	136161,495	766222,182	173,4	0,00	279,579	-173,40
L-49	136161,495	766222,182	173,4	5,06	279,579	-168,34
L-49	136161,495	766222,182	173,4	5,56	270,012	-167,84
L-49	136161,495	766222,182	173,4	12,00	270,012	-161,40
L-49	136161,495	766222,182	173,4	12,50	275,525	-160,90
L-49	136161,495	766222,182	173,4	20,33	275,525	-153,07
L-49	136161,495	766222,182	173,4	20,83	303,034	-152,57
L-49	136161,495	766222,182	173,4	24,00	303,034	-149,40

APÉNDICE C

Tabla 3. Inversión conjunta entre los métodos MASW y ReMi

NOMBRE	ESTE (X) (UTM)	NORTE (Y) (UTM)	COTA (Z) (m)	PROFUNDIDAD (m)	Vs (m/s)	TVD (m)
L-1	134242,540	768369,411	174	0,00	270,627	-174,00
L-1	134242,540	768369,411	174	5,06	270,627	-168,94
L-1	134242,540	768369,411	174	5,56	235,992	-168,44
L-1	134242,540	768369,411	174	12,00	235,992	-162,00
L-1	134242,540	768369,411	174	12,50	235,350	-161,50
L-1	134242,540	768369,411	174	20,33	235,350	-153,67
L-1	134242,540	768369,411	174	20,83	293,720	-153,17
L-1	134242,540	768369,411	174	30,06	293,720	-143,94
L-1	134242,540	768369,411	174	30,56	342,753	-143,44
L-1	134242,540	768369,411	174	41,17	342,753	-132,83
L-1	134242,540	768369,411	174	41,67	374,381	-132,33
L-1	134242,540	768369,411	174	53,67	374,381	-120,33
L-1	134242,540	768369,411	174	54,17	388,058	-119,83
L-1	134242,540	768369,411	174	63,00	388,058	-111,00
L-2	134722,477	768369,423	173	0,00	351,673	-173,00
L-2	134722,477	768369,423	173	5,06	351,673	-167,94
L-2	134722,477	768369,423	173	5,56	296,301	-167,44
L-2	134722,477	768369,423	173	12,00	296,301	-161,00
L-2	134722,477	768369,423	173	12,50	263,554	-160,50
L-2	134722,477	768369,423	173	20,33	263,554	-152,67
L-2	134722,477	768369,423	173	20,83	321,341	-152,17
L-2	134722,477	768369,423	173	30,06	321,341	-142,94
L-2	134722,477	768369,423	173	30,56	371,346	-142,44
L-2	134722,477	768369,423	173	41,17	371,346	-131,83
L-2	134722,477	768369,423	173	41,67	388,977	-131,33
L-2	134722,477	768369,423	173	53,67	388,977	-119,33
L-2	134722,477	768369,423	173	54,17	387,517	-118,83
L-2	134722,477	768369,423	173	67,56	387,517	-105,44
L-2	134722,477	768369,423	173	68,06	384,698	-104,94
L-2	134722,477	768369,423	173	82,83	384,698	-90,17
L-2	134722,477	768369,423	173	83,33	388,576	-89,67
L-2	134722,477	768369,423	173	84,00	388,576	-89,00
L-3	135201,736	768369,553	178	0,00	270,118	-178,20
L-3	135201,736	768369,553	178	5,06	270,118	-173,14
L-3	135201,736	768369,553	178	5,56	251,245	-172,64
L-3	135201,736	768369,553	178	12,00	251,245	-166,20
L-3	135201,736	768369,553	178	12,50	256,962	-165,70
L-3	135201,736	768369,553	178	20,33	256,962	-157,87
L-3	135201,736	768369,553	178	20,83	291,414	-157,37

NOMBRE	ESTE (X) (UTM)	NORTE (Y) (UTM)	COTA (Z) (m)	PROFUNDIDAD (m)	Vs (m/s)	TVD (m)
L-3	135201,736	768369,553	178	30,06	291,414	-148,14
L-3	135201,736	768369,553	178	30,56	343,921	-147,64
L-3	135201,736	768369,553	178	41,17	343,921	-137,03
