

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DEL MUNICIPIO
ZAMORA DE LA CUENCA GUARENAS – GUATIRE
MEDIANTE EL MÉTODO IMASW Y LA RELACIÓN
ESPECTRAL H/V**

Trabajo Especial de Grado
Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela para
Optar al título de Ingeniero Geofísico
Por el Br. Luis E. Guerrero N.

Ciudad Universitaria de Caracas, agosto 2021

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DEL MUNICIPIO
ZAMORA DE LA CUENCA GUARENAS – GUATIRE
MEDIANTE EL MÉTODO IMASW Y LA RELACIÓN
ESPECTRAL H/V**

Tutor académico: Dr. Michael Schmitz

Trabajo Especial de Grado
Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela para
Optar al título de Ingeniero Geofísico
Por el Br. Luis E. Guerrero N.

Ciudad Universitaria de Caracas, agosto 2021

Caracas, 02 de agosto de 2021

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el **Br. Luis Guerrero**, titulado:

“MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DEL MUNICIPIO ZAMORA DE LA CUENCA GUARENAS – GUATIRE MEDIANTE EL MÉTODO IMASW Y LA RELACIÓN ESPECTRAL H/V”

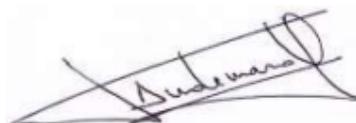
Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducentes al título de Ingeniero Geofísico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas del autor, lo declaran **APROBADO**.



Prof. Michael Schmitz
Tutor Académico



Prof. Feliciano De Santis
Jurado



Prof. Franck Audemard
Jurado

DEDICATORIA

“Sólo con la risa y la felicidad puedo convertirme en un verdadero éxito. Sólo con la risa y la felicidad puedo disfrutar de los frutos de mi trabajo. Si no fuera así, sería mejor que fracasara, porque la felicidad es el vino que afina el gusto de la comida. Para disfrutar del éxito debo tener felicidad, y la risa será la doncella que me sirve”

- O.G. Mandino

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres, por guiarme en mi camino y ser los pilares fundamentales de mi éxito. A mis hermanas, por ser parte de mi vida y apoyarme sin dudar. A mi abuela Gloria Manrique, porque nunca ha dejado de cuidarme. A mis tres abuelos que desde lo más alto me observan. A mi tía Fanny, y todo el resto de mi familia.

Le agradezco a la vida por haberme cruzado con personas maravillosas, siempre dispuestas a brindarme su mano. Agradezco profundamente la señora Belinda Atencio y el señor Francisco Pantoja, por acogerme en su hogar durante cinco años en la ciudad de Caracas.

A todos mis conocidos, y amistades del núcleo Armando Mendoza en Cagua, dónde empezó la espectacular aventura que hoy culmina con la entrega de mi título universitario.

Agradecimiento especial y todo mi cariño a mis amistades de “El Búnker”, que han sido parte de una de las mejores etapas de mi vida. Nos encontraremos de nuevo en el campo laboral, y celebraremos nuestro éxito.

**“Microzonificación sísmica del municipio Zamora de la cuenca Guarenas –
Guatire mediante el método IMASW y la relación espectral H/V”**

Autor: Luis E. Guerrero N.

Tutor académico: Dr. Michael Schmitz

Palabras clave: IMASW, relación espectral, Modelo Digital de Elevación, cuenca sedimentaria, placas tectónicas, amenaza sísmica, ruido ambiental, Vs30, microzonificación sísmica.

RESUMEN

El municipio Zamora del edo. Miranda se encuentra sobre un depósito sedimentario de edad Plio – Pleistoceno, emplazado dentro del sistema montañoso de la Cordillera de la Costa, y se encuentra dentro de una zona considerada de moderado a alta actividad sísmica debido a la interacción entre las placas tectónicas de Caribe y Suramérica. El principal objetivo del presente estudio corresponde a crear un mapa de microzonas sísmicas del municipio Zamora, en función del parámetro Vs30 y el espesor sedimentario de la cuenca a través de los métodos de sísmica pasiva IMASW (*Interferometric Multichannel Analysis of Surface Waves*) y la relación espectral H/V, o método Nakamura. Para ello se realizaron un total de 126 mediciones sísmicas alrededor del municipio Zamora, incluyendo las parroquias de Guatire y Araira. Además, se utilizó información de estudios y proyectos realizados con anterioridad en la zona de estudio para la integración de los resultados previos con los obtenidos en el presente trabajo de investigación. Los mapas de Vs30 integrado y espesor de sedimentos de la cuenca se realizaron a través del ajuste del mapa de interpolación resultante de los datos de IMASW y H/V con mapas de Vs30 topográfico, mapas geológicos y geográficos, así como el uso del Modelo Digital de Elevación de la zona, de modo que se obtuviesen resultados integrales, respaldados con estudios previos y actuales. El mapa de espesor sedimentario integral da como mayor espesor de sedimentos el casco central de la parroquia Guatire, con espesores mayores a 250 metros, y disminuyen gradualmente al acercarse a las zonas limítrofes de la cuenca con rangos establecidos entre 150 y 250 metros, 80 – 150 y 0 – 80 metros cerca de las rampas piemontinas que se ubican al borde del valle. El mapa de Vs30 integral muestra la distribución de Vs30 en tres

clases diferenciadas: zona central del valle, en los flancos, y fuera de la cuenca, por los rangos 200 – 400 m/s, con predominancia en la zona central del valle, 400 – 600 m/s, que se extiende en los flancos, y mayores a 600 m/s fuera de la cuenca. Finalmente, a través de la integración de los mapas de espesor de sedimentos y velocidades de ondas de corte se creó el mapa de microzonas sísmicas que clasifica el suelo en diferentes clases, que van de las clases **microzonas sísmicas MS 5**, de mayor amenaza sísmica en la zona central de la cuenca en la parroquia de Guatire, pasando por las clases **MS 4**, **MS 3**, **MS 2**, a la clase **MS 1** de menor amenaza, fuera de la cuenca y que cubre la mayor parte de los municipios Plaza y Zamora. La parroquia de Araitha, por su parte, posee una amenaza moderadamente baja y se encuentra en la clase **MS 2-1**.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS	V
RESUMEN	VI
ÍNDICE GENERAL	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	X
CAPÍTULO 1	17
INTRODUCCIÓN	17
1.1 OBJETIVOS	18
1.1 Objetivo General	18
1.2 Objetivos Específicos	18
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
1.3 JUSTIFICACIÓN	20
1.4 UBICACIÓN	21
1.5 ANTECEDENTES	22
CAPÍTULO II	29
MARCO GEOLÓGICO	29
2.1 GENERALIDADES	29
2.2 GEOLOGIA REGIONAL	30
2.3 GEOLOGIA LOCAL	31
2.4 GEOLOGIA ESTRUCTURAL	35
CAPÍTULO III	37
MARCO TEORICO	37
3.1 Ondas sísmicas	37
3.2 Ruido ambiental	37
3.3 Ondas Rayleigh	37
3.4 Elipticidad de las ondas Rayleigh	38
3.5 Espesores sedimentarios	38
3.6 Efectos de sitio	39
3.7 Frecuencia fundamental o de resonancia	39
3.8 Análisis espectral de ondas superficiales	39
3.9 Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW)	40
3.10 Curva de dispersión	40

3.11 Interferometría sísmica y análisis multicanal de ondas superficiales (IMASW).....	41
3.12 Inversión	42
3.13 Velocidad de las ondas de corte hasta los 30 m de profundidad (Vs30).....	42
3.14 Relación espectral H/V	43
3.15 Fundamento teórico de la relación H/V	43
3.16 Microzonificación sísmica	45
CAPÍTULO IV	47
METODOLOGÍA	47
4.2 Procesamiento de datos IMASW	51
4.3 Mapa con valores Vs30 inferidas a través del relieve de la cuenca Guarenas – Guatire (Vs30 topográfico).....	56
4.4 Delimitación de microzonas del mapa Vs30 integrado.	57
4.5 Adquisición de datos H/V	61
4.6 Procesamiento de datos H/V	65
4.7 Delimitación de polígonos para las microzonas de espesor sedimentario	66
CAPÍTULO V.....	69
RESULTADOS Y ANALISIS	69
5.1 Integración de datos.....	69
5.2 Parámetros de inversión.....	70
5.3 Modelos 1D del subsuelo (método IMASW)	71
5.4 Espesor sedimentario de la cuenca	79
5.5 Mapa de microzonas sísmicas	83
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	87
REFERENCIAS	89
APÉNDICES.....	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Mapa digitalizado de la zona de estudio, modificado de las cartas del IGVS, G2, G3, H2 y H3, tomado de Hecht (2005)	21
Figura 1. 2 Mapa de espesor de sedimentos (Formación Guatire), con los perfiles definidos para los modelos periodo – profundidad (Hecht, 2005).....	22
Figura 1. 3 Relación período-profundidad de los perfiles 1,2 y 3 y la regresión lineal (Hecht, 2005)	23
Figura 1. 4 Mapa de isoperiodos de la cuenca Guarenas – Guatire (Amarís, 2006).....	24
Figura 1. 5 Mapa Vs30 obtenido para Guarenas Guatire según aproximación de pendientes en regímenes tectónicamente activos (USGS). Tomado de Schmitz et al. (2012).....	25
Figura 1. 6 Mapa de espesor sedimentario de Guarenas y Guatire (Amarís et al., 2011) .	25
Figura 1. 7 Mapa de isoperiodos de la cuenca Guarenas – Guatire (Noda, 2008)	26
Figura 1. 8 Modelo de velocidades de los sedimentos holocénicos (aluvión) y modelo de velocidades de los sedimentos pleistocénicos (Fm. Guatire) de la cuenca Guarenas – Guatire (García, 2012)	27
Figura 1. 9 Mapa de riesgo sísmico de las urbanizaciones de Guatire, municipio Zamora, Estado Miranda, Venezuela (Morejon et al., 2014)	28
Figura 2. 1 Mapa de la distribución geográfica de sedimentos, tomado de Hecht (2005), modificado de Picard (1976).....	30
Figura 2. 2 Mapa geológico y estructural de la cuenca Guarenas – Guatire (Miró & Viete, 2009)	34
Figura 2. 3 Fallas de la región central de Venezuela. Modificado de Rodríguez et al. (2010) tomado de Schmitz et al. (2012)	36
Figura 3. 1 (a) Vista 3D del espectro de velocidad; (b) Curvas de dispersión con los cinco primeros modos, se indicará el cuarto modo más alto y el modo fundamental. Modificado de Dal Moro (2015).....	41
Figura 3. 2 Construcción de una fuente virtual a partir de interferometría sísmica, tomado de Escobar (2019)	42
Figura 4. 1 Mapa de ubicación geográfica de los puntos de adquisición propuestos en el municipio Zamora de la cuenca Guarenas - Guatire	47
Figura 4. 2 Ubicación geográfica de los puntos de adquisición del método IMASW en la cuenca Guarenas - Guatire	48

Figura 4. 3 Ubicación geográfica de los puntos de adquisición del método IMASW en el municipio Zamora de la cuenca Guarenas - Guatire	49
Figura 4. 4 Geófono con placa metálica.....	50
Figura 4. 5 Secuencia de preparación de los datos de IMASW en el programa Geopsy ..	52
Figura 4. 6 Barra de herramientas del programa Geopsy.....	53
Figura 4. 7 Espectro y curva de dispersión, tendido número 23	53
Figura 4. 8 Curva de dispersión en el programa Dinver.	54
Figura 4. 9 Modelo 1D del subsuelo, tendido número 23.	54
Figura 4. 10 Modelo 1D del subsuelo, tendido número 10.	55
Figura 4. 11 Relación entre pendientes topográficas y rangos de Vs30, según NEHRP (BSSC, 2003), tomado de Allen & Wald (2009).	57
Figura 4. 12. Delimitación del límite este del mapa de Vs30 integrado.	58
Figura 4. 13 Mapa de Vs30 integrado sobre mapa de Vs30 topográfico.	59
Figura 4. 14. Delimitación del límite oeste del mapa de Vs30 integrado.	59
Figura 4. 15 Superposición del mapa Vs30 integrado sobre el Modelo Digital de Elevación	60
Figura 4. 16. Superposición del mapa de Vs30 topográfico con el mapa de Vs30 integrado.	61
Figura 4. 17 Ubicación geográfica de las mediciones de ruido sísmico ambiental, para el método H/V en la cuenca Guarenas – Guatire.	62
Figura 4. 18 Ubicación geográfica de las mediciones de ruido sísmico ambiental, para el método H/V en el municipio Zamora de la cuenca Guarenas – Guatire.	63
Figura 4. 19 Secuencia de preparación de los datos en el programa Geopsy, para el método H/V.....	65
Figura 4. 20 Ejemplo de curva de dispersión en el programa Geopsy, correspondiente al punto número 63.	66
Figura 4. 21 Ajuste de la zona central de la microzonas de espesor sedimentario	67
Figura 4. 22 Ajuste del sector oeste de las microzonas de espesor sedimentario.	68
Figura 5. 1 Parámetros de inversión utilizados en el programa Dinver para crear los modelos 1D del subsuelo (5 capas).	70
Figura 5. 2 Parámetros de inversión utilizados en el programa Dinver para crear los modelos 1D del subsuelo (6 capas).	71
Figura 5. 3 Curvas de dispersión y modelos 1D del subsuelo, tendidos 17, 18 y 19.	72

Figura 5. 4 Clasificación de suelos acuerdo a la nueva versión de la norma COVENIN 1.756 (López et al., 2017) para la construcción de edificaciones sismorresistentes.	75
Figura 5. 5 Ajuste de las clases de sitio de la clasificación de suelos de acuerdo a la nueva versión de la norma COVENIN 1.756 (López et al., 2017) para la construcción de edificaciones sismorresistentes para las microzonas sísmicas en Guarenas – Guatire.	75
Figura 5. 6 Mapa de Vs30 integrado de la cuenca de Guarenas - Guatire.	76
Figura 5. 7 Mapa de Vs30 integrado del municipio Zamora de la cuenca de Guarenas – Guatire.....	78
Figura 5. 8 Mapa de Vs30 topográfico (9’’ resolución) del municipio Zamora de la cuenca de Guarenas - Guatire.	79
Figura 5. 9 Ejemplo de la relación espectral H/V de los puntos 58, 64 y 67.	80
Figura 5. 10 Mapa de espesor de sedimentos de la cuenca de Guarenas - Guatire.	82
Figura 5. 11 Mapa de espesor de sedimentos del municipio Zamora de la cuenca de Guarenas - Guatire.	83
Figura 5. 12 Mapa de microzonas sísmicas de la cuenca de Guarenas - Guatire.....	84
Figura 5. 13 Mapa de microzonas sísmicas del municipio Zamora de la cuenca de Guarenas - Guatire	85
Figura 5. 14 Mapa de microzonas sísmicas del municipio Zamora de la cuenca de Guarenas - Guatire, superpuesto sobre el mapa geográfico del municipio Zamora.....	85
Figura 5. 15 Mapa de microzonas sísmicas del municipio Zamora de la cuenca de Guarenas - Guatire, superpuesto sobre el mapa geográfico de los municipios Plaza y Zamora.	86
A.1. 1 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT001 - GT004	97
A.1. 2 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT005 - GT008	98
A.1. 3 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT009 - GT012	99
A.1. 4 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT013 - GT016	100
A.1. 5 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT020 - GT024	101
A.1. 6 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT025 - GT029	102

A.1. 7 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT030 - GT033	103
A.1. 8 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT034 - GT037	104
A.1. 9 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT038 - GT041	105
A.1. 10 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT042 - GT045	106
A.1. 11 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT046 - GT049	107
A.1. 12 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT050 - GT053	108
A.1. 13 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT054 - GT057	109
A.1. 14 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT058 - GT061	110
A.1. 15 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT062 - GT065	111
A.1. 16 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT066 - GT069	112
A.1. 17 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT070 - GT073	113
A.1. 18 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT074 - GT077	114
A.1. 19 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT078 - GT081	115
A.1. 20 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT082 - GT085	116
A.1. 21 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT086 - GT089	117
A.1. 22 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT090 - GT093	118
A.1. 23 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT094 - GT097	119

A.1. 24 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT101 - GT098	120
A.1. 25 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT102 - GT105	121
A.1. 26 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT106 - GT109	122
A.1. 27 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT110 - GT113	123
A.1. 28 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT114 - GT117	124
A.1. 29 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT118 - GT121	125
A.1. 30 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT122 - GT125	126
A.1. 31 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT126 - GR03	127
A.1. 32 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GR04 - GR07	128
A.1. 33 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GR07 - GR12	129
A.1. 34 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GR13 - GR16	130
A.1. 35 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GR17 - GR20	131
A.1. 36 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GR21 - GR24	132
A.1. 37 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GR25 - GR28	133
A.1. 38 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GR29 - GR35	134
A.1. 39 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GR36 - GR39	135
A.1. 40 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GR40 - GR46	136

A.2 1 Relación espectral H/V, tendidos GT039 - GT044	137
A.2 2 Relación espectral H/V, tendidos GT045 - GT050	137
A.2 3 Relación espectral H/V, tendidos GT052 - GT057	138
A.2 4 Relación espectral H/V, tendidos GT058 - GT063	138
A.2 5 Relación espectral H/V, tendidos GT064 - GT069	139
A.2 6 Relación espectral H/V, tendidos GT070 - GT075	139
A.2 7 Relación espectral H/V, tendidos GT076- GT082	140
A.2 8 Relación espectral H/V, tendidos GT083 - GT089	140
A.2 9 Relación espectral H/V, tendidos GT090 - GT097	141
A.2 10 Relación espectral H/V, tendidos GT098 - GT107	141
A.2 11 Relación espectral H/V, tendidos GT108 - GT114	142
A.2 12 Relación espectral H/V, tendidos GT115 - GT123	142
A.2 13 Relación espectral H/V, tendidos GT124 - GT126	143
A.2 14 Relación espectral H/V, tendidos GR02 - GR07	143
A.2 15 Relación espectral H/V, tendidos GR08 - GR15	143
A.2 16 Relación espectral H/V, tendidos GR16 - GR22	144
A.2 17 Relación espectral H/V, tendidos GR23 - GR29	144
A.2 18 Relación espectral H/V, tendidos GR30 - GR38	144
A.2 19 Relación espectral H/V, tendidos GR41 - GR46	145

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4. 1 Instrumentos utilizados para la adquisición de datos con el método IMASW.	49
Tabla 4. 2 Ejemplo de cálculo de Vs30 para el tendido número 23.....	56
Tabla 5. 1 Coordenadas y valor de Vs30 de los puntos de adquisición de datos de IMASW	73
Tabla 5. 2 Coordenadas, frecuencia, periodo, Vs y periodo de los puntos de adquisición del método H/V	80

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Las ciudades de Guarenas y Guatire se encuentran sobre un depósito sedimentario de edad Plio – Pleistoceno, de relleno post orogénico emplazado dentro del sistema montañoso de la Cordillera de la Costa, cuyos límites se encuentran definidos al norte por el Macizo del Ávila y al sur por el cerro Colorado (Hecht, 2005). Dicha zona se caracteriza por poseer una moderada a elevada actividad sísmica debido a la interacción entre las placas Caribe y Suramérica, razón por la que se han impulsado proyectos de caracterización de suelos para la microzonificación sísmica para la mitigación de daños en casos de eventos telúricos.

El municipio Zamora ha desarrollado un gran crecimiento demográfico al considerarse zona de expansión de la Ciudad Capital, crecimiento que ha impulsado a su vez la construcción de viviendas del tipo formal e informal, razón por la que la ciudad de Guatire se ha considerado como una de las ciudades que formarían parte del proyecto de microzonificación sísmica impulsado por la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (Schmitz et al., 2012)

El objetivo de los proyectos de microzonificación sísmica es el de caracterizar el suelo y sub-suelo de las ciudades en función de la respuesta sísmica y espesor sedimentario, así como la evaluación de la amenaza sísmica, con el objeto de brindar lineamientos claros en materia de ordenamiento urbano para ser aplicados en la construcción o reforzamiento de edificaciones sismorresistentes.

La sísmica pasiva se utiliza cada vez con mayor frecuencia debido a las diversas ventajas que ofrece con respecto a la sísmica activa, entre ellos el hecho de que es una técnica no invasiva, que no requiere de fuentes artificiales para su desarrollo, lo que representa una gran ventaja al aplicarse en zonas urbanas cómo lo es el municipio Zamora. El método IMASW representa una eficiente alternativa para el estudio o caracterización de los estratos someros de la cuenca, razón por la que se utiliza para determinar la velocidad de las ondas de corte en los primeros 30 metros de espesor sedimentario (V_{s30}). Por otra parte, la relación espectral H/V, o método

Nakamura se presenta como un método eficaz para determinar el espesor sedimentario de la cuenca haciendo uso del periodo fundamental de cada estación de medición.

1.1 OBJETIVOS

1.1 Objetivo General

Delimitar las microzonas sísmicas del municipio Zamora de la cuenca Guarenas – Guatire en función del parámetro V_{s30} , a través de la inversión de las curvas de dispersión generadas mediante el método IMASW y el espesor sedimentario derivado de la relación espectral H/V.

1.2 Objetivos Específicos

- Integrar los datos existentes de estudios previos en la cuenca Guarenas – Guatire en una única base de datos de un proyecto del Sistema de Información Geográfica (SIG).
- Estimar los parámetros de inversión para la elaboración de modelos 1D del subsuelo, mediante la recopilación de información de estudios previos.
- Generar modelos 1D del subsuelo, mediante la adquisición de datos ruido antrópico en el municipio Zamora de la cuenca Guarenas – Guatire.
- Estimar el espesor de la capa sedimentaria del municipio Zamora de la cuenca Guarenas-Guatire a través de la relación espectral H/V.
- Generar un mapa de microzonas sísmicas en función de los valores de V_{s30} obtenidos, el espesor de sedimentos y la integración de información de estudios previos en la zona.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para investigar las causas de los daños ocurridos en Caracas en el terremoto de 1967, en los últimos años la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) junto con otras instituciones nacionales e internacionales académicas y de investigación, ha desarrollado diferentes estudios en la zona central del país, específicamente en el valle de Caracas (Schmitz et al., 2011).

A unos 25 km al este del valle de Caracas se encuentran ubicadas las ciudades de Guarenas y Guatire, que han estado experimentando un crecimiento demográfico muy acelerado desde 1990, impulsado por la construcción de la zona industrial de la misma localidad, y su función como ciudad “satélite” del Área Metropolitana de Caracas. Consecuentemente a su crecimiento poblacional, también se han desarrollado en cuanto a servicios públicos, urbanizaciones, establecimientos recreacionales, lo que implica una expansión urbanística e ingenieril muy intensa. A pesar de esta expansión, la cuenca carece de estudios actuales de la respuesta sísmica estructural, razón por la que un estudio de ruido sísmico ambiental que aporte información actualizada para evaluar la amenaza sísmica del fondo habitacional y la cuenca en general constituye un objetivo de gran relevancia para su población y autoridades.

Dado lo anterior, este proyecto de investigación pretende la elaboración de un mapa de velocidades V_{s30} que posteriormente pueda emplearse en la microzonificación sísmica del municipio Zamora, de la cuenca Guarenas – Guatire. Mediante el método interferométrico de análisis multicanal de ondas superficiales (IMASW) podrá caracterizarse dicha zona en función de la velocidad de las ondas de corte, mientras que la relación espectral de frecuencias, o método H/V proporcionará los datos necesarios para estimar el espesor de sedimentos de la cuenca. Dicho esto, el trabajo actual se presenta a manera de que la población y autoridades dispongan de información actualizada de la respuesta sísmica estructural para mitigar posibles riesgos sísmicos.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Las ciudades de Guarenas y Guatire, ubicadas al este de Caracas han crecido a nivel poblacional y urbanístico como una zona de expansión de la Capital a lo largo de los años, trayendo consigo gran cantidad de construcciones formales, e informales. Tal situación requiere de estudios que proporcionen lineamientos claros en materia de ordenamiento urbano en consonancia con la variable de riesgo sísmico que sean aplicados de acuerdo con la nueva versión de la norma CONVENIN 1.756 (López et al., 2017) para la construcción de edificaciones sismorresistentes.

Características tales como espesor sedimentario, o velocidad de ondas de corte adquieren relevante importancia en cuánto a la mitigación de daños en caso de eventos sísmicos, pues los mapas resultantes de proyectos de microzonificación permiten discriminar aquellas zonas de mayor vulnerabilidad y riesgo en función de los parámetros mencionados con anterioridad (Schmitz et. al., 2012)

Las técnicas elegidas para llevar a cabo la microzonificación sísmica responden a la necesidad de utilizar métodos no invasivos, de rápida ejecución, con resultados confiables. Los equipos que se utilizan para la ejecución de los métodos IMASW y H/V garantizan la fácil aplicación de los mismos en las que se podrían considerar estrechas calles de Guatire, sin perturbar el libre tránsito de vehículos y peatones, a diferencia de métodos que podrían considerarse cómo invasivos, tal como la sísmica activa.

Estudios y proyectos de microzonificación sísmica realizados con anterioridad en las ciudades de Guarenas y Guatire han representado un gran adelanto en cuanto a la caracterización de la cuenca, por lo que este trabajo se presenta como proyecto de culminación a los trabajos de investigación previos, entre los cuales se encuentran los informes técnicos de pasantía, informes técnicos de investigación y tesis de maestría de Rodríguez et al., (2011), Soto & Henriques (2011), Gil & Yaselli (2011), Alban & Villamizar (2011), De Abreu & Fuentes (2011), Morales & Pompei (2011), Araujo et al. (2011), Noda (2008), Miró & Viete (2009), Morfe (2011), García (2012) a través de la integración de información en la cuenca Guarenas – Guatire, junto con el trabajo de grado de Moreno (2021) y datos

actualizados tomados en salidas de campo realizadas para la ejecución de la nueva microzonificación sísmica.

1.4 UBICACIÓN

El área de estudio se encuentra ubicada en la zona nor-central de Venezuela, a (aproximadamente) 25 km al este de Caracas, específicamente municipio Zamora parroquia Guatire, estado Miranda (figura 1.1). La zona constituye parte de un valle enclavado en el sistema montañoso norte costero del país, cuyos límites se encuentran definidos al norte por el Macizo Ávila, y al sur por el cerro Colorado.

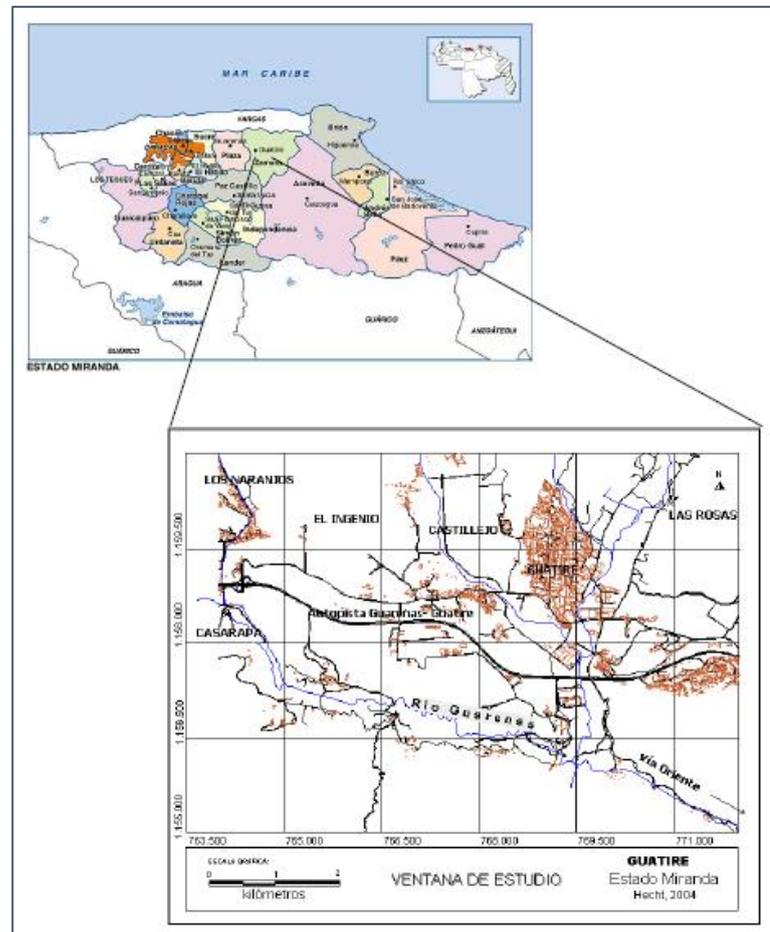


Figura 1. 1 Mapa digitalizado de la zona de estudio, modificado de las cartas del IGVSb, G2, G3, H2 y H3, tomado de Hecht (2005)

1.5 ANTECEDENTES

Diversos estudios se han realizado en la cuenca de Guarenas y Guatire a través de los años, con la finalidad de conocer y entender la geometría de la misma, y poder realizar una microzonificación sísmica definitiva de las zonas pobladas (y por poblar) de los municipios Plaza y Zamora. Hecht (2005) realizó un estudio integral de la cuenca Guarenas – Guatire aplicando métodos gravimétricos para el modelado de la cuenca y estimación de espesores de sedimentos, y métodos sísmicos (sísmica activa de refracción y ruido sísmico ambiental H/V) para caracterizar las capas someras a través de la velocidad de ondas S, y analizar la relación profundidad – periodo fundamental a través de tres perfiles definidos sobre el mapa de espesores generados con gravimetría (figura 1.2).

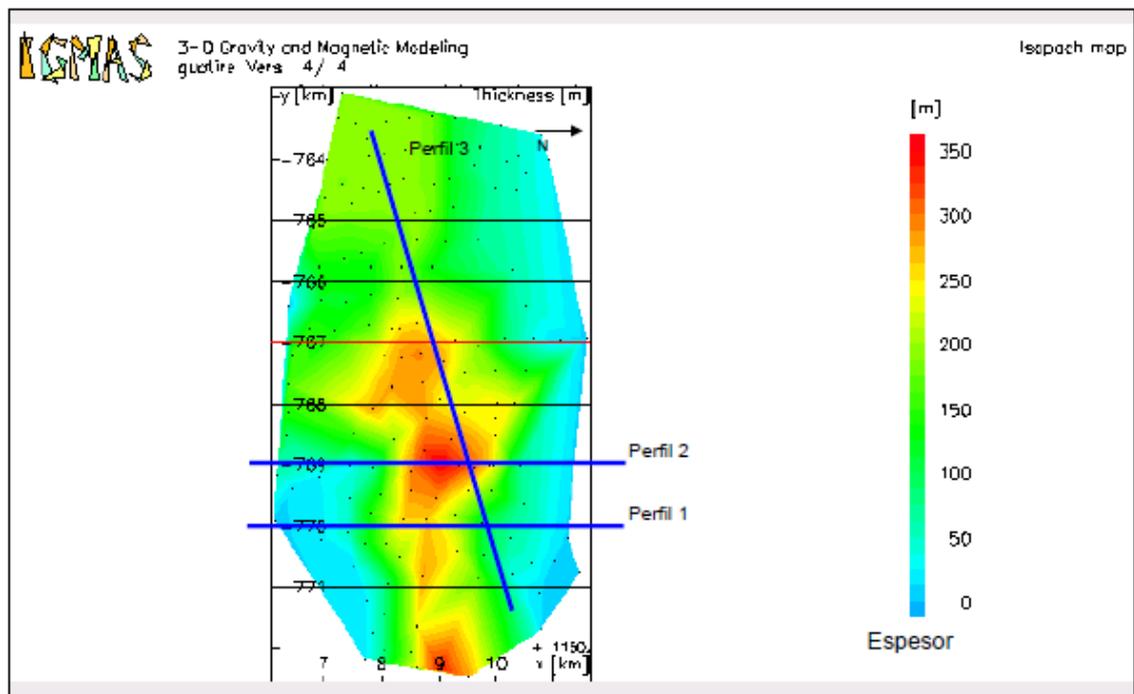


Figura 1. 2 Mapa de espesor de sedimentos (Formación Guatire), con los perfiles definidos para los modelos periodo – profundidad (Hecht, 2005)

El resultado del análisis de la relación periodo – espesor de sedimentos obtenido por Hecht se observa en la figura 1.3.

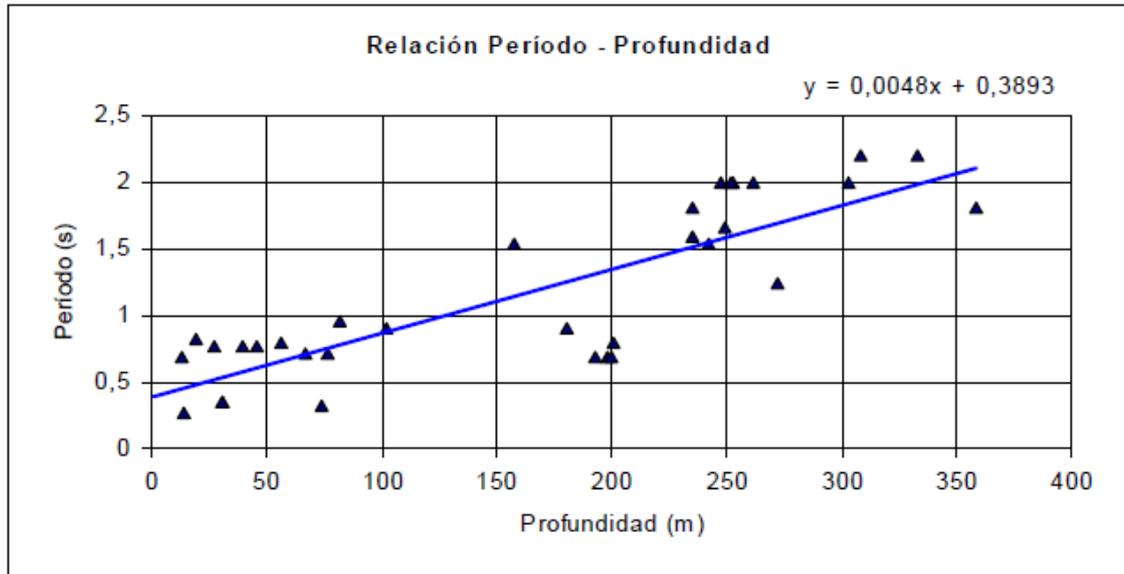


Figura 1. 3 Relación período-profundidad de los perfiles 1,2 y 3 y la regresión lineal (Hecht, 2005)

Amarís (2006) realizó un estudio integral de la cuenca haciendo uso de métodos gravimétricos, y sísmica activa (refracción) y pasiva (ruido ambiental, H/V). Las pruebas de mayor interés para el presente estudio corresponden a los ensayos sísmicos, debido a que las mediciones gravimétricas se realizaron mayoritariamente en la vía entre Caracas y Guarenas, adentrándose poco en el valle de la cuenca. Amarís realizó un total de 135 mediciones de ruido ambiental, con espaciamiento promedio de 500 metros entre cada ensayo, obteniendo como resultado periodos que oscilan entre 0,21 hasta 0,55 s, a partir de los cuales se generó un mapa de isoperiodos (figura 1.4). La caracterización de la cuenca fue complementada con 6 perfiles sísmicos de refracción somera, alcanzando una profundidad máxima de 30 metros y obteniendo como resultados velocidades de ondas P que se encuentran entre 500 y 600 m/s hasta 6 metros de profundidad, y velocidades de onda S en el rango de 290 y 350 m/s.

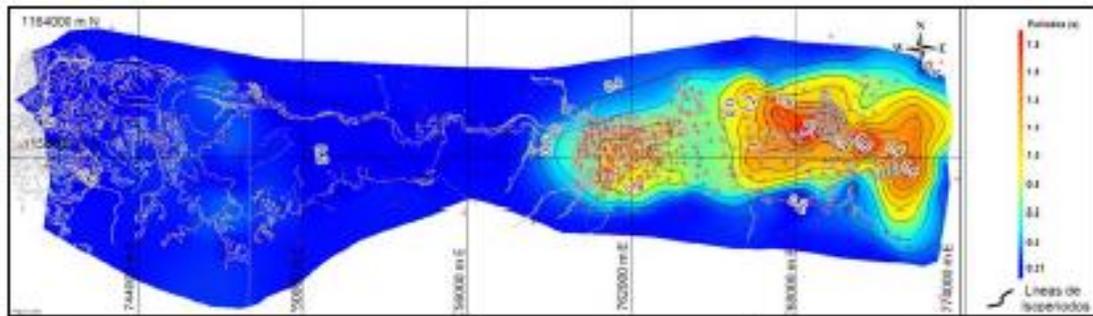


Figura 1. 4 Mapa de isoperiodos de la cuenca Guarenas – Guatire (Amarís, 2006)

Uno de los proyectos más destacados se realizó en el periodo comprendido entre los años 2007 y 2012 titulado “*Microzonificación sísmica para la planificación urbana y la gestión local de riesgo de las ciudades en los ejes de desarrollo: caso piloto Guarenas y Guatire*” (Schmitz et al., 2012), dónde se elaboraron mapas de las unidades geológicas y geomorfológicas, riesgo de deslizamientos, espesor sedimentario y amenaza sísmica en roca, a través de la evaluación neotécnica de las fallas cercanas a la cuenca y la evaluación de una trinchera paleosismológica en la Falla El Ávila, además de la exploración geofísica haciendo uso de diversas técnicas tales como la sísmica de refracción, ReMi, mediciones de ruido ambiental y mediciones gravimétricas, llevado a cabo a través de la integración de trabajos de informes técnicos de investigación (Rodríguez et al., 2011), informes técnicos de pasantías (Soto & Henriques (2011), Gil & Yaselli (2011), Alban & Villamizar (2011), De Abreu & Fuentes (2011), Morales & Pompei (2011), Araujo et al. (2011)), trabajos de grado (Noda (2008), Miró & Viete (2009)) y tesis de maestría (Morfe (2011), García (2012)). Los resultados de mayor relevancia para el presente estudio corresponderían a los mapas de Vs30 de la cuenca según la aproximación de pendientes (figura 1.5), y el modelo de espesor de sedimentos (figura 1.6) de la cuenca creado por Amarís et al. (2011) a partir de la integración de la información geológica y geofísica, a través de mediciones gravimétricas y estudios H/V.

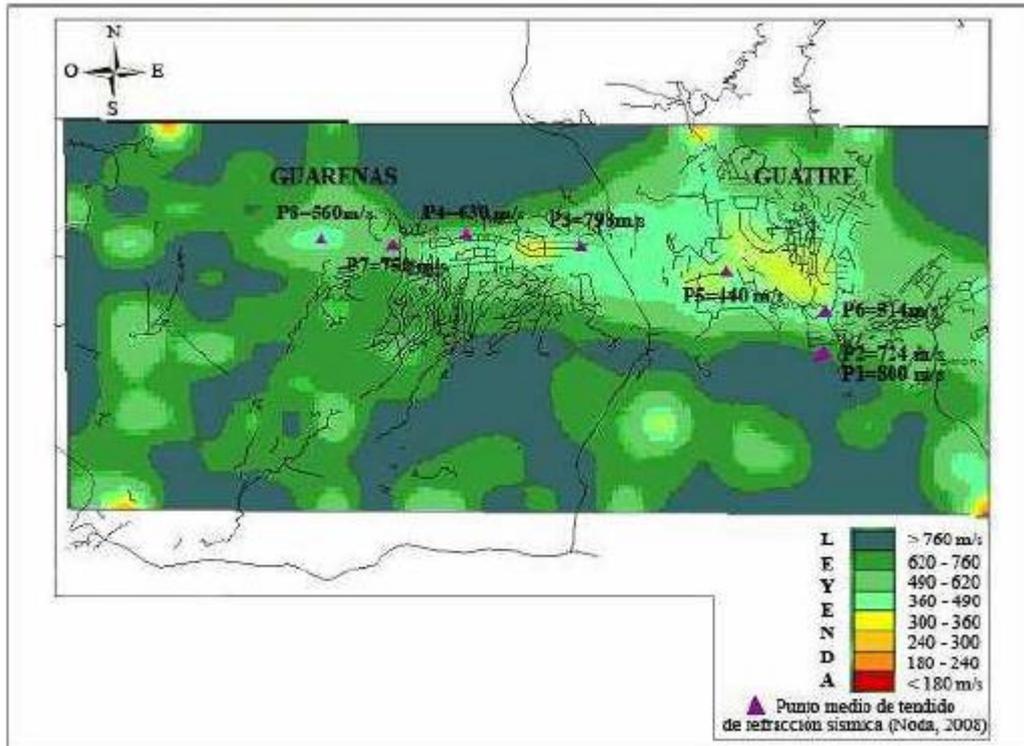


Figura 1. 5 Mapa Vs30 obtenido para Guarenas Guatire según aproximación de pendientes en regímenes tectónicamente activos (USGS). Tomado de Schmitz et al. (2012)

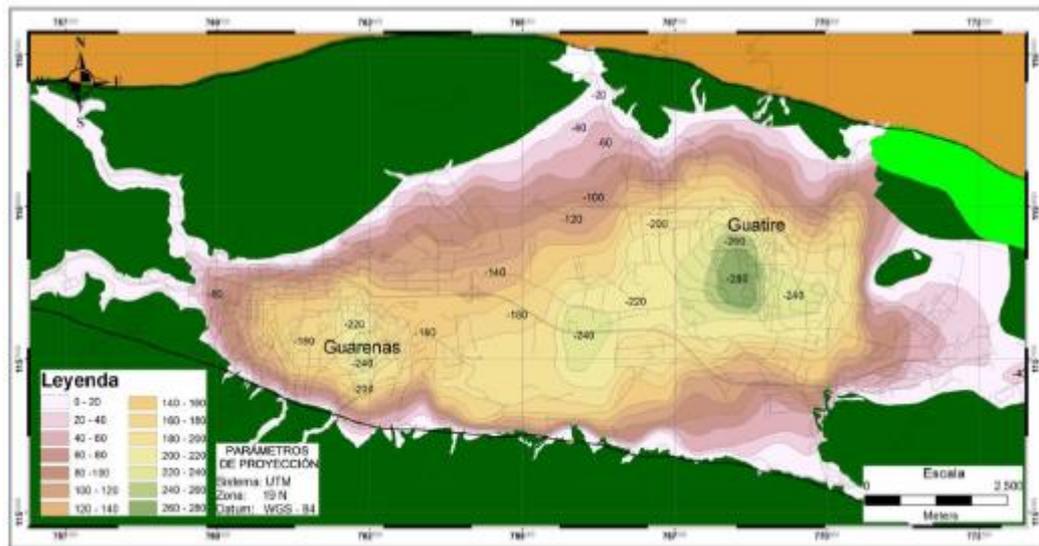


Figura 1. 6 Mapa de espesor sedimentario de Guarenas y Guatire (Amarís et al., 2011)

Otro trabajo de grado de interés es el realizado por Noda (2008), que igualmente se encuentra dentro del proyecto de microzonificación sísmica promovido por FUNVISIS. El objetivo de dicho trabajo sería determinar parámetros geotécnicos a lo largo de la futura línea de metro que conectaría las ciudades de Guarenas y Guatire con Caracas. Las técnicas utilizadas por Noda fueron sísmica de refracción somera, gravimetría y ruido ambiental. En el trabajo establecen la relación entre periodo fundamental y espesor sedimentario, dónde asocian valores de periodos más altos con espesores de sedimentos mayores, y por analogía, en la zona donde los períodos son menores el espesor sedimentario es menor. Como resultados relevantes se encuentran que en la sección este del área de estudio se tienen valores de períodos altos, oscilando entre 1 y 3 s, lo que representa un espesor de sedimentos de aproximadamente 425 metros, en lo que sería la parte central de la cuenca. Los valores menores se obtuvieron en la parte Oeste del área de estudio, oscilando desde 0,2 a 0,7 s (figura 1.7)

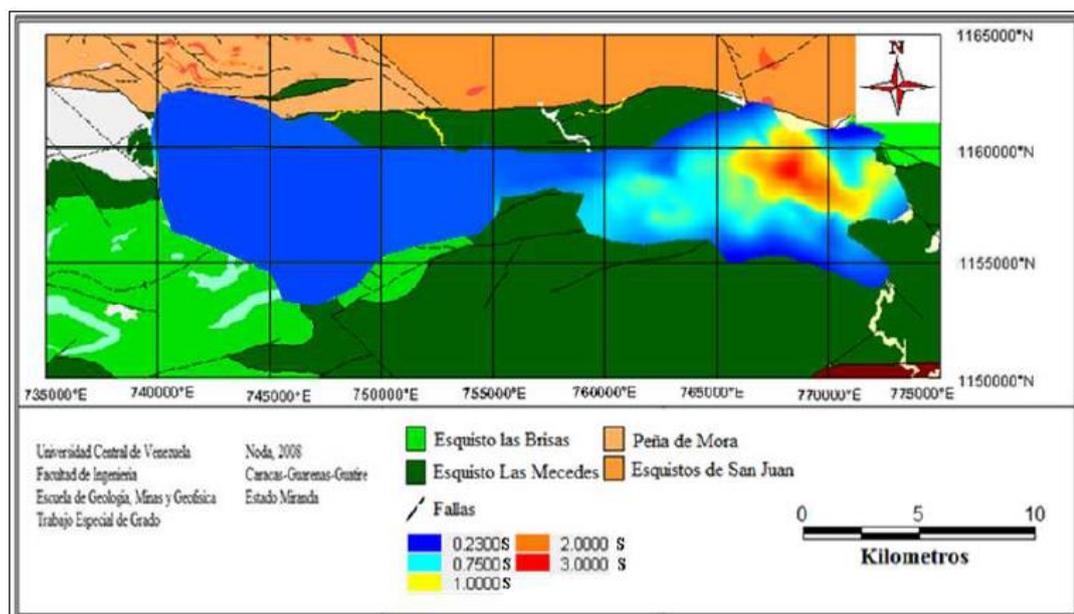


Figura 1. 7 Mapa de isoperiodos de la cuenca Guarenas – Guatire (Noda, 2008)

García (2012) efectuó el trabajo de investigación de nombre “*Caracterización geofísica en Guarenas-Guatire mediante la aplicación de técnicas de arreglos de*

vibraciones naturales” dónde utilizó técnicas pasivas de refracción de microtemores (ReMi), y arreglos de microtemores para la generación de perfiles 1D de V_s de la cuenca Guarenas-Guatire, hasta el basamento de la misma, con la finalidad de caracterizar los sedimentos de las diferentes formaciones presentes. En dicho estudio se adquirieron 12 perfiles aplicando la técnica ReMi, siguiendo principalmente la ruta intercomunal que une las poblaciones de Guarenas y Guatire. Se realizaron además 5 arreglos de vibraciones naturales cuyos resultados fueron comparados con los perfiles de ReMi. Los resultados obtenidos de ambas técnicas permitieron crear dos modelos de velocidades tipo, uno para los sedimentos holocénicos aluviales de cuenca (figura 1.8A), y otro para los sedimentos pleistocénicos (Formación Guatire, figura 1.8B).

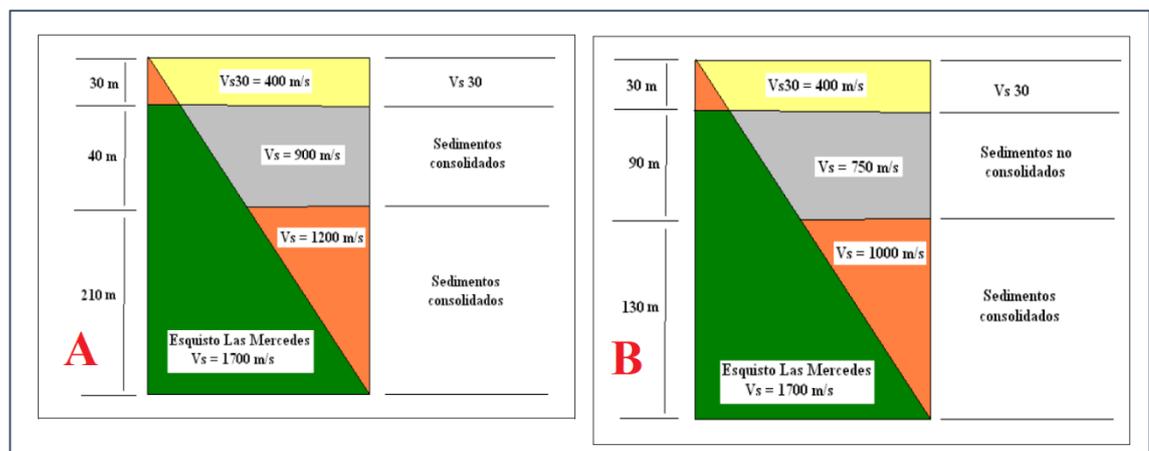


Figura 1. 8 Modelo de velocidades de los sedimentos holocénicos (aluvión) y modelo de velocidades de los sedimentos pleistocénicos (Fm. Guatire) de la cuenca Guarenas – Guatire (García, 2012)

Entre los años 2008 - 2012 se realizó un estudio de microzonificación sísmica y riesgo sísmico en las ciudades de Guarenas y Guatire, titulado como “Evaluación del riesgo sísmico del fondo habitacional de las ciudades Guarenas y Guatire” (Morejon et al., 2014), dónde se comenta la importancia de evaluar la respuesta sísmica estructural del fondo habitacional de estas ciudades utilizando información estructural disponible para la fecha. Como resultados relevantes destacan que solo

el 40% de la población de ambos municipios vive en edificaciones formales, más del 50% de estas edificaciones formales y el total de las edificaciones no formales de ambas ciudades se evalúan como de una vulnerabilidad alta (figura 1.9).

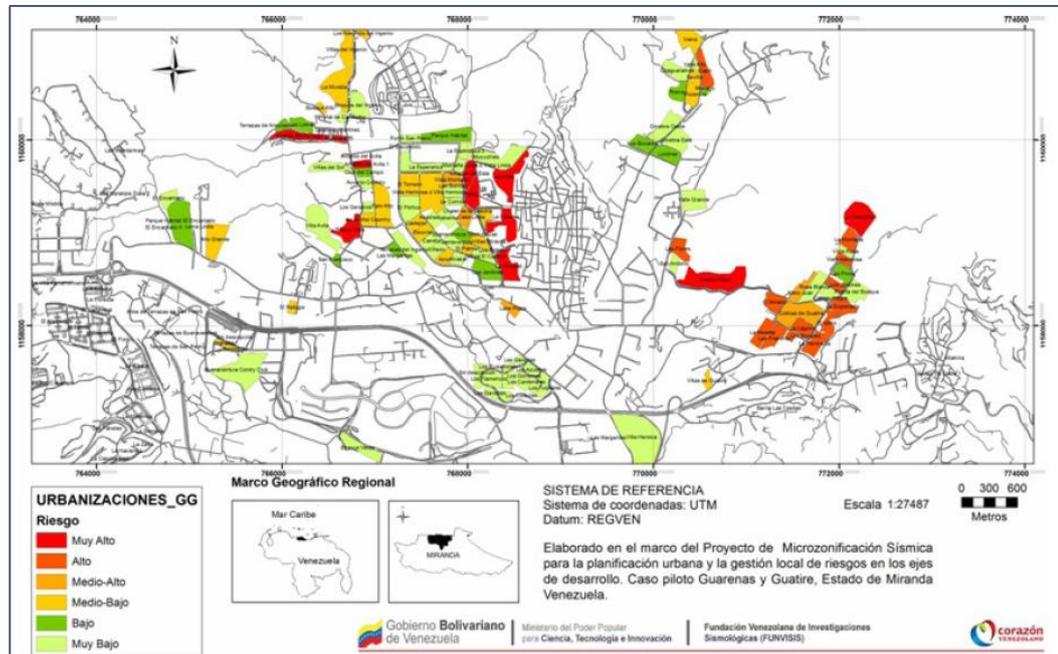


Figura 1. 9 Mapa de riesgo sísmico de las urbanizaciones de Guatire, municipio Zamora, Estado Miranda, Venezuela (Morejon et al., 2014)

CAPÍTULO II

MARCO GEOLÓGICO

2.1 GENERALIDADES

La cuenca Guarenas – Guatire se caracteriza por ser una cuenca cerrada, es decir, sin salidas de corrientes fluviales hacia el océano actualmente. El área de drenaje de la cuenca incluye rocas metamórficas en zonas de facies de los esquistos verdes de la Cordillera de la Costa, lo que influye de forma directa en su contenido sedimentario. Las rocas que afloran dentro de la cuenca corresponden principalmente a la Formación Guatire, la cual se depositó en una cuenca de origen lacustre formada tectónicamente, de edad Plioceno. Además de la Formación Guatire, afloran terrazas aluvionales levantadas y depósitos de aluvión reciente (Picard, 1976).

