



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOFÍSICA
SISMOLOGÍA

**ESTIMACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE VELOCIDAD DE
ONDA DE CORTE DEL SUR DE LA CIUDAD DE MÉXICO A
PARTIR DE RUIDO SÍSMICO AMBIENTAL**

TESIS

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**PRESENTA:
ANGEL BRUNO OLIVARES PALOMARES**

**TUTOR:
DR. JORGE AGUIRRE GONZÁLEZ
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., diciembre 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A las mujeres de mi vida:

Susana, la mejor mamá

Karen y Paty,

Lucy,

<3 Janet <3

A mi padre.

A mi hermosa familia.

Agradecimientos

A la Unidad de Instrumentación Sísmica del Instituto de Ingeniería de la UNAM y a todos los becarios que participaron en la adquisición de los datos. Al Dr. Leonardo Ramírez Guzmán por las facilidades otorgadas en el uso de los datos.

Al CONACYT por la Beca que me asignó (CVU: 927295) para la realización de mis estudios de posgrado.

Al Dr. Jorge Aguirre por motivarme a estudiar un posgrado y darme total independencia en el desarrollo de este trabajo.

A todos mis amigos, que no mencionaré por temor a olvidar a alguno.

La adquisición de los datos utilizados en este trabajo fue financiada por la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación (SECITI) a través del proyecto “Sistema Integral de Monitoreo Sísmico y Generación de Mapas de Intensidades y Daños en Tiempo Real de la Ciudad de México”, con números de convenio: IISGCONV-181-2016, SECITI/073/2016, IISGCONV-181-2016/1 CM-SECITI/107/2017 y CM-SECITI/075/2018.



CÓDIGO DE ÉTICA

Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a, las obras de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales.

A handwritten signature in dark ink, appearing to read "Angel Bruno Olivares Palomares".

Angel Bruno Olivares Palomares

Índice

| | |
|---|----|
| Resumen..... | 1 |
| Introducción | 2 |
| Capítulo 1. Marco Teórico | 5 |
| 1.1 Ondas Superficiales | 5 |
| 1.2 Dispersión..... | 5 |
| 1.3 Microtremores | 6 |
| 1.4 Correlaciones cruzadas de campos difusos..... | 7 |
| 1.5 Correlaciones cruzadas de ruido sísmico ambiental | 8 |
| Capítulo 2. Zona de estudio | 9 |
| 2.1 Geología y estratigrafía | 9 |
| 2.2 Información de pozos profundos | 14 |
| 2.3 Zonificación geotécnica..... | 16 |
| 2.4 Mapa de isoperíodos..... | 19 |
| 2.5 Algunos estudios previos..... | 20 |
| Capítulo 3. Datos | 23 |
| Capítulo 4. Análisis y procesamiento de datos | 27 |
| 4.1 Acondicionamiento de los registros..... | 27 |
| 4.2 Funciones de densidad de energía..... | 27 |
| 4.3 Matriz de coeficientes de correlación de densidad espectral | 31 |
| 4.4 Recuperación de la función de Green | 34 |
| 4.4.1 Correlación cruzada de señales digitales | 35 |
| 4.4.2 Rotación de las componentes horizontales | 36 |
| 4.4.3 Selección de la longitud de las ventanas..... | 36 |
| 4.4.4 Normalización en tiempo | 36 |
| 4.4.5 Normalización en frecuencias (<i>whithening</i>)..... | 39 |
| 4.4.6 Algoritmo de selección de ventanas | 41 |
| 4.4.7 Relación señal ruido y apilado..... | 45 |
| 4.4.8 Esquema de procesamiento seleccionado..... | 48 |
| 4.5. Separación de arribos espurios de la función de Green | 54 |
| 4.6 Cálculo de los tiempos de viaje | 57 |
| Capítulo 5. Tomografía..... | 65 |

| | |
|--|-----|
| 5.1 Tomografía de tiempos de viaje..... | 65 |
| 5.2 Prueba de resolución..... | 67 |
| 5.3 Extracción de curvas de dispersión de velocidad de grupo | 67 |
| 5.4 Procedimiento por arreglo | 67 |
| Capítulo 6. Cocientes espectrales HVSR..... | 73 |
| 6.1 Cocientes espectrales y campos difusos | 73 |
| 6.2 Cálculo de los cocientes espectrales HVSR | 74 |
| Capítulo 7. Inversión a profundidad..... | 79 |
| 7.1 Inversión conjunta de cocientes espectrales HVSR y curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh o Love | 79 |
| 7.2 Clustering de las frecuencias características..... | 80 |
| 7.3 Procedimiento de inversión a profundidad | 85 |
| Capítulo 8. Análisis de resultados, consideraciones y repositorio..... | 91 |
| 8.1 Modelos de velocidad | 91 |
| 8.2 Consideraciones | 99 |
| 8.3 Repositorio CDMX-VS..... | 104 |
| Conclusiones | 107 |
| Referencias..... | 111 |
| Anexo I. Funciones de densidad de energía (PSD) en cada arreglo..... | 117 |
| Anexo II Funciones de Green estimadas en todos los arreglos..... | 141 |
| Anexo III. Cálculo de los tiempos de viaje por arreglo..... | 163 |
| Anexo IV. Tomografías por arreglo. | 201 |
| Anexo V. Inversión por clúster. | 234 |
| Anexo VI. Frecuencias características estimadas por estación..... | 259 |
| Anexo VII. Distribución espacial de las frecuencias características por arreglo | 269 |

Resumen

En este trabajo se analizaron registros de ruido sísmico ambiental obtenidos en 383 estaciones triaxiales de banda intermedia, distribuidas en 22 arreglos de hasta 21 estaciones. En cada arreglo se obtuvieron registros simultáneos de hasta 5 días de duración. El objetivo fue estimar la estructura de velocidades del subsuelo de la Ciudad de México, específicamente en el área que comprende la subcuenca del valle de Chalco en las alcaldías Xochimilco, Coyoacán, Iztapalapa y una parte de Tláhuac. Para observar el contenido espectral del ruido sísmico se calcularon las funciones de densidad de energía (PSD) de cada estación y de cada componente, observándose amplitudes más grandes en la componente vertical. Además, se observó que en frecuencias menores a 0.8 Hz el percentil 50 de las funciones PSD sigue la tendencia de las curvas NLNM y NHNM, e incluso en algunas estaciones está dentro de los rangos formados por estas curvas. En frecuencias más altas las funciones PSD tienen una tendencia creciente acentuándose en la componente vertical. También, para verificar las propiedades difusivas del ruido sísmico fueron calculadas las matrices de coeficientes de correlación de densidad espectral y se observó que en algunas estaciones existe correlación entre frecuencias vecinas, indicando la no difusividad del ruido sísmico registrado.

Con el fin de observar trenes de onda entre pares de estaciones y calcular los tiempos de viaje, fue implementado el método de la recuperación de la función de Green o interferometría sísmica pasiva. Para encontrar el esquema de procesamiento adecuado se analizó exhaustivamente la información, se contempló la normalización en tiempo y en frecuencias, algoritmos de selección de ventanas, ponderación de cada función de correlación cruzada respecto a la relación señal ruido, apilado selectivo. Una vez definido el esquema de procesamiento, se recuperaron las componentes verticales, radiales y transversales de la función de Green en cada arreglo a partir de la correlación cruzada de registros simultáneos. Para separar los arribos espurios en los pulsos de Rayleigh, consecuencia de la no difusividad del ruido sísmico registrado, se implementó un método de separación de señal ciega a partir del análisis de componentes independientes utilizando las componentes radial y vertical de las funciones de Green recuperadas en todos los arreglos. En cada arreglo fue elegido la componente donde se observó un pulso más claro y se calcularon los tiempos de viaje. Se observó dispersión de ondas Love o Rayleigh en un rango entre 0.3 y 1.3 Hz.

Considerando que los trenes de onda que viajen entre cada par de estaciones siguen trayectorias rectas, fueron estimadas tomografías de tiempos de viaje en los rangos donde fue observada la dispersión. En cada tomografía se llevó a cabo una prueba de resolución donde se consideraron sólo las trayectorias donde se obtuvo un pulso coherente, además del error asociado al cálculo de los tiempos de viaje. Posteriormente, de las tomografías fueron extraídas curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh o Love asociadas a áreas específicas. Se calcularon los cocientes espectrales HVSR en cada estación utilizando el estimador cociente de los promedios y con el fin de agrupar las formas de los cocientes espectrales similares entre sí, se llevó a cabo un análisis de Clustering utilizando el método de *k-means*. En cada clúster se hizo al menos una inversión conjunta entre las curvas de dispersión de velocidad de grupo y los cocientes espectrales HVSR para obtener modelos de velocidad congruentes con la frecuencia característica del sitio. En total se estimaron 180 modelos 1-D de velocidad de onda de corte y se alcanzaron profundidades de investigación de hasta 300 m según los kernels de sensibilidad calculados. Los resultados obtenidos en este trabajo se pueden encontrar en un repositorio de acceso libre.

Introducción

El sismo de Michoacán ocurrido el 19 de septiembre de 1985 y el desarrollo de investigaciones posteriores (e.g. Singh *et al.*, 1988; Bard *et al.*, 1988; Campillo *et al.*, 1988) hicieron evidente la influencia de las condiciones locales del subsuelo en la distribución de los daños provocados en la Ciudad de México (CDMX). El epicentro del sismo se localizó en las costas de Michoacán a una distancia de 400 km de la CDMX. La ruptura tuvo un fallamiento de tipo inverso, característico de los sismos de subducción (sismo interplaca) y una magnitud (M_s) de 8.1 (UNAM Seismology group, 1986). Los daños ocasionados se concentraron principalmente en la zona de lago, donde depósitos de arcillas de gran espesor dominan la geología superficial y en la cual se observan frecuencias características en el movimiento del suelo menores a 1 Hz (períodos mayores a 1 s). En registros obtenidos en la CDMX, Singh *et al.* (1988) observaron un incremento en el contenido espectral del sismo en frecuencias menores de 0.5 Hz (períodos mayores a 2 s) y amplificaciones en el movimiento del suelo de hasta 50 veces en la zona de lago respecto a la zona de lomas.

El 19 de septiembre de 2017 ocurrió un sismo de magnitud (M_w) 7.1 consecuencia de una ruptura dentro de la placa de Cocos (sismo intraplaca), tuvo un fallamiento de tipo normal y su epicentro se localizó en el límite entre los estados de Puebla y Morelos, 12 km al sureste de Axochiapan, Morelos, y a sólo 120 km de la CDMX (SSN, 2020). A diferencia del sismo de 1985, los daños se concentraron en las zonas de transición (límites de la zona de lago) donde los depósitos de arcilla no superan los 20 m de espesor y las frecuencias características del suelo varían entre 1 y 2 Hz (períodos entre 0.5 y 1 s). Singh *et al.* (2018) explican que el contenido espectral de los registros debidos a movimientos debidos a sismos intraplaca es enriquecido en altas frecuencias debido a parámetros físicos como lo son: la distancia epicentral a la CDMX (< 250 km), la profundidad del sismo (40-80 km) y la caída de esfuerzos (hasta 4 veces mayor que los sismos interplaca).

Independientemente de las propiedades de las fuentes sísmicas que representan el peligro sísmico de la Ciudad de México, es imprescindible conocer las características del subsuelo y su distribución espacial para entender, estimar y predecir la respuesta sísmica de un sitio para diferentes escenarios. Cultrera *et al.* (2019) mencionan que los perfiles de velocidad de onda de corte como función de la profundidad, la frecuencia característica, la geología superficial, la profundidad del basamento rocoso e ingenieril y el tipo de suelo son los indicadores más importantes para caracterizar un sitio.

Desde los trabajos de Aki (1957), se han desarrollado y aplicado a diferentes escalas, métodos geofísicos de prospección sísmica pasiva que utilizan la información contenida en los microtemores o ruido sísmico ambiental para estimar la estructura de velocidades del subsuelo. La aplicación de estos métodos ha sido popular en áreas urbanas porque son métodos no invasivos, la adquisición de datos es fácil de llevar a cabo, son más económicos que los sondeos geotécnicos y aprovechan las propiedades del ruido sísmico ambiental presente de manera continua en cualquier lugar.

Campillo y Paul (2003) mostraron que es posible estimar la función de Green a partir de la correlación cruzada en el dominio del tiempo de campos de ondas difusos. Posteriormente, Shapiro y Campillo (2004) aplicaron la técnica de correlaciones cruzadas a registros de ruido sísmico ambiental considerándolos como campos aleatorios y lograron recuperar la función de Green. Además, observaron trenes de onda coherentes emerger en un rango amplio de frecuencias y determinaron que corresponden al modo fundamental de ondas Rayleigh. Estas aportaciones han permitido calcular tiempos de viaje de ondas entre dos lugares y posteriormente, con múltiples trayectorias, obtener imágenes tomográficas que muestran la distribución lateral de velocidades de grupo de ondas superficiales y perfiles de velocidad de ondas de corte (V_s), en diferentes escalas (e.g., Sabra et al., 2005; Shapiro, 2005; Picozzi et al., 2009)

Por otro lado, el Instituto de Ingeniería a través del proyecto “Sistema integral de monitoreo sísmico y generación de mapas de intensidades y daños en tiempo real de la Ciudad de México (SIM-CDMX)” se dio a la tarea de instalar sismómetros triaxiales de banda intermedia (0.033-100 Hz) para obtener registros de ruido sísmico ambiental en 383 lugares, distribuidos en 22 arreglos de hasta 21 estaciones y con registros simultáneos de hasta 5 días de duración. Las estaciones se localizaron en las delegaciones Xochimilco, Coyoacán, Tláhuac e Iztapalapa. Las distancias entre estaciones variaron de 0.2 a 6 km aproximadamente.

El objetivo principal de este trabajo es estimar modelos unidimensionales de velocidad de onda de corte utilizando los registros de ruido sísmico ambiental del proyecto SIM-CDMX. La estructura del trabajo consta de 8 capítulos.

En el capítulo 1 se hace una revisión bibliográfica breve de los fundamentos teóricos básicos de las ondas superficiales y su dispersión. Se definen a los microtemores o ruido sísmico ambiental y se revisan las suposiciones adyacentes en el método de la recuperación de la función de Green.

La Ciudad de México se encuentra en la cuenca de México, que a su vez se localiza al oriente de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), limitada por las cordilleras volcánicas conocidas como la

Sierra de las cruces, Sierra Nevada, Sierra del Chichinautzin y por el campo volcánico Apan-Tezontepec.

En el capítulo 2 se exponen las características geológicas y estratigráficas de la cuenca de México basadas en el mapa geológico más reciente, elaborado por Arce *et al.* (2019). También, se mencionan los aspectos técnicos más relevantes de las propiedades físicas del suelo tomados en cuenta por el reglamento de construcción actual de la CDMX, como son los mapas de zonificación geotécnica y mapas de isoperiodos, así como algunos estudios geofísicos previos.

En el capítulo 3 se hace una breve descripción del conjunto de datos, de la adquisición, la instrumentación, la distribución espacial de las estaciones y las características de cada arreglo.

El análisis y procesamiento de datos corresponde al capítulo 4, en el cual se discuten: el acondicionamiento de los registros, el contenido espectral y las propiedades difusivas del ruido sísmico registrado, la recuperación de la función de Green en las componentes vertical, radial y transversal, la separación de arribos espurios en los pulsos de ondas Rayleigh a partir del análisis de componentes independientes utilizando las componentes radial y vertical de la función de Green, y por último, el cálculo los tiempos de viaje de los trenes de onda en cada par de estaciones.

En el capítulo 5 se implementa un método de inversión a los tiempos de viaje para obtener imágenes tomográficas que muestran la distribución lateral de velocidades de grupo de ondas Love o Rayleigh y son extraídas curvas de dispersión de velocidad de grupo representativas de lugares específicos.

Con la finalidad de tener la mayor cantidad de información disponible en el capítulo 6 se calculan los cocientes espectrales (HVSr) en cada estación y se elaboran mapas que muestran la distribución espacial de las frecuencias características calculadas en cada arreglo.

La inversión a profundidad es implementada en el capítulo 7, partiendo un análisis de clustering con las frecuencias características estimadas en los HVSr. En cada clúster se hace mínimo una inversión conjunta entre los cocientes espectrales HVSr y una curva de dispersión de velocidad de grupo para utilizar el modelo resultante como modelo inicial al invertir el resto de las curvas de dispersión localizadas en el clúster. Para obtener una medida confiable de la profundidad de investigación alcanzada se calculan los kernel de sensibilidad en cada modelo.

Por último, en el capítulo 8 se hace un breve análisis de los resultados, se mencionan algunas consideraciones respecto a los métodos utilizados y suposiciones hechas como lo son: la profundidad de investigación, los modos superiores de las ondas superficiales en el ruido sísmico ambiental registrado, entre otras. Además, se hace mención del repositorio CDMX-VS de acceso libre donde se podrán encontrar los resultados obtenidos en este trabajo.

Capítulo 1. Marco Teórico

1.1 Ondas Superficiales

Las ondas superficiales se forman cuando las ondas de cuerpo interactúan con la superficie libre, se propagan de manera paralela a la superficie y su amplitud decrece con la profundidad. Su energía se propaga en dos dimensiones y disminuye a una distancia r con un factor r^{-1} , mientras que la energía de las ondas de cuerpo se propaga en tres dimensiones y decae con un factor r^{-2} . Por este motivo las ondas superficiales son dominantes en los registros de fuentes lejanas (Stein y Wysession, 2003).

Existen dos tipos de ondas superficiales: las ondas Love y las ondas Rayleigh. Bajo ciertas condiciones de frontera, en una capa sobre un semi espacio las ondas Love se originan a partir de ondas SH atrapadas cerca de la superficie, para luego originar múltiples reflexiones entre el semi espacio y la superficie libre. Los desplazamientos ocurren en el plano transversal. Las ondas Love se generan en medios donde la velocidad aumenta con la profundidad. En un medio estratificado las ondas Rayleigh se producen al inducir un movimiento en la superficie libre en el plano vertical. Las ondas Rayleigh son una combinación de desplazamientos en el sistema P-SV, inducen desplazamientos en planos radial y vertical. Los desplazamientos producidos por las ondas Rayleigh tienen una trayectoria elíptica con una componente retrógrada en el plano de propagación. La profundidad de los desplazamientos producidos por la propagación de ondas Rayleigh son proporcionales a la longitud de onda horizontal (Stein y Wysession, 2003).

1.2 Dispersión

Se le conoce como dispersión a la variación de la velocidad de propagación con la frecuencia. En las ondas de Rayleigh la dispersión se puede observar cuando las ondas se propagan en un medio estratificado, se modela a partir de las condiciones de frontera de cada interfaz. La dispersión de ondas Love se puede explicar cómo ondas SH propagándose en una capa sobre un semi espacio, con la condición de que la energía no viaja a través del semi espacio en forma de una onda. La velocidad de fase de cada frecuencia es dada por la siguiente expresión:

$$c = \omega/k, \tag{1}$$

donde c es la velocidad de fase, k es el número de onda de onda y ω la frecuencia angular.

Cuando diferentes componentes viajan a velocidades de fase diferentes las formas del pulso cambian, se dispersan a medida que las frecuencias se separan. Esto produce efectos que destruyen la energía en algunos momentos (interferencia destructiva), mientras que en otros la suma (interferencia constructiva). El resultado de la interferencia constructiva es una onda moduladora que envuelve a un conjunto de fases y que viaja a una velocidad de grupo dada por la siguiente expresión (Shearer, 2009):

$$U = \delta\omega/\delta k. \quad (2)$$

A la representación gráfica de la variación de la velocidad de grupo o fase con la frecuencia se les conoce como curvas de dispersión.

1.3 Microtremores

También conocidos como ruido sísmico ambiental. Los microtremores como vibraciones constantes en la superficie de la Tierra (Okada, 2003). Los desplazamientos inducidos son imperceptibles para el ser humano, varían de 10^{-4} a 10^{-2} mm. De manera general, para frecuencias bajas (< 1 Hz) se les atribuye un origen natural (fenómenos climáticos y oceánicos), mientras que para frecuencias altas (> 1 Hz) un origen antropogénico.

Con el fin de determinar la composición de los microtremores Boneffoy-Claudet *et al.* (2006) hacen una extensa revisión bibliográfica, encontrando mucha variabilidad en los resultados. Entre sus conclusiones mencionan que en bajas frecuencias (< 1 Hz) los microtremores están compuestos por ondas superficiales en su modo fundamental y en altas frecuencias se espera una mezcla de ondas de cuerpo y ondas superficiales (modo fundamental y modos superiores). También observaron que existe un 40% de probabilidades que la contribución de ondas Love sea mayor al 50%. Sin embargo, plantean que la composición del campo de ondas de microtremores puede cambiar de acuerdo con las características de cada sitio.

Una de las primeras descripciones de los microtremores la podemos encontrar en Aki (1957), quien los representa como un fenómeno estocástico en tiempo y en espacio. Recientemente Sánchez-Sesma *et al.* (2011) proponen como hipótesis que los microtremores son un campo difuso, formado por las difracciones múltiples consecuencia de la interacción de ondas sísmicas (generadas por una

distribución aleatoria de fuentes en la superficie y en el interior de la Tierra) y las heterogeneidades de la corteza terrestre.

1.4 Correlaciones cruzadas de campos difusos.

Las investigaciones en acústica de Lobkis y Weaver (2001) demostraron que la correlación cruzada de campos de onda difusos es equivalente a la función de Green. Posteriormente, Campillo y Paul (2003) utilizaron codas de sismos ocurridos en México para mostrar que campos difusos originados por fuentes distantes son suficientes para recuperar ondas directas entre dos puntos de observación. Ellos demostraron que el promedio de las funciones de correlación cruzada entre dos puntos son una aproximación a la función de Green elastodinámica. Además, los pulsos que recuperaron tenían la velocidad de grupo de las ondas superficiales esperadas entre ambos sitios. Un campo difuso dentro de un cuerpo elástico es representado de forma modal como (Lobkis y Waver, 2001):

$$\Phi(x, t) = \sum_n a_n u_n(x) e^{-i\omega_n t}, \quad (3)$$

donde x es la posición, t es el tiempo, u_n son las formas modales reales ortogonales, a_n son amplitudes modales complejas y ω_n son frecuencias características.

En un campo difuso las amplitudes modales (a_n) son variables aleatorias no correlacionadas:

$$\langle a_n a_m^* \rangle = \delta_{nm} F(\omega_n), \quad (4)$$

donde $F(\omega)$ es el espectro de densidad de energía y δ_{nm} es la delta de Kronecker.

En la correlación cruzada entre dos campos de ondas localizados en x y y , respectivamente, los términos cruzados desaparecen por la ecuación (4). Así, se puede expresar como (Shapiro y Campillo, 2004):

$$C(x, y, \tau) = \langle \Phi(x, t) \Phi(y, t + \tau) \rangle = \frac{1}{2} \sum_n F(\omega_n) u_n(x) u_n(y) e^{-i\omega_n \tau}. \quad (5)$$

Si F se aproxima a una constante y se obtiene la antiderivada $\int_0^\tau () d\tau$ la expresión es similar a la función de Green G_{xy} que gobierna la propagación del punto x al punto y (Lobkis y Weaver, 2001):

$$G_{xy}(\tau) = \sum_n u_n(x)u_n(y) \frac{\sin(\omega_n \tau)}{\omega_n}. \quad (6)$$

La función de Green y su derivada temporal, equivalente a la expresión 5, difieren en amplitud. Además, se tiene que tomar en cuenta que la correlación cruzada considera una parte no causal. Sin embargo, este resultado tiene implicaciones importantes: la función de Green entre dos lugares, o al menos los tiempos de arribo de diferentes trenes de onda, pueden ser extraídos mediante la correlación cruzada de campos de onda difusos, si se tienen registros con longitud de tiempo suficiente (Shapiro y Campillo, 2004).

1.5 Correlaciones cruzadas de ruido sísmico ambiental

Shapiro y Campillo (2004) consideran que para períodos largos de tiempo la distribución de las fuentes que dan origen a los microtemores es aleatoria y, por lo tanto, el campo de ondas de microtemores es aleatorio y satisface las ecuaciones (3) y (4). Lo anterior implica que la función de Green puede ser extraída a partir de la correlación cruzada de registros de microtemores de dos sitios. La ventaja principal es que los microtemores están presentes en cualquier momento y en cualquier lugar, por lo que se podría obtener la función de Green en lugares sin sismicidad. En su trabajo recuperan la función de Green para registros de hasta 30 días de duración del componente vertical, en diferentes pares de estaciones, y demuestran que los pulsos recuperados corresponden al modo fundamental de ondas Rayleigh. Estas aportaciones permitieron estimar curvas de dispersión de velocidad de grupo y tiempos de viaje de trenes de onda entre dos lugares.

Sabra *et al.* (2005) aplicaron la técnica de las correlaciones cruzadas a registros de ruido sísmico ambiental de una red con 148 estaciones ubicada al Sureste de California para estimar la función de Green, y lograron obtener un mapa tomográfico de alta resolución de velocidad de grupo de ondas Rayleigh a partir de la inversión de los tiempos de viaje. Análogamente, Shapiro *et al.* (2005) obtienen mapas tomográficos de ondas superficiales aplicando la técnica de correlaciones cruzadas de ruido sísmico ambiental. A partir de entonces existen numerosos trabajos alrededor del mundo que se basan en la recuperación de la función de Green a partir de correlaciones cruzadas de microtemores para estimar la estructura de velocidades.

Capítulo 2. Zona de estudio

La cuenca de México (CM) es una entidad geomorfológica endorreica que se ubica en la porción centro-oriental de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), entre las coordenadas 18° 48' y 19°32' latitud norte y 98°37' y 99°32' longitud oeste. Tiene una superficie de aproximadamente 9620 km² y la planicie central presenta una altura promedio de 2240 msnm. Como se observa en la Figura 1, la CM es limitada por la sierra de las cruces al oeste; por la Sierra Nevada al este, que incluye volcanes como el Popocatepetl e Iztaccíhuatl; por la Sierra de Chichinautzin al sur; y al norte por el campo volcánico Apan-Tezontepec (Arce *et al.* 2019). La CM se considera una depresión profunda que se originó en respuesta de la actividad volcánica y tectónica de la región, y que los materiales que la rellenan son predominantemente volcánicos. En forma general, el relleno de la CM está conformado por depósitos lacustres en la parte superior, y derrames de lava, materiales epiclásticos y depósitos piroclásticos en la parte inferior (González-Torres *et al.*, 2015).

El estudio de la CM es muy importante porque en una porción se edificó la CDMX y su área metropolitana. Aunque la zona urbana de la CM representa sólo el 16% de su superficie (González-Torres *et al.*, 2015), en ella viven más de 20 millones de personas, aproximadamente el 17% de la población total de México (OCDE, 2020).

2.1 Geología y estratigrafía

En la cuenca de México se pueden distinguir tres tipos de geomorfologías: 1) Cordilleras volcánicas, compuestas de volcanes poligenéticos y monogenéticos; 2) Colinas localizadas en la base de cada cordillera volcánica compuestas de una intercalación de depósitos piroclásticos y epiclásticos; 3) Tierras planas resultado de la acumulación de depósitos lacustres con espesores variables de 70 a 300 metros intercalados con capas de tefra. Arce *et al.* (2019) elaboraron el mapa geológico más reciente de la cuenca de México (Figura 2), incorporaron estudios previos, información de pozos profundos y, además, hicieron una nueva datación geocronológica utilizando el método argón-argón. A continuación, se incluye una síntesis de la descripción de las unidades estratigráficas realizada en su trabajo.

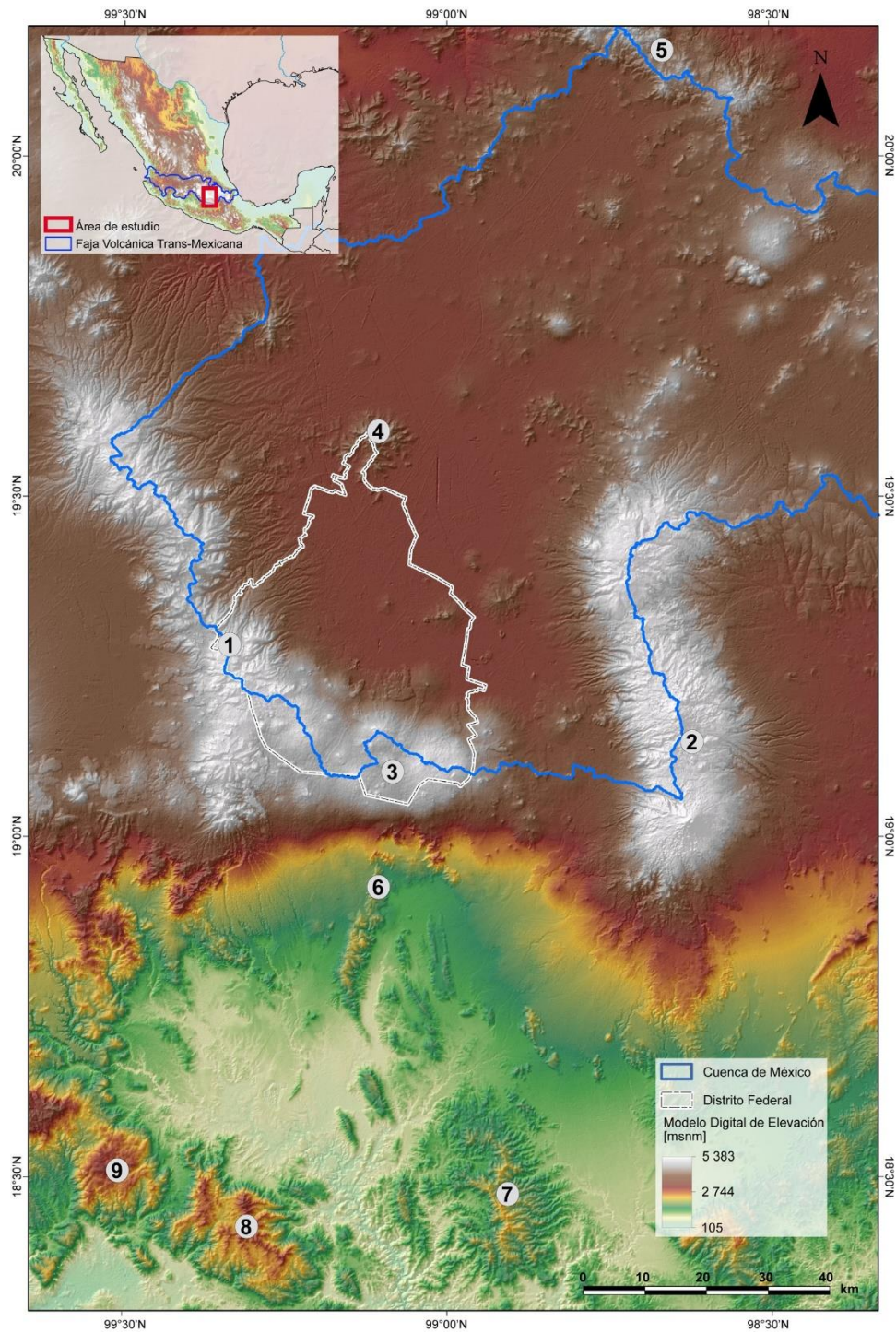


Figura 1. Localización de la Cuenca de México, modelo de elevación. Se muestran los contornos de la CM y la CDMX (Distrito Federal en la imagen). 1) Sierra de las Cruces. 2) Sierra Nevada. 3) Sierra del Chichinautzin. 4) Sierra de Guadalupe. 5) Sierra de Pachuca. 6) Tepoztlan, Morelos. Aquí se encuentran los primeros episodios volcánicos de la FVTM. 7) Huautla, Morelos. 8) Caldera de Tizapotla. 9) Taxco, Guerrero. Tomada de González-Torres *et al.* (2015).

Unidades estratigráficas

Rocas del cretácico.

Formación Morelos: Compuesta de calizas marinas poco profundas y dolomitas del Albiano-Cenomaniano, con nódulos de chert y un espesor máximo de 900 metros. En los pozos profundos Mixhuca 1 y Tulyehualco 1 se describió a 1500 y 1800 m, respectivamente. En la siguiente sección se detallará un poco sobre los pozos mencionados en esta parte.

Formación Mexcala: Dominada por calizas arcillosas con abundantes foraminíferos, calciferúlidos y radiolarios, intercalada gradualmente hacia arriba con lutitas, limolitas y areniscas. Tiene su origen en el turoniano y se estima que tiene un espesor máximo de 1500 m.

Eoceno, grupo Balsas

Corresponde a la sucesión de depósitos continentales, constituidos por conglomerados, areniscas, limolitas, depósitos piroclásticos menores y flujos de lava. Su espesor total es de 500 metros. En el pozo Texcoco se localizó a 2680 m de profundidad.

Oligoceno, Formación Tilzapotla

Es una secuencia de riolitas, riodacitas, lavas dacíticas e ignimbritas del oligoceno temprano. En el pozo Mixhuca 1 fue encontrada a una profundidad de 1281 m, mientras que en el pozo Roma 1 se localizó a una profundidad de 2210 m.

Mioceno Formación Tepoztlán

Se trata de una secuencia de escombros volcánicos de composición andesítica con un espesor máximo de 800 m. Rocas correlacionadas a esta formación fueron encontradas en el pozo Texcoco 1 en profundidades de hasta 920 m; en el pozo Mixhuca en profundidades de 1190 m; Tulyehualco 1 en profundidades de 1740 y 930 m; Copilco 1 a 1580 m de profundidad; en San Lorenzo Tezonco se encontraron en profundidades entre 950 y 2008 m.

Volcanismo del Plioceno-Holoceno

Secuencia volcánica de la Sierra de las Cruces: La Sierra de las Cruces es una cordillera volcánica con una longitud de 11 km. La constituyen los volcanes de La Catedral, La Bufa, Iturbide, Chimalpa, Salazar, San Miguel, Ajusco, La Corona, Zempoala y otras estructuras pequeñas. La parte alta del

relieve es dominada por flujos de lava y domos, mientras que el relieve bajo por depósitos piroclásticos intercalados con depósitos de lahar y avalancha de detritos. El volcán más antiguo es La Catedral con 3.7 Ma. Los volcanes de La Corona y Zempoala son los más jóvenes con 0.4 Ma

Secuencia volcánica de Sierra Nevada: Está compuesta por los estratovolcanes Tláloc, Telapón, Iztaccíhuatl y Popocatepetl. Tláloc y Telapón son las estructuras más antiguas con 1.8 y 1.4 Ma, respectivamente. El flujo de lava más reciente del Iztaccíhuatl es datado en 9 mil años de antigüedad. El volcán Popocatepetl actualmente está activo. Los volcanes Tláloc y Telapón están compuestos principalmente de andesita y riolita, mientras que el Iztaccíhuatl y Popocatepetl abarcan de la andesita a la dacita. La topografía alta de la Sierra Nevada es dominada por flujos y lomos de lava intercalados con depósitos piroclásticos, las partes bajas las constituyen una intercalación de depósitos piroclásticos y epiclásticos, así como depósitos de avalanchas.

Campo volcánico de Chichinautzin: Está compuesto por más de 220 estructuras monogenéticas con edades de 1.2 a 0.0016 Ma. La composición química abarca desde basaltos andesíticos, basaltos, andesitas y dacitas.

Depósitos lacustres: Los depósitos lacustres han sido estudiados en pozos con profundidades entre 30 y 500 m, y edades entre 0.22 Ma a actual. En San Lorenzo Tezonco los depósitos aparecen hasta 600 m debajo de la superficie, intercalados con rocas volcánicas.

Características Tectónicas

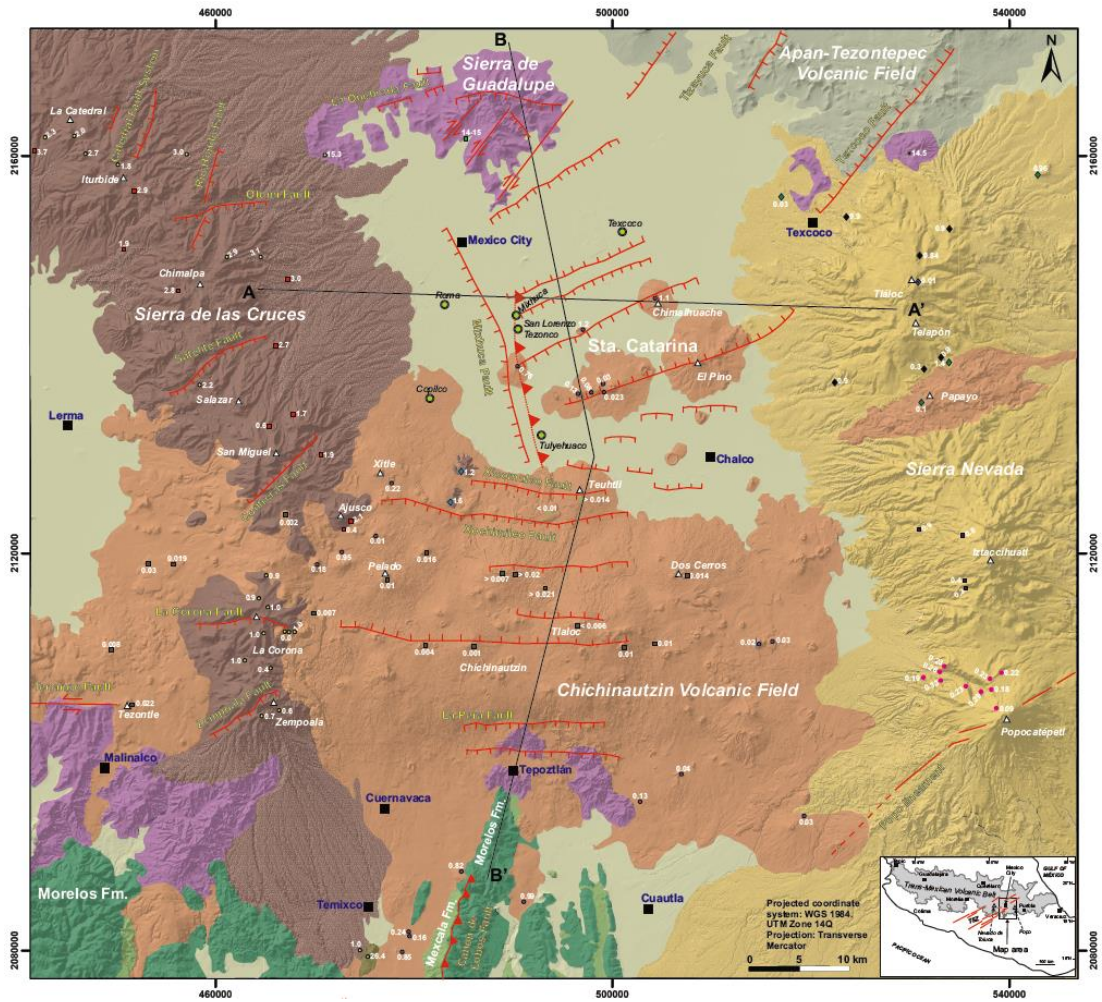
En la cuenca de México se distinguen cuatro sistemas tectónicos principales.

Cañón de lobos: Se trata de una falla inversa con orientación N-S que afecta a las formaciones sedimentarias del cretácico, relacionada a la orogenia Laramide.

Falla Mixhuca: Es una falla normal orientada en la dirección NW-SE, sumergiéndose hacia el oeste. Produce la fosa Roma, que es una depresión de cerca de 1500 m llena de depósitos sedimentarios.

Mega zona de cizalla Tenochtitlan: Son una serie de fallas normales y dextrales con orientación NE-SW. Es probable que su origen haya ocurrido en el Plioceno-Pleistoceno tardío.

Fallas normales E-W: Es el sistema de fallas más joven incluye fallas como La Pera, Xochimilco, graben de Santa Catarina y Tenango.



| Explanation | | Stratigraphic column | Age (Ma) | |
|-------------|----------------------|---|--------------|--|
| Cenozoic | Holocene | Chichinautzin Lacustrine Apan | 1.2 - Recent | Normal Fault Reverse Fault Lateral Fault Inferred Fault Age in million of years (Ma) Deep wells Cities and towns Volcano TSZ Tenochtitlan Shear Zone |
| | Pliocene-Pleistocene | Sierra de las Cruces (lavas and pyroclastic deposits) | 3.7 | |
| | Miocene | Miocene volcanics (Tepoztán Formation) | 22.8 - 5 | |
| | Oligocene | Oligocene volcanics | 25 - 30 | |
| | Eocene | Balsas Group | 34 | |
| Mesozoic | Maastrichtian | Morelos Formation | | |
| | Campanian | | | |
| | Santonian | | | |
| | Coniacian | | | |
| | Turonian | | | |
| Cenomanian | | | | |
| Albian | | | | |

Figura 2. Mapa geológico de la cuenca de México. Modificado de Arce *et al.* (2019)

2.2 Información de pozos profundos

Actualmente la CM cuenta con información obtenida de 9 pozos profundos. La perforación del primer pozo, Texcoco-1, ocurrió entre 1966 y 1969 y alcanzó una profundidad de 2065 m (González-Torres *et al.*, 2015). Con el objetivo de conocer las características, composición y estructura del subsuelo de la CDMX, entre 1986 y 1987, Petróleos Mexicanos (PEMEX) llevó a cabo un estudio de reflexión sísmica y la perforación de 4 pozos de sondeo estratigráfico. Los pozos fueron llamados Copilco-1, Tulyehualco-1, Mixhuca-1 y Roma-1; alcanzaron profundidades máximas de 2250 m, 3000 m, 2452 m y 3200 m, respectivamente. En las columnas litológicas se puede observar gran variedad incluyendo: arcillas lacustres, arcillas tobáceas, arenas, conglomerados tobáceos, conglomerados volcánicos, brechas volcánicas, basaltos, andesitas, brechas calcáreas y calizas marinas (Pérez-Cruz, 1988).

Para apoyar la gestión del agua, en 2012, el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) perforó el pozo San Lorenzo Tezonco (SLT) en la Alcaldía de Iztapalapa. El pozo alcanzó una profundidad de 2008 m. La columna litológica recuperada de este pozo está conformada en su parte superior por sedimentos lacustres y fluviales hasta 70 m de profundidad, y el resto por material volcánico (Arce *et al.*, 2015). Los resultados obtenidos en SLT motivaron el desarrollo de un programa de exploración profunda en convenio con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y PEMEX. Como parte de este programa se perforaron los pozos Agrícola Oriental 2B (AO2B), Agrícola Oriental 2C (AO2C) y Santa Catarina 3A (SC3A).

Los pozos AO2B y AO2C fueron perforados en el 2016, alcanzaron una profundidad de 2000 y 1570 m, respectivamente. Los dos pozos se localizan en la alcaldía de Iztacalco, en la zona conocida como Magdalena Mixhuca. El pozo Santa Catarina, perforado en 2017, se encuentra en el sur de la CDMX, en la alcaldía de Xochimilco y alcanzó una profundidad de 1912 m. Cabe resaltar que la interpretación en estos tres últimos pozos se apoyó en registros geofísicos de pozo, adquiridos por PEMEX. En el boletín número 121 del Instituto de Geología (Morales-Casique *et al.*, 2018a) se puede encontrar información detallada acerca del análisis estratigráfico de los pozos AO2B y AO2C, mientras que para el pozo SC3A, la información se encuentra en el boletín número 123 (Morales-Casique *et al.*, 2018b). En la Figura 3 se muestran las columnas estratigráficas conformadas a partir de los pozos Texcoco-1, Copilco-1, Tulyehualco-1, Mixhuca-1, Roma-1 y SLT. En la Figura 4 se muestra la columna estratigráfica obtenida de los pozos AO2B y AO2C.

Para el pozo SC3A no se cuenta con una representación gráfica de su columna estratigráfica, pero se hace un breve resumen de su descripción presentada por Morales-Casique *et al.* (2018). Es necesario mencionar que la perforación fue direccional (tipo “J”), el desplazamiento horizontal fue de 520 m y alcanzó 2026 metros desarrollados (md), equivalentes a una profundidad vertical de 1912 m. El desplazamiento horizontal inicio a los 567 md y alcanzó una inclinación de 26.9°. Además, no se cuenta con información de los primeros 500 metros. A continuación, se describe la litología encontrada en el pozo:

- 510 a 789 md. Andesitas, probablemente fracturadas, alteradas en la cima y más competentes; menos alteradas en la base.
- 789 a 887 md. Ignimbrita color rosado.
- 887 a 919 md. Flujo tipo lahar, principalmente cenizas.
- 919 a 1141 md. Lahar color rojizo, alterado con matriz arcillosa y fragmentos de roca redondeados de tamaño entre 2 y 35 mm.
- 1141 a 1347 md. Flujo piroclástico poco alterado y permeable.
- 1347 a 1647 md. Depósitos de lahar heterogéneos, con diferentes condiciones de depósito o diferentes fuentes.
- 1647 a 2026 md. Depósitos de lahar. Formación competente.

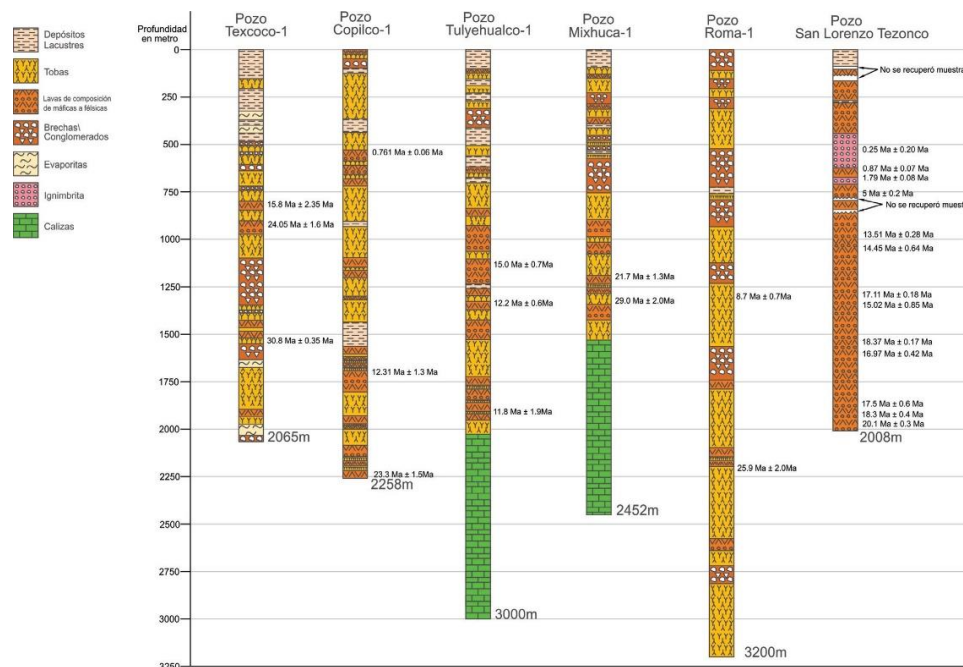


Figura 3. Columnas estratigráficas de los pozos profundos de la Cuenca de México. Tomada de Gonzáles-Torres *et al.* (2015).

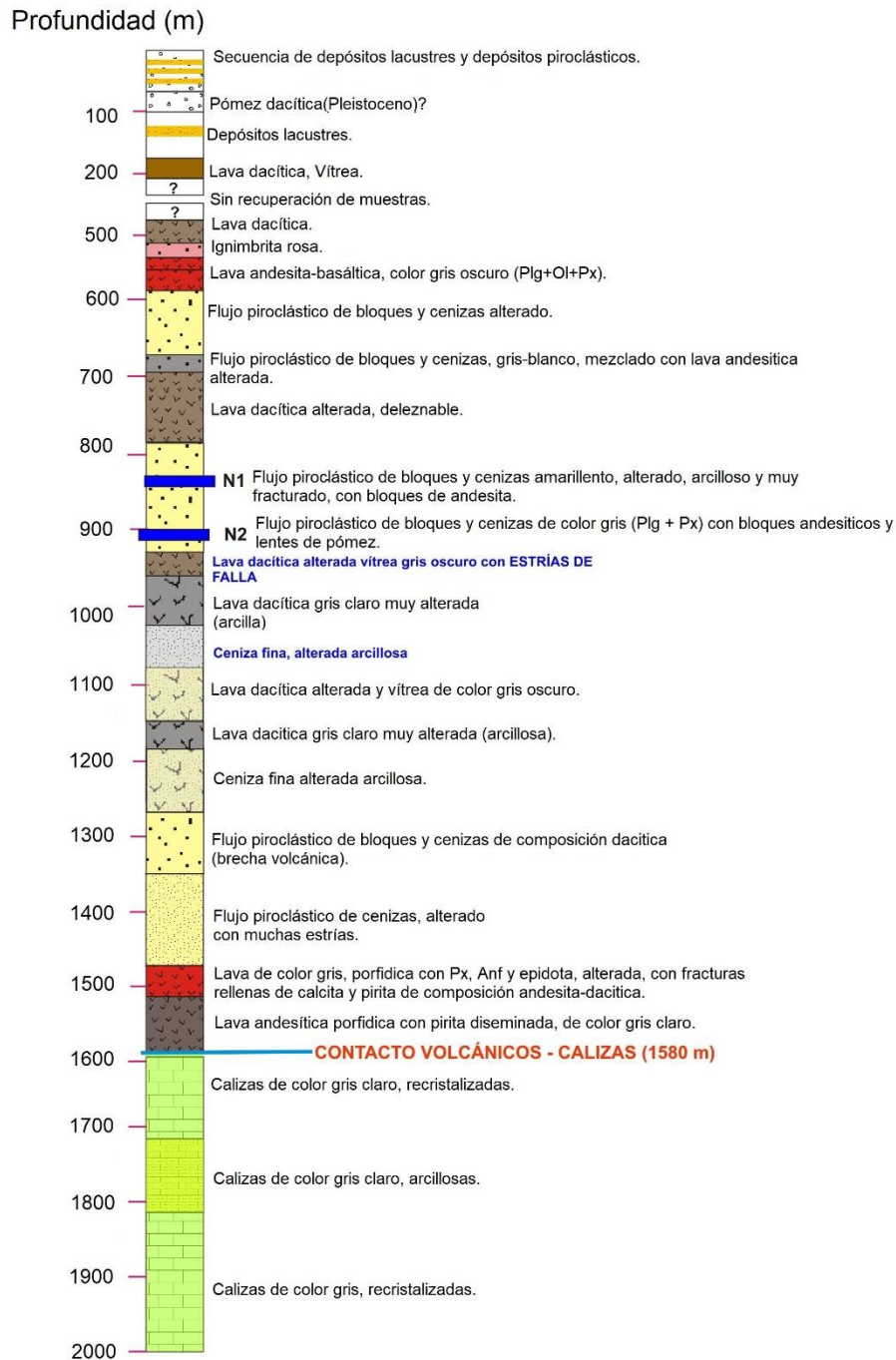


Figura 4. Columna estratigráfica interpretada a partir de los pozos AO2B y AO2C. Tomada de Morales-Casique (2018).

2.3 Zonificación geotécnica

El artículo 170 del capítulo VIII del reglamento general de construcciones de la Ciudad de México divide a la CDMX en tres zonas (Figura 5) cuyas características son (NTC-DC, 2017):

- a) Zona I. Lomas formadas por rocas o suelos generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre, pero en la que pueden existir, superficialmente o intercalados, depósitos arenosos en estado suelto o cohesivos relativamente blandos. En esta zona es frecuente la presencia de oquedades en rocas, cavernas y túneles excavados en suelos para explotar minas de arena y rellenos artificiales no controlados.
- b) Zona II. Transición, donde los depósitos se encuentran a 20 m de profundidad, o menos, y que está constituida predominantemente por estratos arenosos y limo arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre, el espesor de esta es variable entre decenas de centímetros y pocos metros.
- c) Zona III. Lacustre, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son en general medianamente compactas a muy compactas y de espesor variable de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 metros.

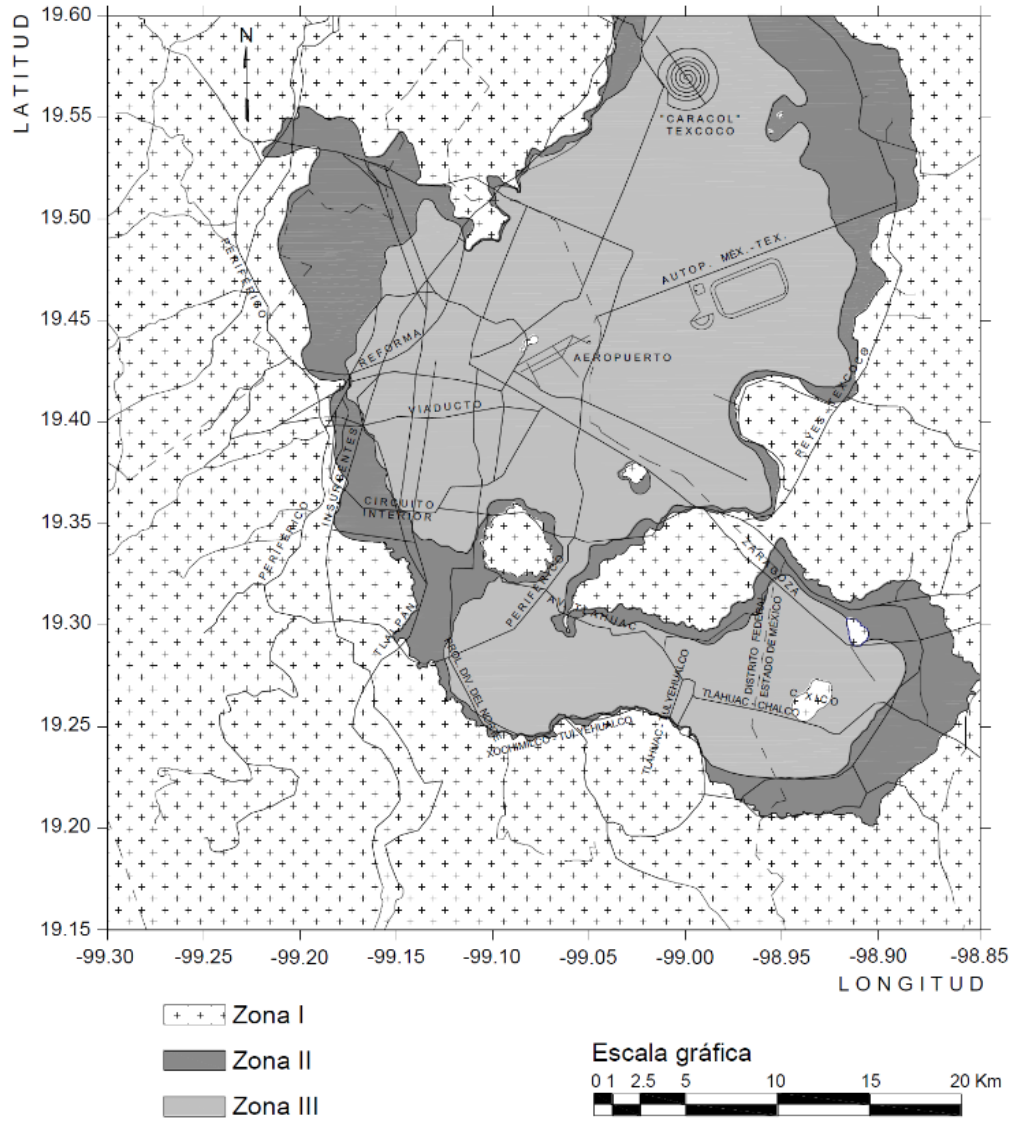
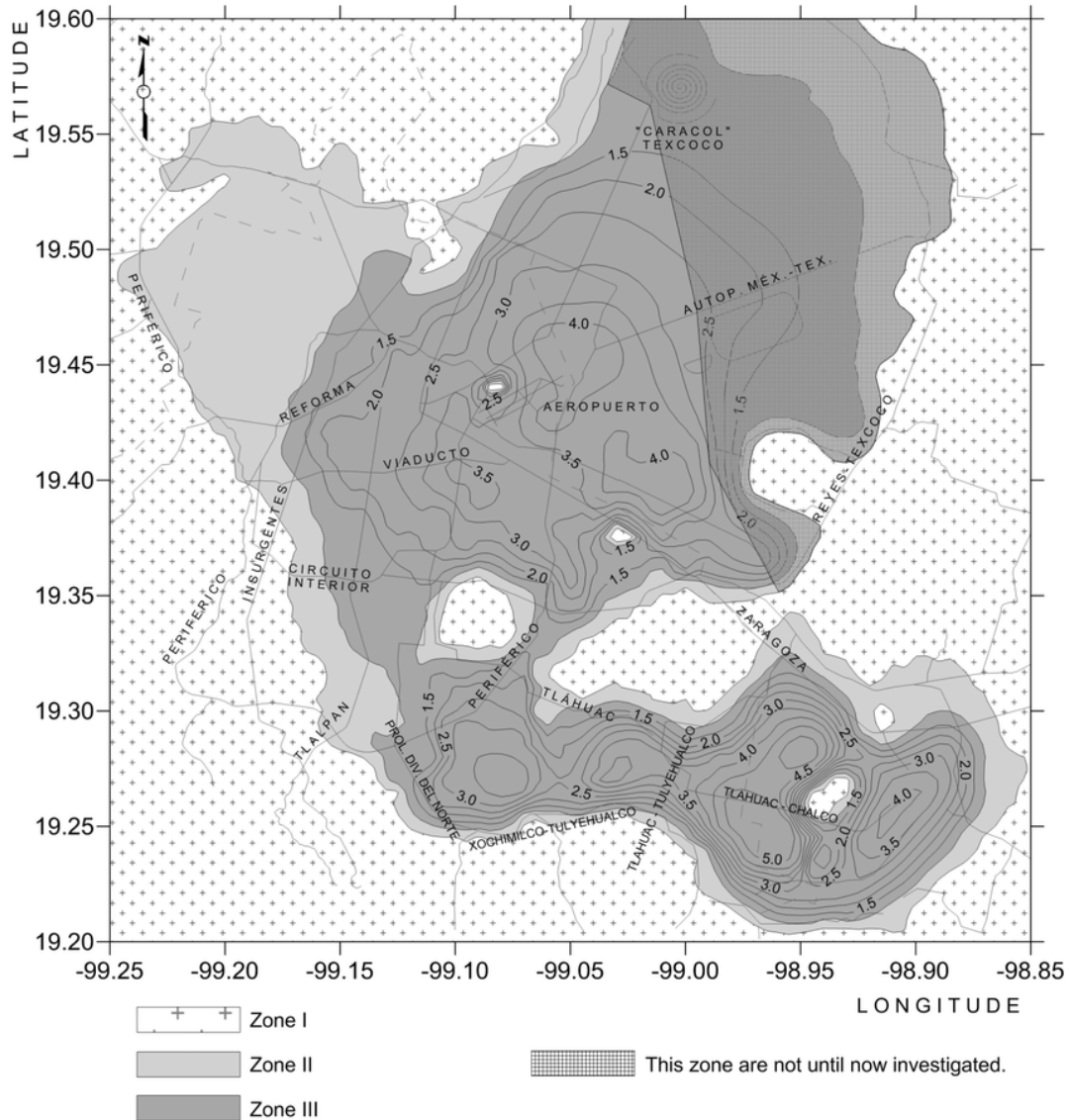


Figura 5. Zonificación geotécnica de la Ciudad de México. (Gobierno de la Ciudad de México, 2017)

2.4 Mapa de isoperíodos



El periodo natural del suelo (T_s) es un parámetro importante en la respuesta de sitio, principalmente porque las amplificaciones del movimiento del suelo son mayores en periodos cercanos (Vijayendra *et al.*, 2015). Además, es considerado en el reglamento de construcción de la Ciudad de México (NTC-DS, 2017) para el diseño por sismo de edificios.

Lermo *et al.* (1988), utilizando microtremores y acelerogramas, elaboraron un mapa en el que mostraron la distribución espacial de periodos naturales del suelo en la Ciudad de México y los relacionaron con la zonificación geotécnica conocida entonces. Encontraron que en la zona de lago

los periodos naturales son mayores a 1.3 s y en la zona de transición son entre 0.5 y 1.3 s. Mendoza *et al.* (1992) observan una relación entre el espesor de la capa de arcillas y los períodos mayores a 1 s. Posteriormente, el mapa de isoperíodos fue complementado con más estudios. Hoy es aceptado que en la zona de lago los períodos dominantes son mayores a 1 s, y en la zona de transición varían entre 1 y 0.5 s. En la Figura 6 se muestra el mapa de isoperíodos elaborado por Martínez *et al.* (2015), la zona I corresponde a zona lomas, la II a zona de transición y la III a zona de lago.

2.5 Algunos estudios previos

Existen estudios realizados en la CDMX que utilizaron ruido sísmico ambiental para estimar modelos unidimensionales de velocidad de onda de corte. Kawaga (1996) instaló arreglos de sismómetros para registrar microtemores en tres sitios de la Ciudad de México, uno para cada zona geotécnica. Obtuvo curvas de dispersión de velocidad de fase de ondas Rayleigh en cada sitio, en la zona de lomas observó velocidades de 2 km/s en 1 Hz, mientras que en la zona de transición de 1 km/s y zona de lago 0.3 km/s, para la misma frecuencia.