L-3	135201,736	768369,553	178	41,67	374,235	-136,53
L-3	135201,736	768369,553	178	53,67	374,235	-124,53
L-3	135201,736	768369,553	178	54,17	400,837	-124,03
L-3	135201,736	768369,553	178	67,56	400,837	-110,64
L-3	135201,736	768369,553	178	68,06	407,265	-110,14
L-3	135201,736	768369,553	178	82,83	407,265	-95,37
L-3	135201,736	768369,553	178	83,33	415,068	-94,87
L-3	135201,736	768369,553	178	88,00	415,068	-90,20
L-5	136082,569	768369,415	198,5	0,00	428,319	-198,50
L-5	136082,569	768369,415	198,5	5,06	428,319	-193,44
L-5	136082,569	768369,415	198,5	5,56	425,001	-192,94
L-5	136082,569	768369,415	198,5	12,00	425,001	-186,50
L-5	136082,569	768369,415	198,5	12,50	376,065	-186,00
L-5	136082,569	768369,415	198,5	20,33	376,065	-178,17
L-5	136082,569	768369,415	198,5	20,83	346,570	-177,67
L-5	136082,569	768369,415	198,5	30,06	346,570	-168,44
L-5	136082,569	768369,415	198,5	30,56	363,616	-167,94
L-5	136082,569	768369,415	198,5	41,17	363,616	-157,33
L-5	136082,569	768369,415	198,5	41,67	383,944	-156,83
L-5	136082,569	768369,415	198,5	53,67	383,944	-144,83
L-5	136082,569	768369,415	198,5	54,17	387,476	-144,33
L-5	136082,569	768369,415	198,5	62,00	387,476	-136,50
L-6	134241,719	767841,304	172	0,00	312,864	-172,00
L-6	134241,719	767841,304	172	5,06	312,864	-166,94
L-6	134241,719	767841,304	172	5,56	255,266	-166,44
L-6	134241,719	767841,304	172	12,00	255,266	-160,00
L-6	134241,719	767841,304	172	12,50	253,535	-159,50
L-6	134241,719	767841,304	172	20,33	253,535	-151,67
L-6	134241,719	767841,304	172	20,83	306,914	-151,17
L-6	134241,719	767841,304	172	30,06	306,914	-141,94
L-6	134241,719	767841,304	172	30,56	399,510	-141,44
L-6	134241,719	767841,304	172	41,17	399,510	-130,83
L-6	134241,719	767841,304	172	41,67	435,633	-130,33
L-6	134241,719	767841,304	172	53,67	435,633	-118,33
L-6	134241,719	767841,304	172	54,17	436,716	-117,83
L-6	134241,719	767841,304	172	65,00	436,716	-107,00
L-7	134720,119	767840,734	171,8	0,00	303,635	-171,80
L-7	134720,119	767840,734	171,8	5,06	303,635	-166,74
L-7	134720,119	767840,734	171,8	5,56	373,302	-166,24
L-7	134720,119	767840,734	171,8	12,00	373,302	-159,80
L-7	134720,119	767840,734	171,8	12,50	325,610	-159,30
L-7	134720,119	767840,734	171,8	20,33	325,610	-151,47

NOMBRE	ESTE (X) (UTM)	NORTE (Y) (UTM)	COTA (Z) (m)	PROFUNDIDAD (m)	Vs (m/s)	TVD (m)
L-7	134720,119	767840,734	171,8	20,83	313,827	-150,97
L-7	134720,119	767840,734	171,8	30,06	313,827	-141,74
L-7	134720,119	767840,734	171,8	30,56	344,749	-141,24
L-7	134720,119	767840,734	171,8	41,17	344,749	-130,63
L-7	134720,119	767840,734	171,8	41,67	379,723	-130,13
L-7	134720,119	767840,734	171,8	53,67	379,723	-118,13
L-7	134720,119	767840,734	171,8	54,17	389,426	-117,63
L-7	134720,119	767840,734	171,8	58,00	389,426	-113,80
L-8	135201,925	767820,373	175,8	0,00	199,429	-175,80
L-8	135201,925	767820,373	175,8	5,06	199,429	-170,74