En la figura 2.1, propuesta originalmente por Picard (1976) se puede observar la distribución estratigráfica de sedimentos dentro de la cuenca, la cual se relaciona en parte con la disposición geológica y fisiográfica de los orógenos fuentes de sedimento.

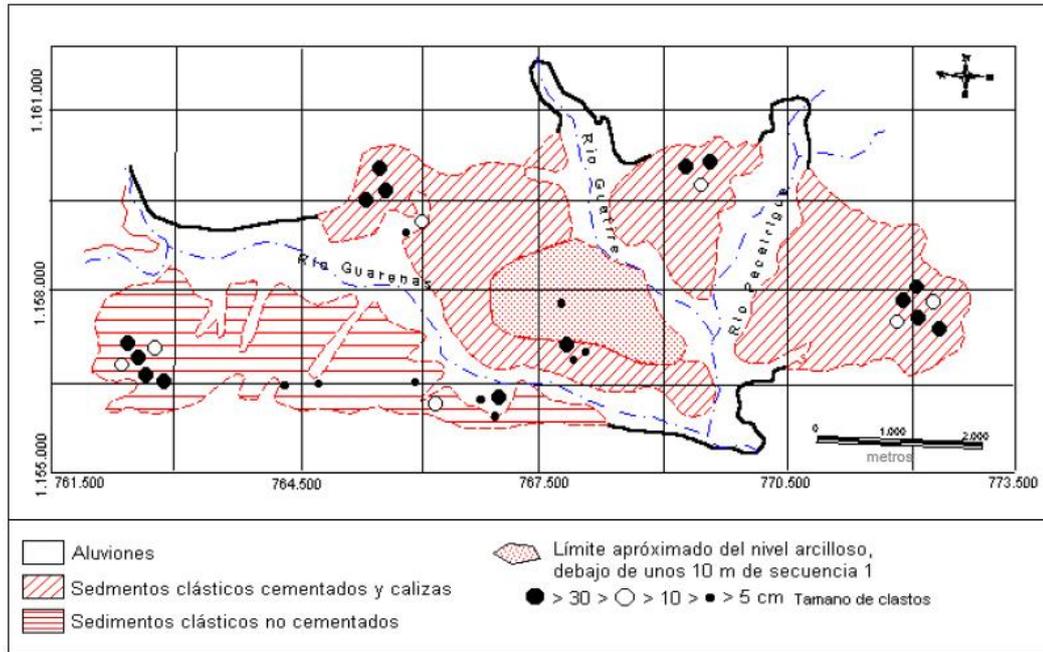


Figura 2. 1 Mapa de la distribución geográfica de sedimentos, modificado de Picard (1976)

2.2 GEOLOGIA REGIONAL

La cuenca de Guarenas – Guatire forma parte del sistema montañoso de la Cordillera de la Costa, la cual se divide en dos serranías con dirección este – oeste; la Serranía del Interior, en su mitad meridional, y la Serranía del Litoral, en su mitad septentrional. Este sistema montañoso pertenece a la amplia zona de interacción de las placas tectónicas Suramericana y Caribe, con característica rumbo – deslizante de aproximadamente 100 km de longitud, dónde la placa Caribe se mueve relativamente a la derecha con respecto a la placa Suramericana (Bell, 1972). El sistema delimita al norte con el Mar Caribe, a través del sistema de fallas transcurrente dextral de San Sebastián, al sur por una depresión axial perteneciente a la Serranía del Interior. En su extremo occidental, en la región de Barquisimeto está delimitada por una depresión topográfica y estructural de los Andes de Venezuela y en su parte oriental por el Golfo de Barcelona (Hecht, 2005).

El valle de la cuenca de Guarenas – Guatire se encuentra emplazado en una depresión al sur de la Serranía del Litoral, y se encuentra delimitado por un conjunto de fallas de tipo transcurrente dextral, con orientación este – oeste, y sísmicamente activas en su mayoría. El norte de la cuenca lo delimita la falla El Avila, siendo ésta la más antigua de la zona (Barboza & Rodríguez, 2001).

2.3 GEOLOGIA LOCAL

Esta zona es denominada según Urbani (2000) como la Franja meridional de la Súper Asociación Ígneo Metamórfica de la Cordillera de la Costa. Al norte de la zona de fallas está el Macizo del Ávila-Cabo Codera, donde aflora la Asociación Metamórfica Ávila y más al norte el Complejo San Julián. Al sur de la falla en la unidad fisiográfica Fila de Mariches, afloran los Esquistos de Las Mercedes y Las Brisas.

Las rocas presentes en la cuenca se pueden dividir en tres grupos: rocas sedimentarias de edad Pleistocena, terrazas aluvionales de edad Pleistocena y aluviones de edad Cuaternaria, suprayacentes sobre el Esquisto de Las Mercedes y en algunas zonas con el Esquisto de Las Brisas de la Asociación Metasedimentaria de Caracas (Hecht, 2005).

Asociación metamórfica Ávila

Al noreste de la cuenca de Guarenas Guatire se encuentra la Asociación Metamórfica Ávila (Paleozoico-Precámbrico), esta asociación presenta en gran parte cuerpos individuales de composición granítica intermezclados o envueltas por rocas esquistosas (Complejo San Julián) y al norte – noroeste de la cuenca podemos encontrar afloramientos de las Metaígneas de Tocome (Urbani & Rodríguez, 2004).

Asociación metasedimentaria de Caracas

La asociación metasedimentaria de Caracas está compuesta por los Esquistos de Las Brisas, los Esquistos de Las Mercedes y Chuspita, y ocupa la franja septentrional de la Serranía Costera de la Cordillera de la Costa (Rodríguez, 2005). Colindantes a estas e inmediatamente por debajo se encuentran las franjas que ocupan las asociaciones la Costa y Ávila.

Formación Guatire

Este nombre designa los sedimentos poco consolidados de suave buzamiento expuestos en la Cuenca Guarenas-Guatire. La unidad consiste en gravas y conglomerados mal consolidados en capas de más de 1 metro de espesor, que pasan progresivamente a arenas y limos laminados y arcillas hacia el centro de la cuenca. Picard (1976) divide a la Formación Guatire en cementada y no cementada;

- Formación Guatire no cementada: ubicada al norte, en esta abundan conglomerados, areniscas y limos raramente o no cementados provenientes del Macizo del Ávila, depositados en forma de abanicos coluvio torrenciales piemontinos que cubren gran parte de la cuenca.
- Formación Guatire cementada: ubicada al suroeste, constituida por una pequeña franja de rocas cementadas por calcita, arcilla y limos calcáreos, calizas fosilíferas y limos (restos de vegetación fósil); esta particularidad puede estar influenciada por la fuente de sedimentos proveniente del Esquistos Las Mercedes. Hacia el centro de la cuenca, coincidiendo con la zona más profunda, hay acumulación de arcillas recubiertas por secuencia fluvial.

La localidad tipo de la formación en la carretera actual Guatire-Caucagua, se extiende por unos 4 km desde el contacto con las rocas metamórficas de la Formación Las Mercedes en el sitio llamado EL Rodeo, cerca de Araira, hasta unos 500 m antes de Guatire, en el contacto con el aluvión del Río del Norte; afloran

alrededor de 350 m de sedimentos. La sección se caracteriza por secuencias de conglomerados seguidos por intercalaciones de arenas y limos.

La Formación Guatire es discordante sobre las rocas metamórficas del Grupo Caracas (Esquisto Las Mercedes), e infrayace localmente a terraza aluvionales y aluviones recientes, en una cuenca sinclinal (Picard, 1976).

Terrazas aluvionales

Picard (1976) describe esta unidad constituida principalmente por sedimentos con alto contenido de óxidos y granos teñidos de óxido. Sus contactos, al igual que el aluvi3n, son discordantes sobre las unidades adyacentes y concordantes con el aluvi3n. Picard & Pimentel (1968) refieren que esta unidad se encuentra en los cauces de los r3os que atraviesan la cuenca.

Aluvi3n

Se encuentra en los cauces de los drenajes aflorando de manera discontinua y est3 presente en el curso del r3o Guarenas. Discordante sobre la Formaci3n Guatire y sobre los Esquistos de Las Mercedes y Las Brisas (Mir3 & Viete, 2009, figura 2.2).

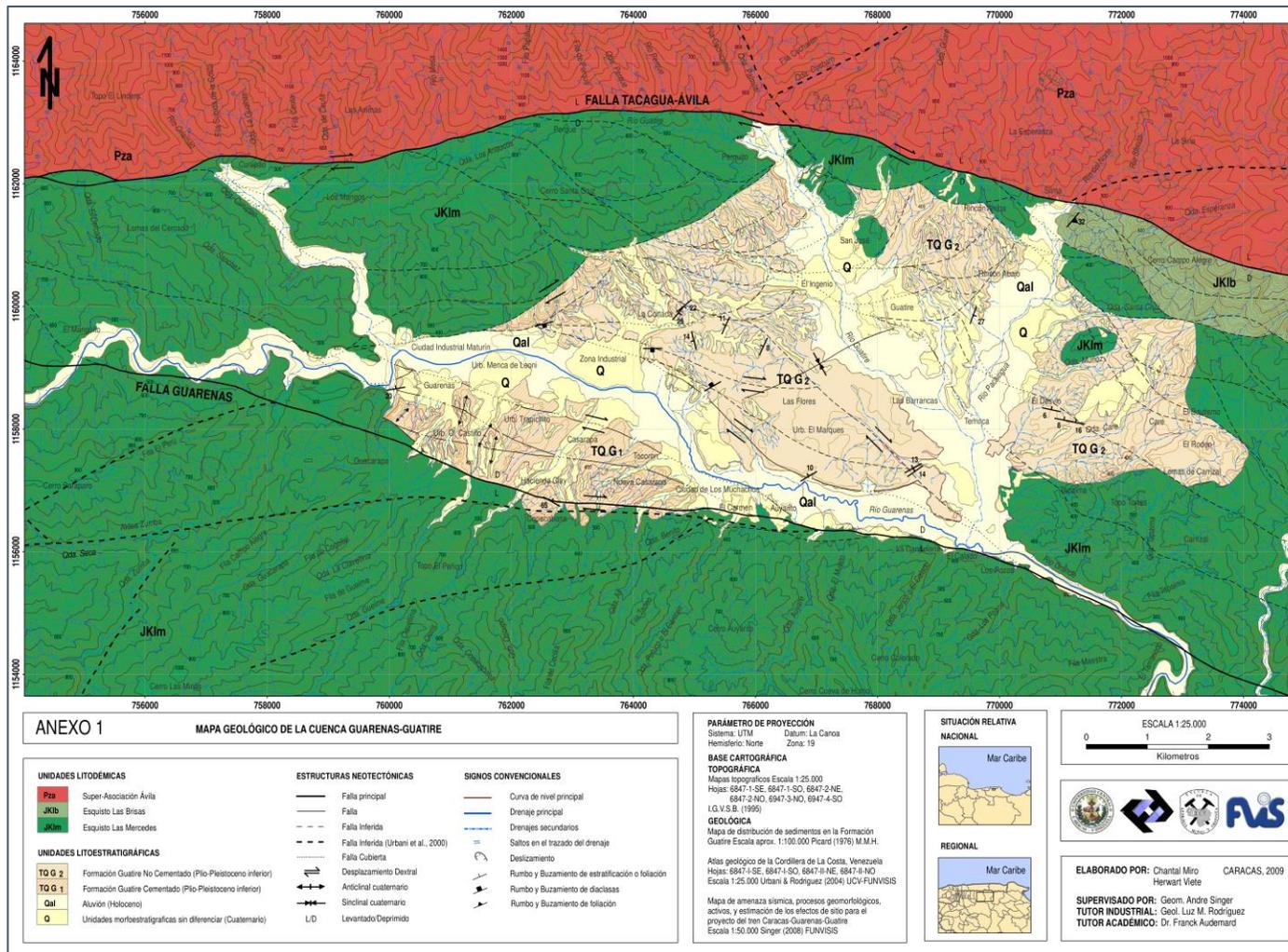


Figura 2. 2 Mapa geológico y estructural de la cuenca Guareñas – Guatire (Miró & Viete, 2009)

2.4 GEOLOGIA ESTRUCTURAL

La cuenca de Guarenas – Guatire fue formada bajo la influencia tectónica que dio origen a la Cordillera de la Costa, formando un depósito sinclinal de edad Plio – Pleistoceno, que fue consecuentemente rellenado por depósitos sedimentarios sobre la napa de Caracas, estando éstos en discordancia erosional en casi toda su extensión sobre los Esquistos de Las Mercedes, y al oeste sobre una pequeña porción de los Esquistos de Las Brisas (Hecht, 2005).

Sistema de fallas Tacagua – El Ávila

El sistema de fallas Tacagua – El Ávila está conformado por los segmentos de fallas del mismo nombre, se considera un riedel sintético de 70,2 km de longitud, rumbo promedio de N 77°W ($\pm 13^\circ$), derivado de la Falla de San Sebastián. Wehrmann (1972) menciona que el sistema de fallas se extiende hasta las llanuras de Barlovento en el edo. Miranda, cortando oblicuamente el sistema montañoso de la Cordillera de la Costa.

Falla Tacagua

La falla Tacagua se extiende aproximadamente 20,1 km, entre Arrecife y Caracas, posee un rumbo promedio de N 71°W, con alto buzamiento al sur. Su movimiento es dextral con componente normal a una tasa de 0,17 mm/año (Miró & Viete, 2009).

Falla El Ávila

La falla El Ávila se extiende aproximadamente 50,1 km entre Caracas y Araira, con un rumbo promedio aproximado N 83°W. Este segmento de falla asegura la articulación del macizo El Ávila y las depresiones tectónicas de Caracas y Guarenas – Guatire, y a su vez controla el estrecho valle de falla ubicado entre estas poblaciones (Rodríguez et al., 2016) Posee un buzamiento alto al sur, y un movimiento dextral con componente normal, con una tasa de movimiento estimada

por Audemard et al. (2000) de $\leq 0,4$ mm/año, con un periodo de retorno de 2500 años.

Sistema de fallas Sur – Guarenas

El sistema de fallas Sur – Guarenas se reconoció por foto interpretación con una longitud aproximada de entre 25 – 30 km, entre la extremidad suroriental de la cuenca de Guarenas – Guatire y 1 km al oeste de la Hda. Izcaragua, dónde se empalma con la falla El Ávila. En la cuenca, el sistema de fallas Sur Guarenas define el contacto con el macizo rocoso ubicado al sur de la misma. A la altura de Casarapa, la traza principal del sistema se abre en 3 ramales subparalelos en dirección de Guarenas. El ramal norte controla el contacto entre las rampas aluviales pleistocenas adosadas contra el macizo rocoso y la vega aluvial holocena entre Tocorón y la entrada a Guarenas, donde la traza de la falla tuerce fuertemente a la izquierda para articularse con la extremidad SO del frente montañoso SO-NE que cierra la depresión de Guarenas-Guatire al oeste (Schmitz et al., 2012).

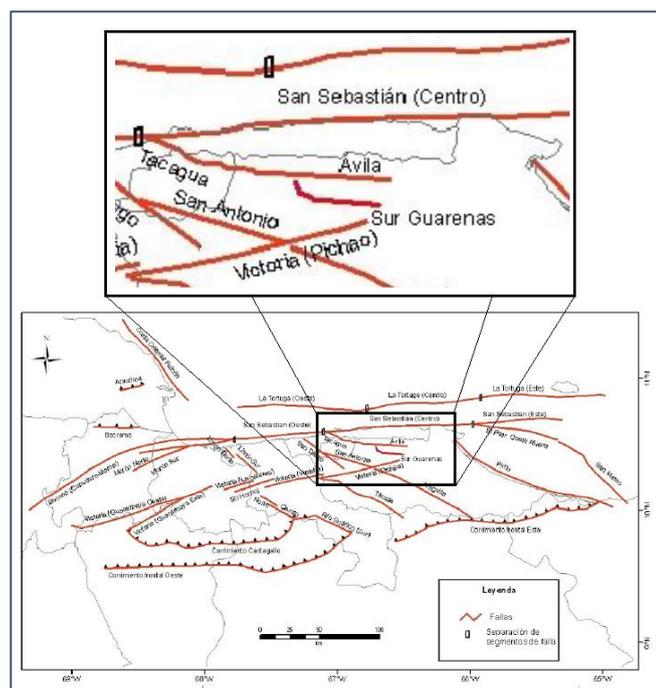


Figura 2. 3 Fallas de la región central de Venezuela. Modificado de Rodríguez et al. (2010) tomado de Schmitz et al. (2012)

CAPÍTULO III

MARCO TEORICO

3.1 Ondas sísmicas

Las ondas sísmicas son la manifestación física de la transferencia de energía de deformación elástica de una partícula a otra, estas ondas se propagan a partir de una fuente sísmica que puede ser de origen natural como una fractura en una roca sometida a esfuerzos, un derrumbe, actividad geotérmica entre otras; y también pueden ser de origen artificial como explosiones, cañones de aire y camiones vibradores (Telford et al., 1976).

3.2 Ruido ambiental

El ruido antrópico, o ruido sísmico ambiental es definido como las constantes vibraciones de la superficie de la Tierra a frecuencias sísmicas, aun cuando no hayan terremotos; en otras palabras, consiste en un conjunto de ondas (de cuerpo y superficiales) viajando en varias direcciones (Okada, 2003). El nivel de ruido varía entre diferentes lugares y frecuencias, y en general se pueden dividir las fuentes de ruido entre naturales y culturales. Se entiende por microsismos las oscilaciones naturales y regulares del subsuelo, los cuales no son generados ni por fuentes artificiales ni por terremotos, sino por el contrario son producidos por fuentes naturales como las olas oceánicas, tormentas. Los mismos, están conformados básicamente por ondas Rayleigh de períodos relativamente extensos, 2 a 3 segundos o más (Nakamura, 1989). La superficie de los suelos siempre está vibrando con amplitudes de muchos micrómetros y con períodos de 0.1 a 10 segundos. Tales vibraciones se denominan microtemores (Bard, 1999) producidos por eventos artificiales consecuencia de la actividad humana, como por ejemplo la maquinaria industrial, el tráfico automotor, explosiones, entre otros.

3.3 Ondas Rayleigh

Las ondas Rayleigh son ondas sísmicas superficiales que se caracterizan por un movimiento de partículas elíptico retrógrado en el plano radial, y por su velocidad

de fase. En medios estratificados horizontalmente, donde la velocidad varía con la profundidad, ambas características muestran dependencia de la frecuencia, por lo que son utilizadas para representar y caracterizar el suelo superficial.

Las ondas Rayleigh son el resultado de la interacción de las ondas P y las ondas Sv, la cual corresponde a la onda S que se propaga en el plano vertical. La velocidad de fase de la onda Rayleigh es función de la velocidad de la propagación, densidad y espesor del medio (Xia *et al* 1999).

3.4 Elipticidad de las ondas Rayleigh

La elipticidad de las ondas Rayleigh es la relación entre el movimiento horizontal y vertical de las partículas, y su variación se refleja en la curva de elipticidad. Debido a que la dependencia de la frecuencia de la elipticidad está estrechamente vinculada a la velocidad de las ondas de corte, la elipticidad de las ondas Rayleigh dependen en gran medida de la estructura del suelo local y contiene información sobre las capas sedimentarias completas (Hobiger et al., 2013).

3.5 Espesores sedimentarios

Se conoce como espesor sedimentario al espesor de materiales poco consolidados o no consolidado que se encuentran suprayacentes a un estrato rocoso. Este estrato rocoso es comúnmente llamado basamento, y se caracteriza por ser roca consolidada. Se considera que esta diferencia de consolidación representa un fuerte contraste entre las propiedades mecánicas de las capas.

Múltiples estudios han intentado hallar una expresión matemática que relacione el espesor de sedimentos con la frecuencia fundamental del suelo. Inicialmente se plantearon relaciones lineales entre valores de período y profundidad. Una de estas expresiones es la fórmula de Kramer (1996) que relaciona el período fundamental de un depósito sedimentario (T) con su espesor (H) en función de la velocidad promedio de ondas S en dicho espesor (V_S):

$$T = 4H/V_S \quad (\text{Expresión 3.1})$$

3.6 Efectos de sitio

Los efectos de sitio son los cambios que sufren las ondas sísmicas debido a la influencia de las condiciones geológicas y topográficas, y consiste en la amplificación de dicha señal en varios ordenes de magnitud (Tsighe & García Flórez, 2006). Esta amplificación está controlada principalmente por las propiedades geotécnicas de los materiales geológicos, especialmente por sus características dinámicas, así como por el espesor de las capas y la profundidad a la que se encuentra el sustrato rocoso (Borcherdt, 1994).

La importancia del estudio de los efectos de sitio reside en que históricamente las mayores catástrofes están relacionadas con eventos sísmicos que se asocian a estos efectos, producto de las deformaciones en el depósito de suelo, y/o por la resonancia producida al coincidir la frecuencia propia de una estructura con la frecuencia fundamental del estrato de suelo que la soporta (Gallo et al., 2017).

3.7 Frecuencia fundamental o de resonancia

La frecuencia fundamental o de resonancia es aquella frecuencia propia a la que la vibración del suelo tiene el más alto nivel de respuesta ante una fuerza empleada a la misma frecuencia. Esta frecuencia es de interés en la geotecnia debido a que si la frecuencia fundamental de las estructuras elásticas de gran escala, tales como edificios y puentes, es igual a la frecuencia con que se mueve el suelo, ocurre el fenómeno de resonancia que propicia grandes daños a las estructuras (Peralta et al., 2009).

3.8 Análisis espectral de ondas superficiales

De acuerdo con Xia et al. (1999), en el análisis espectral de ondas superficiales se utilizan las propiedades de dispersión de las ondas Rayleigh en medios de múltiples capas para estimar las velocidades de ondas de corte en los estratos más someros. Los datos son procesados para ser analizados en el dominio de la frecuencia y extraer una curva de dispersión, que será posteriormente utilizada para crear un modelo que relaciona la velocidad de las ondas de corte con el espesor sedimentario.

3.9 Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW)

El MASW se desarrolló con la finalidad de superar algunas debilidades del análisis espectral convencional, tales como el tiempo y trabajo invertido durante la adquisición. Puede ser clasificado como método activo y pasivo, según la forma en la que sean adquiridos los datos necesarios para el análisis (Xia et al., 1999). En el método activo se generan ondas superficiales mediante fuentes impulsivas (como un martillo) en un arreglo lineal de receptores. Por otra parte, el método pasivo utiliza las ondas generadas por fuentes naturales y actividades culturales, como el tráfico. En el método activo pueden alcanzarse profundidades alrededor de los 30 metros, mientras que en el método pasivo se puede llegar más profundo dada las bajas frecuencias que predominan en el ruido ambiental (Park et al., 2007).

3.10 Curva de dispersión

Se refiere a la curva resultante dado un conjunto de pares de frecuencia – velocidad de fase. La forma de la curva se denomina dispersión característica de la onda Rayleigh. Existen múltiples velocidades de fase para una misma frecuencia por lo cual una curva de dispersión puede ser multimodal. El modo fundamental es el modo con la menor velocidad de fase y existe para todas las frecuencias (Everett, 2013). En la figura 3.1 se ilustran diversas curvas de dispersión, de distintos modos, para un mismo espectro de velocidad. Cabe destacar que, una curva de dispersión puede ser del tipo teórica, que se refiere a una curva generada matemáticamente que representa un modelo de subsuelo determinado (Dal Moro, 2015).

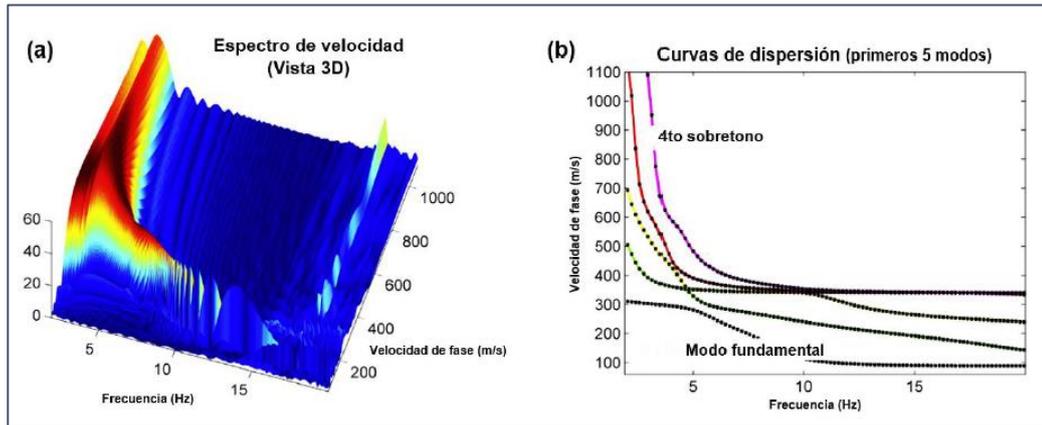


Figura 3. 1 (a) Vista 3D del espectro de velocidad; (b) Curvas de dispersión con los cinco primeros modos, se indica el cuarto modo más alto y el modo fundamental. Modificado de Dal Moro (2015)

3.11 Interferometría sísmica y análisis multicanal de ondas superficiales (IMASW)

El término interferometría sísmica se refiere al principio de generar respuestas sísmicas de fuentes virtuales, mediante la correlación cruzada de observaciones sísmicas de diferentes localizaciones. La interferometría de sísmica pasiva es usada para convertir mediciones pasivas de sísmica (ruido ambiental o microterremotos) en respuestas sísmicas determinísticas. En interferometría sísmica pasiva de ruido ambiental, no se requiere la suma de las correlaciones sobre diferentes posiciones de las fuentes dado que las respuestas correlacionadas son una superposición de fuentes no relacionadas actuando simultáneamente (Wapenaar et al., 2010).

La interferometría sísmica puede ser aplicada mediante dos pasos simples (Curtis et al., 2006): Los registros de cada fuente son correlacionados y los correlogramas resultantes son sumados (apilados). Se obtiene, para tiempos positivos, el sismograma que habría sido obtenido en cada receptor si en la posición del otro se ubicara una fuente, mientras que para tiempos negativos se obtiene el reverso del anterior sismograma (figura 3.2)

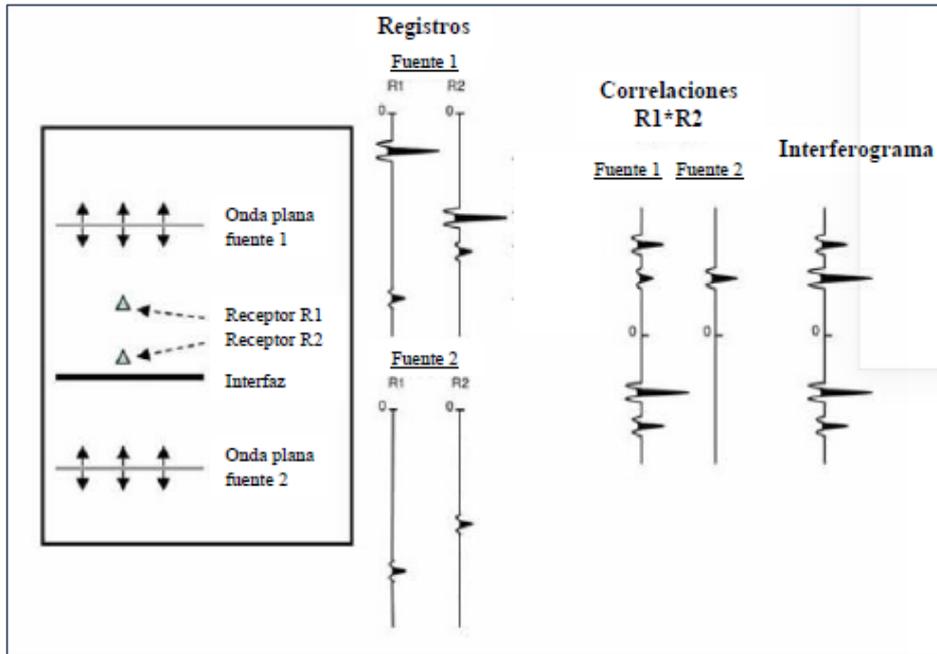


Figura 3. 2 Construcción de una fuente virtual a partir de interferometría sísmica, tomado de Escobar (2019)

3.12 Inversión

La inversión, como paso final del procesamiento del método IMASW consiste en estimar los parámetros que caracterizan el subsuelo a partir de los resultados de las mediciones realizadas, a través del ajuste a partir de una curva de dispersión teórica, asociada a la entrada de un rango de parámetros vinculados a la zona de estudio (Ólafsdóttir, 2014).

3.13 Velocidad de las ondas de corte hasta los 30 m de profundidad (Vs30)

El parámetro Vs30, definido como el promedio de la velocidad de las ondas de corte en los primeros 30 metros de profundidad, es un parámetro de uso estandarizado para caracterizar la respuesta sísmica a escala regional y global, y que permite el diseño de criterios sismorresistentes, implementado en códigos internacionales de ingeniería sísmica. A partir de este parámetro se pueden definir de manera inequívoca clasificaciones de sitio y coeficientes de respuestas espectrales que dependan del suelo (Borcherdt, 2012). Se calcula a partir de la siguiente relación:

$$V_{S30} = \sum_{i=1}^n \frac{30}{h_i/V_{S_i}} \quad (\text{Expresión 3.2})$$

Dónde, V_{S_i} es la velocidad de las ondas S en el estrato i y h_i es el espesor del estrato i , ubicado dentro de los primeros 30m del subsuelo. La expresión 3.2 está en el sistema de unidades MKS.

3.14 Relación espectral H/V

El estudio de la relación espectral de las componentes horizontales y verticales en una sola estación fue por primera vez introducida por Nogoshi & Igarashi (1971), donde se demuestra la relación a la curva de elipticidad de las ondas Rayleigh, y determinaron a partir de esta coincidencia que la más baja frecuencia de la curva H/V con la frecuencia fundamental de resonancia, es un excelente indicador de la estructura del subsuelo. Esta técnica fue luego revisada por Nakamura (1989) quien expuso que esta relación entre las componentes horizontales y las verticales es una estimación confiable de la función de transferencia del sitio para las ondas de cizalla (S) o función de amplificación del sitio dependiente de la frecuencia (lo que lo condujo a denominarla “*Quasi-Transfer Spectrum*”, o QTS).

3.15 Fundamento teórico de la relación H/V

Los efectos de sitio usualmente considerados como funciones de transferencia empíricas de las capas superficiales, son comúnmente estudiados por dos técnicas: la tasa espectral estándar y los métodos de relación H/V (Bard, 1999). La relación espectral estándar, ST , se calcula dividiendo la componente horizontal del espectro de movimiento, en el dominio de Fourier, en superficie, SHS , por otro grabado en un sitio rocoso cercano, en la roca base, SHB . La última estación es tomada como la estación de referencia.

Entonces:

$$S_H = S_{HS}/S_{HB} \quad (\text{Expresión 3.3})$$

Nakamura (1989), Lermo & Chávez-García (1993), usaron una relación espectral E_s para estimar el efecto de amplitud de la fuente donde SVS y SVB son, respectivamente, el espectro de Fourier de la componente vertical de movimiento en la superficie y aquellas en la roca base a cierta profundidad.

$$E_s = S_{vs}/S_{vB} \quad (\text{Expresión 3.4})$$

Nakamura (1989) asumió que la componente vertical del espectro de microtremores no era amplificada por capas superficiales de baja velocidad, y estimó el efecto de las ondas Rayleigh en la componente vertical de los tremores por medio de evaluaciones de E_s . Nakamura (1989) propuso que, si el efecto de las ondas Rayleigh no era el mismo en la componente vertical y la horizontal, entonces E_s podría ser empleado para eliminar los efectos de las ondas Rayleigh en la función de transferencia. Una aplicación para compensar el efecto de la fuente (E_s) fue introducida por Lermo & Chávez-García (1993) la cual incluía una función modificada para el efecto de sitio (STT), llamada:

$$S_{TT} = \frac{S_T}{E_s} \quad (\text{Expresión 3.5})$$

La cual es equivalente a:

$$S_{TT} = \left(\frac{S_{HS}}{S_{sv}}\right) / \left(\frac{S_{HB}}{S_{vB}}\right) \quad (\text{Expresión 3.6})$$

Nakamura (1989) también señaló que la relación, SHB / SVB era cercana a 1, lo cual obtuvo examinando medidas de microtremores en pozos. Huang & Tseng (1999) estudiaron esta relación usando microtremores y grabaciones de eventos sísmicos en una capa sedimentaria en Chiawan, Taiwan. Con estas revisiones

empíricas, fue asumido, para ese sitio, que un estimado razonable para la función de efecto de sitio modificado podría ser determinado a partir de:

$$S_{TT} = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} \quad (\text{Expresión 3.7})$$

Esto sugiere que la tasa H/V, definida por su función de transferencia, puede ser obtenida solamente a partir de movimientos en la superficie, los cuales obviamente hacen más fácil estimar las características del movimiento del suelo.

3.16 Microzonificación sísmica

En el informe técnico final del proyecto de microzonificación sísmica para la planificación urbana y la gestión local de riesgo de las ciudades en los ejes de desarrollo: caso piloto Guarenas y Guatire (Schmitz et al., 2012) se relata con detalle el surgimiento del estudio tipo microzonación o microzonificación sísmica, el cual data de los años 60 del siglo pasado. Tal como se explica en dicho informe, la base fundamental de los trabajos de microzonificación sísmica la constituían (y aún la constituyen) la geología de los estratos superficiales y sus propiedades fundamentales, apoyados en mediciones instrumentales, las cuales hoy en día se refieren a técnicas tales como mediciones de ruido ambiental, ReMi, sísmica de fuente activa (refracción sísmica), entre otros.

El objetivo de la microzonificación sísmica es el de representar en el mapa de una ciudad o zona en desarrollo distintas zonas que tendrían una respuesta sísmica similar ante un terremoto.

Schmitz et al. (2012) resumen las siguientes bases para el desarrollo de la microzonificación sísmica:

- La microzonación sísmica se realiza sobre la base de valores relativos suelo/roca, donde por “roca” se entiende una estructura regional formada

por estratos consolidados y por “suelo” se entiende una estructura local formada por estratos no consolidados.

- El proceso de microzonación se realizará por la delimitación de zonas que presenten un comportamiento cuasi homogéneo ante los terremotos, reflejado en un conjunto de valores y funciones relativos suelo/roca.

Dichas bases serán consideradas de igual manera para el desarrollo de la microzonificación sísmica del presente estudio, considerando la definición de “roca” como el basamento en el cual se encuentra insertada la cuenca.

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA

Para la planificación del trabajo de campo se estableció un mallado de puntos sobre un mapa de la ciudad de Guatire, distribuidos geográficamente sobre todo el municipio Zamora (figura 4.1), con una distancia entre puntos de aproximadamente 300 metros entre sí. En principio, se tenía planeada la adquisición de aproximadamente 120 puntos, dónde se recolectarían datos de ruido antrópico para aplicar el método IMASW con arreglos lineales de geófonos, y un geófono multicomponente para aplicar el método H/V. La numeración de las estaciones se realizó de forma aleatoria, ya que posteriormente durante el trabajo de campo se seguiría un cronograma establecido a diario en función de las rutas más accesibles. Cabe destacar además que la ubicación de estaciones correspondería a una disposición geográfica aproximada de las estaciones reales.



Figura 4. 1 Mapa de ubicación geográfica de los puntos de adquisición propuestos en el municipio Zamora de la cuenca Guarenas - Guatire

La adquisición de datos se extendió durante aproximadamente 21 días de trabajo de campo, a razón de aproximadamente tres días por semana, adquiriendo un total de 126 puntos de control con el equipo de IMASW y 76 puntos de control con el equipo de H/V. La diferencia entre la cantidad de estaciones de cada método fue causada por problemas de logística con respecto al equipo de H/V durante los primeros días de adquisición.

4.1 Adquisición de datos IMASW

Los puntos de adquisición realizados con el método IMASW en la cuenca Guarenas – Guatire se ilustra en la figura 4.2, mientras que la figura 4.3 contiene la ubicación geográfica de los puntos realizados exclusivamente dentro del municipio Zamora.

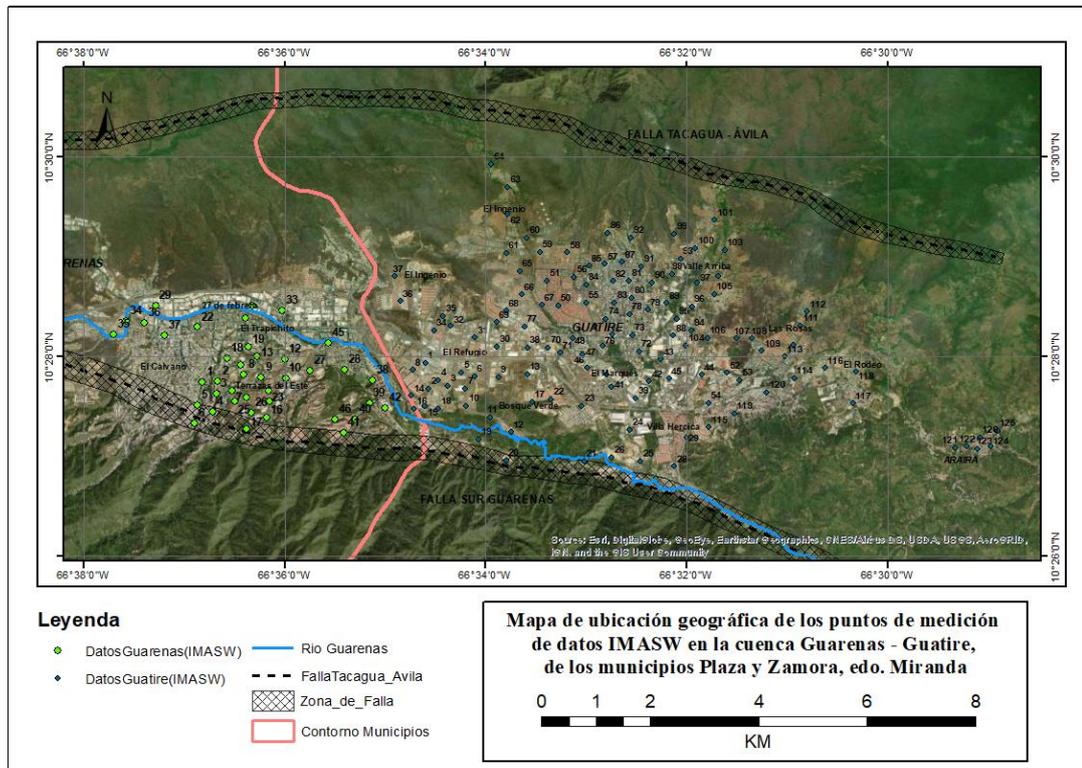


Figura 4. 2 Ubicación geográfica de los puntos de adquisición del método IMASW en la cuenca Guarenas - Guatire

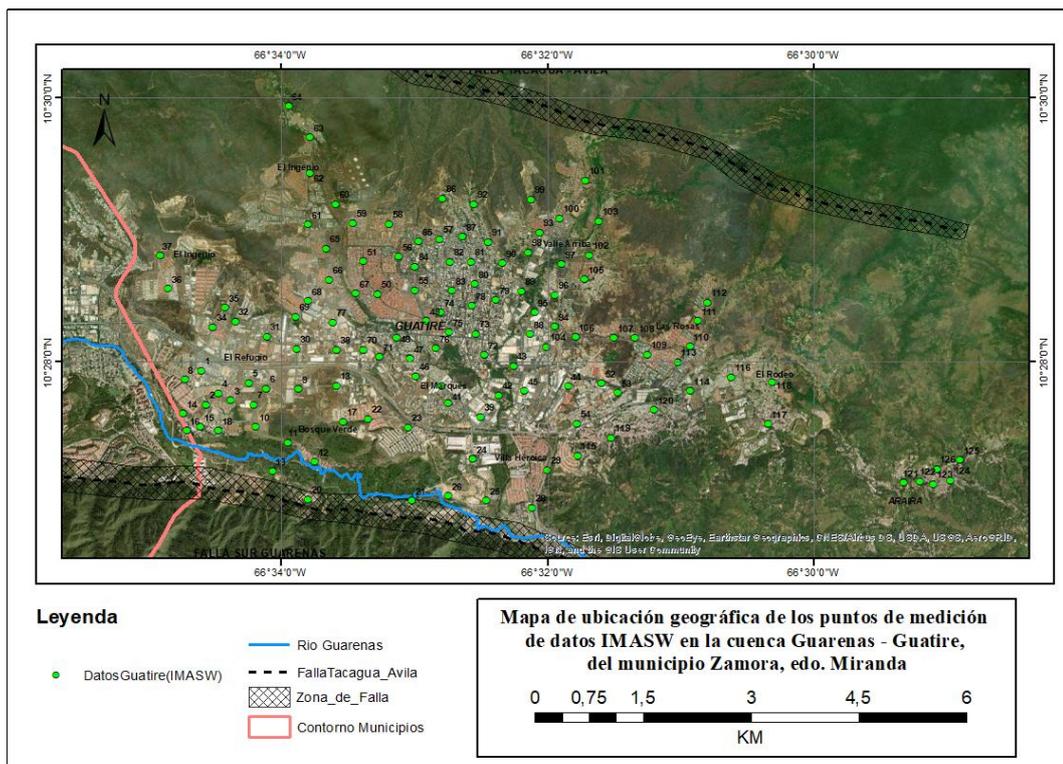


Figura 4. 3 Ubicación geográfica de los puntos de adquisición del método IMASW en el municipio Zamora de la cuenca Guarenas - Guatire

El equipo utilizado para la adquisición de datos de ruido para IMASW consta de los instrumentos expuestos en la tabla 4.1.

Tabla 4. 1 Instrumentos utilizados para la adquisición de datos con el método IMASW

INSTRUMENTO	CANTIDAD
Sismógrafo 24 canales marca Geode	2
Cable sísmico 24 canales	2
Geófono 4,5 Hz	48
Placa metálica	48
Laptop	1

INSTRUMENTO	CANTIDAD
Cable de datos	2
Geoposicionador global	1
Batería 12 V	2
Cono de seguridad	6
Chaleco de seguridad	4

Para la adquisición de datos de ruido antrópico a ser utilizados para el análisis interferométrico multicanal de ondas superficiales (IMASW) se utilizaron dos sismógrafos conectados en serie (alimentados por dos baterías de 12 V), identificados como sismógrafo 1 y 2 respectivamente. El sismógrafo 1 se encuentra a su vez conectado a la laptop a través de un cable de datos. Cada sismógrafo fue conectado a un cable sísmico de 24 canales, para un total de 48 receptores separados dos metros entre sí, resultando así un total de 96 metros lineales de tendido sísmico. La configuración de sismógrafo, laptop y baterías se dispone en el centro del arreglo, extendiéndose cada cable sísmico y receptores en paralelo a las vías, en direcciones opuestas. Es este punto medio dónde se realizaría la anotación de coordenadas y altura obtenidas con el geoposicionador global.

Las placas metálicas descritas en la tabla 4.1 se refieren a la base de acople de los geófonos (figura 4.4), que serían dispuestos en las carreteras de asfalto o cemento de las ciudades de Guarenas y Guatire, calles que imposibilitarían el uso de los “*pikes*” o picos clásicos de los geófonos superficiales que se utilizan usualmente para enterrar los receptores en terrenos blandos, cómo fincas u áreas rurales.



Figura 4. 4 Geófono con placa metálica

El programa utilizado para la adquisición fue **Seismodule Controller**, en su versión 11.1.69.0, de la compañía **Geometrics**. Este fue configurado de tal forma que se

realizaran 30 registros de grabación de ruido continuos, de 30 segundos cada uno, es decir, aproximadamente 15 minutos de registro sísmico para cada estación realizada, con un intervalo de muestreo de 2 ms. Los 30 registrados de cada punto de medición serían salvados en una carpeta debidamente identificada con la fecha y número de tendido, para su posterior apilamiento y procesamiento.

4.2 Procesamiento de datos IMASW

El procesamiento de datos IMASW se realizó en dos etapas; la preparación o pre – procesamiento de los datos para generar las curvas de dispersión utilizando el programa **Geopsy** (*Geophysical Signal Database for Noise Array Processing*, versión 2.9.1) y la generación de modelos 1D del subsuelo, utilizando el programa **Dinver** (versión 0.5.6).

Pre – procesamiento y curvas de dispersión.

El pre – procesamiento de los datos consiste en preparar la data de cada receptor individualmente, proceso que realiza el software **Geopsy** de forma automática para todos los geófonos de un mismo registro de manera simultánea, con la finalidad de acentuar la señal de banda ancha mediante la atenuación de irregularidades instrumentales.

La secuencia de preparación de los datos se realiza siguiendo los pasos descritos a continuación, e ilustrados en la figura 4.5.

- Carga de datos (1).
- Selección de todos los archivos en una tabla (2).
- Substracción de valor medio (3).
- Filtro pasa banda Butterworth causal, de primer orden (4).
- Clip (5).
- Whiten (6).
- Taper (7).

- Correlación cruzada (8).

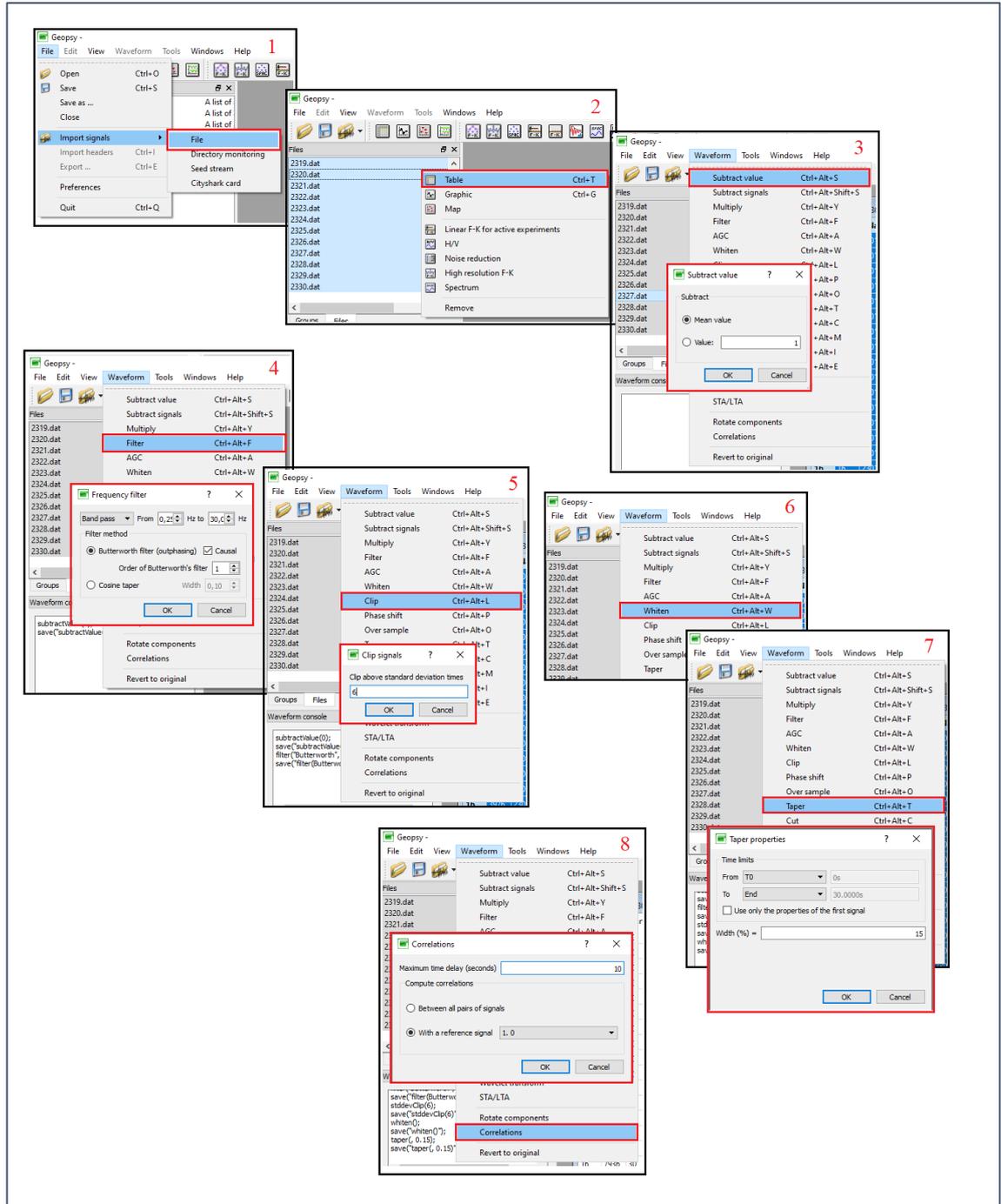


Figura 4. 5 Secuencia de preparación de los datos de IMASW en el programa Geopsy

Finalizada la preparación de los datos se procede a generar el espectro de dispersión, a través de la opción “*Linear F – K for active experiments*” (figura 4.6), obteniendo

así el espectro de dispersión, dónde se aprecia la zona de máxima dispersión (figura 4.7A) utilizada para realizar el escogimiento de puntos para generar la curva de dispersión (figura 4.7B)

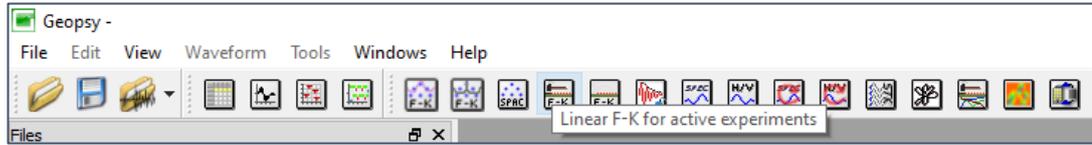


Figura 4. 6 Barra de herramientas del programa Geopsy

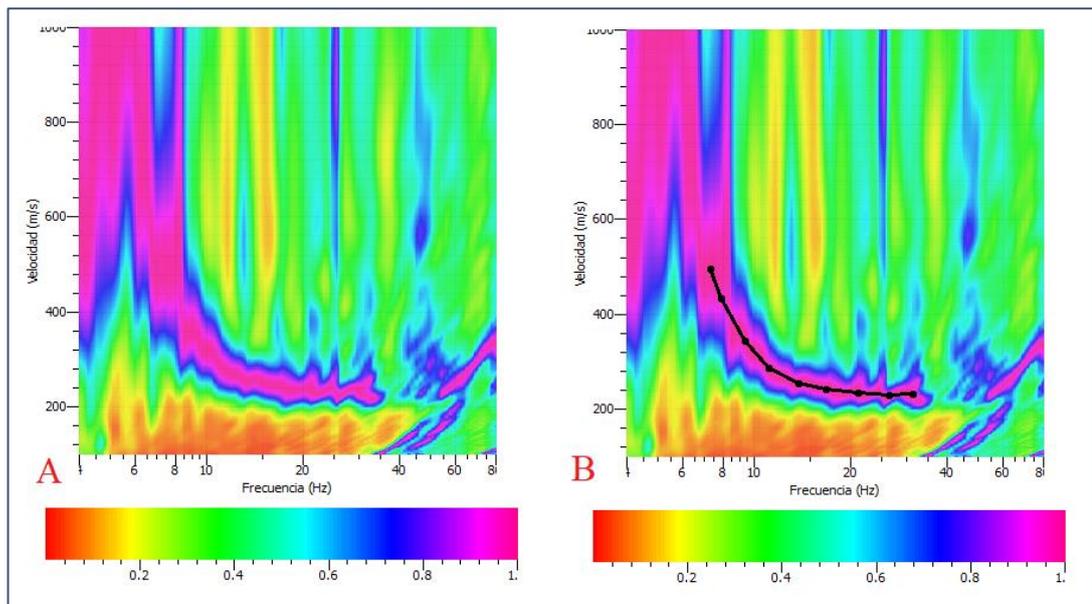


Figura 4. 7 Espectro y curva de dispersión, tendido número 23

Luego de realizar el escogimiento de puntos y generar la curva de dispersión, se guarda la misma en formato de múltiple columna compatible con el software **Dinver** para realizar el modelo 1D del subsuelo.