Chávez-García y Aguirre (2012) registraron microtemores en la zona de lago y utilizaron la técnica SPAC e interferometría sísmica para observar la dispersión de ondas Rayleigh. Las distancias entre estaciones que utilizaron variaron de 10 m a 2 km. Con base en sus resultados sugirieron que no era posible recuperar ondas Rayleigh para distancias entre estaciones mayores a 1 km. Sin embargo, cabe mencionar que los registros tenían una hora de duración. Observaron grandes heterogeneidades laterales, por ejemplo, para 1.5 Hz las velocidades de fase varían de 50 a 250 m/s.

Cárdenas-Soto y Escobedo-Zenil (2019), instalaron estaciones sísmicas en la zona de transición y realizaron una tomografía de ruido sísmico ambiental a partir de la dispersión de ondas Rayleigh. En sus modelos de velocidad de onda de corte obtenidos observan un alto contraste de impedancias entre los depósitos vulcano-sedimentarios (200 m/s) y el basamento ingenieril (700 m/s), que existe a una profundidad de 10 m aproximadamente.

También, se han realizado estudios de sísmica de fuente activa, destaca el trabajo de Pérez-Cruz (1988) quien propone un modelo geológico del subsuelo de la Ciudad de México basado en un estudio de reflexión sísmica y pozos profundos perforados por Pemex, entre sus resultados reporta velocidades de ondas P entre 800 y 1550 m/s y densidades de 1.250 kg/m³ para los depósitos lacustres. Por otro lado, Ramos-Martínez *et al.* (1997) realizaron estudios de refracción sísmica para

determinar las características elásticas y anelásticas del subsuelo en la zona de lago. A partir de un análisis en el dominio $\tau - p$ estimaron un modelo unidimensional de velocidad de onda de corte en el que se observan velocidades de 40 m/s hasta una profundidad de 30 m.

Por último, el Centro Nacional para la Prevención de Desastres (CENAPRED,1996) realizó perforaciones con la finalidad de conocer las propiedades elásticas y estratigráficas del subsuelo en 6 sitios, distribuidos en la zona centro de la Ciudad de México y que corresponden a zona de lago según la zonificación geotécnica. Entre los resultados destaca que, en promedio, hasta 50 m de profundidad se observan velocidades de onda de corte menores a 200 m/s.

Los trabajos mencionados son locales y distantes, por lo que no se han integrado en un modelo regional.

Capítulo 3. Datos

El Instituto de Ingeniería a través del proyecto “Sistema integral de monitoreo sísmico y generación de mapas de intensidad y daños en tiempo real de la Ciudad de México” instaló estaciones sísmicas temporales con la finalidad de registrar microtemores en 383 lugares, ubicados en las delegaciones Xochimilco, Coyoacán, Tláhuac e Iztapalapa. Las estaciones se distribuyeron en 22 arreglos de hasta 21 estaciones con registros simultáneos, en 21 arreglos las estaciones registraron mínimo 75 horas simultáneamente. La distancia entre estaciones varió entre 0.2 y 6 km aproximadamente. En la Tabla 1 se resumen las características de cada arreglo.

Los sitios de instalación fueron principalmente jardines de escuelas, iglesias y casas. En la Figura 7 se muestran algunos ejemplos de la instalación de los sismómetros. Se utilizaron sismómetros triaxiales de banda intermedia (30 s – 100 Hz) Guralp® modelo CMG-6TD sincronizados a través de una antena GPS. En los lugares donde fue posible fueron enterrados hasta 1 m de profundidad, todos fueron nivelados y orientados al norte magnético. El intervalo de muestreo en el que fueron configurados los equipos fue de 0.01 segundos. En la Figura 8 se muestra la distribución espacial de las estaciones.



Figura 7. Instalación de las estaciones temporales.

Tabla 1. Características de los arreglos.

| Arreglo | No. de estaciones | No. de pares formados | Tiempo de registro continuo promedio [horas] | Distancia entre estaciones [m] | Zona geotécnica |
|---------|-------------------|-----------------------|--|--------------------------------|-----------------|
| A1 | 18 | 153 | 99.58 ± 10.12 | 297 - 3829 | I, II, III |
| A2 | 18 | 153 | 93.86 ± 1.99 | 259 - 6296 | III |
| A3 | 18 | 153 | 93.88 ± 1.78 | 191 - 6369 | II, III |
| A4 | 18 | 153 | 94.55 ± 1.78 | 248 - 5101 | III |
| A5 | 18 | 153 | 95.58 ± 6.72 | 210 - 2635 | III |
| A6 | 15 | 105 | 91.30 ± 7.72 | 293 - 4288 | III |
| A7 | 6 | 15 | 11.50 ± 0.63 | 344 - 1032 | III |
| A8 | 17 | 136 | 75.91 ± 14.83 | 462 - 5001 | III |
| A9 | 17 | 136 | 100.02 ± 10.19 | 206 - 2883 | III |
| A10 | 18 | 153 | 101.08 ± 11.49 | 280 - 2850 | II, III |
| A11 | 18 | 153 | 104.13 ± 18.45 | 191 - 2943 | II, III |
| A12 | 18 | 153 | 109.30 ± 11.35 | 180 - 3374 | II |
| A13 | 18 | 153 | 115.94 ± 7.98 | 322 - 3051 | I, II, III |
| A14 | 18 | 153 | 114 ± 8.77 | 314 - 3568 | III |
| A15 | 18 | 153 | 140.38 ± 5.08 | 349 - 4053 | II, III |
| A16 | 18 | 153 | 109.41 ± 12.15 | 252 - 4864 | II, III |
| A17 | 18 | 153 | 118.50 ± 1.44 | 348 - 3667 | I, II, III |
| A18 | 18 | 153 | 116.50 ± 7.56 | 202 - 4287 | III |
| A19 | 18 | 153 | 114.80 ± 7.99 | 149 - 2767 | II |
| A20 | 18 | 153 | 118.13 ± 7.29 | 351 - 3460 | I |
| A21 | 18 | 153 | 117.08 ± 2.05 | 151 - 3708 | I, II |
| A22 | 21 | 210 | 120.57 ± 11.87 | 230 - 3510 | II, III |

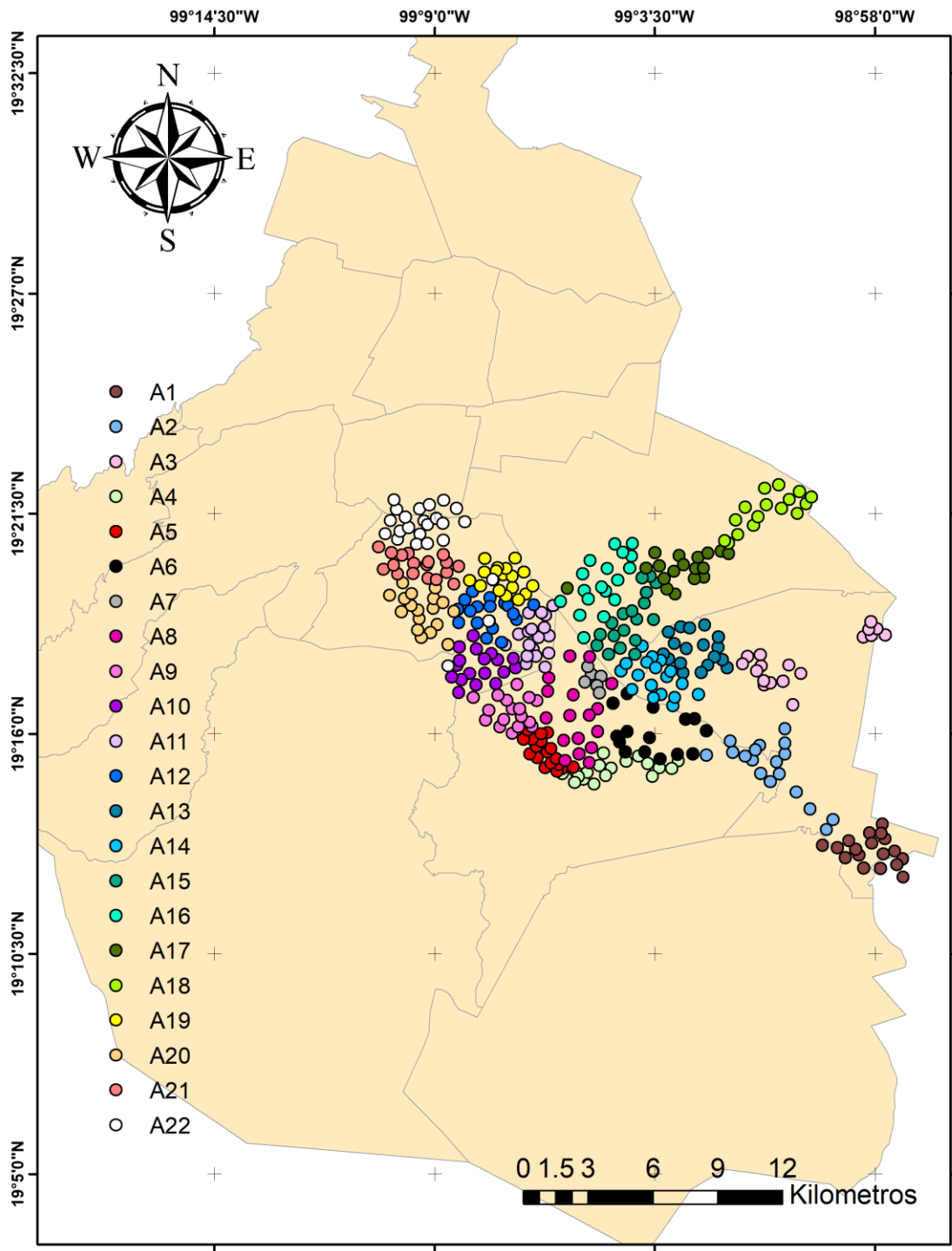


Figura 8. Distribución de las estaciones y los arreglos.

Capítulo 4. Análisis y procesamiento de datos

4.1 Acondicionamiento de los registros

Para cada arreglo, los registros de ruido sísmico ambiental fueron extraídos de la memoria de los sensores en segmentos de 30 minutos y en formato GCF, nativo del fabricante. Posteriormente, fueron convertidos a formato SAC y con la ayuda del software SAC (Goldstein *et al.*, 2003) fue removida la media, la tendencia y la respuesta instrumental de los registros completos de cada estación y de los tres componentes. Se verificó que para cada estación se tuviera el mismo tiempo de registro en los tres componentes, los huecos fueron reemplazados con ceros. Las señales fueron decimadas a un factor de 4, el intervalo de muestreo resultante fue de 0.04 s.

4.2 Funciones de densidad de energía

Con el objetivo de observar el contenido de frecuencias del ruido sísmico, se calcularon las funciones de densidad de energía PSD (Power Spectral Density, en inglés) para los registros de cada estación y cada componente. Las funciones de densidad de energía son una medida del contenido de energía de la señal en el dominio de las frecuencias. Se utilizaron los registros completos dividiéndolos en ventanas de 120 segundos con un traslape del 50%. Fueron calculadas, para cada ventana de tiempo, siguiendo la aproximación para datos sísmicos aleatorios estacionarios de McNamara y Buland (2003), de la siguiente manera:

$$PSD_K = \frac{2\Delta T}{N} |Y_k|^2, \quad (7)$$

donde ΔT es el intervalo de muestro, N es el número de muestras en cada ventana de tiempo y $|Y_k|$ es el espectro de amplitudes de la señal. A cada ventana de tiempo se le aplicó un *cosine taper* del 5% antes de calcular la transformada rápida de Fourier.

En cada estación y en cada componente, se obtuvo una curva que representaba el percentil 50 de las funciones PSD calculadas considerando todas las ventanas. Para analizar el contenido espectral por arreglo se representaron gráficamente todas las curvas que correspondían al mismo arreglo, además se calcularon y representaron las curvas de los percentiles 10 y 90.

En la mayoría de las estaciones se observó un comportamiento similar en el percentil 50 de las funciones PSD en frecuencias menores a 0.8 Hz. Sin embargo, para frecuencias cercanas y mayores a 0.8 Hz presentaban comportamientos distintos, incluso se observaron grandes cambios de amplitud entre los registros de estaciones vecinas. En algunos casos, las curvas de diferente percentil de estaciones cercanas se mezclaban. Además, en general la componente vertical presentaba cambios más abruptos y amplitudes más grandes respecto a las componentes horizontales, principalmente en frecuencias mayores a 0.8 Hz. También, había una mayor diferencia de amplitudes entre los percentiles 10 y 90 en las componentes verticales.

Cabe mencionar que el comportamiento de las curvas fue diferente entre los arreglos, en algunos casos, como el arreglo A9, el comportamiento fue más aleatorio. Por otro lado, en otros arreglos como en el arreglo 20 fue más uniforme. Sin embargo, en los demás arreglos predominó el comportamiento aleatorio.

En la Figura 9 se muestran el percentil 10 (línea punteada en rojo), 50 (línea sólida negra) y 90 (línea punteada en cian) de las componentes este, norte y vertical, de todas las estaciones que forman el arreglo A9. Las curvas PSD calculadas con las estaciones en este arreglo presentan diferencias notables entre sí, además de un incremento considerable en las amplitudes del componente vertical. Basándose en registros de más de 70 estaciones sísmicas en el mundo, Peterson (1993) calculó las curvas NHHM y NLNM para representar los niveles de ruido altos y bajo. Para tener una referencia de los niveles de ruido observados en, se graficaron también las curvas NHHM y NLNM. En la Figura 9 también se puede observar que el percentil 50 de las curvas PSD en frecuencias menores a 0.8 Hz sigue la misma tendencia e incluso está dentro del rango formado por las curvas NLNM y NHHM.

En la Figura 10 se muestran el percentil 10 (línea punteada en rojo), 50 (línea sólida negra) y 90 (línea punteada en cian) de las componentes este, norte y vertical, de todas las estaciones que forman el arreglo A20, en este caso, se observa un comportamiento uniforme en todos componentes y en un mayor rango de frecuencias. En este caso es más notorio que el percentil 50 de las curvas PSD sigue la misma tendencia que las curvas NLNM y NHHM en frecuencias menores a 0.8 Hz. En el Anexo I se muestran las funciones de densidad de energía estimadas en las estaciones que forman cada arreglo y en los tres componentes.

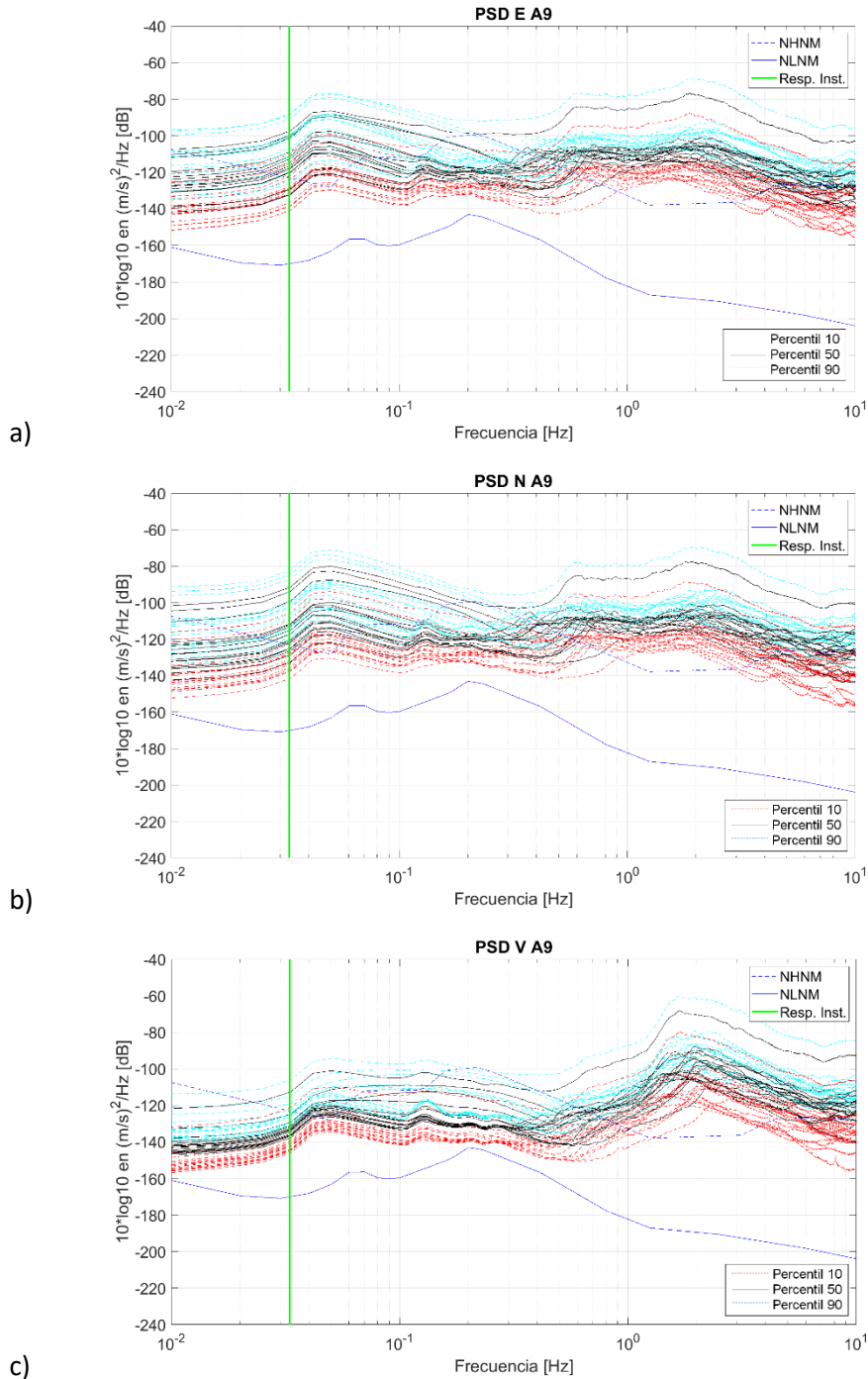


Figura 9. Funciones de densidad de energía de los registros que forman el arreglo 9. En negro, el percentil 50; las líneas punteadas en color cian representan el percentil 90 y las líneas punteadas rojas el percentil 10. Como referencia en color azul se muestran los niveles de ruido NHNM y NLNM. La línea verde vertical representa el límite inferior de la respuesta instrumental según el fabricante. a) Componente este, b) Componente norte, c) Componente vertical.

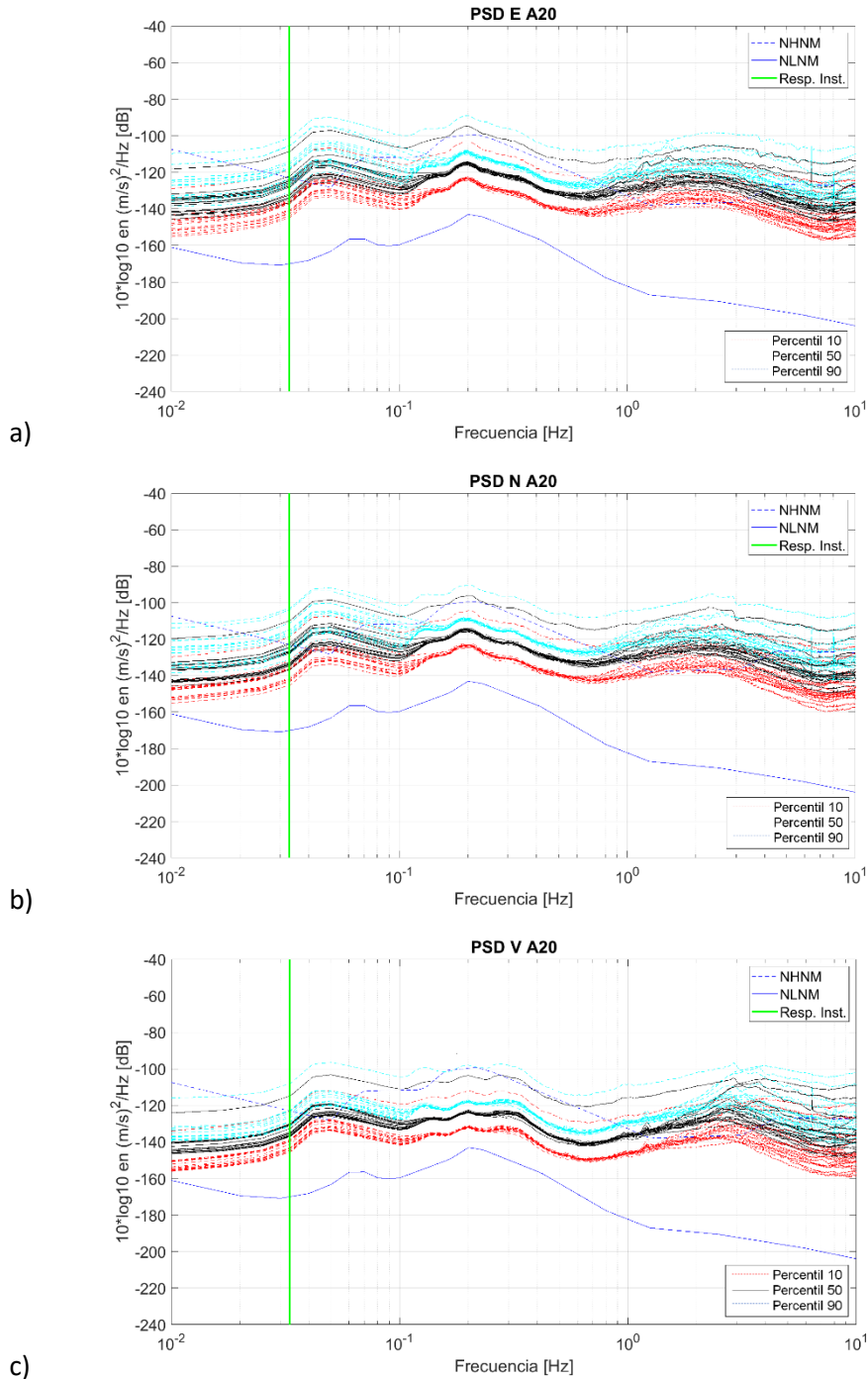


Figura 10. Funciones de densidad de energía de los registros que forman el arreglo 20. En negro, el percentil 50; las líneas punteadas en color cian representan el percentil 90 y las líneas punteadas rojas el percentil 10. Como referencia en color azul se muestran los niveles de ruido NHNM y NLNM. La línea verde vertical representa el límite inferior de la respuesta instrumental según el fabricante. a) Componente este, b) Componente norte, c) Componente vertical.

4.3 Matriz de coeficientes de correlación de densidad espectral

Recuperar la función de Green de manera precisa requiere que los campos de ondas que forman el ruido sísmico ambiental sean completamente difusos. Según la representación modal (sección 1.4), un campo totalmente difuso es estacionario en tiempo, también, implica que los modos de ondas de diferentes eigenfrecuencias no estén correlacionados y que se propaguen en todas las direcciones con la misma energía. Por otro lado, un campo no difuso sería el resultado de fuerzas puntuales aisladas que no están continuamente distribuidas en todas direcciones o no son estacionarias en tiempo. Además, las fuentes puntuales tendrán espectros de fuente anchos, lo que introducirá correlaciones entre frecuencias vecinas del campo de ondas que forman el ruido sísmico ambiental (Liu y Ben-Zion, 2016).

Para estimar las desviaciones de un campo observado respecto a un campo aleatorio de ruido completamente difuso, Liu y Ben-Zion (2016) desarrollaron una técnica basada en el cálculo de una matriz de coeficientes de correlación de densidad espectral (MCE) en diferentes frecuencias.

En un campo difuso (ecuación 3) las amplitudes modales no están correlacionadas. La media, la pseudo-covarianza y la covarianza de las amplitudes modales son (Weaver y Lobkis, 2004):

$$\begin{aligned} E[a_n] &= 0 \\ E[a_n a_m] &= 0 \\ E[a_n a_m^*] &= F(\omega_n) \delta_{nm} \end{aligned} \quad (8)$$

La delta de Kronecker indica que las amplitudes modales en frecuencias cercanas son delta-correlacionadas. El cálculo de la matriz MCE supone que las amplitudes modales en frecuencias vecinas pueden estar correlacionadas y que su covarianza está dada por:

$$E[a_n a_m^*] = g(\omega_n, \omega_m), \quad (9)$$

donde $g(\omega_n, \omega_m)$ es una función generalmente compleja y las amplitudes modales son asumidas como variables aleatorias Gaussianas complejas.

A partir de la covarianza de los absolutos cuadrados de las amplitudes modales, Liu y Ben-Zion (2016) relacionan la función $g(\omega_n, \omega_m)$ con la matriz de correlación de valores de densidad espectral:

$$\begin{aligned}
Cov[|a_n|^2, |a_m|^2] &= E[|a_n|^2, |a_m|^2] - E[|a_n|^2]E[|a_m|^2] \\
&= E[a_n a_m^*]E[a_n^* a_m] = |g(\omega_n, \omega_m)|^2
\end{aligned}
\tag{10}$$

Liu y Ben-Zion (2016) demuestran que si la función de covarianza $|g(\omega_n, \omega_m)|$ es cercana a una constante que multiplica a la delta de Kronecker la derivada de la correlación con respecto a la diferencia de tiempo puede aproximarse a la función de Green entre dos puntos. Además, mencionan que, en campos de ruido aleatorio locales en sistemas abiertos, si las frecuencias vecinas no son delta-correlacionadas o el ruido no es estacionario, el campo no es completamente difuso. De manera que para un campo completamente difuso los valores en la diagonal de la matriz MCE serán 1 y los demás 0 (ver Figura 11). Un campo no difuso tendrá valores no diagonales diferentes de cero, implicando la correlación entre diferentes frecuencias.

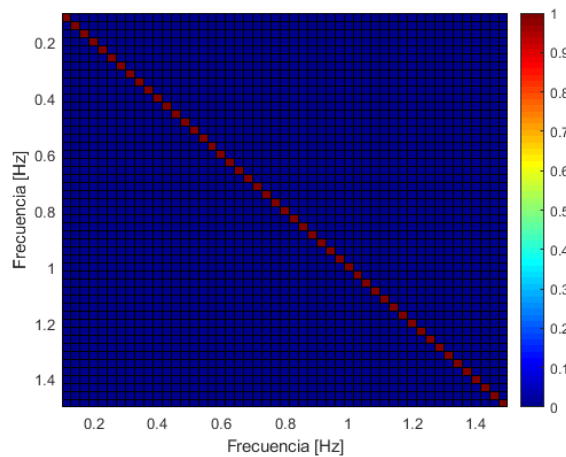


Figura 11. Representación gráfica de la matriz de coeficientes de correlación de densidad espectral de un campo completamente difuso.

Para conocer las características de difusividad del ruido sísmico ambiental registrado en las estaciones, se calcularon las matrices de coeficientes de correlación de densidad espectral en todas las estaciones y en los tres componentes. En cada caso el procedimiento fue:

1. Se dividieron los registros en ventanas de 120 s, entre ventanas consecutivas se dejó un gap del 10% del tamaño de la ventana, como lo sugiere Liu y Ben-Zion (2016).
2. Se calcularon los espectros cruzados entre ventanas consecutivas utilizando la transformada rápida de Fourier
3. Utilizando la función en MATLAB® *xspecmatStats* (Liu y Ben-Zion,2016) se estimaron las matrices de coeficientes de correlación de densidad espectral.

En algunos casos, las MCE mostraron correlación entre frecuencias vecinas, posiblemente debidas a fuentes cercanas a las estaciones. En cada estación los resultados fueron consistentes en los tres componentes, aunque en la mayoría de los casos se observaba mayor correlación de frecuencias vecinas en la componente vertical (ver Figura 12). Las matrices MCE de las estaciones que pertenecían al mismo arreglo mostraron similitudes respecto al rango de frecuencias vecinas correlacionadas (ver Figura 13). En general, se observó que el campo de ondas registrado no es completamente difuso.

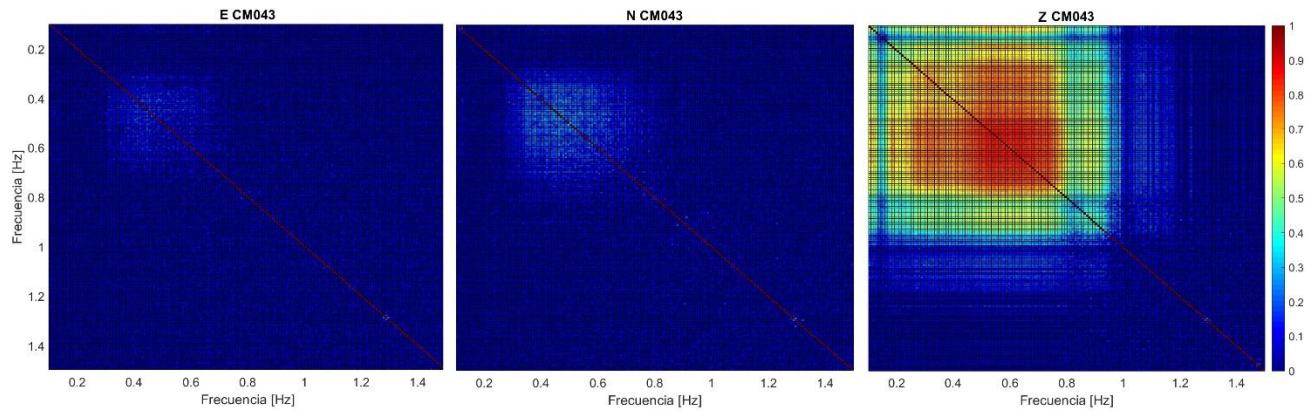


Figura 12. Matriz de coeficientes de correlación de densidad espectral de los tres componentes de la estación CM143. Izquierda, este; centro, norte; derecha, vertical. Se observa que en los tres componentes hay correlación entre frecuencias vecinas en un rango de 0.2 a 0.8 Hz, hay mayor correlación en la componente vertical.

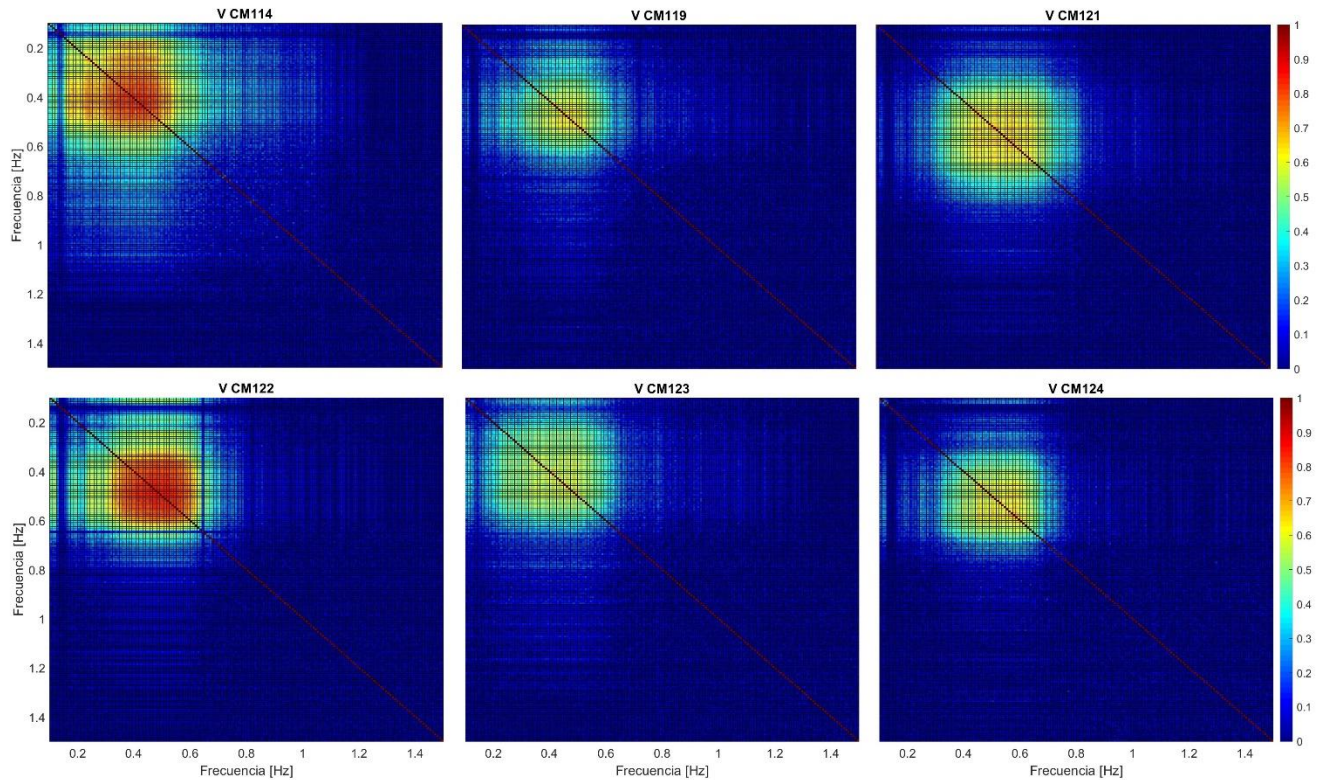


Figura 13. Matrices de coeficientes de correlación de densidad espectral para 6 estaciones pertenecientes al arreglo A9. Se observan rangos similares donde existe correlación entre frecuencias vecinas.

4.4 Recuperación de la función de Green

En este trabajo se analizaron diferentes esquemas de procesamiento para obtener una buena aproximación a la función de Green entre dos puntos. Bensen *et al.* (2007) describen una secuencia de procesamiento que se basa en normalizar en tiempo y en frecuencias los registros para suprimir efectos de fuentes energéticas cercanas a las estaciones. Por otro lado, Gross *et al.* (2012) mencionan que una selección adecuada de los datos de entrada puede sustituir a las normalizaciones no lineales en el dominio del tiempo.

Para los datos utilizados aquí es necesario considerar que las estaciones fueron instaladas en un ambiente urbano, las matrices de coeficientes de correlación de densidad espectral sugieren que posiblemente los registros estén influenciados por fuentes transitorias en alguna de las estaciones, fuentes cercanas a las dos estaciones y fuentes monocromáticas persistentes en una o más estaciones durante todo o gran parte del registro. Además, por las distancias entre estaciones los rangos de frecuencias donde se buscarán arribos de trenes de onda son considerablemente más

altos que los estudios regionales. Es probable que para este rango de frecuencias el ruido sísmico ambiental tenga su origen dentro de la ciudad.

La elección de la secuencia de procesamiento consideró: normalización en tiempo, normalización en frecuencias, selección de ventanas de acuerdo con parámetros estadísticos, relación señal ruido y ponderación de funciones de Green individuales. Como se explica más adelante, la longitud de las ventanas se determinó considerando las velocidades reportadas en los estudios previos. Se probaron más de 40 esquemas de procesamiento variando el orden y tipo de los procesos. Para las pruebas se utilizaron las componentes verticales de todos los pares de estaciones posibles del arreglo A11, en esta sección se muestran las imágenes de las pruebas en tres pares de estaciones: CM145-CM146, separadas 838 m; CM145-CM156, separadas 1360 m y CM145-CM160, separadas 2944 m. En la Figura 14 se muestra un diagrama que resume las secuencias de procesamiento aplicadas.

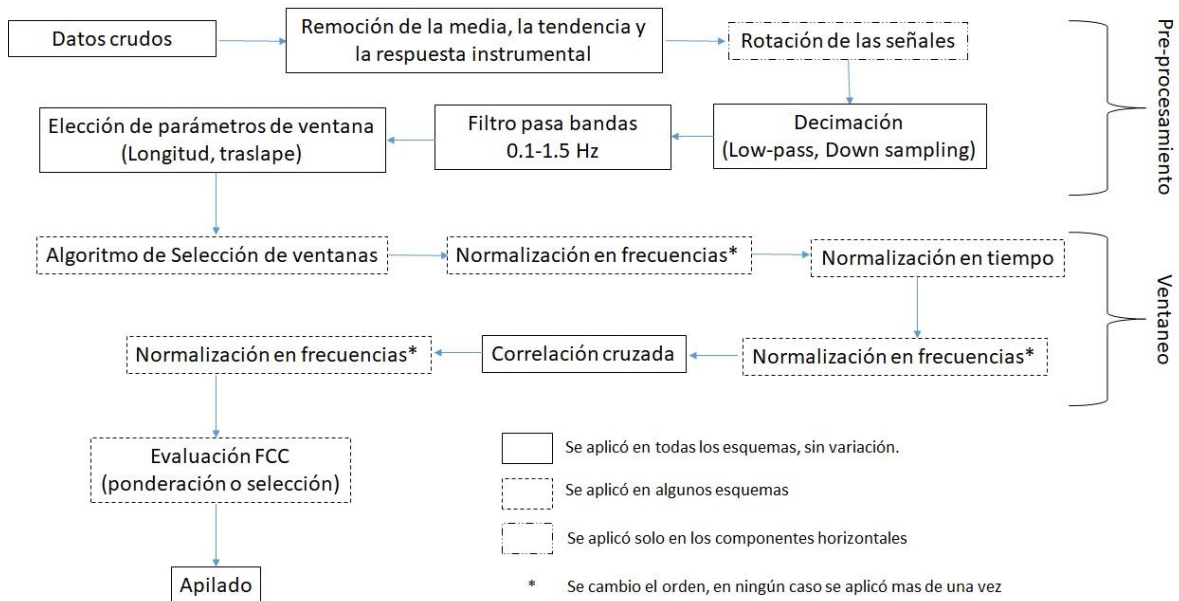


Figura 14. Secuencias de procesamiento probadas en este trabajo. FCC significa Función de Correlación Cruzada.

4.4.1 Correlación cruzada de señales digitales

En el dominio del tiempo, la función de correlación cruzada insesgada de dos series de tiempo x y z , de tamaño N es calculada como (Gross, 2010):

$$FCC(r) = \frac{1}{N - |r|} \sum_{n=0}^{N-r} x_{n+r} z_n^* \quad (11)$$

El término $\frac{1}{N - |r|}$ toma en cuenta el número decreciente de multiplicaciones para retrasos r mayores. Las correlaciones cruzadas fueron calculadas en MATLAB®, el algoritmo que utiliza es equivalente a la ecuación (11) en el dominio de las frecuencias.

4.4.2 Rotación de las componentes horizontales

Para cada par de estaciones, de cada arreglo, fue calculado el acimut (θ). Las componentes radiales (R) y transversales (T) fueron estimados de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} R &= \cos(\theta) * N + \text{sen}(\theta) * E, \\ T &= -\text{sen}(\theta) * N + \cos(\theta) * E, \end{aligned} \quad (12)$$

donde E y N son las componentes este-oeste y norte-sur, respectivamente.

4.4.3 Selección de la longitud de las ventanas

Gross (2015) recomienda que la longitud de las ventanas sea de 4 a 6 veces el máximo tiempo de retraso esperado, en el caso de que no se considere un traslape. Mientras que para ventanas traslapadas menciona que la longitud de las ventanas puede ser igual al máximo tiempo de retraso esperado. El máximo tiempo de retraso esperado fue de 127 s, el cual se calculó a partir de la velocidad de onda de corte mínima reportada en los estudios previos (50 m/s) y la máxima distancia entre estaciones (6369 m). Se decidió utilizar ventanas de 120 segundos. Las primeras pruebas mostraron que las FCCs no cambiaban significativamente para traslapes mayores al 75%.

4.4.4 Normalización en tiempo

La normalización en tiempo tiene como objetivo eliminar los efectos de fuentes energéticas como pueden ser sismos, irregularidades instrumentales y fuentes de ruido no estacionarias (Bensen *et*

al., 2007). Para el conjunto de datos de este trabajo este procedimiento fue fundamental, no se consiguieron buenos resultados cuando se omitió. Se probaron 3 tipos diferentes de normalización en tiempo:

Normalización 1-bit: Consiste en transformar la señal original definida en un conjunto de números reales a una señal digital en un rango de -1 a 1, de la siguiente manera:

$$sgn(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x > 0 \\ -1 & \text{si } x < 0 \end{cases} \quad (13)$$

Hanasogue y Branicki (2012) hicieron una extensa investigación en la que evaluaron las propiedades estadísticas de la correlación cruzada de microtemores usando datos crudos y la normalización 1-bit. Concluyeron que la normalización 1-bit es una medida más estable, eficaz para eliminar señales de gran amplitud debidas a fuentes esporádicas. Incluso sus observaciones fueron válidas mitigar el efecto de fluctuaciones debidas a procesos aleatorios estacionarios y no estacionarios.

Normalización *Runnig-Absolut-Mean* (RAM): Este método calcula el promedio móvil del valor absoluto de la forma de onda en una ventana de tiempo de normalización de longitud fija y pondera la forma de onda en el centro de la ventana por el inverso de este promedio, la ponderación de la normalización, o los pesos, w_n para un tiempo n son calculados como (Bensen et al., 2007):

$$w_n = \frac{1}{2N + 1} \sum_{j=n-N}^{n+N} |d_j|, \quad (14)$$

la señal normalizada se obtiene al dividir la ventana de tiempo entre los pesos w_n . Bensen *et al.* (2007) recomiendan una longitud de ventana igual a la mitad del máximo período del filtro pasa bandas, en este trabajo se utilizó una ventana de 5 segundos.

Normalización respecto a la máxima amplitud (MA): El objetivo de esta normalización es preservar la forma de onda y mitigar el efecto que pueda existir al ser una estación más energética que otra. Simplemente consiste en dividir la ventana de tiempo entre el valor máximo del valor absoluto de la señal.

En este trabajo no se observaron diferencias significativas entre la normalización 1-bit y RAM, incluso la normalización con respecto de la máxima amplitud dio resultados similares. En la Figura 15 se muestran las funciones de Green recuperadas en los pares de prueba, como se puede observar apenas son distinguibles las diferencias entre la normalización 1-bit y RAM, líneas negra y roja, respectivamente.

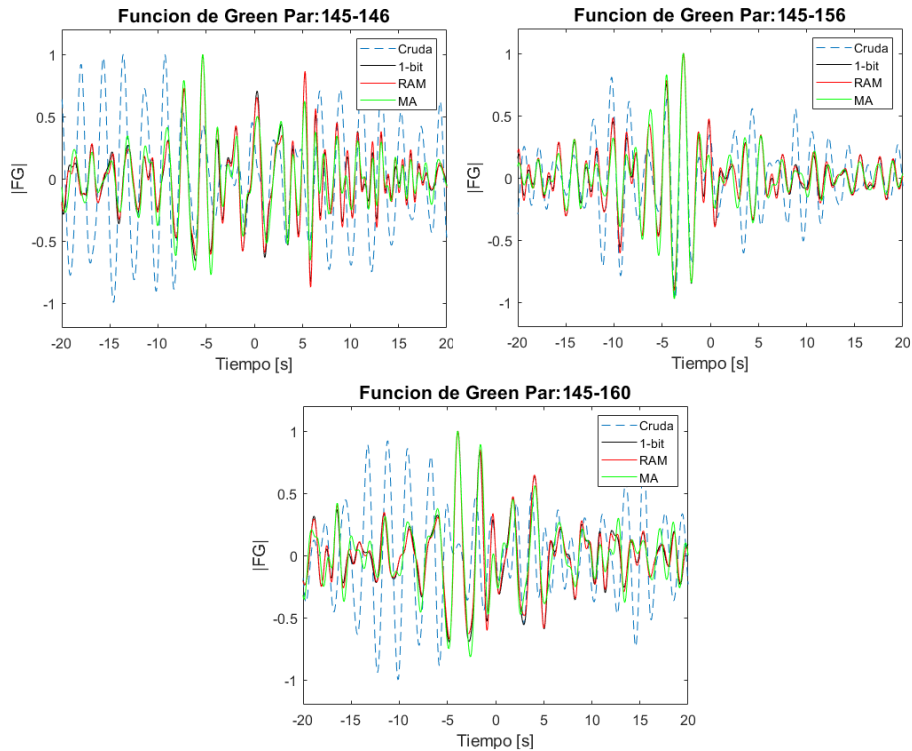


Figura 15. Comparación entre las funciones de Green recuperadas al normalizar las señales en el dominio del tiempo, utilizando 1-bit (línea negra), RAM (línea roja), MA (línea verde). Se muestra también el resultado obtenido sin normalizar la señal (línea punteada). Las funciones de Green están filtradas en un rango de 0.4 a 1 Hz.

Después de analizar las 153 funciones de Green recuperadas, para cada tipo de normalización en tiempo, se observó que con los métodos 1-bit y RAM mejoraba la simetría de algunos pares. Debido a que los tiempos de cálculo son más rápidos con la normalización 1-bit, se consideró más conveniente.

4.4.5 Normalización en frecuencias (*whithening*)

De la misma manera que la normalización en tiempo, la normalización en frecuencias es un proceso no lineal. Su objetivo principal es mitigar la influencia de fuentes monocromáticas (Bensen *et al.*, 2007). Consiste en obtener el espectro de Fourier, multiplicarlo por una ventana de Hanning, normalizar su amplitud y calcular la transformada inversa. La señal resultante tendrá un espectro de frecuencias plano.

Se probaron tres tipos de esquemas: aplicando la normalización en frecuencias antes de la normalización en tiempo, después de la normalización en tiempo y a cada función de correlación cruzada (FCC) antes del apilado. Se observó una relación entre el traslape de las ventanas y los efectos del blanqueamiento espectral. En la Figura 16 se muestran las funciones de Green recuperadas para los tres pares de la sección anterior con los tres tipos de esquemas, aplicando la normalización 1-bit y para traslapes del 50% y 75%, se puede notar que utilizado un traslape del 75% las variaciones son mínimas. En general no se obtuvieron variaciones significativas entre los tres tipos de esquemas, incluso no se observaron diferencias importantes entre las funciones de Green que fueron recuperadas utilizando blanqueamiento espectral y las que sólo fueron normalizadas en tiempo (Figura 17).

Con base en las observaciones hechas se decidió prescindir de la normalización en frecuencias.

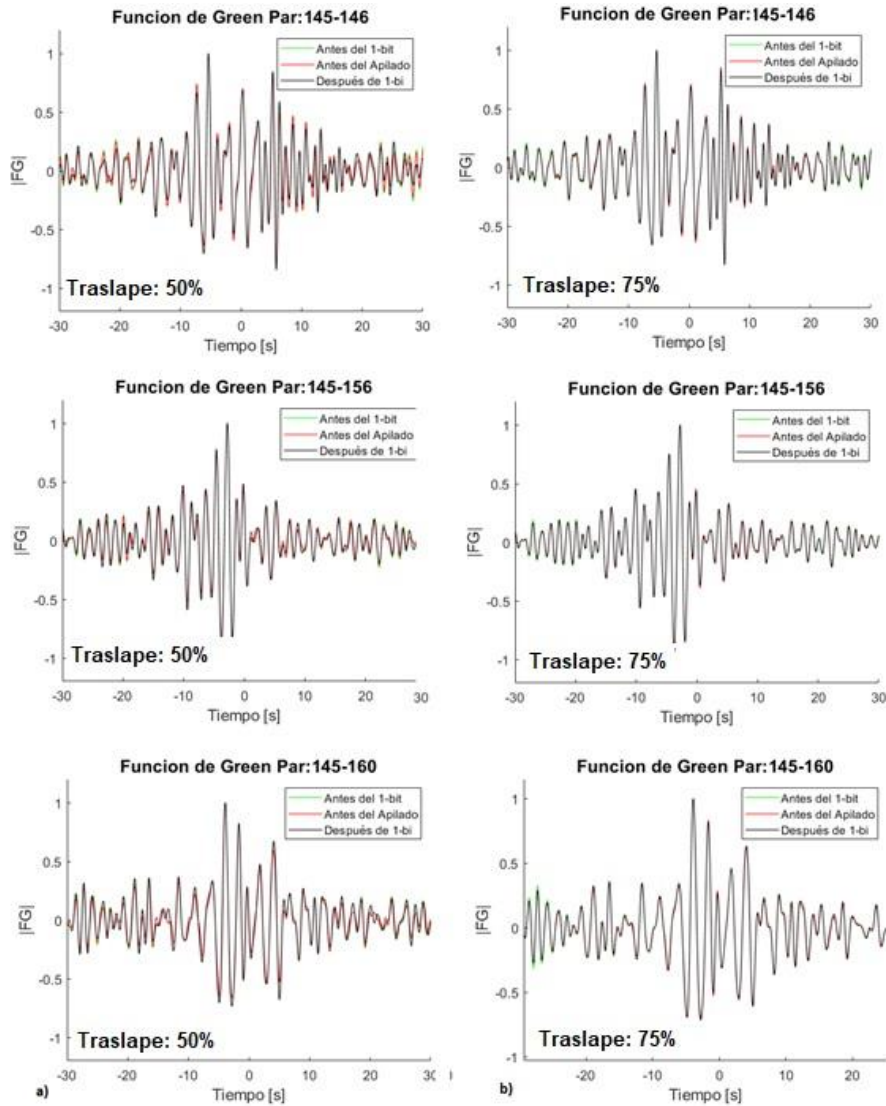


Figura 16. Funciones de Green recuperadas normalizando las señales en frecuencia, antes de la normalización en tiempo (verde), después de la normalización en tiempo (negro) y antes del apilado (rojo). En la columna de la izquierda se utilizó un traslape de ventanas del 50%, mientras que para la columna de la derecha del 75%. Se puede observar que la variación es mínima para traslapes del 75%. Las funciones de Green están filtradas en un rango de 0.4 a 1 Hz.

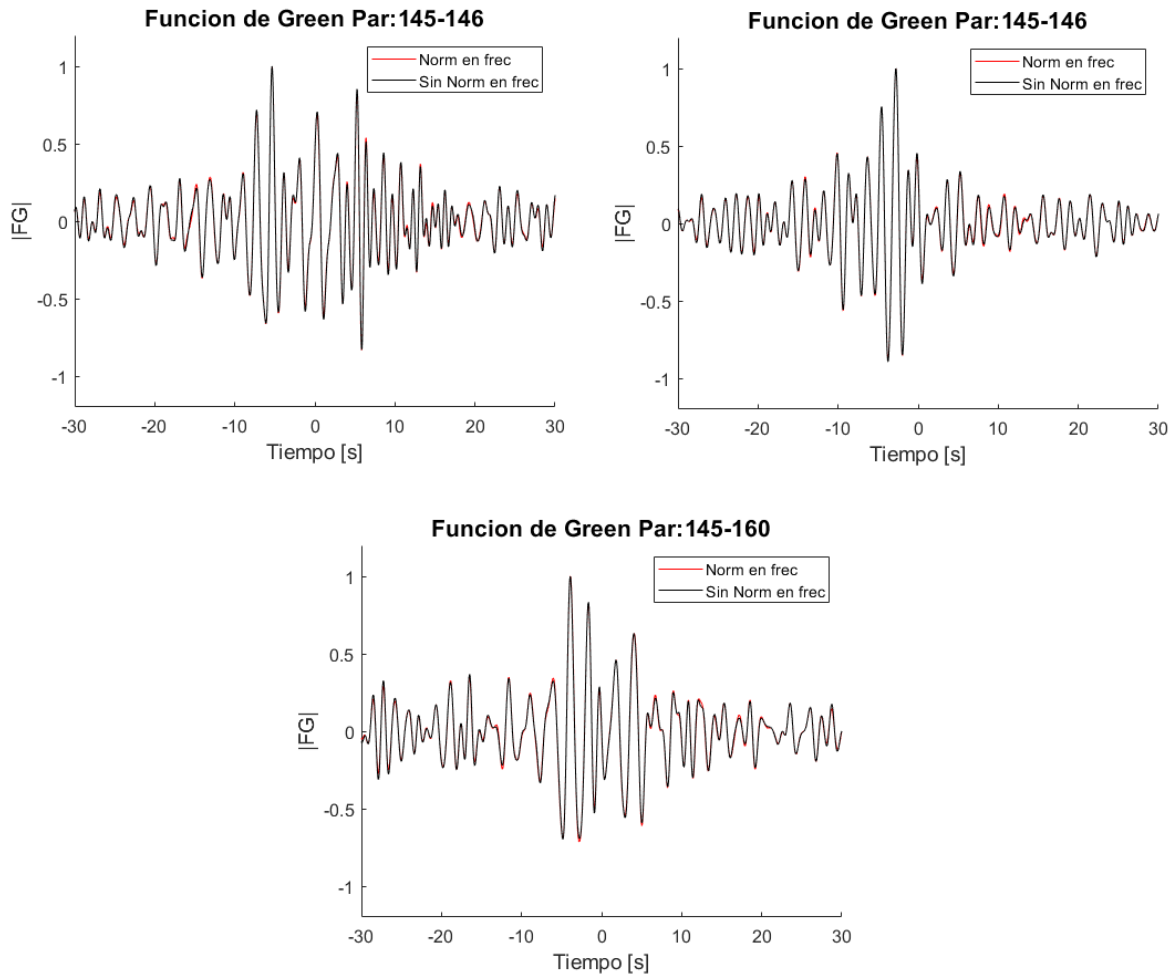


Figura 17. Comparación de las funciones de Green recuperadas de tres pares cuando las señales son normalizadas en frecuencia y en tiempo y cuando sólo son normalizadas en tiempo, utilizando ventanas de 120 segundos y traslape del 75%. Es notorio que los efectos de la normalización en frecuencias son imperceptibles. Las funciones de Green están filtradas en un rango de 0.4 a 1 Hz.

4.4.6 Algoritmo de selección de ventanas

El ruido sísmico urbano puede ser descrito como una superposición de señales emitidas por numerosas fuentes independientes distribuidas aleatoriamente, muchas de estas señales son deterministas, pero sus parámetros físicos son desconocidos. El ruido sísmico (urbano) puede ser considerado como un proceso aleatorio no estacionario en tiempo y en espacio. En el caso ideal de un número infinitamente grande de contribuciones de señales independientes el ruido sísmico tendría una distribución Gaussiana (Gross *et al.*, 2009).

La selección de ventanas tiene como objetivo descartar ventanas de tiempo que estén dominadas por eventos transitorios. El algoritmo utilizado se basó en la clasificación estadística del ruido sísmico presentada por Gross *et al.* (2012) con unas ligeras modificaciones. Esta clasificación utiliza relaciones de intervalos de amplitud de series de tiempo y percentiles para identificar y cuantificar, variaciones en el histograma de las series de tiempo respecto a una distribución Gaussiana. Los parámetros utilizados en este trabajo fueron: factor pico (fp), que representa la relación entre los intervalos 99.73% y 95.45%,

$$fp = \text{intervalo}(99.73\%)/\text{intervalo}(95.45\%); \quad (15)$$

$SI68$, representa la relación entre la frontera inferior y superior del intervalo que agrupa el 68% de las muestras o la relación entre el percentil 84 y el percentil 16,

$$SI68 = |P84/P16|; \quad (16)$$

$SI95$, representa la relación entre la frontera inferior y superior intervalo que agrupa el 95% de las muestras,

$$SI95 = |P97.725/P2.275|. \quad (17)$$

El factor fp es una medida de la normalidad de la muestra, mientras que $SI68$ y $SI95$ de simetría. En la Figura 18 se muestra gráficamente el significado de los intervalos y percentiles en una distribución Gaussiana. Los valores esperados para una distribución normal se resumen en la Tabla 2, también se muestra el rango de valores que pueden tener los parámetros para que una muestra (en este caso una ventana de tiempo) pueda ser considerada aproximada a una distribución normal.

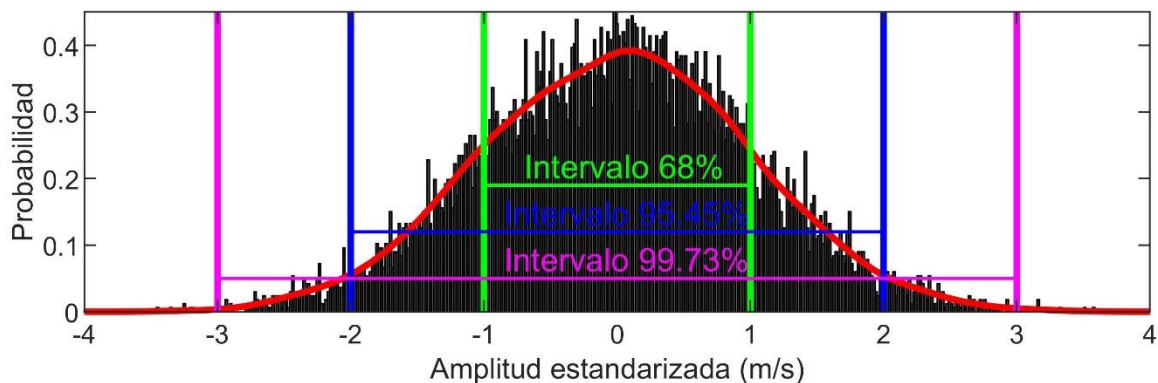


Figura 18. Histograma de amplitudes estandarizadas de una ventana de tiempo con distribución normal. Se muestran los intervalos que comprenden el 99.73%, 95.54% y el 68%, del total de las muestras. La línea roja representa la función de distribución de probabilidad. Imagen basada en Gross *et al.* (2012).

Los registros de ruido ambiental presentaban variaciones importantes en amplitud entre la mayoría de las estaciones. Por esta razón, en el proceso de selección, las ventanas de tiempo fueron estandarizadas, y se aproximaron a una distribución normal $N(\mu = 0, \sigma = 1)$. Para que las ventanas de tiempo fueran utilizadas los tres parámetros tenían que estar dentro del rango de valores aceptados, en ambas estaciones. Gross *et al.* (2012) consideran que las ventanas de tiempo seleccionadas tienen influencia de pocos eventos transitorios. El objetivo principal de este procedimiento es sustituir la normalización en tiempo.

Tabla 2. Parámetros utilizados en la selección de ventanas.

| Parámetro | Valor esperado | Valores aceptados |
|----------------------|----------------|---------------------|
| Factor pico (fp) | 1.5 | $1.4 < fp \leq 1.7$ |
| $SI68$ | 1 | 1 ± 0.05 |
| $SI95$ | 1 | 1 ± 0.05 |

Al utilizar el algoritmo de selección de ventanas se observó que los pulsos principales coincidían en las funciones de Green donde los registros fueron normalizados en tiempo. En la Figura 19 se comparan las funciones de Green recuperadas con el algoritmo de selección de ventanas y las recuperadas con el procedimiento de normalización en tiempo 1-bit. Aunque hay similitudes, en algunos casos se observó que con la selección de ventanas las amplitudes de la coda son mayores, es decir, la relación señal ruido es menor. Otro aspecto importante de la selección de ventanas es la cantidad de información que el algoritmo descarta, existen pares de estaciones en donde se desechó hasta el 95% de las ventanas. El algoritmo no mejoró las funciones de Green en la mayoría de los pares.

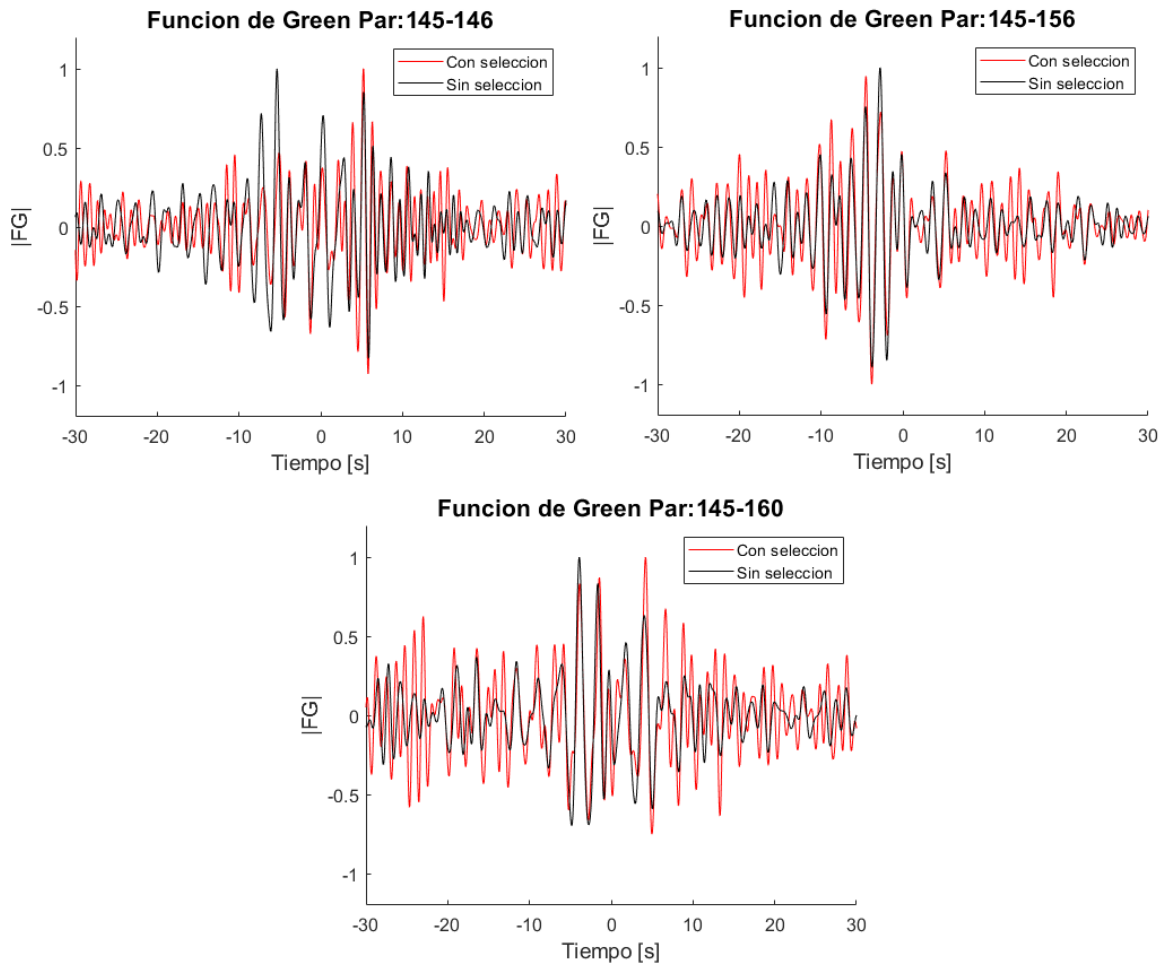


Figura 19. Comparación entre las funciones de Green recuperadas al aplicar el algoritmo de selección de ventanas (línea roja) y las recuperadas al normalizar en tiempo con 1-bit (línea negra). Se puede notar que las funciones de Green tienen codas de mayor amplitud al seleccionar las ventanas.