L-8	135201,925	767820,373	175,8	5,56	237,072	-170,24
L-8	135201,925	767820,373	175,8	12,00	237,072	-163,80
L-8	135201,925	767820,373	175,8	12,50	257,594	-163,30
L-8	135201,925	767820,373	175,8	20,33	257,594	-155,47
L-8	135201,925	767820,373	175,8	20,83	306,511	-154,97
L-8	135201,925	767820,373	175,8	30,06	306,511	-145,74
L-8	135201,925	767820,373	175,8	30,56	382,944	-145,24
L-8	135201,925	767820,373	175,8	41,17	382,944	-134,63
L-8	135201,925	767820,373	175,8	41,67	414,015	-134,13
L-8	135201,925	767820,373	175,8	53,67	414,015	-122,13
L-8	135201,925	767820,373	175,8	54,17	419,501	-121,63
L-8	135201,925	767820,373	175,8	64,00	419,501	-111,80
L-11	134481,169	767304,444	165,8	0,00	336,137	-165,80
L-11	134481,169	767304,444	165,8	5,06	336,137	-160,74
L-11	134481,169	767304,444	165,8	5,56	294,281	-160,24
L-11	134481,169	767304,444	165,8	12,00	294,281	-153,80
L-11	134481,169	767304,444	165,8	12,50	274,856	-153,30
L-11	134481,169	767304,444	165,8	20,33	274,856	-145,47
L-11	134481,169	767304,444	165,8	20,83	315,310	-144,97
L-11	134481,169	767304,444	165,8	30,06	315,310	-135,74
L-11	134481,169	767304,444	165,8	30,56	368,693	-135,24
L-11	134481,169	767304,444	165,8	41,17	368,693	-124,63
L-11	134481,169	767304,444	165,8	41,67	391,310	-124,13
L-11	134481,169	767304,444	165,8	53,67	391,310	-112,13
L-11	134481,169	767304,444	165,8	54,17	422,010	-111,63
L-11	134481,169	767304,444	165,8	66,00	422,010	-99,80
L-12	134720,723	767302,655	170,8	0,00	341,467	-170,80
L-12	134720,723	767302,655	170,8	5,06	341,467	-165,74
L-12	134720,723	767302,655	170,8	5,56	343,996	-165,24
L-12	134720,723	767302,655	170,8	12,00	343,996	-158,80
L-12	134720,723	767302,655	170,8	12,50	332,445	-158,30
L-12	134720,723	767302,655	170,8	20,33	332,445	-150,47
L-12	134720,723	767302,655	170,8	20,83	341,578	-149,97
L-12	134720,723	767302,655	170,8	30,06	341,578	-140,74
L-12	134720,723	767302,655	170,8	30,56	379,028	-140,24

NOMBRE	ESTE (X) (UTM)	NORTE (Y) (UTM)	COTA (Z) (m)	PROFUNDIDAD (m)	Vs (m/s)	TVD (m)
L-12	134720,723	767302,655	170,8	41,17	379,028	-129,63
L-12	134720,723	767302,655	170,8	41,67	408,612	-129,13
L-12	134720,723	767302,655	170,8	53,67	408,612	-117,13
L-12	134720,723	767302,655	170,8	54,17	423,747	-116,63
L-12	134720,723	767302,655	170,8	65,00	423,747	-105,80
L-13	135200,040	767301,087	173,4	0,00	230,042	-173,40
L-13	135200,040	767301,087	173,4	5,06	230,042	-168,34
L-13	135200,040	767301,087	173,4	5,56	273,186	-167,84
L-13	135200,040	767301,087	173,4	12,00	273,186	-161,40
L-13	135200,040	767301,087	173,4	12,50	317,918	-160,90
L-13	135200,040	767301,087	173,4	20,33	317,918	-153,07
L-13	135200,040	767301,087	173,4	20,83	333,734	-152,57
L-13	135200,040	767301,087	173,4	30,06	333,734	-143,34
L-13	135200,040	767301,087	173,4	30,56	358,590	-142,84
L-13	135200,040	767301,087	173,4	41,17	358,590	-132,23
L-13	135200,040	767301,087	173,4	41,67	381,400	-131,73