Modelos 1D del subsuelo

Primeramente, se realiza la carga de datos del tendido a procesar al software **Dinver**, a través de la secuencia “*Dispersion – Set – Load*”, lo que mostrará la curva de dispersión tal como se ilustra en la figura 4.8.

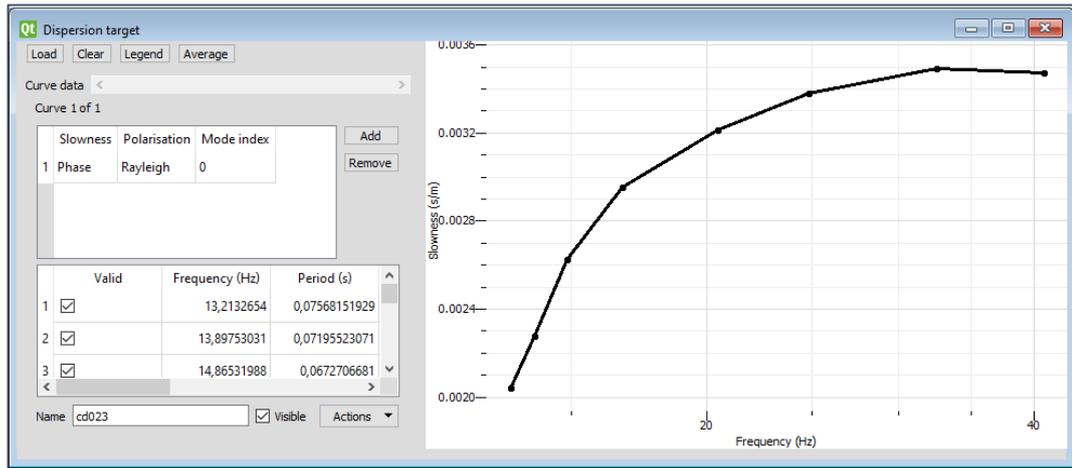


Figura 4. 8 Curva de dispersión en el programa Dinver.

Posteriormente se cargan los parámetros de inversión (valores aproximados de velocidad de onda P, velocidad de onda S, coeficiente de Poisson, densidad de las capas del subsuelo) previamente establecidos a través del análisis e interpretación de la información disponible del área, a través de la secuencia “*File – import parametrization*”. Una vez cargados los parámetros, se procede a realizar la primera corrida de inversión, generando así el modelo 1D del subsuelo (figura 4.9)

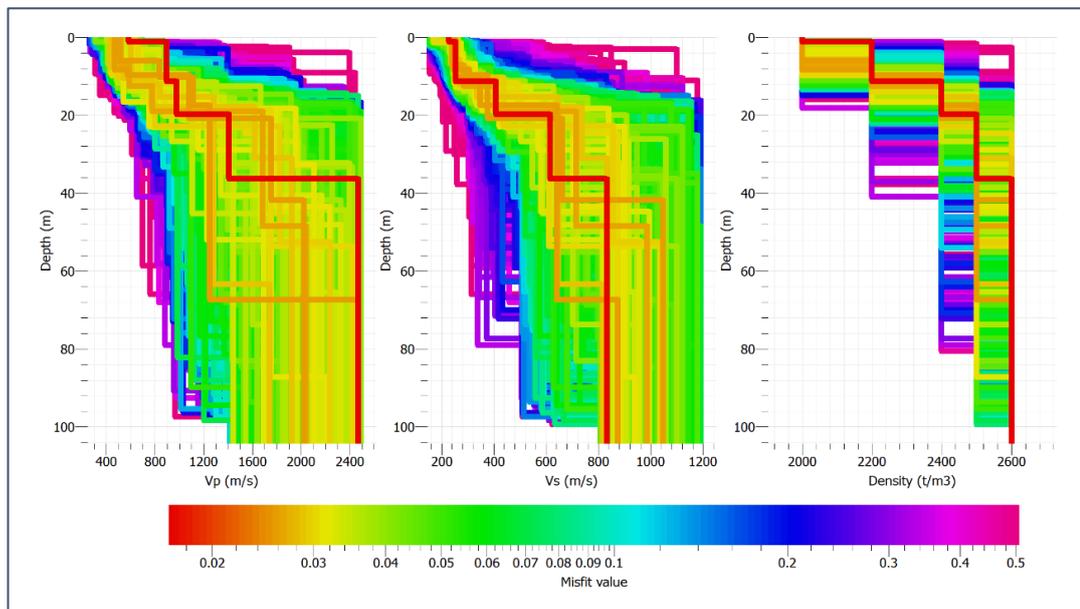


Figura 4. 9 Modelo 1D del subsuelo, tendido número 23.

En caso de que el modelo generado tenga un valor de “*misfit*” o incertidumbre elevada, que no permita la distinción de un modelo específico, se procede a modificar los parámetros de inversión para realizar otra corrida y generar otro modelo. Un ejemplo de incertidumbre elevada se aprecia en la figura 4.10, correspondiente al tendido número 10 de Guatire.

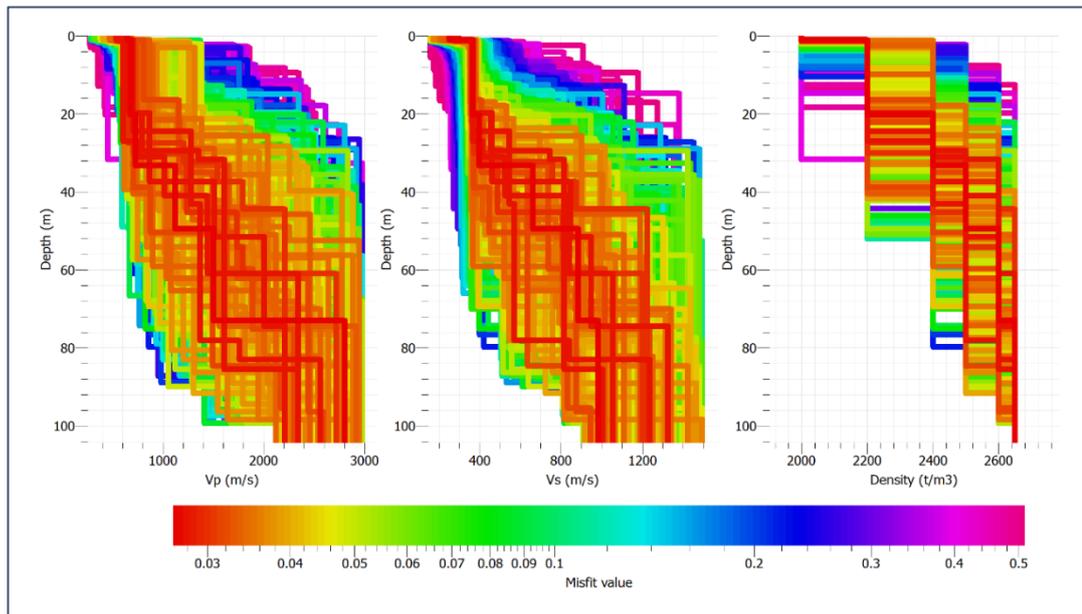


Figura 4. 10 Modelo 1D del subsuelo, tendido número 10.

El modelo 1D generado del subsuelo en cada tendido nos proporciona información acerca del tope de las capas presentes, así como la mejor aproximación posible de velocidad de ondas de corte en cada una de ellas. Habiendo establecido la el espesor de cada capa y su respectiva Vs, es posible calcular el parámetro conocido como Vs30 a través de la expresión 3.2. Un ejemplo de este procedimiento se ilustra en la tabla 4.2.

Tabla 4. 2 Ejemplo de cálculo de Vs30 para el tendido número 23

S023			
Capa	Profundidad base (m)	Espesor (m)	Vs (m/s)
1	1	1	226
2	11	10	253
3	20	9	407
4	36	16	615
5	-	-	832
Vs30	-	-	364

4.3 Mapa con valores Vs30 inferidas a través del relieve de la cuenca Guarenas – Guatire (Vs30 topográfico)

El mapa de Vs30 realizado a través de datos de relieve, o Vs30 topográfico se realizó siguiendo la metodología descrita por Morales et al. (2011), el cual hace uso de la relación entre el Vs30 y la pendiente topográfica propuesta por Allen & Wald (2009) para 9° de arco;

$$Vs30 = \frac{2046 p^3 + 1612 p^2 + 377,4 p + 1,259}{p + 0,007324}$$

(Expresión 4.1)

Dónde: p es el valor de la pendiente en unidades naturales (m/m).

La figura 4.11 expresa la relación entre las pendientes topográficas y las categorías de Vs30 según NEHRP (BSSC, 2003).

Clasificación de sitios NEHRP	Rango Vs30 (m/s)	Rango de gradiente (m/m) para 9 arcsec en regímenes activos
<i>E</i>	< 180	< 3×10^{-4}
	180 - 240	$3,5 \times 10^{-4}$ - $3,5 \times 10^{-3}$
	240 - 300	$3,5 \times 10^{-3}$ - 0,010
<i>D</i>	300 - 360	0,010 - 0,024
	360 - 490	0,024 - 0,08
<i>C</i>	490 - 620	0,018 - 0,14
	620 - 760	0,14 - 0,20
<i>B</i>	> 760	> 0,20

Figura 4. 11 Relación entre pendientes topográficas y rangos de Vs30, según NEHRP (BSSC, 2003), tomado de Allen & Wald (2009).

Los valores de Vs30 calculados con la expresión 4.1 crecen indefinidamente con el valor de la pendiente, por lo que en la práctica debe ser acotado, razón por la que se limitó el valor máximo de Vs30 a 800 m/s (obtenido para $p = 0,216$).

4.4 Delimitación de microzonas del mapa Vs30 integrado

Para la delimitación de los polígonos que representan las diferentes microzonas del mapa de Vs30 se tomaron en consideración diversos factores, tal cómo se describe a continuación; inicialmente se generó un mapa de interpolación con los datos de IMASW, y tomando dicho mapa como base se moldearon los límites de las microzonas a través de la integración del mapa de Vs30 topográfico, el mapa geológico y el mapa geográfico de la cuenca. A continuación se muestran algunos ejemplos de cómo se realizó el modelado de las microzonas a través de la integración de información.

Microzona D (200 – 400 m/s)

Límite este: para la delimitación del sector este de la microzona D, se ajustó el resultado de la interpolación que realizó el programa con de los valores Vs30 (IMASW) al límite de la zona urbanizada de la cuenca, que además coincide con las zonas de baja velocidad resultantes del mapa de Vs30 topográfico (figuras 4.12 y 4.13).

Límite sureste: la delimitación sureste de la microzona D fue definida a través del ajuste de la interpolación realizada por el programa con la zona de transición entre las planicies aluvionales y las rampas piemontinas expuestas en el mapa geomorfológico, siguiendo además la línea definida por las carreteras principales.

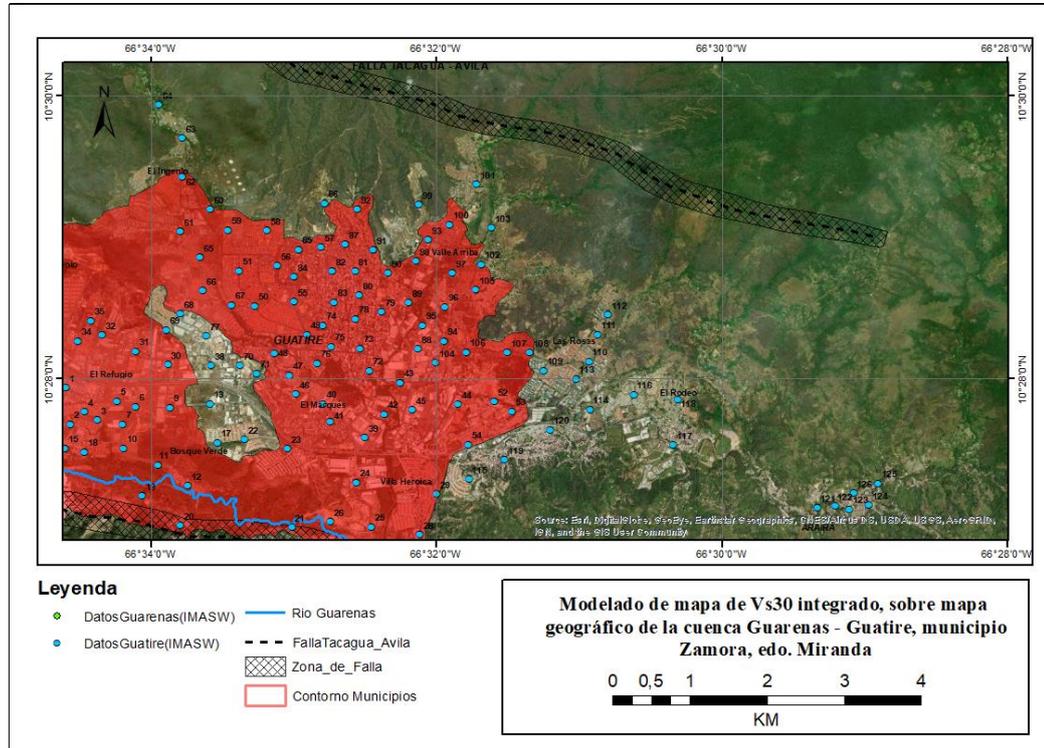


Figura 4. 12. Delimitación del límite este del mapa de Vs30 integrado.

Límite oeste: el límite oeste de la microzona D se trazó a través del ajuste del resultado de la interpolación de los datos de IMASW con el cauce del río Guarenas. El ajuste realizado coincide además con la zona de bajas velocidades del mapa de Vs30 topográfico (figuras 4.13 y 4.14).

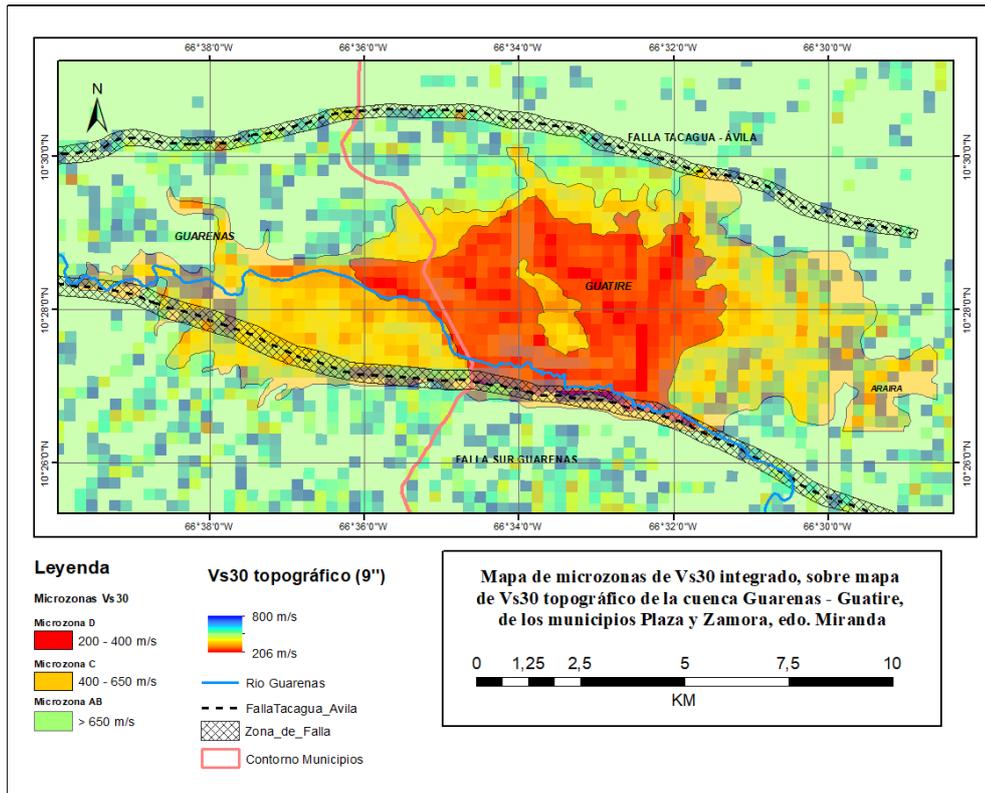


Figura 4. 13 Mapa de Vs30 integrado sobre mapa de Vs30 topográfico.

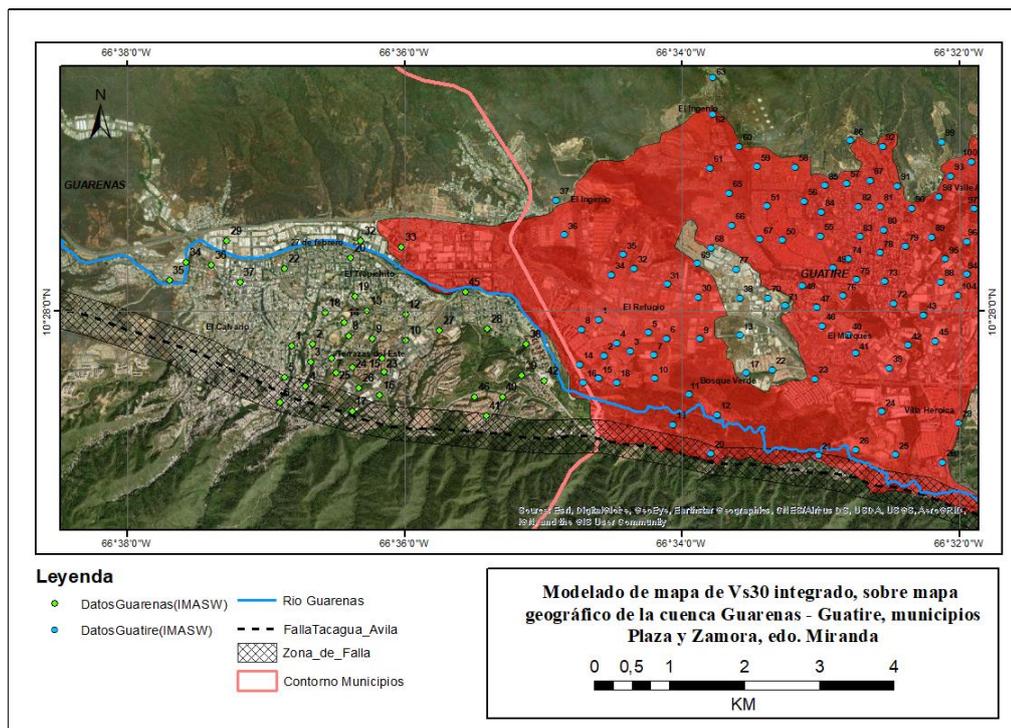


Figura 4. 14. Delimitación del límite oeste del mapa de Vs30 integrado.

Microzonas C y AB

Para delimitar estas dos áreas se consideraron, principalmente, el mapa de elevación (DEM), el mapa de Vs30 por topografía y el mapa geológico. A través de la integración de la información se trazó el límite exterior de la microzona C con el contacto entre Esquistos Las Mercedes y la Formación Guatire, dicha línea concuerda además con la transición entre velocidades bajas e intermedias del mapa de Vs30 topográfico. La microzona AB comprende todos los valores de Vs30 mayores a 650 m/s que se encuentran en su totalidad fuera de los límites de la cuenca, y fuera de las zonas urbanizadas de Guarenas y Guatire. Se puede observar además en la figura 4.15 el ajuste del borde exterior de la microzona C con el Modelo Digital de Elevación, y en la figura 4.16 la distribución general de velocidad a los alrededores de la cuenca y en toda la extensión de los municipios Plaza y Zamora, con velocidad de ondas de corte mayores a 650 m/s.

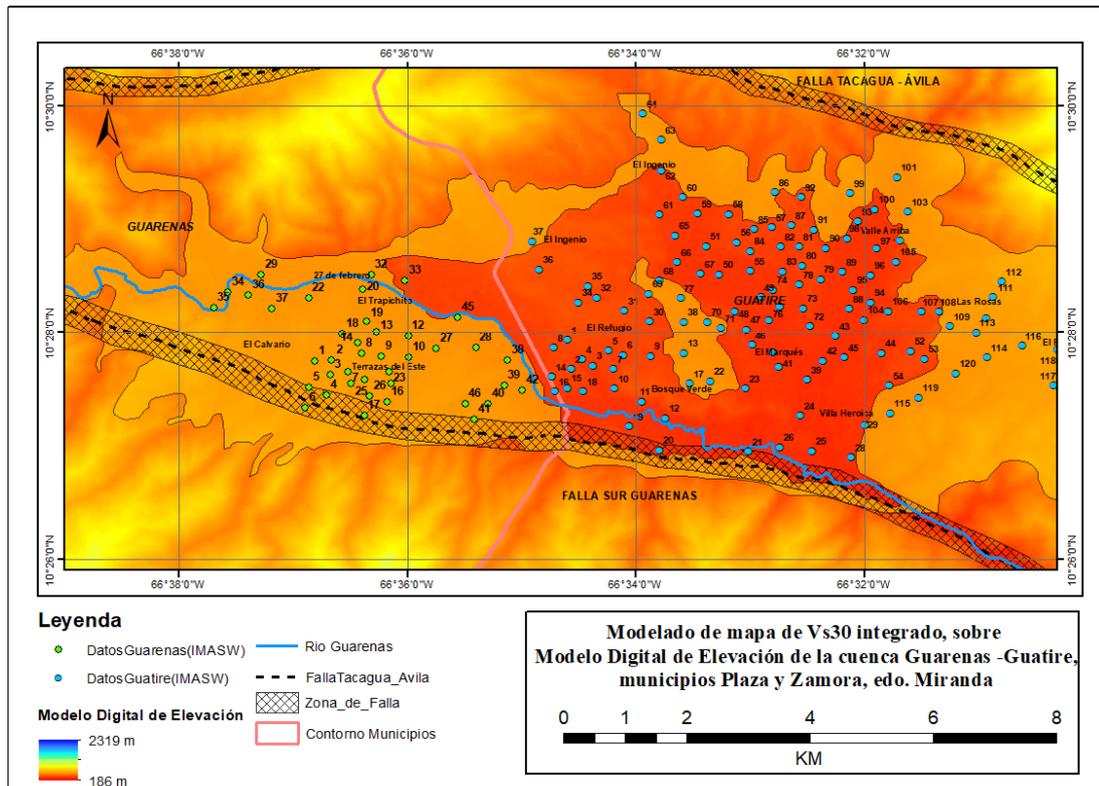


Figura 4. 15 Superposición del mapa Vs30 integrado sobre el Modelo Digital de Elevación

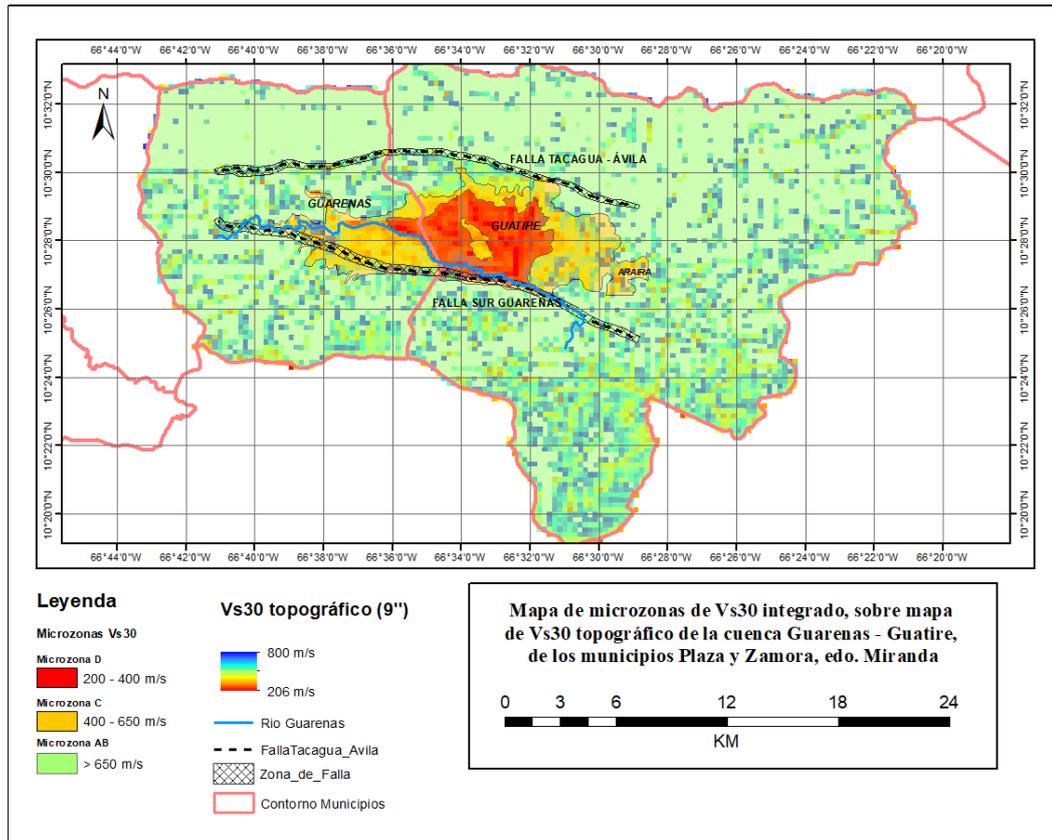


Figura 4. 16. Superposición del mapa de Vs30 topográfico con el mapa de Vs30 integrado.

4.5 Adquisición de datos H/V

Para la adquisición de datos de ruido ambiental se utilizó un sismómetro de tres componentes REF TEK 151 – 30, conectado a un sismógrafo REF TEK 130 B. Para la manipulación y configuración del equipo se utilizó un Ipad compatible con el programa RefTek IFSC. Para el almacenamiento de datos se utilizaron dos memorias de 16 GB cada una, dentro del sismómetro. Para la alimentación eléctrica de los equipos se utilizó una batería de 12 V.

En total se realizaron 111 mediciones de ruido sísmico ambiental para aplicar el método H/V para realizar el mapa en conjunto de la cuenca de Guarenas - Guatire, sin embargo, debido a problemas con la calidad de los datos se utilizaron sólo 43 de estos datos, cuya ubicación geográfica se muestra en la figura 4.17.

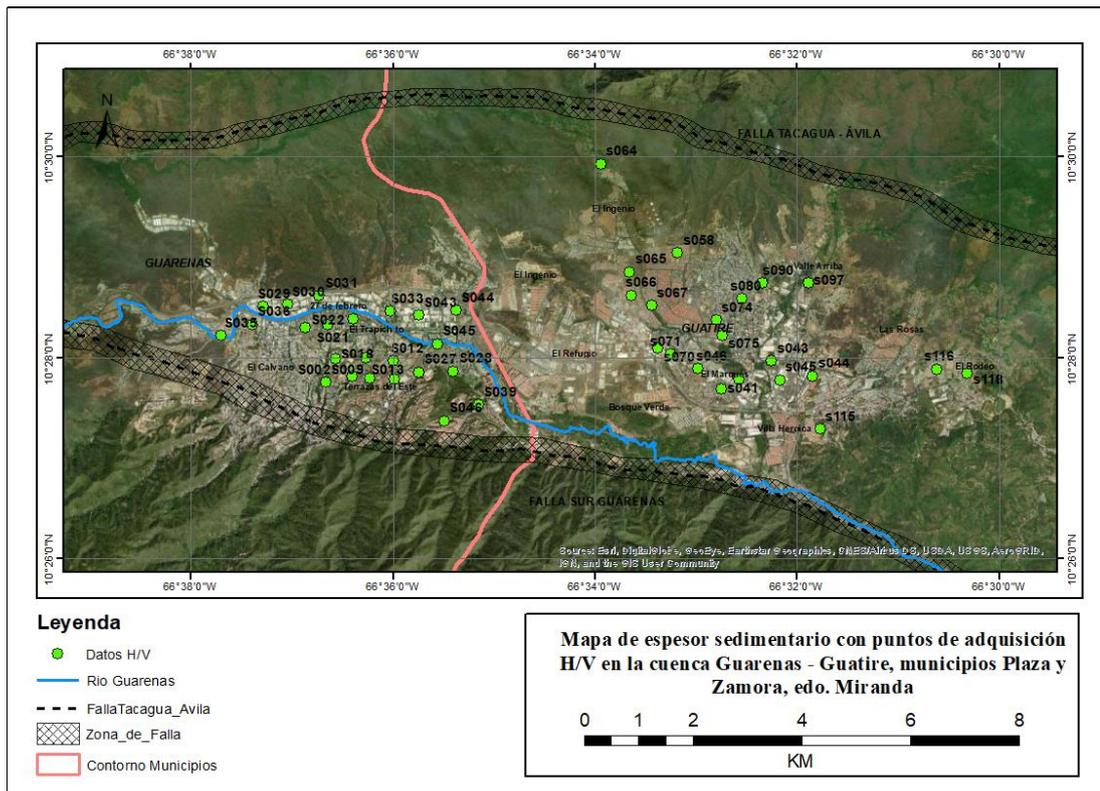


Figura 4. 17 Ubicación geográfica de las mediciones de ruido sísmico ambiental, para el método H/V en la cuenca Guarenas – Guatire.

Exclusivamente en el municipio Zamora se realizaron 74 mediciones de ruido ambiental, de las que se utilizaron únicamente 20 de estos datos, cuya ubicación geográfica se ilustra en la figura 4.18.

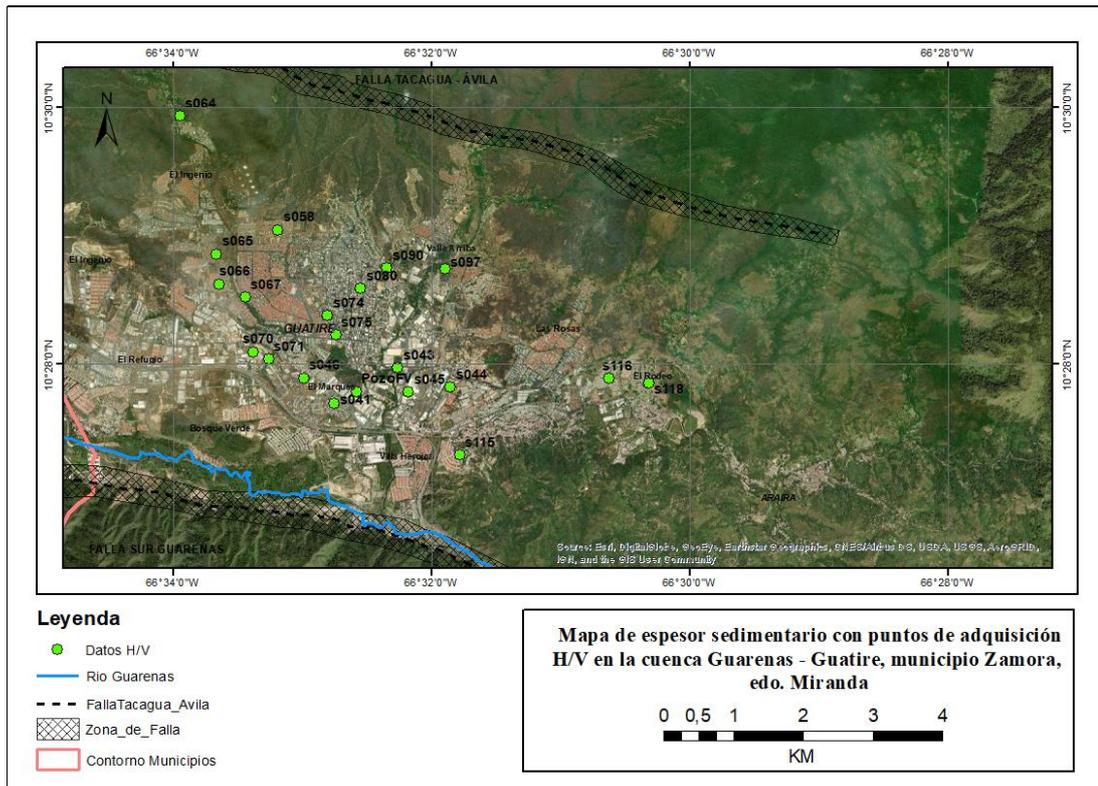


Figura 4. 18 Ubicación geográfica de las mediciones de ruido sísmico ambiental, para el método H/V en el municipio Zamora de la cuenca Guarenas – Guatire.

Los registros de H/V se realizaron en paralelo a los propios de IMASW, ubicándose el equipo tan sólo a una decena de metros de distancia del arreglo de interferometría sísmica. La duración de cada registro sería de 30 minutos, pudiendo variar ± 5 minutos en función del tiempo a disposición en cada punto de adquisición.

La razón por la que se descartaron gran parte de los registros de H/V corresponde principalmente a problemas de interferencia y señales no deseadas en la grabación, debido a que se realizaron en zonas de excesivo tráfico peatonal, así como limitaciones de tiempo en las mediciones.

Los pasos a seguir para la adquisición H/V se detallan a continuación:

- Se dispone el sismómetro REF TEK 151 – 30 A en el lugar de menor perturbación externa, a un par de metros de distancia del sismógrafo REF TEK 130 B.
- Se orienta la placa de identificación del sismómetro en dirección al norte geográfico.
- Se conectan los cables de conexión hacia el sensor REF TEK 151 – 30 A, cable de conexión del Ipad y cable de corriente al sismógrafo (el cable de corriente no se conecta a la batería hasta liberar las masas del sensor).
- Cerciorarse de la presencia de las memorias de almacenamiento dentro del sismógrafo.
- Se realiza la nivelación horizontal del sismómetro a través de tres niveles de burbuja ubicados en los laterales del mismo.
- Se liberan las masas del sismómetro.
- Se conectan los cables que van del sismógrafo a la batería de 12 V.

Culminado el proceso de instalación de los equipos, se anotan las coordenadas geográficas proporcionadas por el geoposicionador global y se procede a configurar los parámetros de grabación en el Ipad, tal cual se detalla a continuación;

- En la opción Monitor se verifica el correcto funcionamiento de cada uno de los tres canales (uno vertical y dos horizontales).
- En el apartado *Status* se selecciona *Start Acquisition*, seguidamente se anota la hora de inicio del registro para tener control del tiempo de grabación.
- Transcurrido el tiempo de adquisición establecido con anterioridad, se detiene la grabación a través de la opción *Stop Acquisition* en el Ipad, anotando nuevamente la hora de culminación.
- Se desconecta el cable de alimentación de corriente que va de la batería al sismómetro.
- Finalmente se bloquean las masas del sismómetro para el posterior traslado del mismo.

4.6 Procesamiento de datos H/V

El procesamiento de los datos de ruido sísmico ambiental se realizó haciendo uso del software Geopsy, dónde se preparan de los datos a través de la aplicación de filtros y ganancia, para posteriormente generar el cociente espectral H/V. El punto o cociente de mayor amplitud proporciona la frecuencia fundamental relacionada al punto geográfico de medición. Los pasos a seguir para el pre procesamiento de datos (figura 4.19) se realiza cómo sigue;

- Carga de datos (1).
- Abrir el archivo en un gráfico o tabla (2).
- Substracción de valor medio (3).
- Filtro pasa banda Butterworth causal, de segundo orden (4).
- Control automático de ganancia (AGC) (5).

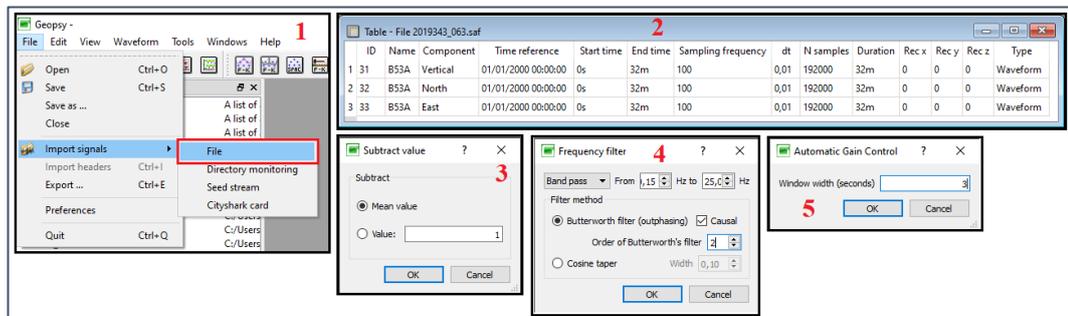


Figura 4. 19 Secuencia de preparación de los datos en el programa Geopsy, para el método H/V.

Finalizada la preparación de la señal se procede a generar el espectro de dispersión a través de la opción *H/V* de la barra de herramientas del programa (figura 4.20A). El software realiza la selección automática del pico de mayor amplitud (figura 4.20B), correspondiente a la frecuencia fundamental de la ubicación geográfica del estudio, que se puede copiar a través de la secuencia “*Tools – Edit peaks*” (figura 4.20C)

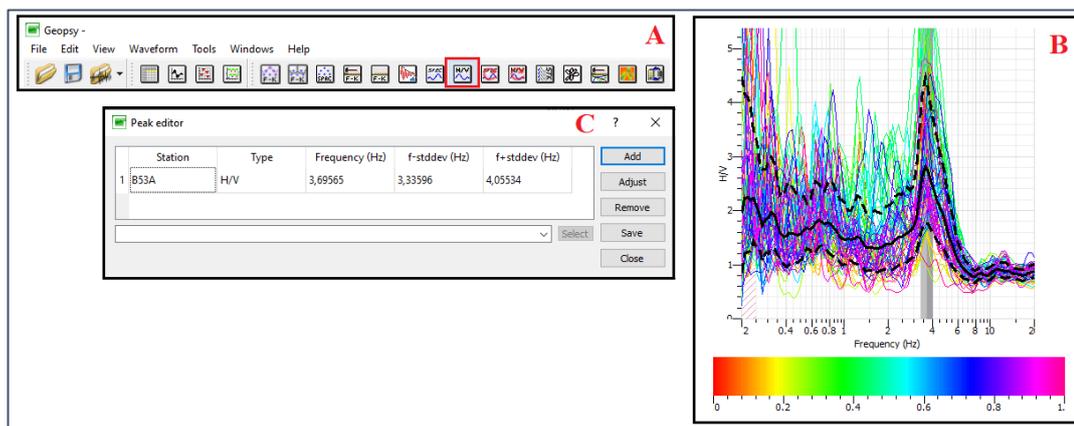


Figura 4. 20 Ejemplo de curva de dispersión en el programa Geopsy, correspondiente al punto número 63.

La frecuencia fundamental (valor inverso del periodo) obtenida a través del proceso anteriormente mencionado se utiliza para estimar el espesor sedimentario del punto de adquisición, a través de la expresión 3.1.

4.7 Delimitación de polígonos para las microzonas de espesor sedimentario

Para la delimitación de los polígonos que clasifican las zonas por rango de espesor, se tomaron en cuenta los datos obtenidos en campo a través del método H/V, así como el mapa de espesor sedimentario obtenido mediante gravimetría realizado por Amarís et al. (2011), los cuales se integraron a través del programa ArcGIS para ajustar los límites de cada zona, dado que las estaciones realizadas en el trabajo de campo no proporciona información concluyente para definir con exactitud los límites de las microzonas.

La delimitación de esta área se realizó a través del ajuste del mapa de interpolación generado con los datos de H/V, con la tendencia de las isolíneas del mapa de espesor sedimentario por gravimetría. El ajuste se realizó en mayor medida en las zonas donde se tuviese la menor cantidad de información o puntos de adquisición, siendo

estas la zona central de la cuenca, y los flancos exteriores de la misma donde se dificulta el acceso para mediciones de campo.

En el caso de las zonas donde existe mayor concentración de datos, se siguió la línea de tendencia resultante de la interpolación realizada por el programa ArcGIS, realizando ajustes en los límites de las microzonas para obtener curvas más suavizadas utilizando como referencia el mapa de espesor sedimentario de Amaris et. al. (2011, figuras 4.21 y 4.22).

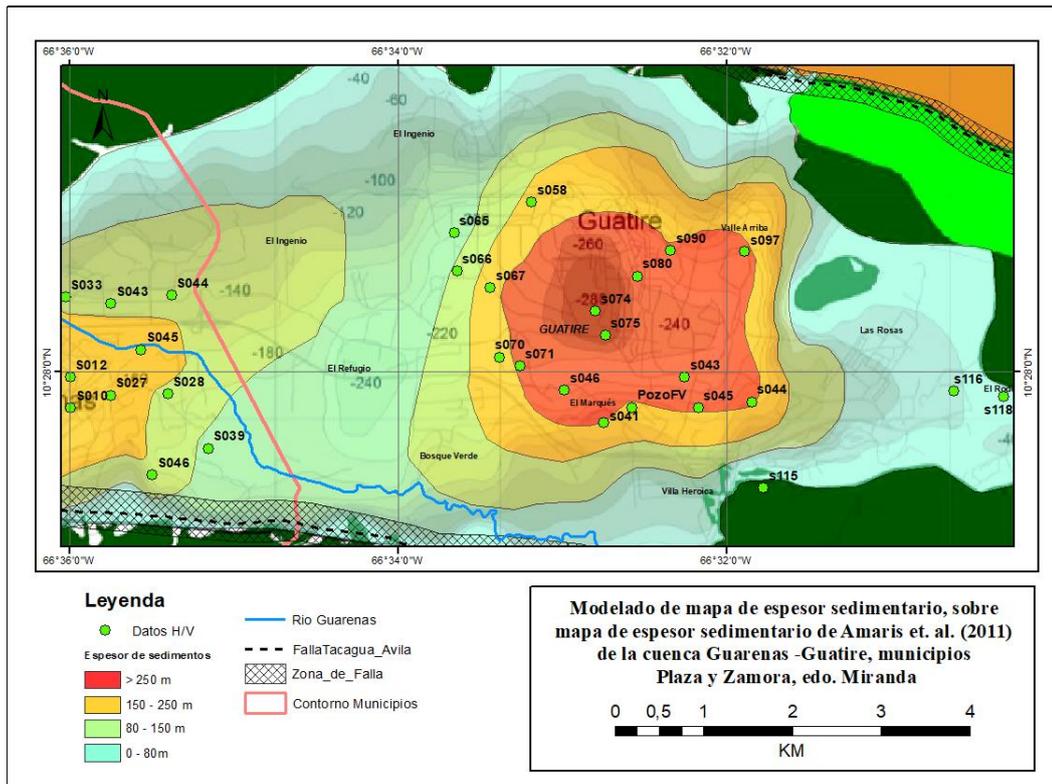


Figura 4. 21 Ajuste de la zona central de la microzonas de espesor sedimentario

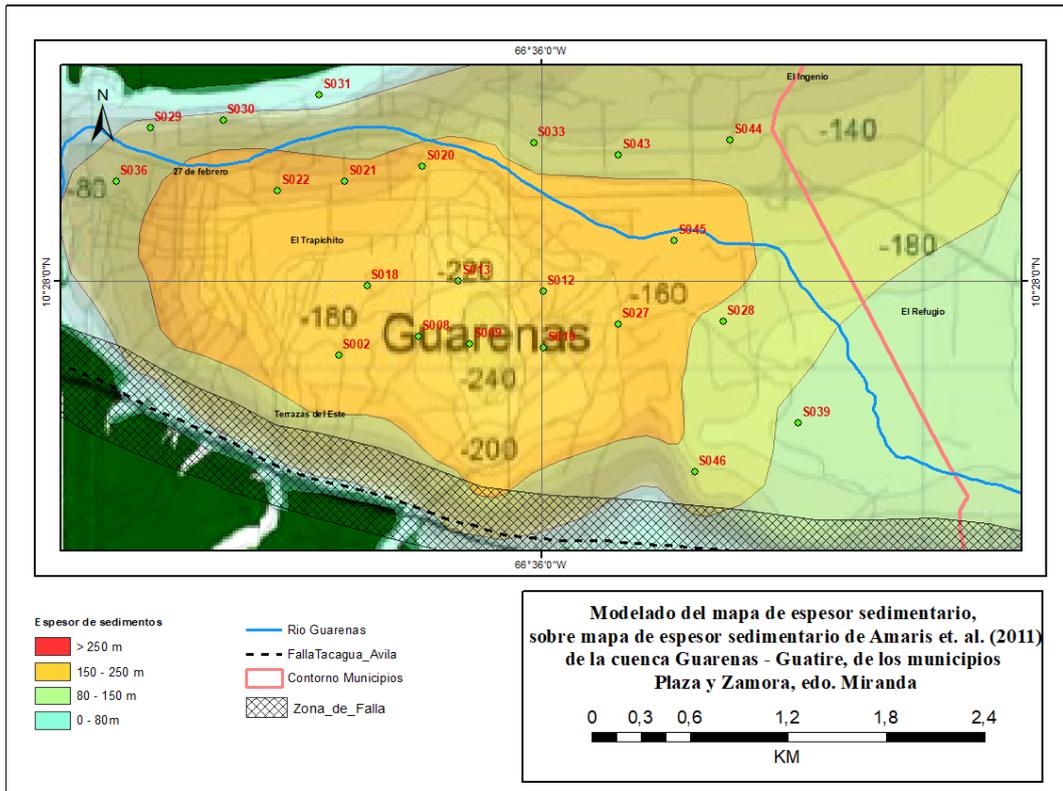


Figura 4. 22 Ajuste del sector oeste de las microzonas de espesor sedimentario.

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y ANALISIS

5.1 Integración de datos

Para la realización de los diferentes mapas y delimitación de las microzonas, se llevó a cabo una recopilación de información de diversos trabajos y estudios de investigación previos, siendo los más relevantes los trabajos realizados por Miró & Viete (2009), cuyo mapa geológico (figura 2.2) se integró dentro del proyecto del programa ArcGIS del presente estudio, permitiendo visualizar los contactos de las diferentes formaciones y estructuras geológicas de la cuenca.

Los mapas preliminares de Vs30 realizados con los datos de IMASW adquiridos en campo fueron comparados con la integración al proyecto del SIG del mapa de Vs30 topográfico (figura 1.5) tomado de Schmitz et al. (2012), el cual se utilizó como referencia observando la distribución general de valores de Vs30, realizando ajustes e interpretando los nuevos mapas en busca de coherencia geológica y geofísica.

Otro mapa utilizado e integrado dentro del proyecto de SIG fue el mapa de espesor sedimentario propuesto por Amarís et al. (2011) (figura 1.6), con el cual se realizó un estudio comparativo de los resultados preliminares de los primeros mapas generados con los datos recolectados en campo, en busca de similitudes y con la finalidad de ajustar (en caso de ser necesario) algunas zonas del mapa que carecieran de coherencia geológica (es decir, que los resultados obtenidos difieran en gran medida con la información geológica propuesta en estudios previos) debido a ausencia de estaciones de adquisición o puntos de control.

Dado lo descrito anteriormente, la integración de los diferentes mapas de proyectos realizados con anterioridad a la nueva base de datos utilizada para el presente trabajo de investigación permitió el correcto modelado y ajustes a los mapas de

espesor sedimentario y Vs30 utilizados para crear el mapa de microzonas final de la cuenca de Guarenas – Guatire.

5.2 Parámetros de inversión

La inversión de las curvas de dispersión se realizó a través del programa Dinver, tal como se describe en el capítulo IV. Para realizarlo, se debe introducir al programa parámetros asociados a la zona, tales como velocidad de onda P, velocidad de onda S y densidad, de modo que el software genere una curva de dispersión teórica, asociada a los parámetros mencionados con anterioridad.

Para generar los modelos que permitiesen estimar la velocidad de ondas de corte en los primeros 30 metros de profundidad se infirieron modelos de 5 y 6 capas sedimentarias, con los parámetros reflejados en las figuras 5.1 y 5.2, respectivamente.

<input type="radio"/> Uniform Vp0: 200 to 700 m/s <input type="checkbox"/> Fixed Linked to Vs0	<input type="radio"/> Uniform Vs0: 150 to 300 m/s <input type="checkbox"/> Fixed DVs0: 1 to 100 m <input type="checkbox"/> Fixed Bottom depth	<input type="radio"/> Uniform Rho0: 2000 kg/m3 <input checked="" type="checkbox"/> Fixed Linked to Vs0
<input type="radio"/> Uniform <input checked="" type="checkbox"/> Vp0 < Vp1 Vp1: 400 to 900 m/s <input type="checkbox"/> Fixed Linked to Vs1	<input type="radio"/> Uniform <input checked="" type="checkbox"/> Vs0 < Vs1 Vs1: 200 to 400 m/s <input type="checkbox"/> Fixed DVs1: 1 to 100 m <input type="checkbox"/> Fixed Bottom depth	<input type="radio"/> Uniform <input checked="" type="checkbox"/> Rho0 < Rho1 Rho1: 2200 kg/m3 <input checked="" type="checkbox"/> Fixed Linked to Vs1
<input type="radio"/> Uniform <input checked="" type="checkbox"/> Vp1 < Vp2 Vp2: 650 to 1400 m/s <input type="checkbox"/> Fixed Linked to Vs2	<input type="radio"/> Uniform <input checked="" type="checkbox"/> Vs1 < Vs2 Vs2: 300 to 800 m/s <input type="checkbox"/> Fixed DVs2: 1 to 100 m <input type="checkbox"/> Fixed Bottom depth	<input type="radio"/> Uniform <input checked="" type="checkbox"/> Rho1 < Rho2 Rho2: 2400 kg/m3 <input checked="" type="checkbox"/> Fixed Linked to Vs2
<input type="radio"/> Uniform <input checked="" type="checkbox"/> Vp2 < Vp3 Vp3: 900 to 2000 m/s <input type="checkbox"/> Fixed Linked to Vs3	<input type="radio"/> Uniform <input checked="" type="checkbox"/> Vs2 < Vs3 Vs3: 500 to 1000 m/s <input type="checkbox"/> Fixed DVs3: 1 to 100 m <input type="checkbox"/> Fixed Bottom depth	<input type="radio"/> Uniform <input checked="" type="checkbox"/> Rho2 < Rho3 Rho3: 2500 kg/m3 <input checked="" type="checkbox"/> Fixed Linked to Vs3
<input checked="" type="radio"/> Uniform <input checked="" type="checkbox"/> Vp3 < Vp4 Vp4: 1400 to 2500 m/s <input type="checkbox"/> Fixed Vp	<input checked="" type="radio"/> Uniform <input checked="" type="checkbox"/> Vs3 < Vs4 Vs4: 800 to 1200 m/s <input type="checkbox"/> Fixed Vs	<input checked="" type="radio"/> Uniform <input checked="" type="checkbox"/> Rho3 < Rho4 Rho4: 2600 kg/m3 <input checked="" type="checkbox"/> Fixed Densidad

Figura 5. 1 Parámetros de inversión utilizados en el programa Dinver para crear los modelos 1D del subsuelo (5 capas).