Para las funciones de Green mostradas en la Figura 19 es necesario mencionar que para el par 145-146 se descartó el 91% de las ventanas evaluadas, para el par 145-156 el 82% y para el par 145-160 el 88%. En general, para las 153 funciones de Green recuperadas con el algoritmo de selección de ventanas se descartaron más del 80% de las ventanas.

Considerando las variaciones en los resultados mostradas en la Figura 19 se evaluó la aplicabilidad de la normalización en frecuencias al utilizar selección de ventanas. En la Figura 20 se muestran las funciones de Green para los mismos pares al aplicar la normalización en frecuencias a las ventanas seleccionadas antes y después de la correlación cruzada. Se observó una ligera mejoría en la relación señal ruido cuando se utilizó la normalización en frecuencias antes de la correlación cruzada.

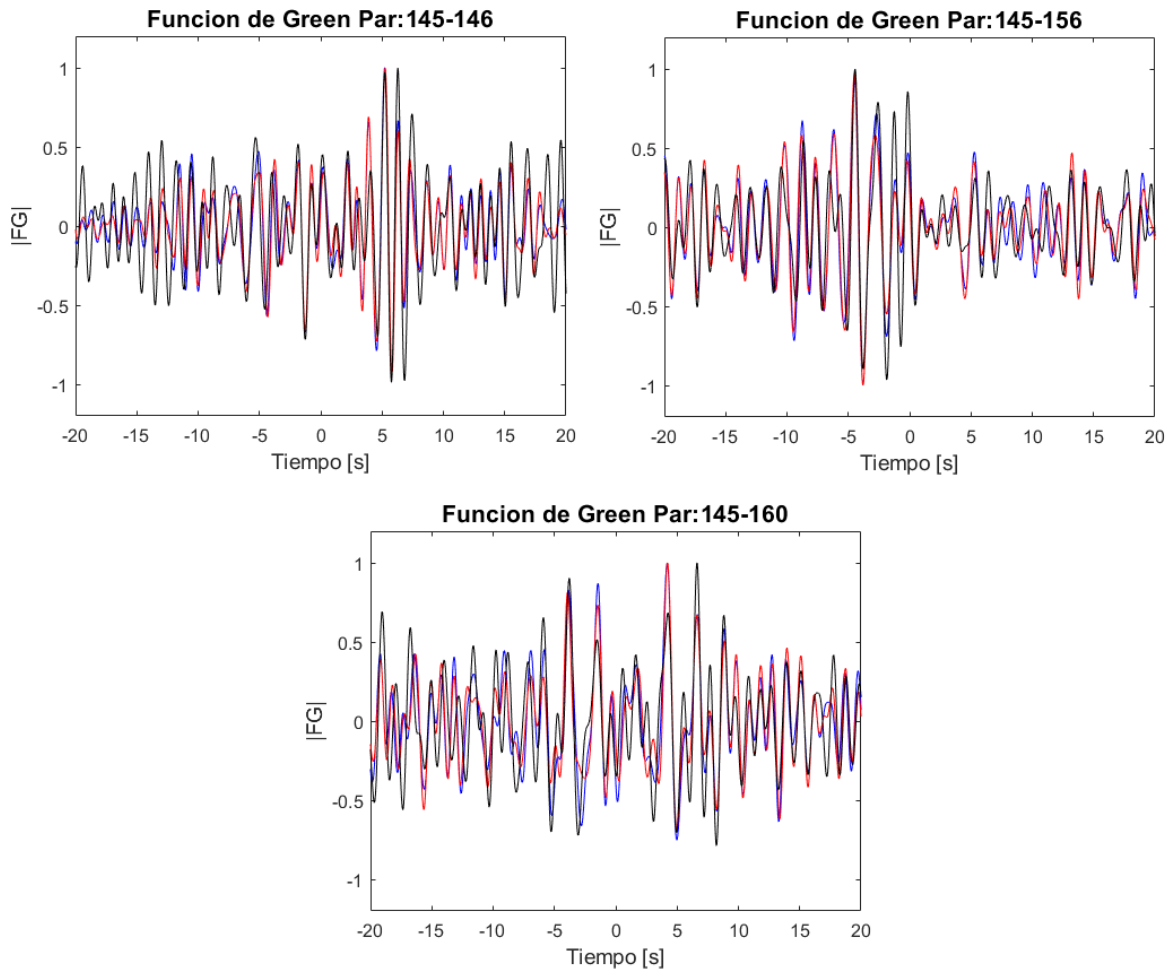


Figura 20. Comparación de las funciones de Green recuperadas con el algoritmo de selección de ventanas sin normalización en frecuencias (azul), con la normalización antes de la correlación cruzada (roja) y con la normalización después de la correlación cruzada (negra).

4.4.7 Relación señal ruido y apilado

La relación señal ruido (SNR, por sus siglas en inglés) es utilizada para cuantificar la calidad de las FCCs. Existen diferentes maneras de calcularla, Gross (2015) dividió el pico máximo de la FCC entre el nivel de la raíz cuadrática media (*Root-Mean-Square Level*, en inglés) o rms de la FCC completa. En su trabajo, las FCCs más confiables tenían valores de SNR superiores a 13. Por otro lado, Oliver (2015) calcula la SNR como el cociente entre el rms de la ventana de tiempo donde se espera el arribo del tren de ondas y el rms de la coda. La ventana de tiempo donde espera la señal es estimada

en el rango $[d/(0.7 * V), d/(1.3 * V)]$, donde V representa una velocidad esperada y d la distancia entre estaciones. En su trabajo, las FCCs más confiables tenían valores de SNR superiores a 4.

En este trabajo la SNR fue calculada combinando los métodos anteriores, se calculó el cociente del rms de la ventana de tiempo donde se esperaba el arribo del tren de ondas y el rms de la coda y la ventana entre el tiempo desde el retraso cero y el inicio de la ventana con la señal esperada. La ventana de tiempo de la señal esperada se estimó en el rango $[d/50, d/900]$, con la distancia en m. Este rango fue elegido tomando en cuenta los estudios previos. Las FCCs que tenían valores mayores a 1.6 se consideraron más confiables. Cabe mencionar que parámetros como el intervalo de muestreo y la longitud de las ventanas influyen en los valores rms, por esta razón el umbral que considera a las FCCs de mejor calidad es menor al que calculó Oliver (2015).

A partir de la SNR se probaron dos tipos de apilado:

- **Apilado ponderado:** Consistió en multiplicar, antes del apilado, las FCCs individuales por el cuadrado del valor SNR, siempre y cuando este sea mayor o igual a 1.6.
- **Apilado selectivo:** Se basó en el trabajo de Oliver (2015), consistió en apilar solo aquellas FCCs que tuvieran valores SNR mayores o iguales a 1.6.

En la Figura 21 se muestran tres funciones de Green recuperadas considerando la normalización 1-bit y el apilamiento ponderado. Se observa que el apilamiento ponderado no contribuye a mejorar la función de Green e incluso realza los pulsos alrededor del tiempo cero. Las funciones de Green recuperadas considerando el algoritmo de selección de ventanas y la normalización en frecuencias antes del apilado no mostraron mejoras en su forma, incluso en algunos casos se perdieron los pulsos de mayor amplitud, estas funciones se muestran en la Figura 22.

En la Figura 23 se muestran tres funciones de Green recuperadas considerando la normalización 1-bit y el apilamiento selectivo. Tampoco se observa una mejoría significativa, además, se descarta más del 90% de la información en la mayoría de los pares. Sin embargo, es importante resaltar que se logran resultados similares apilando menos del 5% de las FCCs, en todos los casos.

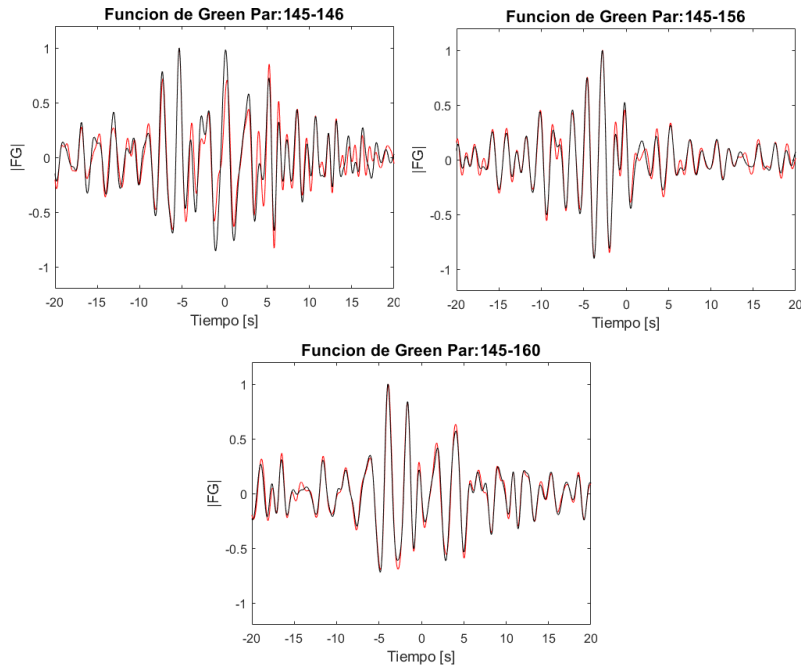


Figura 21. Comparación de funciones de Green recuperadas considerando la normalización 1-bit y el apilamiento ponderado (línea negra) y solo normalización 1-bit (línea roja). No se observa una diferencia significativa

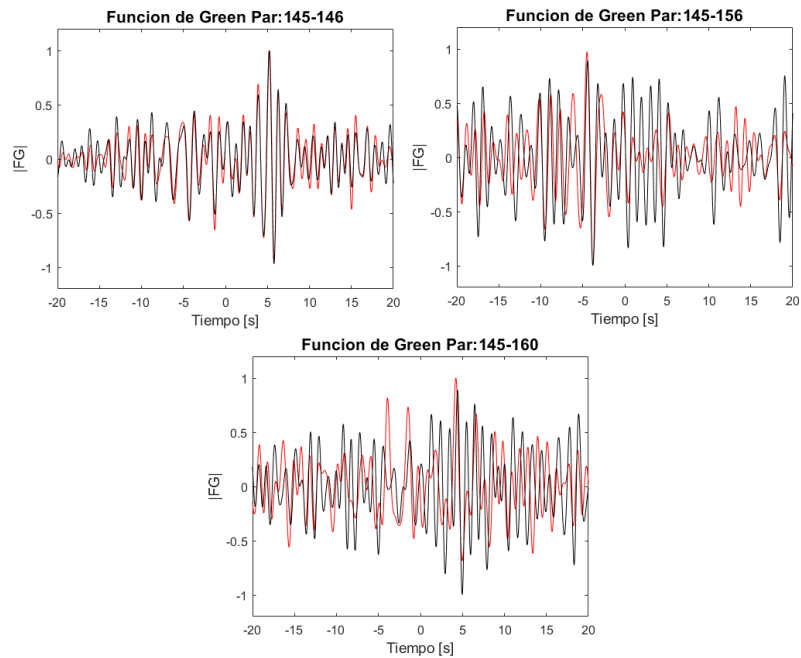


Figura 22. Comparación entre las funciones de Green recuperadas utilizando el algoritmo de selección de ventanas y la normalización espectral (línea roja) y las recuperadas añadiendo el

procedimiento más el apilamiento ponderado (línea negra). Es notorio que las funciones de Green no mejoraron e incluso las amplitudes la coda son mayores.

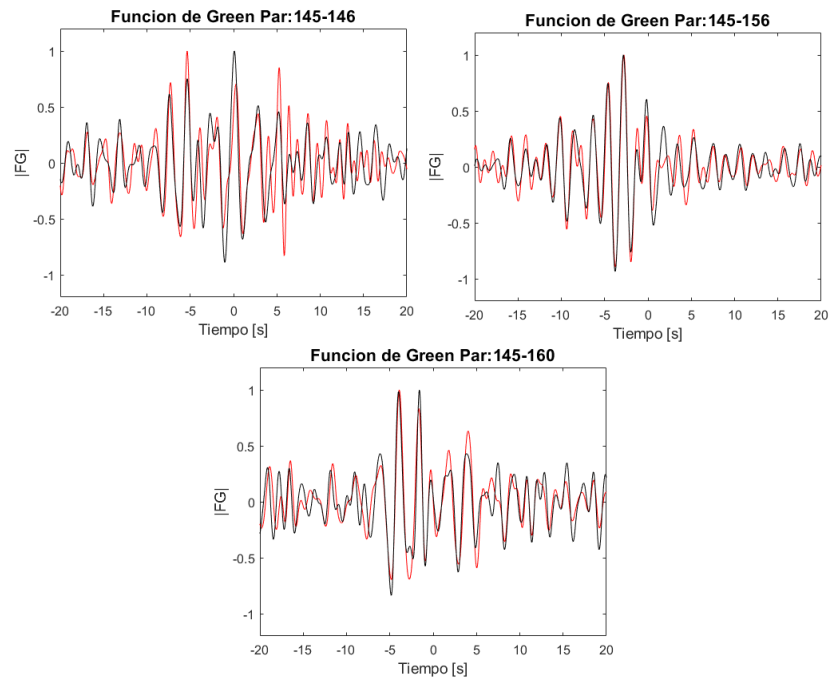


Figura 23. Comparación de funciones de Green recuperadas considerando la normalización 1-bit y el apilamiento selectivo (línea negra) y solo normalización 1-bit (línea roja).

4.4.8 Esquema de procesamiento seleccionado.

Con base en las observaciones hechas en esta sección se eligió el esquema de procesamiento mostrado en la Figura 24 para calcular las correlaciones cruzadas de todos los pares de estaciones y de todos los arreglos, utilizando las componentes vertical, radial y transversal.

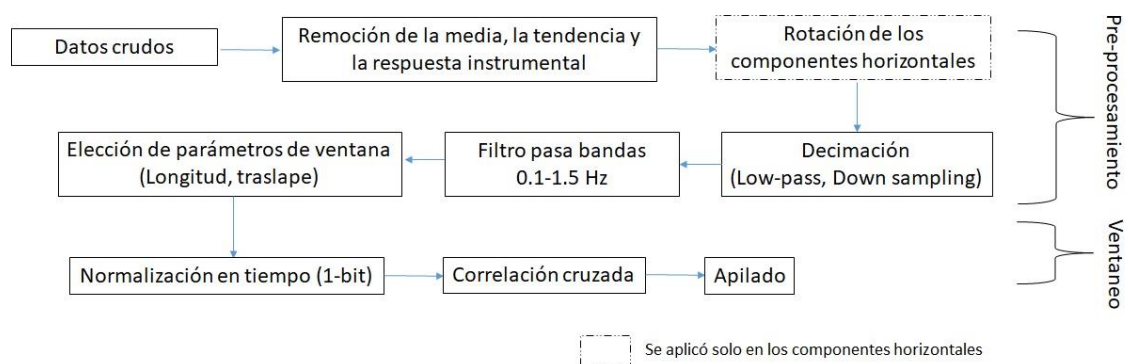


Figura 24. Esquema de procesamiento utilizado para la estimación de todas las funciones de Green.

Al tratarse del mismo tipo de ondas (ondas Rayleigh) se esperaban resultados similares en las funciones de Green recuperadas en las componentes radial y vertical. Sin embargo, se obtuvieron diferencias importantes, incluso en amplitud, sin una clara tendencia general que indicara un componente específico donde la función de Green fuera estimada con mayor precisión, en algunos arreglos se obtuvieron mejores resultados en la componente radial y en otros en el vertical. En la Figura 25 se comparan las funciones Green recuperadas en las componentes vertical y radial de 4 pares de estaciones.

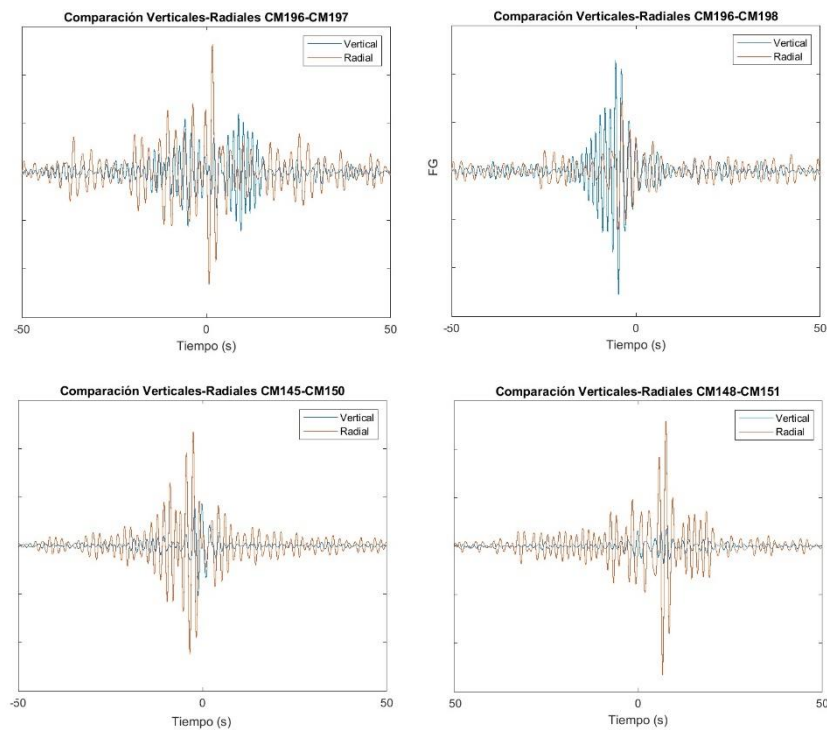


Figura 25. Comparación de la función de Green recuperada en la componente radial y vertical en 4 pares de estaciones. Arriba, en los pares CM196-CM197 y CM196-CM198, pertenecientes al arreglo 7 se observa mejor definida la función de Green en la componente vertical. Abajo, en los pares CM145-CM150 y CM148-CM151, pertenecientes al arreglo 11 se observa mejor definida la función de Green en la componente radial.

Por otro lado, en algunos arreglos se observaron pulsos más claros en la componente transversal de la función de Green recuperada. En las Figuras 26,27,28 y 29 se muestran las funciones de Green recuperadas en los arreglos 5, 9, 17 y 21, respectivamente, graficadas con la distancia correspondiente para cada par de estaciones. En el Anexo II se pueden encontrar todas las funciones de Green recuperadas para todos los pares de estaciones en todos los arreglos.

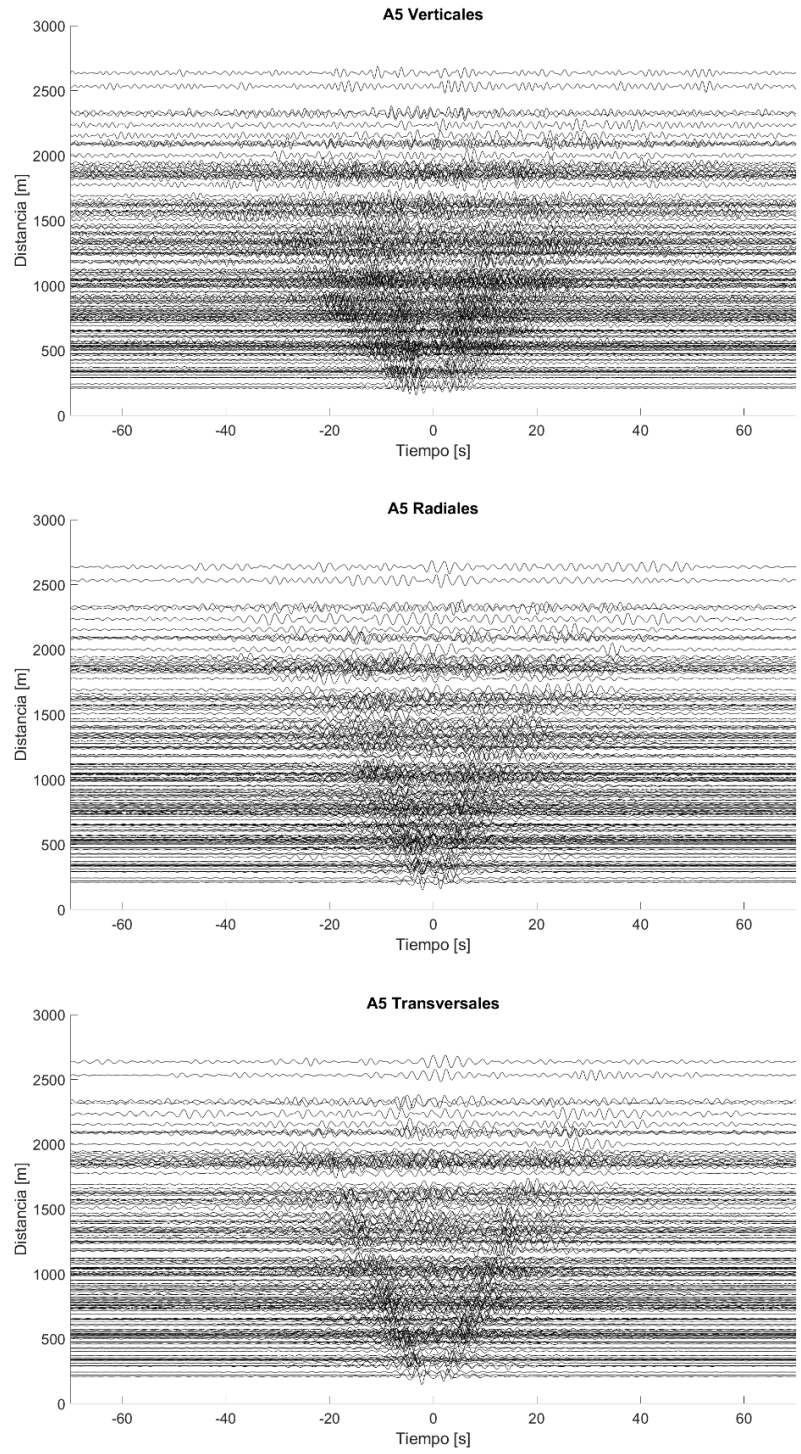


Figura 26. Funciones de Green estimadas en el arreglo 5, filtradas de 0.4 a 0.8 Hz.

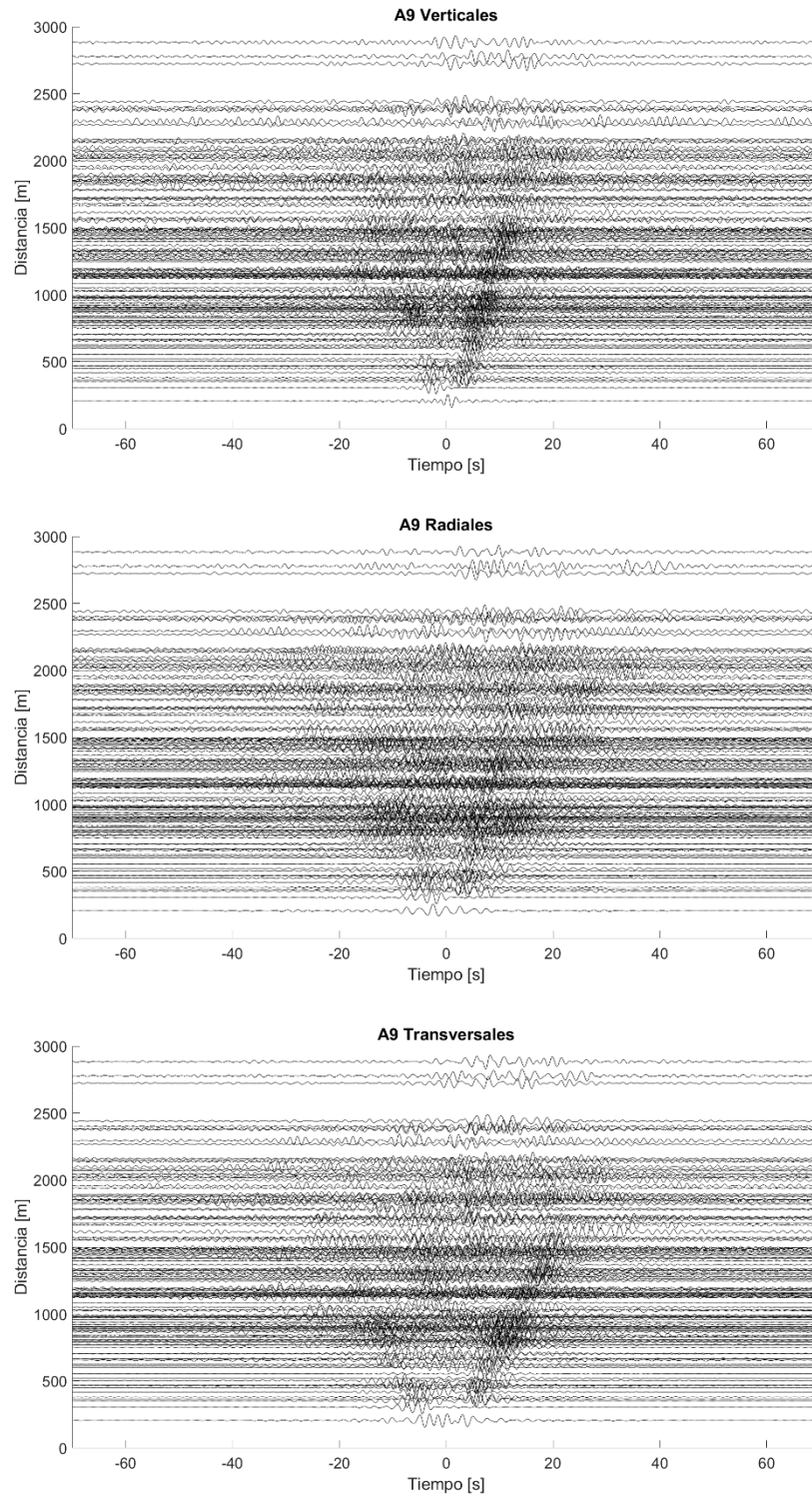


Figura 27. Funciones de Green estimadas en el arreglo 9, filtradas de 0.4 a 0.8 Hz.

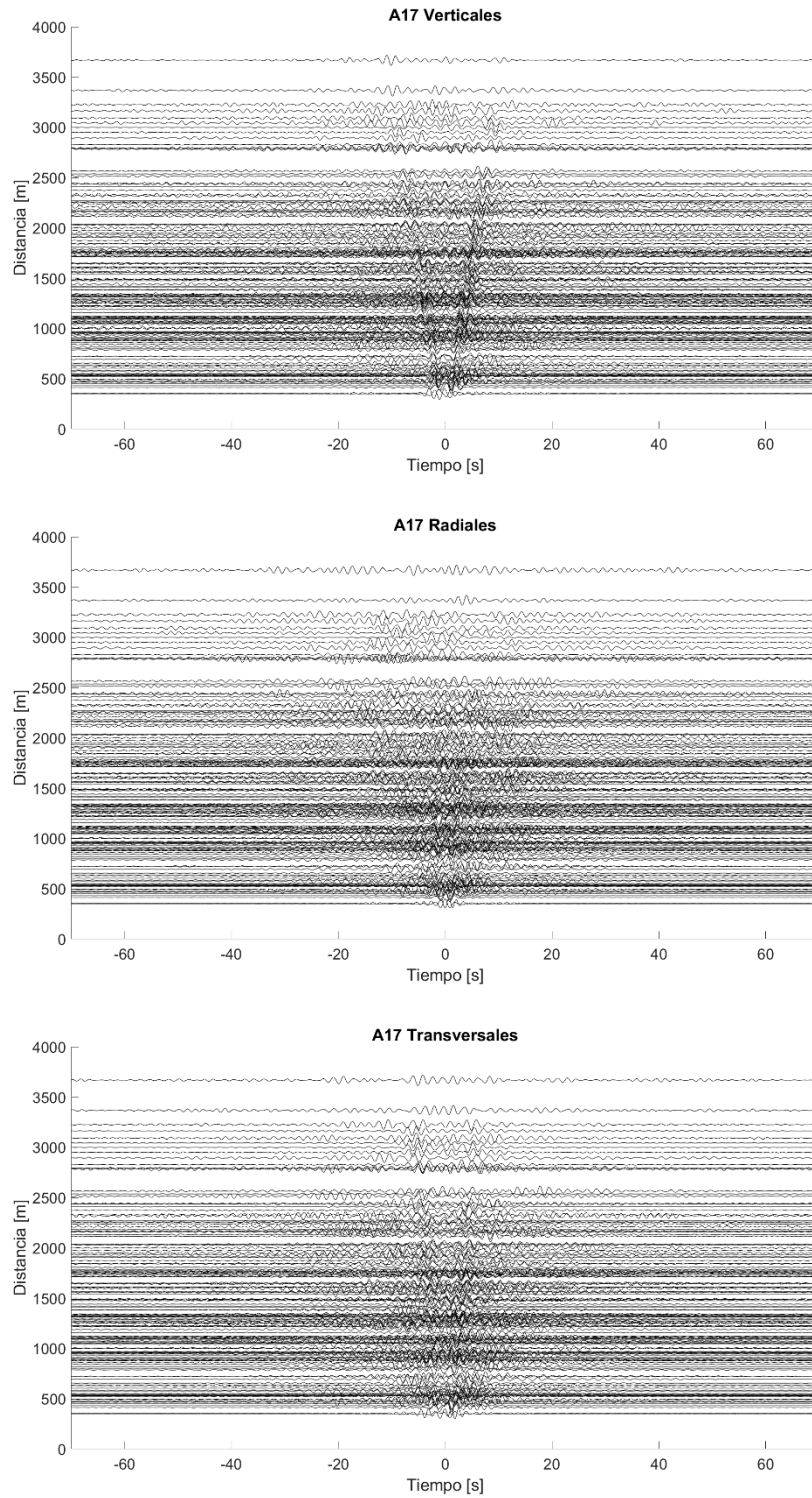


Figura 28. Funciones de Green estimadas en el arreglo A17, filtradas de 0.4 a 0.8 Hz.

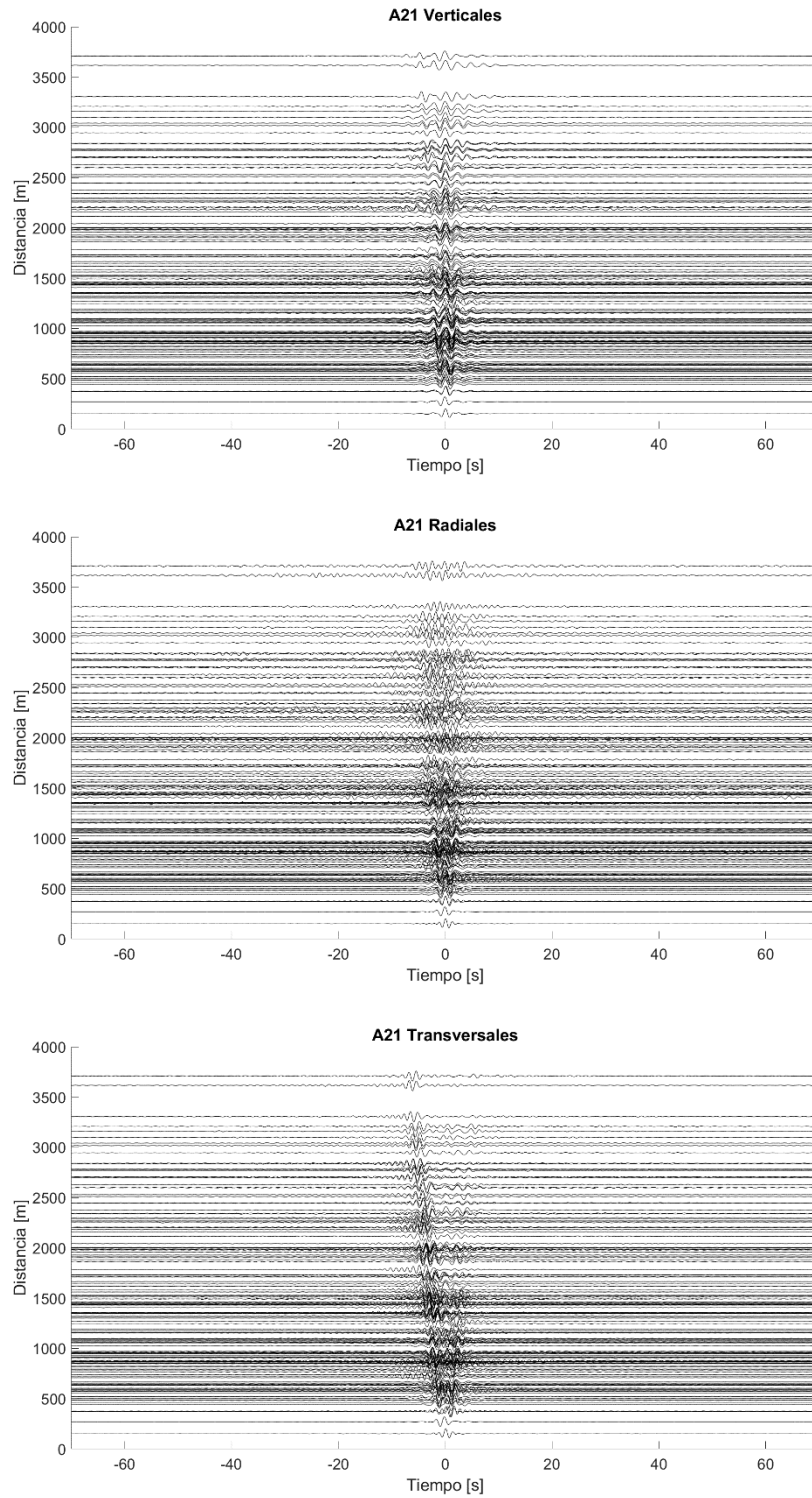


Figura 29. Funciones de Green estimadas en el arreglo A21, filtradas de 0.4 a 0.8 Hz.

4.5. Separación de arribos espurios de la función de Green

Como se observa en el Anexo II, existen algunos arreglos (1, 2, 3, 6, 11, 14 y 15) donde no se distingue un pulso claro que muestre la propagación de un tren de ondas, en ninguno de los componentes. Las matrices de coeficientes de correlación de densidad espectral calculadas hicieron evidente que el campo de ondas registrado no es totalmente difuso en algunas estaciones. Es decir, que posiblemente existen eventos transitorios contenidos en el ruido sísmico produciendo arribos espurios en las funciones de Green recuperadas e impidiendo observar un pulso claro. Liu *et al.* (2019) introdujeron un método de separación de señal ciega para separar la componente espurio del campo de ondas no difuso a las contribuciones de ondas Rayleigh. En la separación de señal ciega, las señales de múltiples fuentes arriban simultáneamente a un arreglo de receptores, de manera que cada receptor registra una mezcla de las señales fuente. Los conjuntos de las señales registradas son procesados para identificar las señales de la fuente o el sistema de mezcla. El término “ciego” se refiere al hecho de que no se dispone de un conocimiento explícito de las señales fuente o del sistema de mezcla (Kumari, 2009).

Liu *et al.* (2019) utilizan el análisis de componentes independientes (ICA, por sus siglas en inglés) con las funciones de Green recuperadas en las componentes radial y vertical para separar las contribuciones espurias del pulso de ondas Rayleigh. El ICA es capaz de encontrar factores o componentes subyacentes a partir de datos estadísticos multivariados. Este método supone que el pulso de ondas Rayleigh y las contribuciones espurias son estadísticamente independientes y no Gaussianos. Sin embargo, su mezcla de acuerdo con el teorema del límite central puede ser Gaussiana. Este método primero blanquea los datos de entrada a vectores de datos no correlacionados aplicando la descomposición de valores singulares. Luego estima una matriz de descomposición de 2×2 (el inverso de la matriz de mezcla) y maximiza la no Gaussianidad de las componentes independientes separados. La no Gaussianidad se mide por la negentropía, que es una medida de la distancia a la normalidad.

En la separación de los componentes, es importante que la fuente espuria no difusa esté fuera de la zona de fase estacionaria y genere una respuesta independiente. Las fuentes dentro de la zona de fase estacionaria interfieren constructivamente y una fuente no difusa dentro de esa zona es inseparable de las fases producidas por la interferencia constructiva de las fuentes de ruido difuso. Siguiendo a Liu *et al.* (2019) se aplicó el análisis de componentes independientes a las funciones de

Green recuperadas en los planos radial y vertical. Se utilizó la función *fastICA* (More, 2020) escrita en MATLAB® y el algoritmo de FastICA incluido en la librería scikit-learn (Buitinck *et al.*, 2013) de Python obteniendo resultados similares en las primeras pruebas. Por practicidad y automatización, se utilizó solo la función *fastICA* en todos los arreglos. Para la implementación del análisis se utilizaron las funciones de Green sin normalizar y en el rango completo de frecuencias (0.1 a 1.5 Hz) según el filtro pasa bandas de la Figura 13.

El orden de los resultados del análisis ICA es aleatorio, es decir, en ocasiones la componente difusa es el primer resultado y en otras el segundo. Por este motivo no fue posible observar las funciones de Green según su distancia como en la Figura 29. Sin embargo, al analizar las funciones de Green individualmente, en algunas se apreciaron pulsos más definidos en las soluciones del análisis ICA. En las Figuras 30-33 se muestran cuatro ejemplos con los resultados del análisis ICA. Estos resultados fueron utilizados para calcular los tiempos de viaje en varios arreglos.

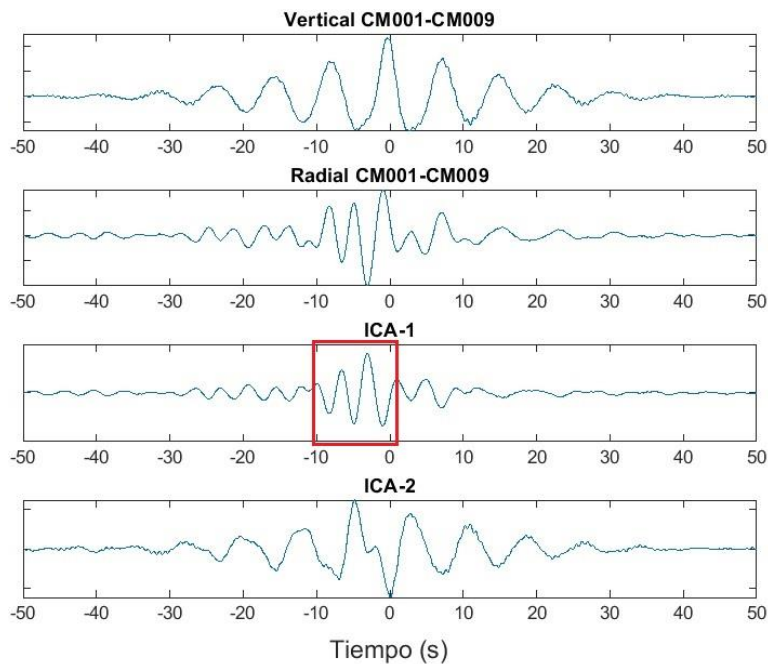


Figura 30. Análisis de componentes independientes (ICA) de las funciones de Green recuperadas en el plano radial y vertical para el par CM001-CM009. En el recuadro rojo se muestra el pulso de ondas Rayleigh esperado. En esta imagen las señales fueron filtradas en un rango de 0.2 a 1 Hz.

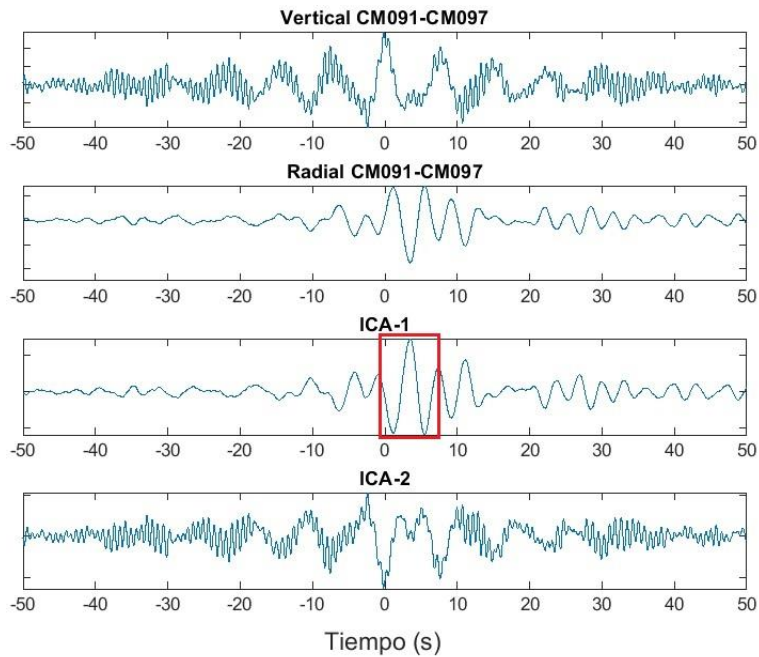


Figura 31. Análisis de componentes independientes (ICA) de las funciones de Green recuperadas en el plano radial y vertical para el par CM091-CM097. En el recuadro rojo se muestra el pulso de ondas Rayleigh esperado. En esta imagen las señales fueron filtradas en un rango de 0.2 a 1 Hz.

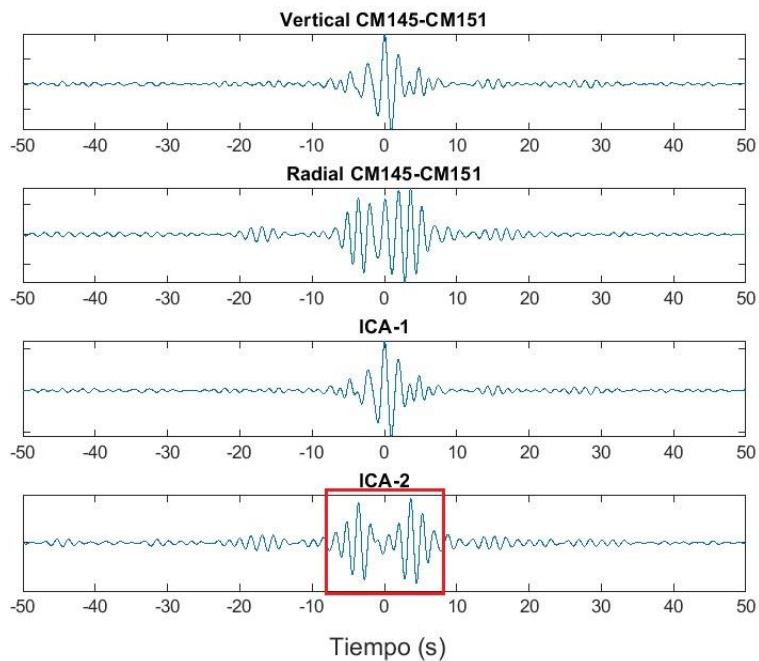


Figura 32. Análisis de componentes independientes (ICA) de las funciones de Green recuperadas en el plano radial y vertical para el par CM091-CM097. En el recuadro rojo se muestra el pulso de ondas Rayleigh esperado. En esta imagen las señales fueron filtradas en un rango de 0.4 a 0.8 Hz.

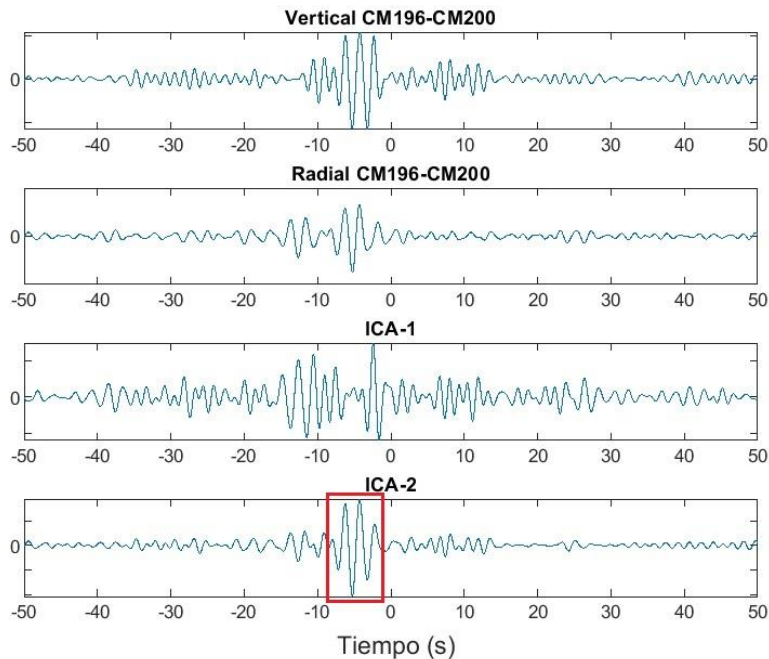


Figura 33. Análisis de componentes independientes (ICA) de las funciones de Green recuperadas en el plano radial y vertical para el par CM196-CM200. En el recuadro rojo se muestra el pulso de ondas Rayleigh esperado. En esta imagen las señales fueron filtradas en un rango de 0.4 a 0.8 Hz.

control

4.6 Cálculo de los tiempos de viaje

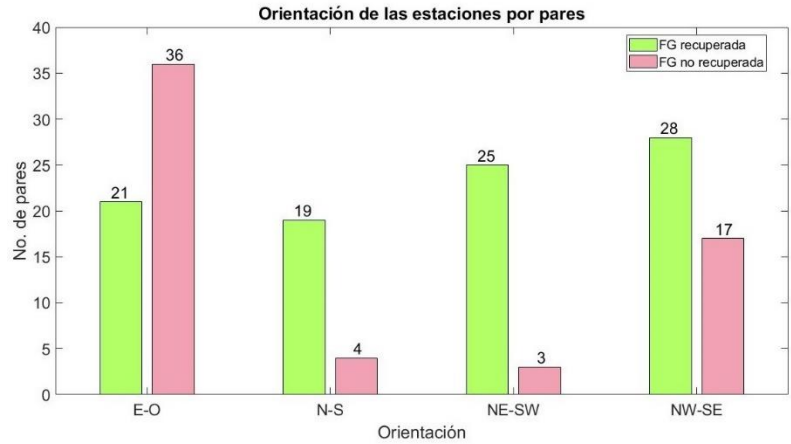
Para calcular los tiempos de viaje de los trenes de onda que viajan entre dos estaciones se aplicó un filtrado múltiple a las funciones de Green recuperadas. Este procedimiento consiste en la aplicación de filtros de banda estrecha en una frecuencia central. En este trabajo los valores de la frecuencia central variaron de 0.2 a 1.5 Hz con un avance logarítmico, el ancho del filtro fue de 0.1 Hz. Posteriormente, se implementó un análisis FTAN siguiendo a Granados *et al.* (2019). En este análisis se obtiene la envolvente, a partir de la transformada Hilbert, de las funciones de Green filtradas. En un caso ideal, el tiempo de viaje en una frecuencia dada es el tiempo de retraso de la máxima amplitud de la envolvente.

Similar a la forma en la que se construyen los espectrogramas, se crearon imágenes de dispersión a partir de una matriz donde cada columna representa la envolvente obtenida en una frecuencia central. De esta manera la amplitud de las envolventes permite estimar una curva de dispersión de velocidad de grupo que representa la propagación de ondas entre dos puntos. La velocidad en las

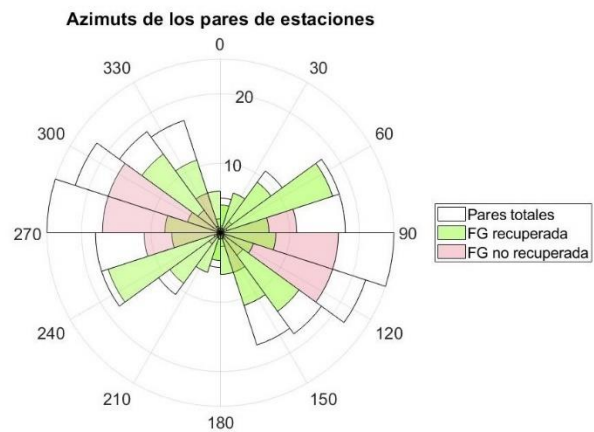
imágenes de dispersión es estimada a partir de los tiempos de retraso posibles, que dependen de la longitud de ventana utilizada en la correlación cruzada. Estas curvas pueden ser picadas de forma manual o automática para estimar los tiempos de viaje ($tiempo = distancia/velocidad$) en un rango de frecuencias específico. Aunque el análisis de componentes independientes permitió mejorar las funciones de Green recuperadas en algunos pares, en otros aún eran visibles arribos que no correspondían al pulso de ondas esperado e incluso estos arribos tenían ganancias de amplitud en algunas frecuencias centrales. Por este motivo, en este trabajo se realizó un picado manual de las curvas de dispersión.

Según las imágenes del Anexo II, para calcular los tiempos de viaje en cada arreglo se eligió la componente donde el pulso de ondas emergía de manera más clara. En aquellos arreglos donde no era visible un pulso emergente de manera clara y congruente en ningún componente fueron analizados los tres componentes (vertical, radial y transversal), además de los resultados obtenidos del análisis de componentes independientes.

En el arreglo 1 se utilizó la componente radial de la función de Green, de 153 pares de estaciones se observó un pulso coherente en 93. Los tiempos de viaje fueron estimados en un rango de frecuencias entre 0.31 y 0.9 Hz. Se observó una relación entre la orientación de los pares de estaciones y la recuperabilidad de la función de Green. Más del 90% de los pares de estaciones donde no se recuperó la función de Green tenían una orientación Este-Oeste con azimuts en un rango de $90 \pm 22.5^\circ$ o $180^\circ \pm 22.5^\circ$ y NW-SE con azimuts en un rango de $135^\circ \pm 22.5$ o $315^\circ \pm 22.5$, como se muestra en la Figura 34a. En la Figura 34b se presenta un histograma polar simétrico de los azimuts de todos los pares de estaciones que se forman en el arreglo, de los pares donde se recuperó la función de Green y de aquellos donde no se recuperó. Es evidente que los azimuts donde no se obtuvieron buenos resultados coinciden con el rango de azimuts de mayor cantidad en el arreglo. Sin embargo, es importante tomar en cuenta la proporción entre las funciones de Green recuperadas y las no recuperadas en el rango dominante, las funciones no recuperadas representan casi el doble de las recuperadas. Con respecto a la distancia entre los pares de estaciones no se encontró una relación directa, pero en los pares más distantes entre sí (> 3400 m) no se recuperó la función de Green. Las velocidades observadas en este arreglo varían de 50 a 900 m/s. En la Figura 35 se muestra el picado de una curva de dispersión obtenida a partir del filtrado múltiple de la función de Green recuperada en la componente radial entre un par de estaciones del arreglo A1, el filtrado múltiple se muestra en la Figura 36.



a)



b)

Figura 34. a) Gráfico de barras donde se observa la proporción entre las funciones de Green recuperadas y no recuperadas respecto a la orientación de los pares de estaciones. En la orientación E-O la proporción de las funciones de Green no recuperadas es casi del doble respecto a las recuperadas. b) Representación polar de los azimuts de los pares de estaciones en el arreglo A1. Se observa que en los rangos de azimuts (entre 70° y 130° aproximadamente) donde existe una mayor cantidad de pares, hay una proporción significativamente mayor de funciones de Green no recuperadas respecto de las recuperadas.

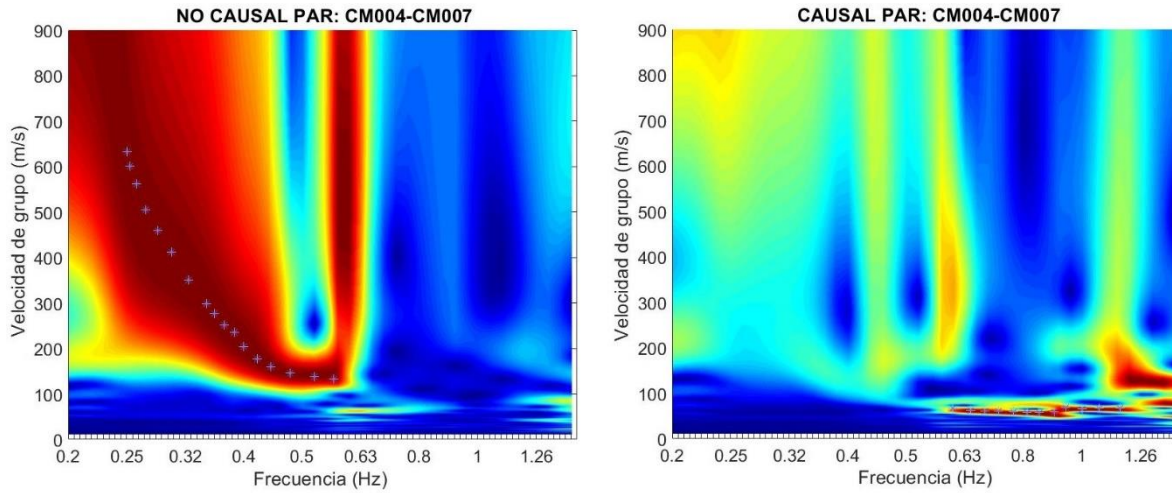


Figura 35. Curvas de dispersión que muestran la propagación de ondas entre las estaciones CM004 y CM007, obtenidas del filtrado múltiple y del análisis FTAN de la función de Green recuperada en la componente radial.

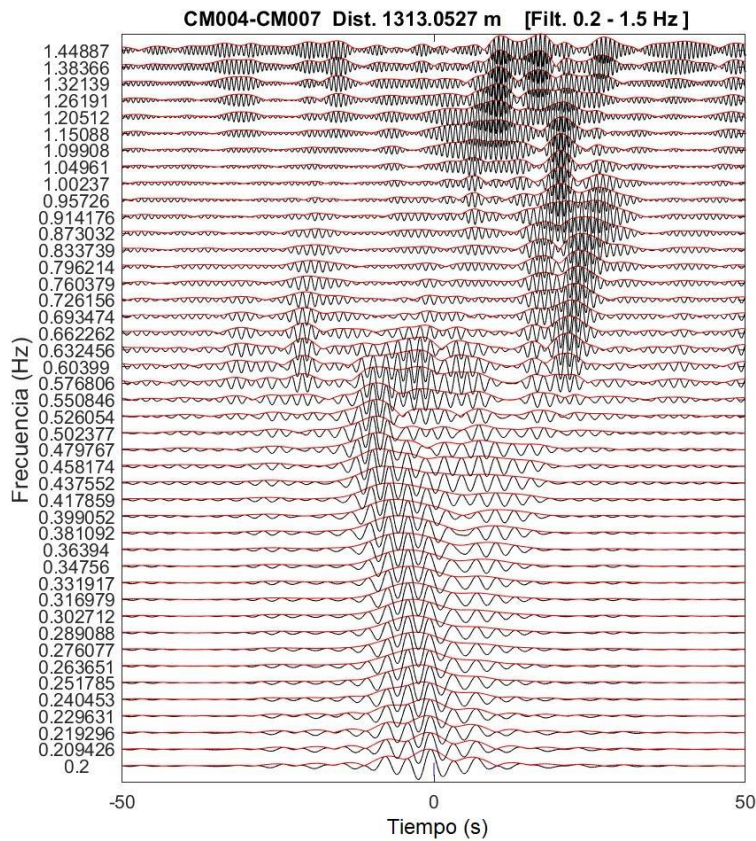


Figura 36. Filtrado múltiple de la función de Green recuperada en la componente radial entre las estaciones CM004 y CM007

En el Anexo III se encuentra el cálculo detallado de los tiempos de viaje para los arreglos A2, A3, ... A22. Como se observa en la Tabla 3 en los arreglos A2 y A3, la función de Green fue recuperada en muy pocos pares de estaciones. Descartando estos arreglos, en 10 arreglos se observaron pulsos de ondas Rayleigh, utilizando las componentes radiales, verticales o los resultados del análisis de componentes independientes. Estos arreglos abarcaban principalmente zonas de lago. Dentro de este grupo se formaron 1327 pares de estaciones, y se obtuvo un pulso coherente en 850, el 64%. En 10 arreglos se observaron pulsos de ondas Love, estos arreglos se encontraban principalmente en zonas de loma y transición. En este caso se formaron 1569 pares de estaciones, y en 941 se obtuvo un pulso de ondas Love en rangos amplios de frecuencias, representando el 60%. Considerando todos los arreglos, de 3202 pares de estaciones se recuperó la función de Green en 1824, que representan el 57%. En la Tabla 3 se resumen algunas características de la estimación de los tiempos de viaje.

Tabla 3. Resumen del cálculo de los tiempos de viaje

| Arreglo | Componente | Tipo de onda observada | Número de pares donde se recuperó la Función de Green | Número de pares donde no se recuperó la Función de Green | Porcentaje de recuperación [%] | Rango de frecuencias [Hz] | Observaciones |
|---------|-------------|------------------------|---|--|--------------------------------|---------------------------|---|
| A1 | Radial | Rayleigh | 93 | 60 | 60.78 | 0.37 - 0.92 | Se observó relación entre la recuperabilidad de la función de Green y la orientación de los pares de estaciones |
| A2 | ICA | Rayleigh | 14 | 139 | 9.15 | NA | Se logró recuperar la función de Green en pocos pares |
| A3 | ICA | Rayleigh | 19 | 134 | 12.42 | NA | Se logró recuperar la función de Green en pocos pares |
| A4 | Vertical | Rayleigh | 113 | 40 | 73.86 | 0.35 - 0.95 | Se observó relación entre la recuperabilidad de la función de Green y la distancia entre estaciones |
| A5 | Transversal | Love | 129 | 24 | 84.31 | 0.4 - 1.3 | - |
| A6 | ICA | Rayleigh | 78 | 27 | 74.29 | 0.38 - 1.2 | Se observó relación entre la recuperabilidad de la función de Green y la distancia entre estaciones |
| A7 | Vertical | Rayleigh | 14 | 1 | 93.33 | 0.32 - 1.4 | - |
| A8 | ICA | Rayleigh | 95 | 41 | 69.85 | 0.35 - 0.9 | Se observó relación entre la recuperabilidad de la función de Green y la distancia entre estaciones |
| A9 | Transversal | Love | 94 | 42 | 69.12 | 0.4 - 1.3 | Se observó relación entre la recuperabilidad de la función de Green y la distancia entre estaciones |
| A10 | Transversal | Love | 104 | 49 | 67.97 | 0.45 - 1.3 | - |
| A11 | ICA | Rayleigh | 90 | 63 | 58.82 | 0.45 - 1.1 | Se identificaron problemas de sincronización en algunas estaciones |

| | | | | | | | |
|------------|-------------|----------|-----|----|-------|-------------|--|
| A12 | Transversal | Love | 103 | 50 | 67.32 | 0.51 - 1.3 | Se identificaron problemas de sincronización en algunas estaciones |
| A13 | Vertical | Rayleigh | 86 | 67 | 56.21 | 0.39 – 1 | Se identificaron problemas de sincronización en algunas estaciones |
| A14 | ICA | Rayleigh | 102 | 51 | 66.67 | 0.45 - 1.1 | - |
| A15 | Transversal | Love | 81 | 72 | 52.94 | 0.37 - 1.3 | - |
| A16 | Transversal | Love | 55 | 98 | 35.95 | 0.45 - 1.3 | Se observó un índice de recuperación de la función de Green muy bajo y frecuencias vecinas correlacionadas en la mayoría de las estaciones |
| A17 | Vertical | Rayleigh | 81 | 72 | 52.94 | 0.5 – 1-1 | Se observaron frecuencias vecinas correlacionadas en la mayoría de las estaciones |
| A18 | Vertical | Rayleigh | 98 | 55 | 64.05 | 0.4 – 1.1 | - |
| A19 | Transversal | Love | 74 | 79 | 48.37 | 0.7 - 1.4 | Se observó relación entre la recuperabilidad de la función de Green y la distancia entre estaciones |
| A20 | Transversal | Love | 86 | 67 | 56.21 | 0.59 - 1.4 | Se observó relación entre la recuperabilidad de la función de Green y la distancia entre estaciones |
| A21 | Transversal | Love | 87 | 66 | 56.86 | 0.58 - 1.44 | - |
| A22 | Transversal | Love | 137 | 73 | 65.24 | 0.55 - 1.46 | - |

Capítulo 5. Tomografía

5.1 Tomografía de tiempos de viaje

A partir de un esquema de inversión de los tiempos de viaje calculados en la sección 4.6 se obtuvieron imágenes tomográficas 2D que mostraron la distribución lateral de velocidades de grupo en cada arreglo. La tomografía de tiempos de viaje es una técnica que tiene como objetivo estimar la distribución de las velocidades de ondas sísmicas en la Tierra a partir de sus tiempos de viaje. El tiempo de viaje de un rayo en un medio de velocidad continua $v(x)$ es (Rawlinson y Sambridge, 2003):

$$t = \int_{L(v)} \frac{1}{v(x)} dl, \quad (18)$$

donde L es la trayectoria del rayo, $v(x)$ es la velocidad del medio y dl es un elemento lineal a lo largo de la ruta del rayo. El término $\frac{1}{v(x)}$ es conocido como lentitud $s(x)$.