L-13	135200,040	767301,087	173,4	53,67	381,400	-119,73
L-13	135200,040	767301,087	173,4	54,17	396,805	-119,23
L-13	135200,040	767301,087	173,4	64,00	396,805	-109,40
L-15	136082,694	767283,740	188,4	0,00	278,911	-188,40
L-15	136082,694	767283,740	188,4	5,06	278,911	-183,34
L-15	136082,694	767283,740	188,4	5,56	361,516	-182,84
L-15	136082,694	767283,740	188,4	12,00	361,516	-176,40
L-15	136082,694	767283,740	188,4	12,50	395,168	-175,90
L-15	136082,694	767283,740	188,4	20,33	395,168	-168,07
L-15	136082,694	767283,740	188,4	20,83	373,844	-167,57
L-15	136082,694	767283,740	188,4	30,06	373,844	-158,34
L-15	136082,694	767283,740	188,4	30,56	365,738	-157,84
L-15	136082,694	767283,740	188,4	41,17	365,738	-147,23
L-15	136082,694	767283,740	188,4	41,67	373,731	-146,73
L-15	136082,694	767283,740	188,4	53,67	373,731	-134,73
L-15	136082,694	767283,740	188,4	54,17	383,367	-134,23
L-15	136082,694	767283,740	188,4	63,00	383,367	-125,40
L-16	134238,340	766761,931	163,2	0,00	352,780	-163,20
L-16	134238,340	766761,931	163,2	5,06	352,780	-158,14
L-16	134238,340	766761,931	163,2	5,56	281,812	-157,64
L-16	134238,340	766761,931	163,2	12,00	281,812	-151,20
L-16	134238,340	766761,931	163,2	12,50	277,348	-150,70
L-16	134238,340	766761,931	163,2	20,33	277,348	-142,87
L-16	134238,340	766761,931	163,2	20,83	343,328	-142,37
L-16	134238,340	766761,931	163,2	30,06	343,328	-133,14
L-16	134238,340	766761,931	163,2	30,56	391,537	-132,64
L-16	134238,340	766761,931	163,2	41,17	391,537	-122,03
L-16	134238,340	766761,931	163,2	41,67	402,194	-121,53
L-16	134238,340	766761,931	163,2	53,67	402,194	-109,53

NOMBRE	ESTE (X) (UTM)	NORTE (Y) (UTM)	COTA (Z) (m)	PROFUNDIDAD (m)	Vs (m/s)	TVD (m)
L-16	134238,340	766761,931	163,2	54,17	383,338	-109,03
L-16	134238,340	766761,931	163,2	60,00	383,338	-103,20
L-17	134718,345	766764,005	163,2	0,00	317,799	-163,20
L-17	134718,345	766764,005	163,2	5,06	317,799	-158,14
L-17	134718,345	766764,005	163,2	5,56	269,042	-157,64
L-17	134718,345	766764,005	163,2	12,00	269,042	-151,20
L-17	134718,345	766764,005	163,2	12,50	251,921	-150,70
L-17	134718,345	766764,005	163,2	20,33	251,921	-142,87
L-17	134718,345	766764,005	163,2	20,83	315,358	-142,37
L-17	134718,345	766764,005	163,2	30,00	315,358	-133,20
L-18	135198,985	766759,426	167,9	0,00	321,140	-167,90
L-18	135198,985	766759,426	167,9	5,06	321,140	-162,84
L-18	135198,985	766759,426	167,9	5,56	290,763	-162,34
L-18	135198,985	766759,426	167,9	12,00	290,763	-155,90
L-18	135198,985	766759,426	167,9	12,50	263,411	-155,40
L-18	135198,985	766759,426	167,9	20,33	263,411	-147,57
L-18	135198,985	766759,426	167,9	20,83	307,232	-147,07
L-18	135198,985	766759,426	167,9	30,06	307,232	-137,84
L-18	135198,985	766759,426	167,9	30,56	358,714	-137,34
L-18	135198,985	766759,426	167,9	41,17	358,714	-126,73
L-18	135198,985	766759,426	167,9	41,67	429,652	-126,23