<input type="radio"/> Uniform Vp0: 200 to 700 m/s <input type="checkbox"/> Fixed <input type="radio"/> Uniform <input checked="" type="checkbox"/> Vp0 < Vp1 Vp1: 400 to 900 m/s <input type="checkbox"/> Fixed <input type="radio"/> Uniform <input checked="" type="checkbox"/> Vp1 < Vp2 Vp2: 650 to 1400 m/s <input type="checkbox"/> Fixed <input type="radio"/> Uniform <input checked="" type="checkbox"/> Vp2 < Vp3 Vp3: 900 to 2000 m/s <input type="checkbox"/> Fixed <input type="radio"/> Uniform <input checked="" type="checkbox"/> Vp3 < Vp4 Vp4: 1400 to 2500 m/s <input type="checkbox"/> Fixed <input checked="" type="radio"/> Uniform <input checked="" type="checkbox"/> Vp4 < Vp5 Vp5: 2100 to 3000 m/s <input type="checkbox"/> Fixed Vp	Bottom depth Vs0: 150 to 300 m/s <input type="checkbox"/> Fixed DVs0: 1 to 100 m <input type="checkbox"/> Fixed <input type="radio"/> Uniform <input checked="" type="checkbox"/> Vs0 < Vs1 Vs1: 200 to 400 m/s <input type="checkbox"/> Fixed DVs1: 1 to 100 m <input type="checkbox"/> Fixed <input type="radio"/> Uniform <input checked="" type="checkbox"/> Vs1 < Vs2 Vs2: 300 to 800 m/s <input type="checkbox"/> Fixed DVs2: 1 to 100 m <input type="checkbox"/> Fixed <input type="radio"/> Uniform <input checked="" type="checkbox"/> Vs2 < Vs3 Vs3: 500 to 1000 m/s <input type="checkbox"/> Fixed DVs3: 1 to 100 m <input type="checkbox"/> Fixed <input type="radio"/> Uniform <input checked="" type="checkbox"/> Vs3 < Vs4 Vs4: 800 to 1200 m/s <input type="checkbox"/> Fixed DVs4: 1 to 100 m <input type="checkbox"/> Fixed <input checked="" type="radio"/> Uniform <input checked="" type="checkbox"/> Vs4 < Vs5 Vs5: 900 to 1500 m/s <input type="checkbox"/> Fixed Vs	<input type="radio"/> Uniform Rho0: 2000 kg/m3 <input checked="" type="checkbox"/> Fixed <input type="radio"/> Uniform <input checked="" type="checkbox"/> Rho0 < Rho1 Rho1: 2200 kg/m3 <input checked="" type="checkbox"/> Fixed <input type="radio"/> Uniform <input checked="" type="checkbox"/> Rho1 < Rho2 Rho2: 2400 kg/m3 <input checked="" type="checkbox"/> Fixed <input type="radio"/> Uniform <input checked="" type="checkbox"/> Rho2 < Rho3 Rho3: 2500 kg/m3 <input checked="" type="checkbox"/> Fixed <input type="radio"/> Uniform <input checked="" type="checkbox"/> Rho3 < Rho4 Rho4: 2600 kg/m3 <input checked="" type="checkbox"/> Fixed <input checked="" type="radio"/> Uniform <input checked="" type="checkbox"/> Rho4 < Rho5 Rho5: 2650 kg/m3 <input checked="" type="checkbox"/> Fixed Densidad
--	---	--

Figura 5. 2 Parámetros de inversión utilizados en el programa Dinver para crear los modelos 1D del subsuelo (6 capas).

De acuerdo a lo descrito en el capítulo II los estratos más someros de la cuenca están conformados por aluviones, terrazas aluvionales y la Formación Guatire, dependiendo de la localidad. Partiendo de tal información, se establecieron los rangos de velocidades de ondas P y S, y densidad de las capas asumiendo que los estratos más someros corresponderían a una intercalación de arenas y arcillas, con presencia de conglomerados. Se observó además en afloramientos ubicados en distintas localidades de la cuenca que el espesor de las arenas y arcillas se encontraba en el rango de los 2 – 6 metros por capa, razón por la que se establecieron modelos de 5 y 6 capas para generar los modelos 1D.

5.3 Modelos 1D del subsuelo (método IMASW)

La figura 5.3 muestra las curvas de dispersión de velocidad – frecuencia de los tendidos del número 17 al 19 realizados en Guatire, con sus respectivos modelos 1D del subsuelo. Las curvas y modelos 1D de los tendidos restantes se encuentra en la sección de apéndices, desde la figura A.1.1 hasta la figura A.1.40. La simbología GT00x corresponde a los puntos de adquisición realizados dentro del municipio Zamora, mientras que la simbología GR0x se refiere a los puntos de adquisición realizados en el municipio Plaza (utilizados para generar el mapa general de la cuenca de Guarenas – Guatire en conjunto con Moreno (2021)).

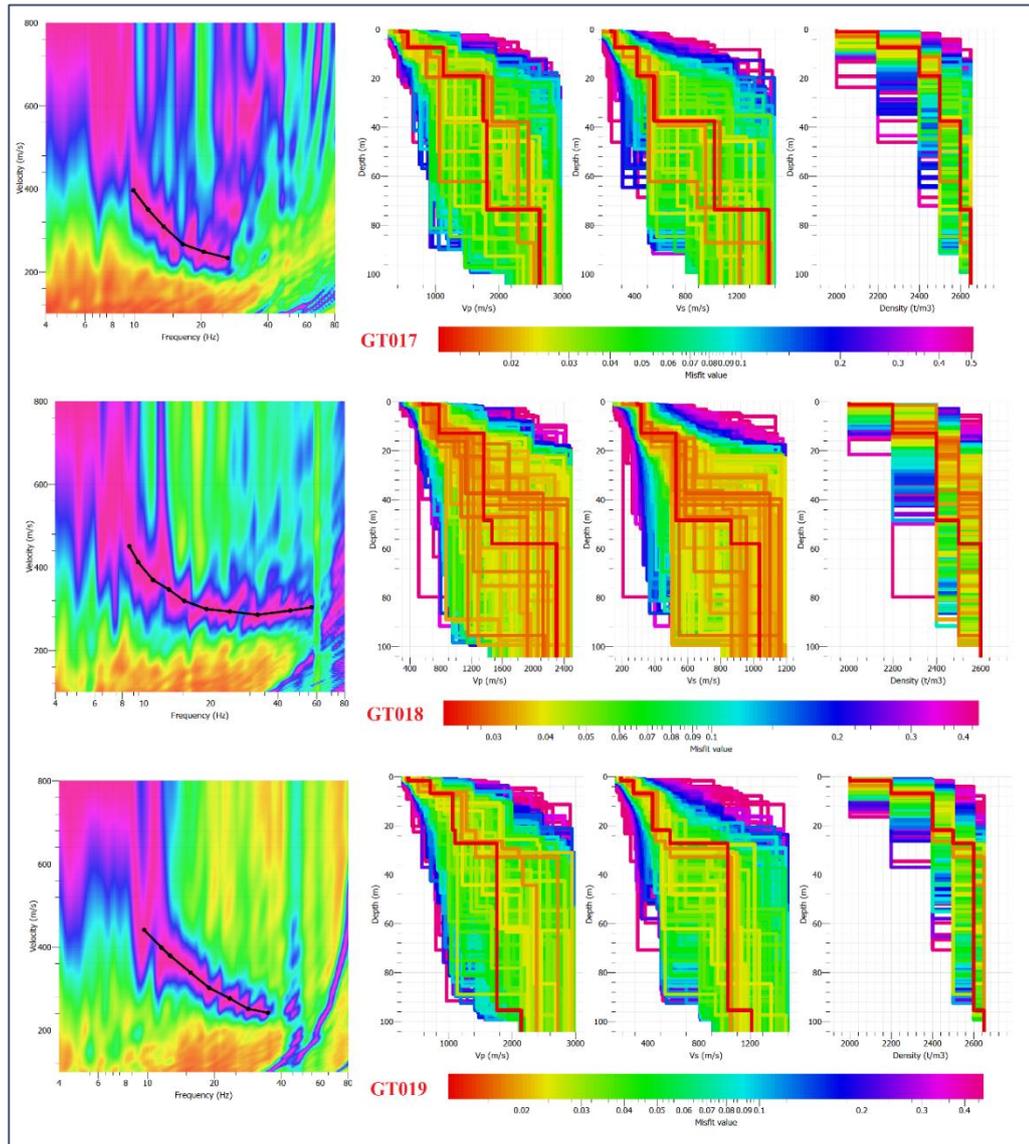


Figura 5. 3 Curvas de dispersión y modelos 1D del subsuelo, tendidos 17, 18 y 19.

Los modelos 1D generados con DINVER proporcionan información con respecto a las velocidades de ondas P, ondas S y densidad del subsuelo sin embargo, para efectos del presente proyecto se utilizó exclusivamente la información con respecto a la velocidad de onda S. Tal cómo se menciona en el capítulo III, el método pasivo de IMASW alcanza mayores profundidades de prospección, sin embargo, sería poco certero realizar un estimado de la profundidad alcanzada, por lo que se limitará a considerar información fiable los primeros 30 metros de espesor en los modelos 1D del subsuelo. Dicho esto, se presentan los 124 valores de Vs30 (los tendidos nro.

27 y 33 no poseen datos de IMASW) en la tabla 5.1, obtenidos a través de la expresión 3.2 haciendo uso de la información proporcionada por los modelos 1D del subsuelo.

Tabla 5. 1 Coordenadas y valor de Vs30 de los puntos de adquisición de datos de IMASW

ID	Longitud (°)	Latitud (°)	Vs30 (m/s)	ID	Longitud (°)	Latitud (°)	Vs30 (m/s)	ID	Longitud (°)	Latitud (°)	Vs30 (m/s)
1	-66,5767	10,4655	321	44	-66,5309	10,4635	384	85	-66,5496	10,4818	425
2	-66,5762	10,4612	487	45	-66,5363	10,4629	288	86	-66,5465	10,4872	441
3	-66,5730	10,4617	293	46	-66,5499	10,4648	361	87	-66,5441	10,4824	454
4	-66,5746	10,4627	269	47	-66,5506	10,4670	351	88	-66,5356	10,4701	298
5	-66,5708	10,4640	303	48	-66,5523	10,4696	406	89	-66,5367	10,4755	314
6	-66,5686	10,4633	517	49	-66,5486	10,4718	298	90	-66,5391	10,4790	382
7	-66,5701	10,4612	408	50	-66,5547	10,4752	261	91	-66,5409	10,4817	480
8	-66,5788	10,4643	349	51	-66,5565	10,4793	384	92	-66,5427	10,4865	443
9	-66,5646	10,4632	368	52	-66,5266	10,4639	347	93	-66,5344	10,4829	310
10	-66,5700	10,4584	385	53	-66,5246	10,4627	346	94	-66,5325	10,4710	351
11	-66,5659	10,4564	344	54	-66,5298	10,4588	478	95	-66,5351	10,4728	340
12	-66,5625	10,4540	249	55	-66,5501	10,4756	428	96	-66,5325	10,4750	345
13	-66,5598	10,4636	386	56	-66,5521	10,4799	505	97	-66,5316	10,4790	339
14	-66,5790	10,4601	377	57	-66,5469	10,4821	405	98	-66,5359	10,4804	436
15	-66,5768	10,4584	352	58	-66,5532	10,4840	382	99	-66,5355	10,4871	612
16	-66,5786	10,4579	402	59	-66,5578	10,4841	402	100	-66,5319	10,4847	375
17	-66,5590	10,4590	377	60	-66,5599	10,4865	339	101	-66,5287	10,4894	521
18	-66,5746	10,4579	409	61	-66,5633	10,4839	329	102	-66,5282	10,4800	406
19	-66,5678	10,4528	406	62	-66,5631	10,4904	354	103	-66,5271	10,4843	379
20	-66,5633	10,4493	390	63	-66,5631	10,4949	474	104	-66,5335	10,4685	493
21	-66,5503	10,4491	652	64	-66,5658	10,4988	498	105	-66,5288	10,4770	428
22	-66,5559	10,4594	446	65	-66,5611	10,4809	300	106	-66,5299	10,4697	405
23	-66,5508	10,4583	364	66	-66,5608	10,4770	329	107	-66,5252	10,4696	437
24	-66,5428	10,4544	479	67	-66,5574	10,4752	338	108	-66,5225	10,4696	488
25	-66,5410	10,4491	412	68	-66,5633	10,4742	441	109	-66,5209	10,4675	447
26	-66,5458	10,4497	328	69	-66,5649	10,4723	420	110	-66,5156	10,4686	464
28	-66,5354	10,4482	381	70	-66,5564	10,4681	490	111	-66,5146	10,4718	534
29	-66,5334	10,4530	536	71	-66,5544	10,4672	458	112	-66,5134	10,4741	481
30	-66,5648	10,4682	356	72	-66,5413	10,4675	474	113	-66,5172	10,4666	427
31	-66,5685	10,4698	361	73	-66,5424	10,4701	477	114	-66,5155	10,4629	409
32	-66,5725	10,4717	418	74	-66,5468	10,4728	337	115	-66,5297	10,4548	377
34	-66,5753	10,4710	382	75	-66,5457	10,4704	409	116	-66,5104	10,4647	417
35	-66,5738	10,4734	291	76	-66,5474	10,4684	308	117	-66,5058	10,4588	605

ID	Longitud (°)	Latitud (°)	Vs30 (m/s)	ID	Longitud (°)	Latitud (°)	Vs30 (m/s)	ID	Longitud (°)	Latitud (°)	Vs30 (m/s)
36	-66,5809	10,4758	353	77	-66,5603	10,4716	342	118	-66,5053	10,4641	324
37	-66,5819	10,4800	459	78	-66,5429	10,4736	488	119	-66,5255	10,4570	601
38	-66,5598	10,4681	472	79	-66,5399	10,4744	378	120	-66,5201	10,4606	496
39	-66,5418	10,4596	343	80	-66,5425	10,4764	404	121	-66,4889	10,4514	381
40	-66,5467	10,4636	336	81	-66,5430	10,4792	362	122	-66,4869	10,4516	545
41	-66,5459	10,4615	415	82	-66,5456	10,4792	389	123	-66,4852	10,4512	594
42	-66,5396	10,4624	353	83	-66,5454	10,4756	381	124	-66,4830	10,4517	419
43	-66,5377	10,4661	300	84	-66,5501	10,4786	397	125	-66,4818	10,4542	408
								126	-66,4848	10,4531	401

El tipo de suelo de la cuenca será clasificado según la descripción cualitativa de suelos de la norma COVENIN 1.756 (López et al., 2017) para la construcción de edificaciones sismo-resistentes (figura 5.4). Sin embargo, las clases utilizadas para el presente proyecto han sido modificadas con un criterio más conversador con respecto a las clases originales de la norma, quedando de la siguiente manera; microzonas "A/B" serán todas aquellas con $Vs30 > 650$ m/s (correspondiente a las clases de sitio BC, B, AB y A de la norma), microzona "C" con $Vs30$ de 400-650 m/s (correspondiente a la clase de sitio C de la norma), microzona "D" con $Vs30$ de 200-400 m/s (uniendo las clases CD y D de la norma), microzona "E" con $Vs30 < 200$ m/s (uniendo las clases DE y E de la norma) (figura 5.5).

CLASE	DESCRIPCIÓN CUALITATIVA	Vs30 (m/s)
A	Roca cristalina sana muy dura, sin fractura ni meteorización notable.	>1500
AB*	Propiedades intermedias entre las clases A y B	1300 a 1500
B	Roca muy dura o formación similar (e.g. conglomerados), con eventual fracturación y un mínimo de 5 metros de espesor de meteorización con Vs30≥350 m/s.	850 a 1300
BC*	Propiedades intermedias entre las clases B y C	650 a 850
C	1) Roca dura con espesor meteorizado de 5 metros 2) Roca blanda (e. g. margas) 3) Arenas o gravas muy densas 4) Arcillas muy duras	400 a 650
CD*	Propiedades intermedias entre las clases C y D	300 a 400
D	1) Arenas o gravas densas a medio-densas 2) Arcillas duras 3) Arcillas firmes de menor de 30 metros de espesor	200 a 300
DE*	Propiedades intermedias entre las clases D y E	170 a 200
E	1) Arenas sueltas o arenas limosas, con suficiente proporción de finos, no susceptibles de licuación 2) Arcillas blandas, plásticas (IP>20) u orgánicas, no incluidas en la Clase F	120 a 170
F**	Arenas o arenas limosas susceptibles de licuación***, arcillas sensibles, arcillas expansivas, suelos cementados colapsables, turbas o arcillas orgánicas de más de 3 metros de espesor, arcillas con índice de plasticidad IP>75 y más de 7 m de espesor, arcillas firmes o blandas con más de 30 m de espesor, rellenos artificiales con o sin pendiente y sitios con Vs30 menor a 120 m/s.	Variable: incluye el caso de Vs30 < 120

*Empléese también en caso de incertidumbre entre las clases adyacentes.

**Debe efectuarse el estudio de sitio y tomarse medidas especiales de fundación.

***Debe determinarse el potencial de licuación.

Figura 5. 4 Clasificación de suelos acorde a la nueva versión de la norma COVENIN 1.756 (López et al., 2017) para la construcción de edificaciones sismorresistentes.

CLASE	DESCRIPCIÓN CUALITATIVA	Vs30 (m/s)	
A	Roca cristalina sana muy dura, sin fractura ni meteorización notable.	>1500	
AB*	Propiedades intermedias entre las clases A y B	1300 a 1500	
B	Roca muy dura o formación similar (e.g. conglomerados), con eventual fracturación y un mínimo de 5 metros de espesor de meteorización con Vs30≥350 m/s.	850 a 1300	A/B Vs30 > 650 m/s
BC*	Propiedades intermedias entre las clases B y C	650 a 850	
C	1) Roca dura con espesor meteorizado de 5 metros 2) Roca blanda (e. g. margas) 3) Arenas o gravas muy densas 4) Arcillas muy duras	400 a 650	C Vs30 400 - 650 m/s
CD*	Propiedades intermedias entre las clases C y D	300 a 400	
D	1) Arenas o gravas densas a medio-densas 2) Arcillas duras 3) Arcillas firmes de menor de 30 metros de espesor	200 a 300	D Vs30 200 - 400 m/s
DE*	Propiedades intermedias entre las clases D y E	170 a 200	
E	1) Arenas sueltas o arenas limosas, con suficiente proporción de finos, no susceptibles de licuación 2) Arcillas blandas, plásticas (IP>20) u orgánicas, no incluidas en la Clase F	120 a 170	E Vs30 < 200 m/s
F**	Arenas o arenas limosas susceptibles de licuación***, arcillas sensibles, arcillas expansivas, suelos cementados colapsables, turbas o arcillas orgánicas de más de 3 metros de espesor, arcillas con índice de plasticidad IP>75 y más de 7 m de espesor, arcillas firmes o blandas con más de 30 m de espesor, rellenos artificiales con o sin pendiente y sitios con Vs30 menor a 120 m/s.	Variable: incluye el caso de Vs30 < 120	

*Empléese también en caso de incertidumbre entre las clases adyacentes.

**Debe efectuarse el estudio de sitio y tomarse medidas especiales de fundación.

***Debe determinarse el potencial de licuación.

Figura 5. 5 Ajuste de las clases de sitio de la clasificación de suelos acorde a la nueva versión de la norma COVENIN 1.756 (López et al., 2017) para la construcción de edificaciones sismorresistentes para las microzonas sísmicas en Guarenas – Guatire.

Los valores de Vs30 se encuentran dentro del rango de los 249 m/s (valor mínimo, correspondiente al tendido número 12), y 652 m/s, correspondiente al tendido número 22. La mayoría de valores de velocidad se encuentra entre los 300 y 500 m/s, y la distribución general de los mismos se observa en la figura 5.6.

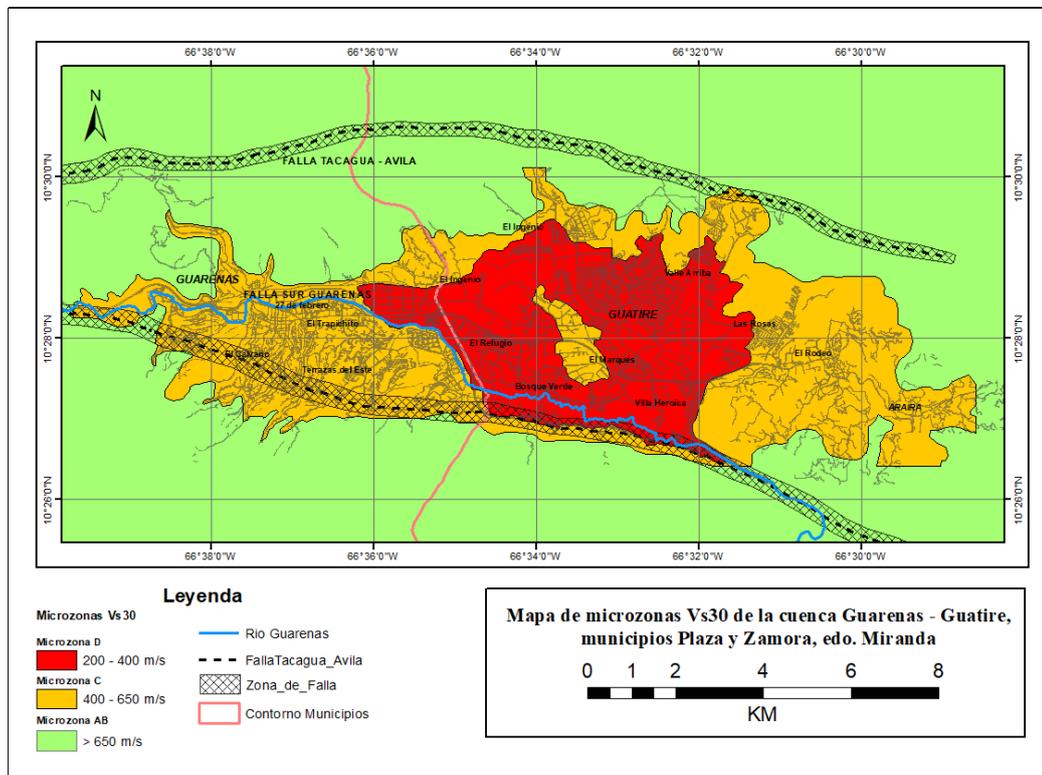


Figura 5. 6 Mapa de Vs30 integrado de la cuenca de Guarenas - Guatire.

Por su parte, la figura 5.7 muestra la distribución de Vs30 en el municipio Zamora. Se observa predominancia de velocidades en el rango de los 200 a 400 m/s (clase D modificada) en gran parte de la cuenca, habiendo una zona de mayores velocidades (clase C) en la zona centro – oeste, que abarca el Marqués Alto y la sección este de El Refugio.

A manera general se observa que la distribución de Vs30 correspondiente a la clase “C” modificada se distribuye en todos los flancos o “bordes” de la cuenca, con

presencia significativa en la sección este del mapa, incluyendo las zonas denominadas “Las Casitas”, “Las Rosas”, “El Rodeo”, y toda la parroquia de Araitha. La zona correspondiente a la clase D modificada abarca la zona de Castillejo casi en su totalidad, parte de El Ingenio, El Marqués, Bosque Verde, Villa Heroica y parte de El Refugio. La clase A/B modificada de la norma predomina en la zona exterior del valle de la cuenca sedimentaria, correspondiente a zonas montañosas y de pendiente abrupta.

Se extendió la delimitación del flanco sur de la clase D modificada siguiendo la línea trazada por la falla Sur Guarenas, siendo éste una de las estructuras más importantes de la cuenca. Por su parte, el segmento de falla Tacagua – Ávila que se extiende sobre el norte de la cuenca no tiene mayor influencia sobre la delimitación de zonas en función del V_s30 , ya que la misma atraviesa zonas montañosas y apenas atraviesa alguna zona poblada de la cuenca. Otro aspecto destacable del mapa sería el curso del Río Guarenas a través del valle de Guatire, que, como sería de esperar se encuentra dentro de la zona de menores velocidades de V_s , correspondiente a la clase D modificada de la norma.

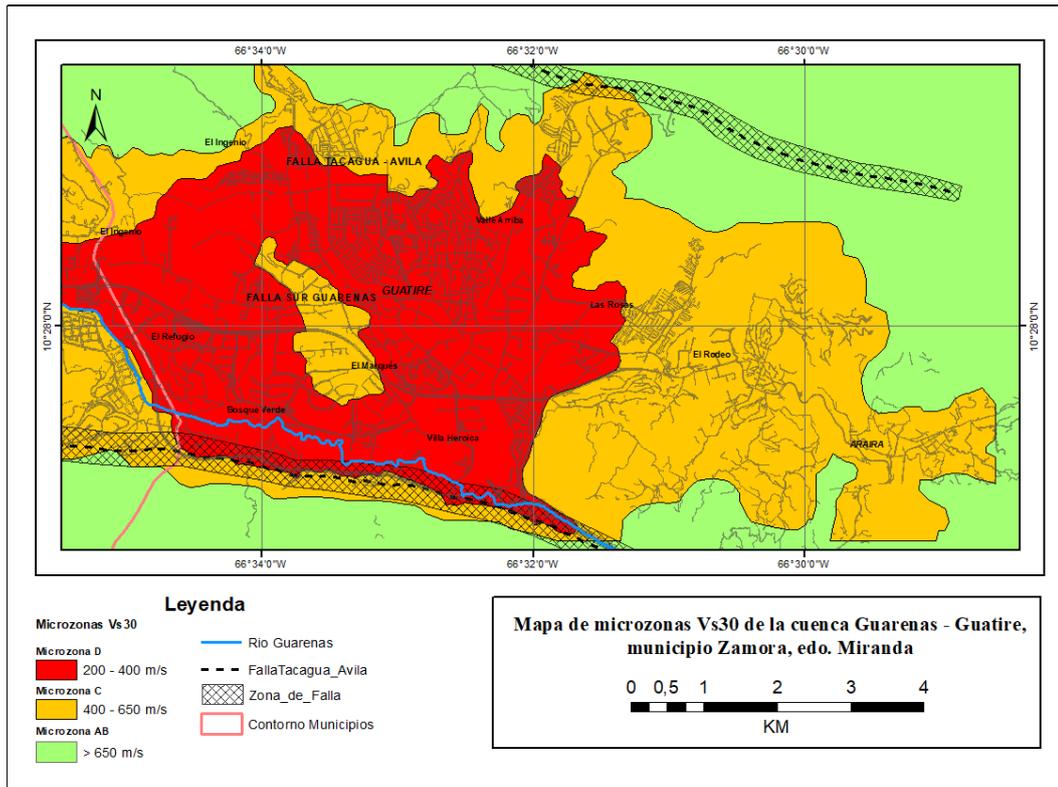


Figura 5. 7 Mapa de Vs30 integrado del municipio Zamora de la cuenca de Guarenas – Guatire.

Además del mapa de distribución de Vs30 en la cuenca, se realizó un mapa de Vs30 “topográfico” (figura 5.8), a partir de valores de pendiente topográfica haciendo uso de la expresión 4.1. En este mapa se puede observar una distribución general de los valores de Vs30 topográficos con una resolución de 9”, lo cual se refiere al tamaño de celda (270 por 270 metros). Las ubicaciones cuya velocidad excediesen los 800 m/s son descartados y se muestran en el mapa como espacios en blanco. El mapa de Vs30 topográfico se realiza con la finalidad de comparar la distribución de velocidades obtenidas en los trabajos de adquisición, y las velocidades generadas a partir de la inversión matemática con datos de topografía y de esta manera poder ampliar el mapa integrado a zonas sin acceso para mediciones. Dicho esto, realizado un análisis cuantitativo se puede observar que la distribución se velocidades se asemeja en gran medida al mapa de Vs30 con datos de IMASW, ubicándose los valores más bajos de velocidad en la zona central de la cuenca, siguiendo el flujo de corriente de los ríos que atraviesan la cuenca que se evidencia (aunque en menor medida) en el mapa de Vs30 de IMASW. Como sería de esperar, los valores más

elevados de Vs30 se ubican en la parte externa de la cuenca, correspondiente a zonas montañosas y de pendiente abrupta.

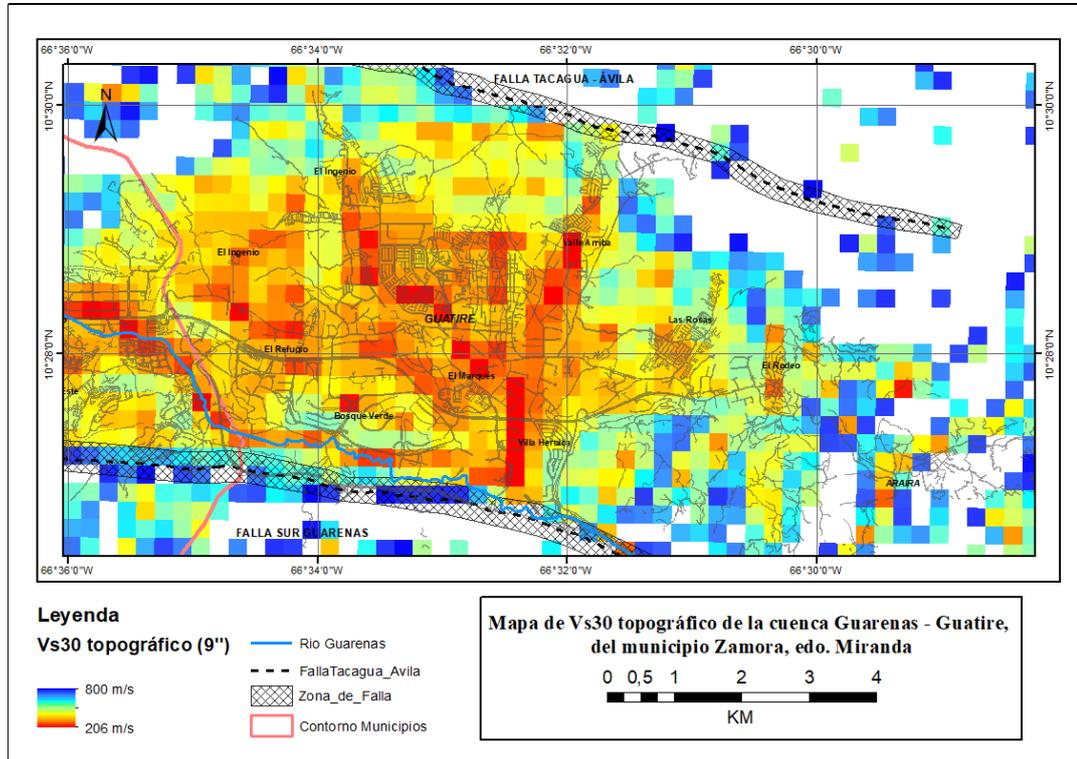


Figura 5. 8 Mapa de Vs30 topográfico (9'' resolución) del municipio Zamora de la cuenca de Guarenas - Guatire.

5.4 Espesor sedimentario de la cuenca

Además de los mapas de Vs30 generador con datos de IMASW, la realización del mapa de microzonas sísmicas requiere de un mapa de espesor sedimentario de la cuenca creados a partir de valores de periodo fundamental obtenidos con el método H/V (figuras 5.9, 5.10 y 5.11). Los valores de periodo fundamental y espesor sedimentario se encuentran en la tabla 5.2. Los gráficos de la relación espectral H/V del resto de puntos adquiridos se encuentra en la sección de apéndices, correspondientes a las figuras A.2.1 hasta A.2.19. Nuevamente, la simbología GT00x corresponde a los puntos de adquisición realizados dentro del municipio Zamora, mientras que la simbología GR0x se refiere a los puntos de adquisición

realizados en el municipio Plaza en conjunto con Moreno (2021) utilizados para generar el mapa general de la cuenca de Guarenas – Guatire.

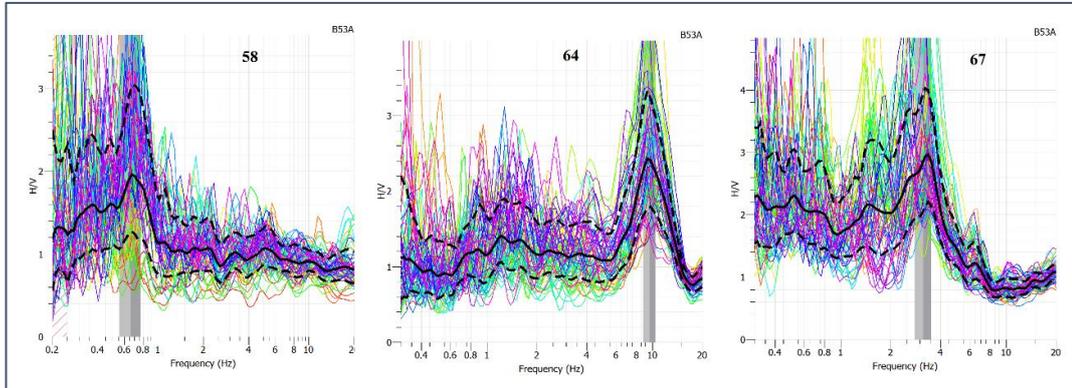


Figura 5. 9 Ejemplo de la relación espectral H/V de los puntos 58, 64 y 67.

La tabla 5.2 contiene los valores de frecuencia, periodo, velocidad de ondas de corte utilizado y espesor resultante en cada punto de medición obtenido con la fórmula de Kramer (expresión 3.1). El periodo mostrado en la tabla es el resultado de la inversión de datos H/V, y la velocidad de ondas de corte que se utilizó para los cálculos corresponde al modelo de García (2012) para sedimentos Pleistocénicos (Fm. Guatire, figura 1.8B).

Tabla 5. 2 Coordenadas, frecuencia, periodo, Vs y periodo de los puntos de adquisición del método H/V

ID	Long (°)	Lat (°)	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	Vs (m/s)	Espesor (m)
GT041	-66,5459	10,4615	0,666	1,502	750	282
GT043	-66,5377	10,4661	0,457	2,188	750	410
GT044	-66,5309	10,4635	0,594	1,684	750	316
GT045	-66,5363	10,4629	0,563	1,776	750	333
GT046	-66,5499	10,4648	0,500	2,000	750	375
GT058	-66,5532	10,4840	0,661	1,513	750	284
GT064	-66,5658	10,4988	9,567	0,105	750	24
GT065	-66,5611	10,4809	2,700	0,370	750	69
GT066	-66,5608	10,4770	3,238	0,309	750	58
GT067	-66,5574	10,4752	1,600	0,625	750	117

ID	Long (°)	Lat (°)	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	Vs (m/s)	Espesor (m)
GT070	-66,5564	10,4681	0,542	1,845	750	346
GT071	-66,5544	10,4672	0,525	1,905	750	357
GT074	-66,5468	10,4728	0,446	2,242	750	420
GT075	-66,5457	10,4704	0,469	2,132	750	400
GT080	-66,5425	10,4764	0,435	2,299	750	431
GT090	-66,5391	10,4790	0,461	2,169	750	407
GT097	-66,5316	10,4790	0,708	1,412	750	265
GT115	-66,5297	10,4548	5,075	0,197	750	37
GT116	-66,5104	10,4647	3,158	0,317	750	71
GT118	-66,5053	10,4641	3,196	0,313	750	70
GR002	-66,6111	10,4625	0,901	1,110	750	208
GR008	-66,6068	10,4636	1,201	0,833	750	156
GR009	-66,6040	10,4632	1,205	0,830	750	156
GR010	-66,5999	10,4630	1,200	0,834	750	156
GR012	-66,6000	10,4661	1,211	0,826	750	155
GR013	-66,6046	10,4666	1,194	0,837	750	157
GR018	-66,6096	10,4664	1,059	0,944	750	177
GR020	-66,6066	10,4730	1,039	0,963	750	181
GR021	-66,6108	10,4721	1,025	0,976	750	183
GR022	-66,6145	10,4716	1,034	0,967	750	181
GR027	-66,5959	10,4642	1,183	0,845	750	159
GR028	-66,5901	10,4644	1,177	0,849	750	159
GR029	-66,6215	10,4751	1,204	0,831	750	156
GR030	-66,6175	10,4755	1,184	0,844	750	158
GR031	-66,6122	10,4769	1,194	0,837	750	157
GR033	-66,6005	10,4743	2,832	0,353	750	66
GR035	-66,6284	10,4703	1,214	0,824	750	154
GR036	-66,6233	10,4721	1,231	0,812	750	152
GR039	-66,5860	10,4588	3,776	0,265	750	50
GR043	-66,5958	10,4736	1,208	0,828	750	155
GR044	-66,5897	10,4744	1,213	0,824	750	155
GR045	-66,5928	10,4689	1,200	0,833	750	156
GR046	-66,5917	10,4561	1,180	0,848	750	159
PozoFV	-66,5430	10,4630				217

Primeramente se realizó un mapa integral de toda la cuenca de Guarenas – Guatire (figura 5.10), dónde se observa la distribución general de espesor de sedimentos, encontrándose la zona de mayor espesor en la sección centro – este de la cuenca, perteneciente al municipio Zamora, con profundidades mayores a 250 m. Se aprecia

una disminución de espesores hacia el centro de la cuenca que aumenta significativamente en la zona perteneciente al municipio Plaza. Se podría dividir entonces en función del espesor de sedimentos a la cuenca de Guarenas – Guatire en dos sub cuencas (sub cuenca de Guarenas y sub cuenca de Guatire).

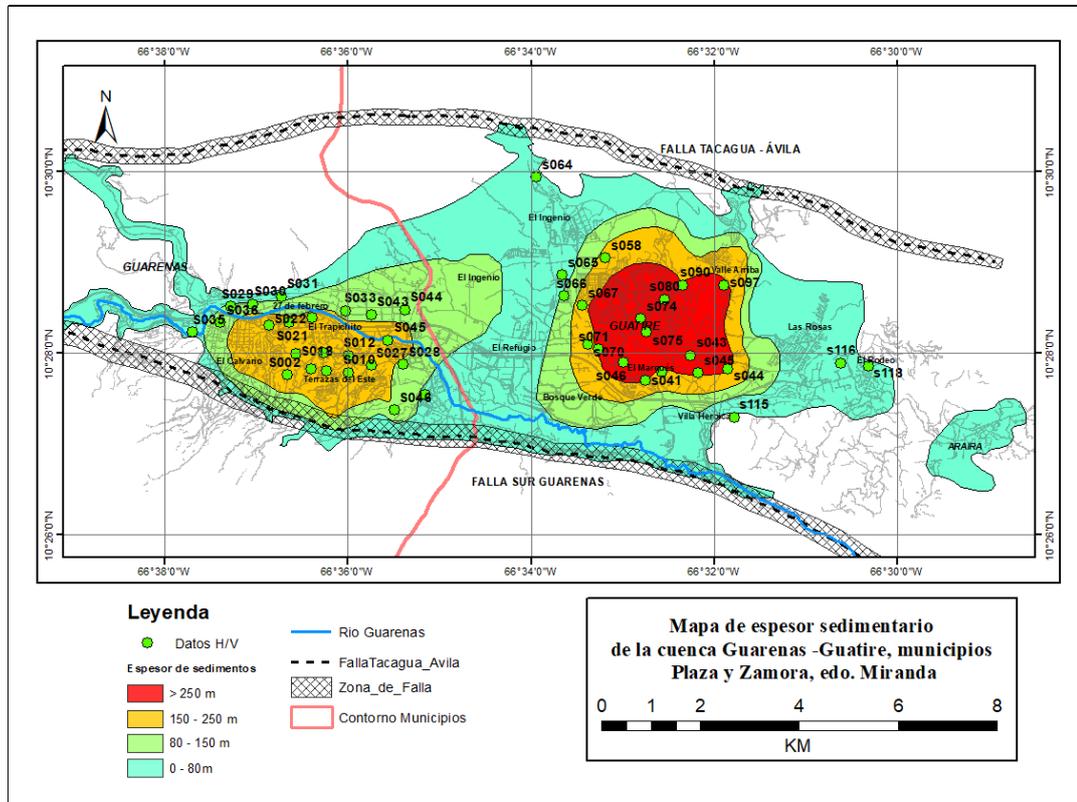


Figura 5. 10 Mapa de espesor de sedimentos de la cuenca de Guarenas - Guatire.

La figura 5.11 corresponde al mapa de espesor sedimentario de la cuenca en la zona perteneciente al municipio Zamora. El mayor espesor se ubica en lo que podría considerarse como la zona central de la sub – cuenca de Guatire, con espesores mayores a 250 metros, abarcando el casco central y parte de Castillejo. En la parte externa de dicha zona disminuye el espesor sedimentario ubicándose entre los 150 y 250 metros, abarcando parte de las zonas de Valle Arriba, Castillejo y El Marqués. Seguidamente se encuentra una zona con espesores en el rango de los 80 – 150 metros, que contiene las zonas de Bosque verde, parte de El Refugio, Valle Verde y Marqués Alto. Por último, la zona de menor espesor sedimentario con un rango

de 0 – 80 metros, cubriendo toda la parte externa de la cuenca, incluyendo la parroquia de Araira. Las zonas dentro de este rango de espesores corresponden a parte de El Refugio, Villa Heroica, Las Rosas, Las Casitas, El Rodeo, parte de Valle Arriba, y El Ingenio.

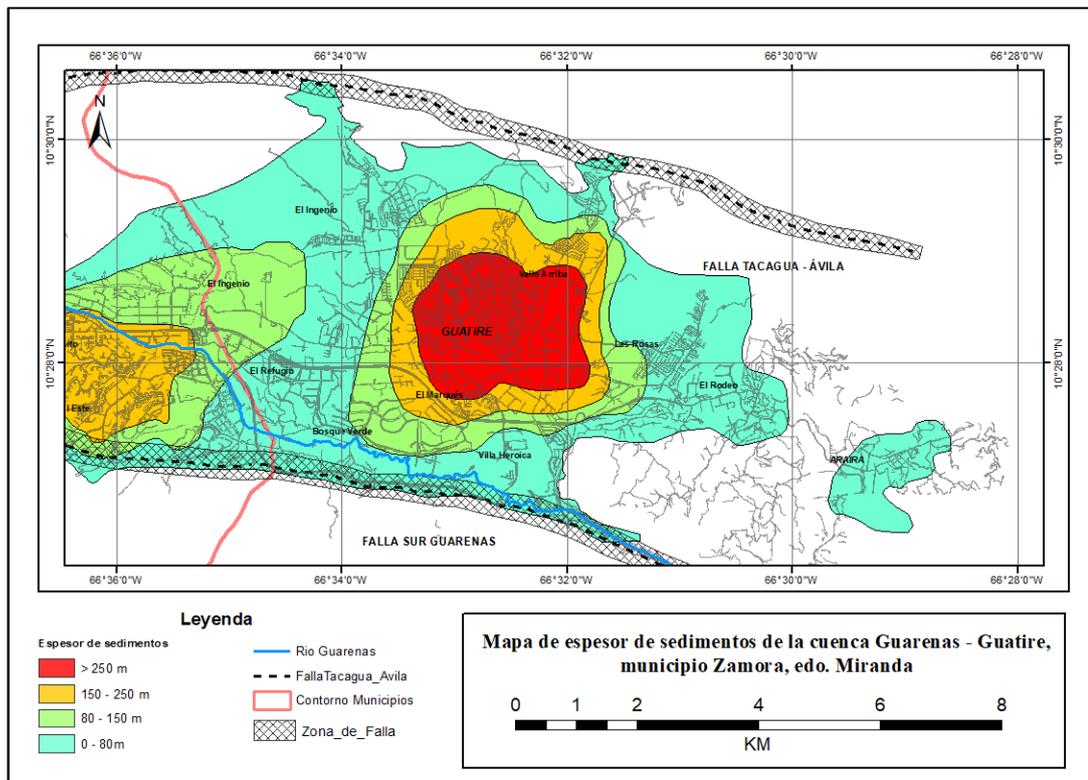


Figura 5. 11 Mapa de espesor de sedimentos del municipio Zamora de la cuenca de Guarenas - Guatire.

5.5 Mapa de microzonas sísmicas

Finalmente, tras la integración de los mapas de Vs30 y mapa de espesor sedimentario se creó el mapa de microzonas sísmicas de la cuenca Guarenas – Guatire (figura 5.12). Este mapa representa la superposición de los dos mapas mencionados con anterioridad, y los límites de las microzonas se ajustaron en función de los límites urbanos (dónde fuese posible, sin distorsionar lo originalmente propuesto) y las estructuras / formaciones geológicas.

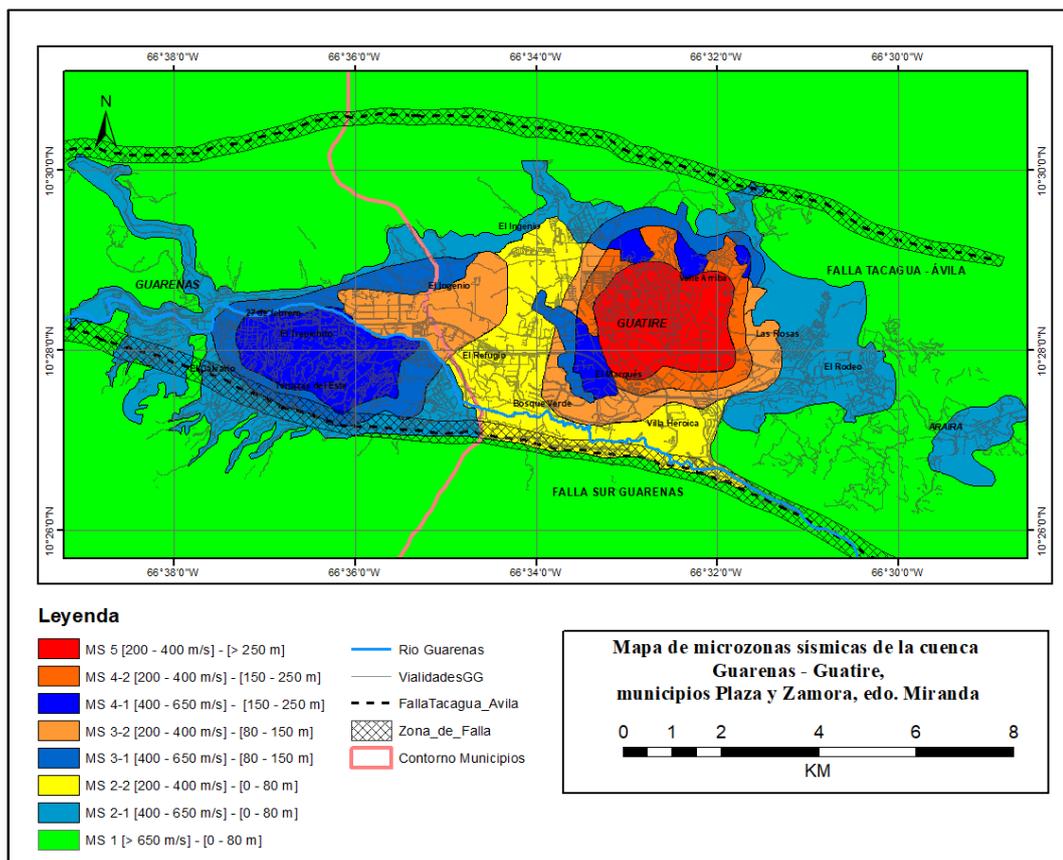


Figura 5. 12 Mapa de microzonas sísmicas de la cuenca de Guarenas - Guatire.

La figura 5.13 corresponde al mapa de microzonas sísmicas del municipio Zamora, parroquias Guatire y Araira. Para fines de identificación de las zonas pertenecientes a cada clase se incluye la figura 5.14 que representa el mapa de microzonas sísmicas con transparencia sobre el mapa geográfico del municipio Zamora.

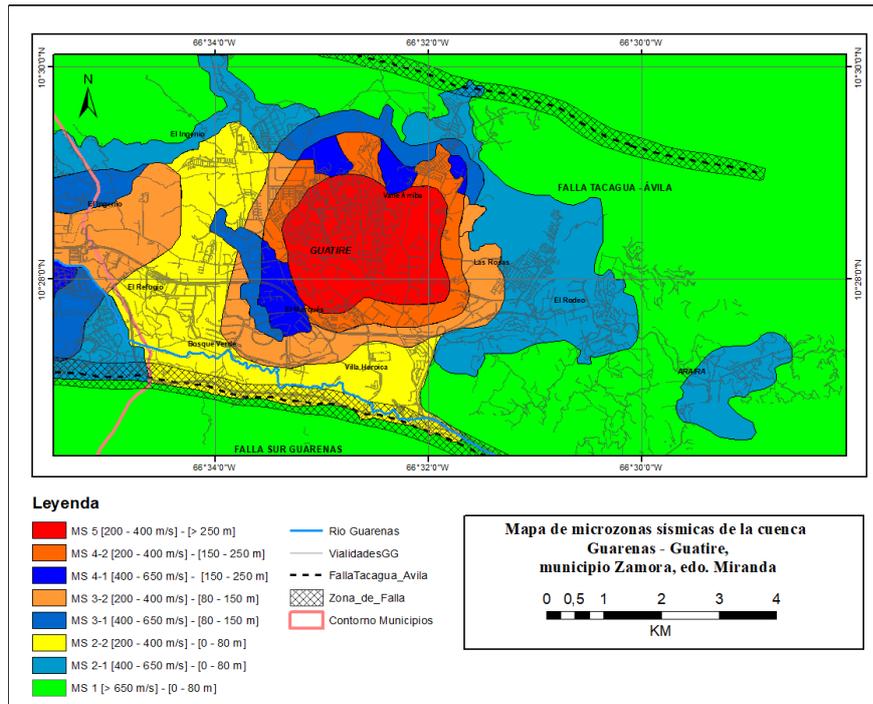


Figura 5. 13 Mapa de microzonas sísmicas del municipio Zamora de la cuenca de Guarenas - Guatire

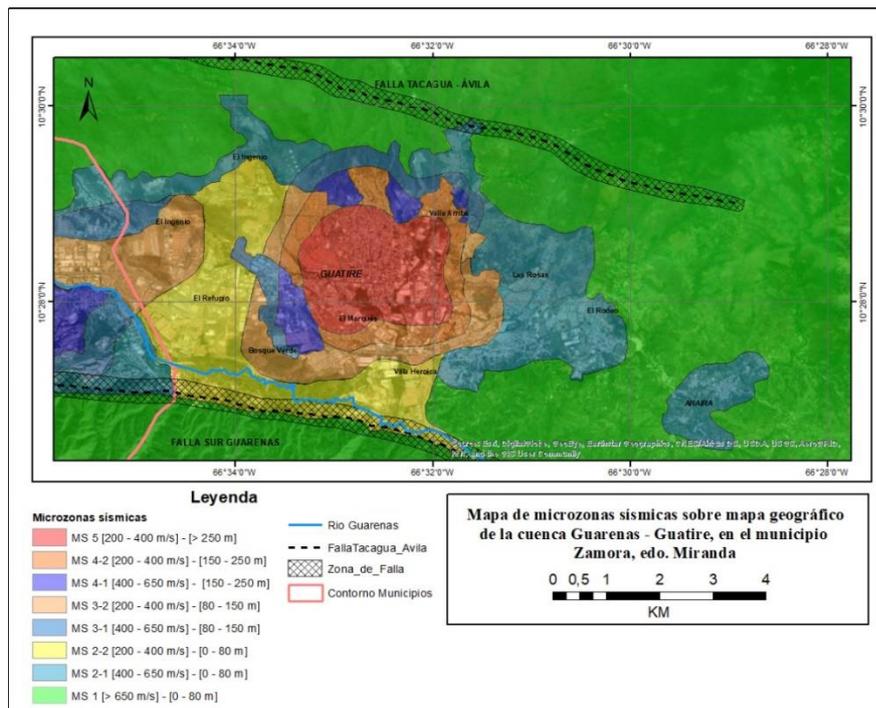


Figura 5. 14 Mapa de microzonas sísmicas del municipio Zamora de la cuenca de Guarenas - Guatire, superpuesto sobre el mapa geográfico del municipio Zamora.

La figura 5.15 muestra la extensión de la MS 1 en los municipios Plaza y Zamora, donde dada la información proporcionada por el mapa de Vs30 topográfico (figura 4.16) no se aprecian valles o cuencas que posean velocidades de ondas de corte inferiores a 650 m/s o espesores sedimentarios mayor a 80 metros.