En la ecuación (18) la trayectoria del rayo (L) depende de la velocidad del medio, de manera que perturbaciones en la velocidad causarían flexiones en la trayectoria del rayo. Nolet (1985), linealizó el problema especificando un modelo inicial $v_0(x)$ y dedujo que las variaciones de $v(x)$ al modelo inicial están relacionadas a las diferencias entre los tiempos de viaje observados y predichos por $v_0(x)$ de cada rayo. Además, tomando en cuenta el principio de Fermat concluyó que la integral (18) no es sensible a perturbaciones pequeñas de velocidad. En otras palabras, es posible asumir trayectorias rectas de los rayos si en el medio no existen variaciones fuertes de velocidad. Dada la escala y las distancias entre estaciones de los datos utilizados en este trabajo se asumieron trayectorias rectas de los frentes de onda.

Para resolver la ecuación (18), Nolet (1985) discretiza el medio en celdas no traslapadas y obtiene un sistema disperso de ecuaciones lineales:

$$t = Ls, \quad (19)$$

donde s es la lentitud del medio, t son los tiempos de viaje observados y L es una matriz dispersa de $M \times N$, M rayos que cruzan el medio dividido en N celdas. L representa la trayectoria del rayo en cada celda por la que pasa.

El problema inverso fue resuelto utilizando el algoritmo de mínimos cuadrados LSQR, que es un método iterativo para sistemas lineales dispersos (Piage y Saunders, 1982). Nolet (1985) menciona que en la tomografía de tiempos de viaje la resolución proporcionada por el sistema de rayos que cruzan el medio puede diferir significativamente en diferentes zonas y, que junto con los errores en los datos ocasionan que el sistema algebraico esté casi siempre mal condicionado. Tomando en cuenta lo anterior se consideró un término de regularización en el algoritmo LSQR, la función a minimizar fue:

$$\varepsilon = \left\| \begin{matrix} t & -Ls \\ 0 & \lambda I \end{matrix} \right\|^2, \quad (20)$$

donde I es una matriz identidad y λ representa el factor de regularización o amortiguamiento. Para elegir el valor adecuado de λ se obtuvieron curvas de *trade-off* (o curvas L) para cada frecuencia en donde se calcularon los tiempos de viaje y, se observó el comportamiento de la desviación estándar del modelo y la norma L_2 en diferentes valores de λ . El valor elegido fue aquel en donde se obtuvo la menor desviación estándar de los parámetros del modelo y el menor error. En general, se observaron comportamiento muy parecidos de las curvas de *trade-off* calculadas en las distintas frecuencias del mismo arreglo. La desviación estándar del modelo fue estimada a partir de la raíz cuadrada de la varianza del modelo, que es la diagonal de la matriz de covarianzas calculada de la siguiente manera (Menke, 2012):

$$[cov\ m] = \sigma_t^2 [L^T L + \lambda I]^{-1}, \quad (21)$$

donde σ_d^2 es la varianza de los datos:

$$\sigma_t^2 \approx \frac{1}{N - M} \sum_{i=1}^N e_i^2, \quad (22)$$

y e es el error: $e = (t_{pre} - t_{obs})$. Donde t_{pre} son los tiempos de viaje predichos por el modelo y t_{obs} son los tiempos de viaje observados.

5.2 Prueba de resolución

La elección adecuada del tamaño de las celdas en que se discretiza el medio es fundamental para obtener resultados confiables. Existen diferentes pruebas de resolución que ayudan a determinar este parámetro, en este trabajo se implementó la prueba del tablero de ajedrez, similar a Lévêque *et al.* (1993), la prueba consiste en proponer un modelo inicial de dos velocidades de propagación diferentes en un medio discretizado con un tamaño de celda regular específico, de manera que estas dos velocidades se distribuyen alternadamente simulando un tablero de ajedrez. Después de definir el modelo inicial se calcula el problema directo con la ecuación (19), el objetivo es invertir los tiempos de viaje obtenidos en el problema directo y recuperar el modelo inicial. Si el modelo inicial es recuperado satisfactoriamente el tamaño de las celdas es adecuado. Para tener más certidumbre en los resultados y simular los errores de los tiempos observados, se añadió ruido aleatorio de distribución uniforme en un $\pm 10\%$ a los tiempos de viaje obtenidos en el problema directo. Aunque es posible discretizar el medio en celdas rectangulares en este trabajo se usaron celdas cuadradas en todos los arreglos. El modelo inicial propuesto fue el mismo en todos los arreglos, con celdas de 250 y 500 m/s. El criterio que se tomó para elegir el tamaño de las celdas adecuado fue que la norma L_2 sea menor o cercana a 1 para tres diferentes semillas de números aleatorios. Es importante mencionar que sólo fueron consideradas las trayectorias donde se recuperó la función de Green, en todos los arreglos. El algoritmo LSQR se implementó con la función *lsqr* (David, 2020) escrita en MATLAB®.

5.3 Extracción de curvas de dispersión de velocidad de grupo

Después de estimar las tomografías de tiempos de viaje, se extrajo la velocidad de cada celda y en cada frecuencia con el objetivo de construir curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas de Rayleigh o Love atribuidas a un lugar específico. Este procedimiento es muy importante porque permite realizar la inversión de las curvas y calcular la estructura unidimensional de velocidades de onda de corte en un sitio determinado dentro del arreglo.

5.4 Procedimiento por arreglo

En el arreglo A1 con la prueba del tablero de ajedrez se determinó adecuado un tamaño de celdas de 600 m por lado, el Figura 37 se muestra el modelo inicial y el modelo recuperado en la prueba.

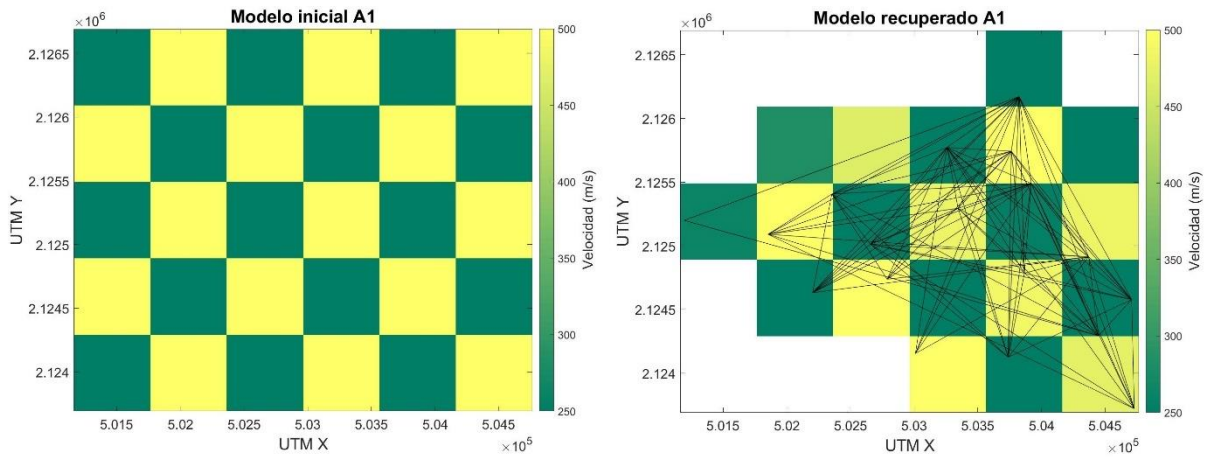


Figura 37. Izquierda, modelo inicial en la prueba del tablero de ajedrez. Derecha, modelo recuperado en la prueba. Las líneas negras representan las trayectorias de los rayos donde se recuperó la función de Green. La norma L_2 del modelo recuperado fue 0.6250.

En la Figura 38 se muestra la curva de *trade-off* calculada para la inversión de los tiempos de viaje en 0.37 Hz del arreglo A1. Se eligió un valor de amortiguamiento (λ) de 0.26. El comportamiento de la curva y el valor de amortiguamiento fue estable para las diferentes frecuencias donde se estimaron los tiempos de viaje en este arreglo. Así, fue calculado el factor de amortiguamiento (λ) en todos los arreglos.

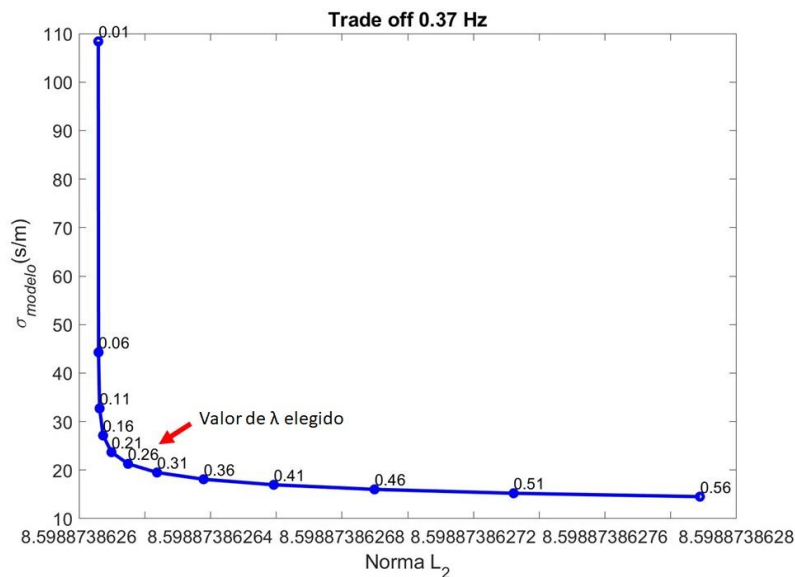


Figura 38. Curva de *trade-off* que muestra el comportamiento de la desviación estándar de los parámetros del modelo y la norma L_2 a diferentes valores de amortiguamiento (λ). Como se observa en la Figura el valor más conveniente es 0.26.

Como se muestra en la Figura 39 el arreglo fue desplegado entre las zonas de lago, transición y loma. Particularmente las estaciones CM001, CM013, CM016, CM017 y CM018, se encuentran sobre la zona de loma, en los resultados en bajas frecuencias (0.37, 0.42, 0.47) se observaron velocidades más altas en las celdas cercanas a estas estaciones. A continuación, en la Figura 40 se muestran algunas imágenes obtenidas de la inversión de los tiempos de viaje calculados en el arreglo A1. En la Figura 41 se muestran las curvas de dispersión extraídas y las celdas.

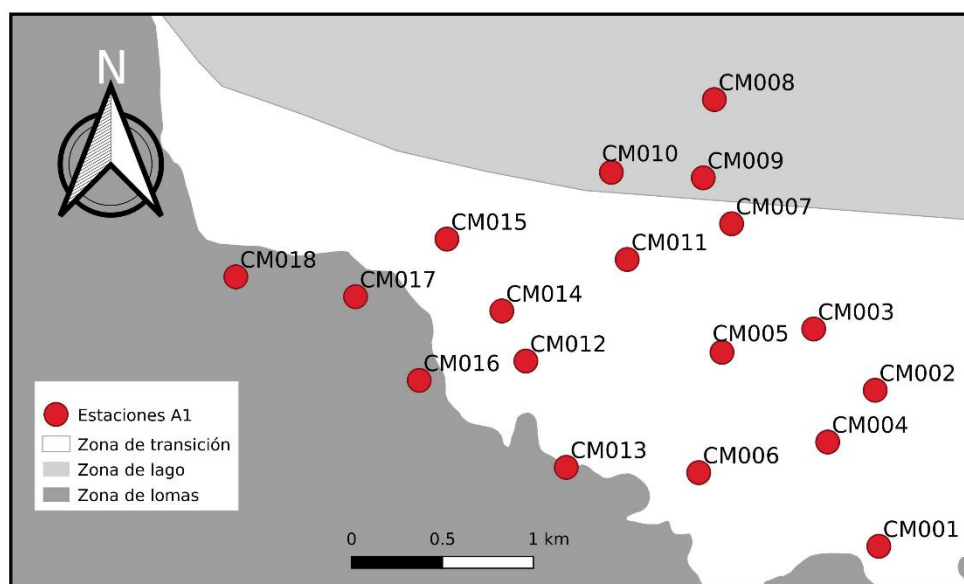


Figura 39. Distribución espacial de las estaciones que forman el arreglo A1. Las estaciones CM001, CM013, CM016, CM017, CM018 se encuentran en zona de loma, en estas zonas se estimaron velocidades ligeramente en la inversión tomográfica en bajas frecuencias.

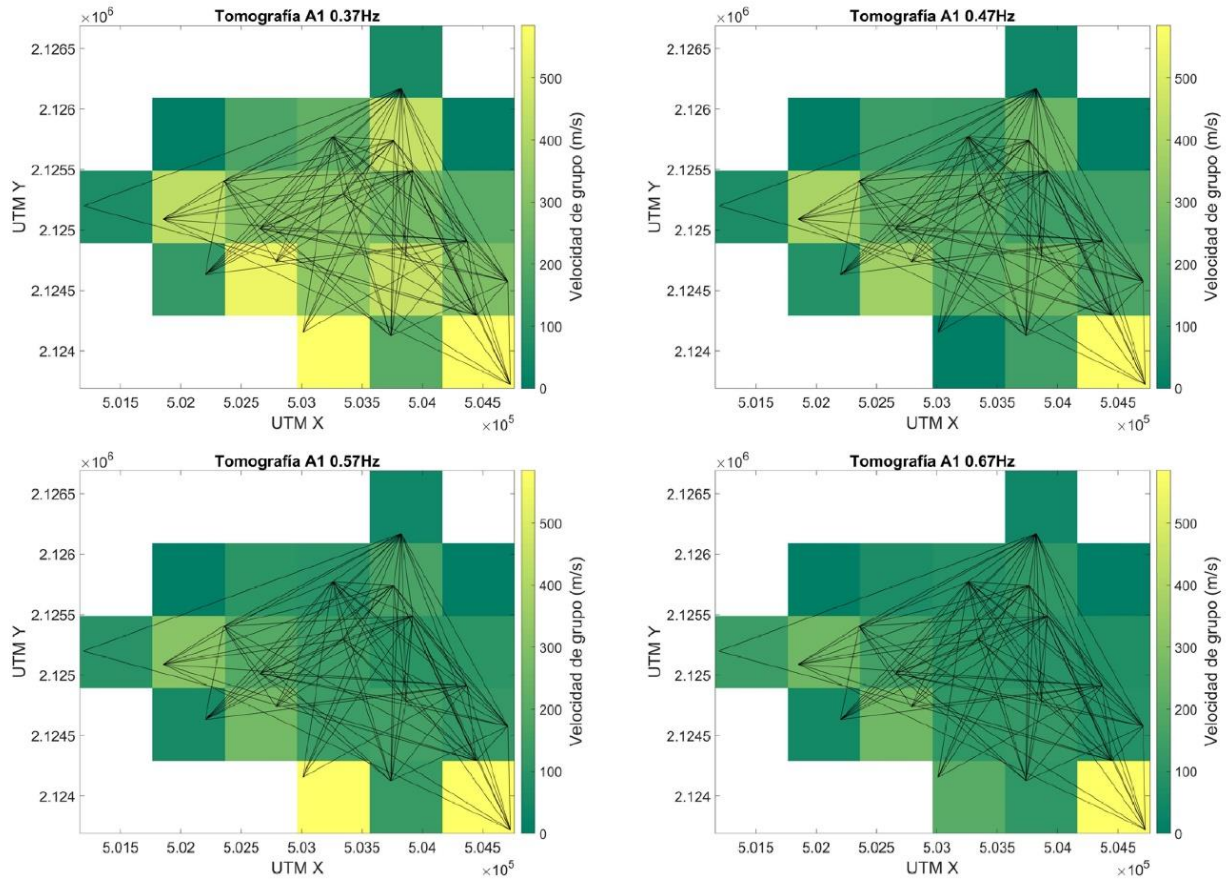


Figura 40. Tomografías obtenidas a partir de la inversión de los tiempos de viaje calculados en las frecuencias 0.37, 0.47, 0.57, 0.67 Hz del arreglo A1.

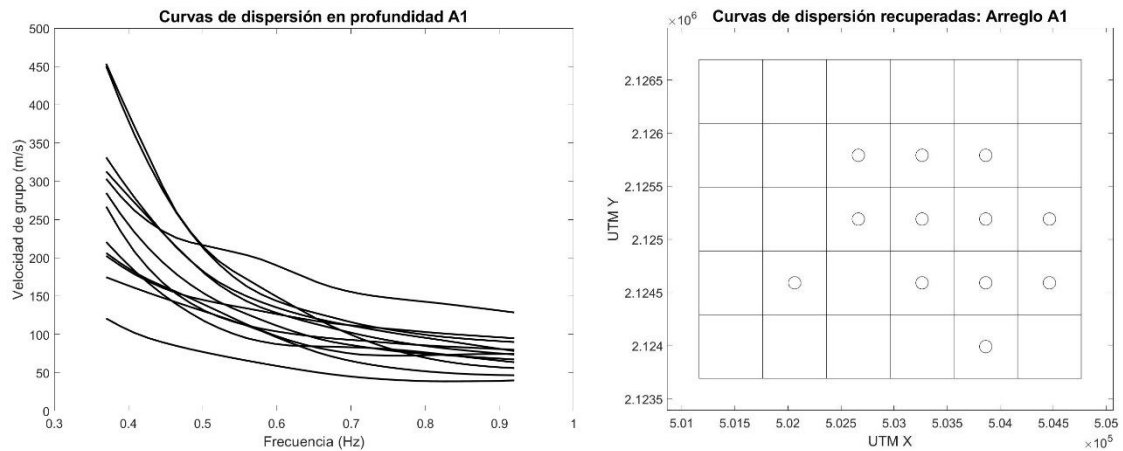


Figura 41. Izquierda. Curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh extraídas de las tomografías. Derecha. Con un círculo negro se señalan las celdas de donde fueron extraídas las curvas de dispersión.

En el Anexo IV se muestra el procedimiento para la estimación de las tomografías en los arreglos A2, A3, ..., A22. En resumen, en las tomografías se observó una relación entre la zonificación geotécnica de la CDMX y la distribución de las velocidades de grupo de ondas Rayleigh y Love estimadas en aquellos arreglos donde las estaciones compartían zonas geotécnicas o se ubicaban al límite. La elección del tamaño de las celdas fue muy importante, después de múltiples pruebas, se decidió agregar un $\pm 10\%$ de ruido aleatorio de distribución uniforme a los tiempos de viaje calculados con el modelo inicial, porque se observó que si el modelo era recuperado con este nivel de ruido las tomografías de tiempos de viaje tenían un comportamiento estable. Por lo tanto, se puede suponer que la incertidumbre de los tiempos de viaje calculados con estos datos y en este trabajo, se aproxima al $\pm 10\%$ de los valores estimados.

En la elección del tamaño de las celdas, también es importante tomar en cuenta:

- 1) El número de trayectorias donde se recuperó la función de Green, mientras menor cantidad de trayectorias mayor tenía que ser el tamaño de las celdas.
- 2) El dominio de alguna dirección en las trayectorias, en aquellos arreglos donde existía una dirección dominante se necesitaron celdas de mayor tamaño.
- 3) La forma de arreglo, los arreglos que presentaban formas rectangulares o alargadas en alguna dirección requirieron mayores tamaños de celdas.

Capítulo 6. Cocientes espectrales HVSR

Los cocientes espectrales HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) son un estimador confiable de la frecuencia característica de depósitos sedimentarios y proporcionan información de la estructura del subsuelo. En un modelo de una capa sobre un semi espacio la frecuencia característica f_0 se estima de la siguiente manera (Kramer, 1996):

$$f_0 = \frac{Vs}{4H'} \quad (23)$$

donde Vs es la velocidad de onda de corte de la capa y H es su espesor. La aplicación de la técnica HVSR consiste en calcular el cociente de los espectros en las componentes horizontales entre el vertical. Arai y Tokimatsu (2004) definen al cociente espectral HVSR como:

$$\frac{H(\omega)}{V(\omega)} = \sqrt{\frac{E_{NS}(\omega) + E_{EO}(\omega)}{E_z(\omega)}}, \quad (24)$$

donde E_{NS} , E_{EO} y E_V son los espectros de densidad de energía de las componentes norte-sur, este-oeste y vertical, respectivamente.

6.1 Cocientes espectrales y campos difusos

A partir de la suposición de que el campo de ondas que forman el ruido sísmico ambiental es un campo difuso, Sánchez-Sesma *et al.* (2011) proponen un modelo directo para calcular los cocientes espectrales HVSR. En los campos difusos la densidad de energía está relacionada con la parte imaginaria de la función de Green elastodinámica para fuente y receptor coincidente, de la siguiente manera:

$$E(x_A) = 2\pi\mu E_s K^{-1} \text{Im}[G_{mm}(X_A, X_A)], \quad (25)$$

Donde μ es la constante de rigidez de Lamé, $E_s = \rho\omega^2 S^2$ representa la densidad de energía de ondas de corte como una medida de la fuerza de difusión, S^2 es igual a la densidad espectral promedio de las ondas de corte, ρ es igual densidad, ω representa la frecuencia angular, K el

número de onda de corte, $G_{mm}(X_A, X_A)$ representa el desplazamiento en X_A en dirección m producido por una carga unitaria armónica actuando en X_A y en dirección m (fuente y receptor coincidente en este caso) y $E(X_A)$ es la densidad de energía direccional a lo largo de la dirección m . Esto permite escribir al cociente espectral HVSR en términos de la parte imaginaria de la función de Green o de la densidad de energía, de la siguiente manera:

$$\frac{H(\omega)}{V(\omega)} = \sqrt{\frac{\text{Im}[G_{xx}(X_A, X_A; \omega)] + \text{Im}[G_{yy}(X_A, X_A; \omega)]}{\text{Im}[G_{zz}(X_A, X_A; \omega)]}} = \sqrt{\frac{E_X(X_A) + E_Y(X_A)}{E_Z(X_A)}} \quad (26)$$

donde $G_{xx}(X_A, X_A; \omega)$, $G_{yy}(X_A, X_A; \omega)$ y $G_{zz}(X_A, X_A; \omega)$ representan a la función de Green para fuente y receptor coincidente en el dominio de las frecuencias para las componentes horizontales (x , y) y vertical (z), respectivamente.

6.2 Cálculo de los cocientes espectrales HVSR

Se calcularon los cocientes espectrales considerando los registros completos de cada estación de todos los arreglos presentados en este trabajo. Los registros fueron divididos en ventanas de 120 s con un traslape del 50%. Varios estudios muestran propiedades estadísticas diferentes para los estimadores, promedio de los cocientes (denotado como \hat{R}_n) y cociente de los promedios (denotado como \hat{R}_1). Rao (2002) estudió el sesgo de ambos estimadores y consideró a \hat{R}_n como un estimador inconsistente. Larivière y Gingras (2011) observaron diferencias significativas en los resultados obtenidos con ambos estimadores. Sin embargo, la diferencia entre ambos estimadores estaba fuertemente influenciada por la cantidad de datos disponibles y concluyeron que los resultados convergían para muestras grandes de datos. Formenti (2014) estudió las propiedades estadísticas de ambos estimadores y a partir de una simulación de Monte Carlo determinó que el estimador \hat{R}_1 tenía menor incertidumbre estadística. Con base en estos estudios, se decidió calcular los cocientes espectrales HVSR como un cociente de promedios; el promedio de la raíz cuadrada de los espectros de densidad de energía de las componentes horizontales de todas las ventanas entre el promedio de la raíz cuadrada de los espectros de densidad de energía en la componente vertical.

En el cálculo de los cocientes espectrales HVSR es importante evitar registros con eventos transitorios porque estos pueden ocasionar picos en otras frecuencias diferentes a la frecuencia característica (SESAME, 2004). Para evitar la influencia de fuentes monocromáticas y eventos

transitorios en la estimación de los cocientes espectrales HVSr fue utilizado el algoritmo de selección de ventanas mencionado en la sección 4.4.6 de este trabajo. La condición para que los segmentos de registro fueran utilizados fue que los parámetros estadísticos estuvieran dentro del rango mencionado en la Tabla 2 en los tres componentes. Cabe mencionar que cada ventana de tiempo fue multiplicada por una ventana de tiempo cosenoidal al 5% antes de calcular la transformada rápida de Fourier y que los espectros de cada ventana fueron suavizados siguiendo a Konno y Ohmachi (1998), con un valor b fijado en 40 utilizando la función escrita en MATLAB® *smoothSpectra* (Kallan, 2020).

En resumen, la metodología empleada para calcular los cocientes espectrales en cada estación fue la siguiente:

- Selección de los registros de tres componentes de cada estación.
- Ventaneo y selección de las ventanas de tiempo más estacionarias, mediante el algoritmo de selección de ventanas de la sección 4.4.6.
- Cálculo y suavizado de los espectros de potencia de cada ventana utilizando el método de Konno y Ohmachi con un valor b fijado en 40.
- Cálculo del promedio de la raíz cuadrada de la suma de los espectros de potencia en las componentes horizontales.
- Cálculo del promedio de la raíz cuadrada de la suma de los espectros de potencia en la componente vertical.
- Cálculo del cociente de los promedios y estimación de f_0 .

Algunos paquetes de software como Geopsy (SESAME, 2004) (Version 3.1.0, disponible en <http://www.geopsy.org/download.php>) calculan los cocientes espectrales como el promedio de cocientes. Con el objetivo de comparar los resultados fueron calculados los cocientes espectrales en algunas estaciones utilizando Geopsy, este software utiliza un algoritmo LTA/STA para seleccionar las ventanas más estacionarias, el resto de los parámetros fue el mismo. En general se observaron algunas diferencias en la amplitud de los HVSr, en la mayoría de las estaciones fue mínima. Respecto a las frecuencias características estimadas la variación también fue mínima, en las estaciones de prueba la diferencia fue de centésimos. En la Figura 42 se muestra el cociente espectral estimado en la estación CM008 perteneciente al arreglo A1, calculado como el cociente de los promedios y el promedio de los cocientes en Geopsy. En ambas curvas se utilizaron los mismos parámetros, a excepción del método para seleccionar ventanas estacionarias, para el

estimador (\hat{R}_1) se utilizó el algoritmo de selección de ventanas de la sección 4.6.6, mientras que Geopsy utiliza un algoritmo LTA/STA. Del registro total, para \hat{R}_1 se utilizaron 441 ventanas de tiempo mientras que para \hat{R}_n , 729.

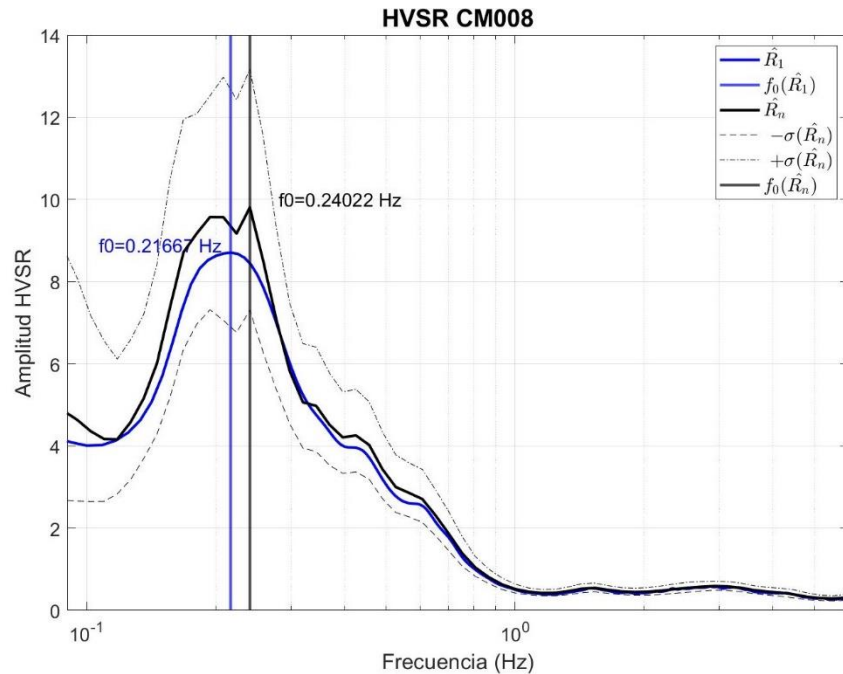


Figura 42. Cociente espectral HVSR calculado en la estación CM008 perteneciente al arreglo A1. La curva azul representa el cociente espectral calculado como el cociente de los promedios (\hat{R}_1), la línea vertical azul señala el pico de la curva azul, asociado a la frecuencia característica del sitio. La curva sólida en color negro representa el cociente espectral calculado en Geopsy como el promedio de los cocientes (\hat{R}_n), la línea vertical de color negro señala el pico de la curva negra, asociado a la frecuencia característica del sitio. Las líneas punteadas representan el rango formado por la desviación estándar para el estimador (\hat{R}_n).

En el Anexo VI, se incluye una tabla con la frecuencia característica obtenida en cada estación. También, a partir de las frecuencias características se obtuvieron mapas por arreglo para observar su distribución espacial. Se incluyeron los arreglos A2 y A3. En las Figuras 43 y 44 se muestran dos ejemplos de los mapas obtenidos, los mapas para todos los Arreglos se incluyen en el Anexo VII.

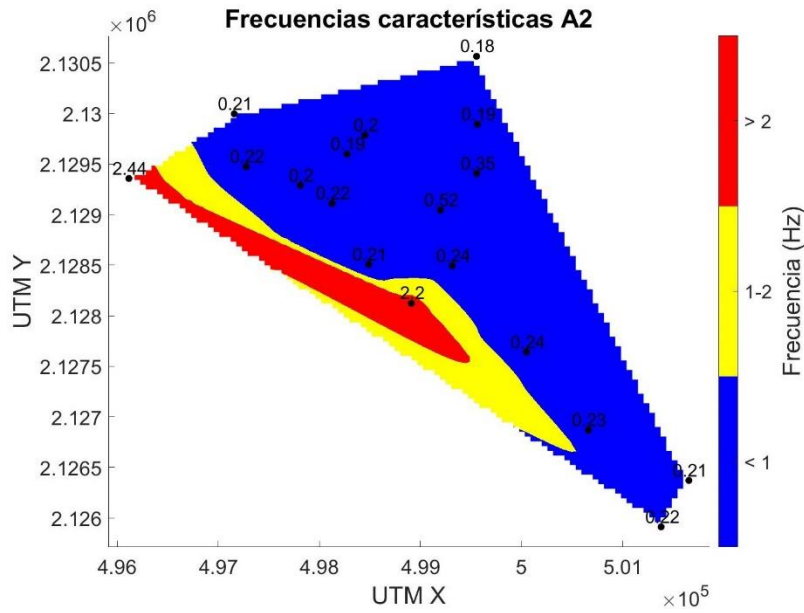


Figura 43. Distribución espacial de las frecuencias características estimadas con los cocientes espectrales HVSR en el arreglo A2. Se creó una superficie para mostrar la posible distribución de tres zonas mostradas en color rojo ($f_0 > 2$), amarillo ($1 < f_0 < 2$) y azul ($f_0 < 1$). Considerando las frecuencias y períodos que comúnmente delimitan las zonas de loma, transición y lago, respectivamente. Los puntos negros representan la ubicación de las estaciones y los números el valor de la frecuencia característica estimada.

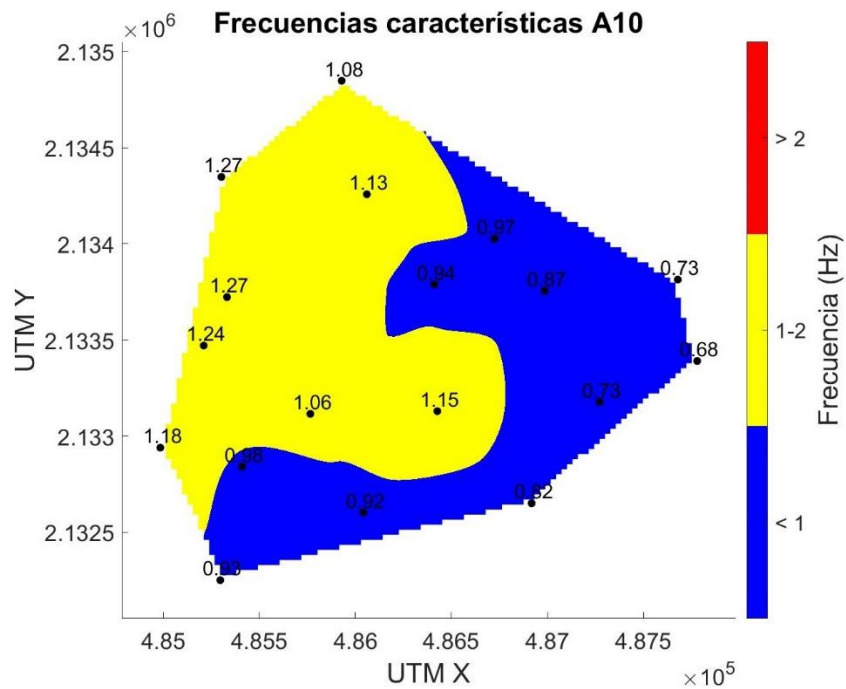


Figura 44. Distribución espacial de las frecuencias características estimadas con los cocientes espectrales HVSR en el arreglo A9. Se creó una superficie para mostrar la posible distribución de tres zonas, mostradas en color rojo ($f_0 > 2$), amarillo ($1 < f_0 < 2$) y azul ($f_0 < 1$) considerando las frecuencias y períodos que comúnmente delimitan las zonas de loma, transición y lago, respectivamente. Los puntos negros representan la ubicación de las estaciones y los números el valor de la frecuencia característica estimada.

Capítulo 7. Inversión a profundidad

De la información a priori con la que se cuenta, los datos más relevantes son las columnas litológicas de los pozos Tulyehualco-1, Copilco-1, San Lorenzo Tezonco y Agrícola Oriental, además de las velocidades de onda P y densidades reportadas por Pérez-Cruz (1986). El pozo Tulyehualco-1 es particularmente importante porque se encuentra en zona de lago cercano a los arreglos A6, A7 y A8. Mientras que el pozo Copilco 1 se encuentra a 2 km aproximadamente de la estación más cercana perteneciente al arreglo A21.

7.1 Inversión conjunta de cocientes espectrales HVSR y curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh o Love

La inversión conjunta de datos geofísicos se refiere al proceso iterativo que consiste en minimizar una función de costo compuesta de dos (o más) funciones de costo, donde cada una de estas funciones representa un tipo de datos diferente. Para aprovechar la información proporcionada por los cocientes espectrales y obtener modelos de velocidad congruentes con la frecuencia característica del sitio, en este trabajo se llevaron a cabo en lugares específicos, inversiones conjuntas entre las curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas de Rayleigh o Love estimadas en la tomografía de tiempos de viaje y las formas del cociente espectral HVSR.

El proceso de inversión conjunta se llevó a cabo en el software HV-Inv (García-Jerez *et al.*, 2016) (versión 2.1 disponible en: <https://w3.ual.es/GruposInv/hv-inv/#Download>), que considera al ruido sísmico ambiental como un campo difuso. En este software, el modelo directo de los cocientes espectrales HVSR se basa en el conjunto de expresiones de la parte imaginaria de la función de Green para el caso especial cuando la fuente y el receptor coinciden en la superficie de un medio estratificado, desarrolladas por García-Jerez *et al.* (2013). Mientras que el problema inverso es resuelto con métodos de optimización global (*Monte Carlo* y *Simulated Annealing*) y local (*Simplex Downhill* e *Interior Point*) según Piña-Flores *et al.* (2017), quien define la función de costo como:

$$\Gamma = \frac{2(1 - \xi)}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(HV_{obs}(\omega_i) - HV_{th}(\omega_i))^2}{\sigma_{HV}^2(\omega_i)} + \frac{2\xi}{m} \sum_{i=1}^m \frac{(CD_{obs}(\omega_i) - CD_{th}(\omega_i))^2}{\sigma_{CD}^2(\omega_i)}, \quad (27)$$

donde $\xi = n/(n + m)$, n representa el número de muestras en el HVSR, m es el número de muestras en la curva de dispersión, CD_{obs} corresponde a la curva de dispersión observada, CD_{th} es la curva de dispersión calculada y σ es la desviación estándar resultado de los modelos calculados.

La suposición de que el ruido sísmico ambiental forma un campo difuso implica algunas propiedades físicas como la equipartición de la energía. Existen dos maneras de explicar este concepto, a la primera se le conoce como equipartición clásica, está relacionada con la distribución de la energía de forma proporcional a los grados de libertad de un movimiento, así en un plano 3D con tres ejes ortogonales el movimiento en una dirección se llevará a cabo con 1/3 de la energía disponible (Sánchez-Sesma *et al.*, 2011). La otra forma involucra diferentes modos y tipos de onda, e implica que en un espacio tridimensional las ondas P y S, así como los diferentes modos de las ondas superficiales, tienen densidades de energía fijas.

El software HV-Inv contempla la segunda forma de ver la equipartición, como no se tiene una idea clara de las contribuciones de los diferentes tipos de onda y de los modos en los HVSR calculados se decidió utilizar, en todos casos, los parámetros por default del software respecto a la composición del ruido sísmico, es decir se consideró de inicio la contribución del modo fundamental y 4 modos superiores de ondas Love o Rayleigh, las proporciones son fijadas durante el proceso de inversión. Es importante señalar que lo anterior solamente aplica a la forma de interpretar los cocientes espectrales HVSR, en las curvas de dispersión obtenidas fue supuesto que se observó el modo fundamental. Además, no se observaron indicios claros de modos superiores en análisis FTAN.

7.2 Clustering de las frecuencias características.

La elección de los lugares donde se llevó a cabo la inversión conjunta de los cocientes espectrales y las curvas de dispersión se basó en la agrupación HVSR. Para esto, los HVSR cuyo pico máximo se encontraba en frecuencias menores a 2 Hz fueron agrupados en clústeres, de manera que todas las curvas contenidas en un clúster tuvieran características comunes entre sí, como la ubicación, frecuencia característica y amplitud del máximo pico. El objetivo fue hacer una inversión conjunta por cada clúster, utilizando la curva de dispersión y el cociente espectral HVSR más cercanos al centro del clúster o, una curva de dispersión estimada en una celda con suficiente cobertura de rayos que contenía una estación con un cociente espectral HVSR con un pico bien definido, en la parte central del clúster. El modelo resultante fue utilizado como modelo inicial para invertir las curvas de dispersión que se encontraban dentro de cada clúster.

El clustering se llevó a cabo utilizando el método de *Kmeans*. Este método es uno de lo más utilizados en algoritmos de machine learning no supervisados para particionar un conjunto de datos en k grupos o clústeres. Los datos u objetos dentro de cada clúster son lo más similar posible (*intra-class similarity*), mientras que los datos u objetos de diferente clúster son lo más disimilar posible (*inter-class similarity*). Cada clúster es representado por su centro o centroide que corresponde a la media de los puntos asignados. El algoritmo minimiza la variación dentro de cada clúster, Hartigan y Wong (1979) definen la variación dentro de cada clúster como la suma del cuadrado de las distancias euclídeas entre los elementos y el centroide:

$$W(C_k) = \sum_{x_i \in C_k} (x_i - \mu_k)^2, \quad (28)$$

donde x_i es un dato asignado al clúster C_k , y μ_k es el valor medio de los puntos asignados al clúster C_k . Para un conjunto de datos la variación total intra-cluster, representa la suma de las variaciones individuales de cada clúster (Kassambara, 2020). El algoritmo consiste en los siguientes pasos:

1. Especificar el número de clústeres en que seran agupados los datos.
2. Selección aleatoria de los centros.
3. Asignar cada observación a un clúster, según la distancia euclídea.
4. Para cada clúster actualizar el centroide, calculando una nueva media de todos los datos en el clúster.
5. Iterativamente minimizar la distancia dentro de cada clúster. Repetir los pasos 3, 4 y 5 hasta un número determinado de iteraciones o una tolerancia específica en el cambio de la distancia.

Para determinar el número adecuado de clústeres se utilizó el “método del codo” que es similar a las curvas de *trade-off* (sección 5.4), consiste en observar el cambio en la variación total *intra-clúster* al aumentar el número de clusters, la curva presenta un comportamiento suave y sin cambios bruscos a partir del número adecuado de clústeres. El análisis fue implementado utilizando las librerías base de R (R Core Team, 2020) y ggplot2 (Wickham, 2016). En la Figura 45 se ilustra el método del codo obtenido con los datos analizados, en esta gráfica se observa un comportamiento suave a partir de 6 clústeres, después de varias pruebas se decidió utilizar 10. En la Tabla 4 se resumen las características de los clústeres resultantes y en la Figura 46 se muestran en diferente

color, se puede observar que el quinto y el octavo cuentan con pocos elementos, 3 y 4 respectivamente. Estos clústeres fueron descartados, el quinto agrupó tres estaciones con amplitudes muy grandes consecuencia de algún error en alguno de los componentes. El octavo agrupó estaciones con un pico máximo no confiable en bajas frecuencias, estas estaciones se encontraban en zona de lomas y la frecuencia característica era incongruente. Además, presentaban amplitudes muy bajas sugiriendo la ausencia de un contraste fuerte de impedancias.

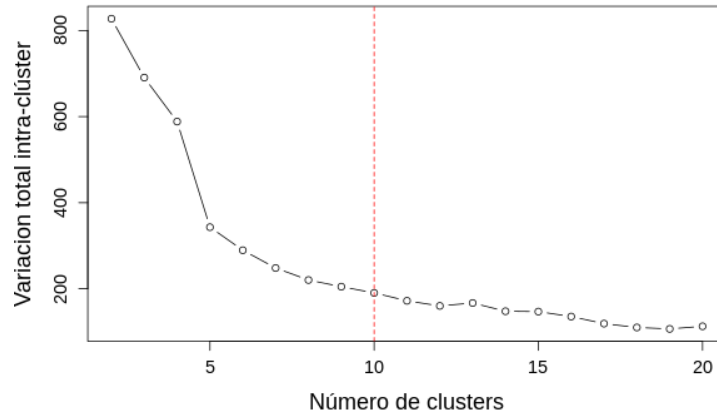


Figura 45. Método del codo para la determinación del número adecuado de clústeres.

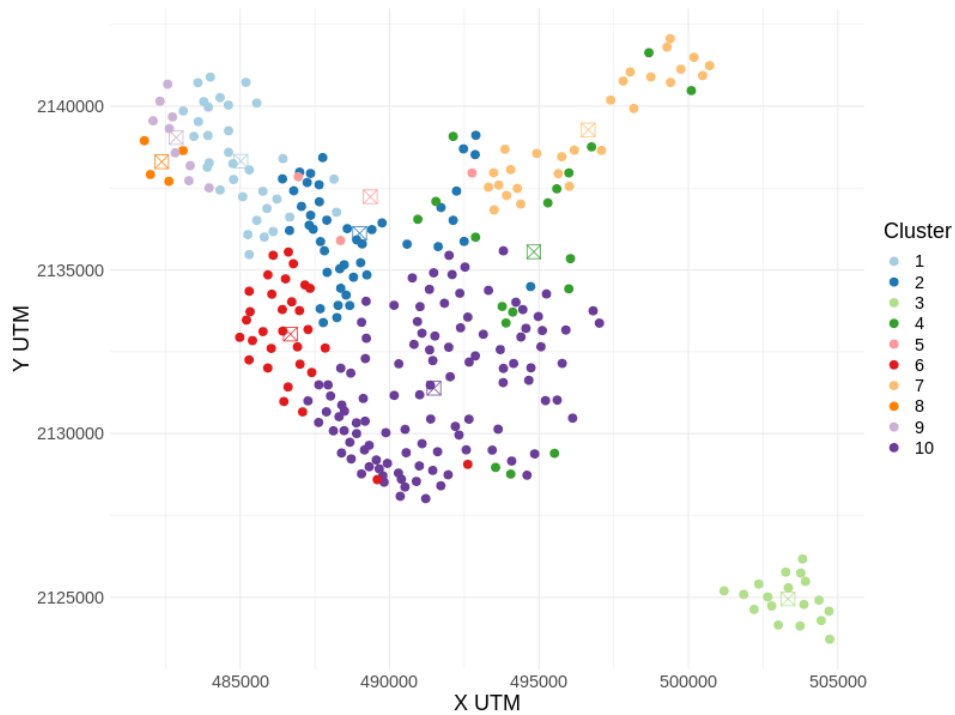


Figura 46. *Clustering* de las frecuencias características menores a 2 Hz estimadas en este trabajo. Las cruces dentro de los rectángulos representan los centros de cada clúster.

Tabla 4. Características de los clústeres obtenidos. P10, P90 e IQR representan los percentiles 10, 90 y el índice intercuartil de las frecuencias características dentro de cada clúster.

| Clúster | $\mu (f_0)$ Hz | $\sigma (f_0)$ Hz | P10 | P90 | IQR | Número de estaciones | Arreglos comprendidos |
|---------|-------------------|----------------------|------|------|------|-------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 1.03 | 0.11 | 0.90 | 1.18 | 0.18 | 33 | A12, A19, A21, A22 |
| 2 | 0.72 | 0.12 | 0.55 | 0.89 | 0.17 | 44 | A11, A16, A19 |
| 3 | 0.48 | 0.38 | 0.24 | 1.07 | 0.26 | 18 | A1 |
| 4 | 1.35 | 0.25 | 1.10 | 1.67 | 0.38 | 18 | A4, A6, A13, A14, A15, A16, A17, A18 |
| 5* | 1.52 | 0.50 | 1.11 | 1.83 | 0.45 | 3 | A11, A16, A19 |
| 6 | 0.95 | 0.19 | 0.71 | 1.18 | 0.23 | 31 | A10, A12 |
| 7 | 0.43 | 0.23 | 0.18 | 0.75 | 0.35 | 27 | A15, A17, A18 |
| 8* | 0.19 | 0 | 0.19 | 0.19 | 0 | 4 | A21 |
| 9 | 1.57 | 0.17 | 1.44 | 1.77 | 0.12 | 9 | A21, A22 |
| 10 | 0.35 | 0.15 | 0.18 | 0.54 | 0.19 | 108 | A5, A6, A7, A8, A9, A14, A15 |

En las Figura 47 se muestran los cocientes espectrales HVSR agrupados por clúster. A simple vista se puede observar que los clústeres 3, 4 y 7 presentan mayores diferencias entre los elementos que los componen. El 3 corresponde a todas las estaciones que forman el arreglo A1 que, por su ubicación distante a todos los demás arreglos, fueron agrupados en el mismo clúster. Por otro lado, el 4 y 7 abarcan áreas contiguas, cerca del cerro de Santa Catarina, donde se observaron cambios bruscos en las frecuencias características y velocidades entre estaciones y celdas cercanas. Además, en algunas estaciones se obtuvo más de un pico en los HVSR.

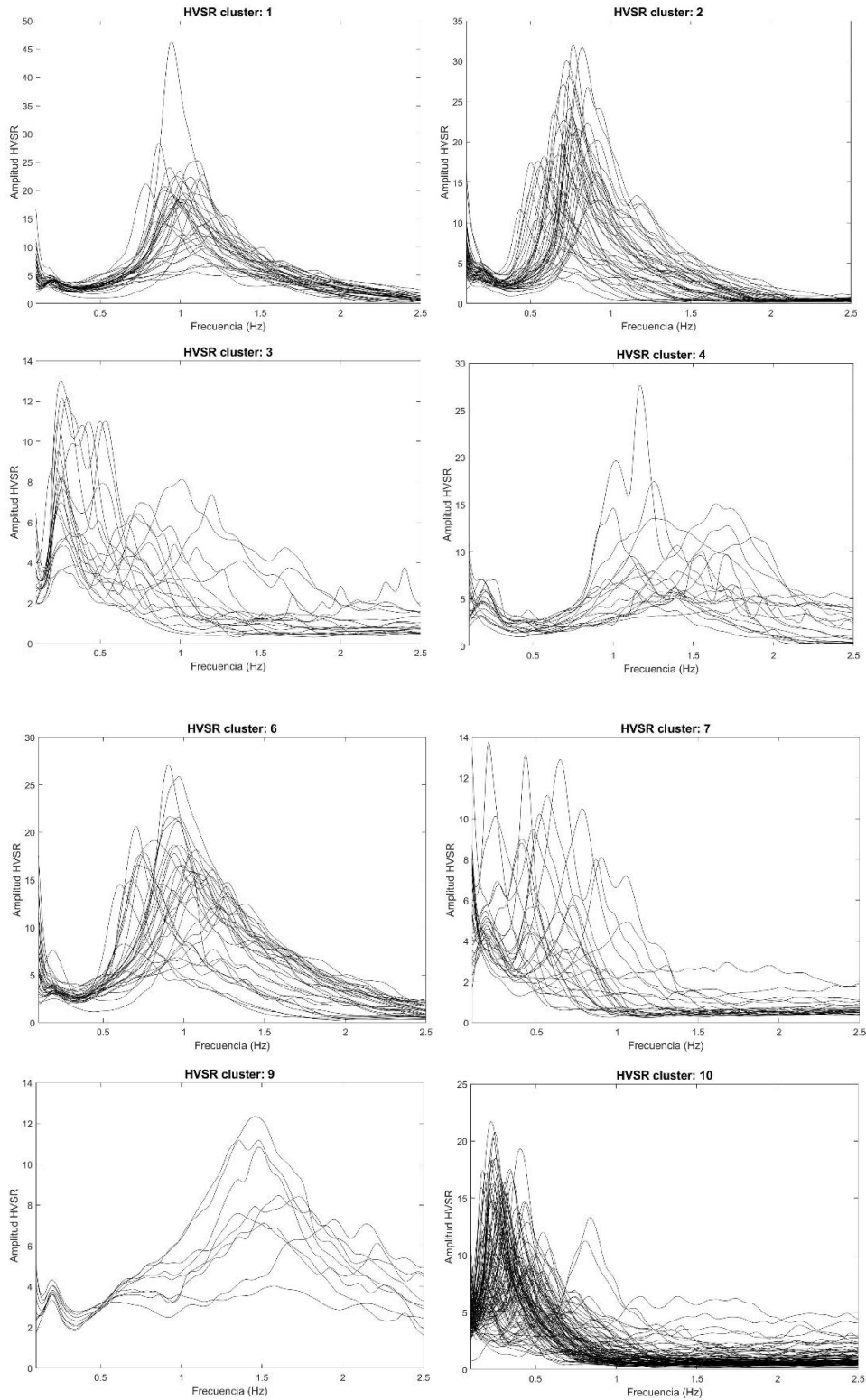


Figura 47. Cocientes espectrales HVSr agrupados según el procedimiento de *Clustering*

7.3 Procedimiento de inversión a profundidad

Clúster 10

El procedimiento empezó con el clúster 10 cuyo centroide se ubicó muy cerca de los arreglos A7 y A8. Se decidió hacer la inversión conjunta en la celda perteneciente al arreglo A7 más cercana al centroide del clúster, porque al mismo tiempo se encontraba más cerca del pozo Tulyehualco-1, permitiendo obtener un modelo inicial a partir de la descripción del pozo. Además, las curvas de dispersión del arreglo A7 fueron estimadas en un rango más amplio de frecuencias. A partir de la columna litológica presentada por González-Torres *et al.* (2015), de las densidades y las velocidades de onda P obtenidas por Pérez-Cruz (1986), se construyeron diferentes modelos sintéticos estimando las velocidades de onda de corte a partir de diferentes valores del módulo de Poisson. Estos modelos fueron utilizados como modelo inicial para invertir de manera conjunta la curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh recuperada en la celda elegida y la forma del cociente espectral HVSR de la estación CM196, ubicada dentro de esta celda.

En la Figura 48 se muestra el mejor ajuste obtenido en el cociente espectral HVSR y en la curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh. Para obtener una medida de la calidad de los ajustes en ambas curvas fue calculado el error relativo según las expresiones (29). La desviación estándar simulada en el cociente espectral representa el 15% de variación de la amplitud del cociente HVSR, usado como parámetro en la inversión, en la curva de dispersión la desviación estándar simulada se refiere a la aleatoriedad (alrededor de $\pm 10\%$) observada en los tiempos de viaje en el proceso de inversión tomográfica.

$$\begin{aligned} er_{HV} &= \sum_{i=1}^n \left| \frac{HV_{obs}(\omega_i) - HV_{th}(\omega_i)}{HV_{obs}(\omega_i)} \right| \\ er_{CD} &= \sum_{i=1}^n \left| \frac{CD_{obs}(\omega_i) - CD_{th}(\omega_i)}{CD_{obs}(\omega_i)} \right| \end{aligned} \quad (29)$$

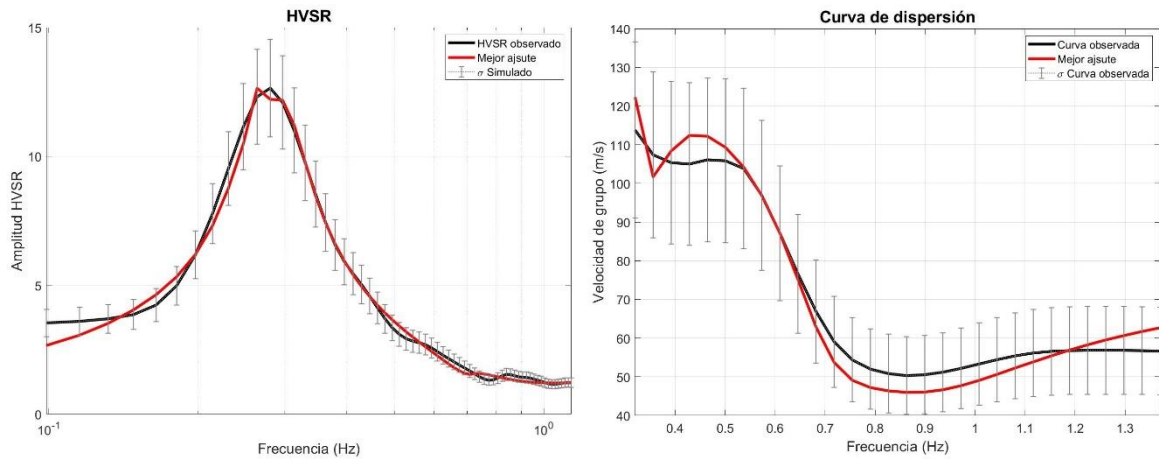


Figura 48. Izquierda. La línea negra representa el cociente espectral estimado en la estación CM196, la línea roja representa el mejor ajuste obtenido de la inversión. La desviación estándar simulada representa el 15% de variación de la amplitud del cociente HVSr, usado como parámetro en la inversión. El error relativo del mejor ajuste es de 6.2%. Derecha. La línea negra representa la curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh recuperada en la celda elegida del arreglo A7, la línea roja representa el mejor ajuste obtenido de la inversión. En este caso, la desviación estándar simulada se refiere a la aleatoriedad (alrededor de $\pm 10\%$) observada en los tiempos de viaje en el proceso de inversión tomográfica.

El modelo de velocidad obtenido del proceso de inversión conjunta se muestra en la Figura 49. También se muestra el kernel de sensibilidad del modo fundamental, calculado con el módulo *srfer96* incluido en el paquete de software *Computer Programs in Seismology* (Herrmann, 2013) (versión 3.30 disponible en: http://www.eas.slu.edu/eqc/eqc_cps/getzip.html). En este caso, los kernels de sensibilidad representan la tasa de cambio de la velocidad de grupo de ondas Rayleigh a variaciones en la velocidad de onda de corte a cierta profundidad. Sirven para identificar las profundidades en las que las ondas superficiales son sensibles en una frecuencia determinada, son no lineales y dependen de la estructura de velocidades del sitio.

Del kernel de sensibilidad mostrado se puede concluir que la curva de dispersión obtenida sólo explica el modelo resultante hasta una profundidad de 300 m. Entonces, se tomó esta porción del modelo y mediante el software HV-Inv se hicieron varias pruebas para observar el comportamiento del modelo directo de los cocientes espectrales HVSr al modelo cortado. Se observó que la forma del cociente espectral era sensitiva a perturbaciones de velocidad hasta de 350 m. Por lo que se puede concluir que la inversión conjunta de los cocientes espectrales HVSr calculados en la estación

CM196 y la curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh estimada en la celda que contiene esta estación explican el modelo resultante hasta una profundidad de 350 m, aproximadamente.

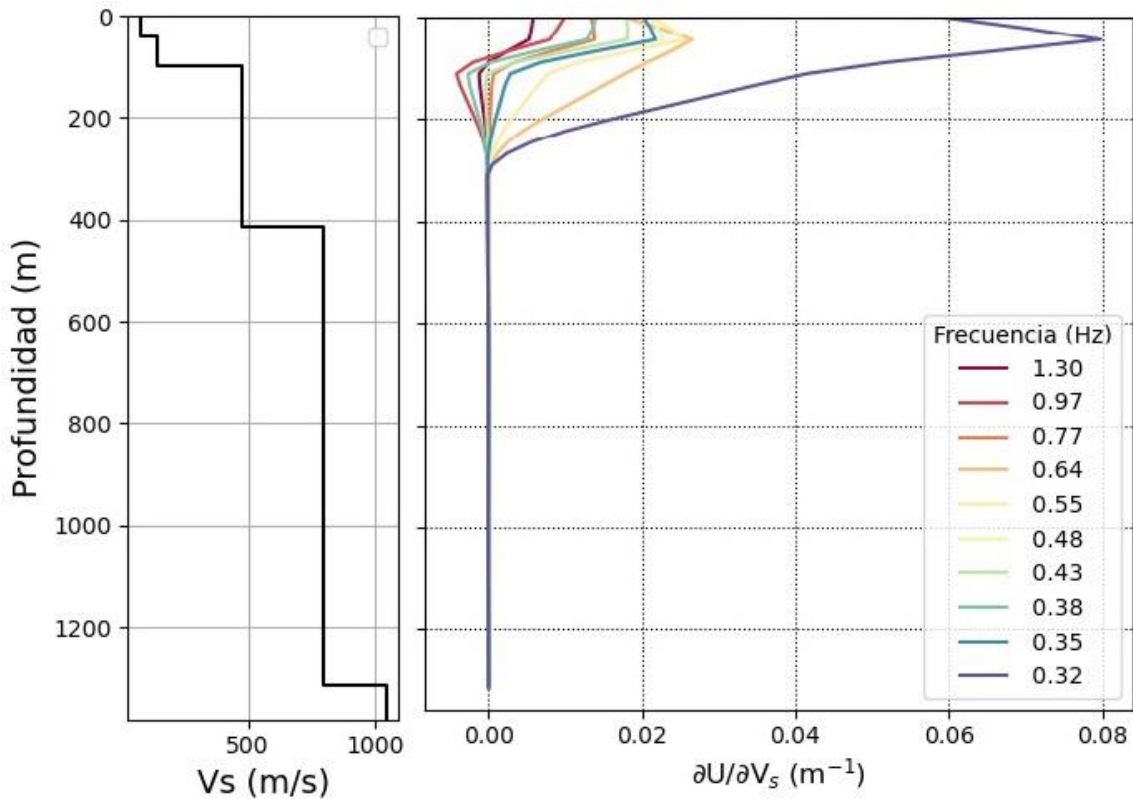


Figura 49. Izquierda. Modelo de velocidades obtenido de la inversión conjunta de los cocientes espectrales HVSR obtenidos en la estación CM196 y la curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh estimada con la inversión tomográfica en la misma celda que contiene esta estación en el arreglo A7, cuyos ajustes se muestran en la Figura 159. Derecha. Kernel de sensibilidad estimado dentro del rango de las frecuencias donde fue recuperada la curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh.

Este *clúster* incluyó celdas completas de los arreglos A5, A6, A7, A8, A9, A14 y A15, de los arreglos A4, A11, A13 y A16 sólo incluían una o dos estaciones en celdas dominadas por estaciones de otro *clúster*, por lo que no fueron consideradas. De la inversión de las curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh o Love estimadas en las celdas elegidas se obtuvieron 66 modelos 1-D de velocidad de onda de corte. Debido a que en cada arreglo las curvas de dispersión fueron

recuperadas en diferentes rangos de frecuencias fue necesario obtener los kernels de sensibilidad de al menos un modelo de velocidades por arreglo para conocer la profundidad de investigación alcanzada. Además, se observó que en aquellos arreglos donde se invirtieron curvas de dispersión de ondas Love se alcanzó una profundidad de investigación menor. Se eligió el modelo cuya curva ajustada en la inversión obtuvo se menor error relativo. En las Figura 50 y 51 se muestran dos ejemplos de los modelos obtenidos, así como su ajuste y kernel de sensibilidad.