L-18	135198,985	766759,426	167,9	53,67	429,652	-114,23
L-18	135198,985	766759,426	167,9	54,17	446,268	-113,73
L-18	135198,985	766759,426	167,9	67,56	446,268	-100,34
L-18	135198,985	766759,426	167,9	68,06	449,807	-99,84
L-18	135198,985	766759,426	167,9	82,83	449,807	-85,07
L-18	135198,985	766759,426	167,9	83,33	455,820	-84,57
L-18	135198,985	766759,426	167,9	93,00	455,820	-74,90
L-19	135681,082	766563,152	172,4	0,00	351,484	-172,40
L-19	135681,082	766563,152	172,4	5,06	351,484	-167,34
L-19	135681,082	766563,152	172,4	5,56	301,036	-166,84
L-19	135681,082	766563,152	172,4	12,00	301,036	-160,40
L-19	135681,082	766563,152	172,4	12,50	317,515	-159,90
L-19	135681,082	766563,152	172,4	20,33	317,515	-152,07
L-19	135681,082	766563,152	172,4	20,83	366,971	-151,57
L-19	135681,082	766563,152	172,4	30,06	366,971	-142,34
L-19	135681,082	766563,152	172,4	30,56	369,688	-141,84
L-19	135681,082	766563,152	172,4	41,17	369,688	-131,23
L-19	135681,082	766563,152	172,4	41,67	351,413	-130,73
L-19	135681,082	766563,152	172,4	53,67	351,413	-118,73
L-19	135681,082	766563,152	172,4	54,17	367,538	-118,23
L-19	135681,082	766563,152	172,4	60,00	367,538	-112,40
L-20	136002,479	766749,512	181,2	0,00	265,229	-181,20
L-20	136002,479	766749,512	181,2	5,06	265,229	-176,14
L-20	136002,479	766749,512	181,2	5,56	386,506	-175,64

NOMBRE	ESTE (X) (UTM)	NORTE (Y) (UTM)	COTA (Z) (m)	PROFUNDIDAD (m)	Vs (m/s)	TVD (m)
L-20	136002,479	766749,512	181,2	12,00	386,506	-169,20
L-20	136002,479	766749,512	181,2	12,50	350,206	-168,70
L-20	136002,479	766749,512	181,2	20,33	350,206	-160,87
L-20	136002,479	766749,512	181,2	20,83	322,174	-160,37
L-20	136002,479	766749,512	181,2	30,06	322,174	-151,14
L-20	136002,479	766749,512	181,2	30,56	395,083	-150,64
L-20	136002,479	766749,512	181,2	41,17	395,083	-140,03
L-20	136002,479	766749,512	181,2	41,67	459,253	-139,53
L-20	136002,479	766749,512	181,2	53,67	459,253	-127,53
L-20	136002,479	766749,512	181,2	54,17	476,653	-127,03
L-20	136002,479	766749,512	181,2	68,00	476,653	-113,20
L-22	134720,978	766221,073	160,6	0,00	249,167	-160,60
L-22	134720,978	766221,073	160,6	5,06	249,167	-155,54
L-22	134720,978	766221,073	160,6	5,56	263,143	-155,04
L-22	134720,978	766221,073	160,6	12,00	263,143	-148,60
L-22	134720,978	766221,073	160,6	12,50	270,430	-148,10
L-22	134720,978	766221,073	160,6	20,33	270,430	-140,27
L-22	134720,978	766221,073	160,6	20,83	298,878	-139,77
L-22	134720,978	766221,073	160,6	30,06	298,878	-130,54
L-22	134720,978	766221,073	160,6	30,56	335,841	-130,04
L-22	134720,978	766221,073	160,6	41,17	335,841	-119,43
L-22	134720,978	766221,073	160,6	41,67	352,450	-118,93
L-22	134720,978	766221,073	160,6	53,67	352,450	-106,93
L-22	134720,978	766221,073	160,6	54,17	358,268	-106,43
L-22	134720,978	766221,073	160,6	57,00	358,268	-103,60
L-43	134242,119	766222,643	159,2	0,00	341,027	-159,20
L-43	134242,119	766222,643	159,2	5,06	341,027	-154,14