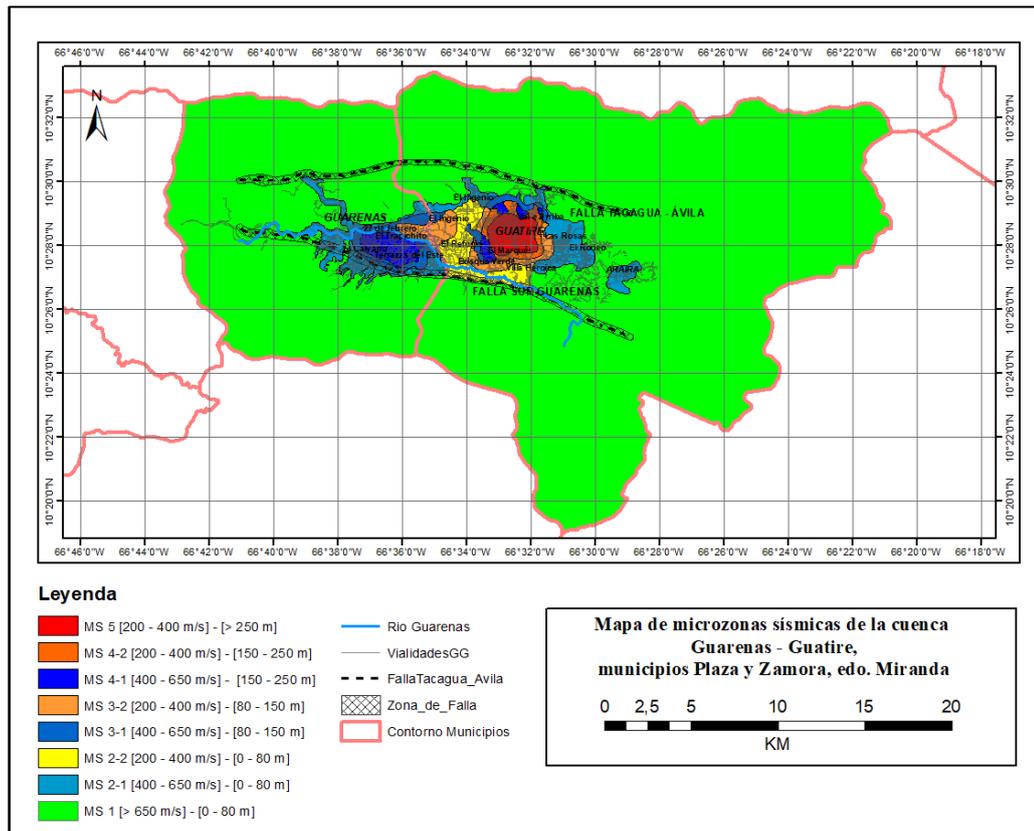


Figura 5. 15 Mapa de microzonas sísmicas del municipio Zamora de la cuenca de Guarenas - Guatire, superpuesto sobre el mapa geográfico de los municipios Plaza y Zamora.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Finalizado el desarrollo de los análisis con respecto a la microzonificación sísmica del municipio Zamora de la cuenca de Guarenas – Guatire, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

Los métodos de sísmica pasiva representan una alternativa de bajo costo y eficaces con respecto a los métodos activos que usualmente requieren de mayor inversión de tiempo y equipos que podrían perturbar el libre desenvolvimiento de las actividades rutinarias de la comunidad.

Los periodos fundamentales obtenidos en la cuenca a través del método H/V oscilan entre los 0,1 y 2,3 s, rango de valores que concuerdan con lo establecido en el capítulo III con respecto a las características de los microtemores.

La cuenca de Guarenas – Guatire puede considerarse como la integración de dos sub – cuencas, (como su nombre lo indica, sub cuenca de Guarenas y sub cuenca de Guatire), con espesores sedimentarios que se encuentra en el orden de los 150 – 250 metros máximo para la zona de Guarenas y espesores mayores a 250 metros para Guatire, separadas por un estrecho de profundidades en el rango de los 0 – 80 metros.

La integración de información de proyectos e investigaciones previas del área de estudio permite desarrollar un mejor criterio para el análisis y la proyección de la cuenca a la hora de modelarla con nuevos datos.

La ciudad de Guatire podría considerarse como una zona de moderada – alta amenaza sísmica, debido a que el casco central se encuentra sobre la zona de mayor

espesor sedimentario y menor valor de Vs30 de la cuenca. Se observa además un desconocimiento general del riesgo sísmico y conceptos derivados del tema en la población. La parroquia de Araira, por su parte, podría considerarse de amenaza moderada debido a que se encuentra sobre una parte de la cuenca de mayor estabilidad en cuanto al subsuelo.

Se recomienda tomar en cuenta las características geológicas de la zona de estudio para la planificación de la adquisición de datos, otorgando mayor relevancia a la calidad de datos, por encima de la cantidad, además de ubicar puntos estratégicos para mayor cubrimiento del área.

REFERENCIAS

- Alban, C., & Villamizar, J. (2011). *Inspecciones de estructuras para la evaluación sismorresistente (Vivienda Popular #1)*. (Informe Técnico de Pasantía), Departamento de Ingeniería Sísmica, FUNVISIS.
- Allen, T., & Wald, D. (2009). On the use of High-Resolution Topographic Data as proxy for seismic site conditions (V_{s30}). *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 99, No. 2A, 935-943.
- Amarís, E. (2006). *Estudio geofísico de la zona de expansión este de la ciudad de Caracas (municipio Sucre y municipio Plaza)*. (Trabajo Especial de Grado), Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Amarís, E., Moncada, J., & Schmitz, M. (2011). Modelo gravimétrico del basamento de la cuenca de Guarenas y Guatire estado Miranda, Venezuela. Memorias en CD, 4 pp.
- Araujo, Y., Mandujano, M., & López, I. (2011). *Inspecciones de estructuras para la evaluación sismorresistente (Centros de salud)*. (Informe Técnico de Pasantía), Departamento de Ingeniería Sísmica, FUNVISIS.
- Audemard, F. A., Machette, M., Cox, J., Dart, R., & Haller, H. (2000). Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Venezuela and its Offshore Regions. *USGS Open-File report 00-0018*(accesible from USGS web page; open-File reports ofr -00-0018).
- Barboza, L., & Rodríguez, S. (2001). *Integración de la geología del Estado Vargas y del flanco sur del Macizo del Ávila al norte de Caracas*. (Trabajo Especial de Grado), Universidad Central de Venezuela, Caracas.

- Bard, P. Y. (1999). Microtremor measurements: a tool for site effect estimation? *The Effects of Surface Geology on Seismic Motion - Recent progress and new Horizon on ESG Study, Vol. 3, Balkema, Rotterdam*, 1251-1279.
- Bell, J. (1972). Geotectonic evolution of the southern Caribbean area. *Geological Society of America Memoir, 132*, 369-386.
- Borcherdt, R. D. (1994). Estimates of Site-Dependent Response Spectra for Design (Methodology and Justification). *Earthquake Spectra, 10(4)*, 617-653.
- Borcherdt, R. D. (2012). *VS30 – A Site-Characterization Parameter for Use in Building Codes, Simplified Earthquake Resistant Design, GMPEs, and ShakeMaps*. Paper presented at the 15th World Conf. on Earthquake Engineering (15 WCEE Lisboa).
- BSSC. (2003). *NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures (FEMA 450)*. Building Seismic Safety Council (BSSC), NIBS, Washington.
- Curtis, A., Gerstoft, P., Sato, H., Snieder, R., & Wapenaar, K. (2006). Seismic interferometry - turning noise into signal. *The Leading Edge, 25(9)*, 1082-1092.
- Dal Moro, G. (2015). *Surface Waves Analysis for Near Surface Applications*. Elsevier, 23-55.
- De Abreu, J., & Fuentes, J. (2011). *Inspecciones de estructuras para la evaluación sismorresistente (Viviendas Formales)*. (Informe Técnico de Pasantía), Departamento de Ingeniería Sísmica, FUNVISIS.

- Escobar, V. (2019). *Estudio de la velocidad de ondas de corte mediante análisis multicanal de ondas superficiales en la ciudad de Maracay*. (Trabajo de Grado), Universidad Simón Bolívar, Caracas.
- Everett, M. E. (2013). *Near-Surface Applied Geophysics*. Cambridge University Press, New York, 182-197.
- Gallo, L., Arango, S., Cruz, A., & Thomson, P. (2017). *Evaluación de los efectos de sitio con la técnica de cocientes espectrales a partir de vibraciones ambientales*. VIII Congreso Nacional de Ingeniería sísmica, Barranquilla, Colombia.
- García, K. (2012). *Caracterización geofísica en Guarenas-Guatire mediante la aplicación de técnicas de arreglos de vibraciones naturales*. (Trabajo Especial de Grado), Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Gil, C., & Yaselli, O. (2011). *Inspecciones de estructuras para la evaluación sismorresistente (Viaductos y Puentes)*. (Informe Técnico de Pasantía), Departamento de Ingeniería Sísmica, FUNVISIS.
- Hecht, J. (2005). *Caracterización Geofísica mediante estudios de ruido sísmico ambiental y gravimétricos del municipio Zamora (Guatire), estado Miranda.*, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Hobiger, M., Cornou, C., Wathelet, M., Giulio, G. D., Knapmeyer-Endrun, B., Renalier, F., Bard, P. Y., Savvaidis, A., Hailemikael, S., Le, B. N., Ohrnberger, M., & Theodoulidis, N. (2013). Ground structure imaging by inversions of Rayleigh wave ellipticity: sensitivity analysis and application to European strong-motion sites. *Geophysical Journal International*, 192 (1), 207-229.

- Huang, H., & Tseng, Y. (1999). Characteristics of soil liquefaction using H/V of microtremors in Yuan-Lin area, Taiwan. *TAO*, 13(3), 325-338.
- Kramer, S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, Inc. 653p.
- Lermo, J., & Chávez-García, F. J. (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. *BSSA*, 83, 1574-1594.
- López, O. A., Hernández, J. J., Jácome, J., Schmitz, M., Marinilli, A., Coronel, D., Morillo, M. M., & Márquez, B. (2017). Norma venezolana para construcciones sismorresistentes. XI CONVESIS, Caracas, del 17 al 19 de julio de 2017, Resumen in Extenso, CONV-090, 12 pp.
- Miró, C., & Viète, H. (2009). *Estudio Neotectónico de la cuenca Guarenas-Guatire*. (Trabajo especial de grado), Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Morales, C., Hernández, J. J., Schmitz, M., Cano, V., & Tagliaferro, M. (2011). Velocidades promedios de ondas de corte en los primeros 30 m de profundidad (V_{s30}), inferidas a partir del relieve en el área metropolitana de Caracas. *Revista de la Facultad de Ingeniería UCV*, 26, 5-6.
- Morales, J., & Pompei, R. (2011). *Inspecciones de estructuras para la evaluación sismorresistente (Viviendas Popular #2)*. (Informe Técnico de Pasantía), Departamento de Ingeniería Sísmica, FUNVISIS.
- Morejon, G., López, A., Berenguer, Y., Leyva, K., Villalón, M., Rengel, J., González, O., Álvarez, L., & Schmitz, M. (2014). Evaluación de riesgo sísmico del fondo habitacional de las ciudades Guarenas y Guatire. *Revista de la Facultad de Ingeniería UCV*, 29(3), 37-50.

- Moreno, P. (2021). *Microzonificación sísmica del municipio Plaza de la cuenca Guarenas - Guatire mediante el método IMASW y la relación espectral H/V*. (Trabajo de grado por publicar), Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Morfe, J. (2011). *Simulación del campo de ondas sísmicas y caracterización de amplitud y período con fines de microzonificación para las ciudades Guarenas-Guatire*. (Trabajo Especial de Grado, Maestría en Geofísica), Universidad Central de Venezuela, Caracas-Venezuela,.
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *QR of RTRI*, 30(1).
- Noda, F. (2008). *Estudio geofísico a lo largo de la ruta del ferrocarril Caracas-Guarenas-Guatire*. (Trabajo Especial de Grado), Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Nogoshi, M., & Igarashi, T. (1971). On the amplitude characteristics of microtremor, Part 2. *J. Seism. Soc. Japan*, 24(In japanese with english abstract).
- Okada, H. (2003). The Microtremor Survey Method. *Geophysical Monograph Series*, 12, 65-66.
- Ólafsdóttir, E. Á. (2014). Multichannel Analysis of Surface Waves: Methods for Dispersion Analysis of Surface Wave Data. *University of Iceland, Faculty of Civil and Environmental Engineering*, 15-52.
- Park, C., Miller, R., Xia, J., & Ivanov, J. (2007). Multichannel analysis of surface waves (MASW) - active and passive methods. *The Leading Edge*, 26(1), 60-64.

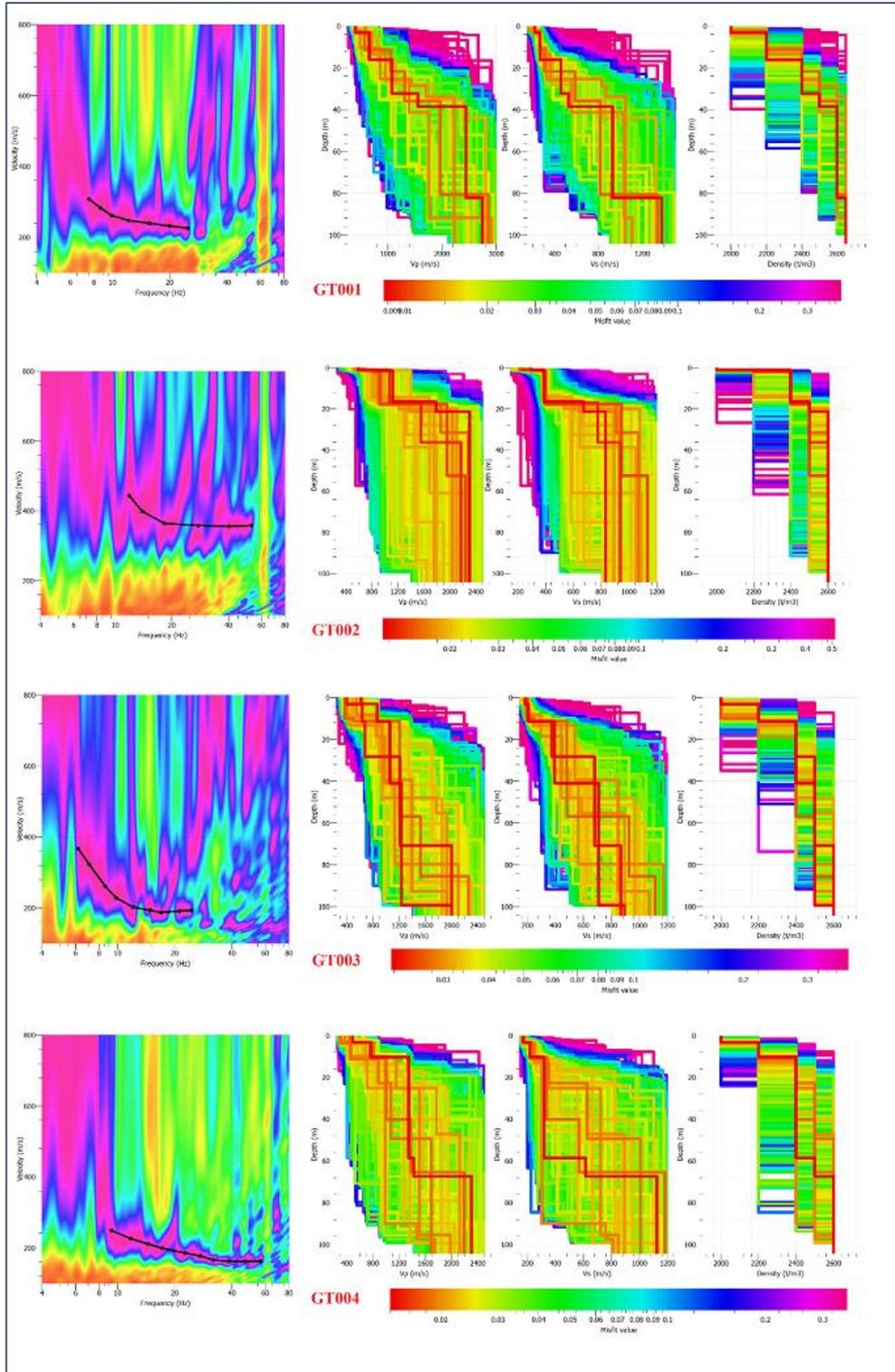
- Peralta, J. A., Reyes, P., & Godínez, A. (2009). El fenómeno de la resonancia. *Revista Latinoamericana de física educativa*, 3(3), 612-618.
- Picard, X. (1976). Geología de la Cuenca Guarenas-Guatire, sedimentación continental intracordillerana. *Mem. Bol. Geol., Publicación Especial*, 7(2), 965-984.
- Picard, X., & Pimentel, N. (1968). Geología de la cuenca Santa Lucía-Ocumare del Tuy. *Bol. Geol.*, 10(19), 263-296.
- Rodríguez, S. (2005). *Caracterización geofísica mediante estudios de ruido sísmico ambiental y gravimétrico del municipio Plaza, Guarenas, estado Miranda*. (Trabajo especial de grado), Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Rodríguez, L., Cano, V., & Alvarado, L. (2010). *Revisión de los Sistemas de Fallas Sismogénicos en la Región Central. Aportes a la Base de Datos de Amenaza Sísmica Preexistente. Versión Preliminar*. Informe Técnico FUN-010, 2010. Interno.,
- Rodríguez, L., López, O. A., Morales, C., Gonzalez, J., Singer, A., Noda, F., Garcia, K., Schmitz, M., Audemard, F., Moncada, J., Quinteros, C., Paolini, M., Rada, F., Reinoza, C., Olbrich, F., Viete, H., Miro, C., & Colon, S. (2011). *Estudio de amenaza sísmica, procesos geomorfológicos activos y estimación de los efectos de sitio para el proyecto del tren Caracas - Guarenas – Guatire, Informe Técnico Final.*, Informe inédito, FUNVISIS, FUN-026.
- Rodríguez, L., Ollarves, R., Audemard, F., Singer, A., Colón, S., Miró, C., & Viete, H. (2016). Estudio paleosísmico en la traza activa de la falla El Ávila, Santa Rosa, Caracas, Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 57(1).

- Schmitz, M., Álvarez, L., Morejon, G., García, K., López, A., Berenguer, Y., Leyva, K., Villalón, M., Vega, I., Rengel, J., Aguilar, A., Aguilar, I., Alvarado, L., Amarís, E., Ascanio, W., Audemard, F., Betancourt, A., González, J., González, O., Guasch, F., Leal, A., Miró, C., Morales, C., Morfe, J., Olbrich, F., Oliva, R., Páez, V., Rendón, H., Rodríguez, L., Rojas, R., Singer, A., Tagliaferro, M., Valleé, M., Viete, H., & Zapata, J. (2012). *Microzonificación sísmica para la planificación urbana y la gestión local de riesgo de las ciudades en los ejes de desarrollo: Caso piloto Guarenas y Guatire. Continuación del proyecto anterior y estudios comparativos en Santiago de Cuba.* (Informe técnico final), FUNVISIS, Caracas, FUN 04-2012, 414 pp.
- Schmitz, M., Hernández, J. J., Morales, C., Domínguez, J., Rocabado, V., Valleé, M., Tagliaferro, M., Delavaud, E., Singer, A., Amarís, E., Molina, D., González, M., & Leal, V. (2011). Principales resultados y recomendaciones del proyecto de microzonificación sísmica en Caracas. *Revista de la Facultad de Ingeniería UCV*, 26 (2), 113-127.
- Soto, D., & Henriques, C. (2011). *Inspecciones de estructuras para la evaluación sismorresistente (Patrimoniales y Primera Asistencia).* (Informe Técnico de Pasantía), Departamento de Ingeniería Ssmica, FUNVISIS.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., & Keys, D. A. (1976). *Applied Geophysics.* Cambridge University Press(Londres), 877.
- Tsige, M., & García Flórez, I. (2006). Propuesta de clasificación geotécnica del “Efecto Sitio” (Amplificación Sísmica) de las formaciones geológicas de la Región de Murcia. *Geogaceta*, 40, 39-42.
- Urbani, F. (2000). Revisión de las unidades de rocas ígneas y metamórficas de la Cordillera de la Costa. *Caracas, Venezuela. U.C.V. Geos*, 33, 1 - 170.

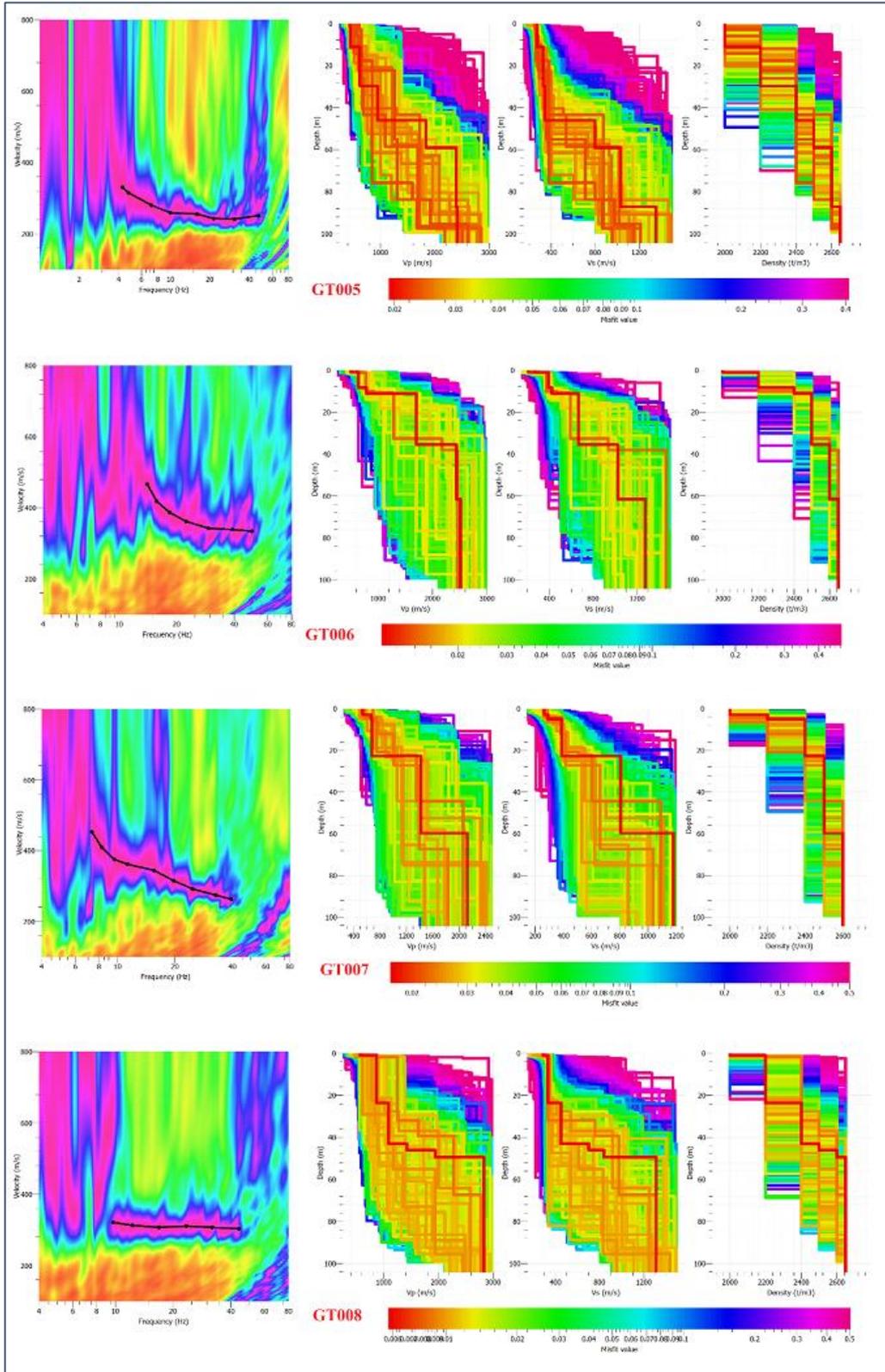
- Urbani, F., & Rodríguez, J. A. (2004). Atlas geológico de la Cordillera de la Costa, Venezuela. *Edic. Fundación Geos., U.C.V., ediciones en CD-rom, numeo 1, Caracas, ix + 146 mapas a escala 1:25.000.*
- Wapenaar, K., Draganov, D., Snieder, R., Campman, X., & Verdel, A. (2010). Tutorial on seismic interferometry: Part 1-Basic principles and applications. *Geophysics, 75(5), 75A195-175A209.*
- Wehrmann, M. (1972). Geología de la región Guatire-Colonia Tovar. *Bol. Geol., 5(4), 2093-2119.*
- Xia, J., Miller, R. D., & Park, C. B. (1999). Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. *Geophysics, 64.*

APÉNDICES

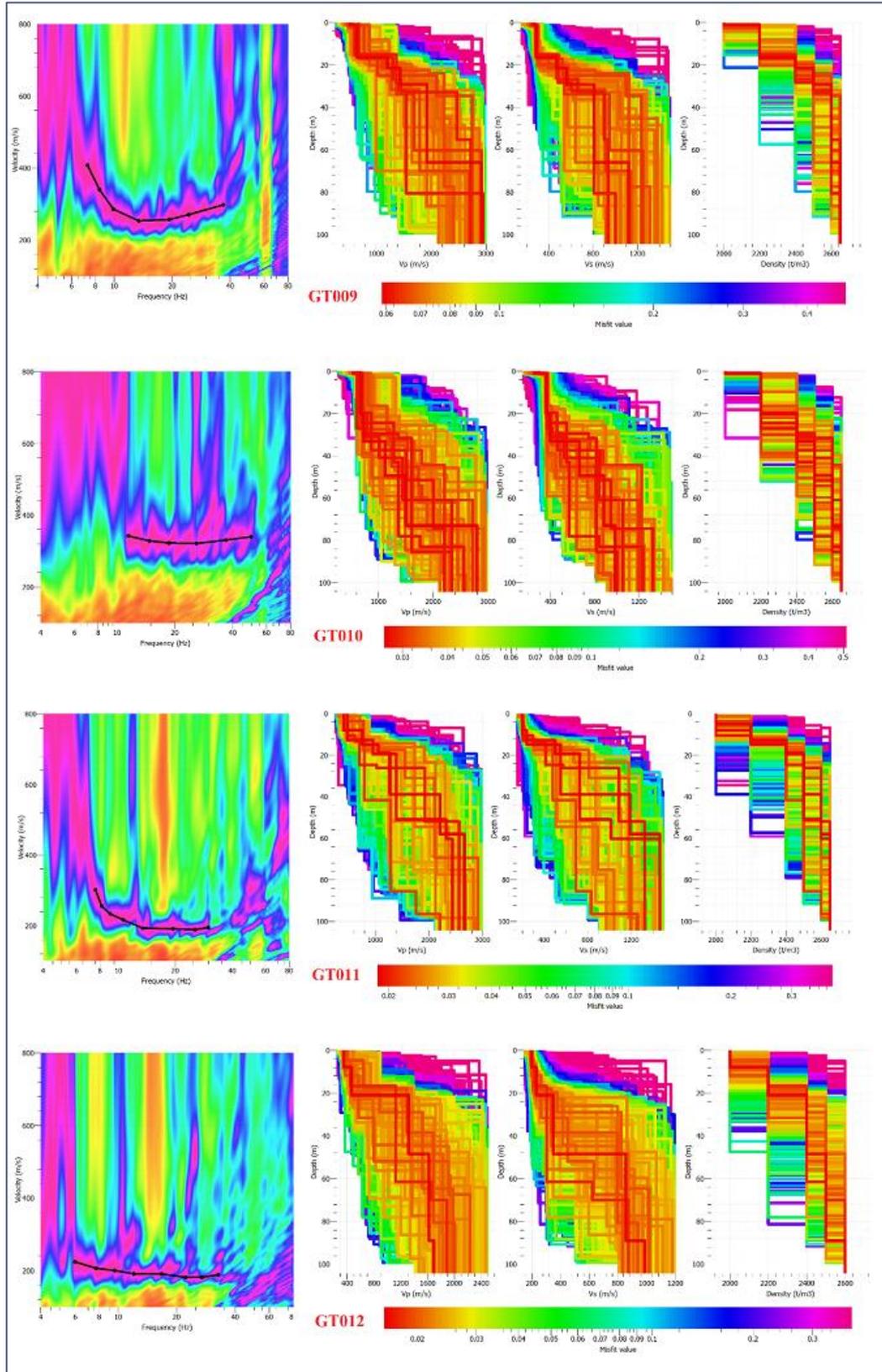
A.1 Curvas de dispersión y modelos 1D del subsuelo



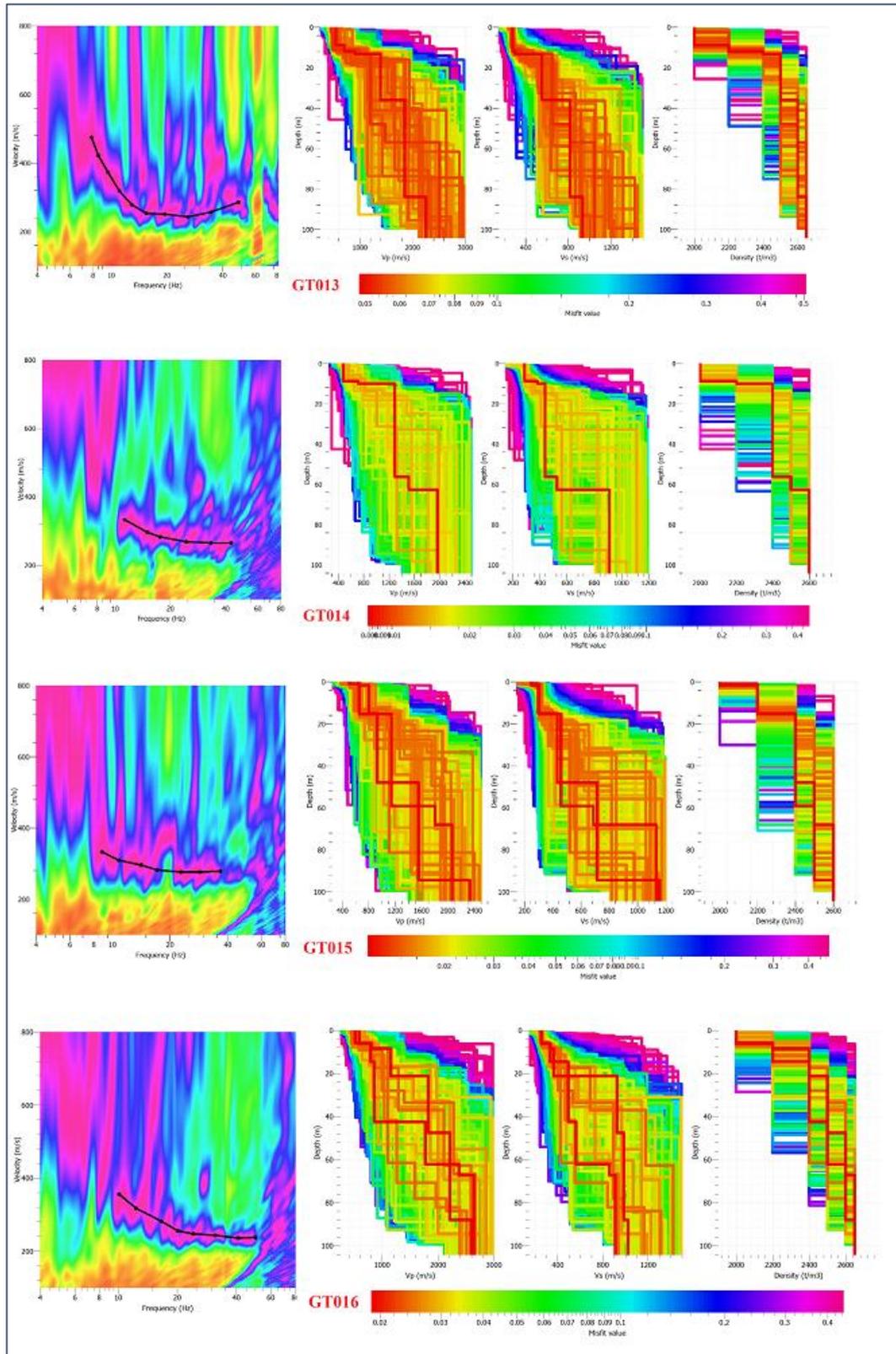
A.1. 1 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT001 - GT004



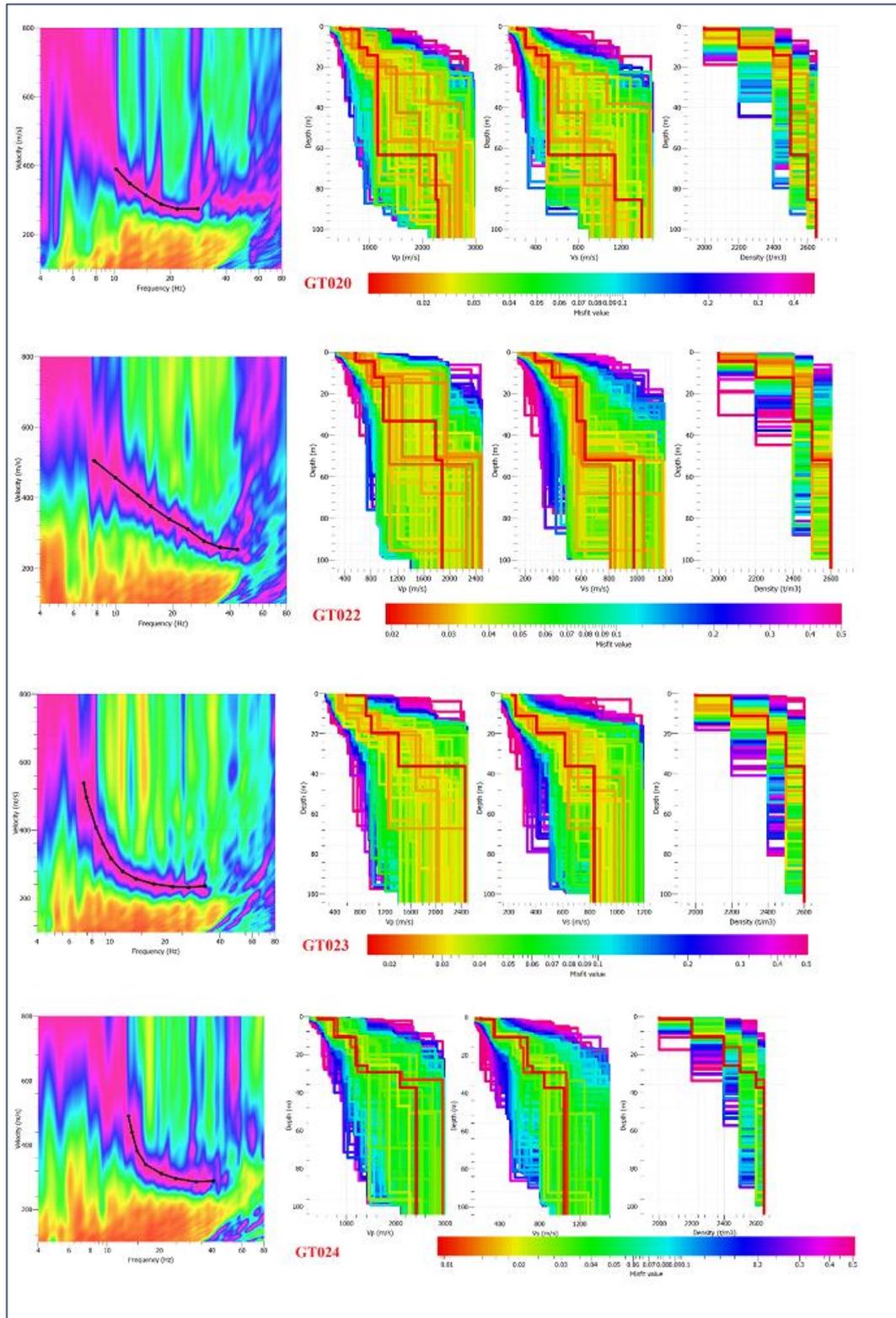
A.1. 2 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT005 - GT008



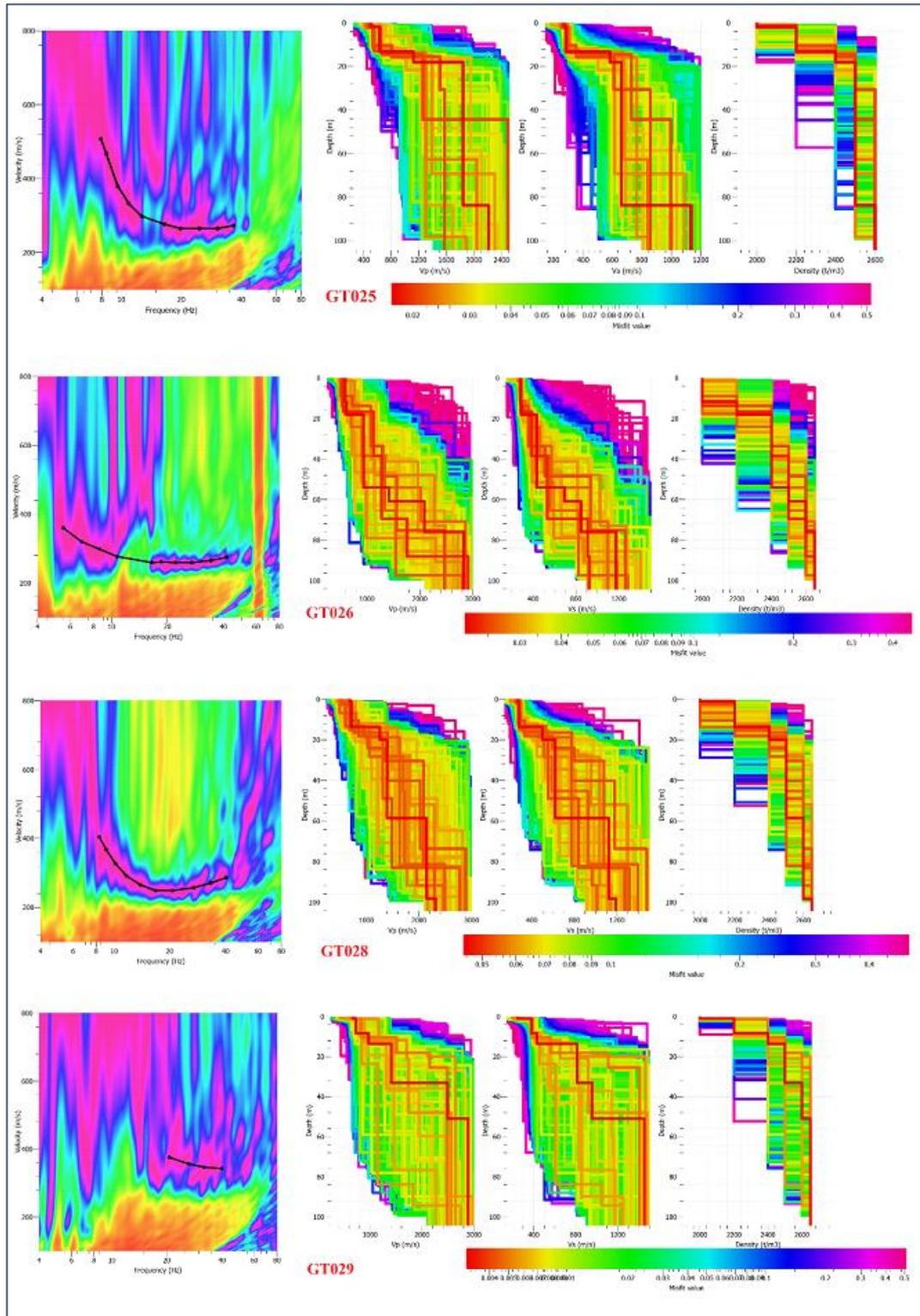
A.1. 3 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT009 - GT012



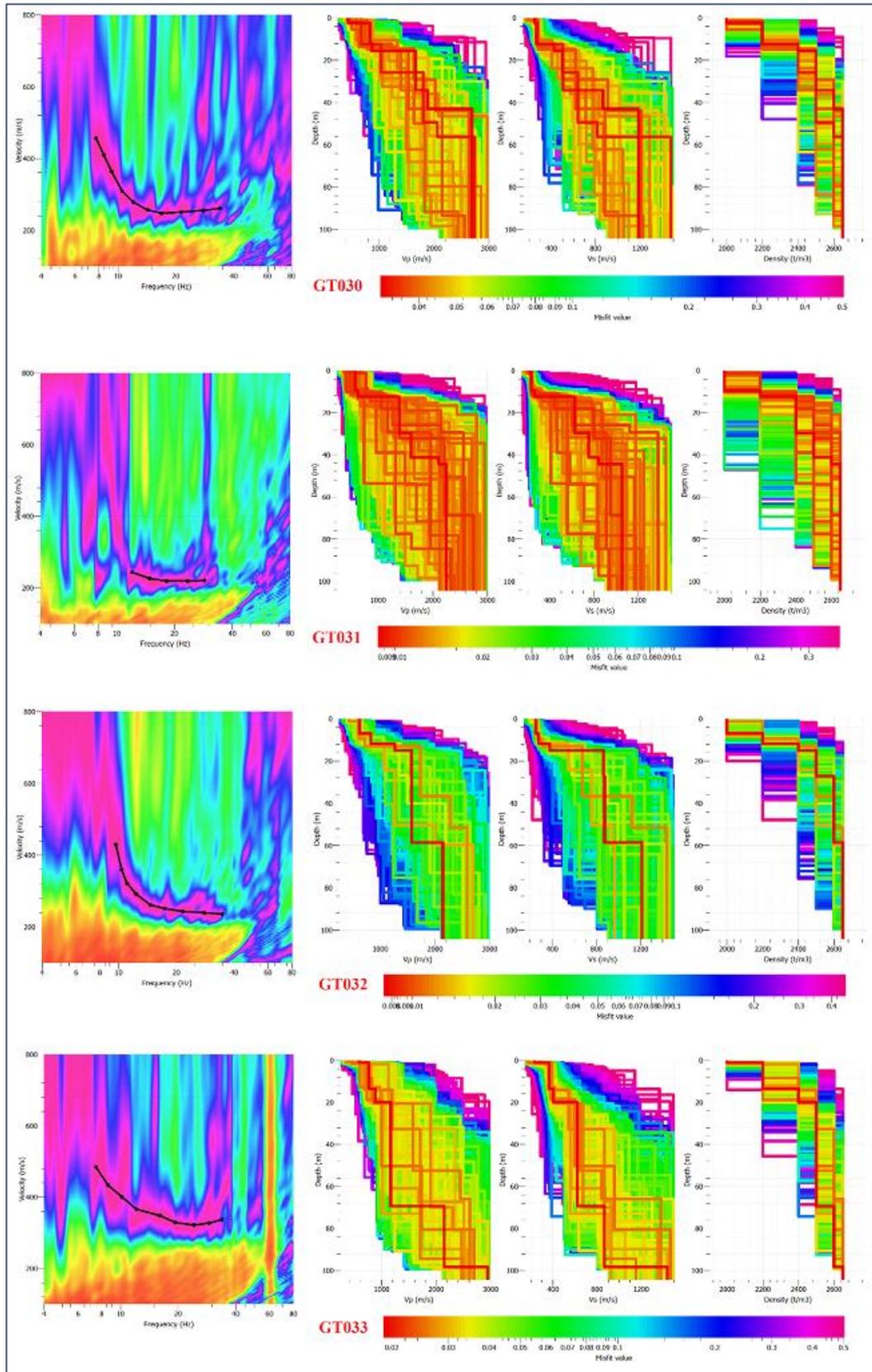
A.1. 4 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT013 - GT016



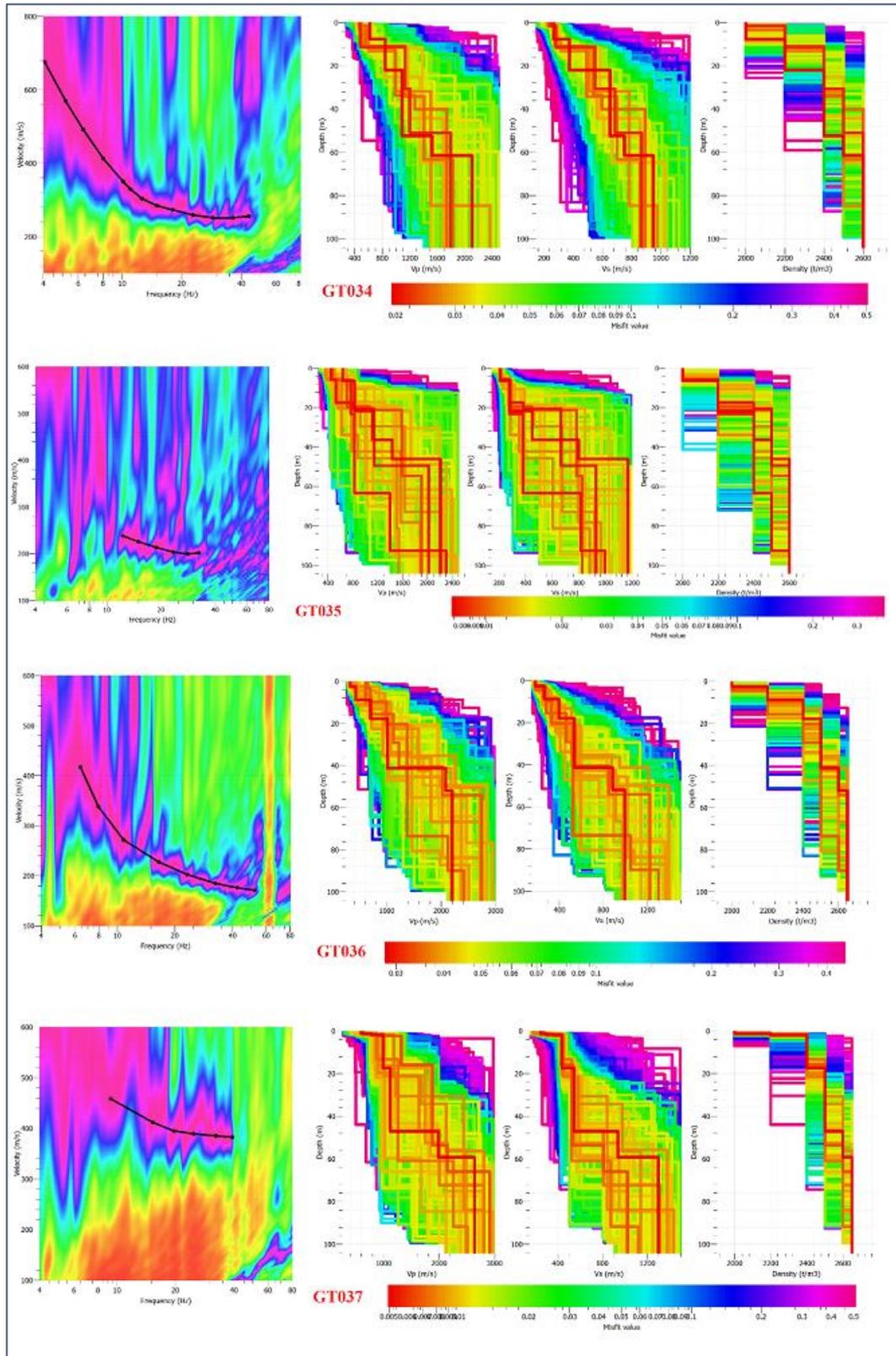
A.1. 5 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT020 - GT024



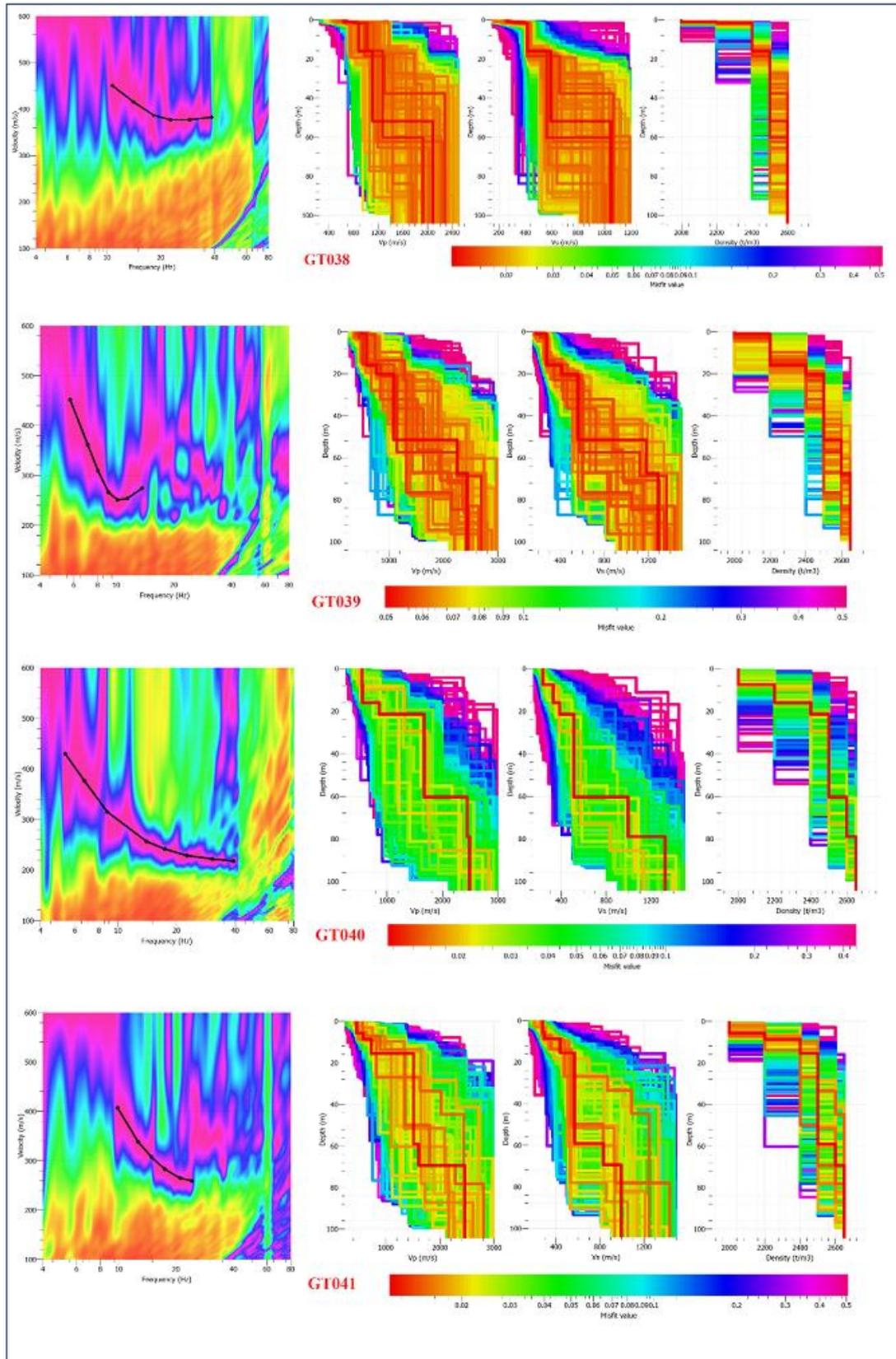
A.1. 6 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT025 - GT029