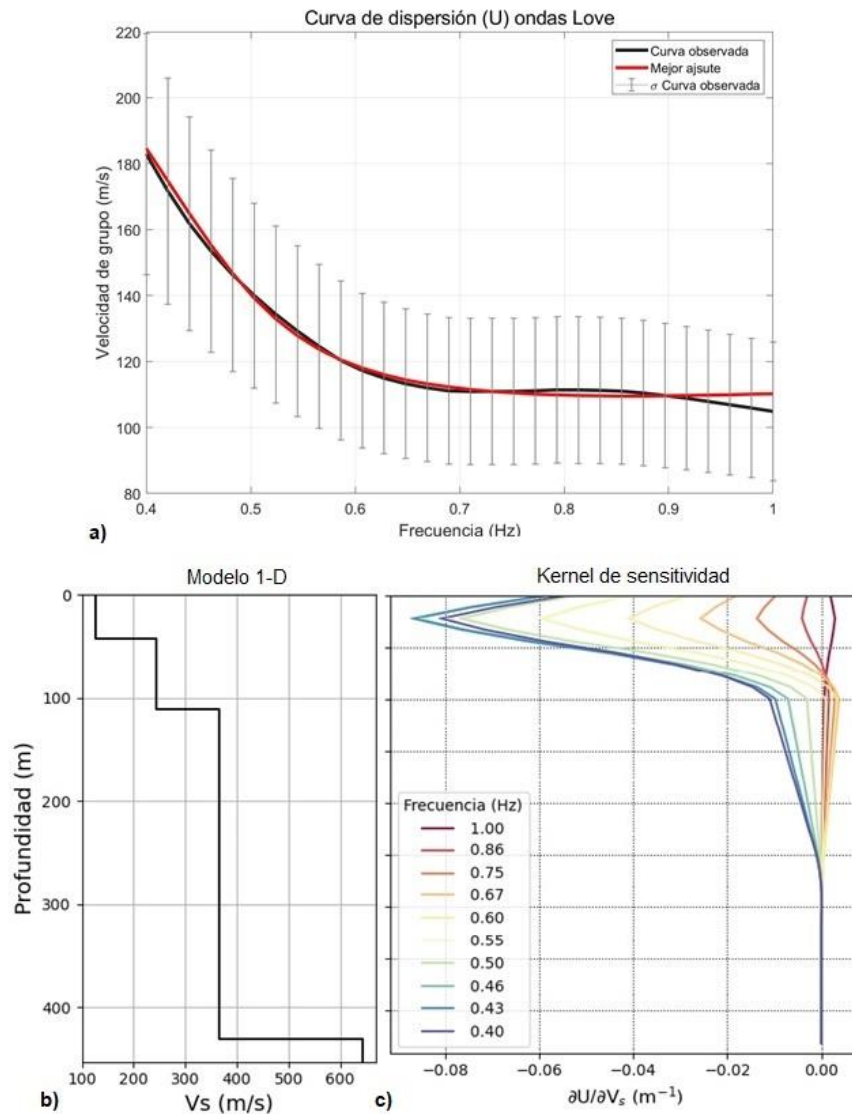


Figura 50. a) En negro, curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love estimada a partir de la tomografía de tiempos de viaje en una celda del arreglo A5. En rojo, mejor ajuste obtenido de la inversión. b) Modelo de velocidad 1-D obtenido de la inversión a profundidad. c) Kernel de

sensibilidad estimado del modelo resultante en el rango de frecuencias donde fue observada la dispersión.

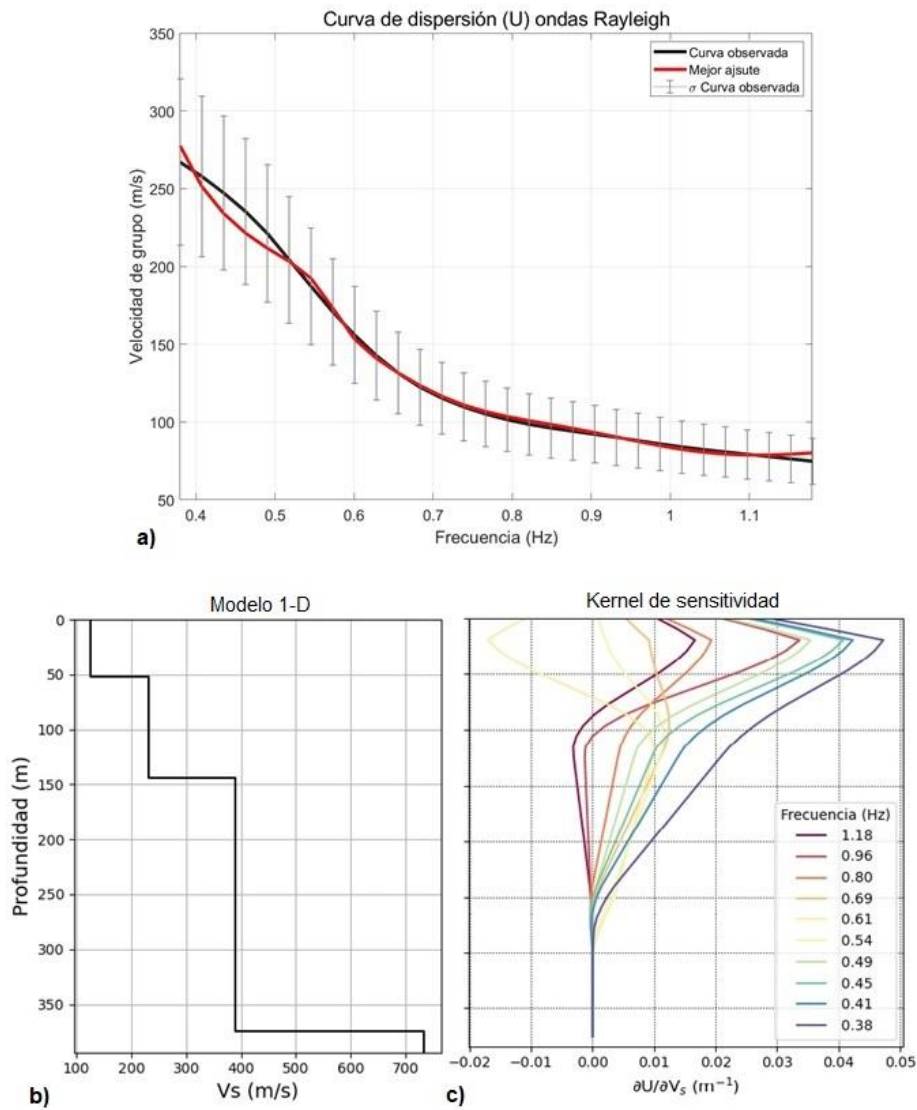


Figura 51. a) En negro, curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh estimada a partir de la tomografía de tiempos de viaje en una celda del arreglo A6. En rojo, mejor ajuste obtenido en la inversión. b) Modelo de velocidad 1-D obtenido de la inversión a profundidad. c) Kernel de sensibilidad estimado del modelo resultante en el rango de frecuencias donde fue observada la dispersión.

En la Figura 52 se muestran todos los modelos 1-D estimados en el clúster 10 con las profundidades de investigación reales según los kernels de sensibilidad.

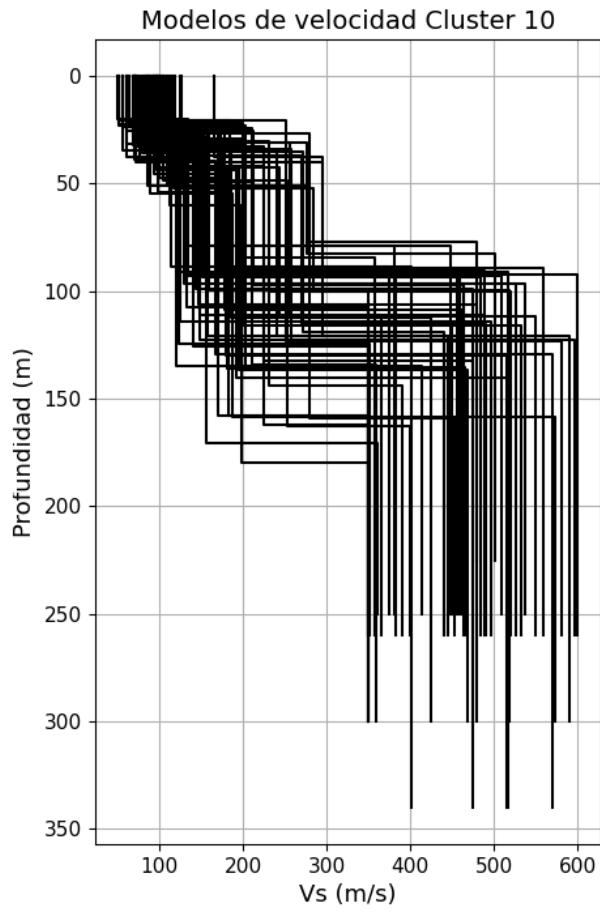


Figura 52. Modelos de velocidad 1-D obtenidos en el clúster10.

El procedimiento detallado de inversión llevado a cabo en los clusters y arreglos restantes se muestra en el Anexo V.

Capítulo 8. Análisis de resultados, consideraciones y repositorio.

8.1 Modelos de velocidad

Zona de lago

En total, se estimaron 180 modelos 1-D de velocidad de onda de corte. Los modelos de zona de lago comprendieron los clústeres 2,3 y 10 principalmente, de estos el 10 agrupó la mayor cantidad de modelos, según los kernels de sensibilidad se obtuvieron profundidades de investigación que variaron en un rango de 250 a 300 m.

Pérez-Cruz (1986) menciona que se encontraron depósitos lacustres en el pozo Tulyehualco-1 en profundidades de hasta 300 m. Por otro lado, en la columna estratigráfica presentada por González-Torres *et al.* (2015) se observa que a partir de los 100 m (aprox.) existen intercalaciones entre tobas y depósitos lacustres con espesores similares. En los modelos estimados en zona de lago existe un importante contraste de velocidades en profundidades entre 100 y 150 m (en la Figura 163 este contraste es muy notorio). Sería razonable pensar que en la parte superior de este contraste se caracteriza la velocidad de onda de corte de los depósitos lacustres y por debajo, la velocidad promedio de la intercalación entre tobas y depósitos lacustres. La razón por la que no es posible distinguir entre las tobas y los depósitos lacustres es que las zonas profundas los modelos son resueltos por longitudes de onda más grandes causando pérdida de resolución, es decir el espesor de estas capas es considerablemente menor a las longitudes de onda que resuelven el modelo. Además, también podría ser una explicación a la variación de la velocidad en el semi espacio que presentan los modelos.

Para conocer la media de la velocidad de ondas corte en los depósitos lacustres se calculó el promedio ponderado respecto al espesor de la velocidad en los primeros 100 metros de cada modelo estimado. En el clúster 10 la media de los promedios fue de 166.37 ± 39.75 m/s. En los modelos del clúster 3, a pesar de ser el más alejado de los demás, se obtuvieron resultados similares, la velocidad media de los primeros 100 m fue 163.63 ± 23.4 m/s. Además, la media de las frecuencias características fue similar entre los dos clústeres anteriores, 0.35 y 0.47 Hz, respectivamente. En el clúster 2 la velocidad media de los primeros 100 m fue de 269.6 ± 48.15 m/s, la frecuencia característica promedio también fue mayor, 0.72 Hz.

Aunque el modelo inicial del clúster 10 fue obtenido a partir de la inversión de una curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh se obtuvieron muy buenos ajustes al invertir las curvas de dispersión de ondas Love, demostrando congruencia en los resultados obtenidos. En la inversión conjunta en este clúster el cociente espectral HVSR fue sensible a perturbaciones en el modelo incluso a profundidades mayores que las alcanzadas por la curva de dispersión. Según estos resultados las frecuencias características observadas en zona de lago se deben a las propiedades elásticas del subsuelo hasta profundidades mayores de 300 m. Sin embargo, para tener conclusiones más claras es necesario realizar más inversiones conjuntas, un análisis más formal de la sensibilidad de los HVSR y considerar los cambios en los periodos naturales que se han reportado.

Zona de transición

Por otro lado, los clústeres 1, 4 y 6 agruparon los modelos en zona de transición. Se observó mucha variabilidad y complejidad en los resultados en esta zona. Por ejemplo, en los modelos del clúster 1 los depósitos más superficiales son caracterizados por una velocidad media de 183.9 ± 36.2 m/s y espesores promedio de 37.73 ± 12.09 m. Mientras que, en el clúster 6, los depósitos más superficiales tienen una velocidad media de 59.06 ± 8.18 m/s y un espesor promedio de 11.15 ± 1.83 m. En el clúster 4, que incluye al arreglo A13, se obtuvieron resultados más parecidos al clúster 1, la velocidad media de la capa más superficial fue de 130.28 ± 43.74 m/s y el espesor promedio de 41 ± 11.06 m. La velocidad media de los promedios ponderados en los primeros 100 m de cada modelo para el clúster 1 fue de 418.93 ± 60.11 m/s, para el clúster 6 de 332.51 ± 25.59 m/s y para el clúster 4 de 209.025 ± 45.61 m/s.

En la inversión conjunta llevada a cabo en el clúster 6, los resultados indicaron que la forma de los cocientes espectrales y la frecuencia característica observada estaban determinados por el contraste de impedancias entre las primeras dos capas de los modelos, cuya interface se localiza en profundidades de 11.15 ± 1.83 m. Al perturbar el modelo obtenido en el clúster 1 se obtuvieron resultados similares, el contraste de impedancias entre las dos primeras capas también determinó la forma de los HVSR y la frecuencia característica observada. Sin embargo, la interface se localizaba a una mayor profundidad, 41 ± 11.06 m. De manera breve, se puede concluir que en la zona de transición las frecuencias características observadas son debidas a los primeros 50 m de la estructura de velocidades del subsuelo.

Zona de lomas

En el arreglo A20 la mayoría de las estaciones se encontraba en zona de lomas, según la zonificación geotécnica. Sin embargo, las velocidades estimadas fueron similares a las del clúster 1, el más cercano. La velocidad media de los promedios ponderados en los primeros 100 m de cada modelo fue de 484.82 ± 30.6 m/s. Debido a la poca cantidad de datos en zona de lomas analizados en este trabajo no se obtuvieron resultados concluyentes acerca de las velocidades de onda de corte en esta zona.

Los resultados obtenidos en este trabajo son congruentes con las perforaciones en zona de lago realizadas por CENAPRED (1996), donde describen que hasta la profundidad de los sondeos (50 m) se observaron velocidades de onda de corte menores a 200 m/s. Por otro lado, Hernández-Hernández (2019) utilizó el conjunto de datos del arreglo A1 para obtener la estructura de velocidades del subsuelo siguiendo un procedimiento diferente. Aunque no define la profundidad de investigación alcanzada en su trabajo, en el rango en común se observaron similitudes en los espesores y en las velocidades estimadas según los resultados obtenidos en el clúster 3, que corresponde al arreglo A1 de este trabajo. Por ejemplo, la media del promedio ponderado de los primeros 100 metros en los modelos estimados por Hernández-Hernández es de 202 m/s, mientras que en este trabajo es de 163.63 m/s.

Recientemente, Machado *et al.* (2019) estimaron la estructura del subsuelo en la colonia Nativitas a partir de la inversión de los cocientes espectrales HVSR. Este lugar se encuentra cercano al clúster 4, el modelo más cercano obtenido en este trabajo presenta algunas diferencias en los rangos de espesores que ellos reportan. Sin embargo, fueron estimadas velocidades dentro del mismo rango en los primeros 100 metros.

En las Figuras 53-59 se muestra la distribución lateral de velocidades de onda de corte en diferentes profundidades (50, 75, 100, 125, 150, 175 y 200 metros). Para esto, fueron extraídas las velocidades de los modelos 1-D en las profundidades correspondientes y se consideró al centro de cada celda como el punto de atribución. En los mapas de las Figuras 56-59 destaca una anomalía de alta velocidad aproximadamente en el centro del mapa, es atribuida a la influencia de las faldas del cerro de santa Catarina en esta Zona, incluso es posible observar altas velocidades en la tomografía de tiempos de viaje llevada a cabo en el arreglo A15. En general los mapas fueron consistentes con la zonificación geotécnica, observándose velocidades mayores en zona de lomas y transición, respecto a la zona de lago.

Velocidad de onda de corte a 50 m

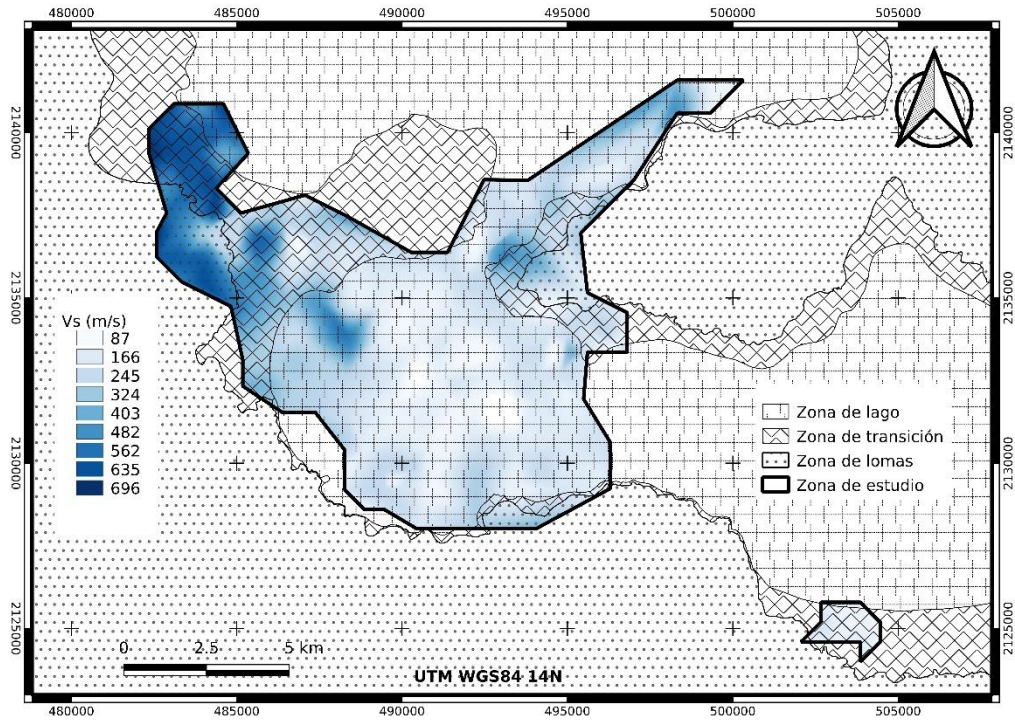


Figura 53. Velocidades de onda de corte a 50 m de profundidad.

Velocidad de onda de corte a 75 m

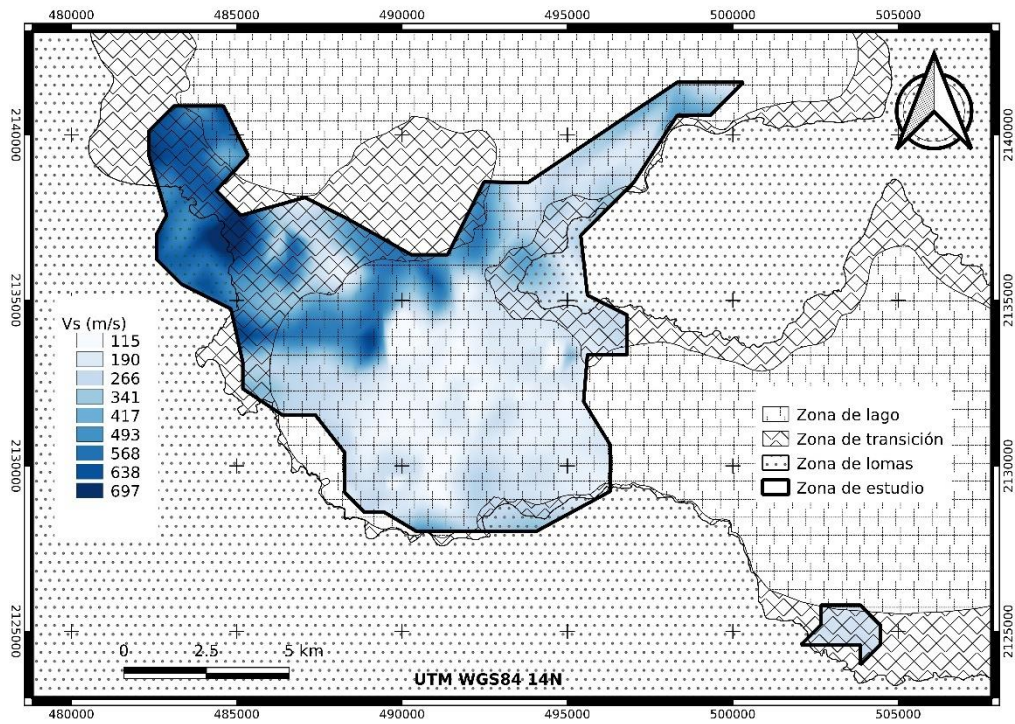


Figura 54. Velocidades de onda de corte a 75 metros de profundidad.

Velocidad de onda de corte a 100 m

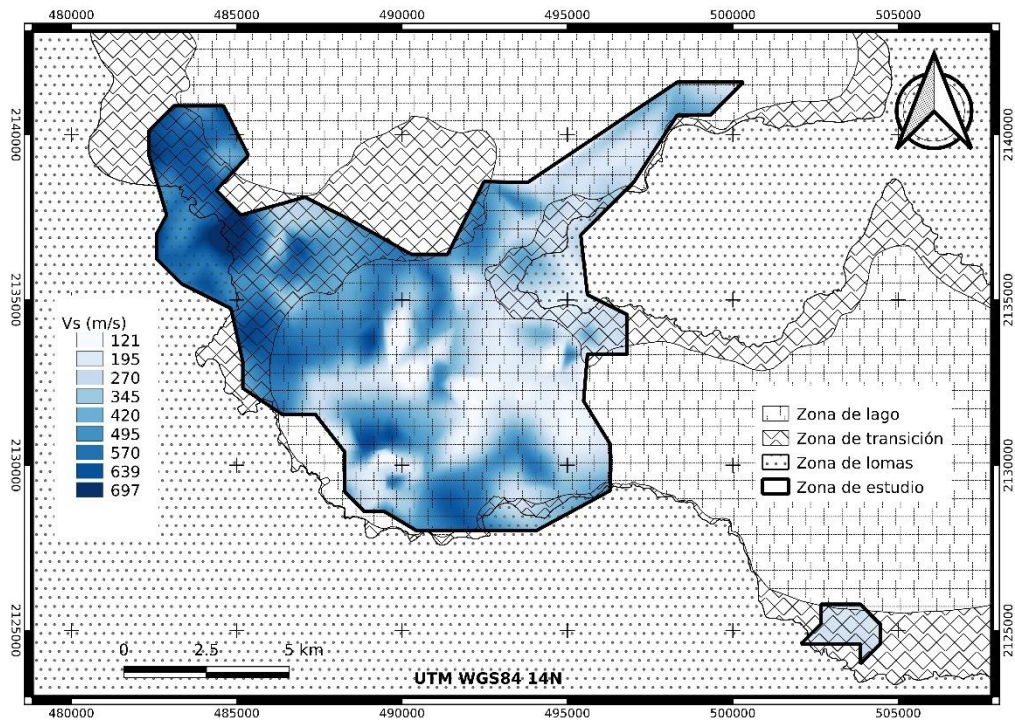


Figura 55. Velocidad de onda de corte a 100 metros de profundidad.

Velocidad de onda de corte a 125 m

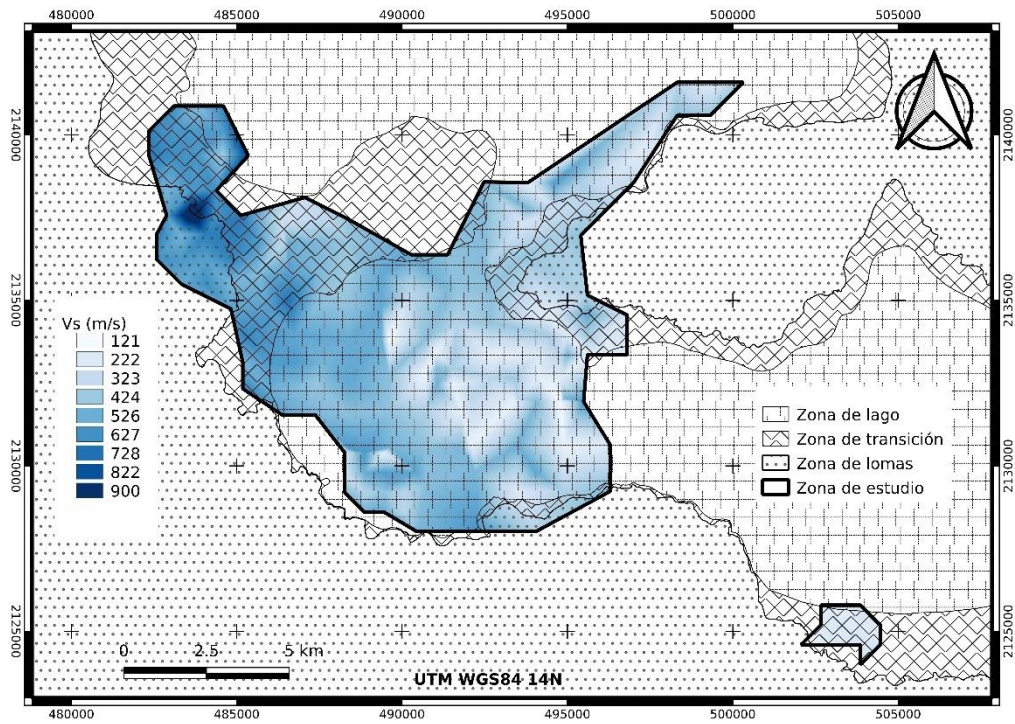


Figura 56. Velocidad de onda de corte a 125 metros de profundidad.

Velocidad de onda de corte a 150 m

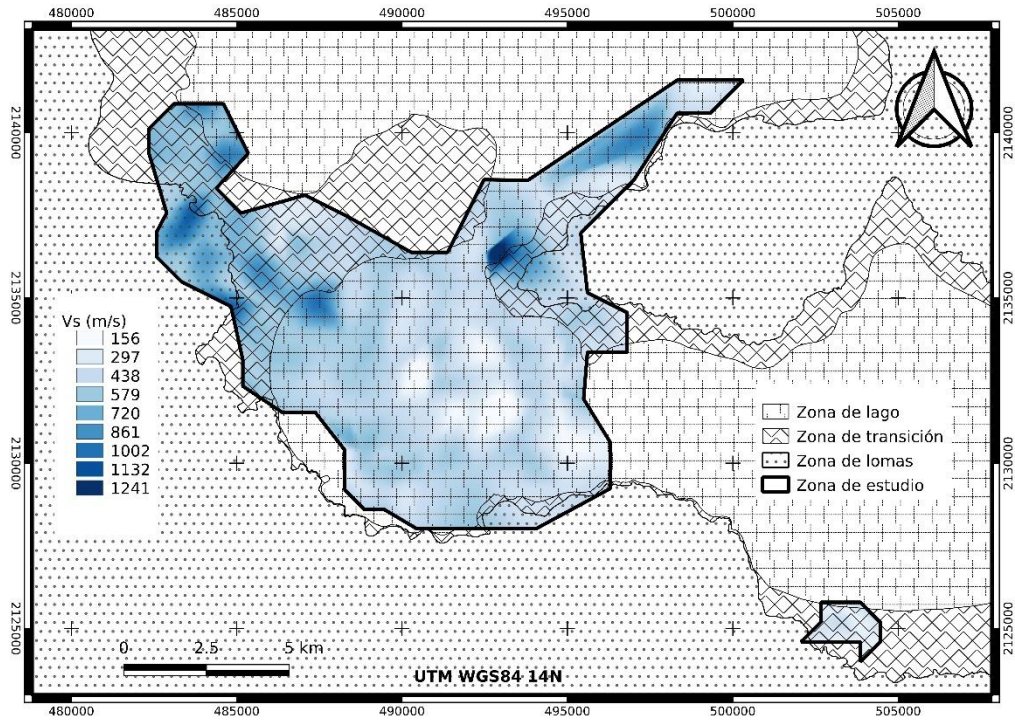


Figura 57. Velocidad de onda de corte a 150 m de profundidad.

Velocidad de onda de corte a 175 m

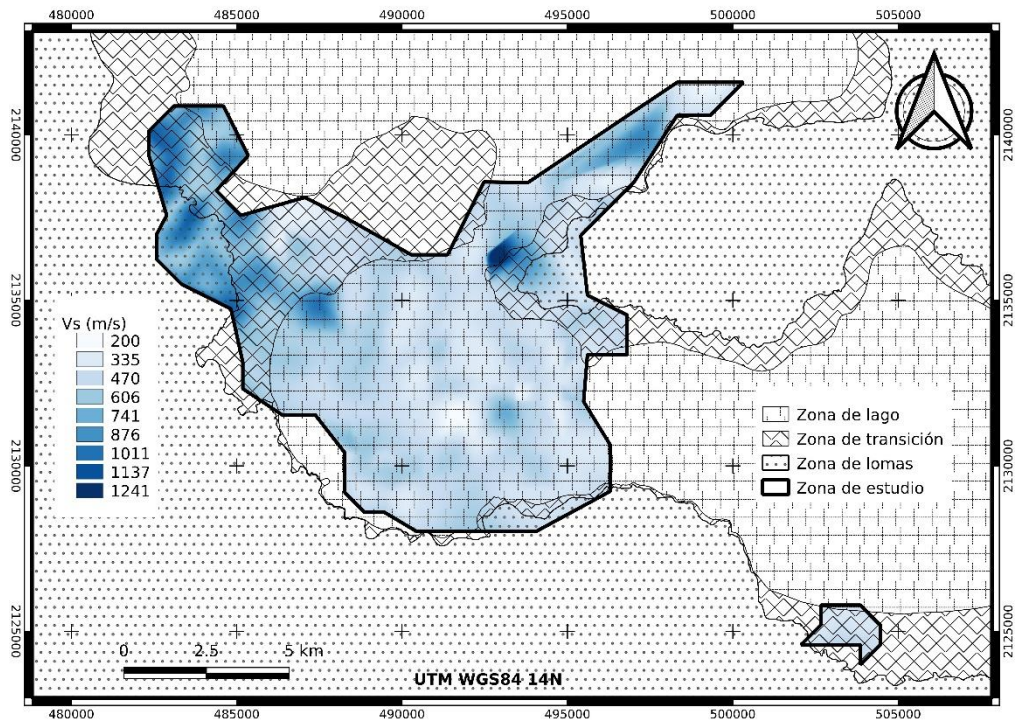


Figura 58. Velocidad de onda de corte a 175 m de profundidad.

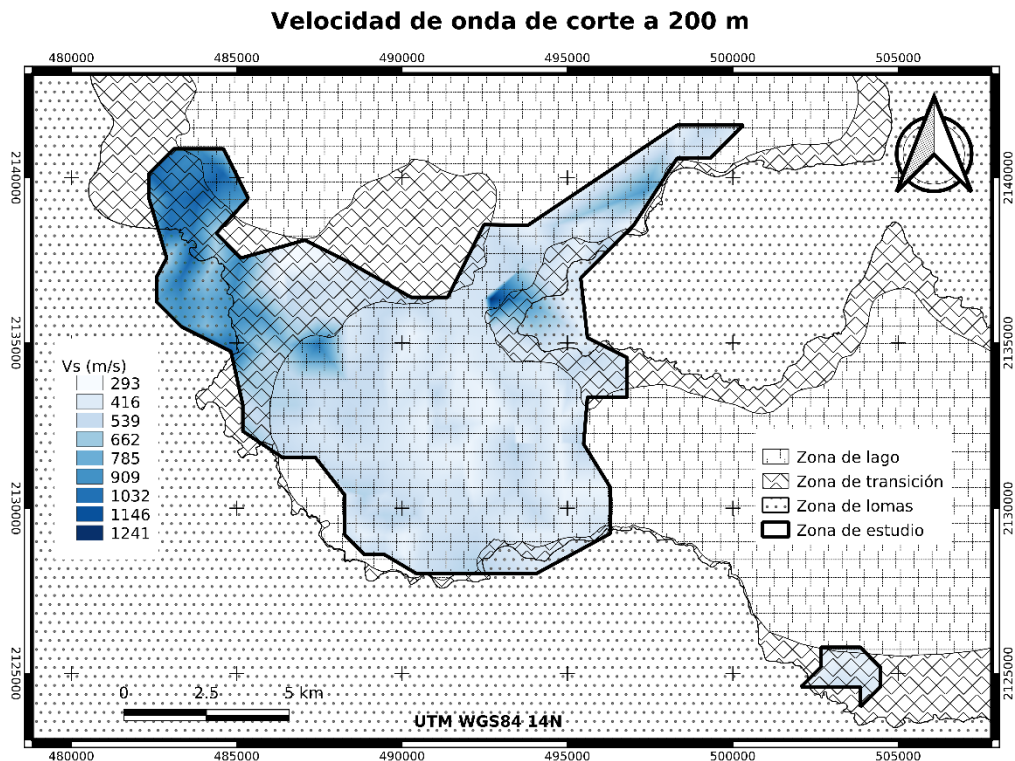


Figura 59. Velocidad de onda de corte a 200 m de profundidad.

Para observar la variación de velocidades a lo largo de una trayectoria recta se construyó un perfil en donde se incluyeron los modelos que se ubicaron en las cercanías de la línea formada entre los puntos A y B de la Figura 60a, los modelos incluidos se muestran en la tabla 5. El perfil, que es mostrado en la Figura 60b, se puede observar que las velocidades debajo de los 50 m son mayores en las cercanías del punto A y disminuyen en dirección al punto B. También, en color azul rey es notoria una capa con velocidades menores a 200 m/s que aumenta su espesor en la zona de lago, esta capa puede estar asociada a los depósitos lacustres. Es importante mencionar que en el perfil no se consideró la topografía de la zona. En los puntos A, 1, 2 se utilizaron modelos de velocidad estimados en el arreglo A22, en los puntos 3 y 4 modelos del arreglo A21, los puntos 5 y 6 modelos del arreglo A11, los puntos 7 y 8 modelos del arreglo A7 y en los puntos 9, 10 y B modelos de estimados en el arreglo A6.

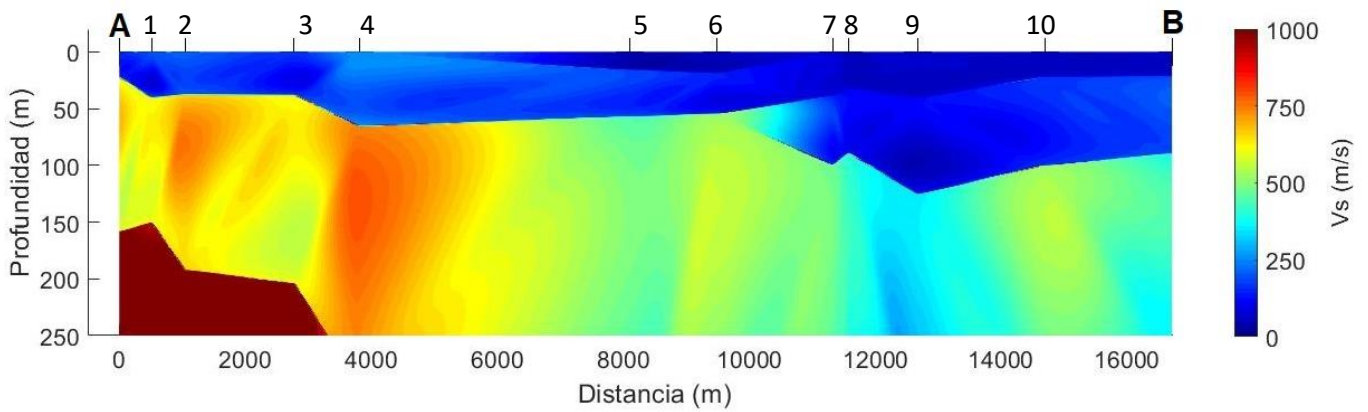
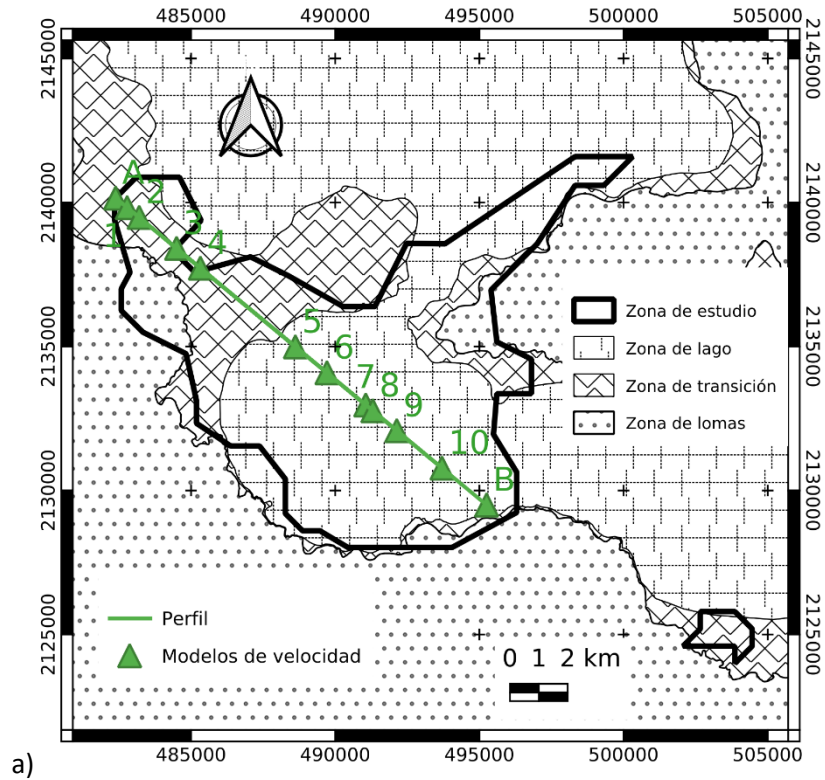


Figura 60. a) En el mapa la línea verde representa el perfil trazado. Además de en los puntos A y B, en cada número existe un modelo de velocidades que fue interpolado para crear el perfil. b) Perfil de velocidades interpolado, se consideraron solo los rangos de velocidad observados.

8.2 Consideraciones

Profundidad de investigación y resolución.

En este trabajo la profundidad de investigación se determinó a partir del cálculo de los kernels de sensibilidad utilizando el módulo *srfkrn96* de la paquetería CPS (Herrmman, 2013). Por la escala de los modelos fue complicado obtener curvas suaves impidiendo determinar la resolución alcanzada en cada modelo, o la profundidad mínima de investigación. Por lo tanto, es posible que existan capas más someras, de menor o mayor velocidad, que no pudieron determinarse en este trabajo por las frecuencias de investigación.

Modos superiores de ondas superficiales

En este trabajo se asumió que en las funciones de Green recuperadas estaban dominadas por el modo fundamental de ondas superficiales. Bajo esta suposición no se encontraron evidencias en el análisis FTAN de la influencia o existencia de modos superiores en el rango de frecuencias de investigación [0.3 - 1.3].

Aprovechando que en el arreglo A7 se logró recuperar la función de Green en las componentes radial y vertical, se analizó el movimiento de partícula causado por ondas Rayleigh utilizando el par de estaciones CM197 y CM200. En el análisis se utilizó una ventana de tiempo de 3 segundos alrededor del pico máximo en las partes no causales de la función de Green filtrada entre 0.5 y 0.7 Hz. Los resultados se muestran en la Figura 61, se puede observar que el movimiento de partícula es elíptico retrogrado respecto a la dirección de movimiento de las ondas. Este movimiento corresponde al modo fundamental de ondas Rayleigh, la similitud de las velocidades estimadas en los arreglos vecinos es un buen indicador de que también fue observado el modo fundamental de las ondas Rayleigh en los arreglos en donde se analizaron las componentes radiales, verticales o los resultados del análisis de componentes independientes.

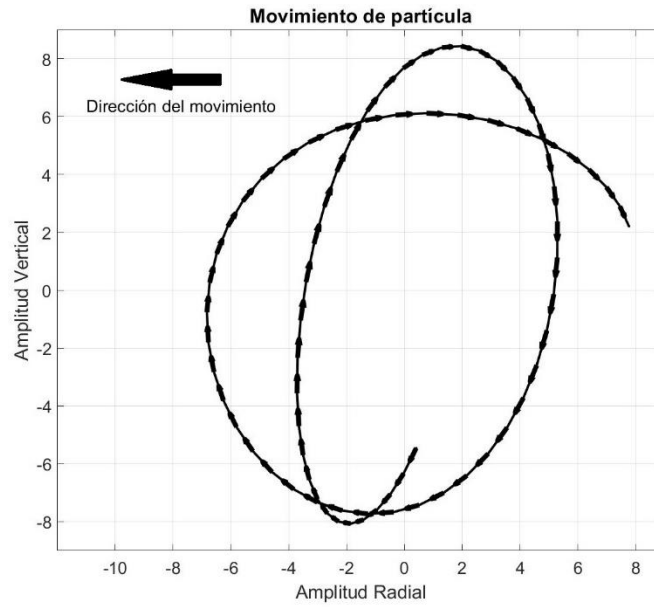


Figura 61. Movimiento de partícula deducido de la función de Green recuperada en las componentes radial y vertical en el par de estaciones CM197 y CM200 del arreglo A7.

Sobre la estrategia de inversión, *clustering* e inversión conjunta.

En la tomografía la prueba de resolución del tablero de ajedrez tuvo como finalidad mitigar los efectos causados por la varianza de los tiempos de viaje y la distribución no homogénea de trayectorias a través del arreglo. Al aumentar los tamaños de las celdas estos efectos disminuyeron permitiendo obtener resultados más confiables. Sin embargo, al mismo tiempo se dio lugar una consecuencia secundaria: las curvas de dispersión recuperadas eran representativas de áreas más grandes. Se puede interpretar a las curvas de dispersión extraídas como el promedio de velocidades de grupo en el área que abarca la celda.

En comparación con las curvas de dispersión, los cocientes espectrales son una medida puntual de las propiedades elásticas del subsuelo, no obstante, se observó que entre HVSR cercanos existían similitudes en la forma y en las frecuencias características estimadas. Estas observaciones motivaron la estrategia de inversión a profundidad por *clustering* implementada en este trabajo, minimizando el efecto de que las curvas de dispersión no sean una medida puntual y de que en una misma celda existieran más de una estación, además de que la frecuencia característica del modelo resultante es cercana a las observadas.

Sin embargo, existen dos efectos no deseados de la estrategia de inversión, ambos se dan en los límites entre clústeres. El primero, se presentaría en cualquier estrategia que intentará hacer la

inversión conjunta, es consecuencia de que las curvas de dispersión sean representativas de un área que puede abarcar estaciones con cambios bruscos en la forma de los cocientes espectrales y en las frecuencias características estimadas. El caso más representativo se observó en el clúster 4 en donde se decidió descartar la inversión conjunta y se optó por utilizar como modelo inicial los modelos estimados más cercanos. El segundo efecto, se refiere a los cambios bruscos que pueden existir en los modelos resultantes en los límites entre clústeres, consecuencia de utilizar modelos iniciales diferentes en celdas cercanas, pero de diferente clúster.

Influencia de la desviación estándar de las curvas de dispersión en los modelos obtenidos

Como se explicó en la sección 5.2, en las pruebas del tablero de ajedrez realizadas se decidió añadir ruido aleatorio de distribución uniforme en un $\pm 10\%$ a los tiempos de viaje sintéticos con la finalidad de simular los errores en los tiempos de viaje observados. Ignorando el factor de la distancia entre estaciones, esta aleatoriedad fue supuesta como la desviación estándar de las curvas de dispersión extraídas una vez realizada la inversión tomográfica. Se hizo un breve ejercicio añadiendo y restando la desviación estándar a las velocidades de una curva de dispersión extraída e invirtiendo las curvas para observar su influencia en el modelo estimado.

Algo importante a mencionar, es que en este trabajo el modelo obtenido de la inversión conjunta del clúster 10 es considerado uno de los más confiables, debido a la claridad de las funciones de Green recuperadas y a los ajustes obtenidos en la inversión. Para este ejercicio se utilizó una curva de dispersión del arreglo A8 y como modelo inicial el modelo obtenido de la inversión conjunta, mencionado al principio de este párrafo. También, en la inversión se utilizaron los mismos parámetros, como el número de iteraciones y el porcentaje de perturbación de los modelos. En la Figura 62 se muestran los resultados del análisis. Aunque los modelos son similares, las principales diferencias se observan en los espesores y en la velocidad del semi espacio. En el modelo obtenido de la curva observada las interfaces son más profundas. Algo interesante fue que a pesar de que hay mayores diferencias en las velocidades de grupo en las curvas donde se sustrajo y se añadió la desviación estándar, los espesores en estos modelos son más parecidos entre sí.

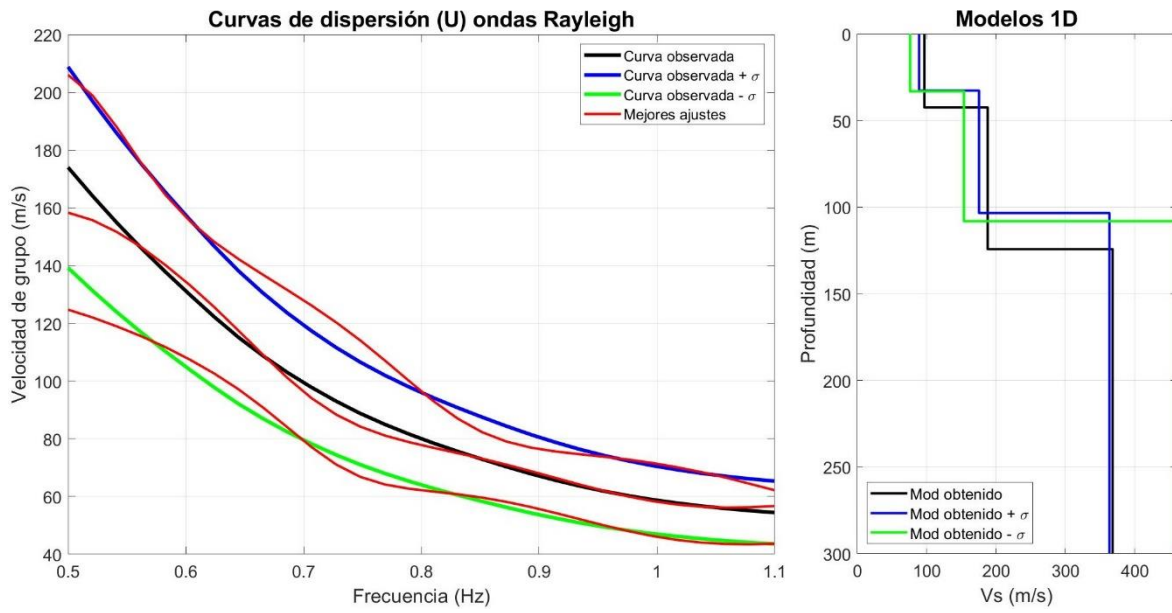


Figura 62. Izquierda. En negro se muestra una curva de dispersión recuperada en una celda del Arreglo A14. En azul y verde, se muestran las curvas obtenidas al sumar y restar, respectivamente, la desviación estándar. Las curvas en color rojo representan los mejores ajustes obtenidos de la inversión, utilizando los mismos parámetros. Los errores relativos fueron; 3.04%, 2.23% y 3.2%, en el orden azul, negro y verde. Derecha. Modelos obtenidos en la inversión del mejor ajuste, el color corresponde a la curva de dispersión.

Para observar el efecto en un modelo en zona de transición se repitió el experimento utilizando una curva de dispersión recuperada en una celda del arreglo A22 y utilizando como modelo inicial el obtenido en la inversión conjunta del clúster 1. En la Figura 63 se muestran los resultados del análisis.

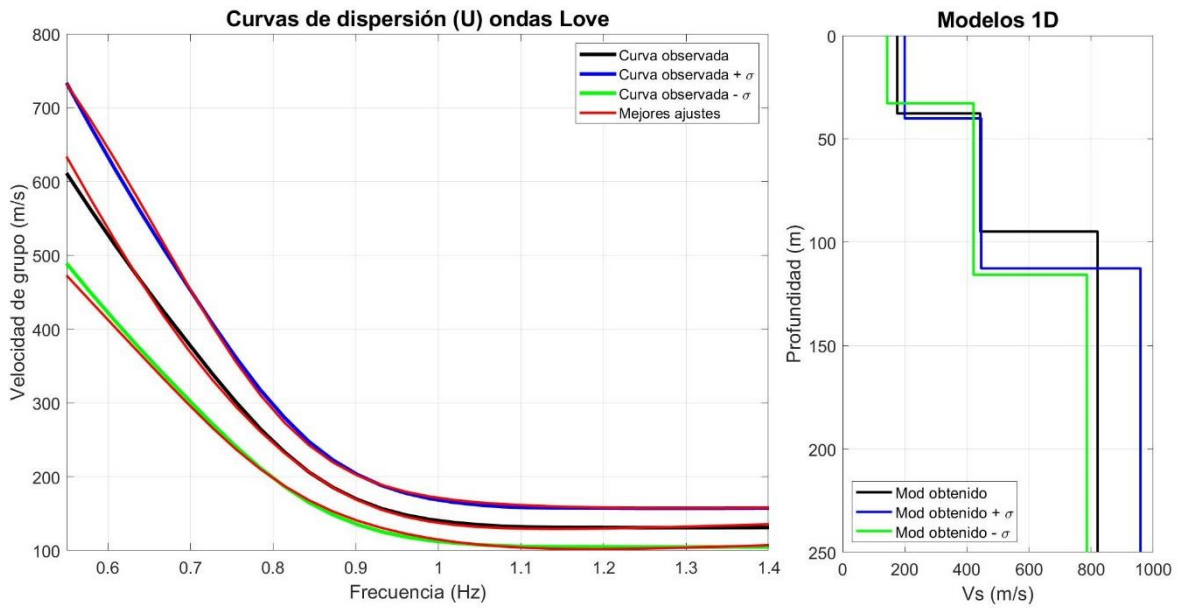


Figura 63. Izquierda. En negro se muestra una curva de dispersión recuperada en una celda del Arreglo A22. En azul y verde, se muestran las curvas obtenidas al sumar y restar, respectivamente, la desviación estándar. Las curvas en color rojo representan los mejores ajustes obtenidos de la inversión, utilizando los mismos parámetros. Los errores relativos fueron; 1.16%, 1.55% y 2.01%, en el orden azul, negro y verde. Derecha. Modelos obtenidos del mejor ajuste, el color corresponde a la curva de dispersión.

De la misma manera que en el ejemplo anterior, los modelos resultantes son muy parecidos, las principales diferencias se observan en las velocidades del semi espacio. La diferencia más notable en este caso es la profundidad de la segunda interface, siendo ~20 m menos profunda en el modelo obtenido al invertir la curva observada, respecto a los otros dos.

Dominio de Ondas Rayleigh o Love en el ruido sísmico registrado.

Bonnefoy-Claudet *et al.* (2006) en sus estudios sobre la composición del ruido sísmico ambiental encontraron una gran variabilidad en sus resultados y concluyeron que la participación de las ondas Love o Rayleigh puede cambiar con las características de cada sitio. En este trabajo, se buscó recuperar la función de Green en las componentes radial, vertical y transversal aplicando el mismo esquema de procesamiento. De los 22 arreglos analizados solamente en uno (Arreglo A7) se logró recuperar la función de Green de forma precisa en los tres componentes, en los demás, fue muy claro el dominio de algún tipo de ondas (Rayleigh o Love) en los registros.

En la Figura 64 se muestra la ubicación de las estaciones de todos los arreglos en donde se recuperó la función de Green, según el tipo de onda dominante las estaciones son graficadas en diferente color. Se puede observar que en los arreglos ubicados en el lado oeste de la zona de estudio las ondas Love fueron dominantes, mientras que, en el lado este, a excepción del arreglo A15, las ondas Rayleigh fueron dominantes. Hay coincidencias entre este patrón y la zonificación geotécnica, aunque existe una excepción en la mayoría de los arreglos en zona de transición las ondas Love fueron dominantes.

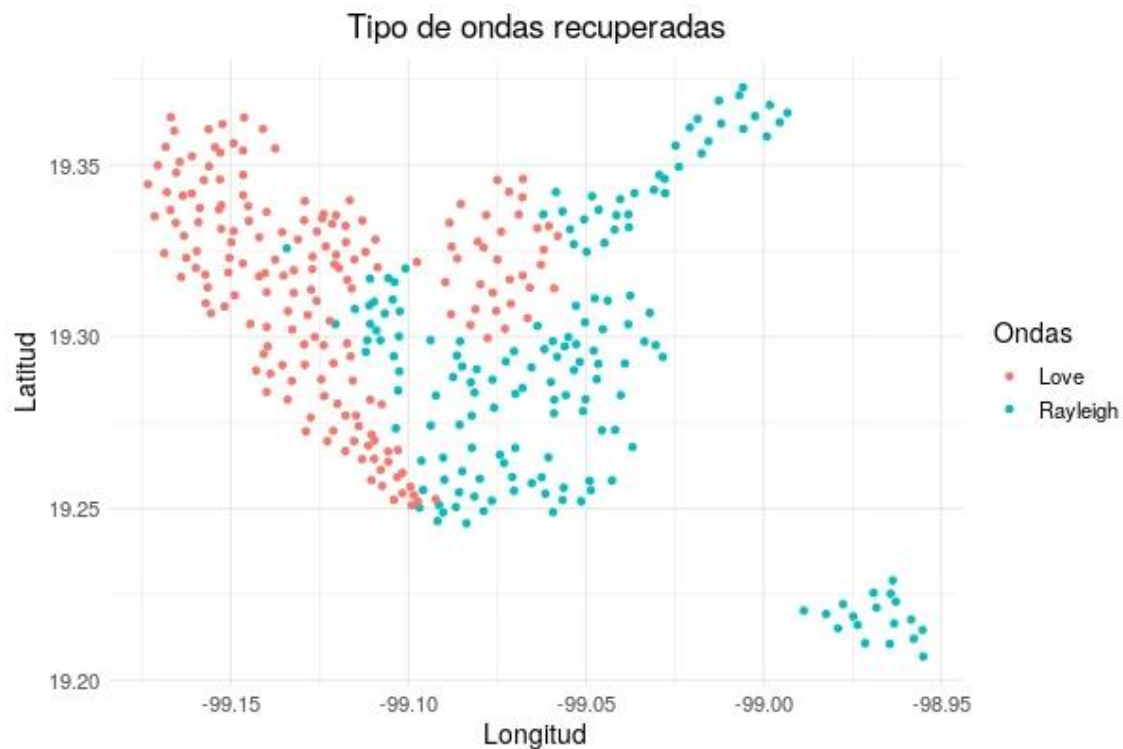


Figura 64. Tipo de ondas recuperadas según las estaciones de cada arreglo.

8.3 Repositorio CDMX-VS

En este trabajo se han revisado y analizado diferentes esquemas de procesamiento para recuperar de manera confiable la función de Green y posteriormente calcular los tiempos de viaje de la manera más precisa posible. También, se ha utilizado un método de inversión (LSQR) tradicional en las tomografías de tiempos de viaje que asume trayectorias rectas. Es posible que actualmente existan otros métodos o técnicas con las cuales se puedan obtener resultados que mejoren o

complementen el conocimiento de la distribución de velocidades en el área de estudio. Con respecto a los modelos 1-D de velocidad obtenidos, se debe tener en cuenta que la calidad y certeza de los resultados en la inversión a profundidad dependen en gran medida de la información a priori con la que se cuente. Es evidente que en la realización de este trabajo no se contó con toda la información que pudiese existir, y que los modelos están influidos principalmente por la información de dos pozos descritos en la bibliografía citada. Así, que si se desea utilizar un modelo en un lugar específico sería conveniente recopilar la mayor cantidad de información a priori disponible y si es necesario, volver a hacer una inversión de la curva de dispersión o incluso, implementar una inversión conjunta.

Por estos motivos, y para un mejor aprovechamiento del trabajo realizado se ha decidido compartir los tiempos de viaje estimados, las curvas de dispersión recuperadas de las tomografías y los modelos resultantes en un repositorio de acceso libre al que se puede tener acceso en el siguiente enlace: <https://github.com/inthaliba/CDMX-VS.git>.

Conclusiones

Como parte del proyecto “Sistema integral de monitoreo sísmico y generación de mapas de intensidad y daños en tiempo real de la Ciudad de México” se obtuvieron registros de ruido sísmico ambiental en 383 estaciones triaxiales de banda intermedia distribuidas en 22 arreglos de hasta 21 estaciones con distancias entre estaciones variando de 0.2 a 6 km. El objetivo fue estimar la estructura de velocidades utilizando el ruido sísmico ambiental registrado.

Antes de cualquier análisis se eliminó la media, la tendencia y la respuesta instrumental de los registros. Para conocer el contenido espectral del ruido sísmico ambiental se calcularon las funciones de densidad de energía (PSD) en cada componente de cada estación. Estas curvas presentaron diferentes comportamientos según los arreglos y las componentes en que fueron calculadas. En general, las curvas de las componentes horizontales tenían amplitudes menores respecto al componente vertical. También se observó que debajo de ~ 0.8 Hz el percentil 50 de las curvas PSD estaba dentro de los límites de las curvas NLNM y NHNM de velocidad. Después de 0.8 Hz las amplitudes aumentaban considerablemente principalmente en la componente vertical, estas observaciones sugieren que los eventos transitorios producto de la actividad en la ciudad influyen en frecuencias mayores a 0.8 Hz y tienen un mayor impacto en la componente vertical.

La recuperación de la función de Green supone la difusividad del campo de ondas que forma el ruido sísmico ambiental, para verificar la difusividad de los campos de ondas registrados se calcularon las matrices de coeficientes de correlación de densidad espectral en los registros de cada componente de cada estación. La medida de difusividad en estas matrices es representada mediante la correlación entre frecuencias vecinas, en un campo difuso no existe correlación. Los resultados obtenidos mostraron que en algunas estaciones existe correlación entre frecuencias vecinas, en la mayoría de los casos los resultados fueron consistentes en los tres componentes. Sin embargo, la magnitud de las correlaciones fue mayor en la componente vertical. Los resultados también mostraron consistencia cuando fueron agrupados por arreglo, observándose rangos similares de frecuencias correlacionadas. En general, el rango más común en donde se obtuvo correlación frecuencias vecinas varió entre 0.4 a 0.8 Hz.

Respecto a la recuperación de la función de Green, múltiples pruebas demostraron que el esquema de procesamiento más efectivo fue al mismo tiempo el más sencillo, consistió en el preprocesamiento, aplicación de un filtro pasa-bandas (0.1-1.5 Hz), decimación, ventaneo en

secciones de 120 s, normalización en tiempo (1-bit), correlación cruzada y apilamiento lineal de las funciones de correlación cruzada. Este esquema fue aplicado a las componentes verticales, radiales y transversales en los 22 arreglos. En dos arreglos no fue posible recuperar la función de Green en ningún componente y solamente en uno fue recuperada en los tres componentes.

Como se mencionó anteriormente, los resultados obtenidos al calcular las matrices de correlación de densidad espectral indicaron que el campo de ondas no era completamente difuso. Para mitigar los efectos del componente no difuso en las funciones de Green recuperadas y bajo la suposición de que las componentes difuso y no difuso son estadísticamente independientes, se llevó a cabo un procedimiento de separación de señal ciega a partir del análisis de componentes independientes utilizando la componente radial y vertical de las funciones de Green recuperadas. Con este procedimiento se logró observar con mayor claridad el pulso de ondas Rayleigh. Sin embargo, no se tuvo éxito en todos los casos, probablemente porque las fuentes de ruido se localizaron dentro de la zona de fase estacionaria y los eventos transitorios interfirieron constructivamente con la componente difusa no haciendo posible su separación.

El enfoque que se tomó en este trabajo sobre la correlación cruzada de registros simultáneos de ruido sísmico ambiental fue bajo la consideración de que estos campos de onda forman un campo difuso. Sin embargo, condiciones menos estrictas como la aleatoriedad del ruido sísmico ambiental pueden ser suficientes para justificar los resultados y objetivos de este trabajo. Por ejemplo, la conjetura Claerbout, desarrollada en 1968, establece que correlaciones cruzadas de trazas de ruido registradas en dos diferentes ubicaciones de receptores en un medio heterogéneo tridimensional da la respuesta que podría ser observada en uno de los receptores si hubiera una fuente en el otro, derivando el término interferometría de ruido sísmico.

Considerando todos los arreglos analizados de 3202 pares de estaciones se recuperaron pulsos coherentes a partir de la correlación cruzada en 1824, que representan el 57%. Descartando los dos arreglos donde no se obtuvieron pulsos coherentes en ningún componente, en 10 arreglos se observaron pulsos de ondas Rayleigh y en otros 10 pulsos de ondas Love. Se observó una relación espacial entre la ubicación de los arreglos y el tipo de onda dominante. Los arreglos donde se observaron ondas Love se encontraban en la zona oeste del área de estudio, principalmente en zonas de transición y lomas. Aunque hay algunas excepciones en la mayoría de los arreglos en zona de lago se recuperaron pulsos de ondas Rayleigh. El análisis del movimiento de partícula llevado a cabo en el arreglo donde se logró recuperar la función de Green en los tres componentes (radial,

vertical y transversal), además de la congruencia y similitud de las velocidades encontradas en los arreglos vecinos sugiere que los pulsos observados corresponden al modo fundamental de las ondas superficiales.