L-43	134242,119	766222,643	159,2	5,56	257,842	-153,64
L-43	134242,119	766222,643	159,2	12,00	257,842	-147,20
L-43	134242,119	766222,643	159,2	12,50	282,297	-146,70
L-43	134242,119	766222,643	159,2	20,33	282,297	-138,87
L-43	134242,119	766222,643	159,2	20,83	336,523	-138,37
L-43	134242,119	766222,643	159,2	30,06	336,523	-129,14
L-43	134242,119	766222,643	159,2	30,56	360,660	-128,64
L-43	134242,119	766222,643	159,2	32,00	360,660	-127,20
L-46	135201,483	766221,771	163,3	0,00	327,881	-163,30
L-46	135201,483	766221,771	163,3	5,75	327,881	-157,55
L-46	135201,483	766221,771	163,3	6,25	356,086	-157,05
L-46	135201,483	766221,771	163,3	16,17	356,086	-147,13
L-46	135201,483	766221,771	163,3	16,67	352,552	-146,63
L-46	135201,483	766221,771	163,3	30,75	352,552	-132,55
L-46	135201,483	766221,771	163,3	31,25	413,798	-132,05
L-46	135201,483	766221,771	163,3	32,00	413,798	-131,30
L-47	135520,071	766221,632	170,2	0,00	322,215	-170,20
L-47	135520,071	766221,632	170,2	5,06	322,215	-165,14

NOMBRE	ESTE (X) (UTM)	NORTE (Y) (UTM)	COTA (Z) (m)	PROFUNDIDAD (m)	Vs (m/s)	TVD (m)
L-47	135520,071	766221,632	170,2	5,56	297,563	-164,64
L-47	135520,071	766221,632	170,2	12,00	297,563	-158,20
L-47	135520,071	766221,632	170,2	12,50	287,012	-157,70
L-47	135520,071	766221,632	170,2	20,33	287,012	-149,87
L-47	135520,071	766221,632	170,2	20,83	298,437	-149,37
L-47	135520,071	766221,632	170,2	30,06	298,437	-140,14
L-47	135520,071	766221,632	170,2	30,56	334,761	-139,64
L-47	135520,071	766221,632	170,2	41,17	334,761	-129,03
L-47	135520,071	766221,632	170,2	41,67	410,413	-128,53
L-47	135520,071	766221,632	170,2	53,67	410,413	-116,53
L-47	135520,071	766221,632	170,2	54,17	425,355	-116,03
L-47	135520,071	766221,632	170,2	67,56	425,355	-102,64
L-47	135520,071	766221,632	170,2	68,06	424,922	-102,14
L-47	135520,071	766221,632	170,2	82,00	424,922	-88,20
L-48	135841,154	766227,238	170,8	0,00	354,679	-170,80
L-48	135841,154	766227,238	170,8	5,06	354,679	-165,74
L-48	135841,154	766227,238	170,8	5,56	297,714	-165,24
L-48	135841,154	766227,238	170,8	12,00	297,714	-158,80
L-48	135841,154	766227,238	170,8	12,50	240,290	-158,30
L-48	135841,154	766227,238	170,8	20,33	240,290	-150,47
L-48	135841,154	766227,238	170,8	20,83	301,079	-149,97
L-48	135841,154	766227,238	170,8	30,06	301,079	-140,74
L-48	135841,154	766227,238	170,8	30,56	339,936	-140,24
L-48	135841,154	766227,238	170,8	34,00	339,936	-136,80
L-49	136161,495	766222,182	173,4	0,00	322,777	-173,40
L-49	136161,495	766222,182	173,4	5,06	322,777	-168,34
L-49	136161,495	766222,182	173,4	5,56	259,753	-167,84
L-49	136161,495	766222,182	173,4	12,00	259,753	-161,40
L-49	136161,495	766222,182	173,4	12,50	265,549	-160,90
L-49	136161,495	766222,182	173,4	20,33	265,549	-153,07
L-49	136161,495	766222,182	173,4	20,83	301,698	-152,57
L-49	136161,495	766222,182	173,4	30,00	301,698	-143,40