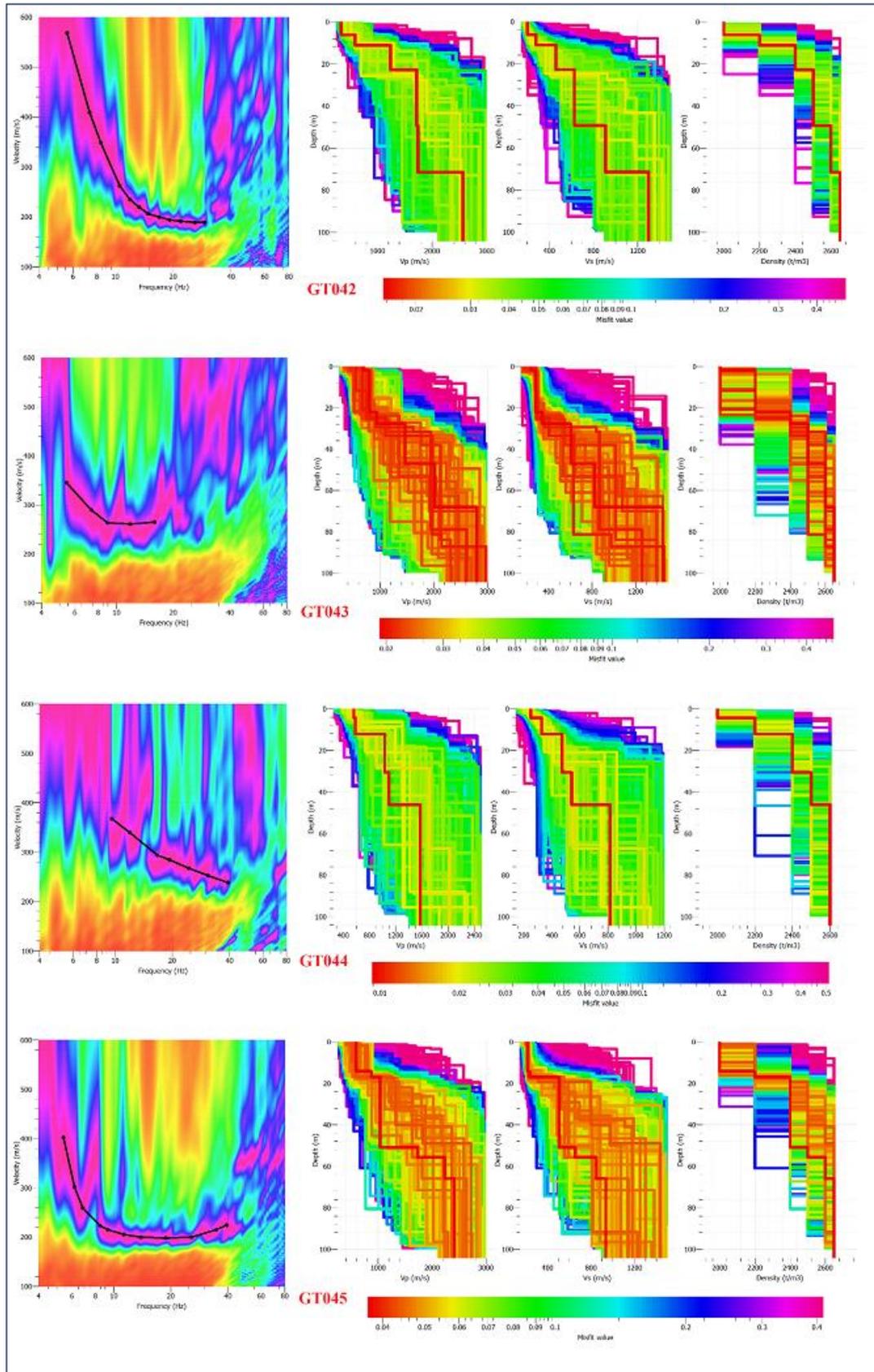
A.1. 7 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT030 - GT033



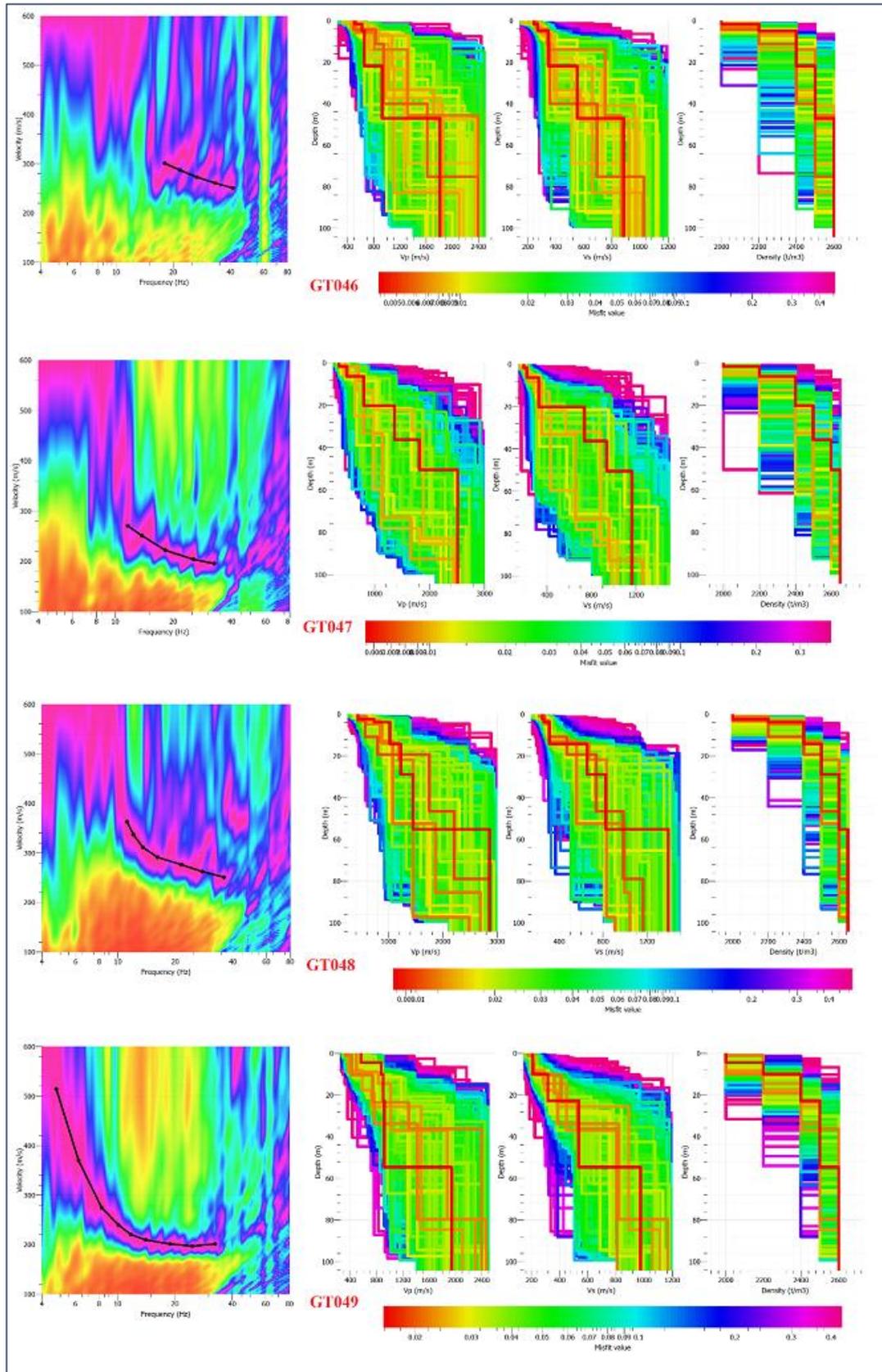
A.1. 8 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT034 - GT037



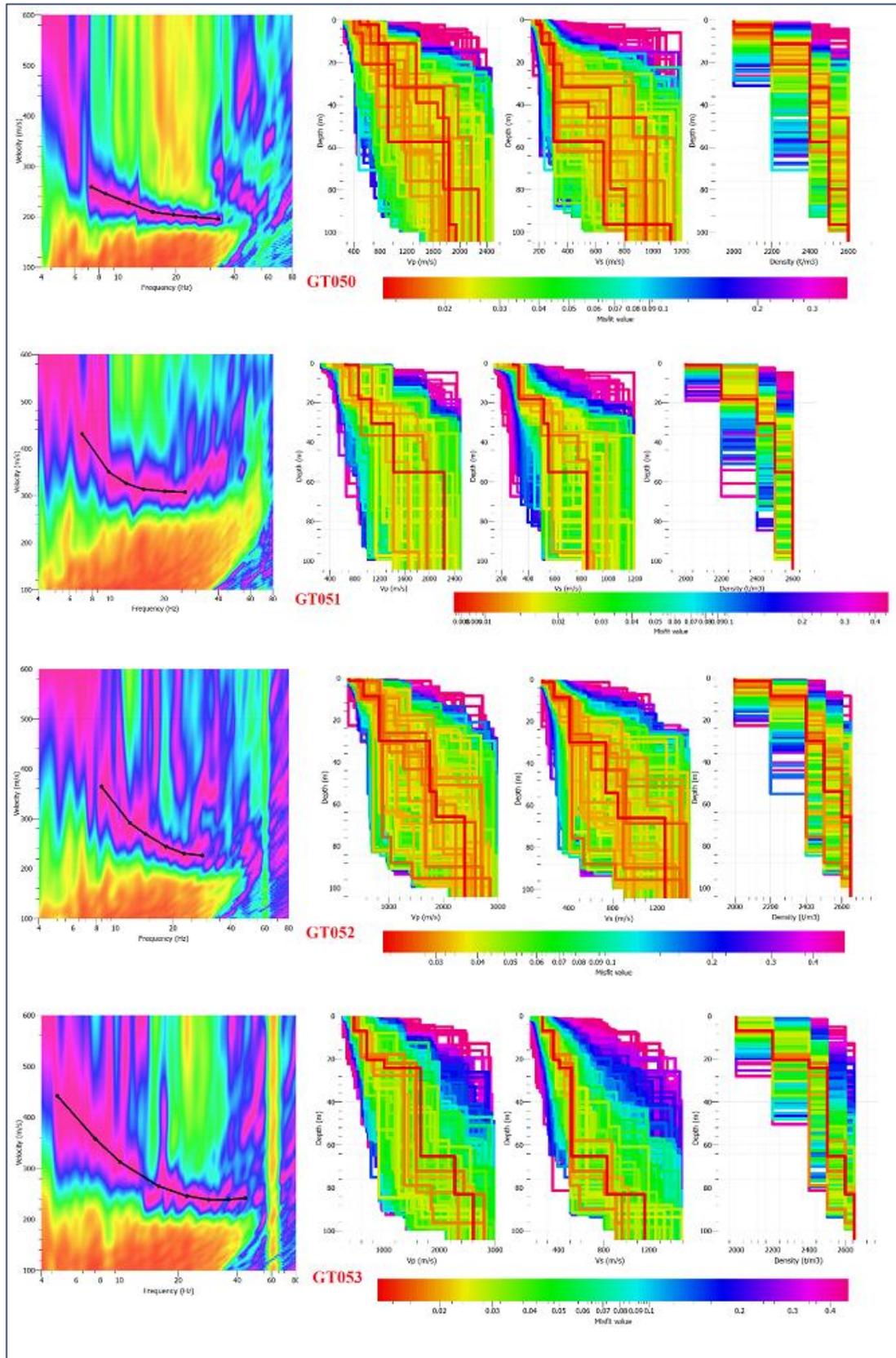
A.1. 9 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT038 - GT041



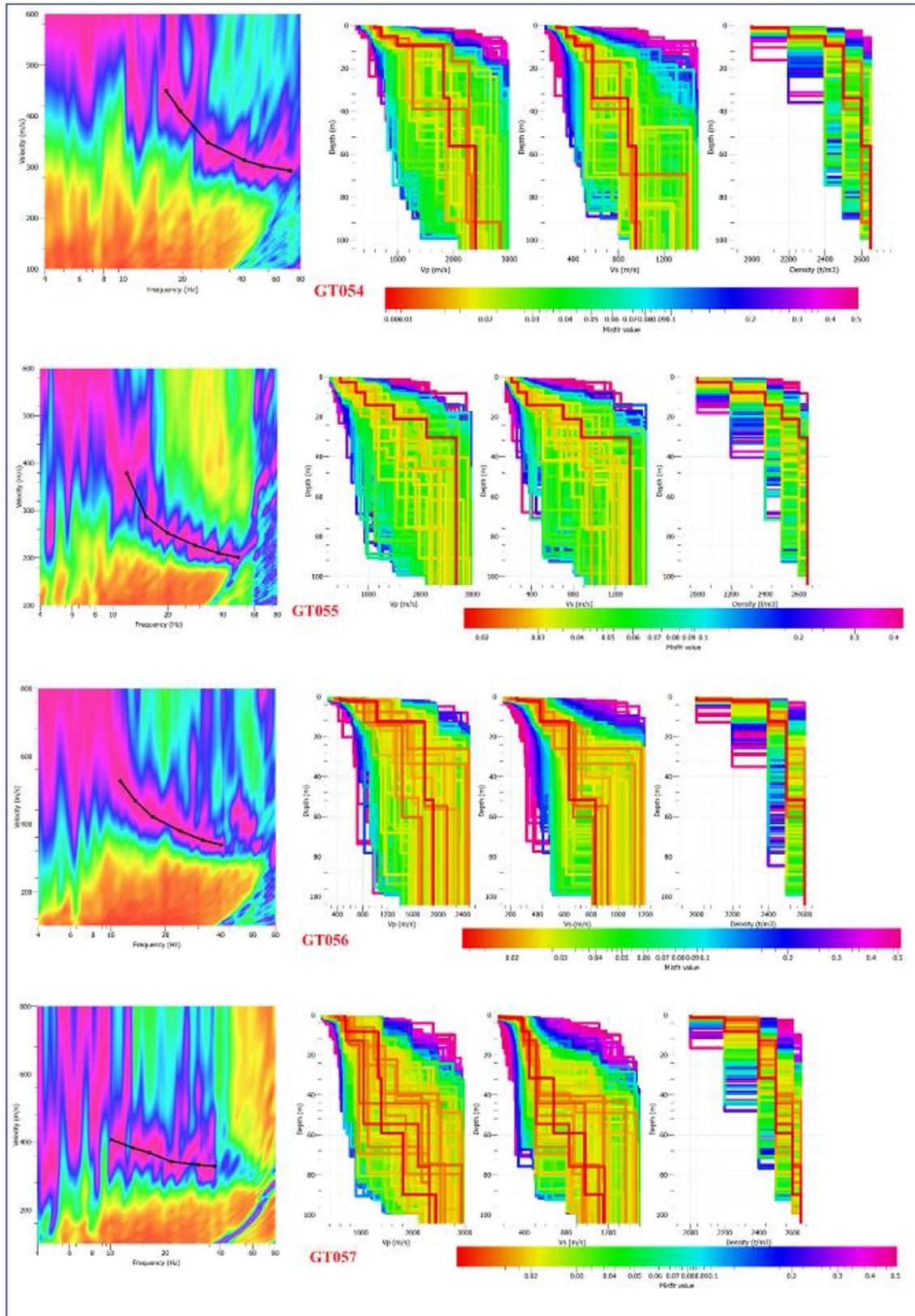
A.1. 10 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT042 - GT045



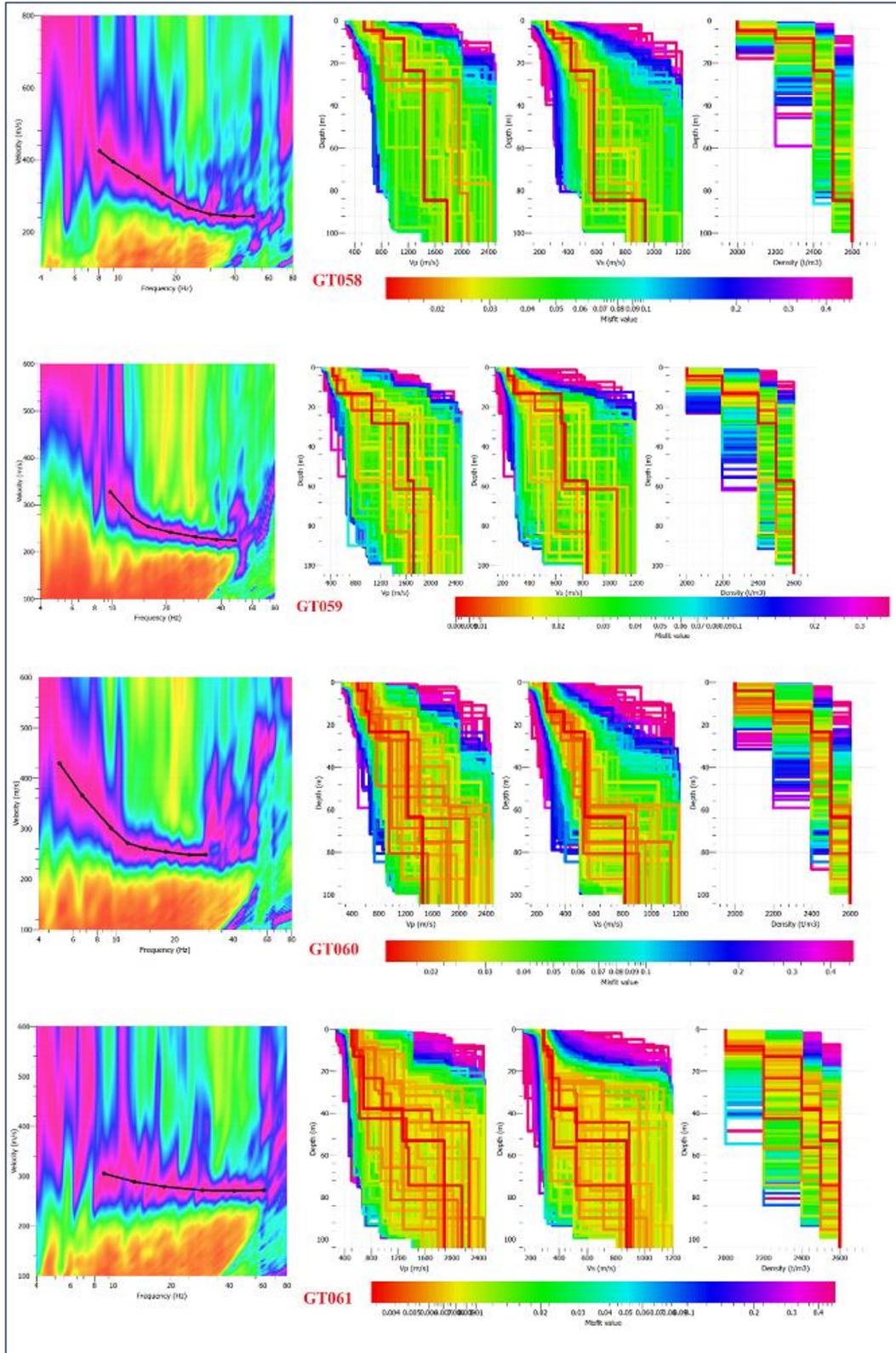
A.1. 11 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT046 - GT049



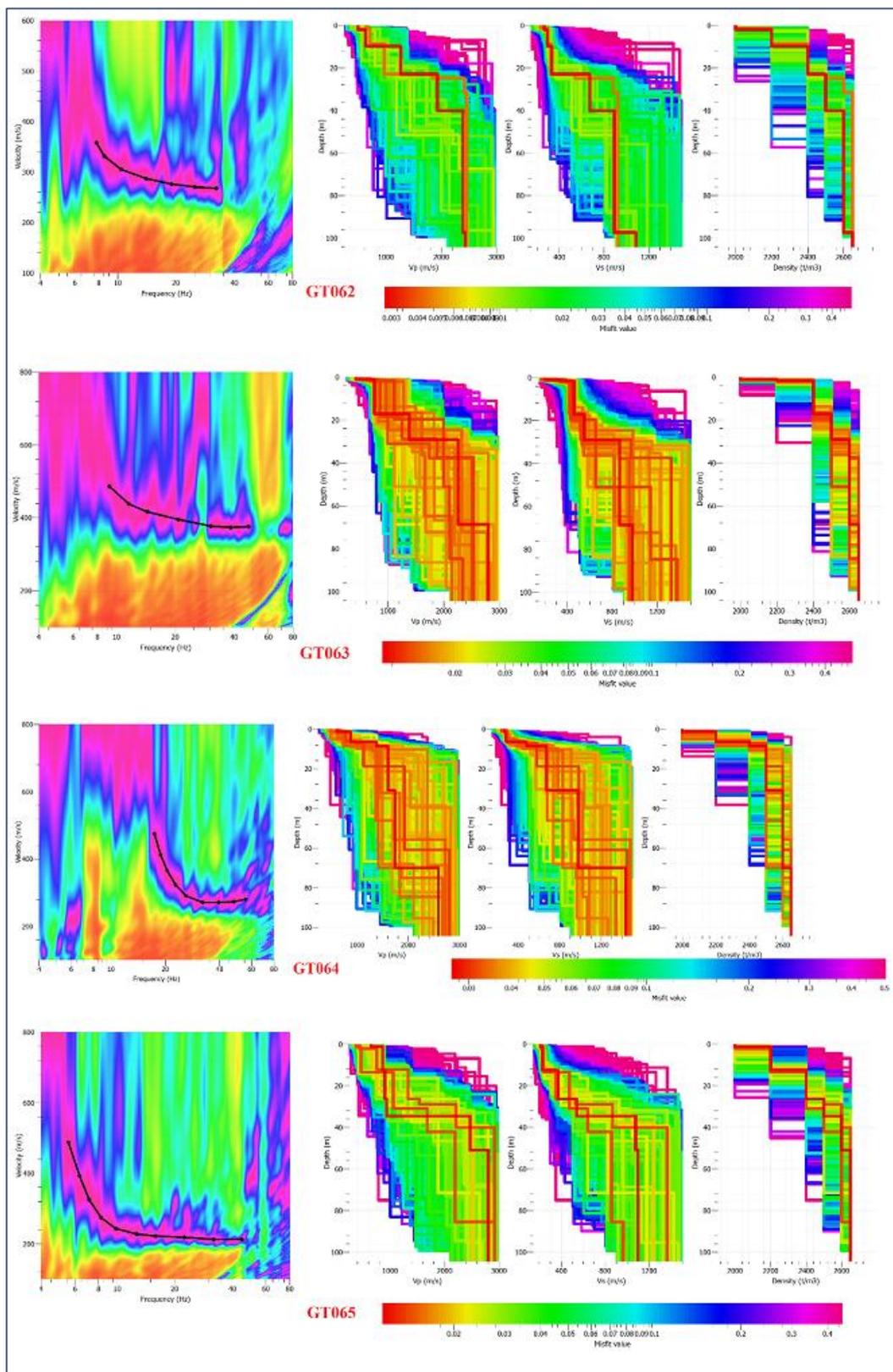
A.1. 12 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT050 - GT053



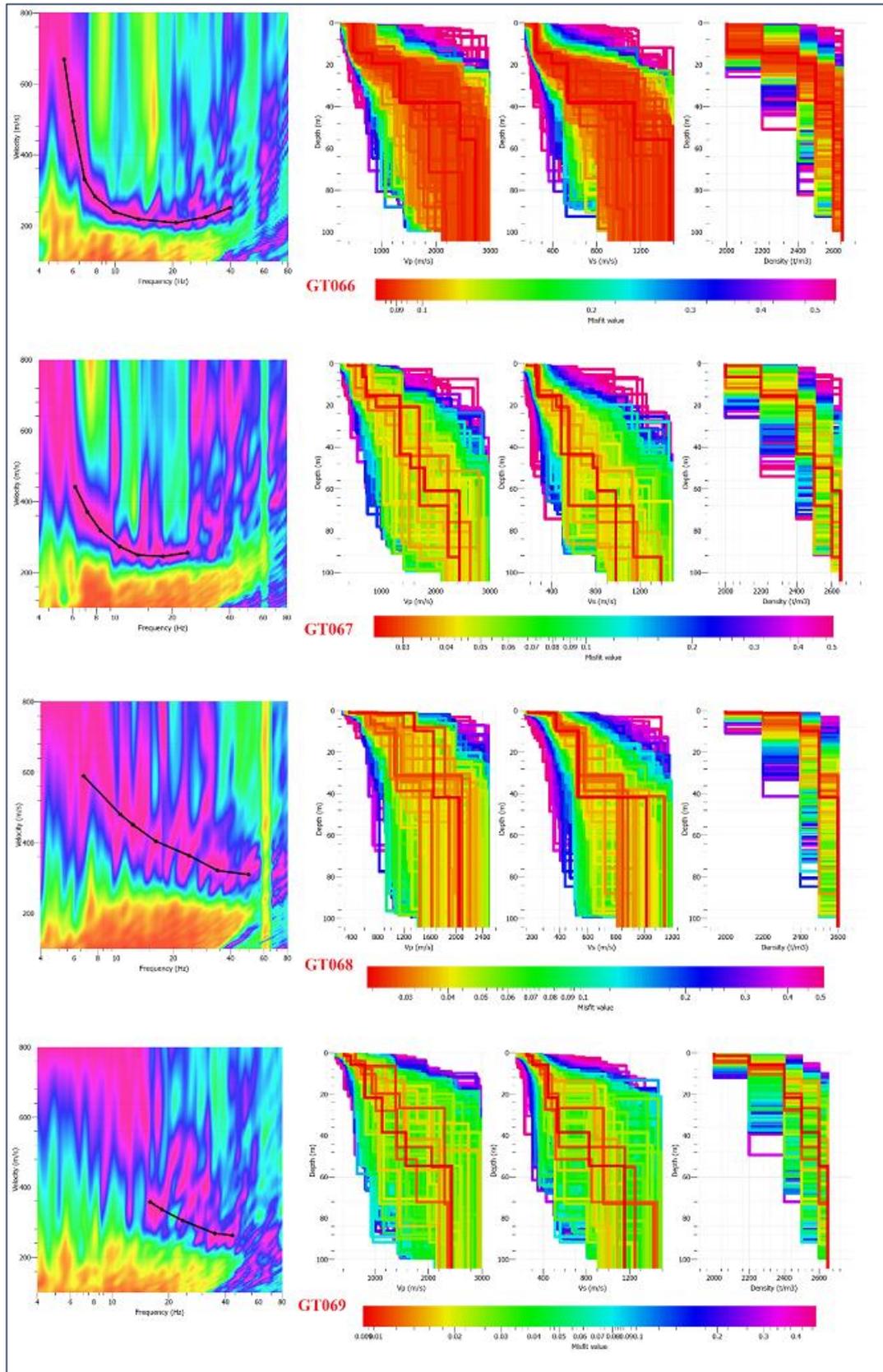
A.1. 13 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT054 - GT057



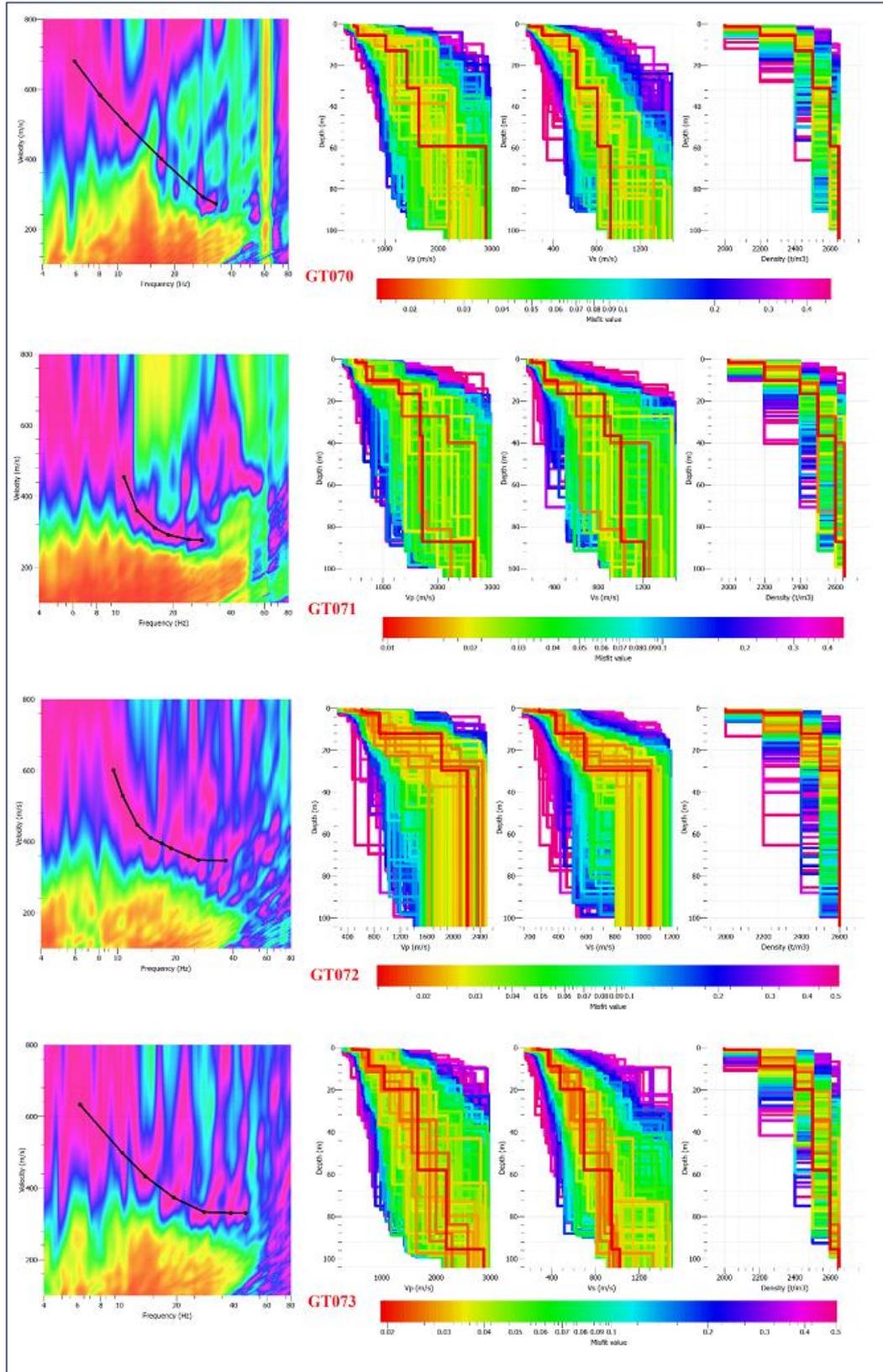
A.1. 14 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT058 - GT061



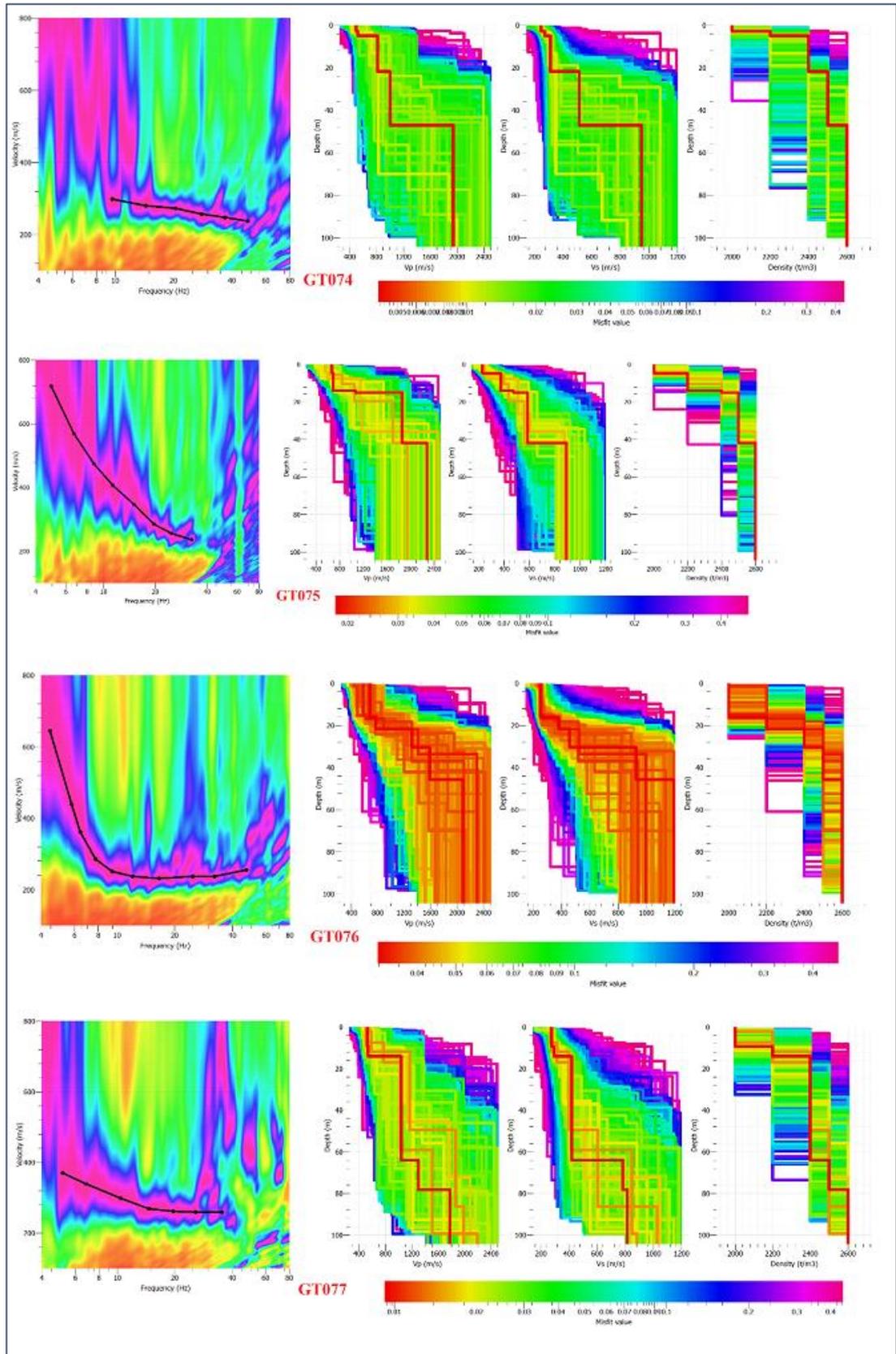
A.1. 15 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT062 - GT065



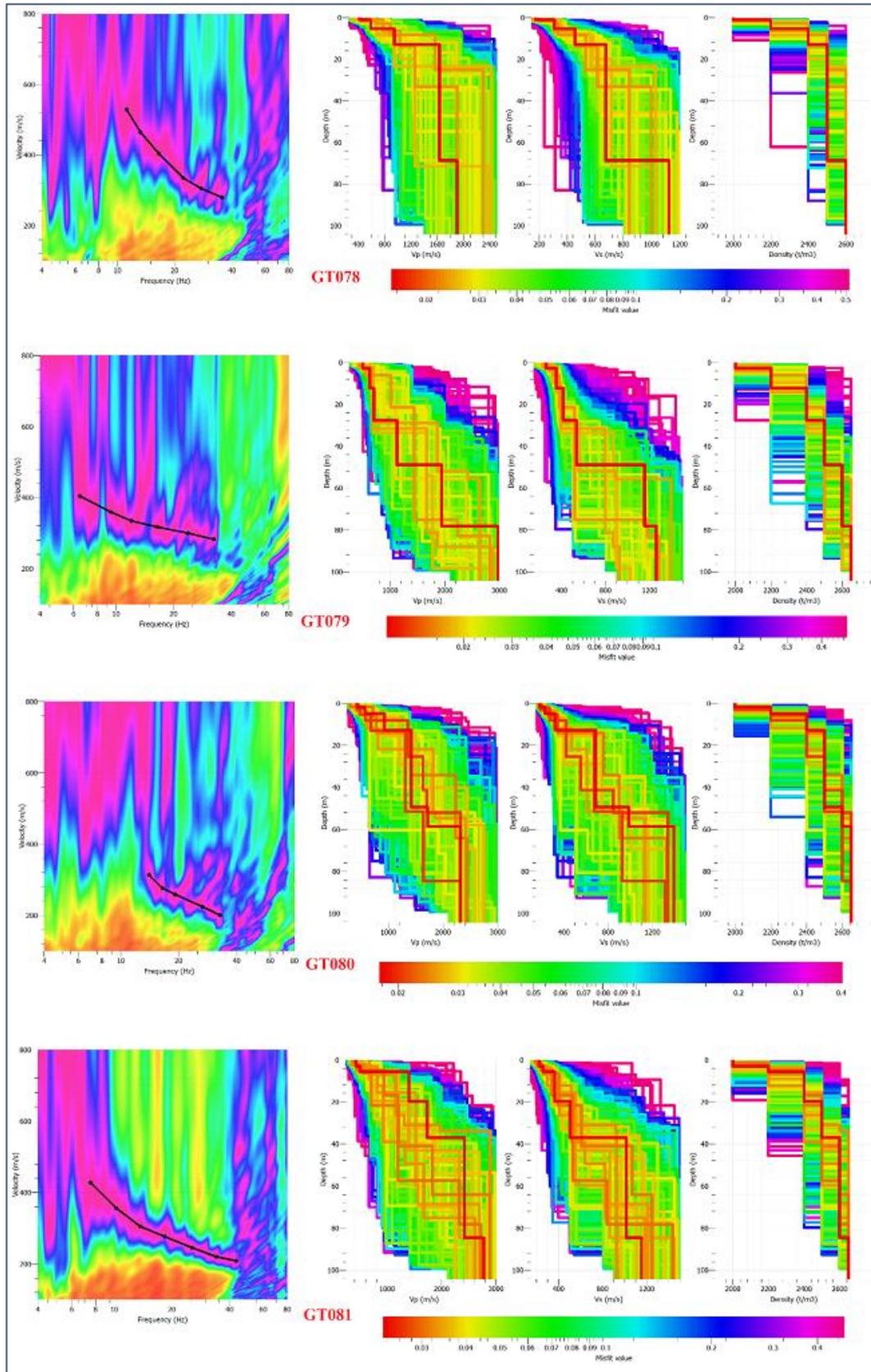
A.1. 16 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT066 - GT069



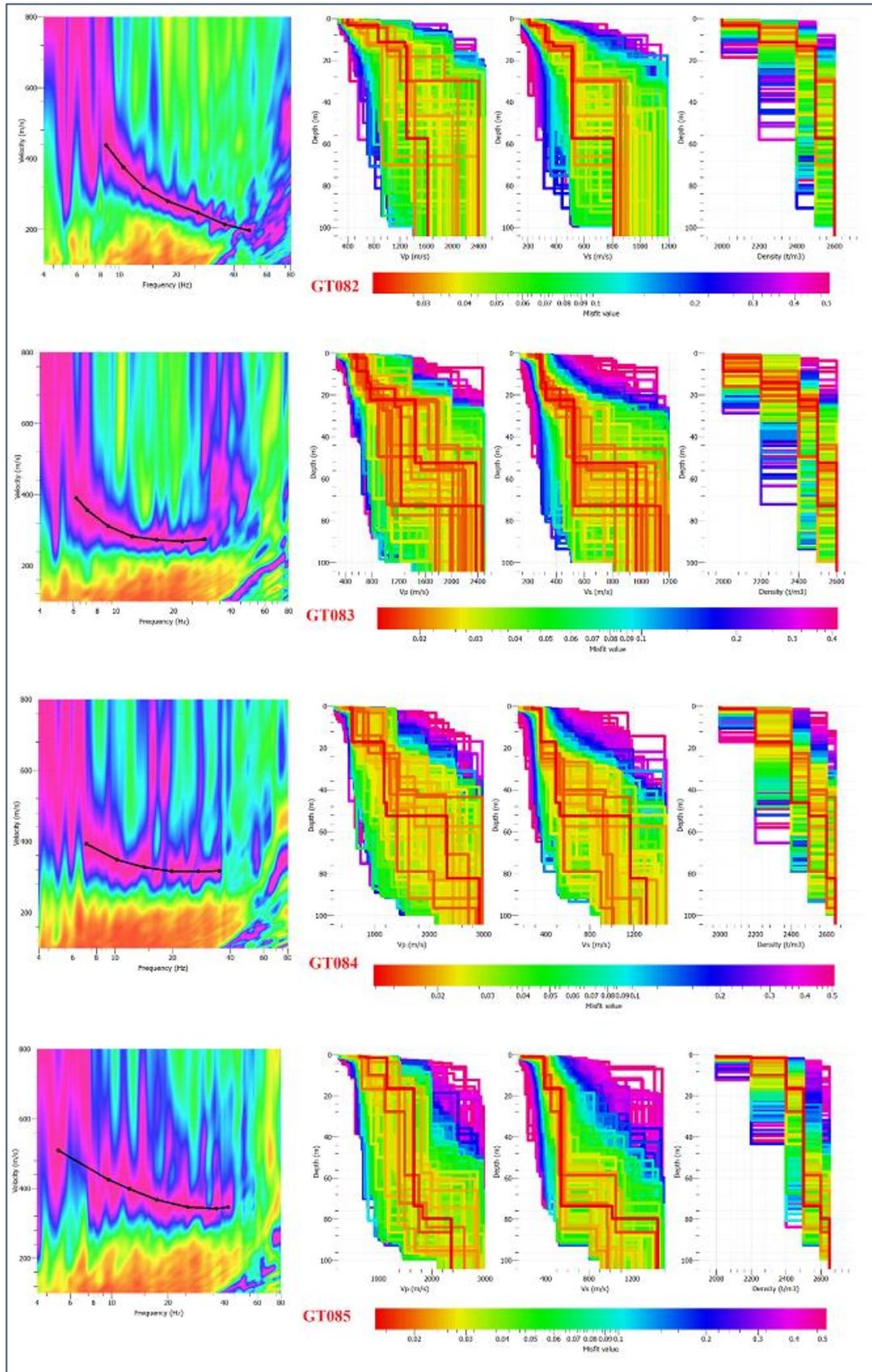
A.1. 17 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT070 - GT073



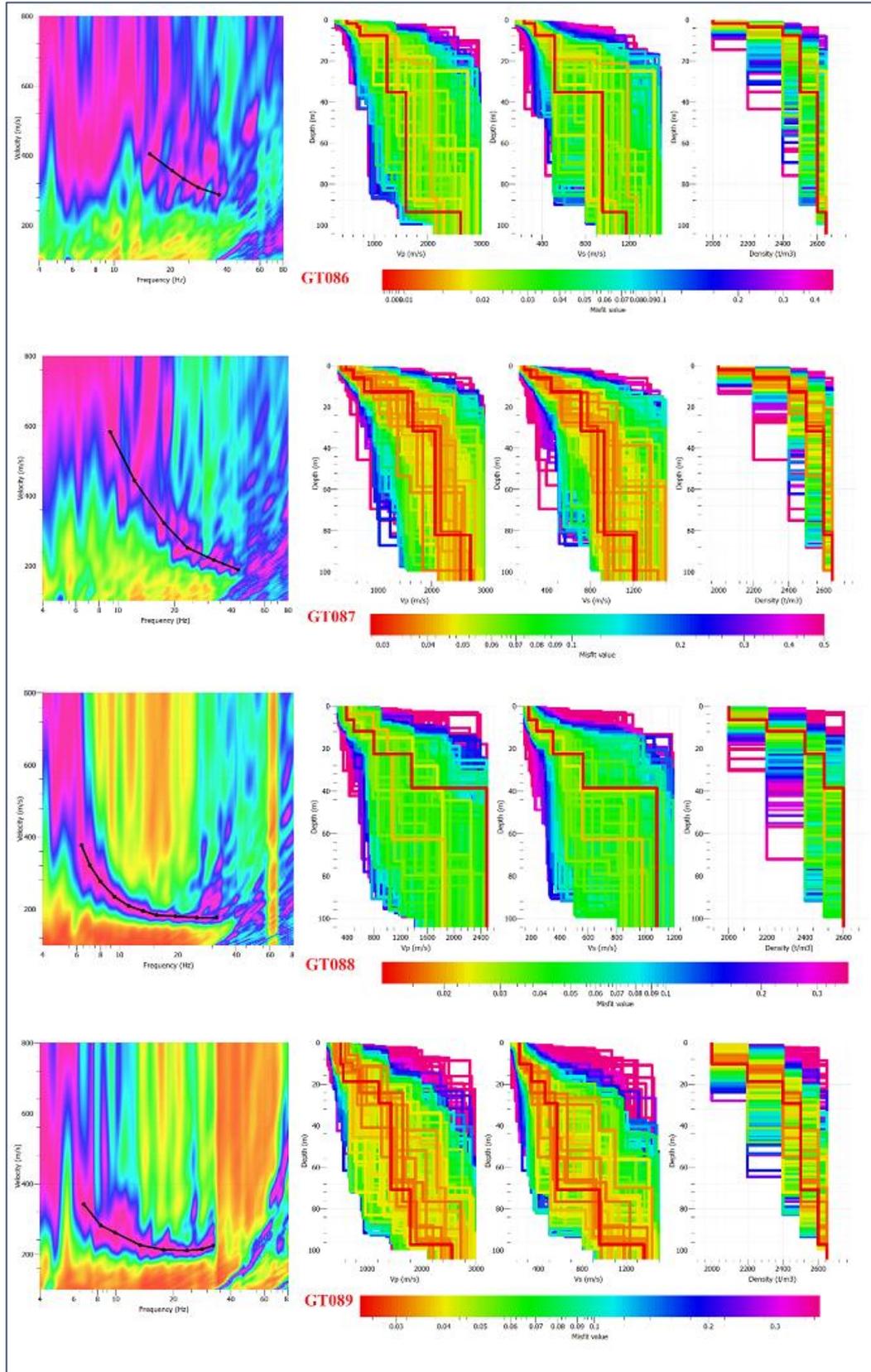
A.1. 18 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT074 - GT077



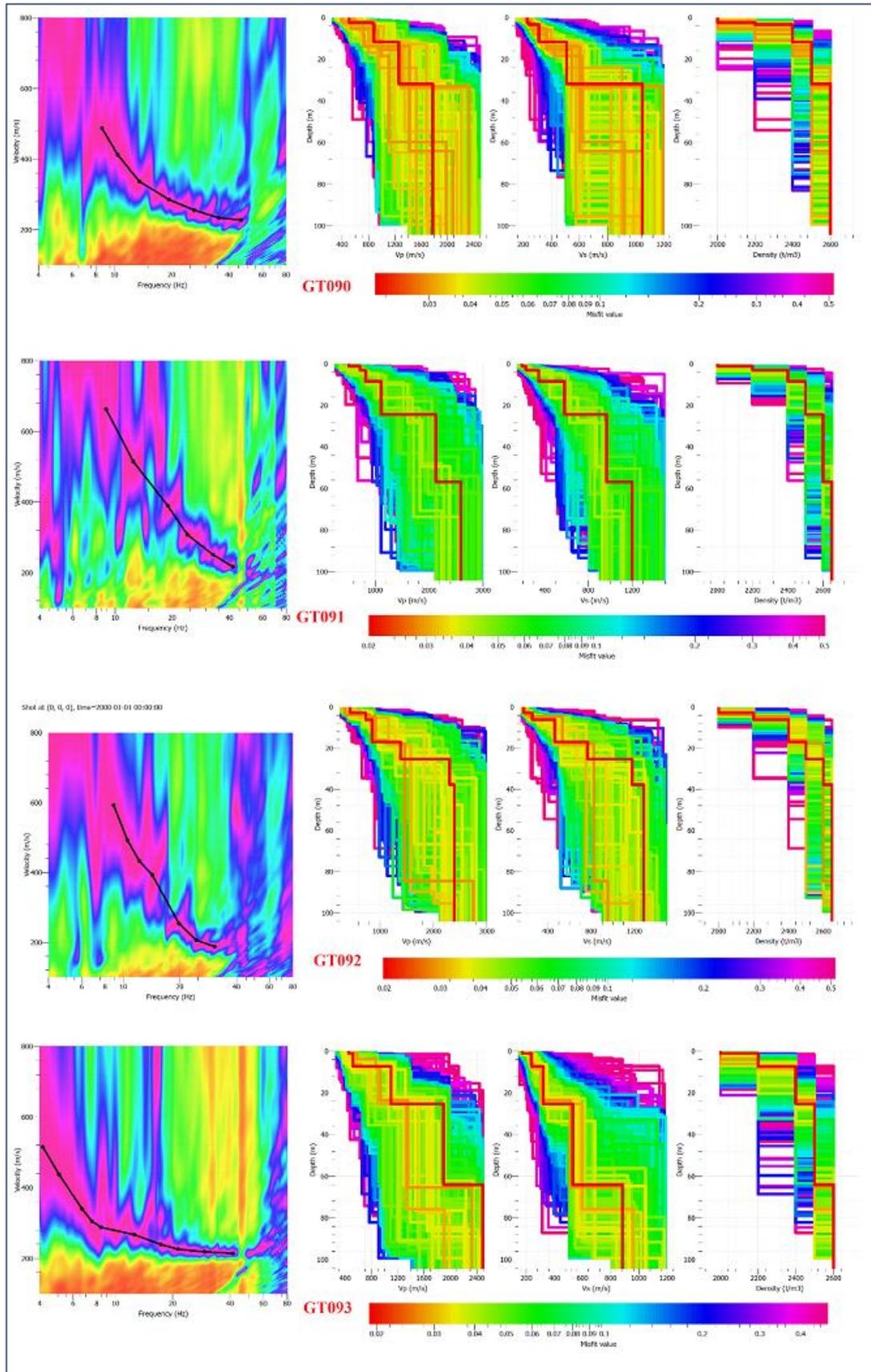
A.1. 19 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT078 - GT081



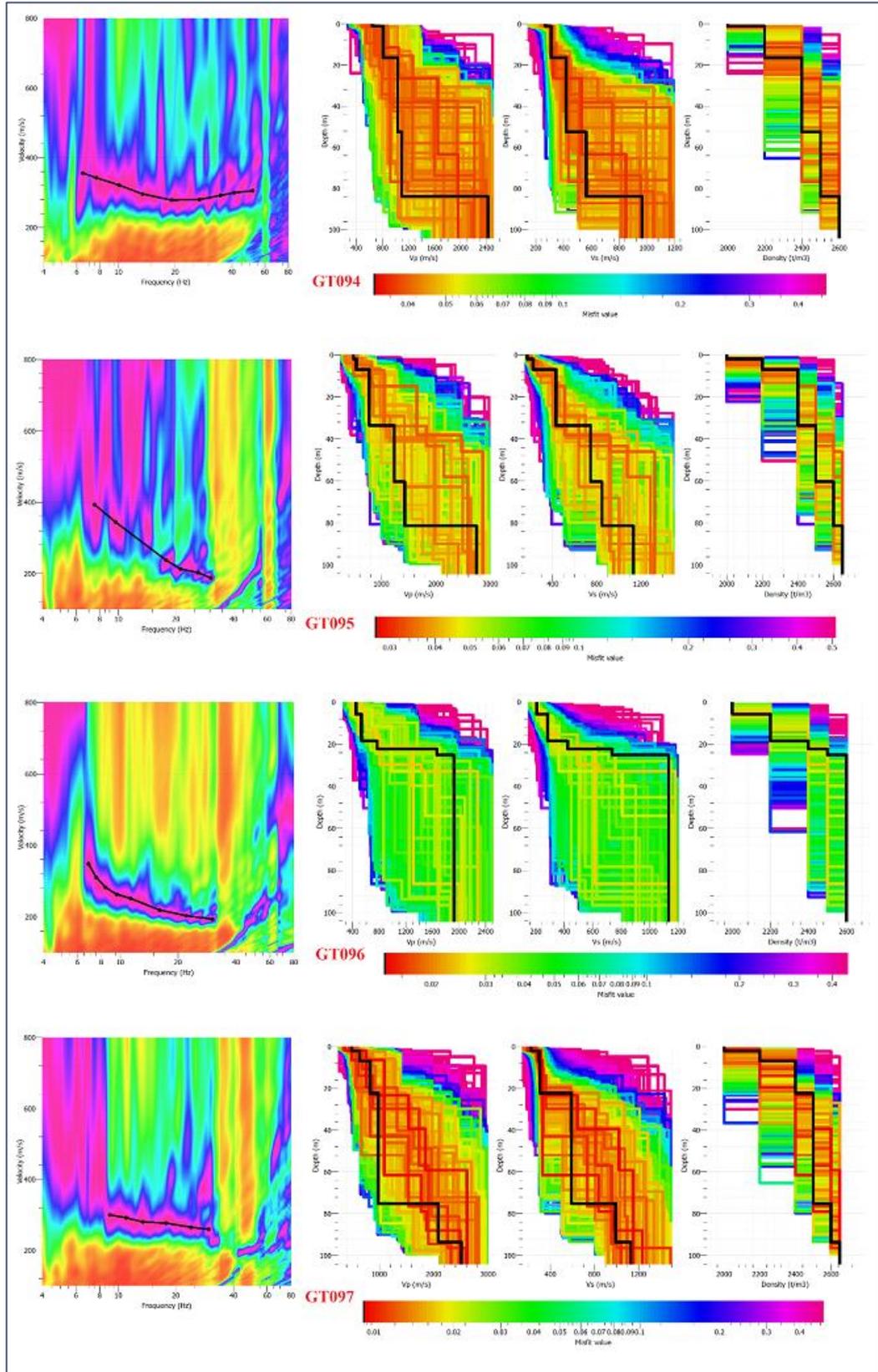
A.1. 20 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT082 - GT085