Una vez recuperada la función de Green a partir de un análisis FTAN fueron estimados los tiempos de viaje de trenes de onda en rangos de frecuencia que variaron entre 0.4 y 1.3 Hz, según el arreglo analizado. Después, fueron obtenidas tomografías de tiempos de viaje, asumiendo que los rayos tienen trayectorias rectas, un análisis formal y detallado de la resolución adecuada fue llevado a cabo en cada arreglo a partir de la prueba del tablero de ajedrez. Los tamaños de celdas elegidos variaron entre 500 y 1800 m. Posteriormente, una vez calculadas las tomografías fueron extraídas curvas de dispersión de velocidad de grupo representativas del área de la celda donde se extrajeron.

Durante la etapa donde se eligió el mejor esquema de procesamiento para calcular la función de Green se implementó un algoritmo de selección de ventanas que se basó en las propiedades estadísticas del ruido sísmico ambiental, asumiendo que las secciones de tiempo con distribuciones de probabilidad similares a la distribución normal tenían menor influencia de eventos transitorios. Para el cálculo de la función de Green este algoritmo no tuvo éxito porque se descartaba mucha información, la razón fue que en muy pocas ocasiones los estadísticos de los registros simultáneos estaban dentro de los valores de aceptación, es decir, existían fuentes de ruido no sincronizadas que afectaban a cada estación individualmente. Sin embargo, al implementar este algoritmo en el cálculo de los cocientes espectrales HVSR para elegir las ventanas de tiempo más estacionarias se obtuvieron resultados muy similares al algoritmo LTA/STA.

Los cocientes espectrales HVSR fueron calculados utilizando el estimador cociente de los promedios en cada estación. A partir de las frecuencias características estimadas fue llevado a cabo un análisis de clustering utilizando el método *k-means* con el objetivo de agrupar los HVSR con características similares entre sí. Una vez identificadas las ubicaciones de las curvas de dispersión extraídas de las tomografías en los clústeres formados, fue implementada la inversión a profundidad, en cada clúster fue llevada a cabo mínimo una inversión conjunta entre los cocientes espectrales HVSR y las curvas de dispersión de velocidad de grupo. Los modelos obtenidos de la inversión conjunta fueron utilizados como modelo inicial para invertir todas las curvas de dispersión contenidas en el mismo clúster.

En los modelos obtenidos destaca que las arcillas lacustres en zona de lago alcanzan profundidades de hasta 150 metros con una media de 115, los modelos en zona de lago tienen velocidades de onda de corte promedio, en los primeros 100 metros de profundidad, de 166.36 ± 39.75 m/s.

Según los kernels de sensibilidad calculados, con los datos utilizados en este trabajo y el procesamiento hecho se alcanzaron profundidades de investigación desde 250 m hasta 350 m, según el rango de frecuencias donde fue observada la dispersión. En total, fueron estimados 178 modelos 1-D de velocidad de onda de corte.

Referencias

- Aki, K. (1957). Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves, with Special Reference to Microtremors. *Tokyo University, Bull. Earthquake, Res. Inst.* 25, 415-457.
- Arai, K., & Tokimatsu, K. (2004). S-wave velocity profiling by inversion of microtremor H/V spectrum. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(1), 53-63.
- Arce, J. L., Layer, P. W., Macías, J. L., Morales-Casique, E., García-Palomo, A., Jiménez-Domínguez, F. J., . . . Vázquez-Serrano, A. (2019). Geology and stratigraphy of the Mexico Basin (Mexico City), central Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Maps*, 15(2), 320-332. doi:10.1080/17445647.2019.1593251
- Bard, P.-Y., Campillo, M., Nicollin, F., & Sánchez-Sesma, F. J. (1988). The incident wave field in Mexico City during the great earthquake and its interaction with the deep basin. The Mexico Earthquake of September 19, 1985. *Earthquake Spectra*(4), 591-608.
- Bensen, G., Ritzwoller, M., Barmin, M., Levshin, A., Lin, F., Moshchetti, M., . . . Yang, Y. (2007). Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements. *Geophys. J. Int.* 169, 1239–1260. doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03374.x
- Bonnefoy-Claudet, S., Cotton, F., & Pierre-Yves, B. (2006). The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies. A literature review. *Earth-Science Reviews* 79, 205-227. doi:10.1016/j.earscirev.2006.07.004
- Buitinck, L., Louppe, G., Blondel, M., Pedregosa, F., Mueller, A., Grisel, O., . . . Varoquaux, G. (2013). API design for machine learning software: experiences from the scikit-learn project. *European Conference on Machine Learning and Principles and Practices of Knowledge Discovery in Databases*, 108-122.
- Campillo, M., Chávez-García, F. J., Bard, P.-Y., & Sánchez-Sesma, F. (1988). The Mexico Earthquake of September 19, 1985 - A theoretical investigation of large and small scale amplification effects in the Mexico city valley. *Earthquake Spectra*(4), 609-635.
- Cárdenas-Soto, M., & Escobedo-Zenil, D. (2019). Ambient Noise Tomography fot characterize the subsoil structure under a damaged bilding in Mexico City. *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP)* , (pp. 378-381). Denver, CO.
- CENAPRED. (1996). Estudios del subsuelo del valle de México. *Reporte técnico. México*.
- Chávez-García, F. J., & Aguirre, J. (2012). Exploration of subsoil structure in Mexico city using correlation of microtremors. *Geofísica Internacional*, 51(3), 251-270.
- Cultrera, G., Di Giulio, G., Cornou, C., Bard, P. Y., & Al Tfaily, B. (2019). Best practice and quality assessment procedures for site characterization at seismic station: an European initiative. *Proceedings of the AGU 2019 Fall Meeting*. San Francisco, CA, USA.

- David. (2020, Mayo 24). *LSMR: An iterative algorithm for least-squares problems*. Retrieved from MATLAB Central File Exchange: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/27183-lsmr-an-iterative-algorithm-for-least-squares-problems>
- Formenti, M. (2014). *Mean of Ratios or Ratio of Means: statistical uncertainty applied to estimate Multiperiod Probability of Default*. Retrieved from <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1409/1409.4896.pdf>
- García-Jerez, A., Luzón, F., Sánchez-Sesma, F., Lunedei, E., Albarello, D., Santoyo, M., & Almendros, J. (2013). Diffuse elastic wavefield within a simple crustal model. Some consequences for low and high frequencies. *Journal of Geophysical Research*, *118*(10), 5577–5595. doi:10.1002/2013JB010107
- García-Jerez, A., Piña-Flores, J., Sánchez-Sesma, F., Luzón, F., & Pertón, M. (2016). A computer code for forward calculation and inversion of the H/V spectral ratio under the diffuse field assumption. *Computer & Geosciences*, *97*, 67-78. doi:10.1016/j.cageo.2016.06.016
- Goldstein, P., Dodge, D., Firpo, M., & Minner, L. (2003). SAC (2000): Signal processing and analysis tools for seismologists and engineers. In W. Lee, H. Kanamori, P. Jennings, & C. Kisslinger, *Invited contribution to "ISAPEI International handbook of Earthquake and Engineering Seismology"*. London: Academic Press.
- González-Torres, E. A., Morán-Zenteno, D. J., Mori, L., & Martiny, B. (2015). Revisión de los últimos eventos magmáticos del Cenozoico del sector norte-central de la Sierra Madre del Sur y su posible conexión con el subsuelo profundo de la Cuenca de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, *67*(2), 285-297.
- Granados, I., Calo, M., & Valente, R. (2019). Noisy dispersion curve picking: a MATLAB package for group velocity dispersion picking of seismic surface waves. *Computer and Geosciences*, *133*. doi:doi: 10.1016/j.cageo.2019.104315
- Groos, J. C., Bussat, S., & Ritter, J. R. (2012). Performance of different processing schemes in seismic noise cross-correlations. *Geophysical Journal International*, *188*, 498-512. doi:10.1111/j.1365-246X.2011.05288.x
- Gross, J. (2010). Broadband seismic noise: classification and Green's function estimation. *Phd. Thesis. Karlsruhe Institute of Technology*, 155 pp.
- Gross, J. C., & Ritter, R. R. (2009). Time domain classification and quantification of seismic noise in an urban environment. *Geophysical Journal International*, *179*, 1213-1231. doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04343.x
- Hanasoge, S. M., & Branicki, M. (2012). Interpreting Cross-correlations of One-bit Filtered Seismic Noise. *Geophysical Journal International*.
- Hartigan, J., & Wong, M. (1979). Algorithm AS 136: A K-means clustering algorithm. *Applied Statistic*, 100-108.

- Hernández-Hernández, R. (2019). *Estudio de ruido sísmico ambiental utilizando interferometría sísmica de la componente radial y cocientes espectrales, para la obtención de un modelo 3D de velocidades de ondas de corte al sur de la subcuenca de Chalco*. Ciudad de México: Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería UNAM. Retrieved from 132.248.9.195/ptd2019/noviembre/0797797/Index.html
- Herrmann, R. B. (2013). Computer programs in seismology: An evolving tool for instruction and research. *Seismological Research Letters*, *84*, 1081-1088. doi:10.1785/0220110096
- Kagawa, T. (1996).) Estimation of velocity structures beneath Mexico city using microtremor array data. Acapulco, Mexico. *Proceeding of the 11th World Conference on Earthquake Engineering*. . Acapulco, Gro. México.
- Kalkan , E. (2020). *SMOOTHING FUNCTION FOR FOURIER AMPLITUDE SPECTRUM*. Retrieved from MATLAB Central File Exchange: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/70217-smoothing-function-for-fourier-amplitude-spectrum>
- Kassambara, A. (2020, 09 17). *K-Means Clustering in R: Algorithm and Practical Examples*. Retrieved from <https://www.datanovia.com/en/lessons/k-means-clustering-in-r-algorithm-and-practical-examples/>
- Konno, K., & Ohmachi, T. (1998). Ground-Motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio between Horizontal and Vertical Components of Microtremor. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *88*(1), 228-241.
- Kramer, S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Washington University, Prentice-Hall international series in civil engineering and engineering mechanics.
- Kumari, S. (2009). *Fast ICA for blind source separation and its implementation*. Rourkela, India: National Institute of Technology Rourkela.
- Larivière, V., & Gingras, Y. (2011). Averages of ratios vs. ratios of averages: An empirical analysis of four levels of aggregation. *Journal of Informetrics*, *5*(3), 392-399. doi:10.1016/j.joi.2011.02.001
- Lermo, J., Rodríguez, M., & Singh, S. K. (1988). The Mexico earthquake of September 19, 1985— natural period of sites in the valley of Mexico from microtremor measurements and strong motion data. *Earthquake Spectra*, *4*(4), 805-814.
- Lévêque, J., Rivera, L., & Wittlinger, G. (1993). On the use of the checker-board test to assess the resolution of tomographic inversions. *Geophysical Journal International*, *115*(1), 313-318. doi:10.1111/j.1365-246X.1993.tb05605.x
- Liu, X., & Ben-Zion, Y. (2016). Estimating correlations of neighbouring frequencies in ambient seismic noise. *Geophysical Journal International*, *206*, 1065-1075. doi:10.1093/gji/ggw196
- Liu, X., Beroza, G., & Nakata, N. (2019). Isolating and suppressing the spurious non-diffuse contributions to ambient seismic field correlations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*(124). doi:10.1029/2019JB017297

- Lobkis, O., & Weaver, R. (2001). On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field. *Theoretical and Applied Mechanics*, 110(3011). doi:10.1121/1.1417528
- Martínez, J., Lermo, J., Vergara-Huerta, F., & Ramos, E. (2015). Avances en la zonificación sísmica de la Ciudad de México y zona de Chalco, Edo. de Mex., propuesta de nuevo mapa de periodos dominantes para las NTC para diseño por sismo del reglamento del D.F. XX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Acapulco, Gro., México.
- Mendoza, L., Acosta, J., Huerta, G., Reyes, A., & Otero, J. (1992). Mapa de periodos dominantes de la vibración ambiental de los suelos blandos del Valle de México. *Ingeniería Sísmica*(43), 19-58.
- Menke, W. (2012). *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*. Amsterdam: Elsevier.
- Moore, B. (2020, Abril 23). *MATLAB Central File Exchange*. Retrieved from <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/38300-pca-and-ica-package>
- Morales-Casique, E., Arce, J. L., Lezama, J. L., & Escolero, O. (2018). *Análisis de la estratigrafía y las características hidrogeológicas de los estratos profundos de conforman el subsuelo de la Cuenca de México a partir de la perforación de dos pozos profundos, uno a 2000 m y otro a 1570 m denominados Agrícola Oriental 2B*. CDMX: Instituto de Geología, UNAM.
- Morales-Casique, E., Arce, J. L., Lezama, J. L., & Escolero, O. (2018). *Análisis de la estratigrafía y las características hidrogeológicas de los estratos profundos que conforman el subsuelo de la Cuenca de México a partir de la perforación a 2000 m del pozo profundo denominado "Santa Catarina 3A*. CDMX: Instituto de Geología, UNAM.
- Nolet, G. (1985). Solving or resolving inadequate and noisy tomographic systems. *Journal of Computational Physics*, 61, 463 - 482. doi:10.1016/0021-9991(85)90075-0
- NTC-DC. (2017). Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de cimentaciones. *Gaceta Oficial de la Ciudad de México*. 15 de diciembre 2017.
- NTC-DS. (2017). Normas técnicas complementarias para diseño por sismo. *Gaceta Oficial de la Ciudad de México*. 15 de diciembre de 2017.
- OCDE. (2015). *OECD Territorial Reviews: Valle de México, Mexico*. Retrieved Abril 2020, from <https://www.oecd.org/regional/oecd-territorial-reviews-valle-de-mexico-mexico-9789264245174-en.htm>
- Okada, H. (2003). *The Microtremor Survey Method*. U.S.A.: SEG, Geophysical monographs series no. 12.
- Oliver, G. (2015). Seismic imaging and monitoring in mines with ambient seismic noise correlations. *Phd. Thesis. Université Grenoble Alpes*, 130 pp.
- Paige, C. C., & Saunders, M. A. (1982). LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 8, 43-71. doi:10.1145/355984.355989

- Pérez-Cruz, G. (1988). Estudio sismológico de reflexión del subsuelo de la Ciudad de México. *Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. UNAM. México.*
- Peterson, J. (1993). *Observations and Modeling of Seismic Background Noise*. USGS, Open-File report.
- Piña-Flores, J., Perton, M., García-Jerez, A., Carmona, E., Luzón, F., Molina-Villegas, J., & Sánchez-Sesma, F. (2017). The inversion of spectral ratio H/V in a layered system using the diffuse field assumption (DFA). *Geophysical Journal International*, 208, 577-588. doi:10.1093/gji/ggw416
- Ramos-Martínez, J., Chávez-García, F. J., Romero-Jiménez, E., Rodríguez-Zúñiga, J. L., & Gómez-González, J. L. (1997). Site effects in Mexico City: Constraints from surface wave inversion of shallow refraction data. *Journal of Applied Geophysics*(36), 157-165.
- Rao, T. J. (2002). Mean of ratios or ratio of means or both? *Journal of Statistical Planning and Inference*, 102(1), 129-138. doi:10.1016/S0378-3758(01)00181-1
- Rawlinson, N., & Sambridge, M. (2003). Seismic traveltimes tomography of the crust and lithosphere. *Advances in Geophysics*, 46(12), 81-198. doi:10.1016/S0065-2687(03)46002-0
- Sabra, K., Gerstoft, P., Roux, P., & Kuperman, K. (2005). Surface wave tomography from microseisms in Southern California. *Geophysical Research Letters*, Vol. 32. doi:10.1029/2005GL023155
- Sánchez-Sesma, F. J., Rodríguez, M., Iturrarán-Viveros, U., Luzón, F., Campillo, M., Margerin, L., . . . Rodríguez-Castellanos, A. (2011). A theory for microtremor H/V spectral ratio: application for a layered medium. *Geophysical Journal International*, 186, 221-225.
- SESAME. (2004). *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation*. Research Report WP12.
- Shapiro, N., & Campillo, M. (2004). Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise. *Geophysical Research Letters*, Vol. 31. doi:10.1029/2004GL019491
- Shapiro, N., Campillo, M., Stehly, L., & Ritzwoller, M. (2005). High-Resolution Surface-Wave Tomography from Ambient Seismic Noise. *Science*. doi:10.1126/science.1108339
- Shearer, P. (2009). *Introduction to seismology*. New York: Cambridge University Press.
- Singh, S. K., Mena, E., & Castro, R. (1988). Some aspects of source characteristics of the 19 september 1985 michoacan earthquake and ground motion amplification in and near Mexico city from strong motion data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78(2), 451-477.
- Stein, S., & Wysession, M. (2003). *An introduction to seismology, earthquakes and earth structure*. Oxford, U.K: Blackwell.
- Team, R. C. (2020). R: A language and environment for statistical computing. *R Foundation for Statistical Computing*. Retrieved from <https://www.R-project.org/>.

- UNAM Seismology group. (1986). The September 1985 Michoacán earthquakes: Aftershock distribution and history of rupture. *Geophys. Res. Lett.*, *13*, 573-576.
- Vijayendra, K. V., Nayack, S., & Prasad, S. K. (2014). An Alternative Method to Estimate Fundamental Period of Layered Soil Deposit. *Indian Geotechnical Society*, *45*(2), 192-199. doi:10.1007/s40098-014-0121-7
- Weaver, R. L., & Lobkis, O. I. (2001). Diffuse fields in open systems and the emergence of the Green's function. *Journal Acustics Society of America*, *116*(5), 2731. doi:10.1121/1.1810232
- Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. New York: Springer-Verlag. Retrieved from <https://ggplot2.tidyverse.org>.

Anexo I. Funciones de densidad de energía (PSD) en cada arreglo.

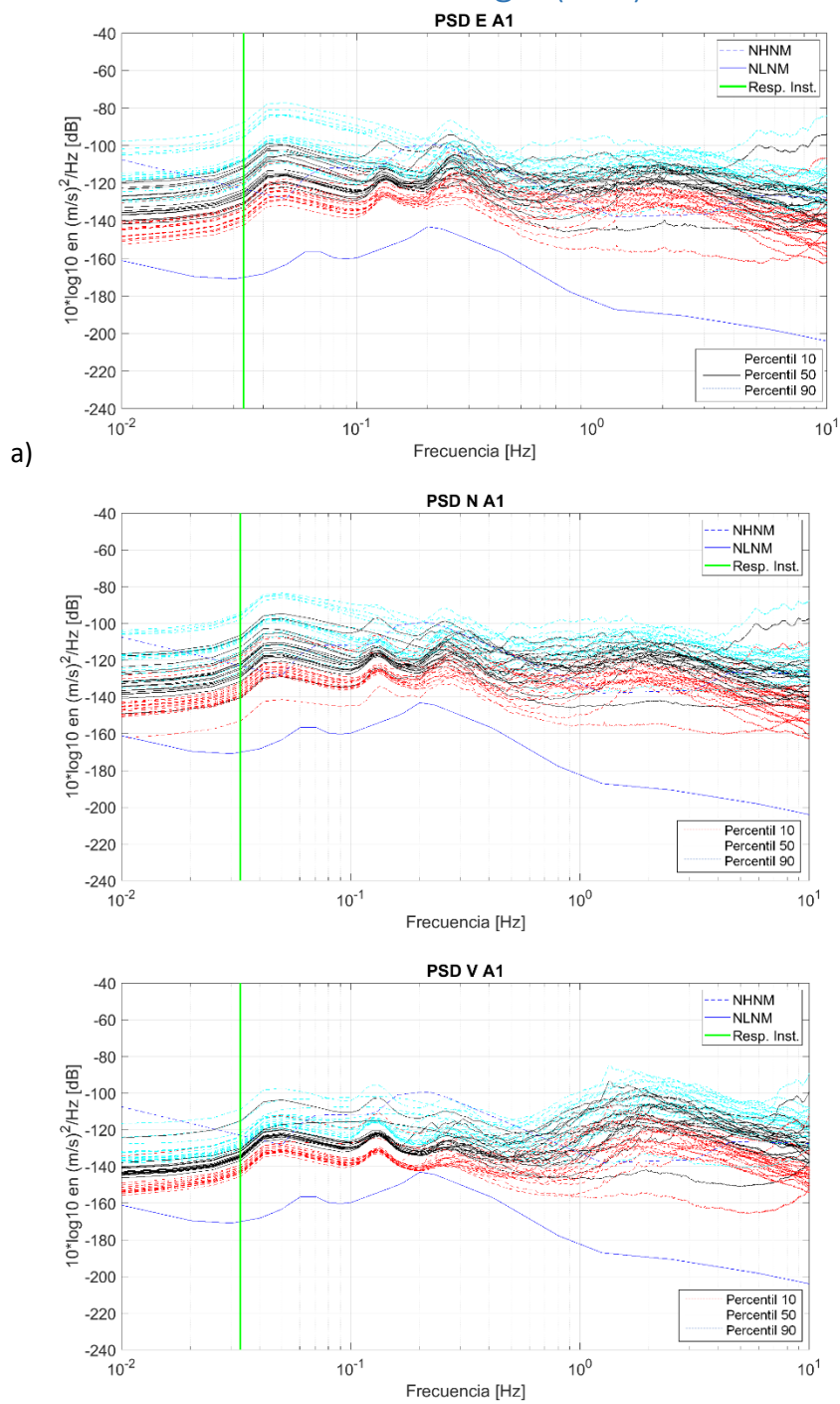


Figura I_1. Funciones de densidad de energía de los registros que forman el arreglo A1. En negro, el percentil 50; las líneas punteadas en color cian representan el percentil 90 y las líneas punteadas rojas el percentil 10. Como referencia en color azul se muestran los niveles de ruido

NHNM y NLNM. La línea verde vertical representa el límite inferior de la respuesta instrumental según el fabricante. a) Componente este, b) Componente norte, c) Componente vertical.

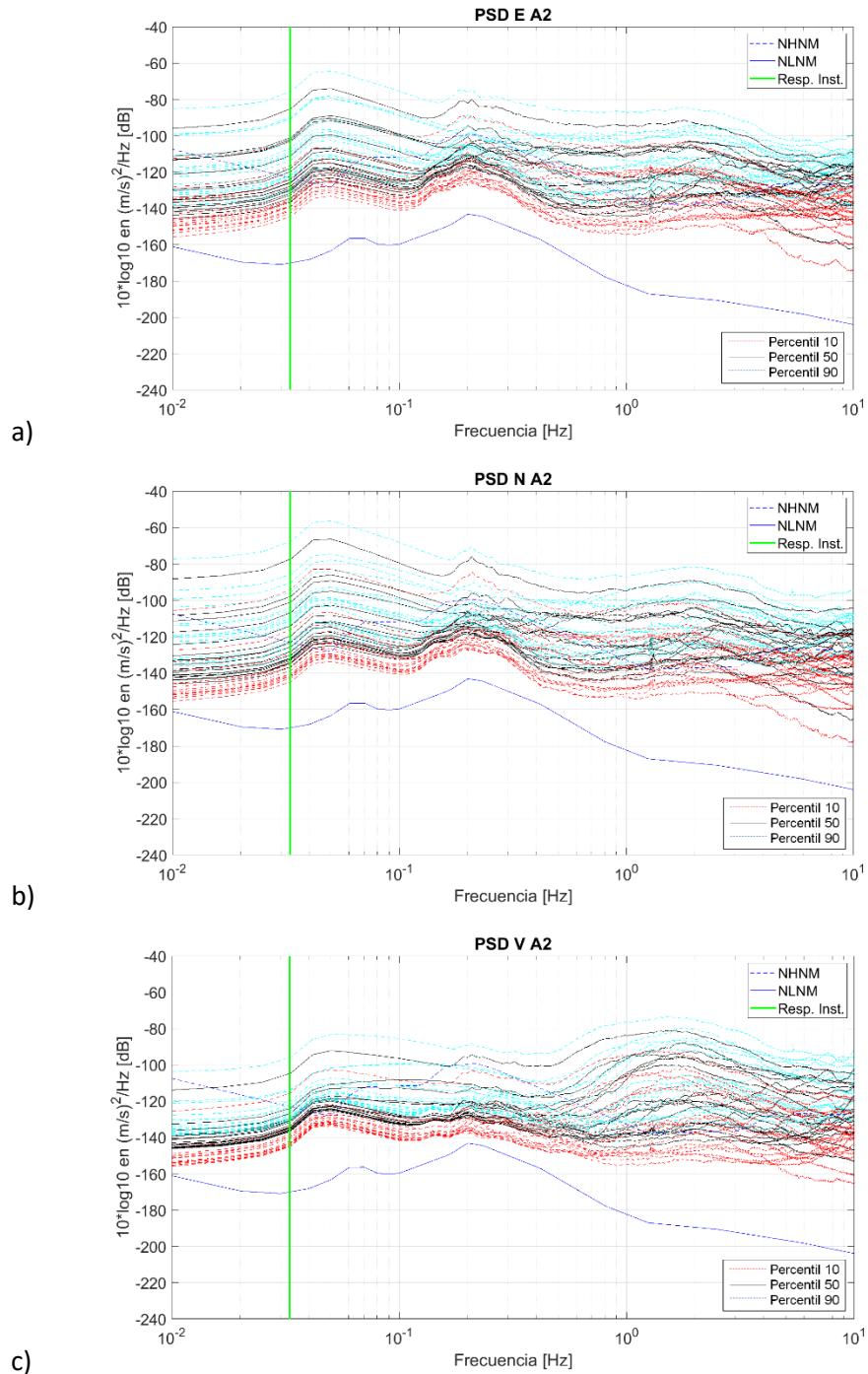


Figura I_2. Funciones de densidad de energía de los registros que forman el arreglo A2. En negro, el percentil 50; las líneas punteadas en color cian representan el percentil 90 y las líneas

punteadas rojas el percentil 10. Como referencia en color azul se muestran los niveles de ruido NHNM y NLNM. La línea verde vertical representa el límite inferior de la respuesta instrumental según el fabricante. a) Componente este, b) Componente norte, c) Componente vertical.

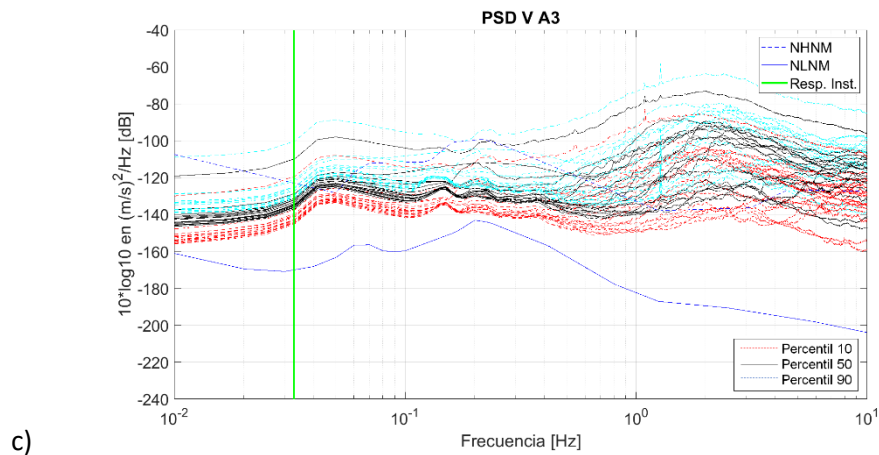
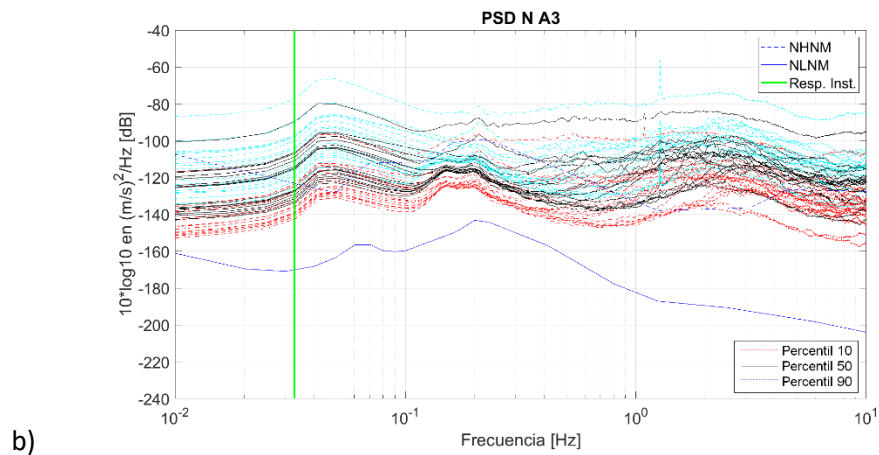
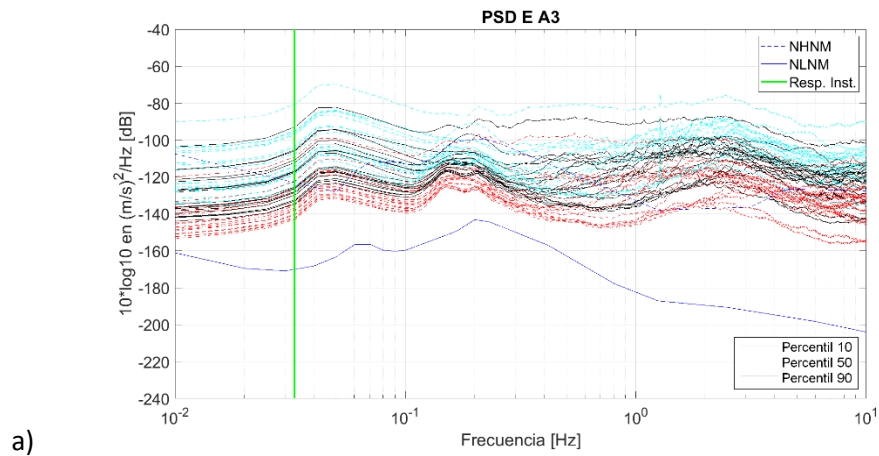
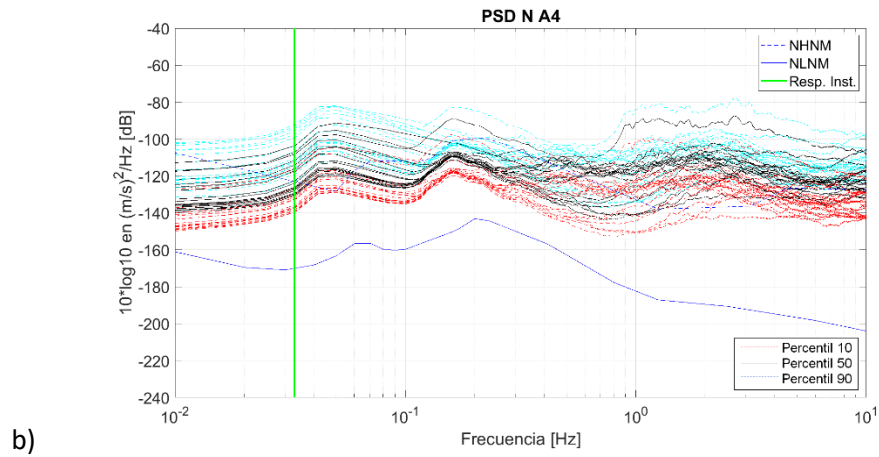
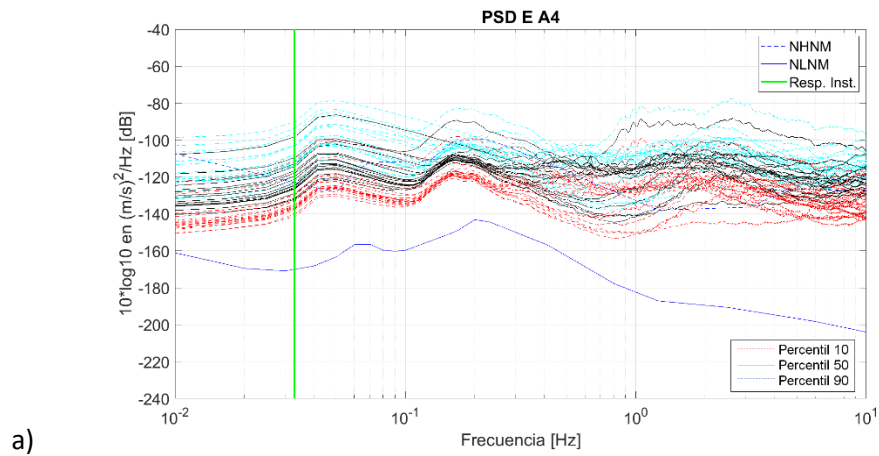
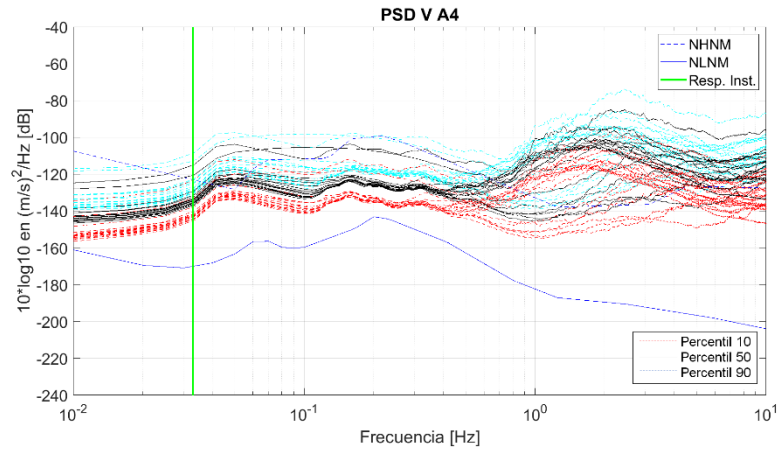


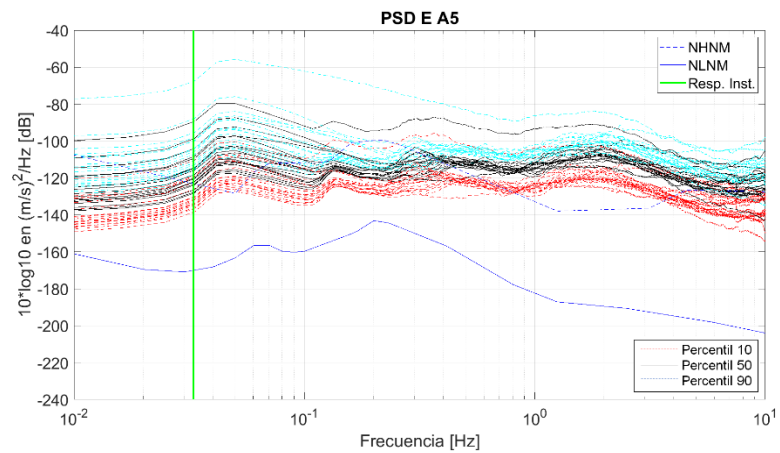
Figura I_3. Funciones de densidad de energía de los registros que forman el arreglo A3. En negro, el percentil 50; las líneas punteadas en color cian representan el percentil 90 y las líneas punteadas rojas el percentil 10. Como referencia en color azul se muestran los niveles de ruido NHNM y NLNM. La línea verde vertical representa el límite inferior de la respuesta instrumental según el fabricante. a) Componente este, b) Componente norte, c) Componente vertical.





c)

Figura I_4. Funciones de densidad de energía de los registros que forman el arreglo A4. En negro, el percentil 50; las líneas punteadas en color cian representan el percentil 90 y las líneas punteadas rojas el percentil 10. Como referencia en color azul se muestran los niveles de ruido NHNM y NLNM. La línea verde vertical representa el límite inferior de la respuesta instrumental según el fabricante. a) Componente este, b) Componente norte, c) Componente vertical.



a)

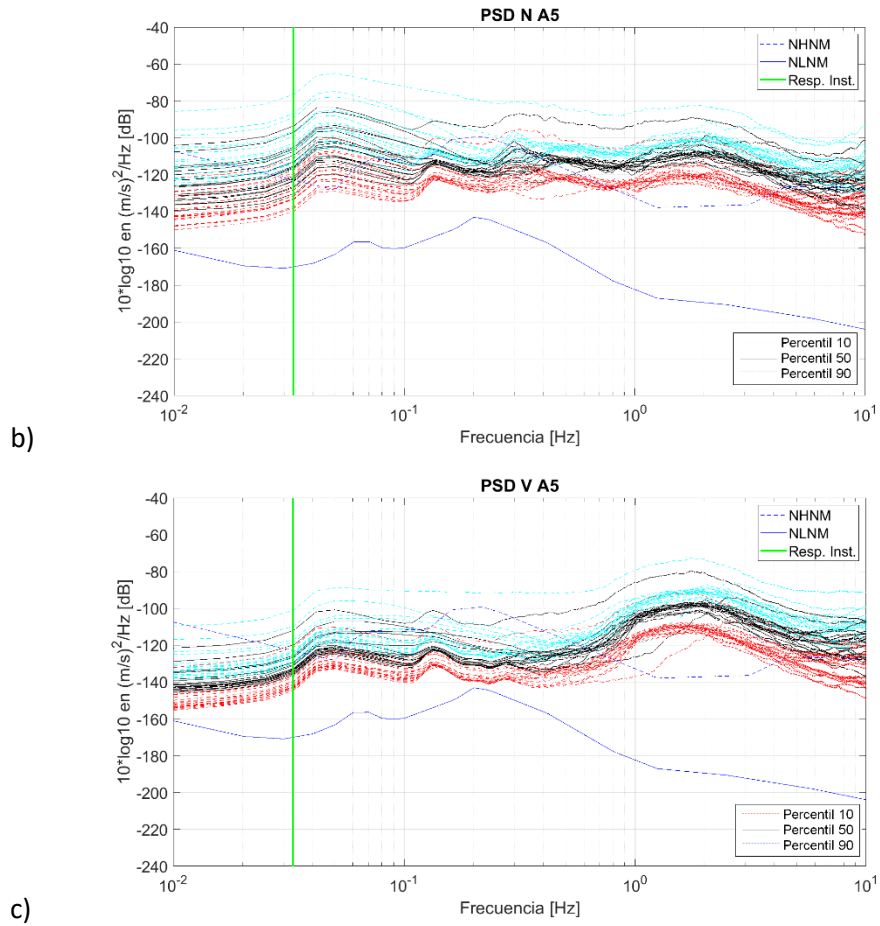


Figura I_5. Funciones de densidad de energía de los registros que forman el arreglo A5. En negro, el percentil 50; las líneas punteadas en color cian representan el percentil 90 y las líneas punteadas rojas el percentil 10. Como referencia en color azul se muestran los niveles de ruido NHNM y NLNM. La línea verde vertical representa el límite inferior de la respuesta instrumental según el fabricante. a) Componente este, b) Componente norte, c) Componente vertical.

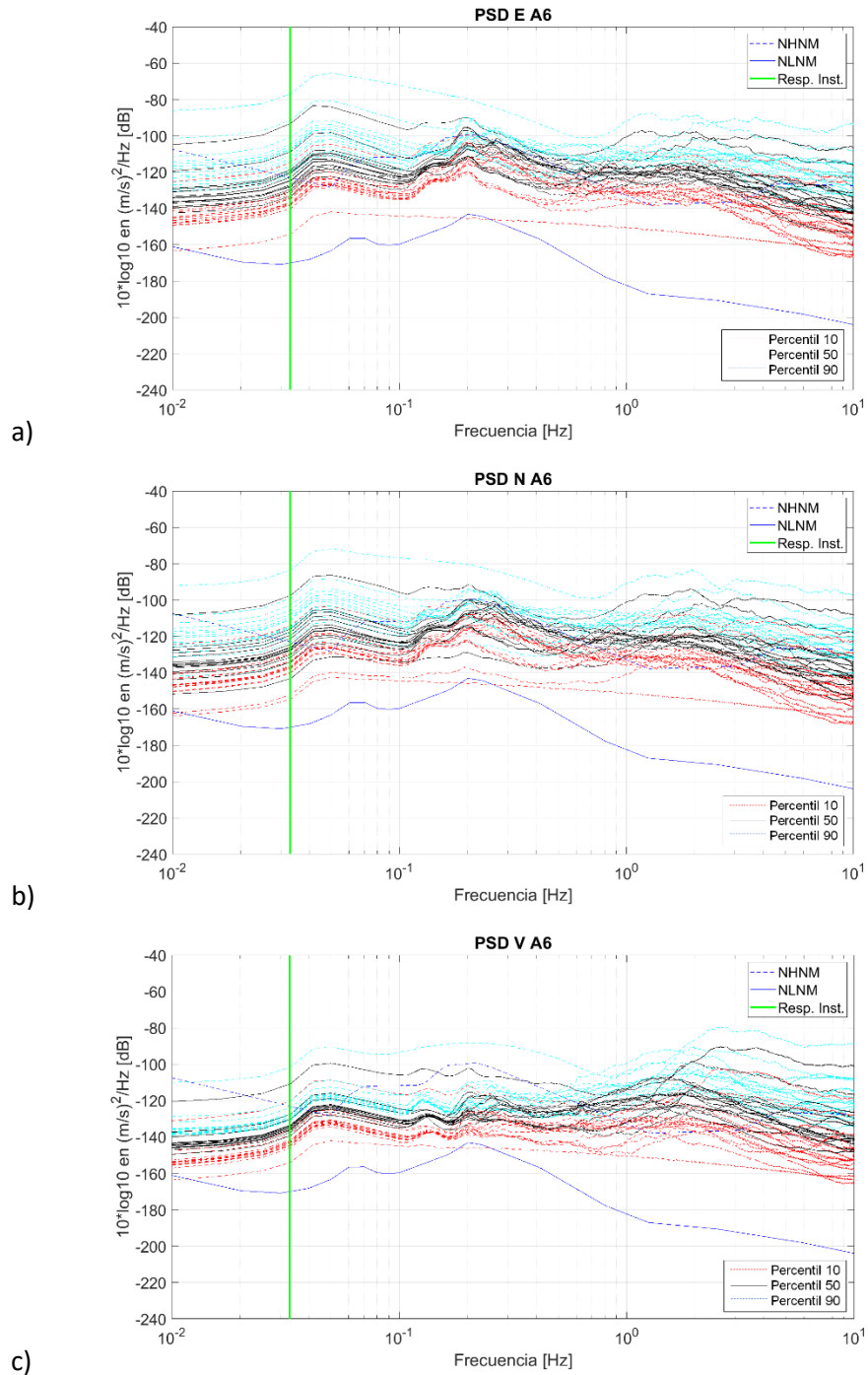


Figura I_6. Funciones de densidad de energía de los registros que forman el arreglo A6. En negro, el percentil 50; las líneas punteadas en color cian representan el percentil 90 y las líneas punteadas rojas el percentil 10. Como referencia en color azul se muestran los niveles de ruido NHNM y NLNM. La línea verde vertical representa el límite inferior de la respuesta instrumental según el fabricante. a) Componente este, b) Componente norte, c) Componente vertical.

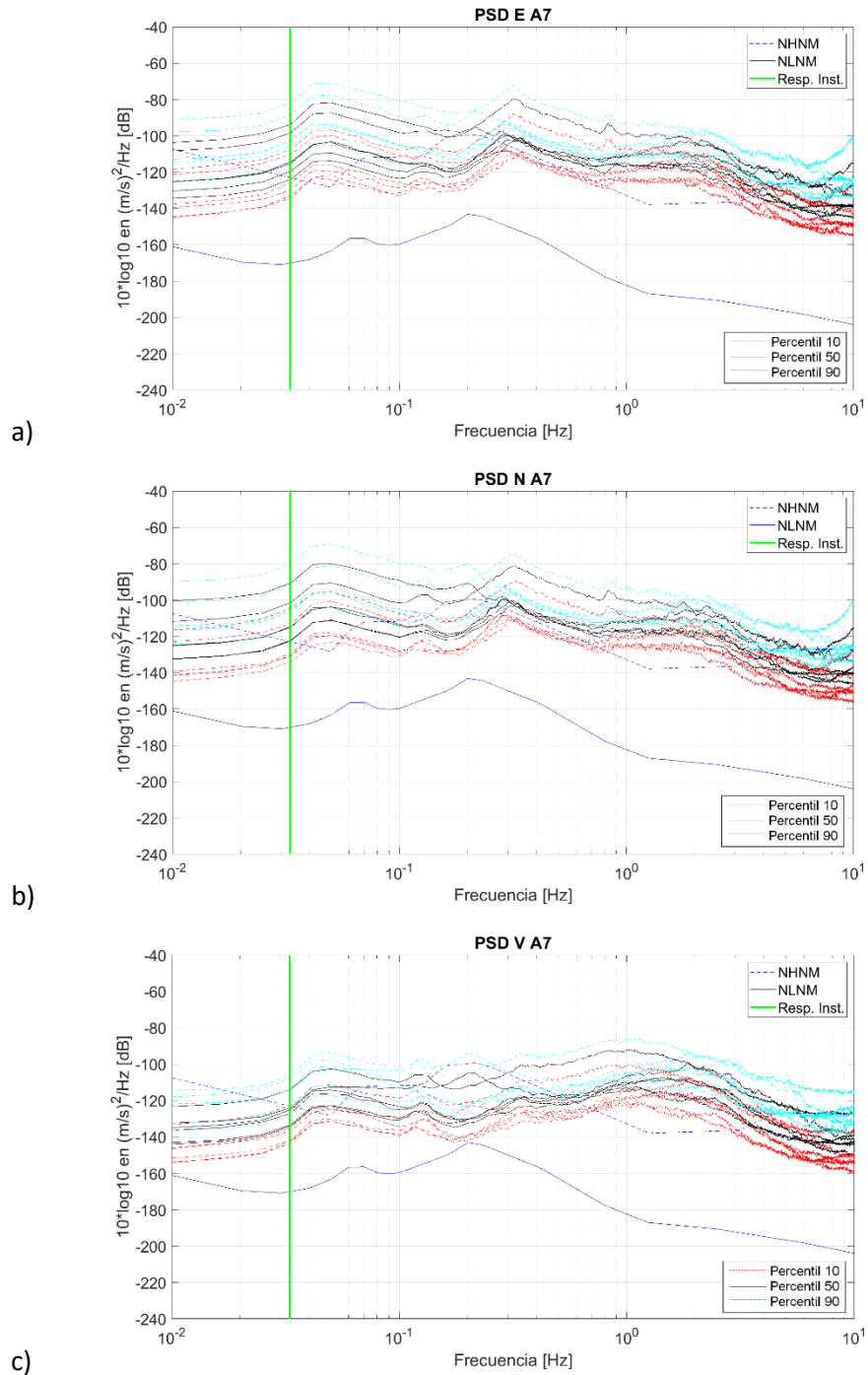


Figura I_7. Funciones de densidad de energía de los registros que forman el arreglo A7. En negro, el percentil 50; las líneas punteadas en color cian representan el percentil 90 y las líneas punteadas rojas el percentil 10. Como referencia en color azul se muestran los niveles de ruido NHNM y NLNM. La línea verde vertical representa el límite inferior de la respuesta instrumental según el fabricante. a) Componente este, b) Componente norte, c) Componente vertical.

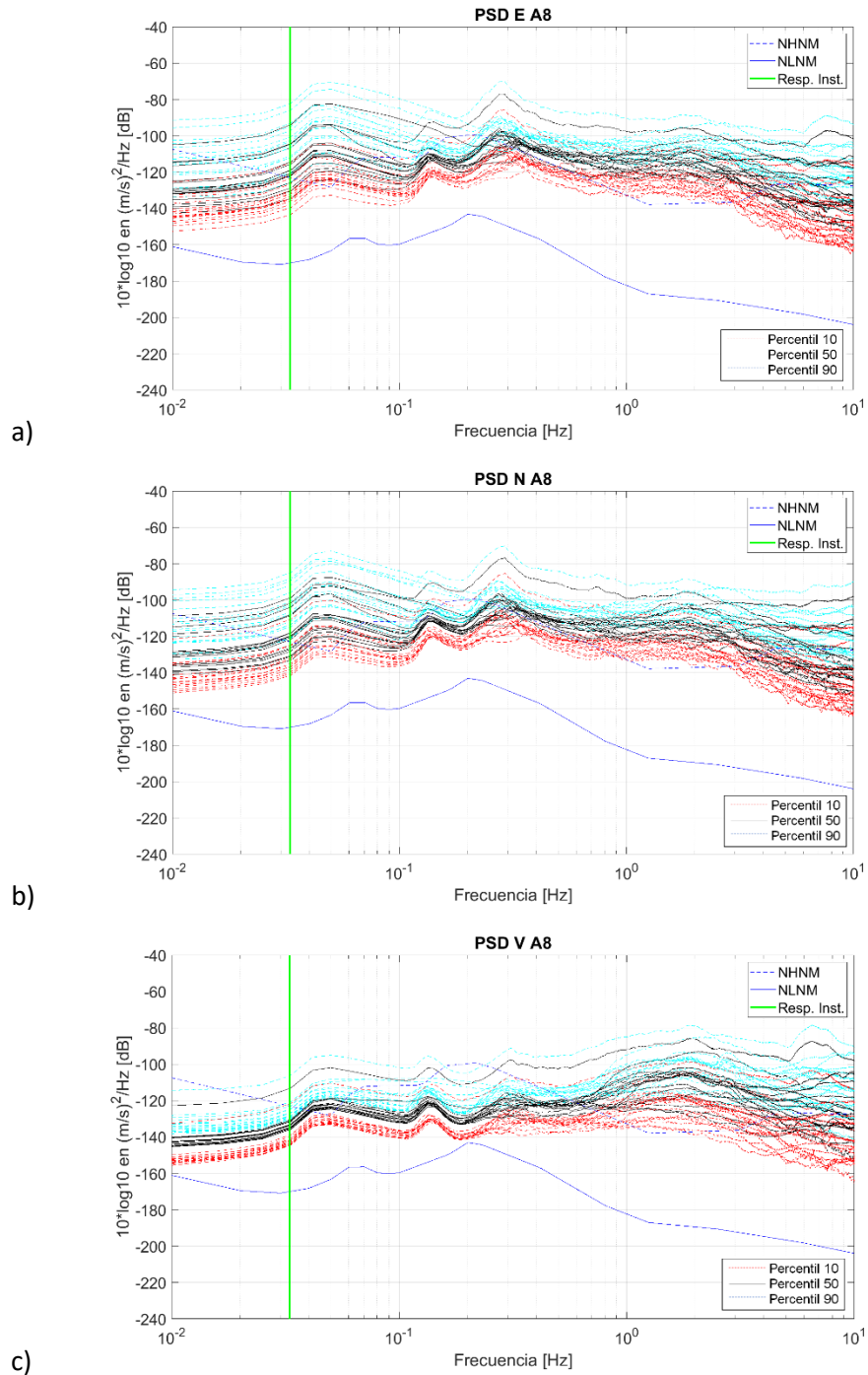


Figura I_8. Funciones de densidad de energía de los registros que forman el arreglo A8. En negro, el percentil 50; las líneas punteadas en color cian representan el percentil 90 y las líneas punteadas rojas el percentil 10. Como referencia en color azul se muestran los niveles de ruido NNNM y NLNM. La línea verde vertical representa el límite inferior de la respuesta instrumental según el fabricante. a) Componente este, b) Componente norte, c) Componente vertical.

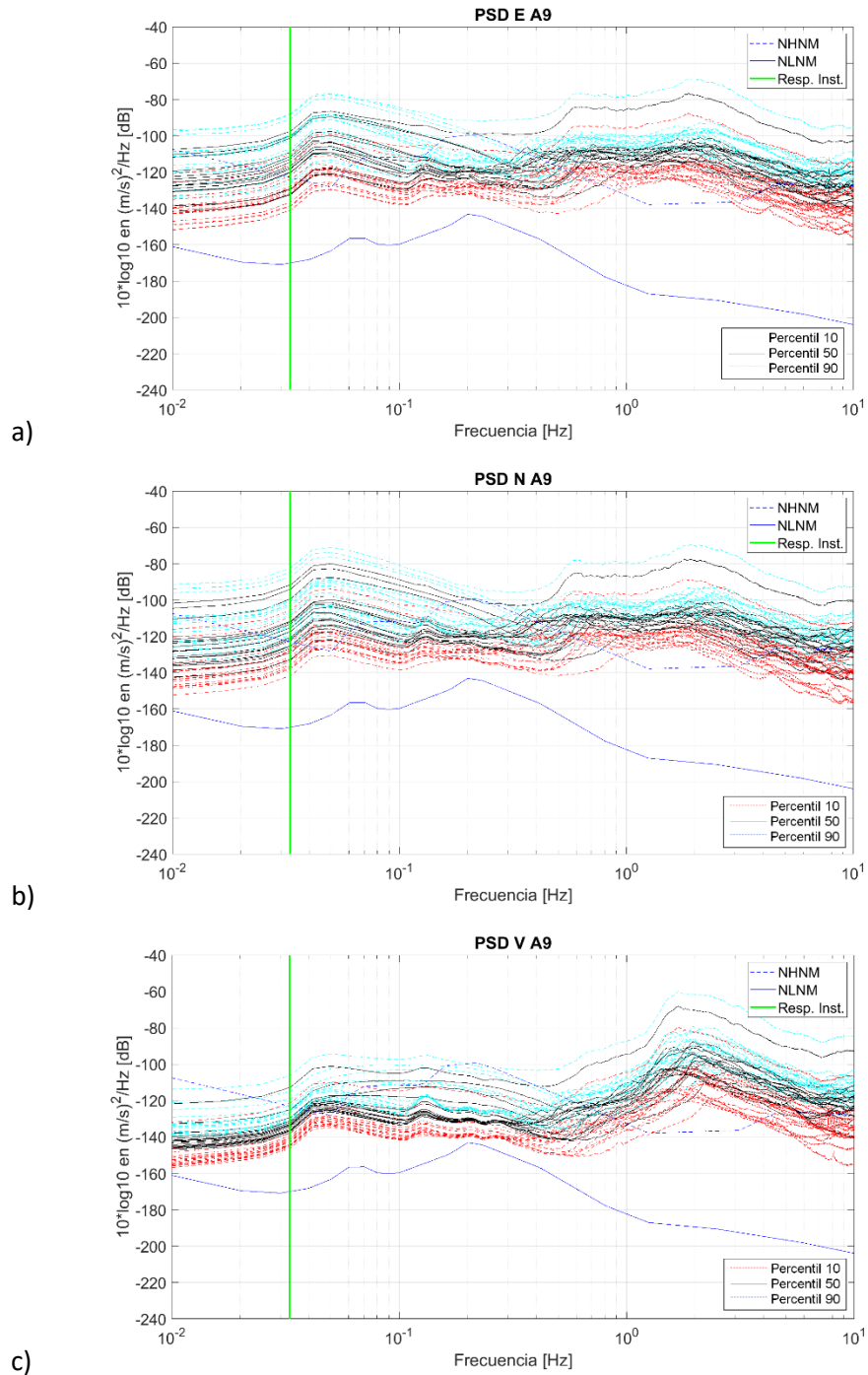


Figura I_9. Funciones de densidad de energía de los registros que forman el arreglo A9. En negro, el percentil 50; las líneas punteadas en color cian representan el percentil 90 y las líneas punteadas rojas el percentil 10. Como referencia en color azul se muestran los niveles de ruido NHNM y NLNM. La línea verde vertical representa el límite inferior de la respuesta instrumental según el fabricante. a) Componente este, b) Componente norte, c) Componente vertical.

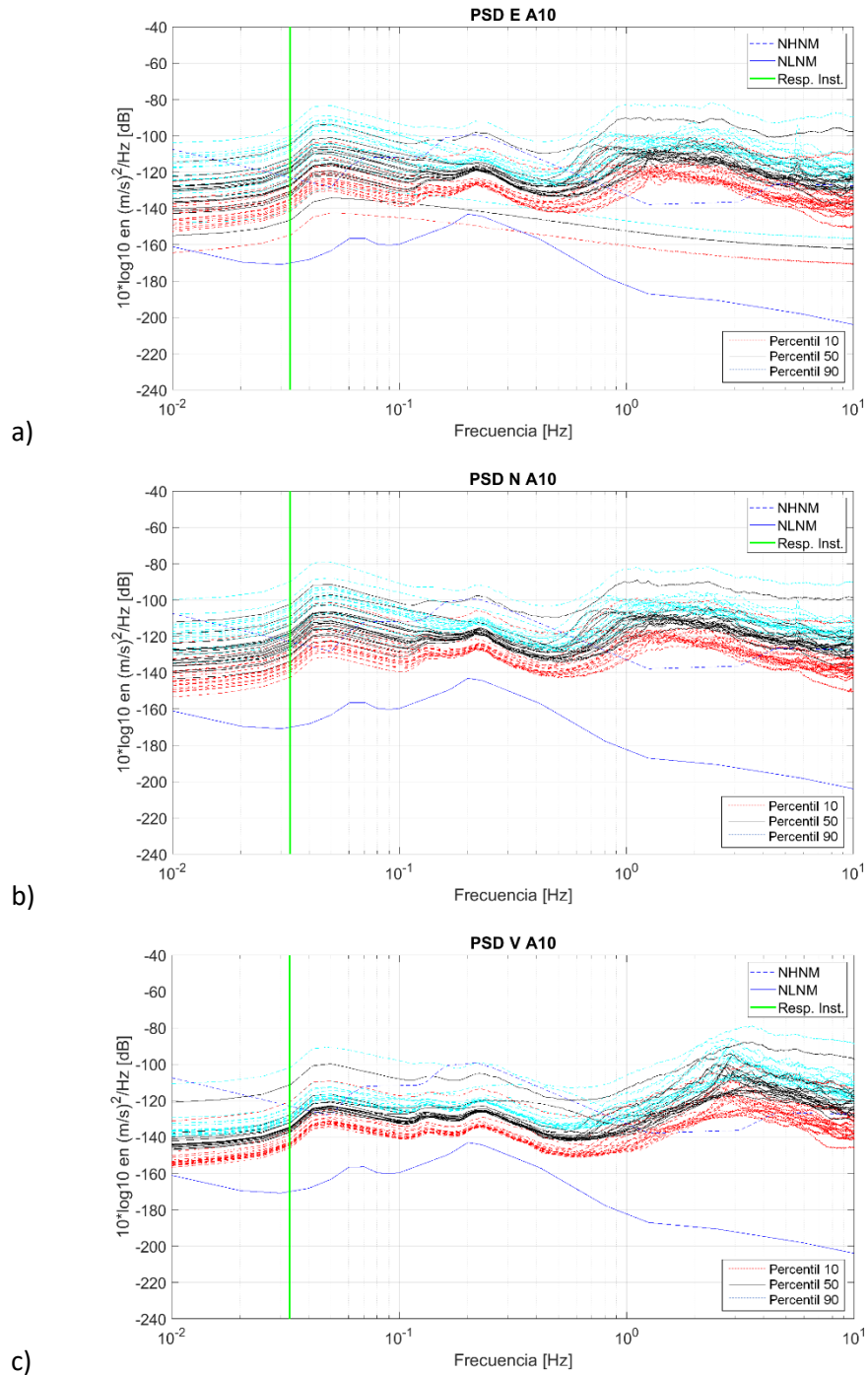


Figura I_10. Funciones de densidad de energía de los registros que forman el arreglo A10. En negro, el percentil 50; las líneas punteadas en color cian representan el percentil 90 y las líneas punteadas rojas el percentil 10. Como referencia en color azul se muestran los niveles de ruido NHNM y NLNM. La línea verde vertical representa el límite inferior de la respuesta instrumental según el fabricante. a) Componente este, b) Componente norte, c) Componente vertical.