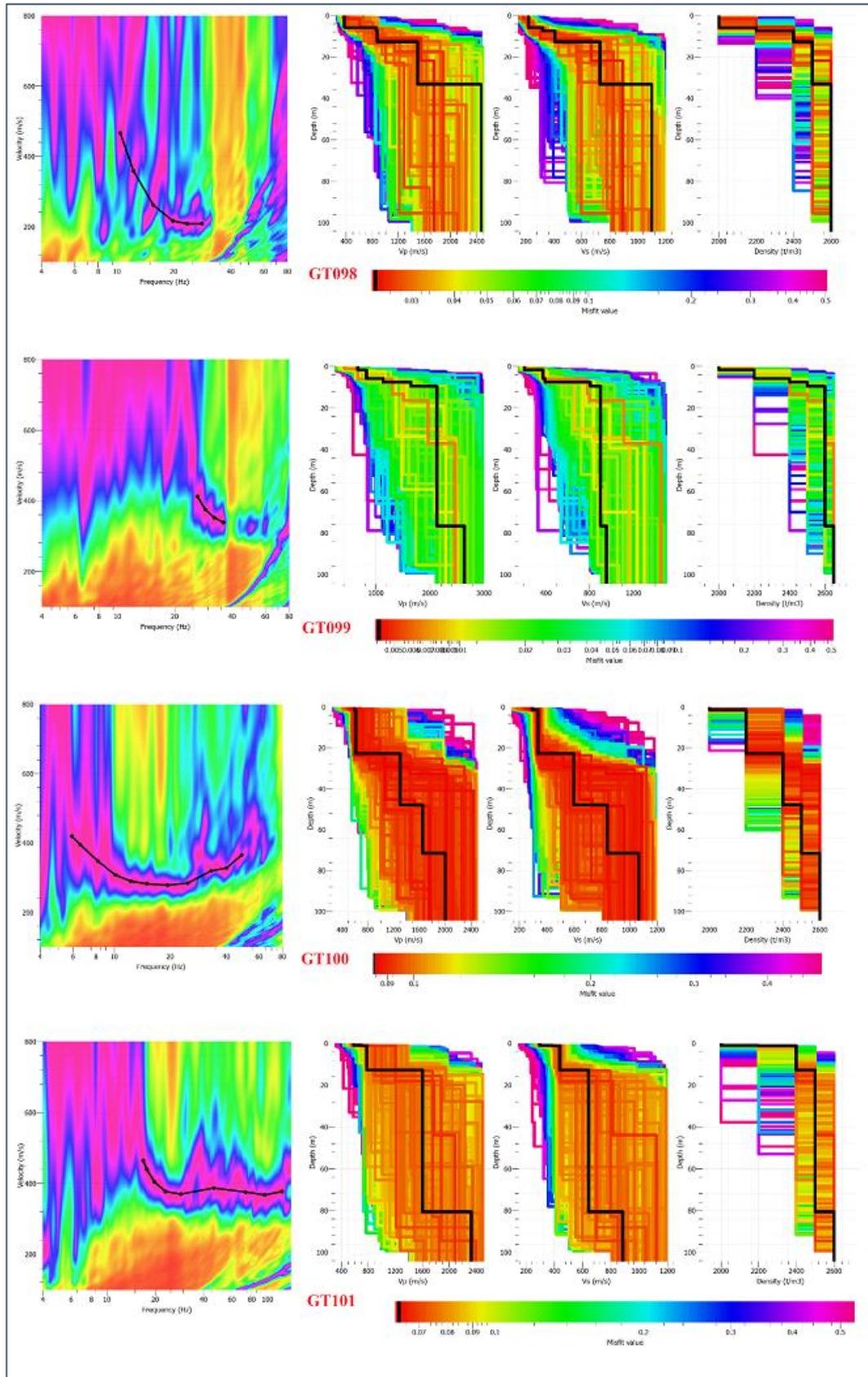
A.1. 21 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT086 - GT089



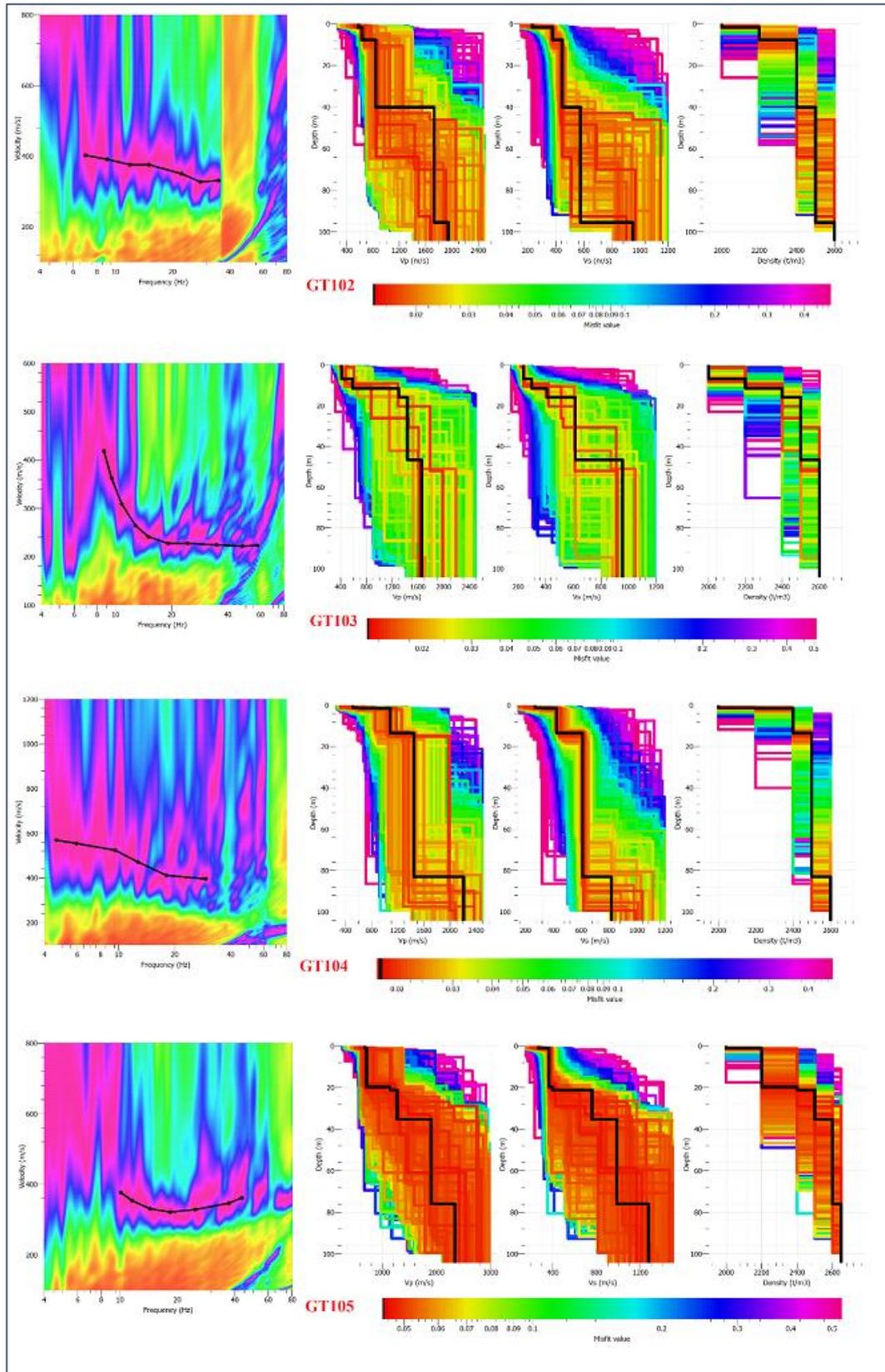
A.1. 22 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT090 - GT093



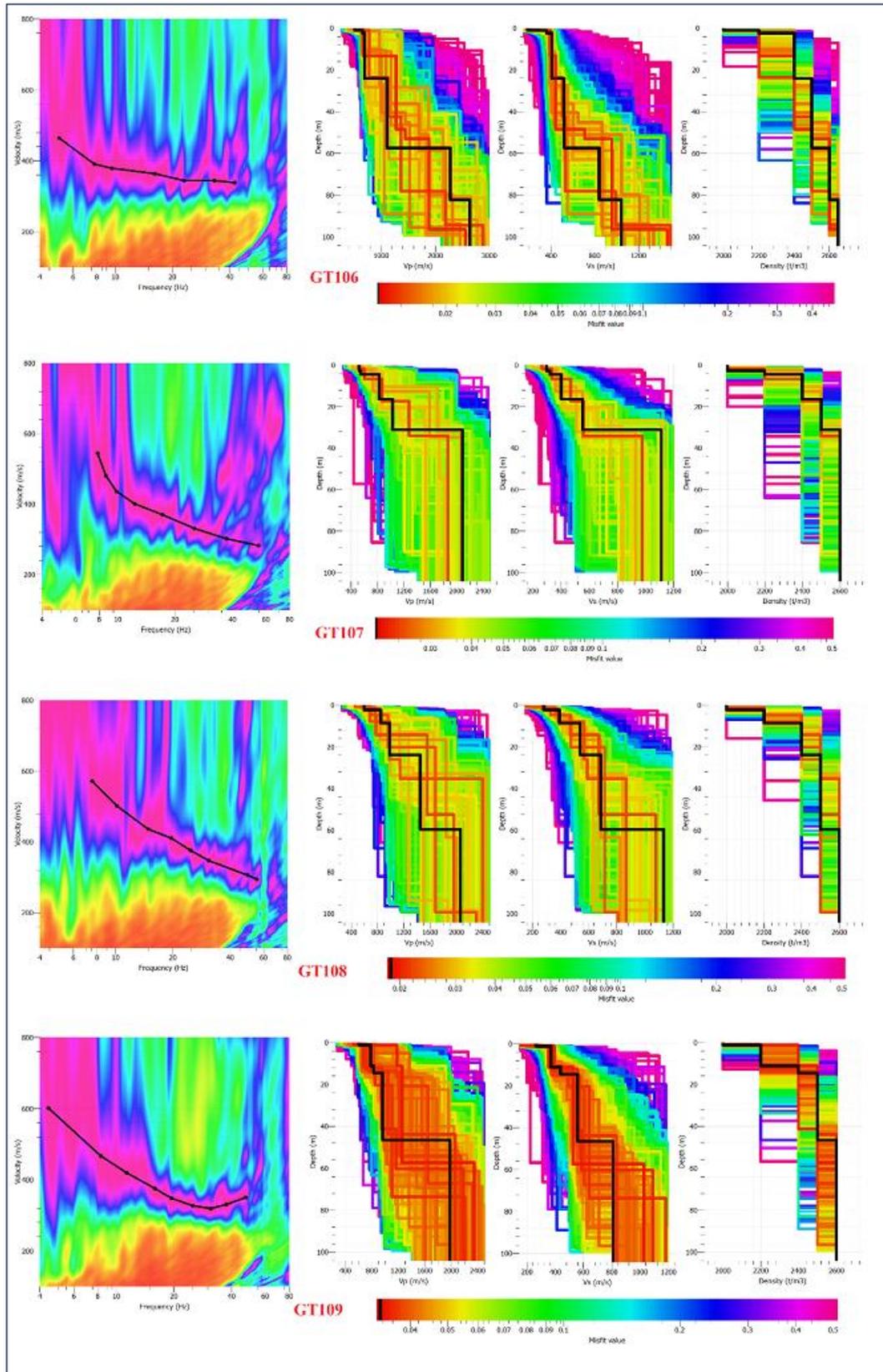
A.1. 23 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT094 - GT097



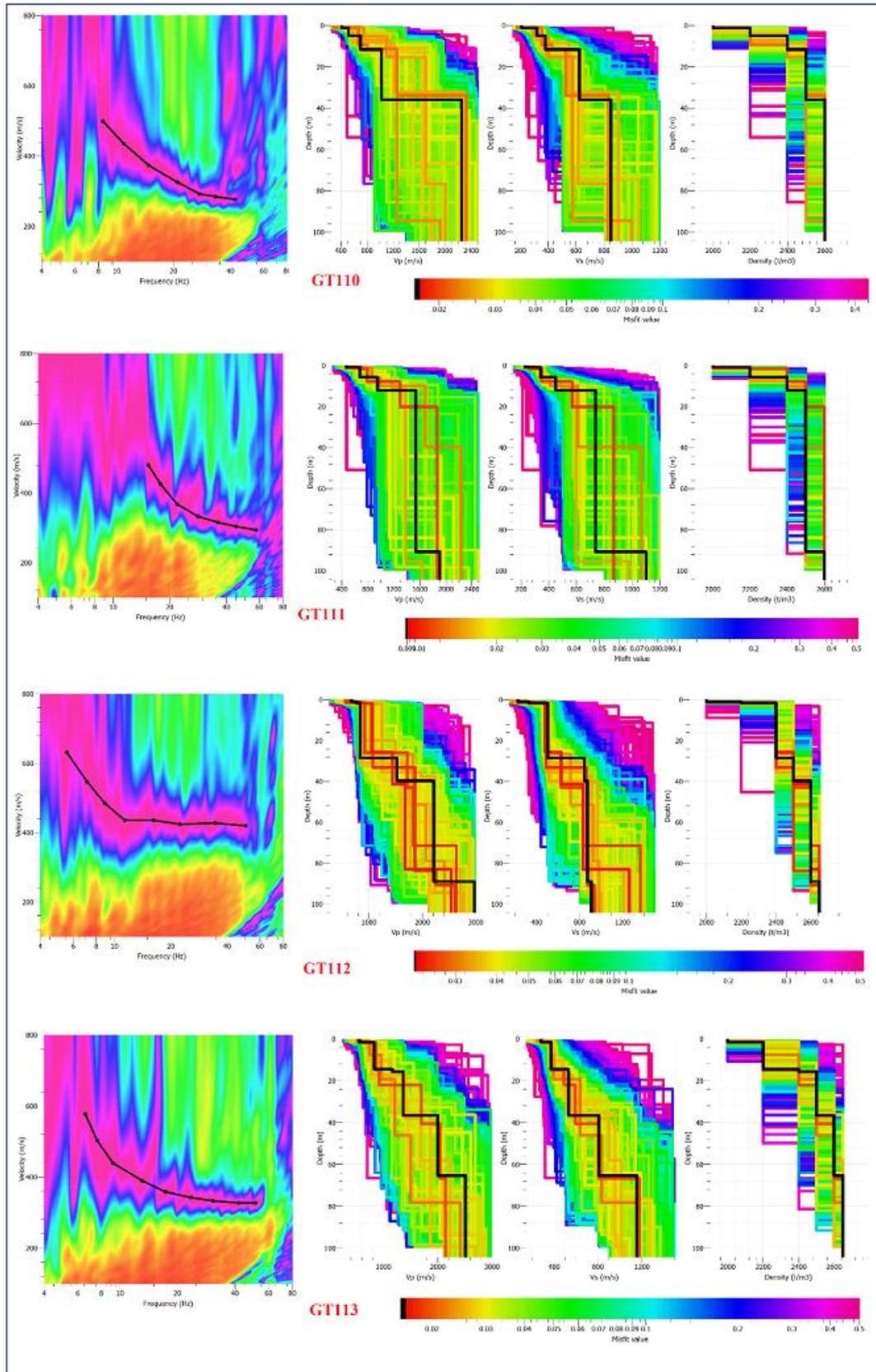
A.1. 24 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT101 - GT098



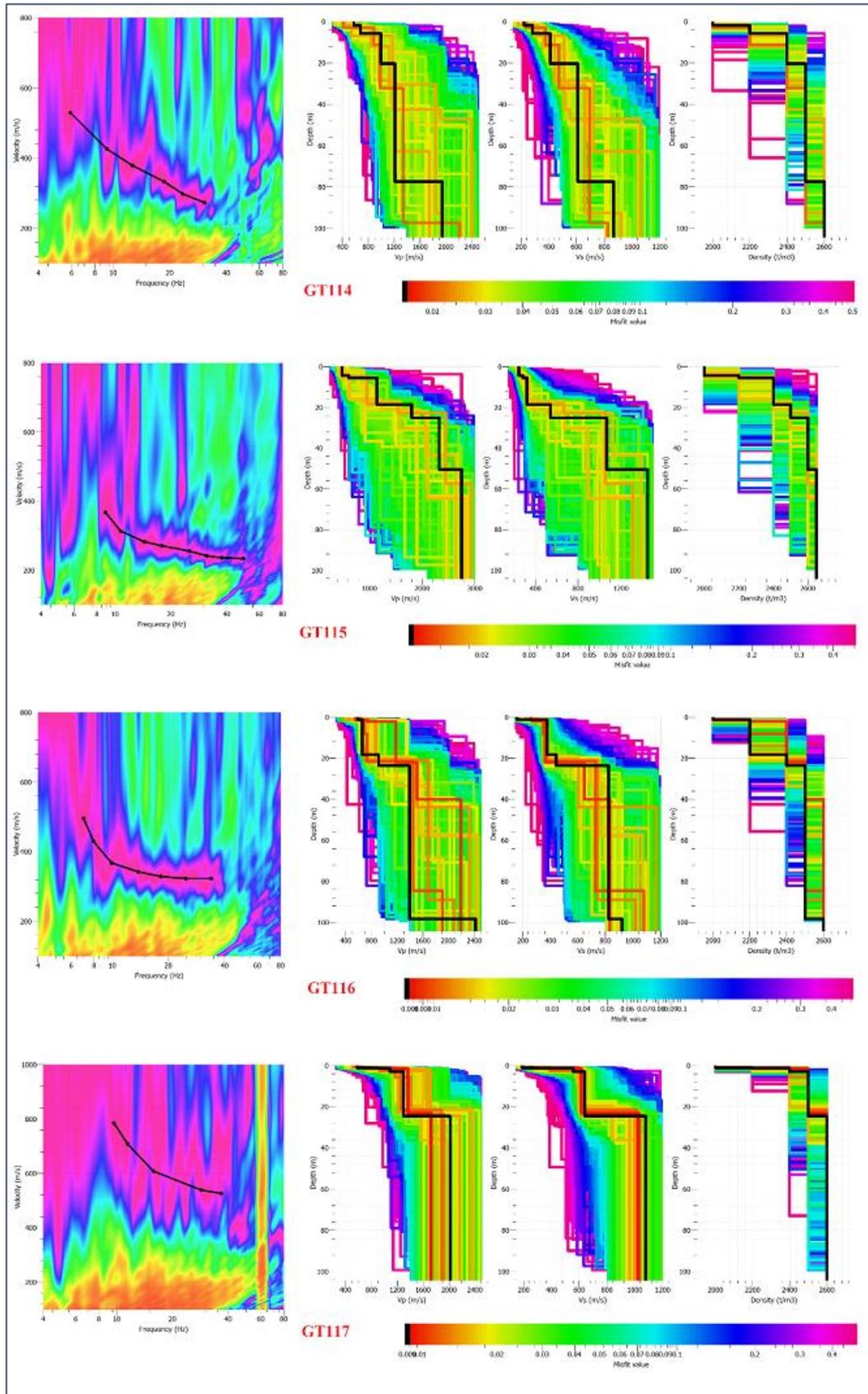
A.1. 25 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT102 - GT105



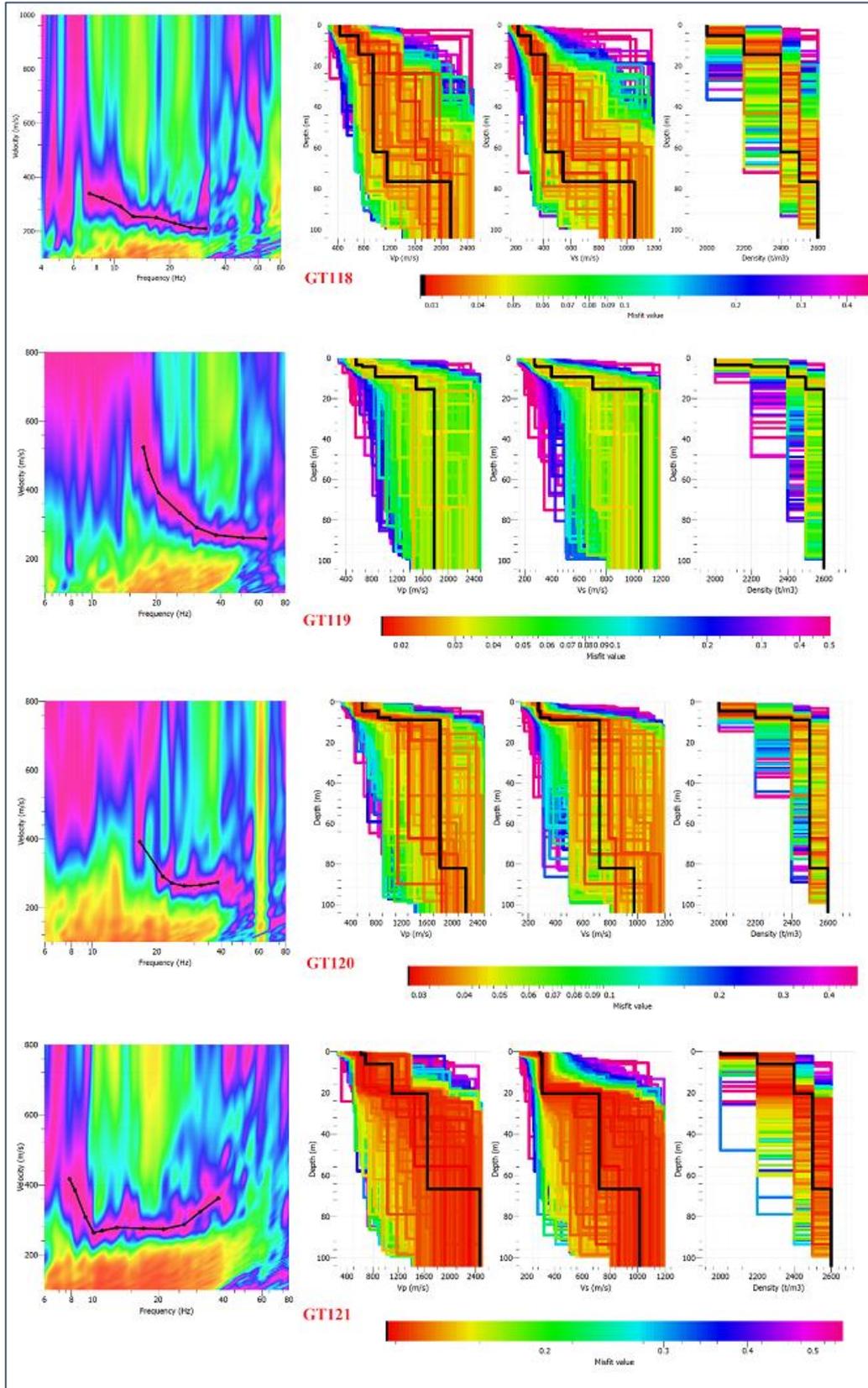
A.1. 26 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT106 - GT109



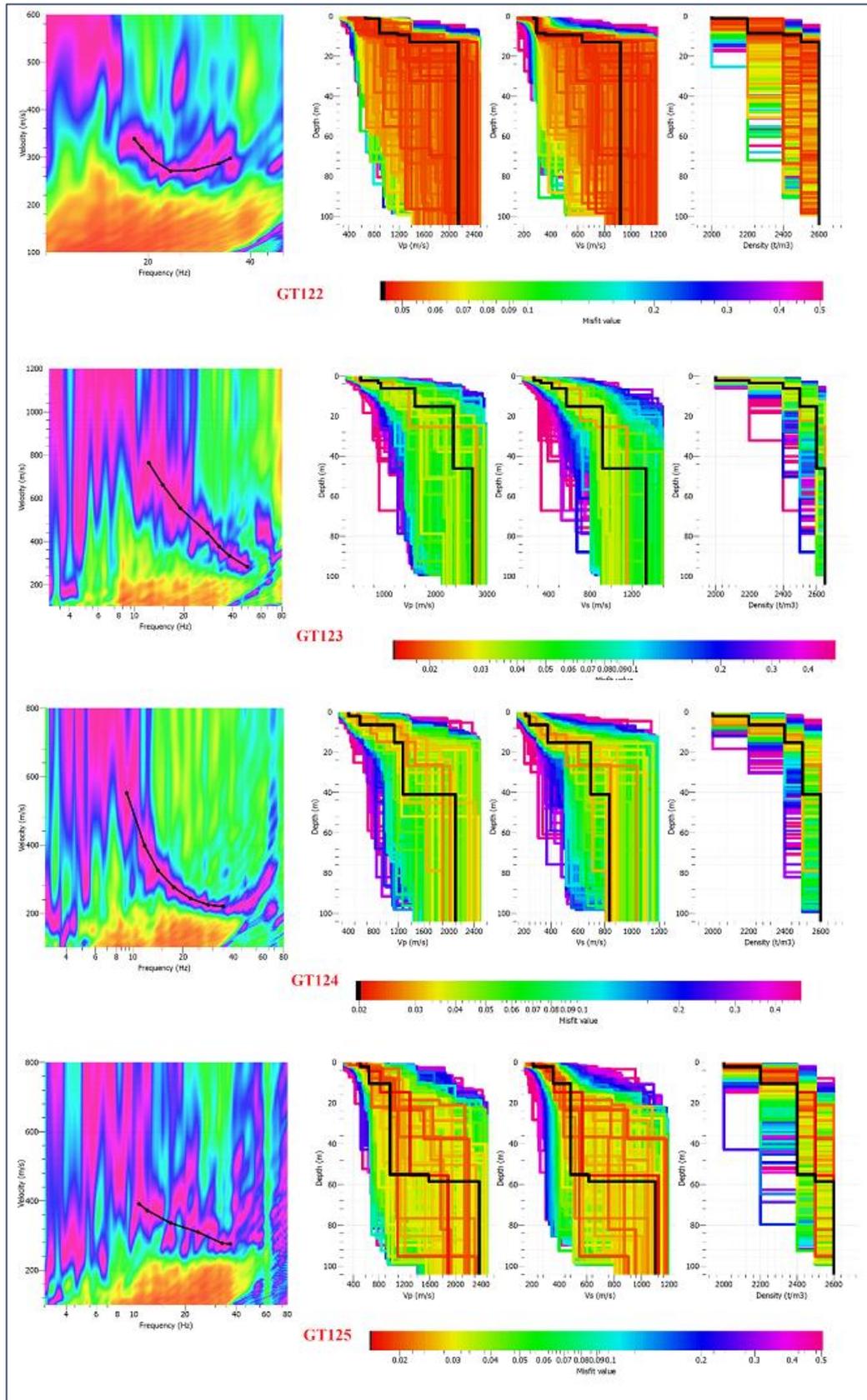
A.1. 27 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT110 - GT113



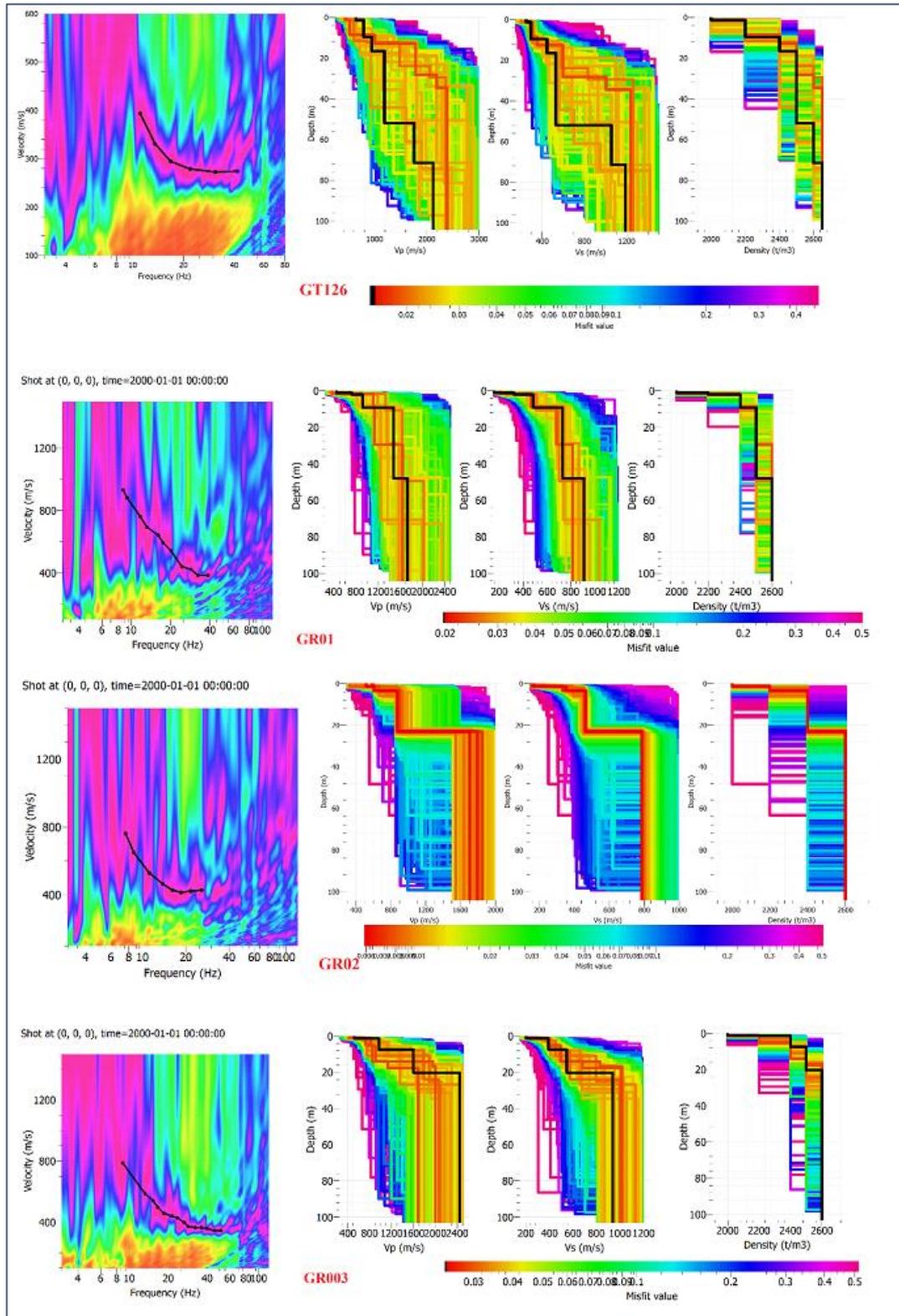
A.1. 28 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT114 - GT117



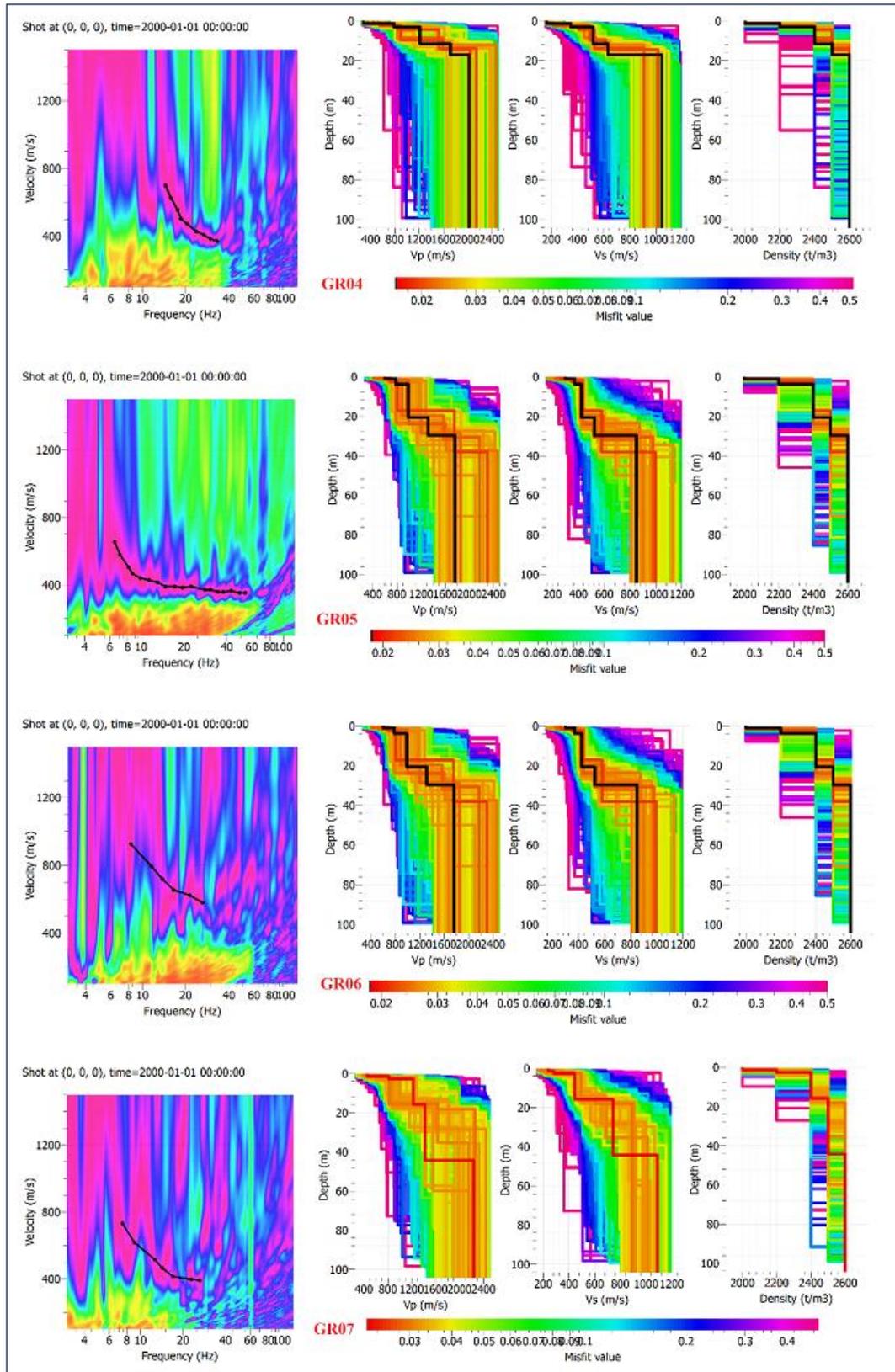
A.1. 29 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT118 - GT121



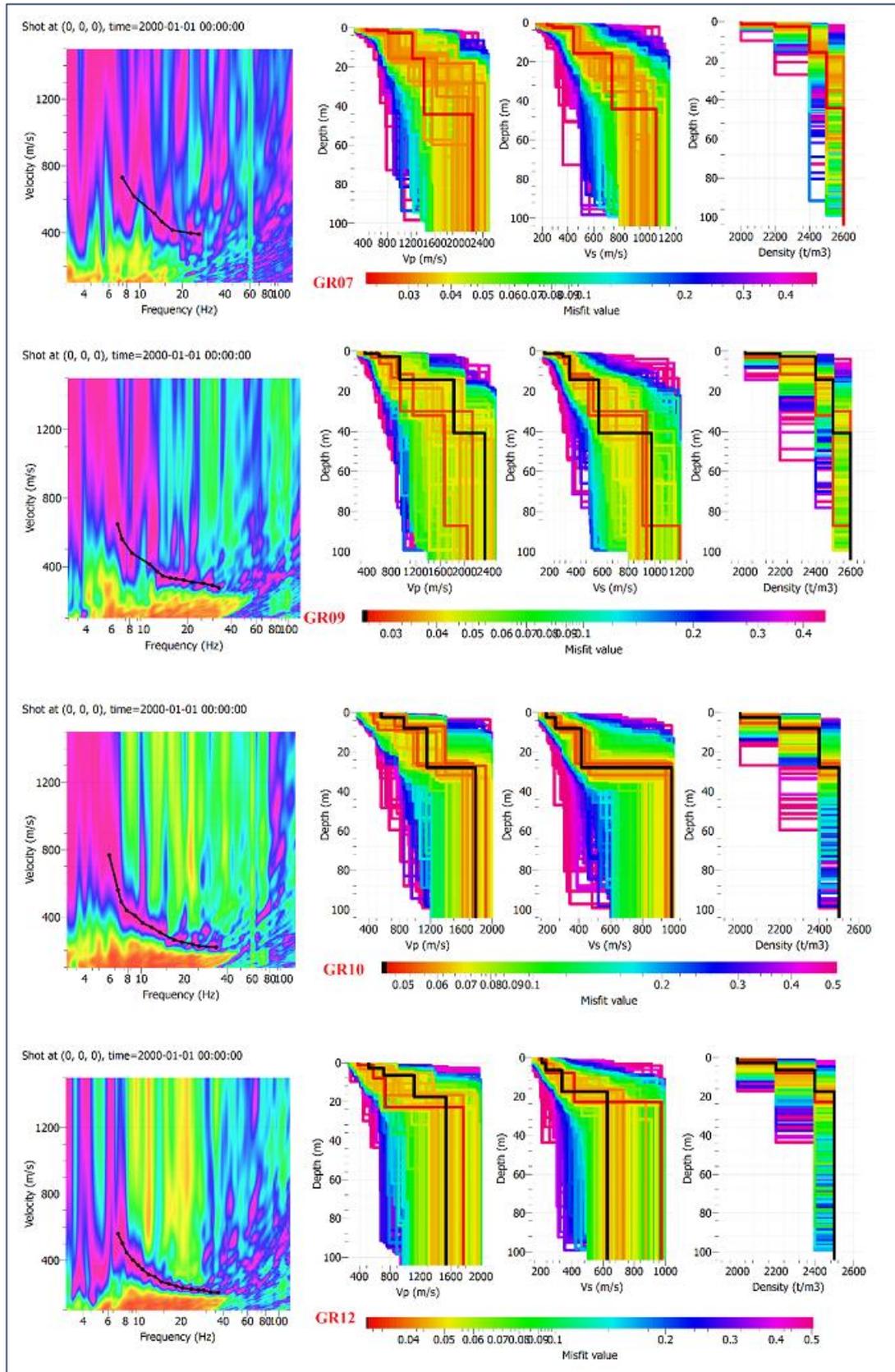
A.1. 30 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT122 - GT125



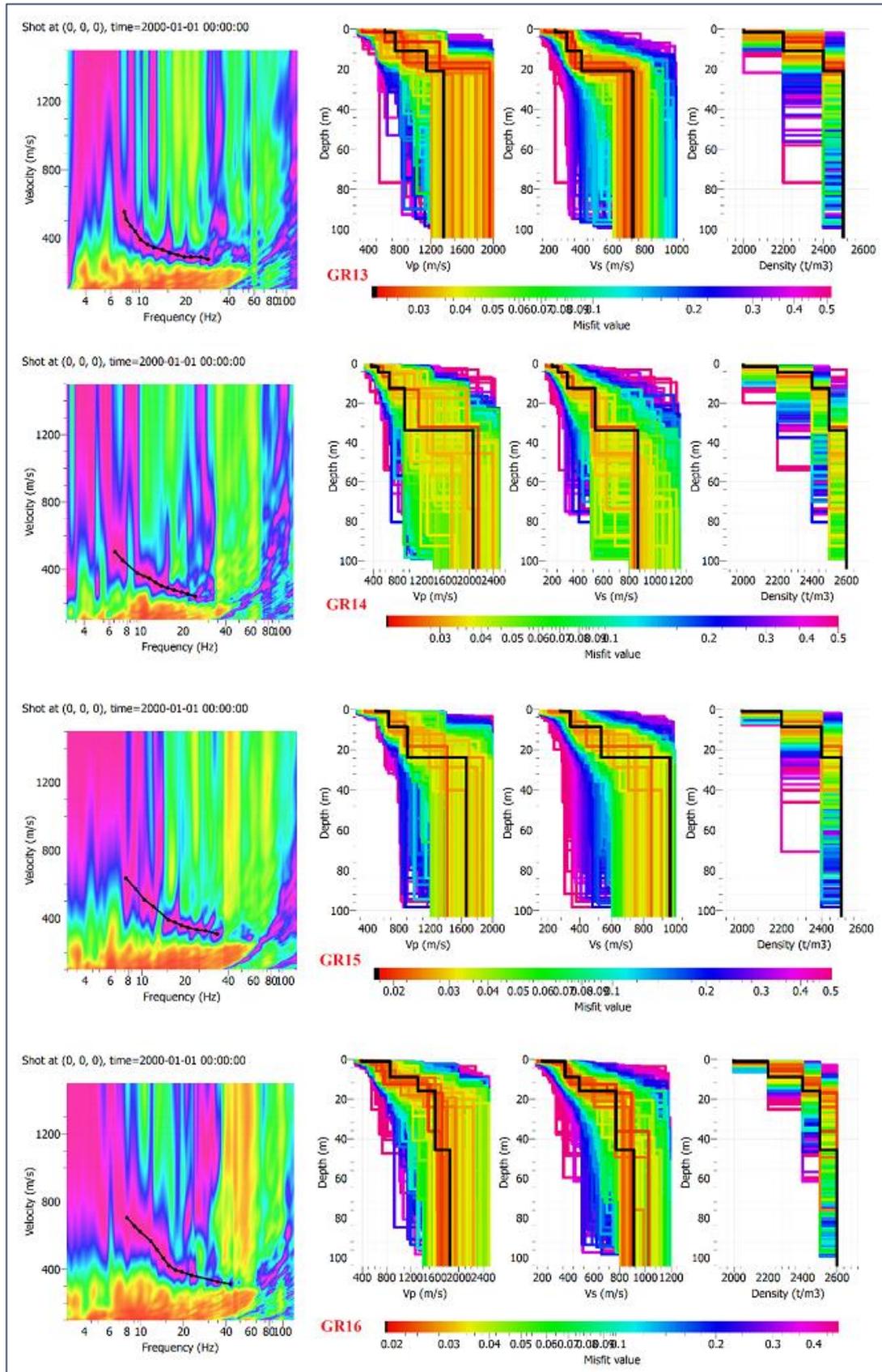
A.1. 31 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GT126 - GR03



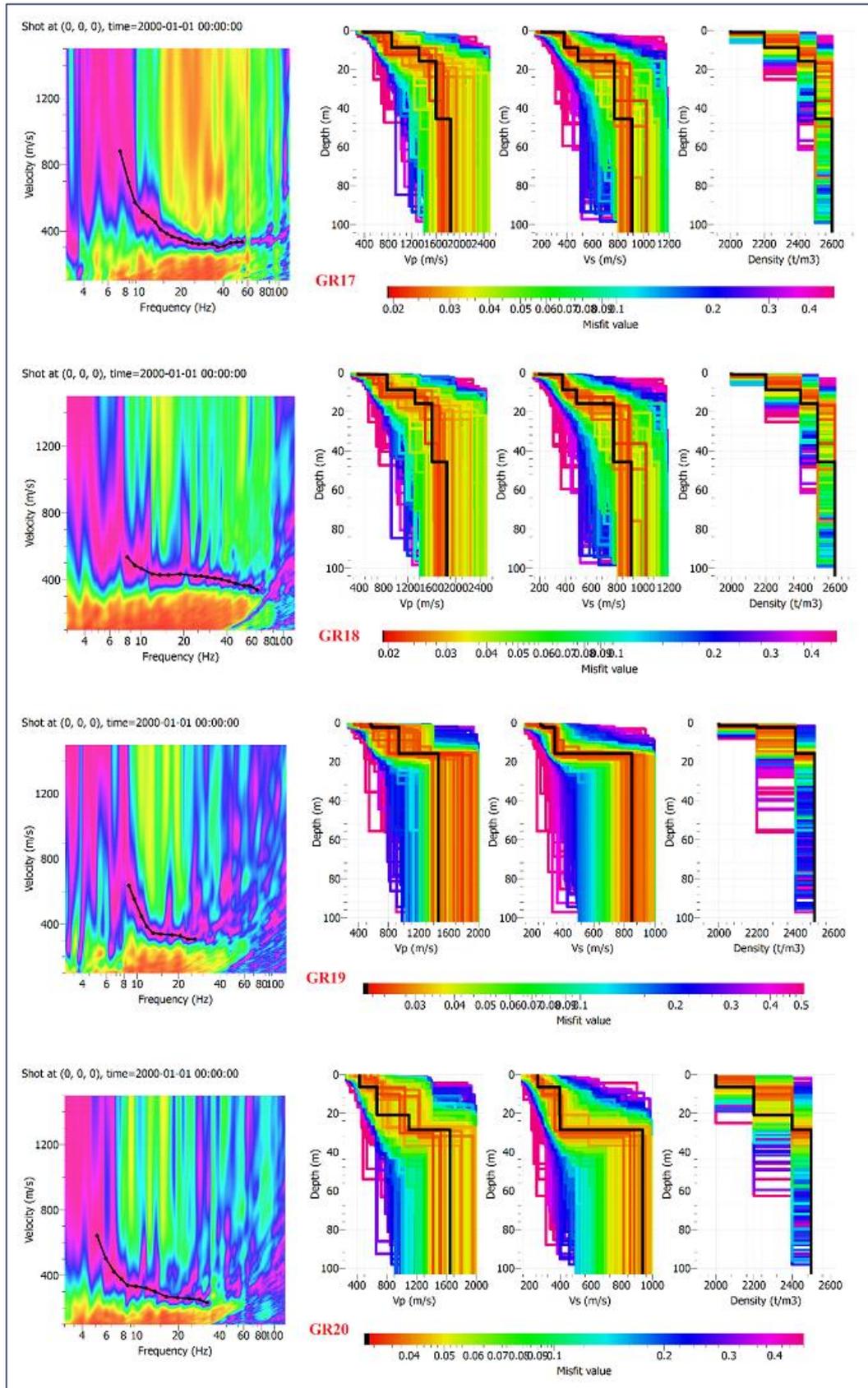
A.1. 32 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GR04 - GR07



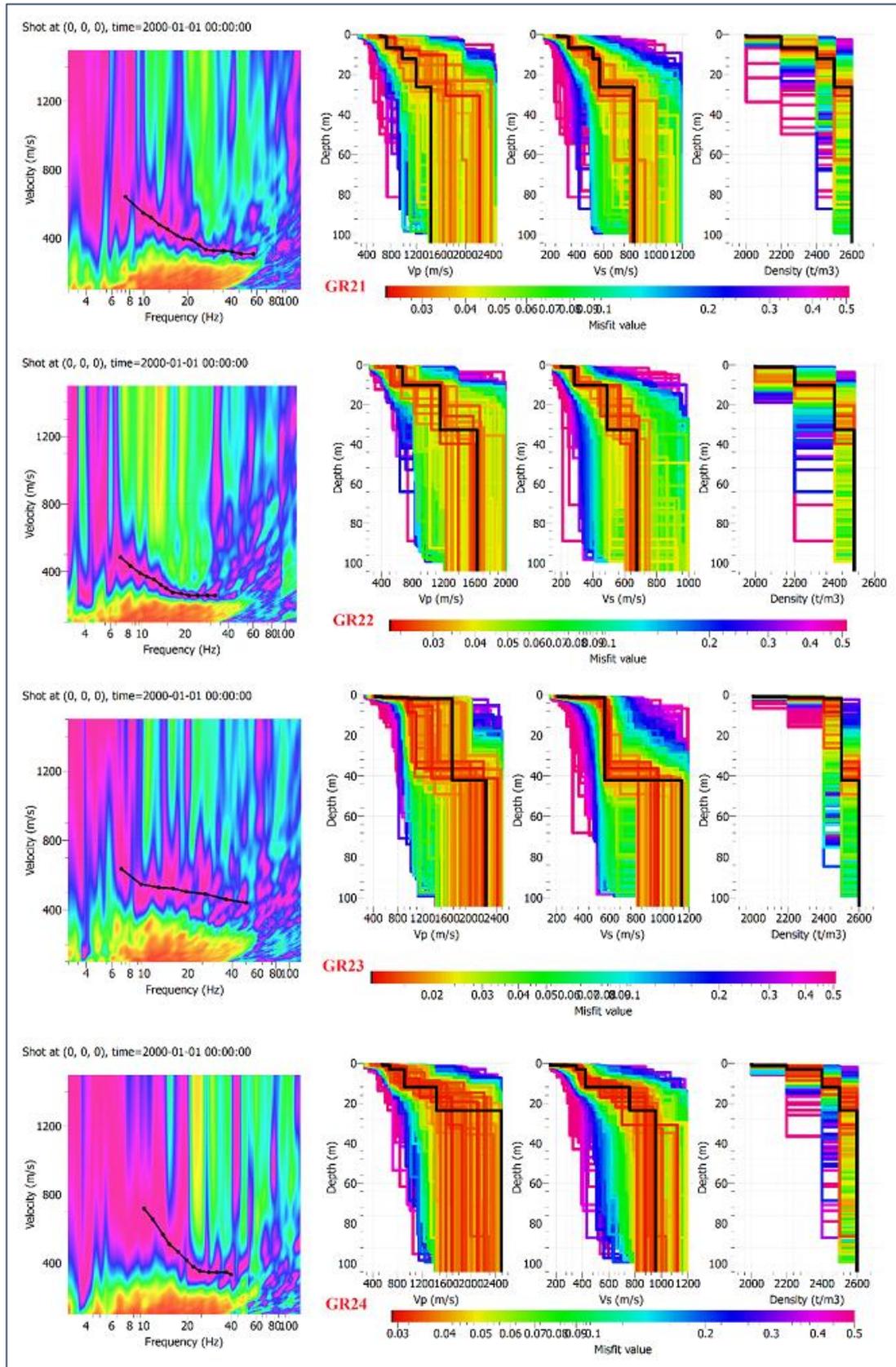
A.1. 33 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GR07 - GR12



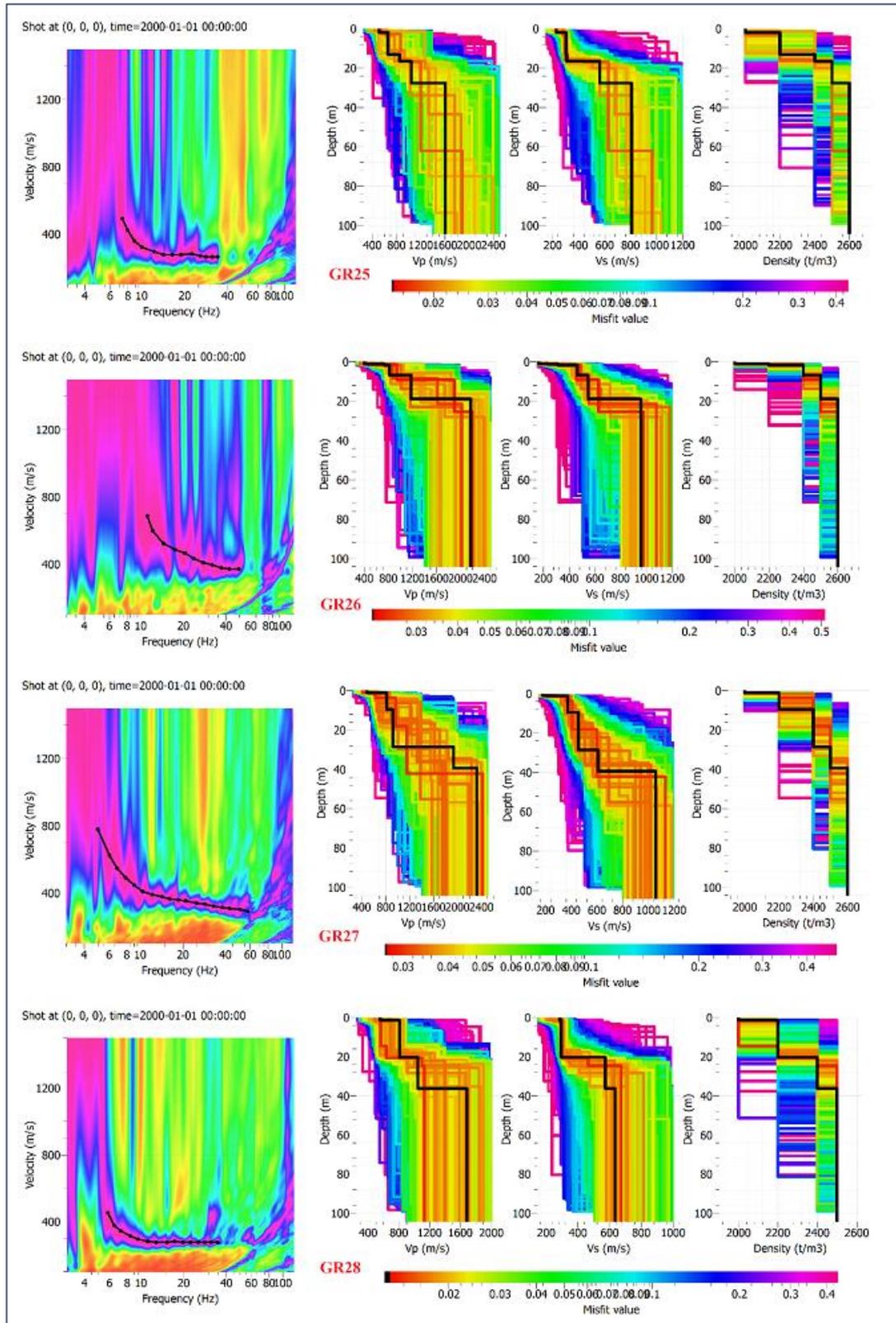
A.1. 34 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GR13 - GR16



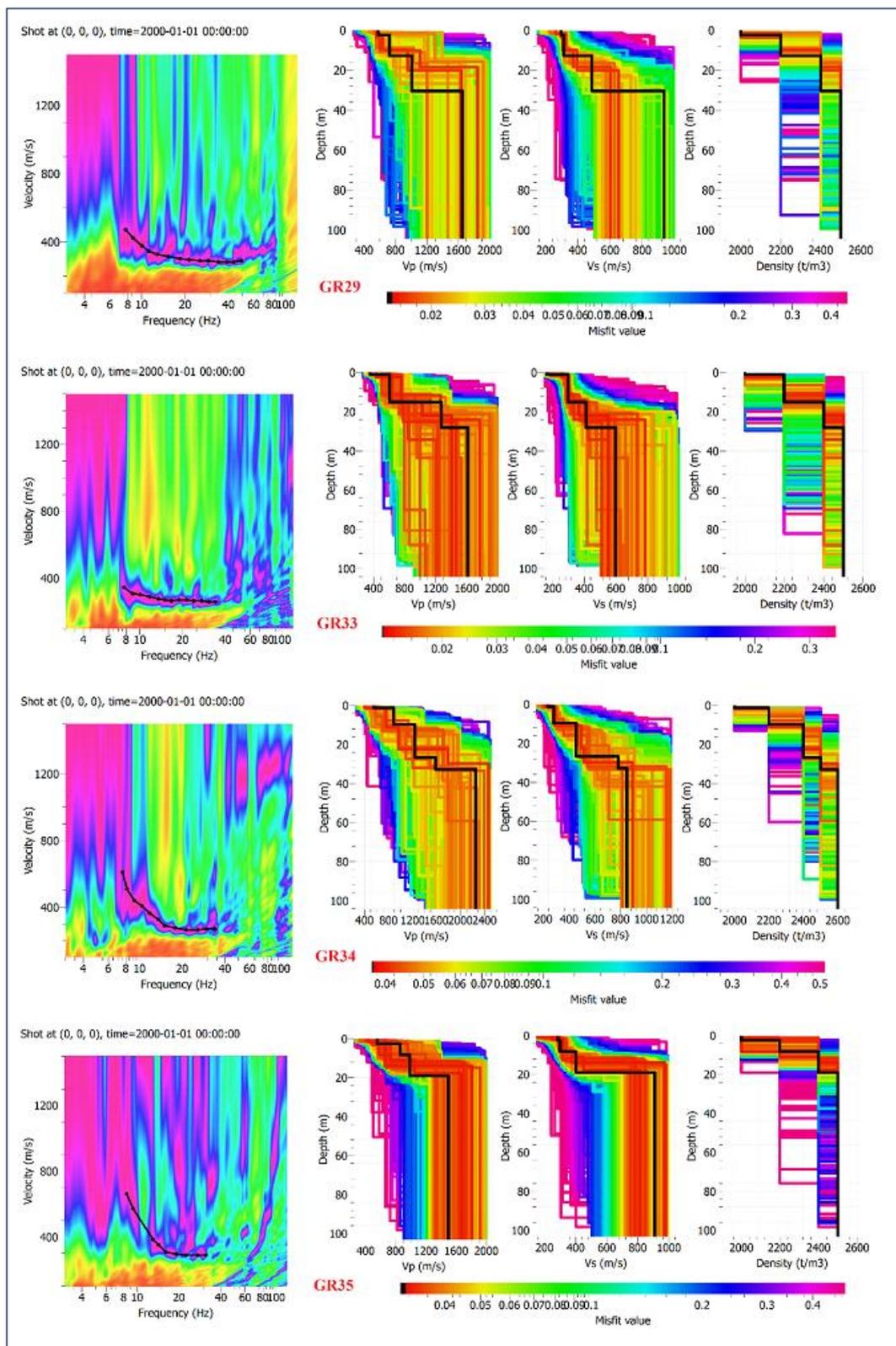
A.1. 35 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GR17 - GR20



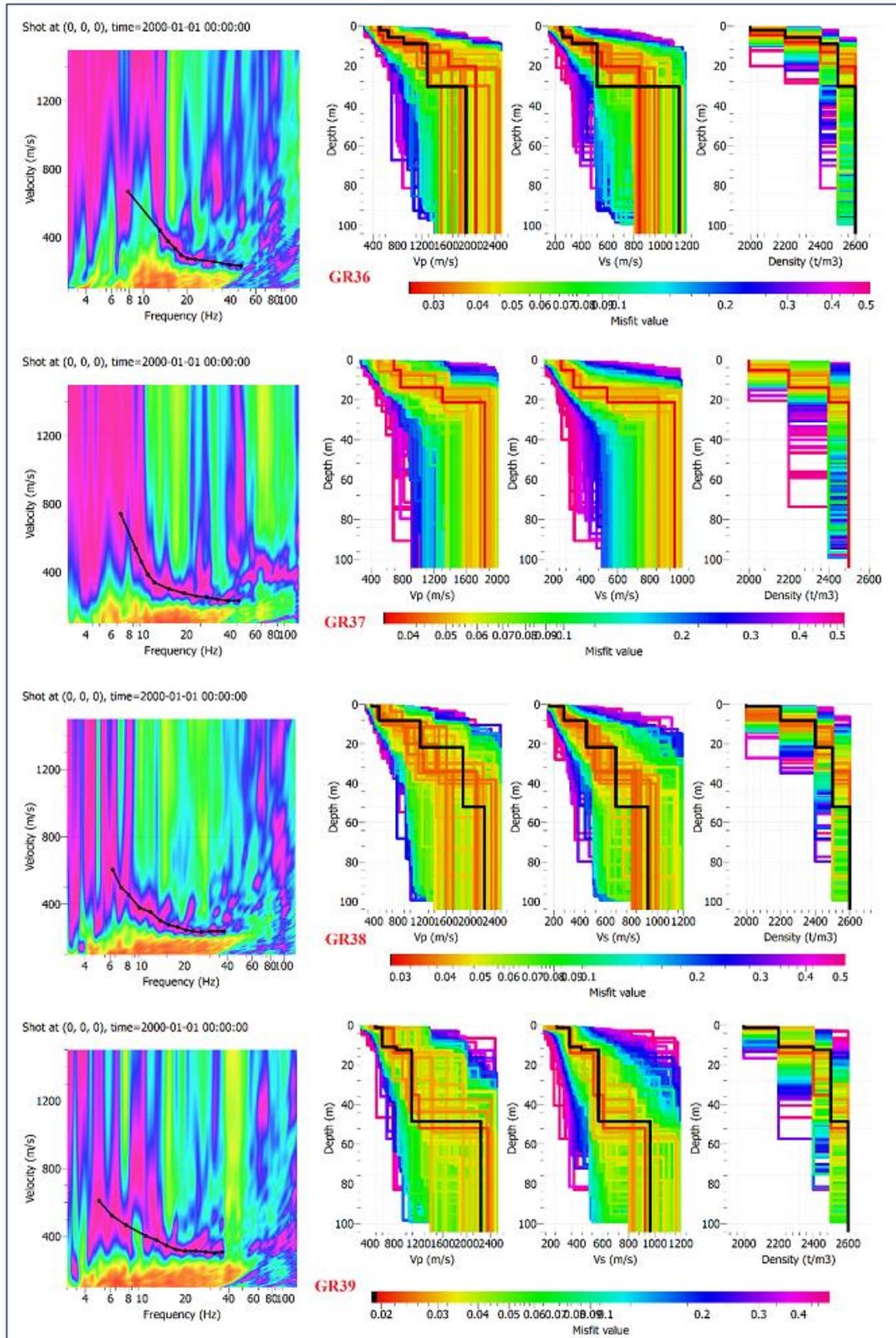
A.1. 36 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GR21 - GR24



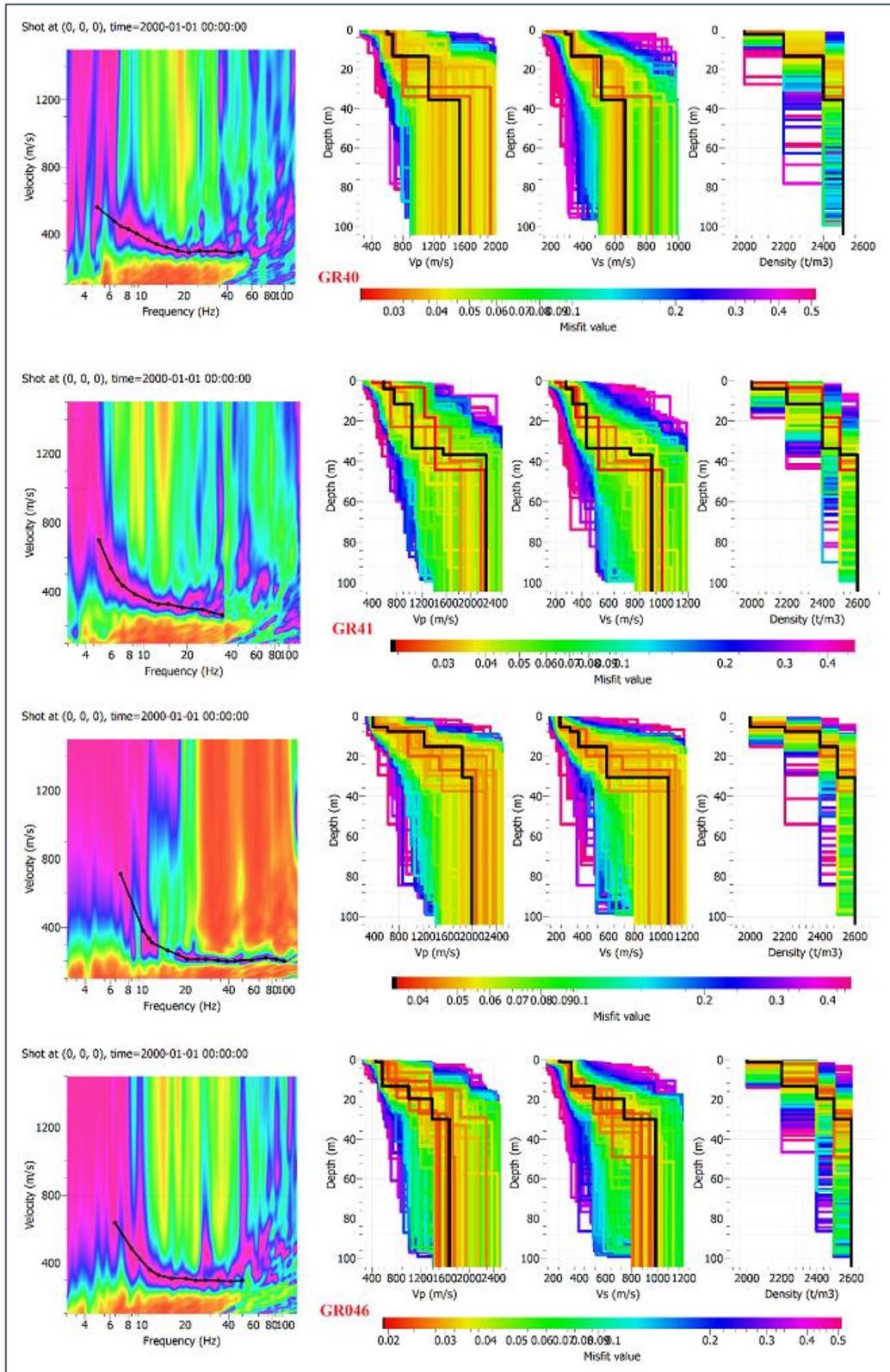
A.1. 37 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GR25 - GR28



A.1. 38 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GR29 - GR35

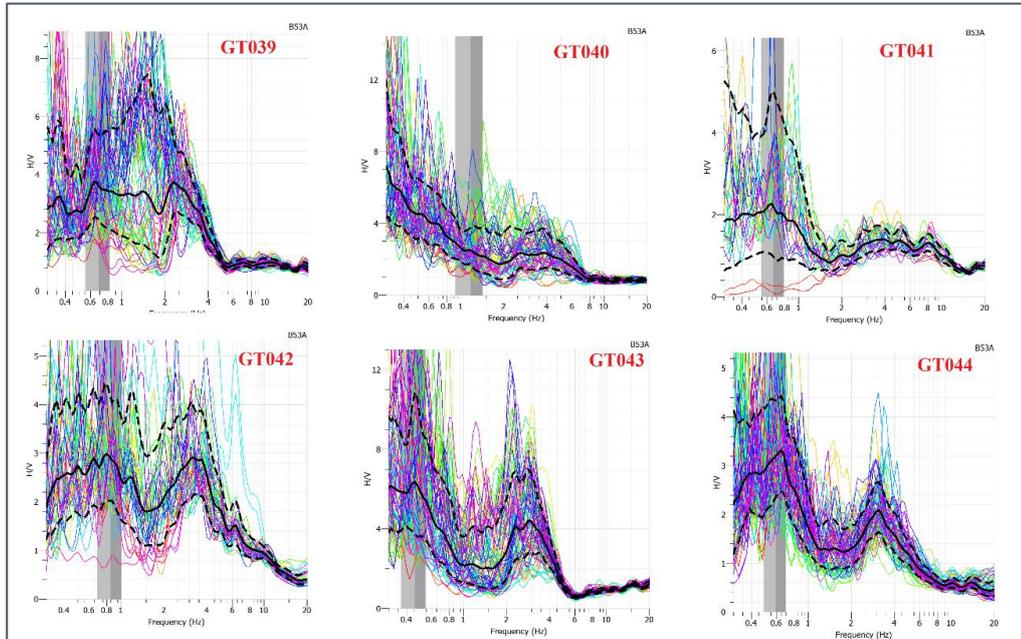


A.1. 39 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GR36 - GR39

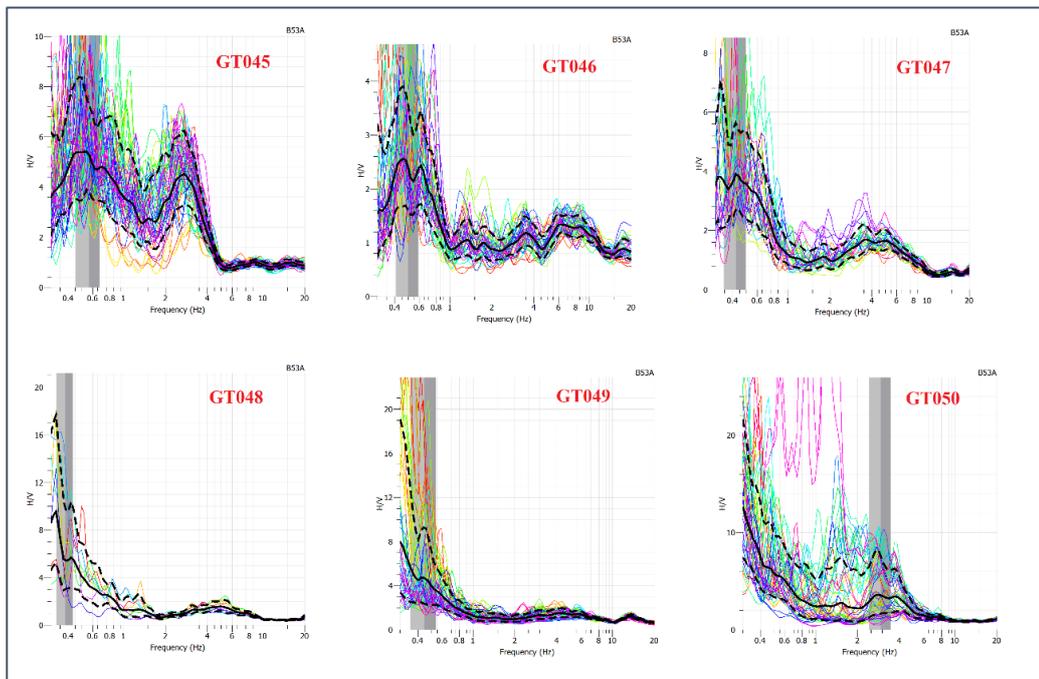


A.1. 40 Curvas de dispersión y modelos 1D (método IMASW), tendidos GR40 - GR46

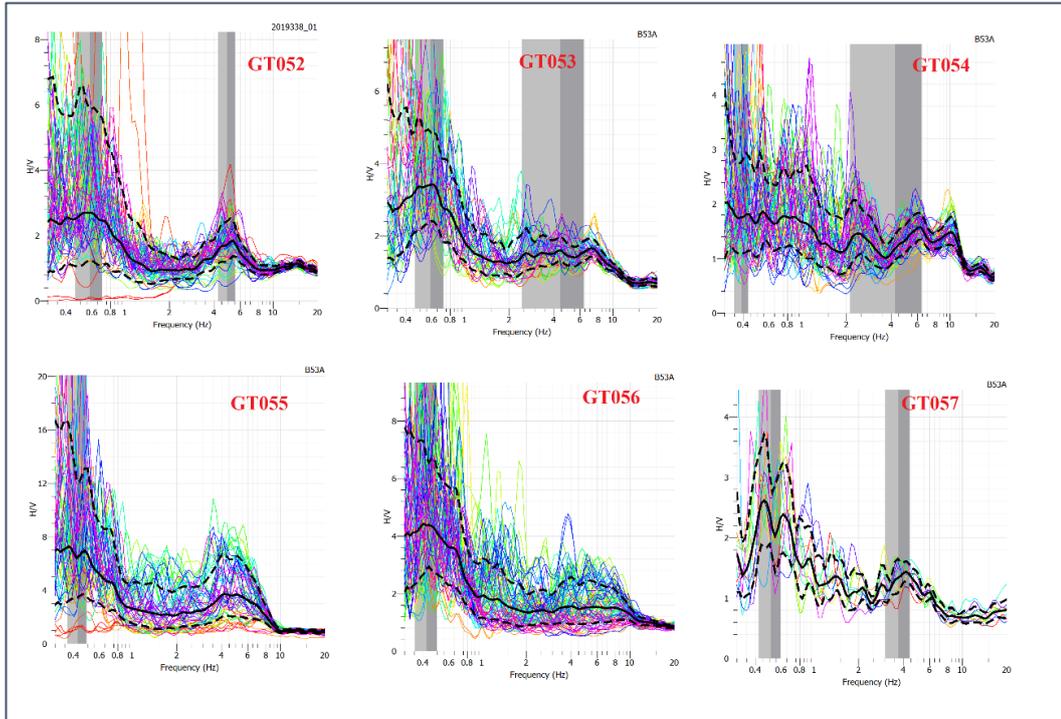
A.2 Gráficos de la relación espectral H/V



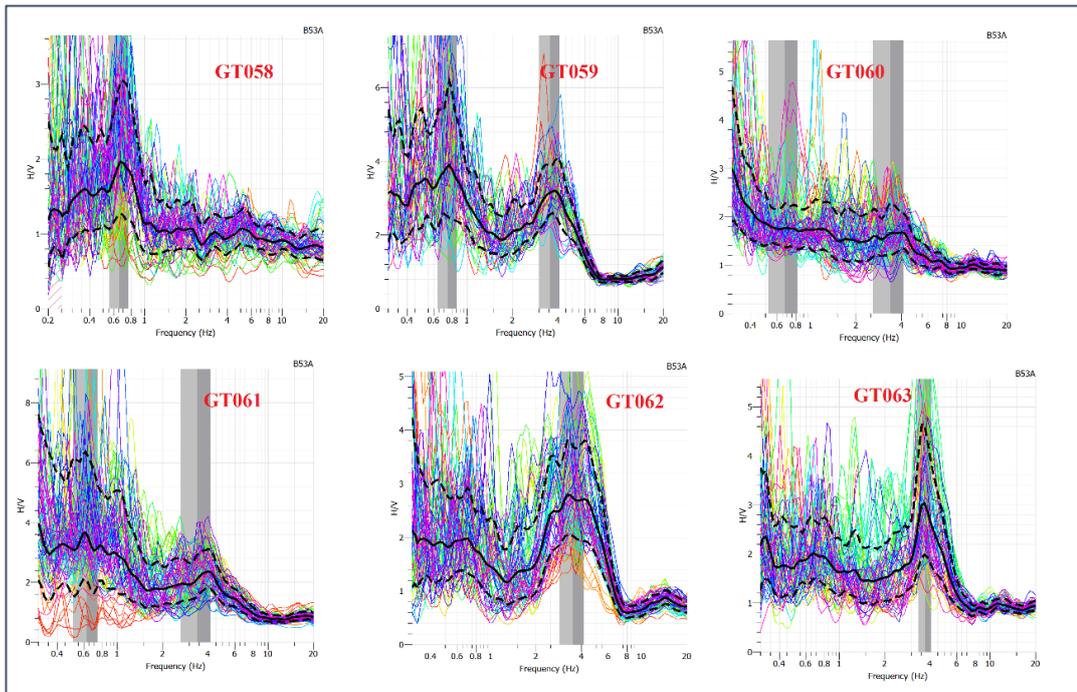
A.2.1 Relación espectral H/V, tendidos GT039 - GT044



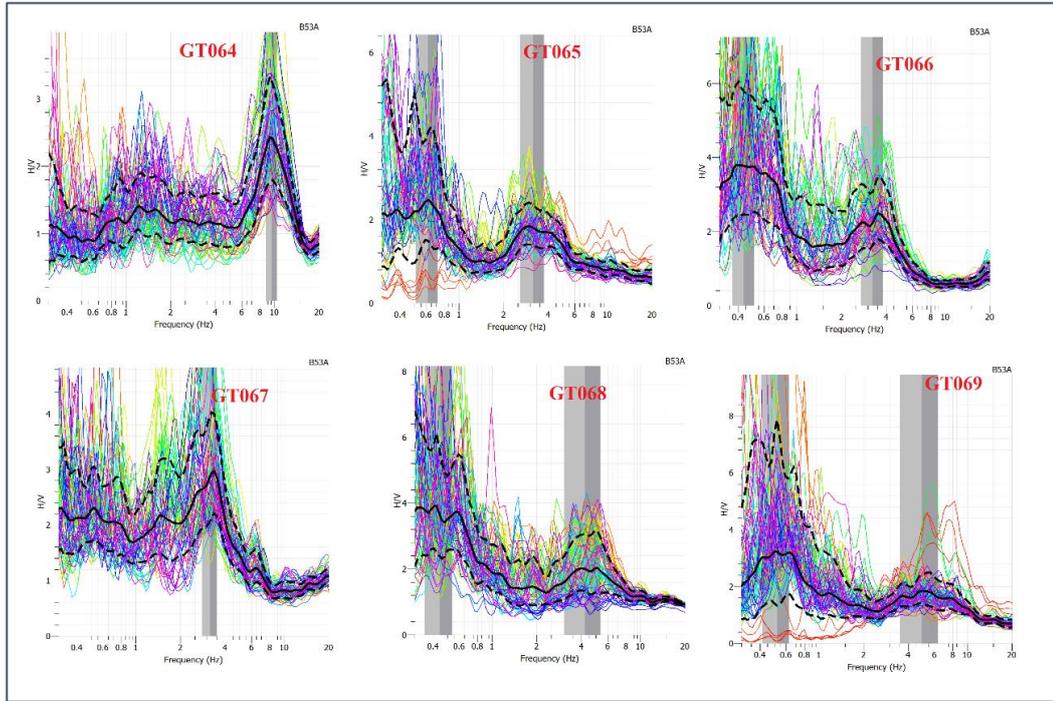
A.2.2 Relación espectral H/V, tendidos GT045 - GT050



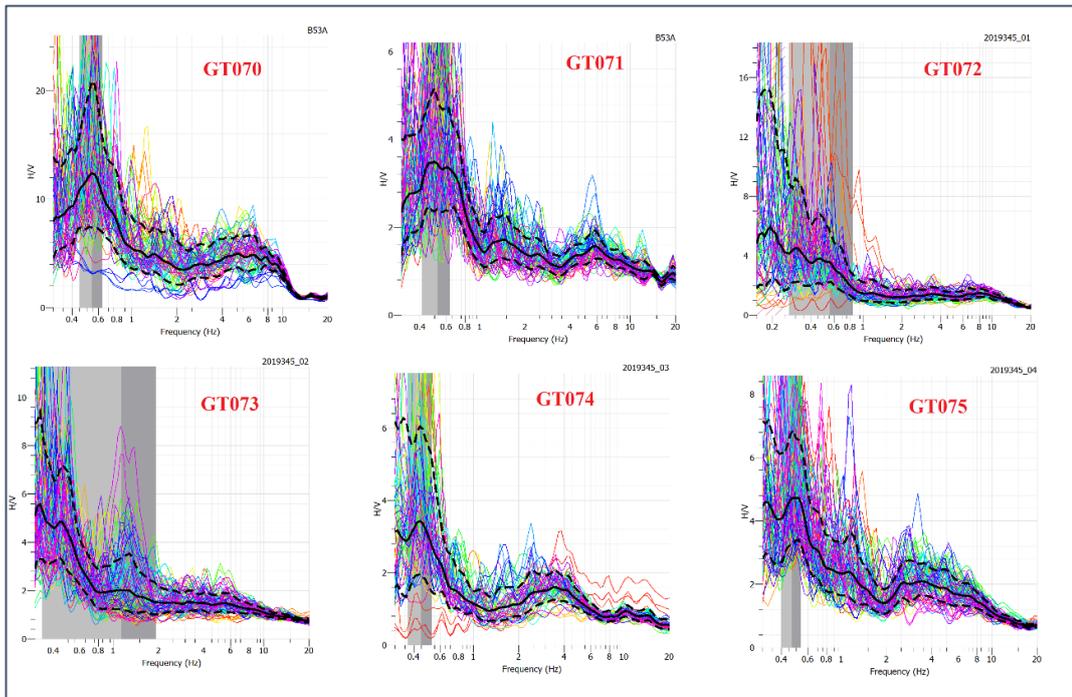
A.2.3 Relación espectral H/V, tendidos GT052 - GT057



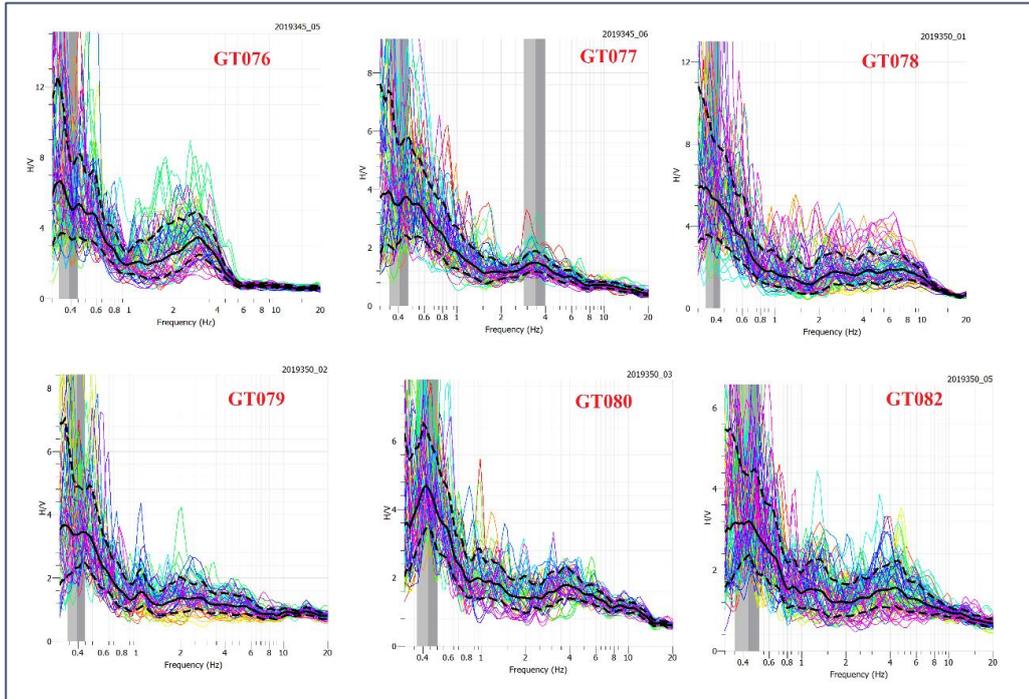
A.2.4 Relación espectral H/V, tendidos GT058 - GT063



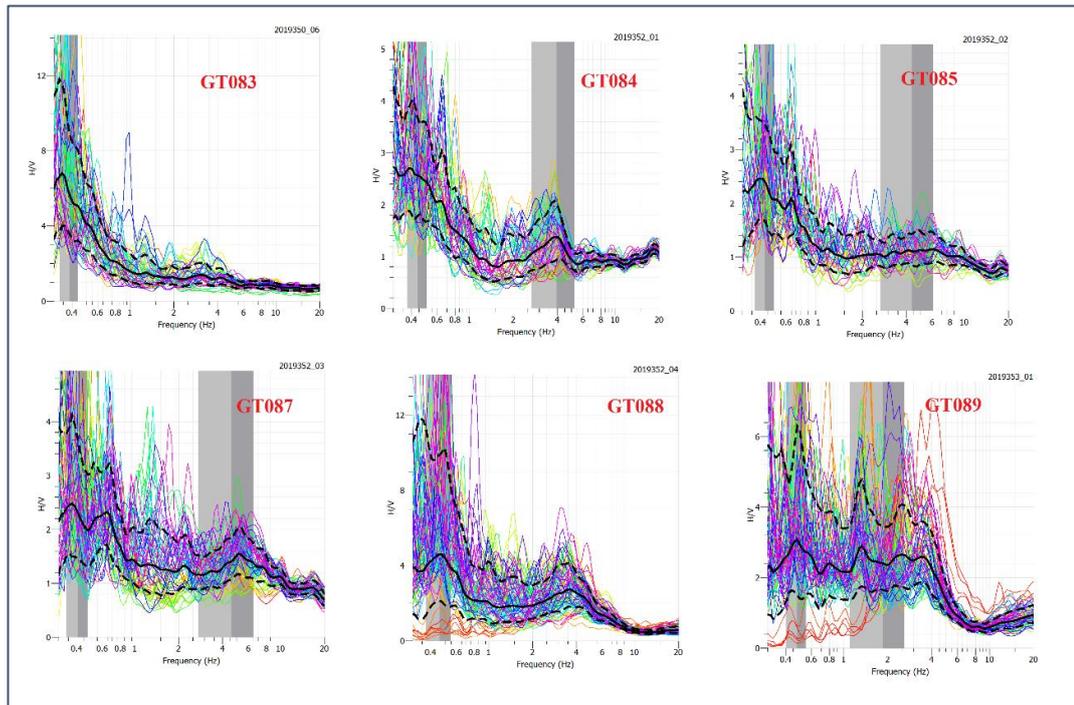
A.2 5 Relación espectral H/V, tendidos GT064 - GT069



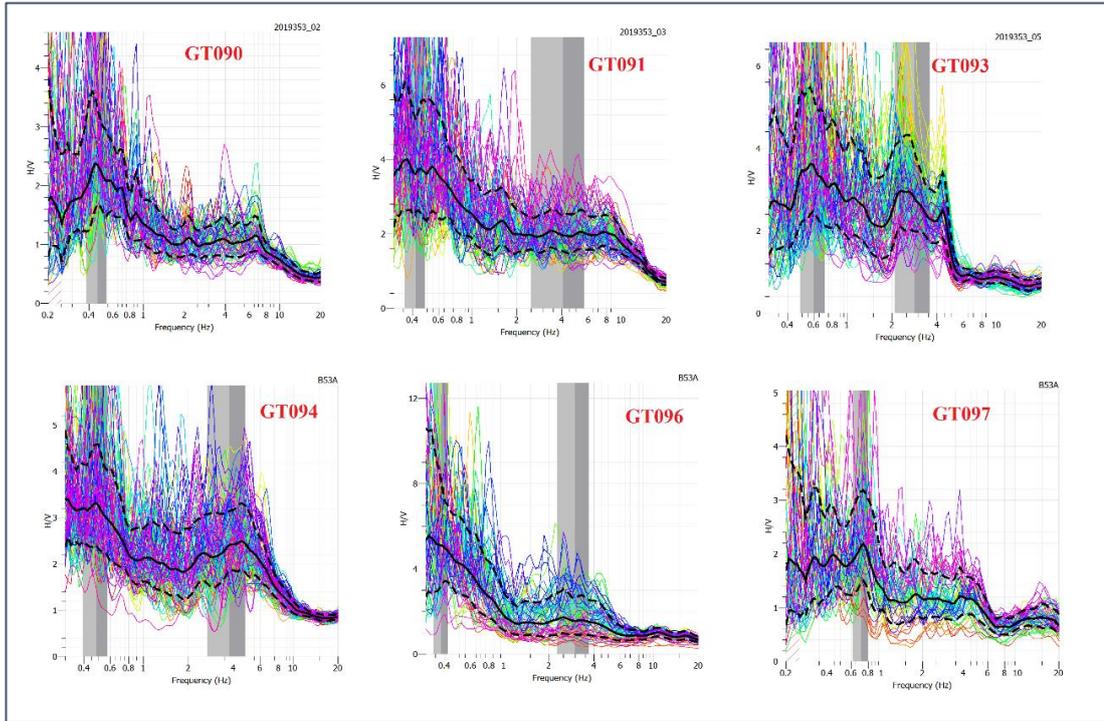
A.2 6 Relación espectral H/V, tendidos GT070 - GT075



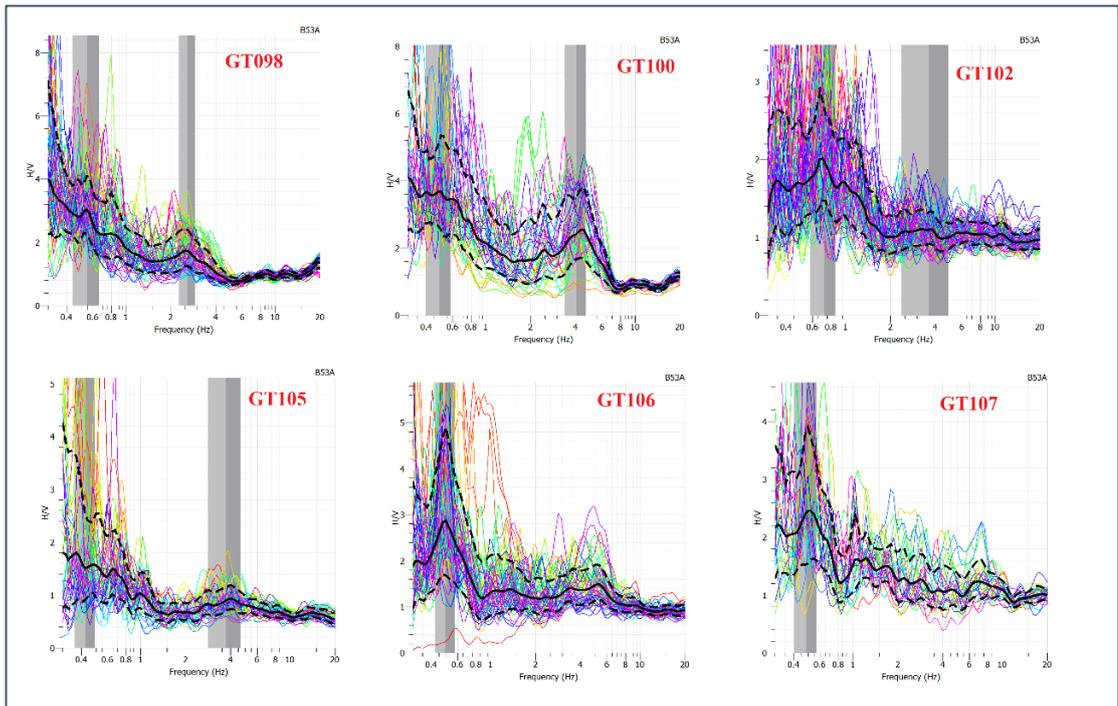
A.2.7 Relación espectral H/V, tendidos GT076- GT082



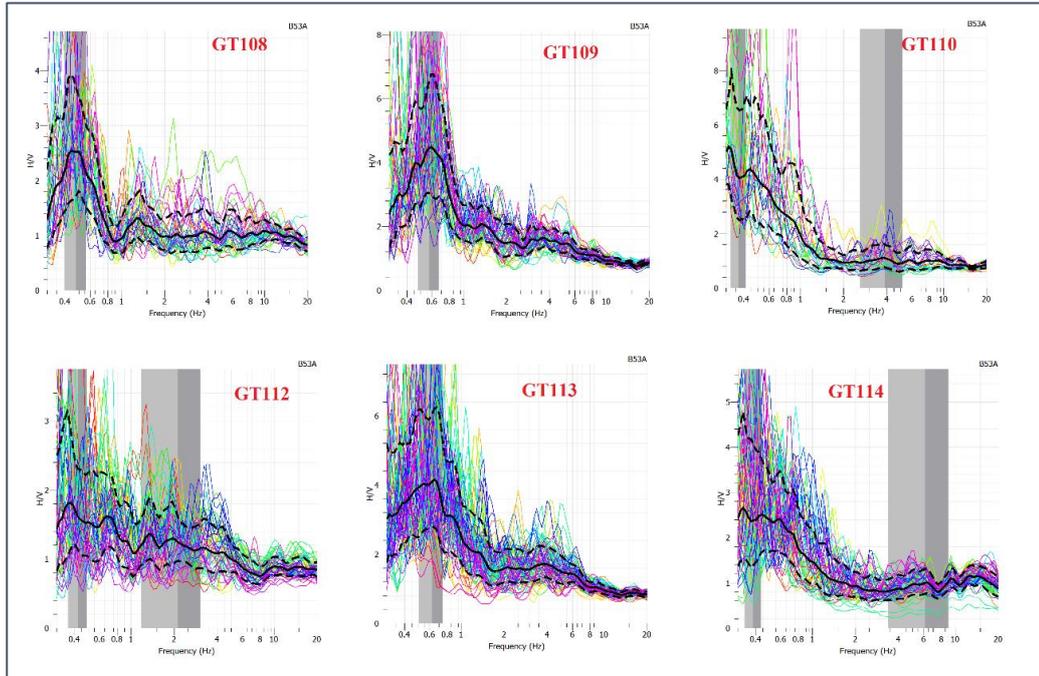
A.2.8 Relación espectral H/V, tendidos GT083 - GT089



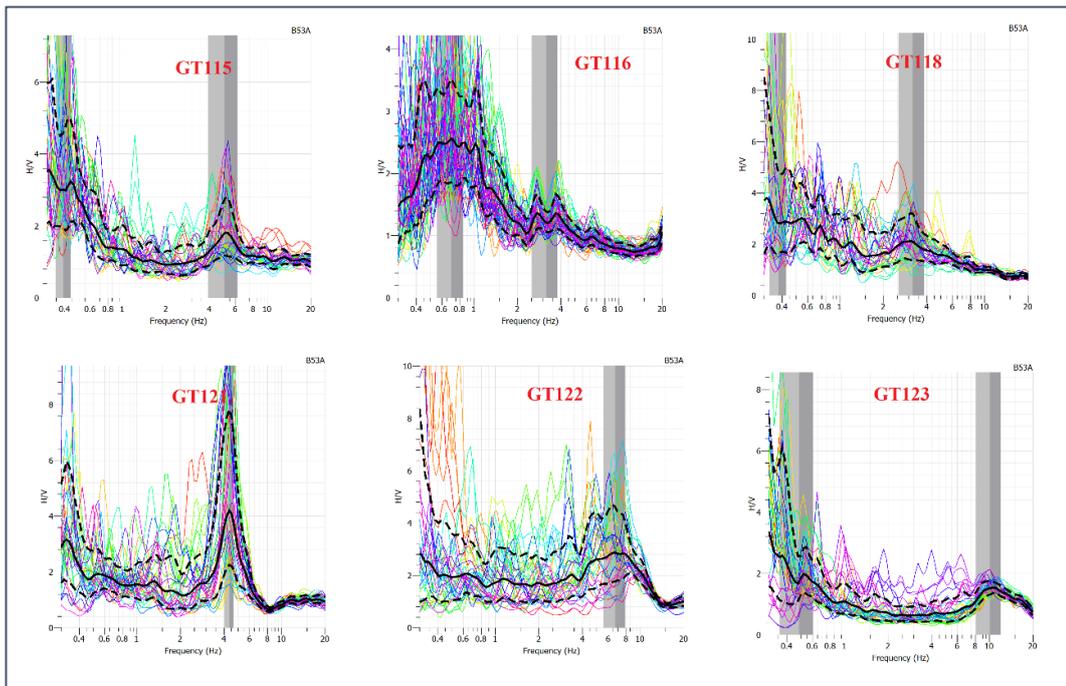
A.2.9 Relación espectral H/V, tendidos GT090 - GT097



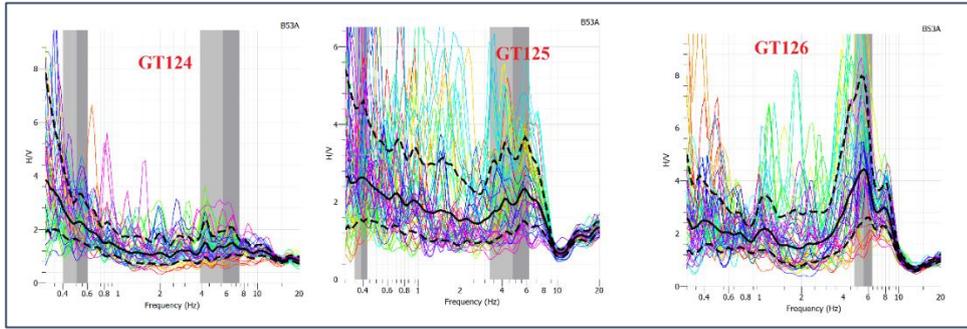
A.2.10 Relación espectral H/V, tendidos GT098 - GT107



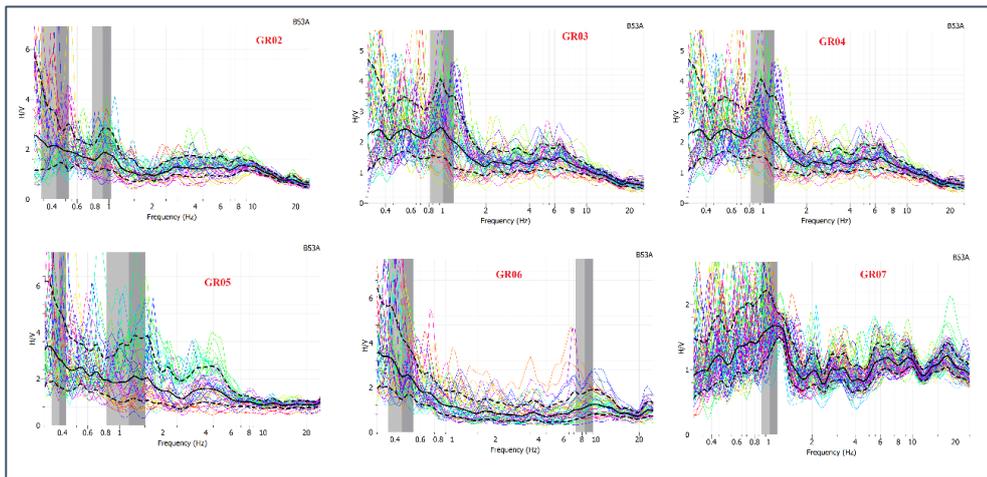
A.2 11 Relación espectral H/V, tendidos GT108 - GT114



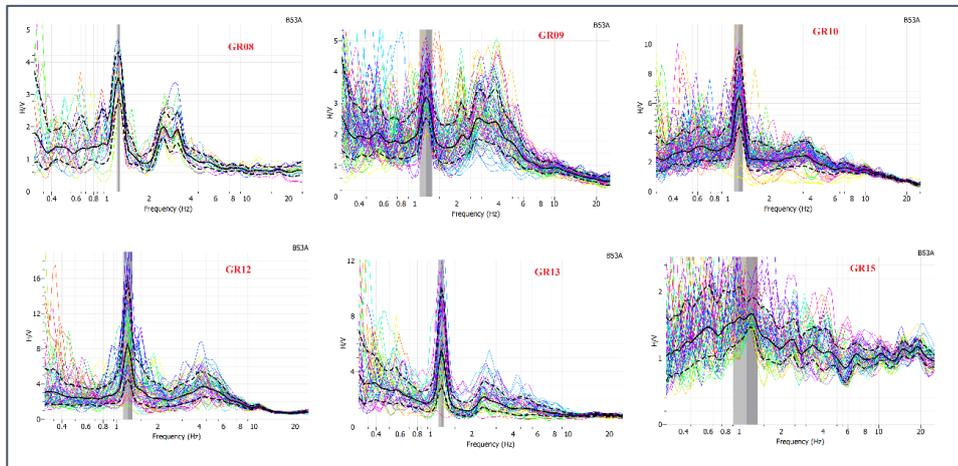
A.2 12 Relación espectral H/V, tendidos GT115 - GT123



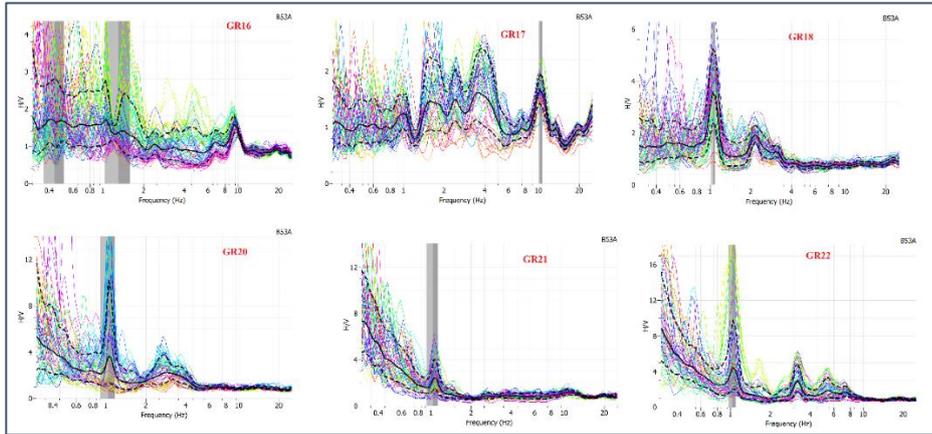
A.2 13 Relación espectral H/V, tendidos GT124 - GT126



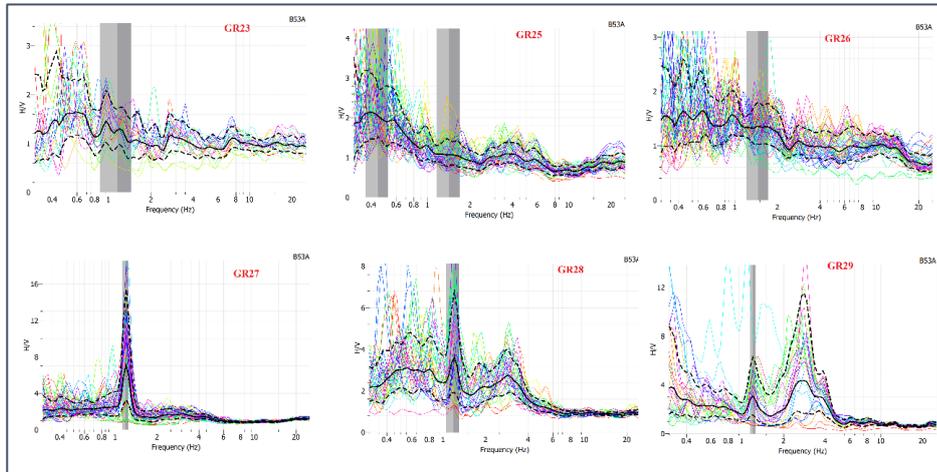
A.2 14 Relación espectral H/V, tendidos GR02 - GR07



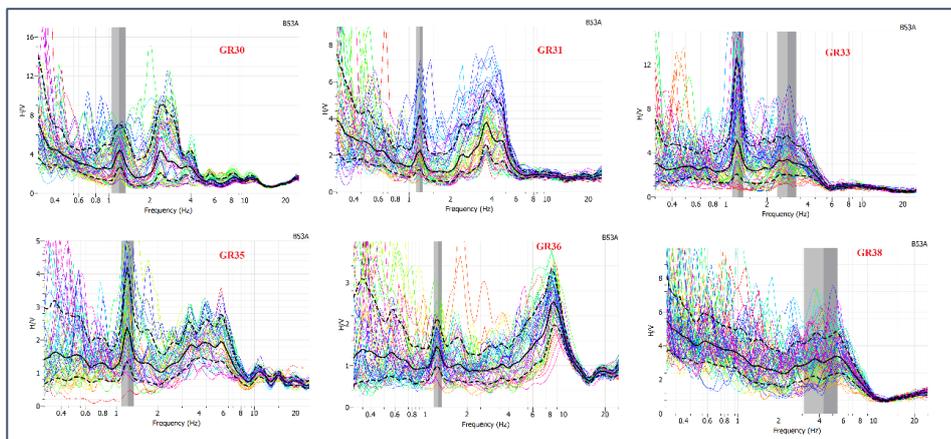
A.2 15 Relación espectral H/V, tendidos GR08 - GR15



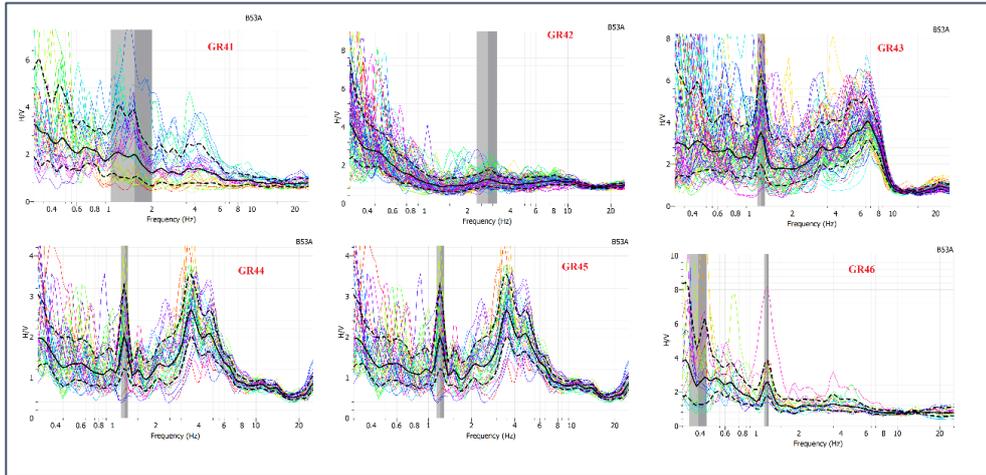
A.2 16 Relación espectral H/V, tendidos GR16 - GR22



A.2 17 Relación espectral H/V, tendidos GR23 - GR29



A.2 18 Relación espectral H/V, tendidos GR30 - GR38



A.2 19 Relación espectral H/V, tendidos GR41 - GR46