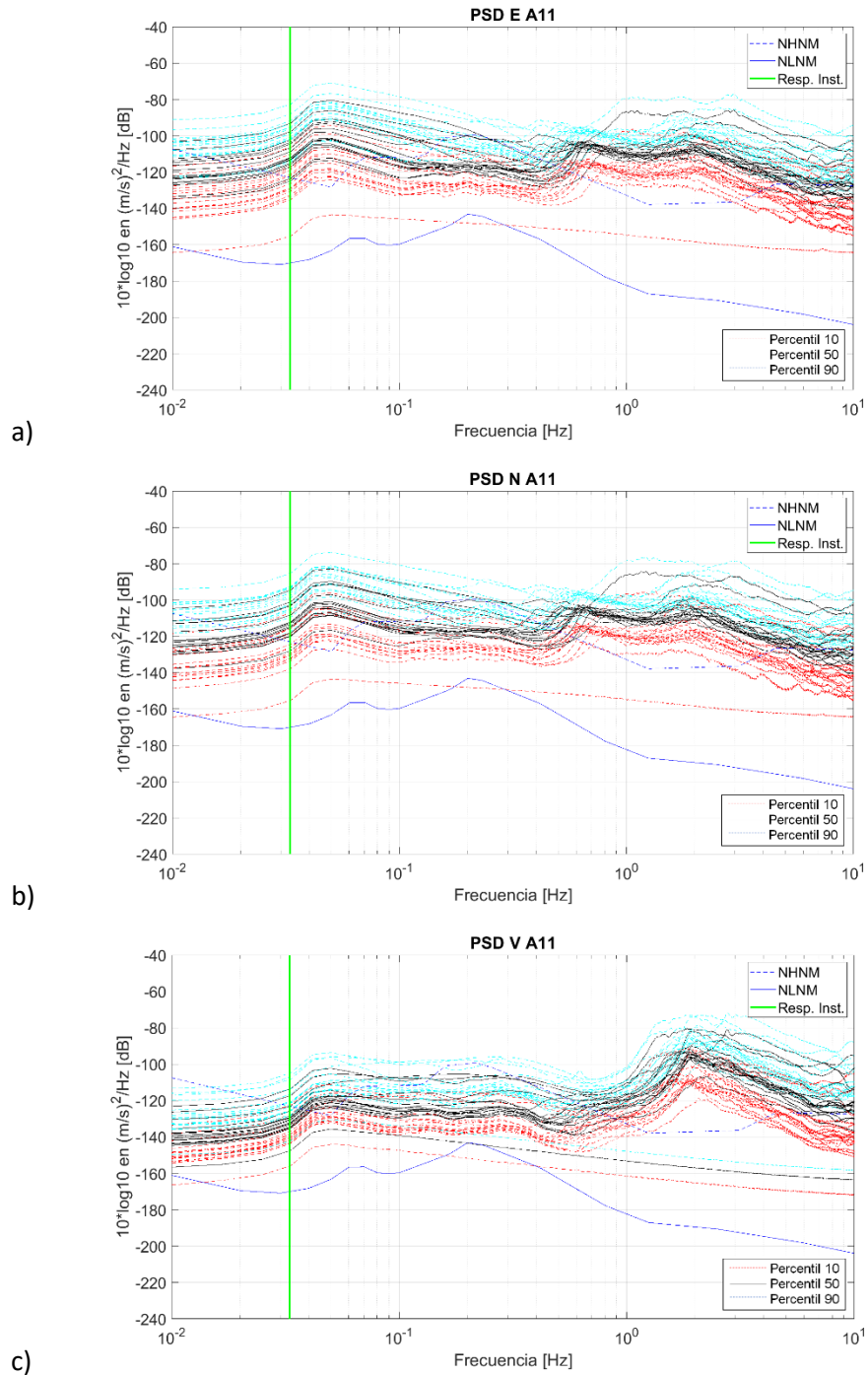


Figura I_11. Funciones de densidad de energía de los registros que forman el arreglo A11. En negro, el percentil 50; las líneas punteadas en color cian representan el percentil 90 y las líneas punteadas rojas el percentil 10. Como referencia en color azul se muestran los niveles de ruido NHHM y NLNM. La línea verde vertical representa el límite inferior de la respuesta instrumental según el fabricante. a) Componente este, b) Componente norte, c) Componente vertical.

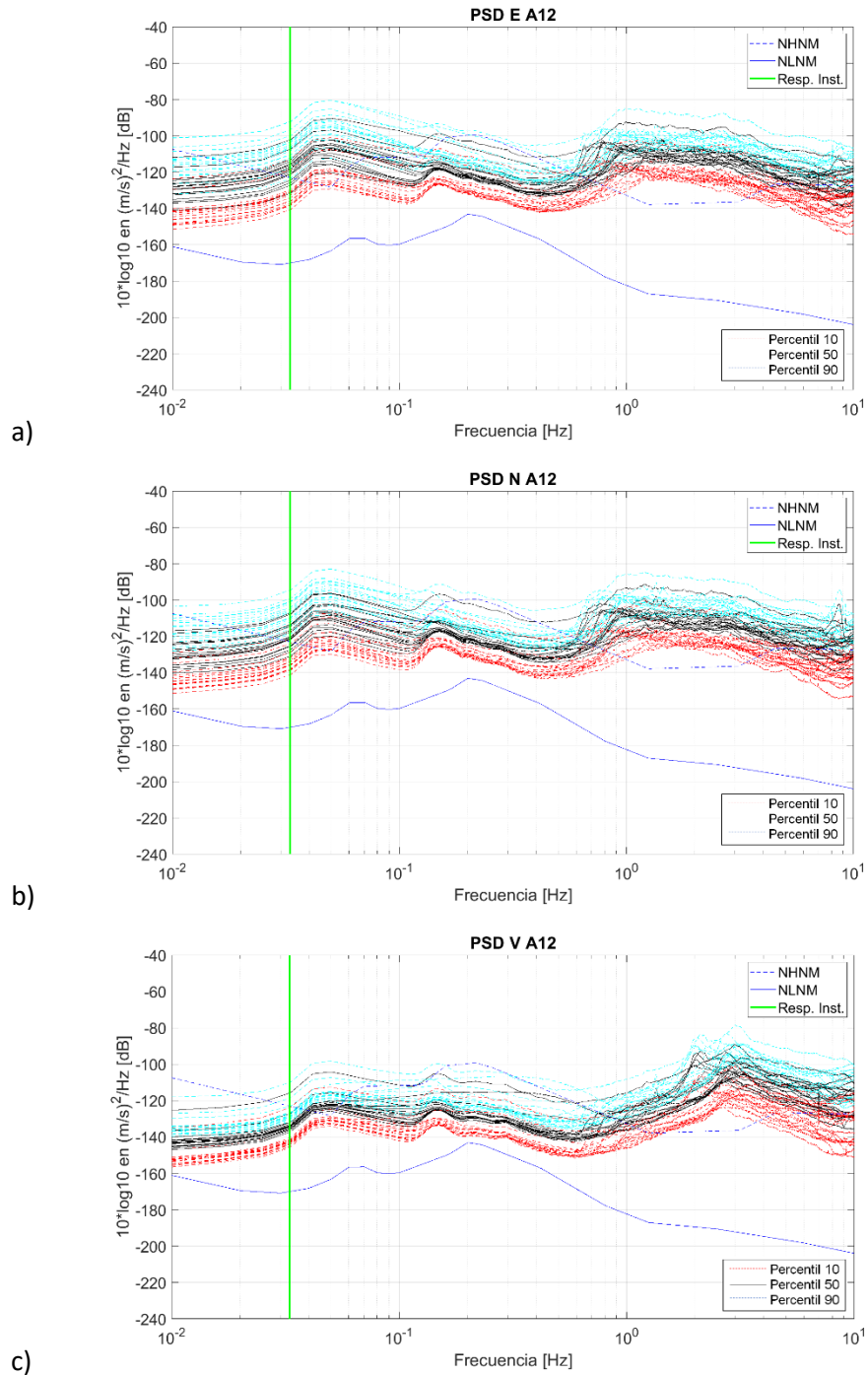


Figura I_12. Funciones de densidad de energía de los registros que forman el arreglo A12. En negro, el percentil 50; las líneas punteadas en color cian representan el percentil 90 y las líneas punteadas rojas el percentil 10. Como referencia en color azul se muestran los niveles de ruido NHNM y NLNM. La línea verde vertical representa el límite inferior de la respuesta instrumental según el fabricante. a) Componente este, b) Componente norte, c) Componente vertical.

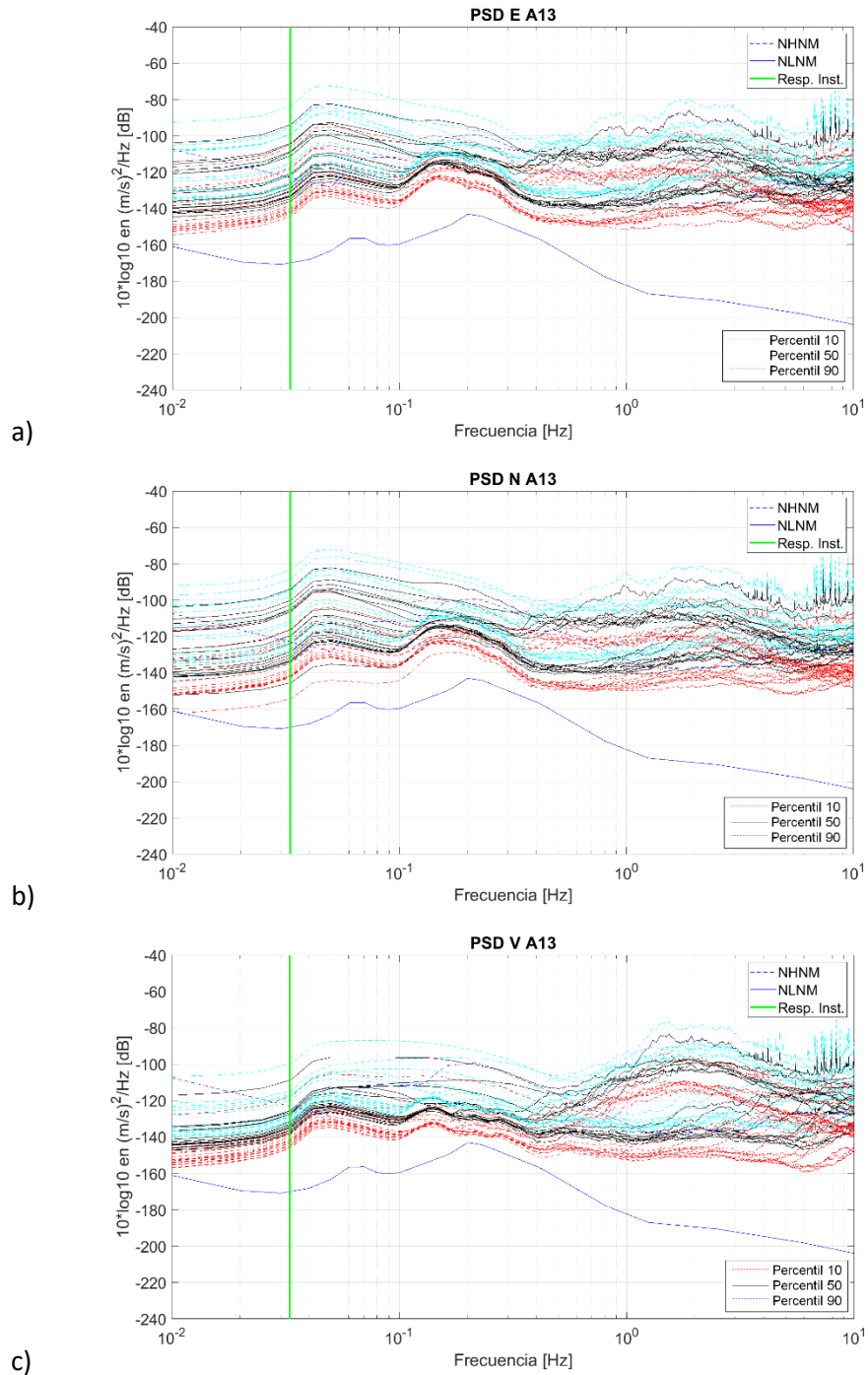


Figura I_13. Funciones de densidad de energía de los registros que forman el arreglo A13. En negro, el percentil 50; las líneas punteadas en color cian representan el percentil 90 y las líneas punteadas rojas el percentil 10. Como referencia en color azul se muestran los niveles de ruido NHNM y NLNM. La línea verde vertical representa el límite inferior de la respuesta instrumental según el fabricante. a) Componente este, b) Componente norte, c) Componente vertical.

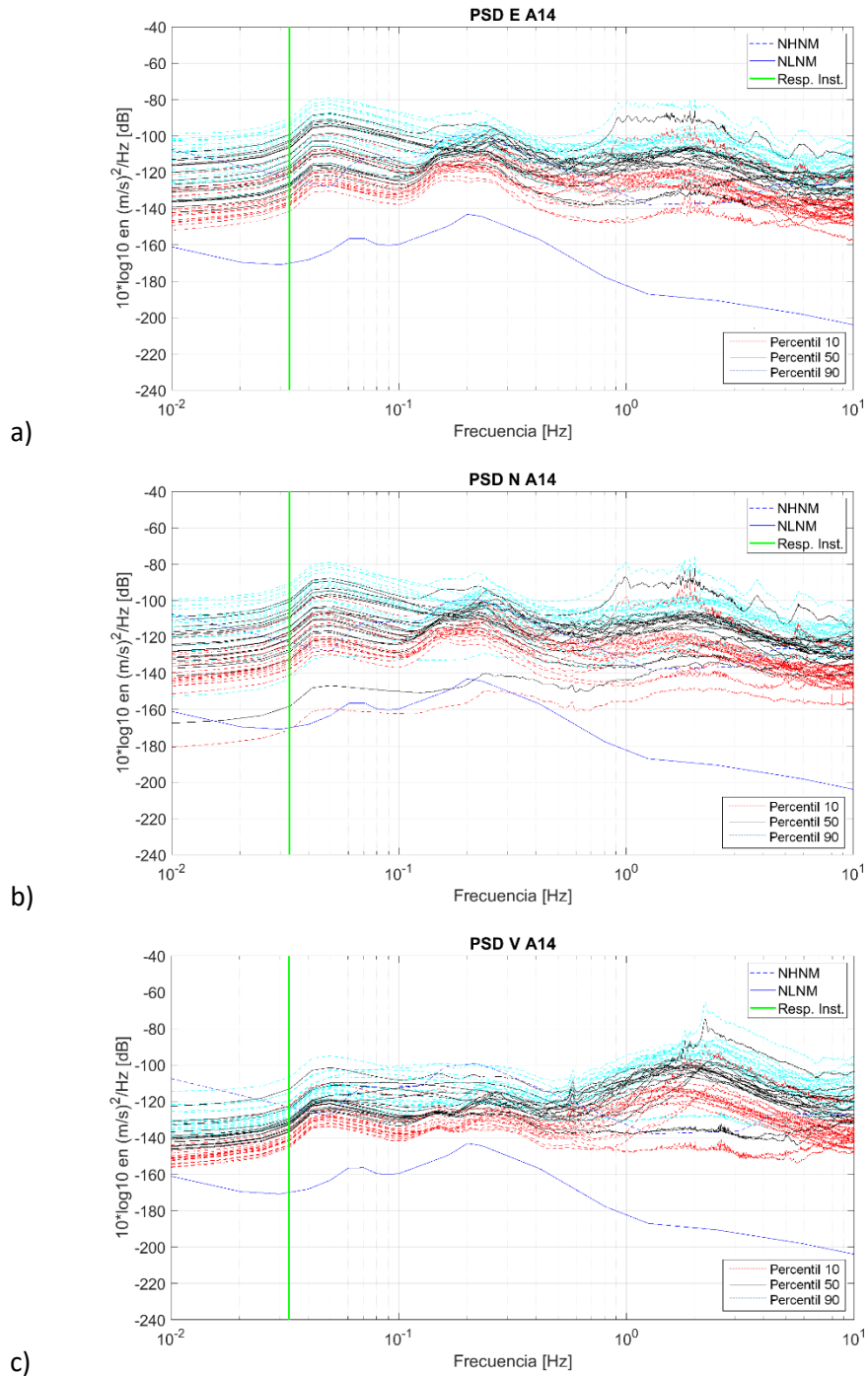


Figura I_14. Funciones de densidad de energía de los registros que forman el arreglo A14. En negro, el percentil 50; las líneas punteadas en color cian representan el percentil 90 y las líneas punteadas rojas el percentil 10. Como referencia en color azul se muestran los niveles de ruido NHNM y NLNM. La línea verde vertical representa el límite inferior de la respuesta instrumental según el fabricante. a) Componente este, b) Componente norte, c) Componente vertical.

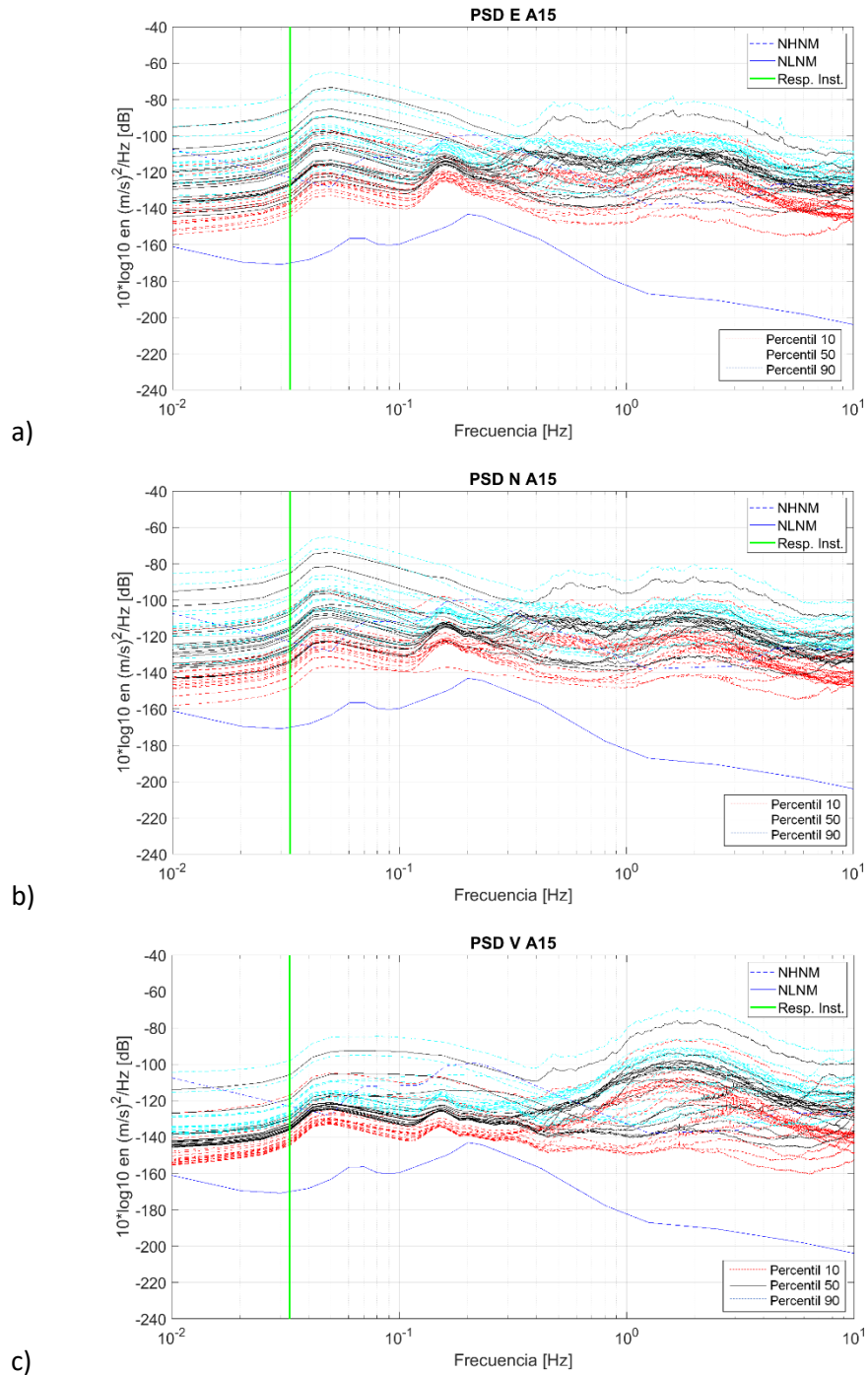


Figura I_15. Funciones de densidad de energía de los registros que forman el arreglo A15. En negro, el percentil 50; las líneas punteadas en color cian representan el percentil 90 y las líneas punteadas rojas el percentil 10. Como referencia en color azul se muestran los niveles de ruido NHNM y NLNM. La línea verde vertical representa el límite inferior de la respuesta instrumental según el fabricante. a) Componente este, b) Componente norte, c) Componente vertical.

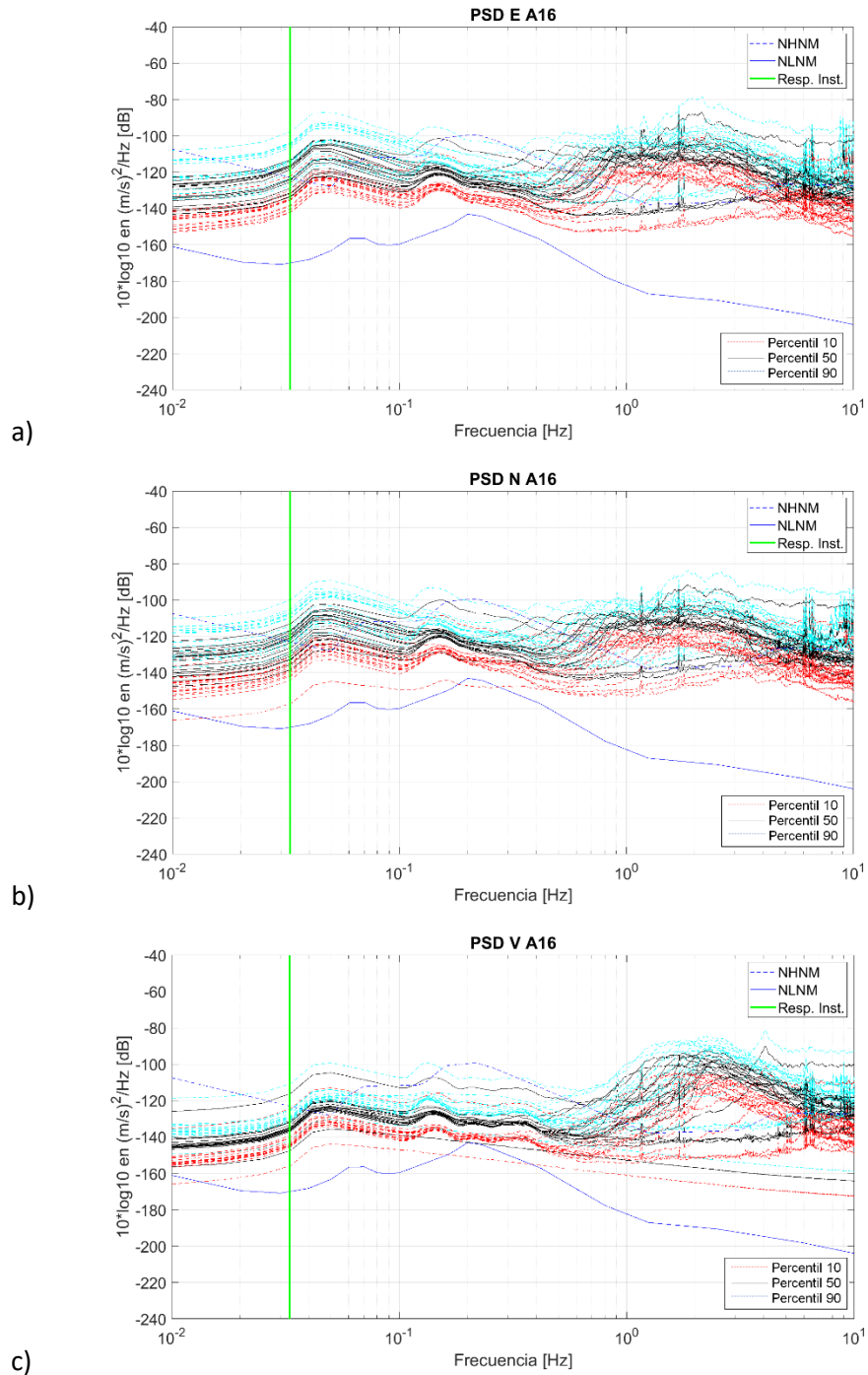


Figura I_16. Funciones de densidad de energía de los registros que forman el arreglo A16. En negro, el percentil 50; las líneas punteadas en color cian representan el percentil 90 y las líneas punteadas rojas el percentil 10. Como referencia en color azul se muestran los niveles de ruido NHHM y NLNM. La línea verde vertical representa el límite inferior de la respuesta instrumental según el fabricante. a) Componente este, b) Componente norte, c) Componente vertical.

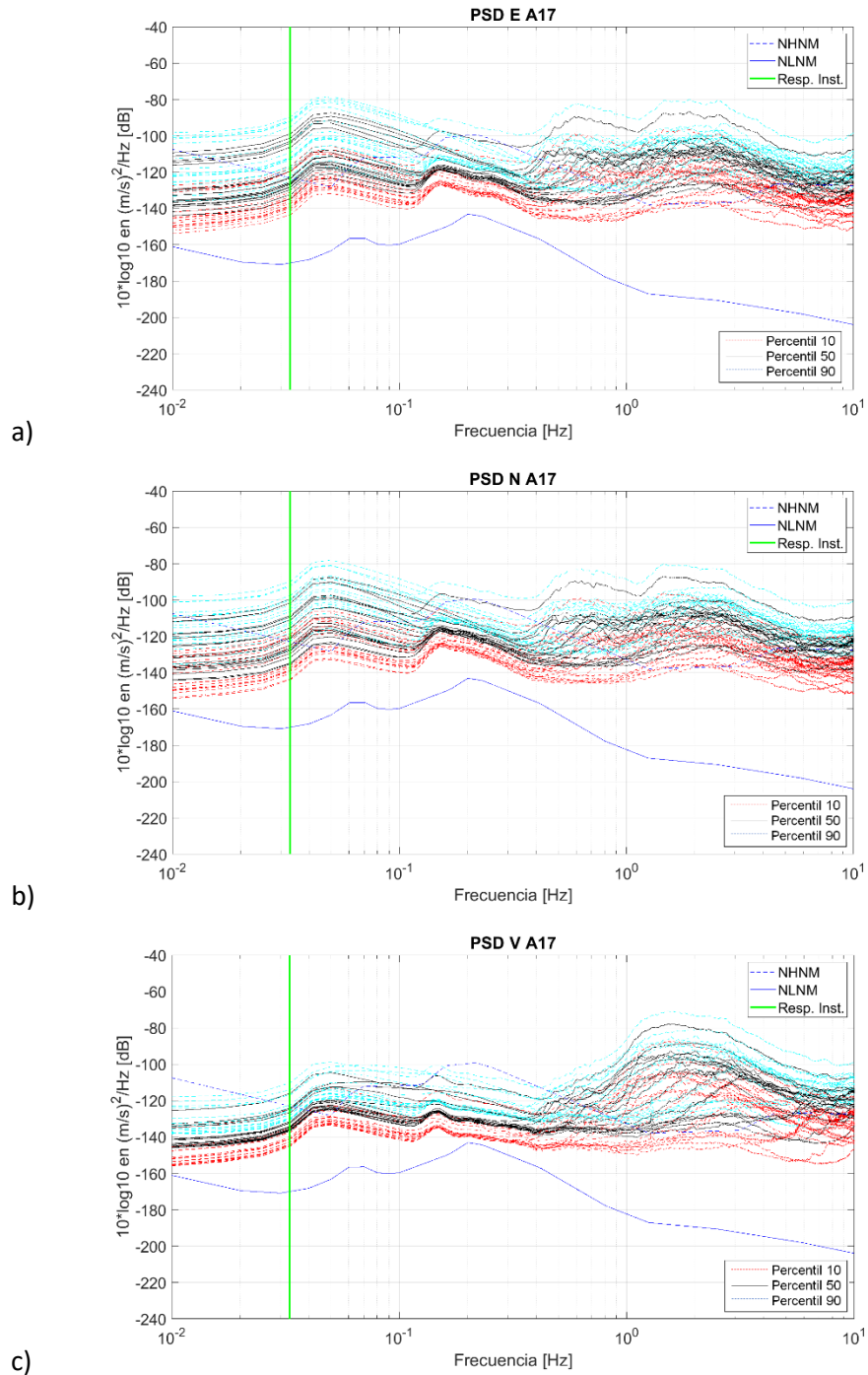


Figura I_17. Funciones de densidad de energía de los registros que forman el arreglo A17. En negro, el percentil 50; las líneas punteadas en color cian representan el percentil 90 y las líneas punteadas rojas el percentil 10. Como referencia en color azul se muestran los niveles de ruido NHNM y NLNM. La línea verde vertical representa el límite inferior de la respuesta instrumental según el fabricante. a) Componente este, b) Componente norte, c) Componente vertical.

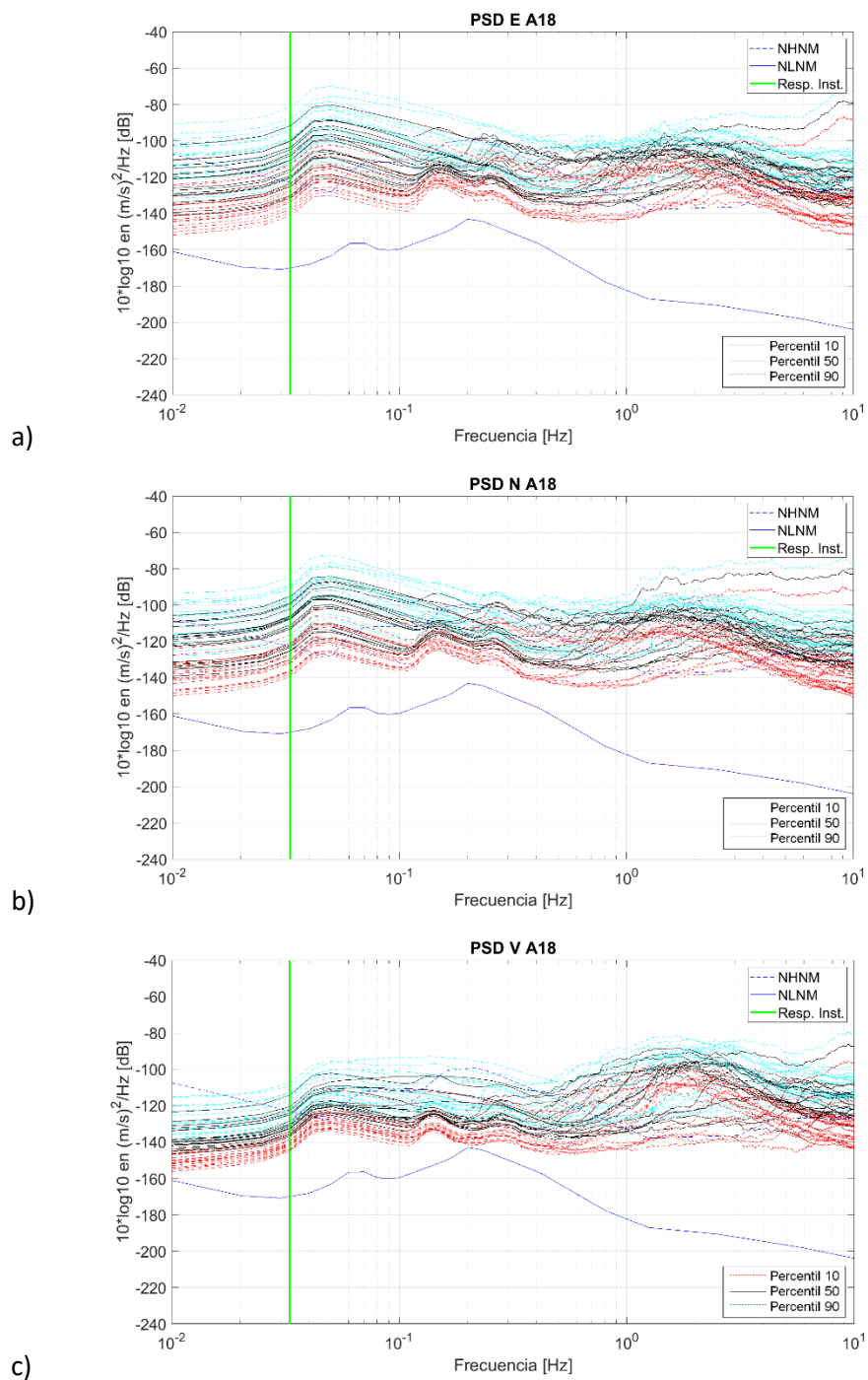


Figura I_18. Funciones de densidad de energía de los registros que forman el arreglo A18. En negro, el percentil 50; las líneas punteadas en color cian representan el percentil 90 y las líneas punteadas rojas el percentil 10. Como referencia en color azul se muestran los niveles de ruido

NHNM y NLNM. La línea verde vertical representa el límite inferior de la respuesta instrumental según el fabricante. a) Componente este, b) Componente norte, c) Componente vertical.

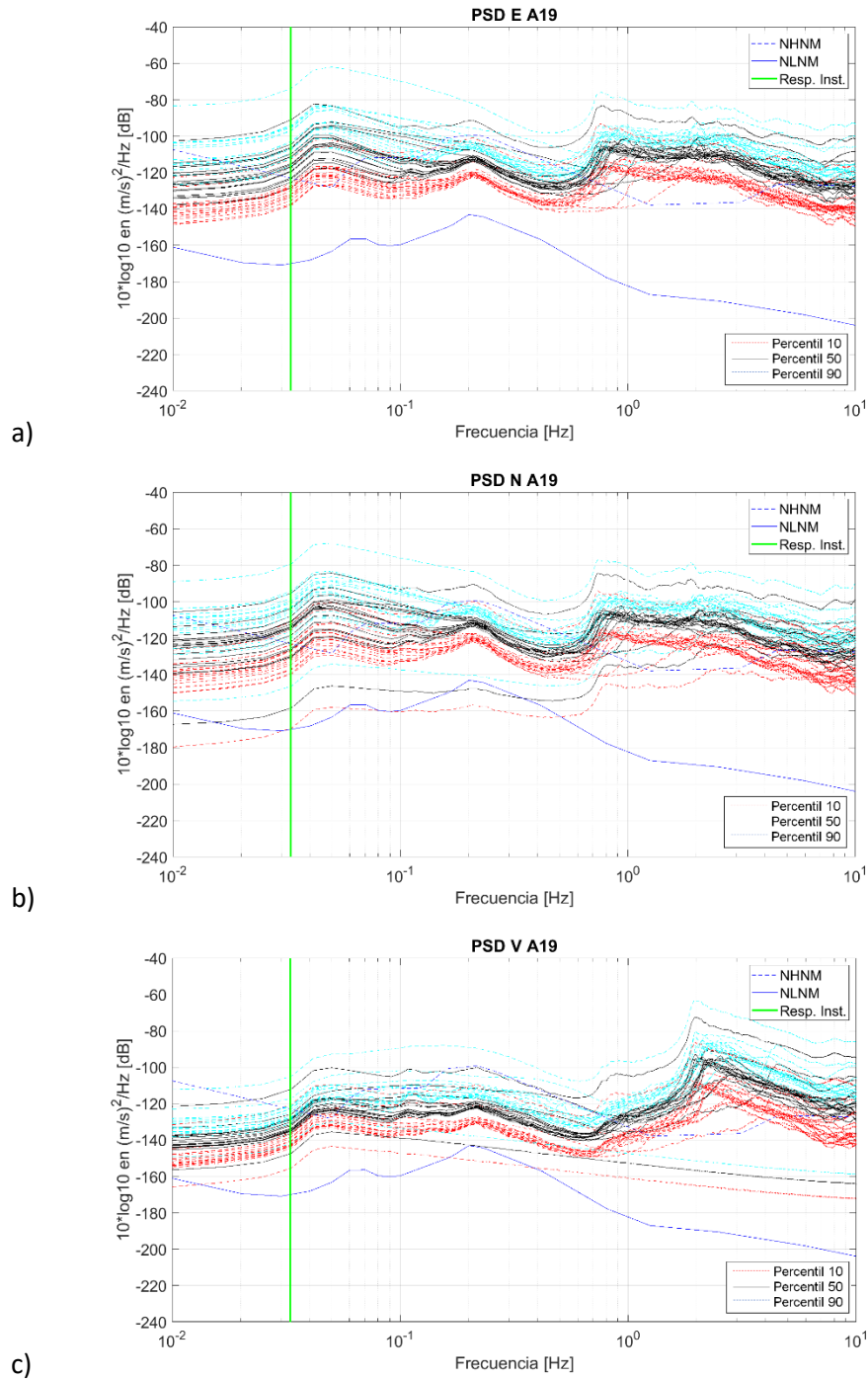


Figura I_19. Funciones de densidad de energía de los registros que forman el arreglo A19. En negro, el percentil 50; las líneas punteadas en color cian representan el percentil 90 y las líneas

punteadas rojas el percentil 10. Como referencia en color azul se muestran los niveles de ruido NHNM y NLNM. La línea verde vertical representa el límite inferior de la respuesta instrumental según el fabricante. a) Componente este, b) Componente norte, c) Componente vertical.

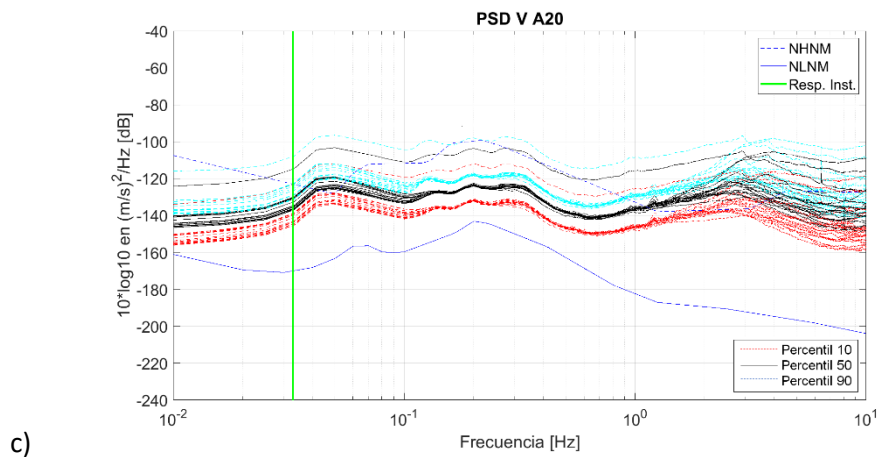
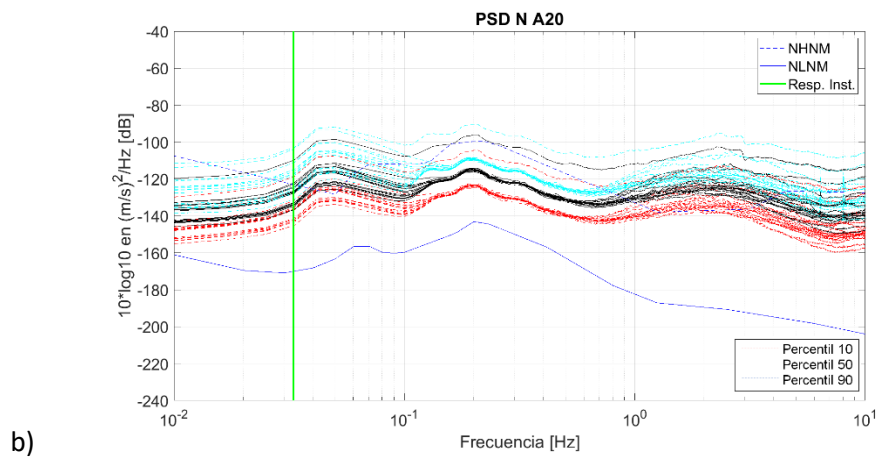
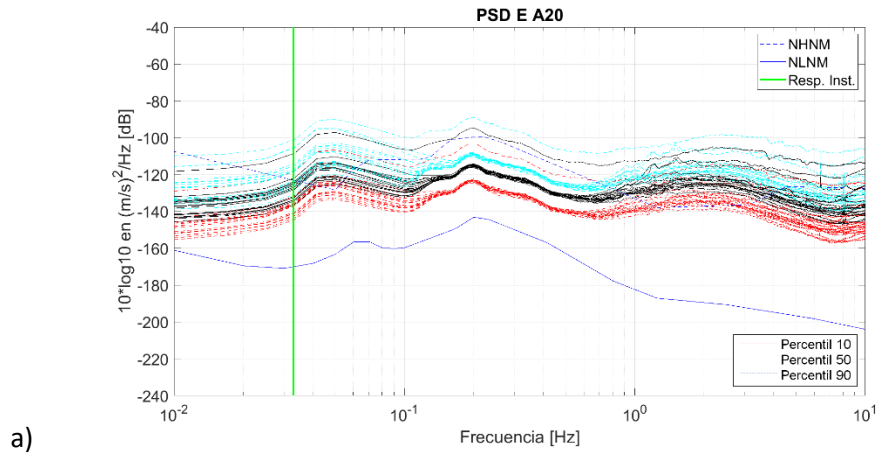
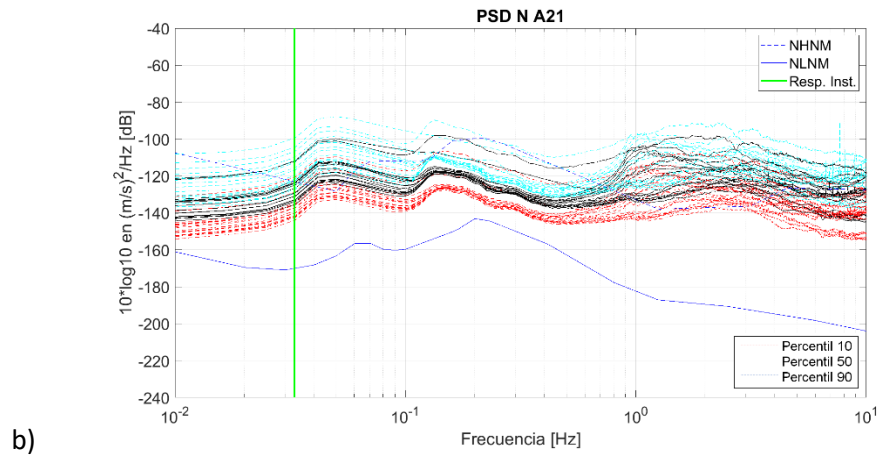
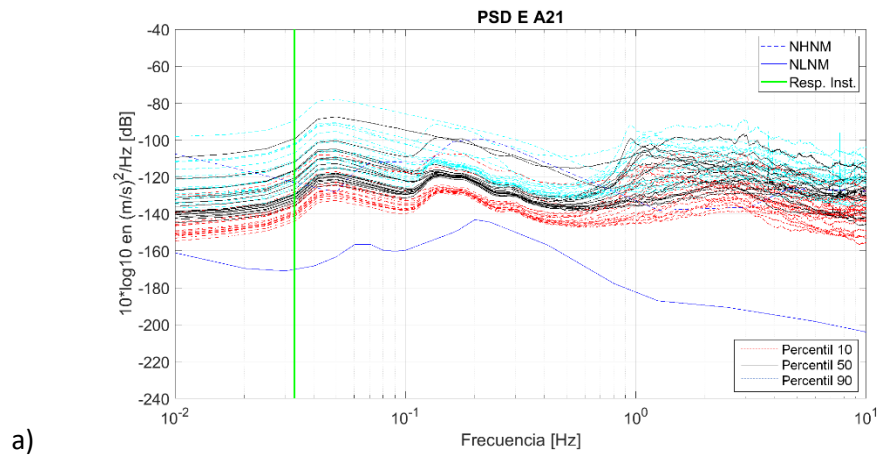
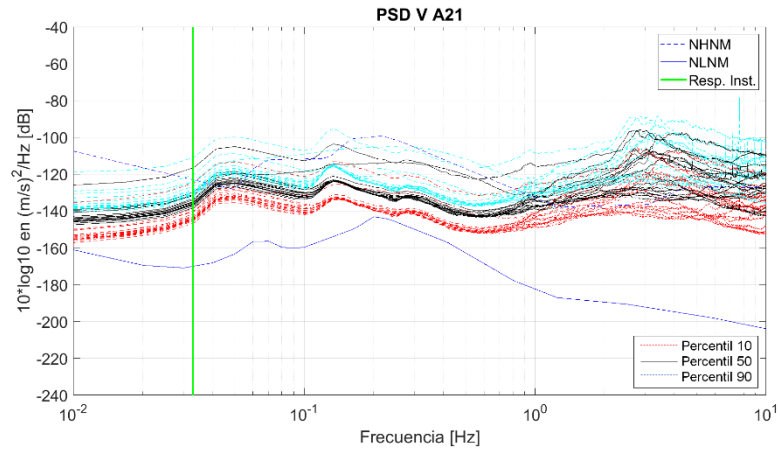


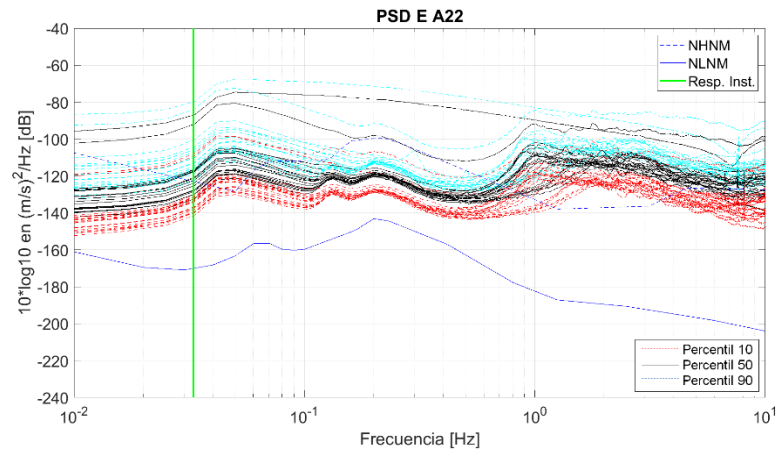
Figura I_20. Funciones de densidad de energía de los registros que forman el arreglo A20. En negro, el percentil 50; las líneas punteadas en color cian representan el percentil 90 y las líneas punteadas rojas el percentil 10. Como referencia en color azul se muestran los niveles de ruido NHHM y NLNM. La línea verde vertical representa el límite inferior de la respuesta instrumental según el fabricante. a) Componente este, b) Componente norte, c) Componente vertical.





c)

Figura I_21. Funciones de densidad de energía de los registros que forman el arreglo A21. En negro, el percentil 50; las líneas punteadas en color cian representan el percentil 90 y las líneas punteadas rojas el percentil 10. Como referencia en color azul se muestran los niveles de ruido NHNM y NLNM. La línea verde vertical representa el límite inferior de la respuesta instrumental según el fabricante. a) Componente este, b) Componente norte, c) Componente vertical.



a)

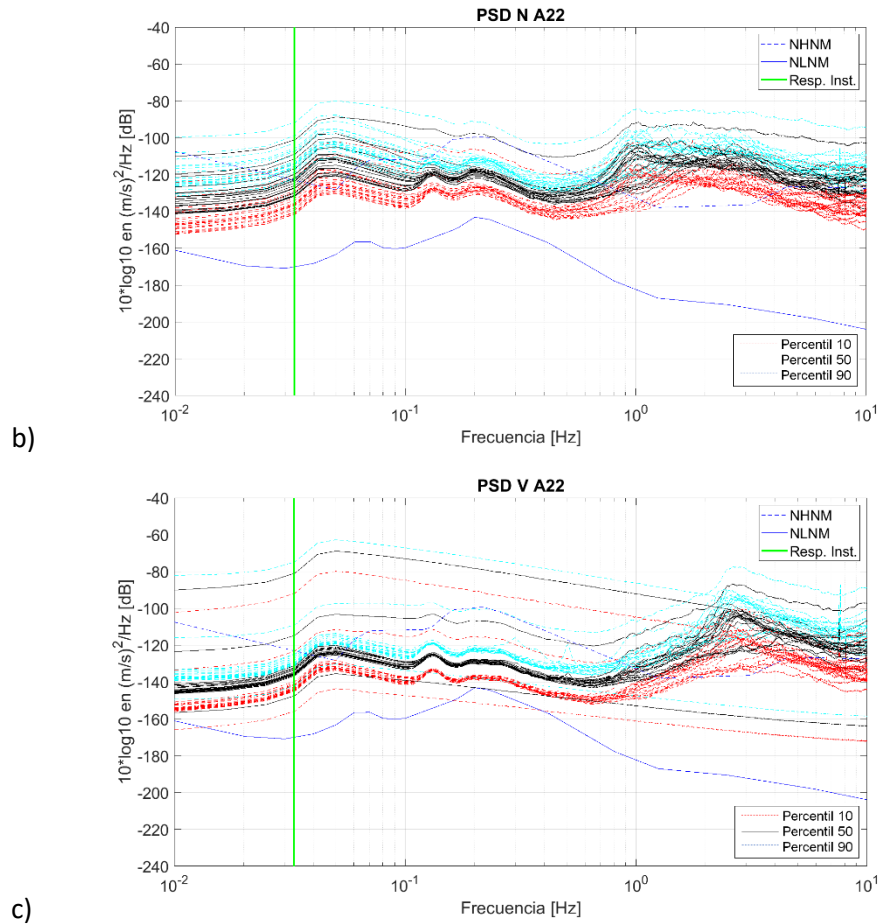


Figura I_22. Funciones de densidad de energía de los registros que forman el arreglo A22. En negro, el percentil 50; las líneas punteadas en color cian representan el percentil 90 y las líneas punteadas rojas el percentil 10. Como referencia en color azul se muestran los niveles de ruido NHHM y NLNM. La línea verde vertical representa el límite inferior de la respuesta instrumental según el fabricante. a) Componente este, b) Componente norte, c) Componente vertical.

Anexo II Funciones de Green estimadas en todos los arreglos.

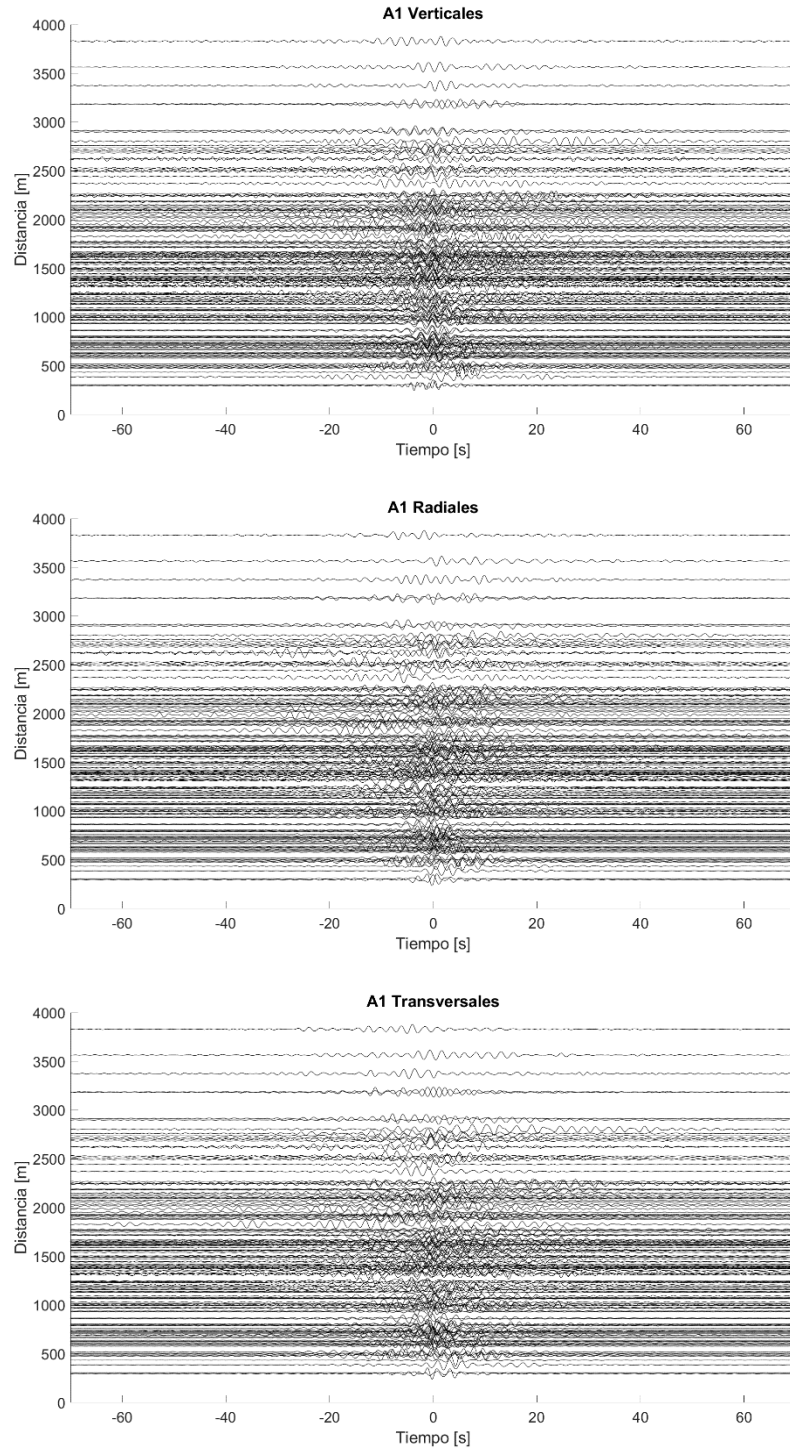


Figura AII_1. Funciones de Green estimadas en el arreglo 1, filtradas de 0.4 a 0.8 Hz.

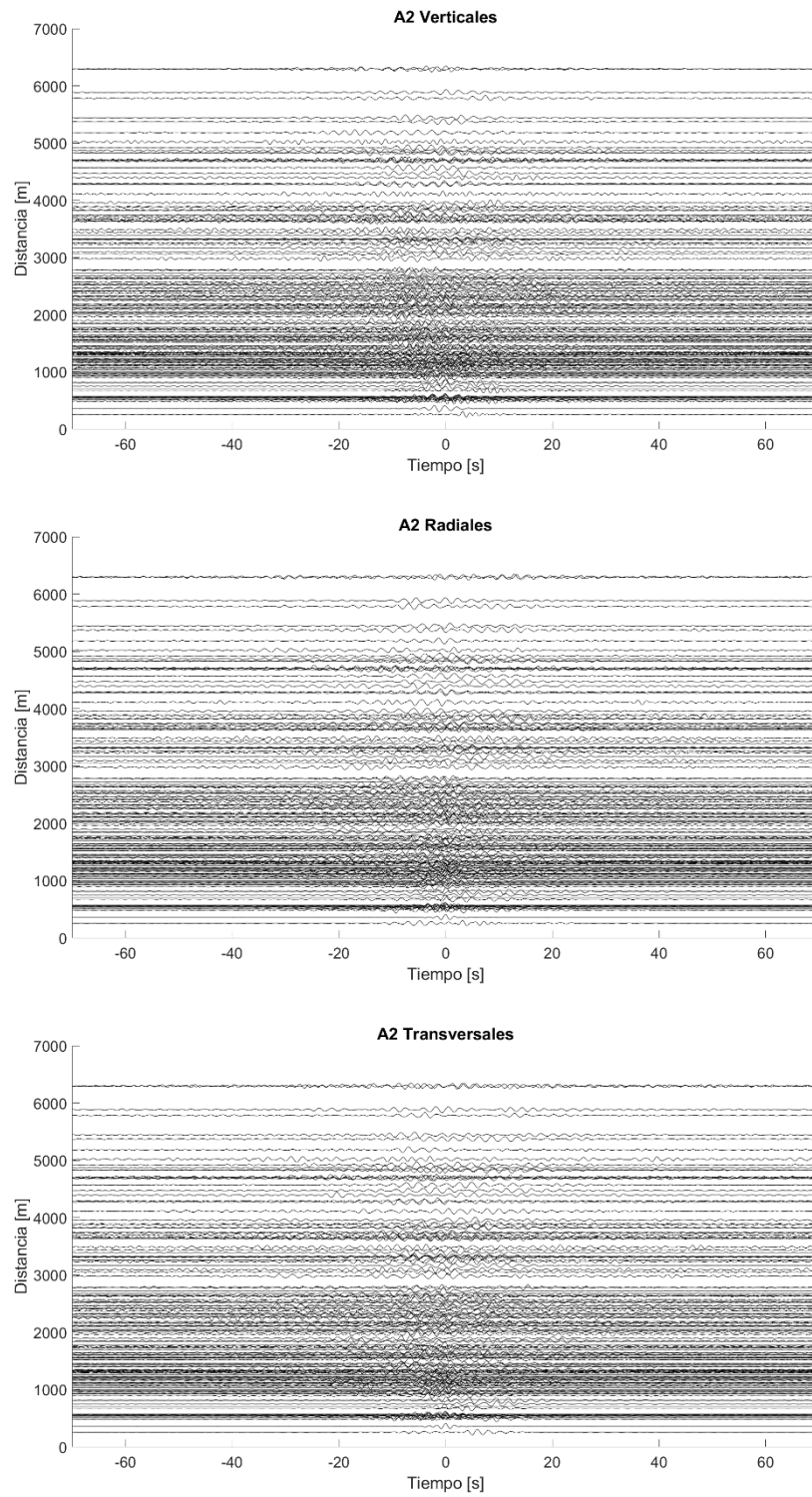


Figura AII_2. Funciones de Green estimadas en el arreglo 2, filtradas de 0.4 a 0.8 Hz.

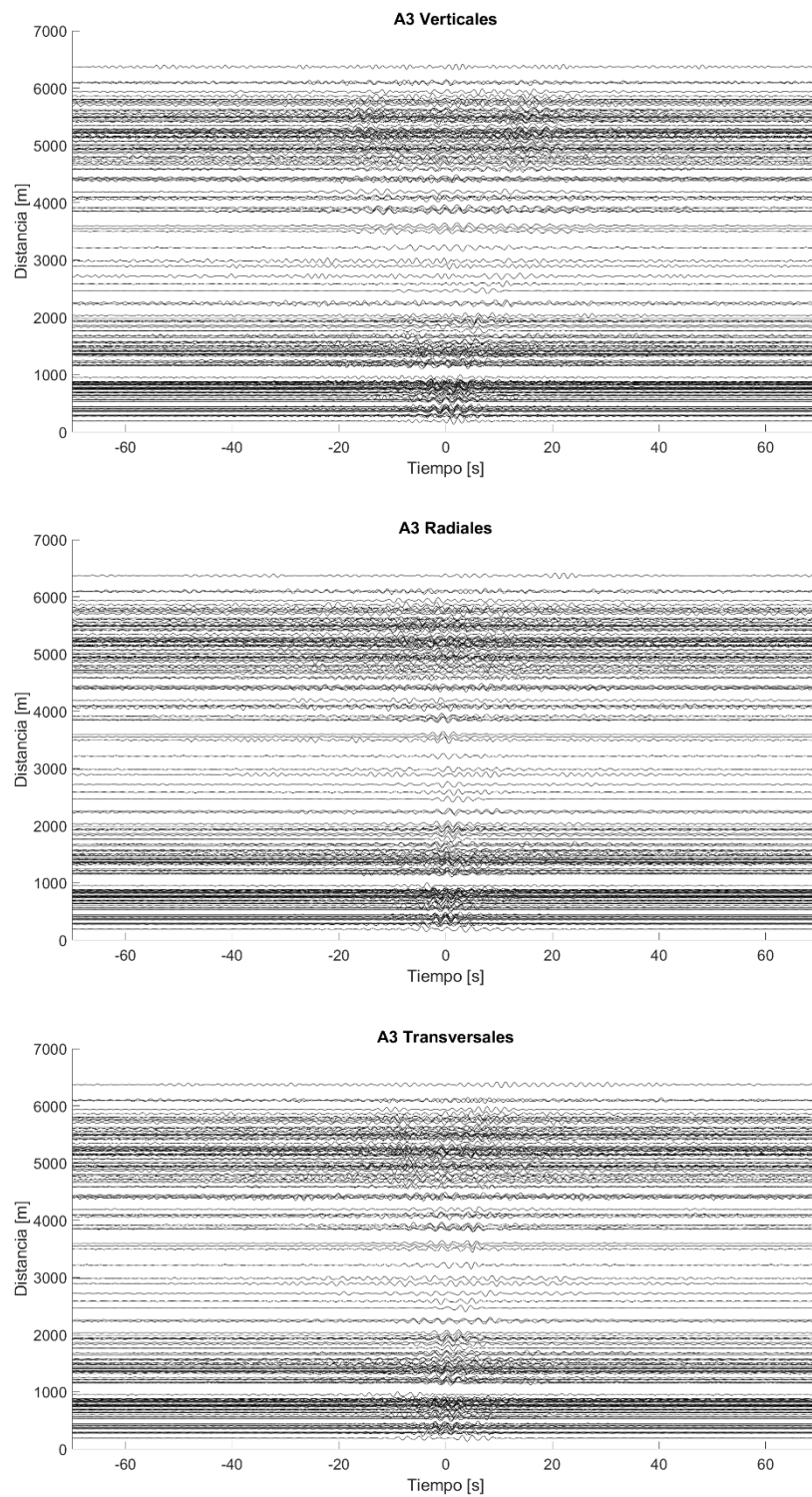


Figura AII_3. Funciones de Green estimadas en el arreglo 3, filtradas de 0.4 a 0.8 Hz.

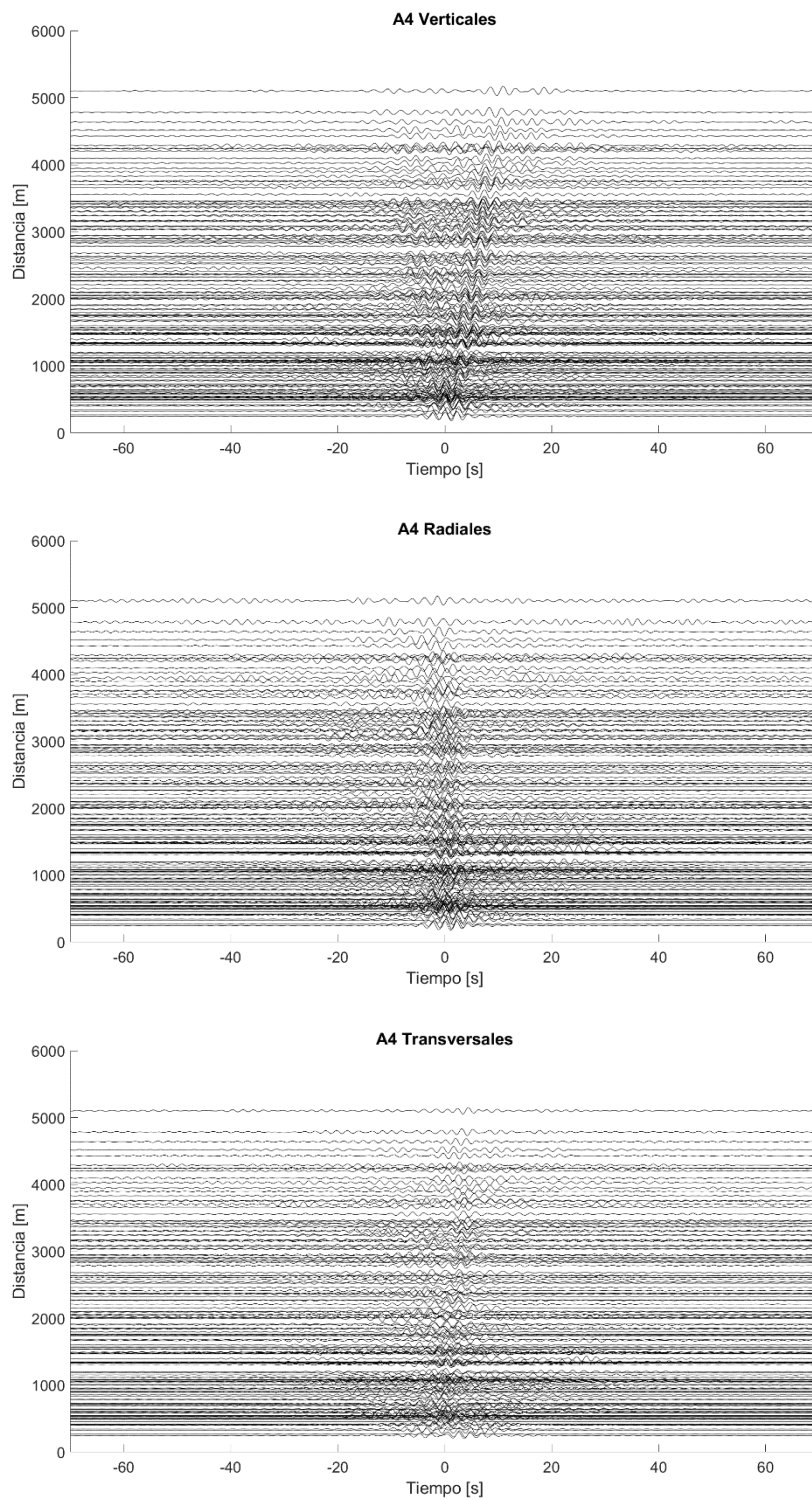


Figura AII_4. Funciones de Green estimadas en el arreglo 4, filtradas de 0.4 a 0.8 Hz.

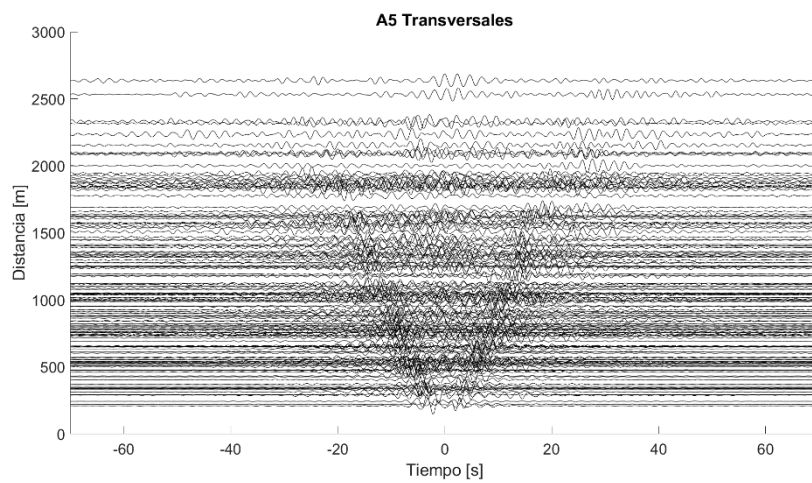
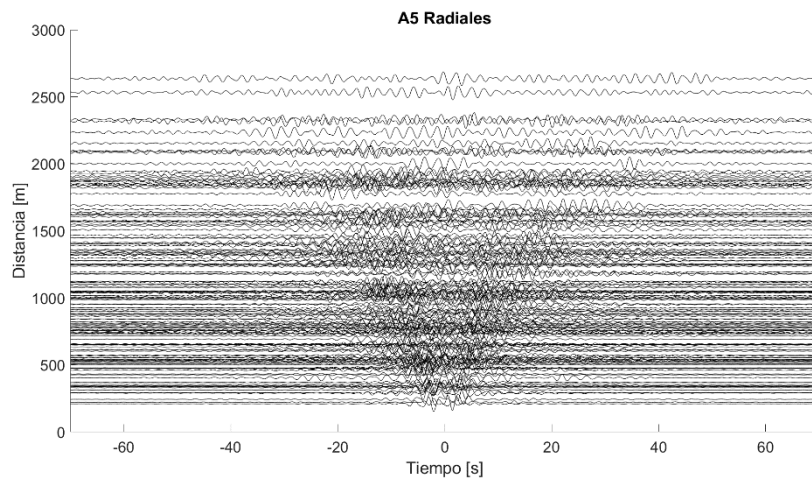
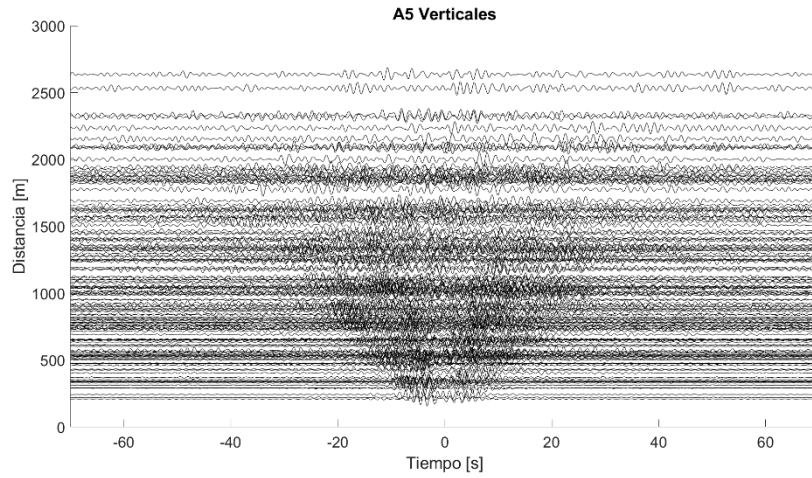


Figura AII_5. Funciones de Green estimadas en el arreglo 5, filtradas de 0.4 a 0.8 Hz.

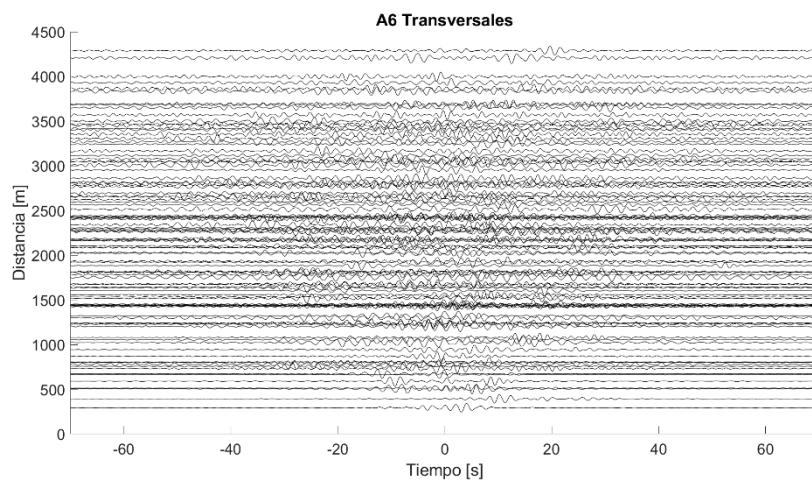
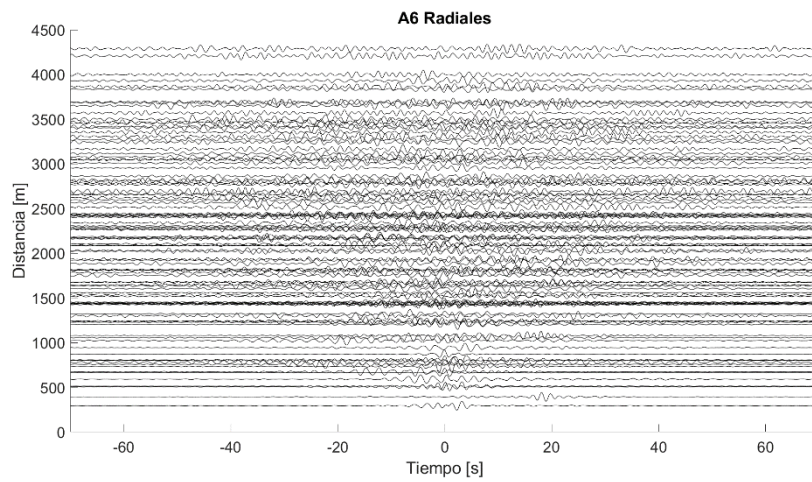
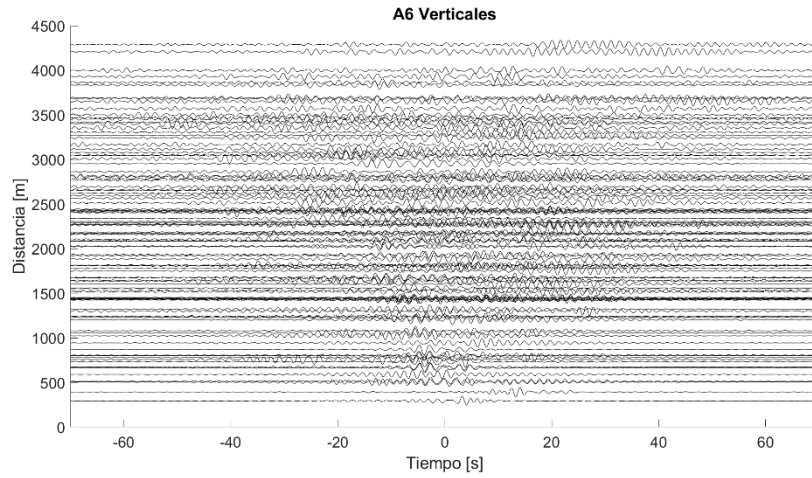


Figura AII_6. Funciones de Green estimadas en el arreglo 6, filtradas de 0.4 a 0.8 Hz.

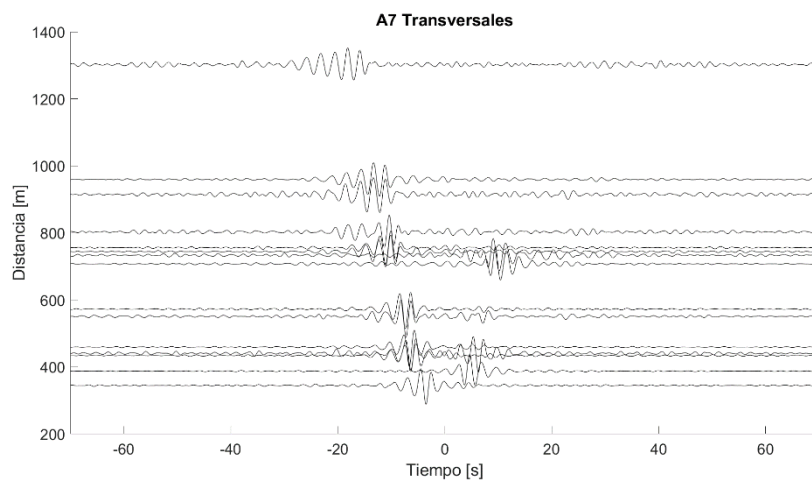
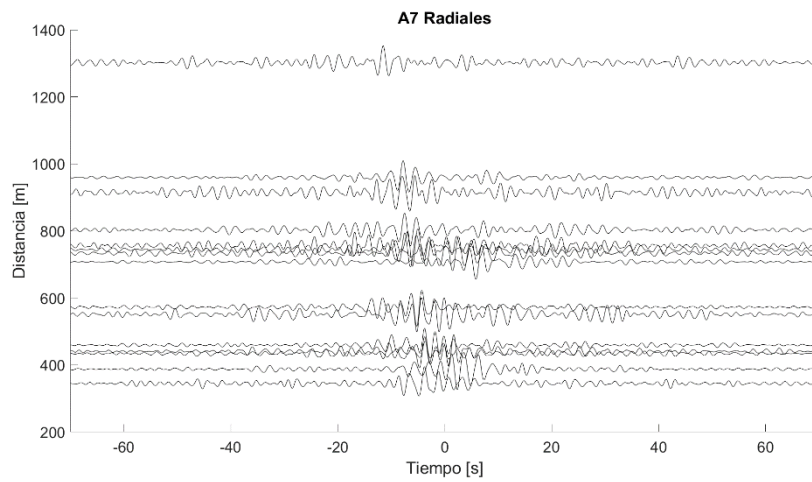
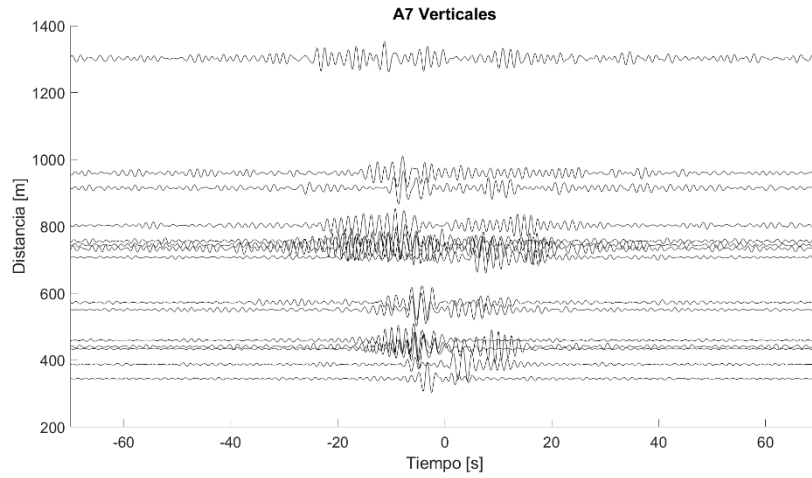


Figura AII_7. Funciones de Green estimadas en el arreglo 7, filtradas de 0.4 a 0.8 Hz.

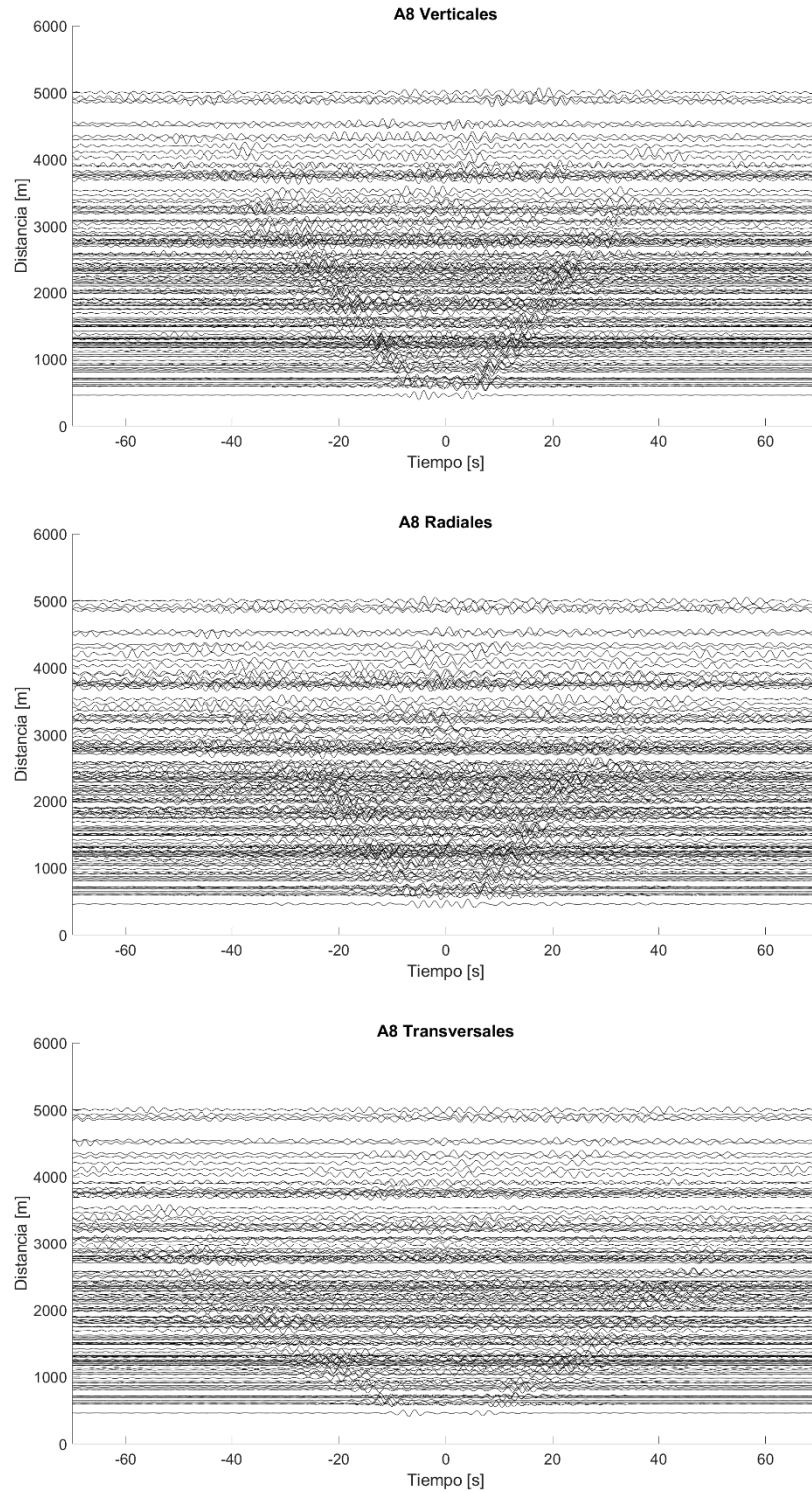


Figura AII_8. Funciones de Green estimadas en el arreglo 8, filtradas de 0.4 a 0.8 Hz.

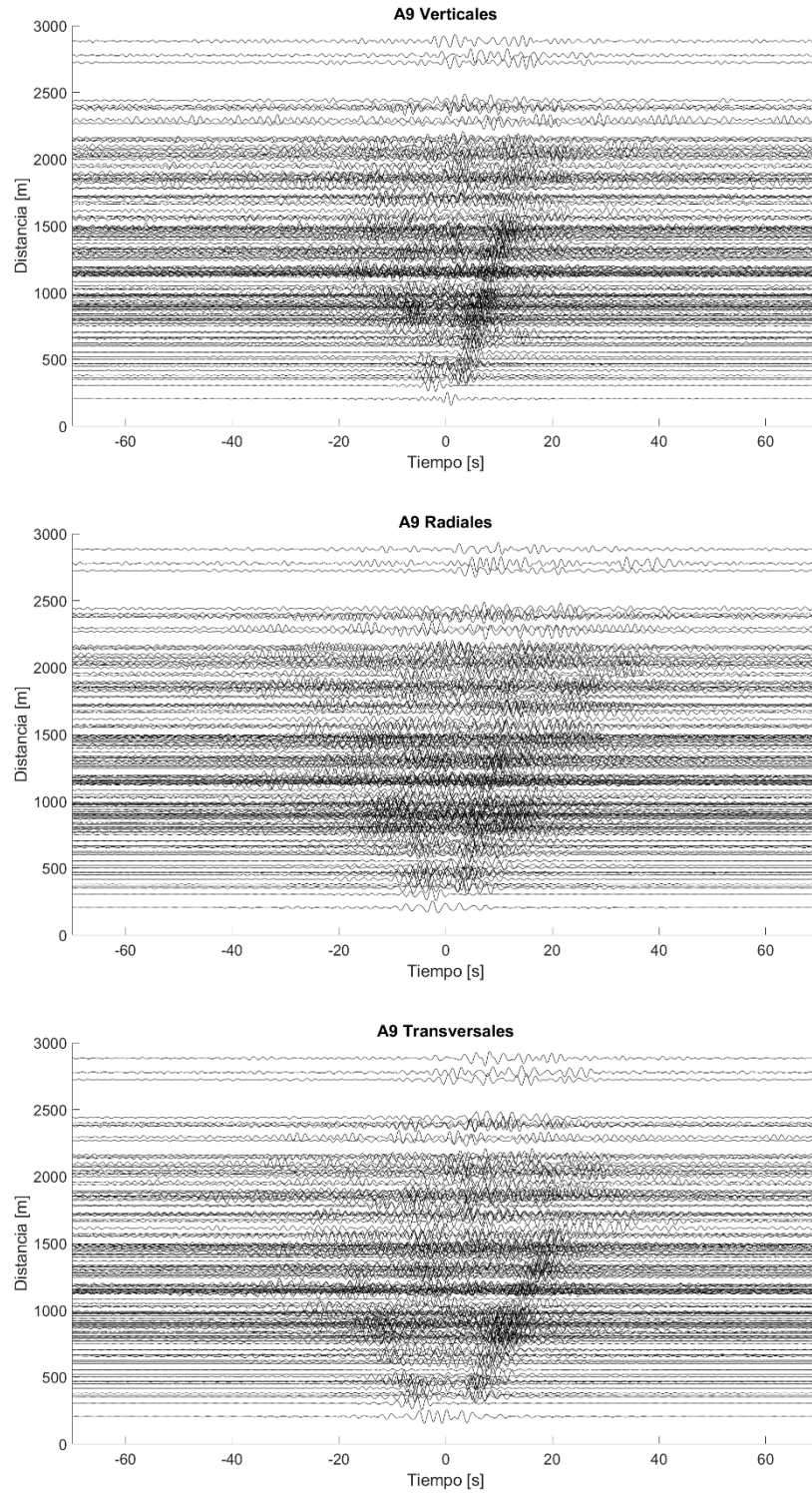


Figura AII_9. Funciones de Green estimadas en el arreglo 9, filtradas de 0.4 a 0.8 Hz.

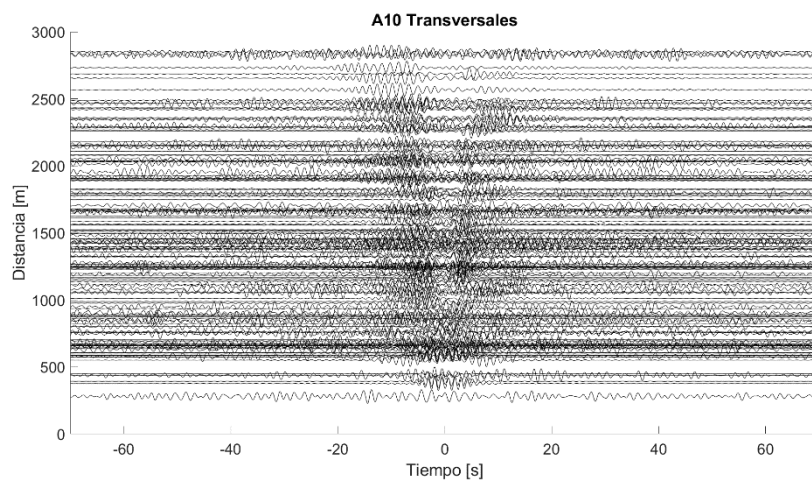
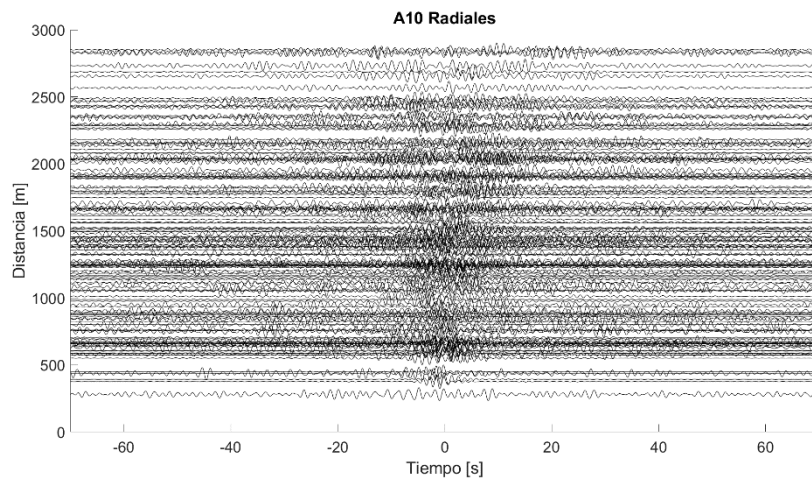
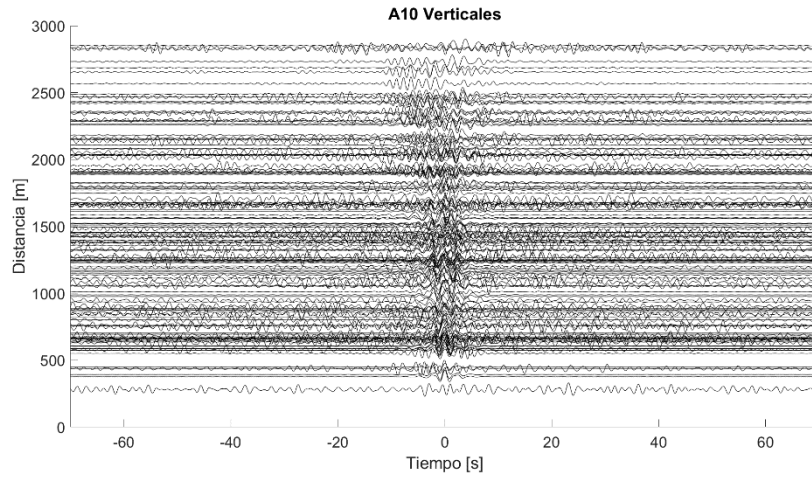


Figura AII_10. Funciones de Green estimadas en el arreglo A10, filtradas de 0.4 a 0.8 Hz.

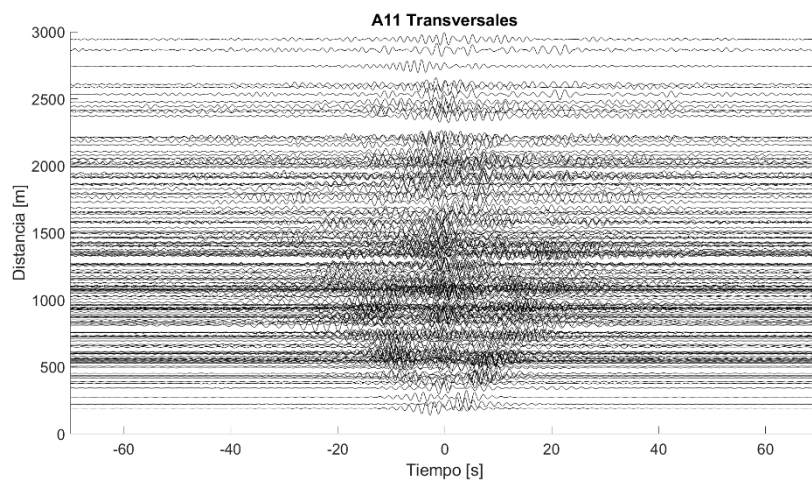
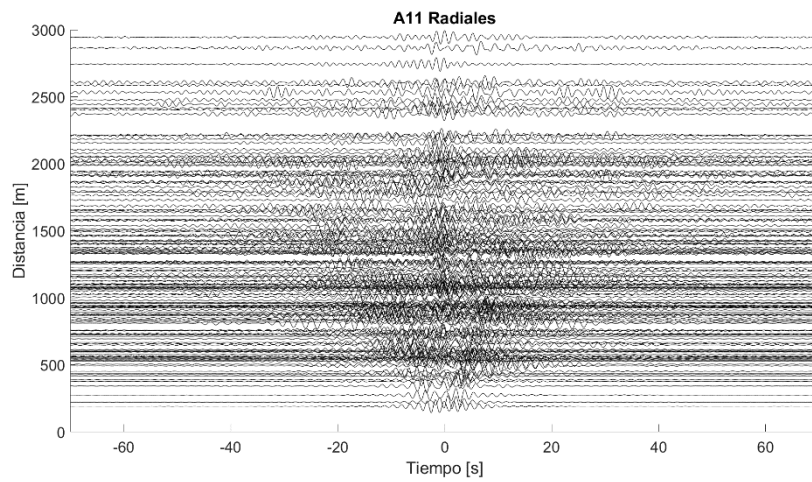
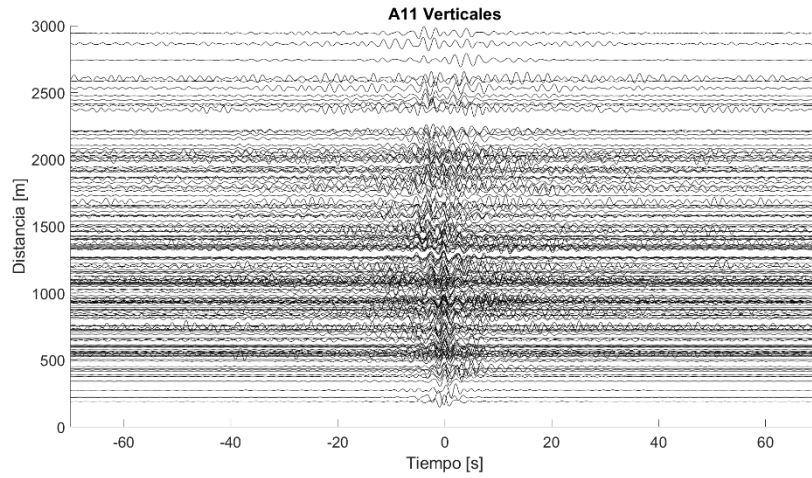


Figura AII_11. Funciones de Green estimadas en el arreglo A11, filtradas de 0.4 a 0.8 Hz.

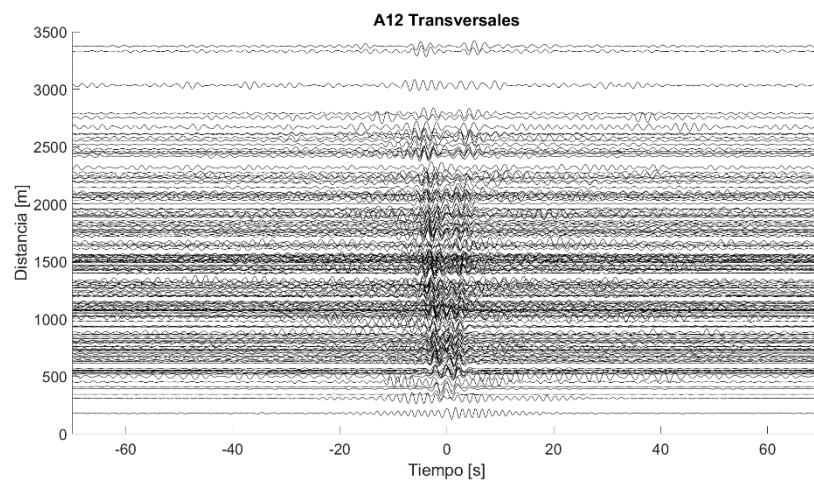
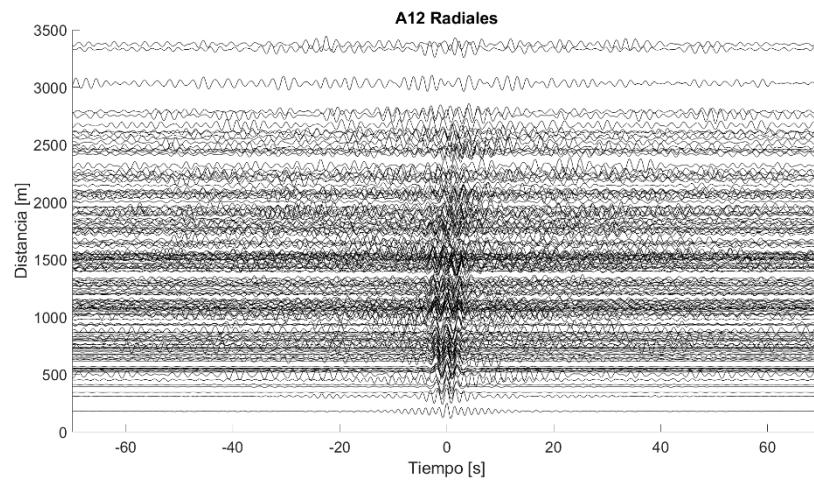
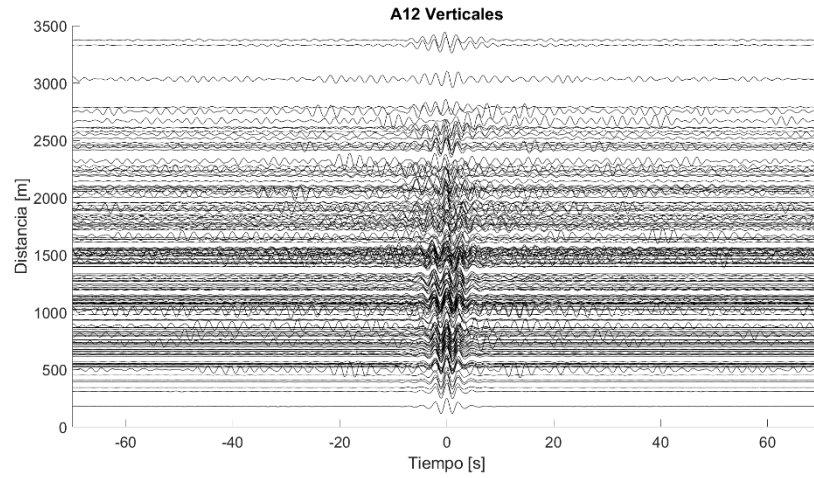


Figura AII_12. Funciones de Green estimadas en el arreglo A12, filtradas de 0.4 a 0.8 Hz.

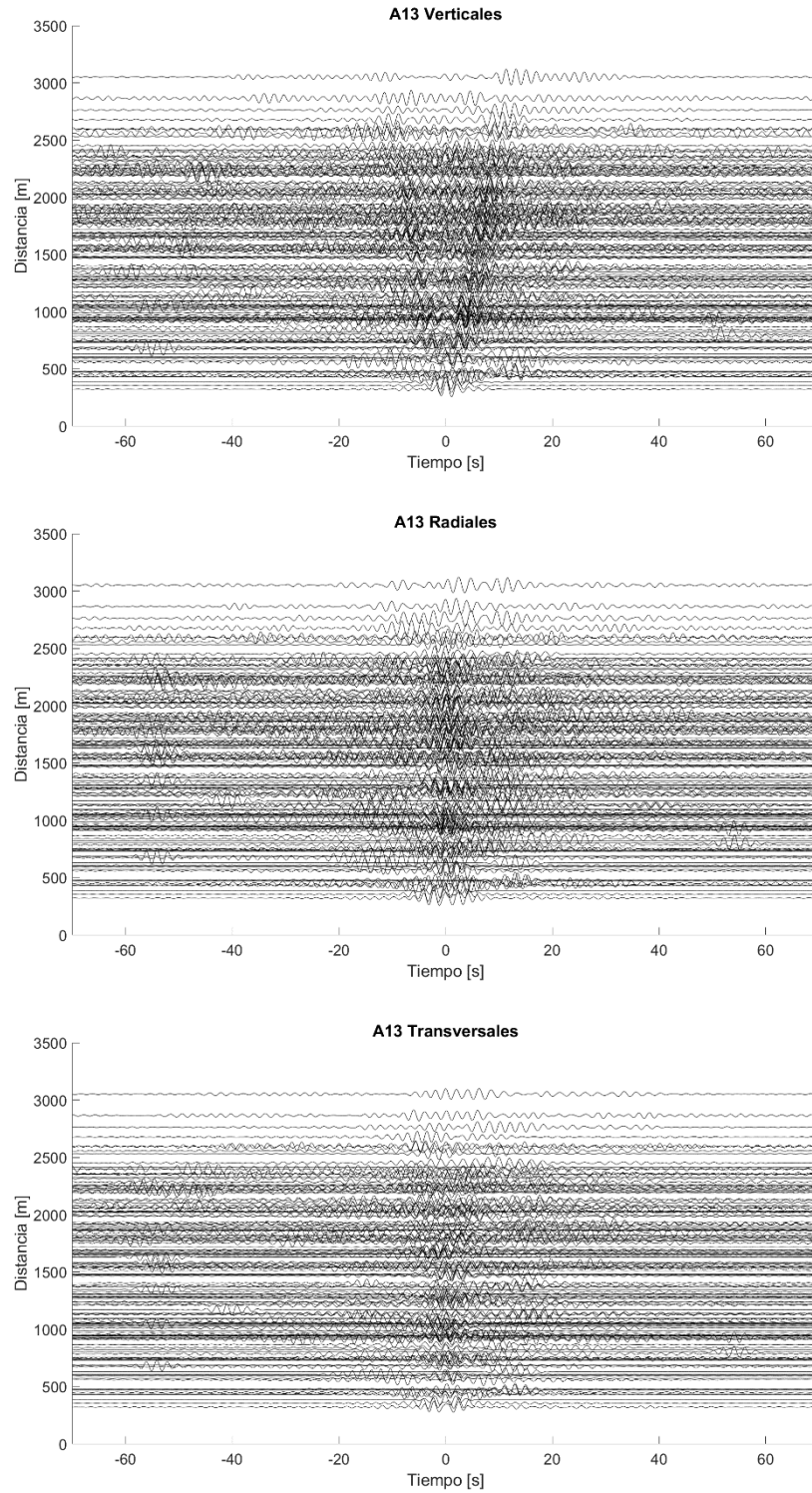


Figura AII_13. Funciones de Green estimadas en el arreglo A13, filtradas de 0.4 a 0.8 Hz.

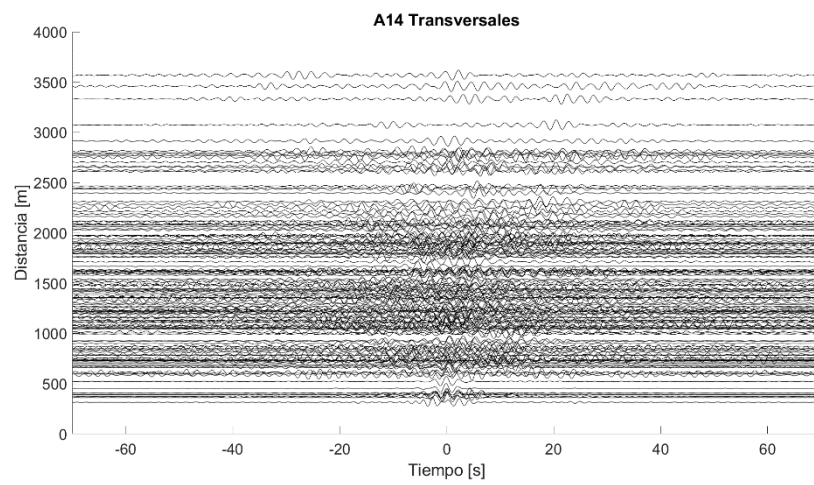
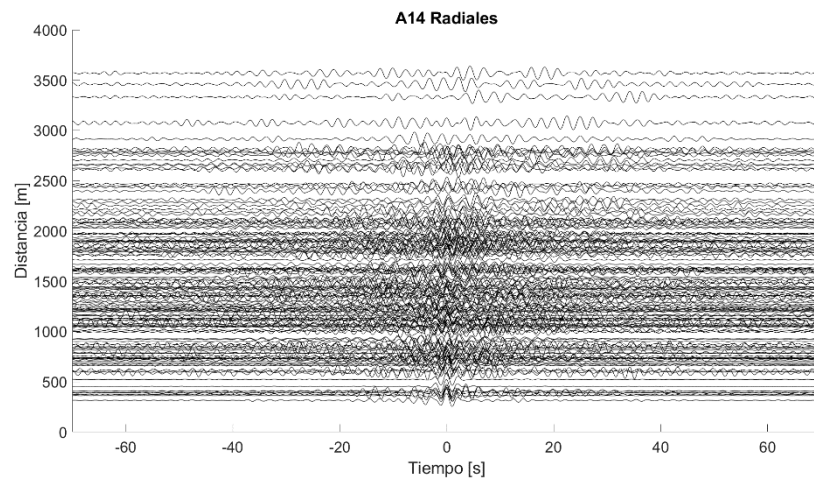
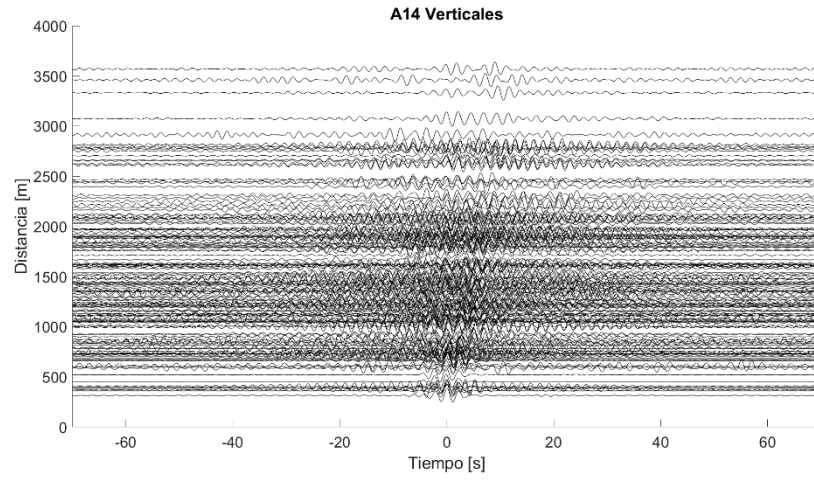


Figura AII_14. Funciones de Green estimadas en el arreglo A14, filtradas de 0.4 a 0.8 Hz.

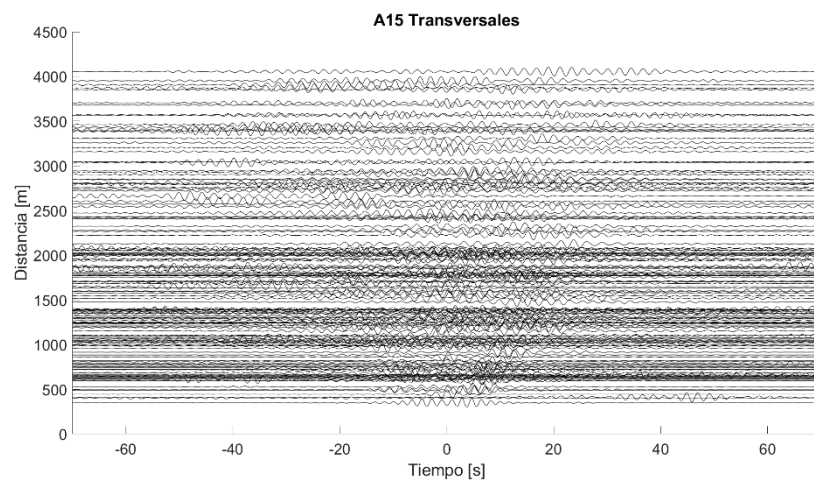
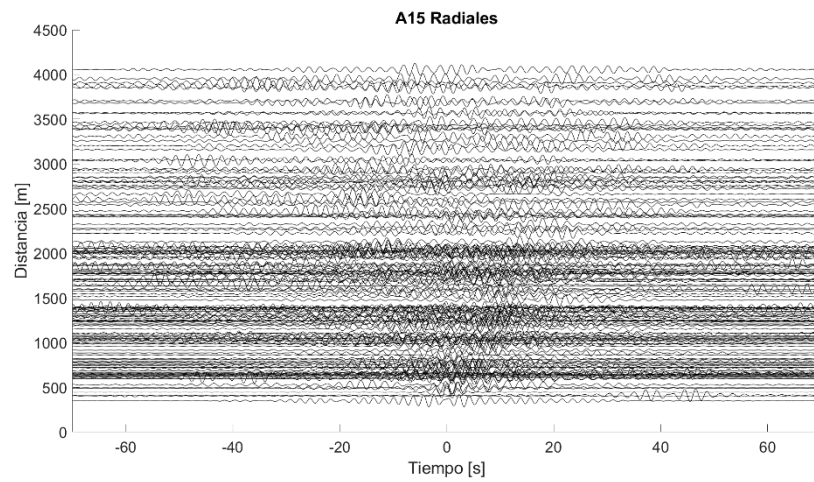
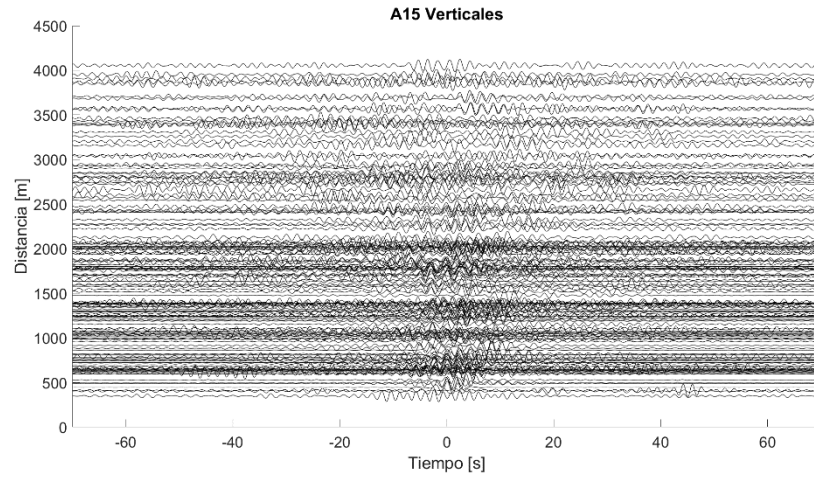


Figura AII_15. Funciones de Green estimadas en el arreglo A15, filtradas de 0.4 a 0.8 Hz.

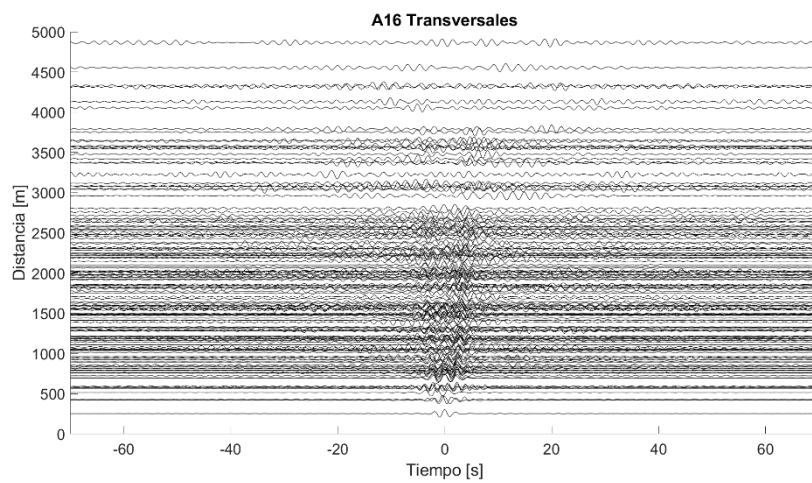
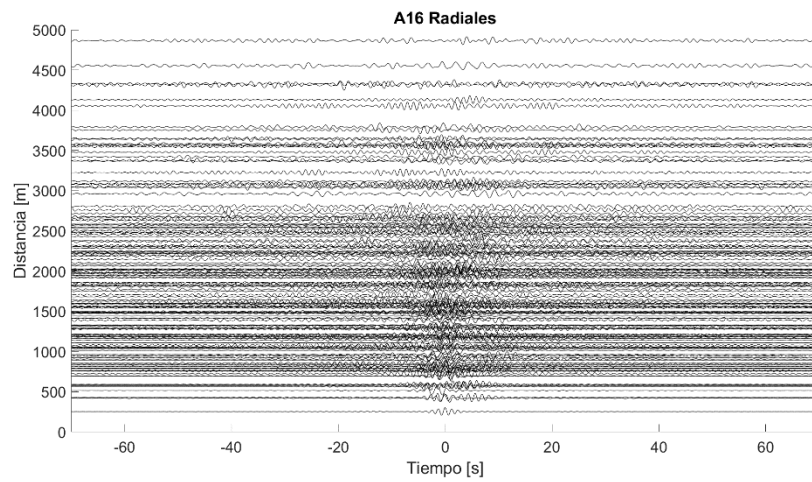
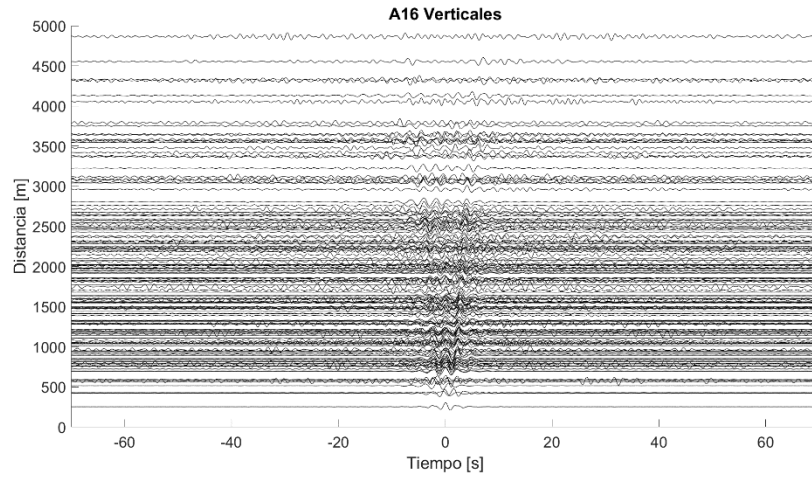


Figura AII_16. Funciones de Green estimadas en el arreglo A16, filtradas de 0.4 a 0.8 Hz.

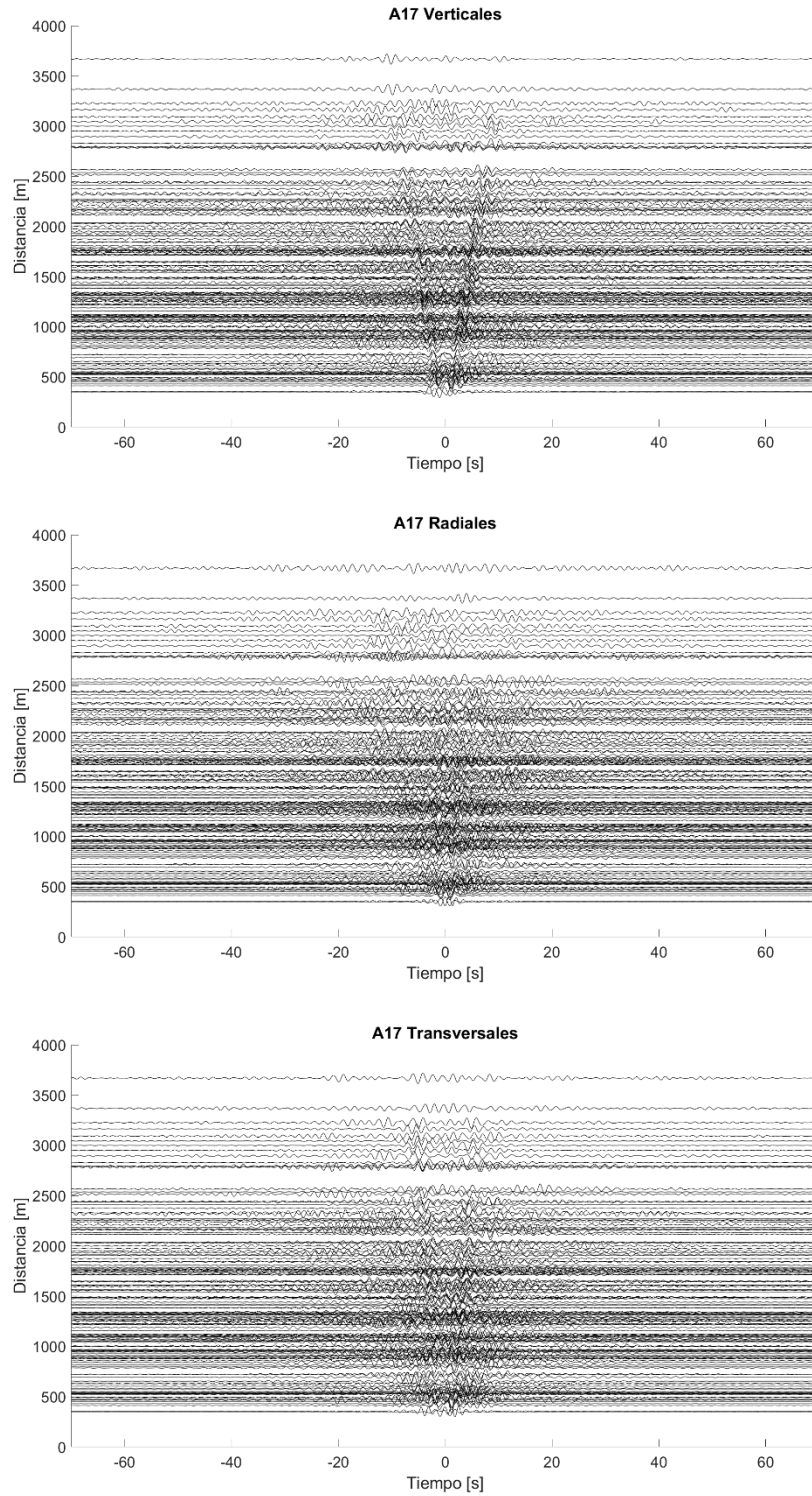


Figura AII_17. Funciones de Green estimadas en el arreglo A17, filtradas de 0.4 a 0.8 Hz.

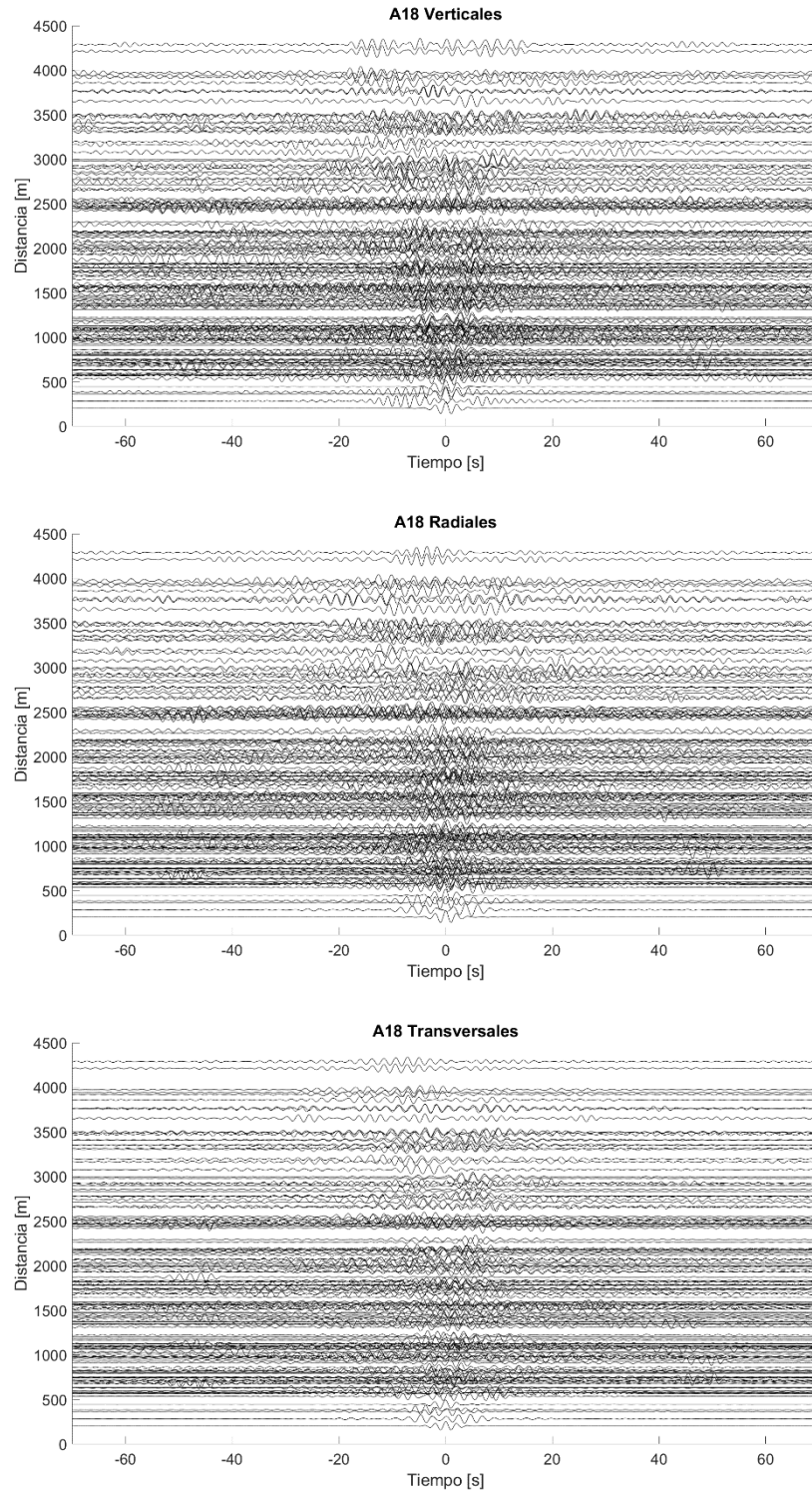


Figura AII_18. Funciones de Green estimadas en el arreglo A18, filtradas de 0.4 a 0.8 Hz.

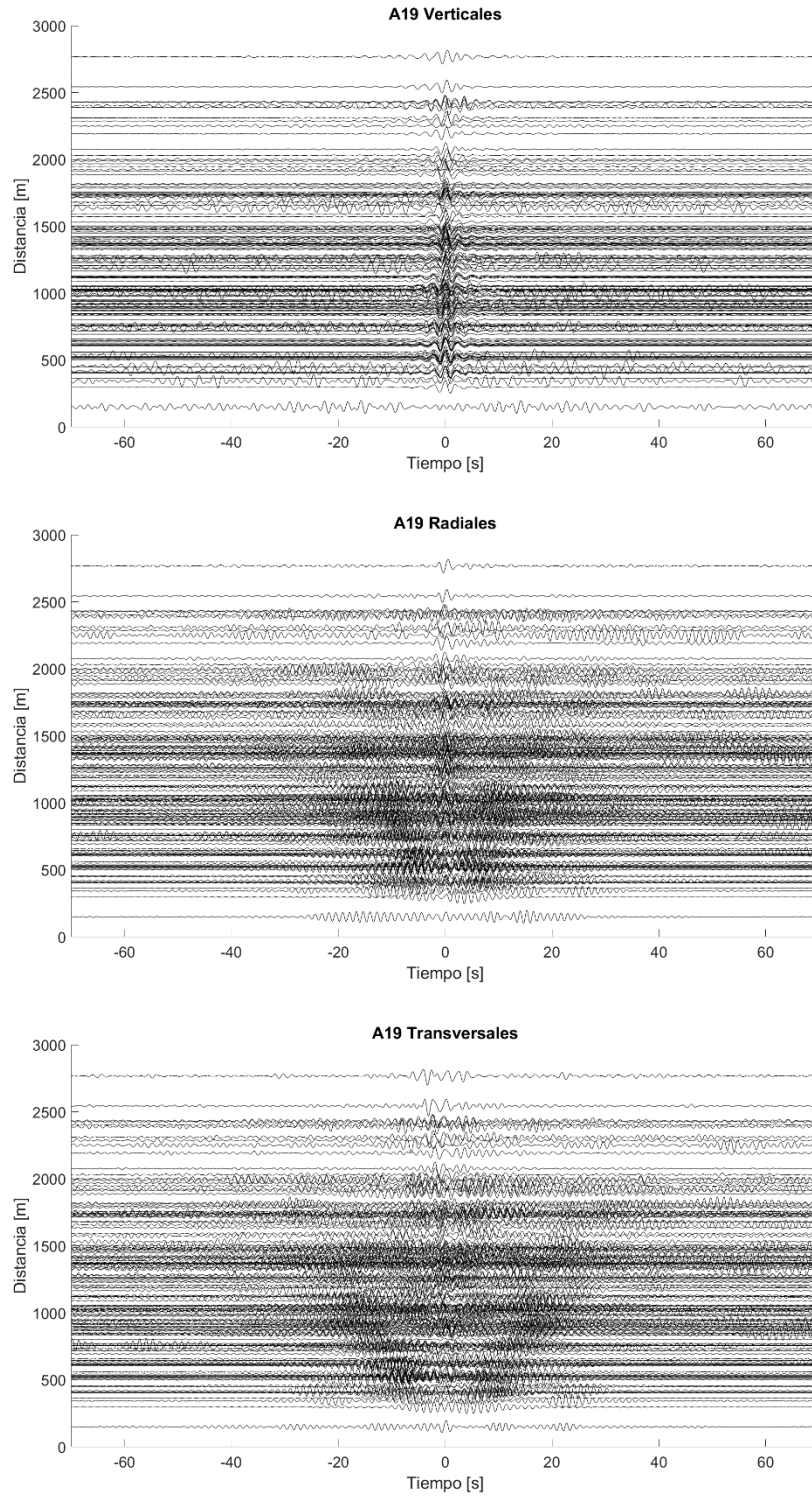


Figura AII_19. Funciones de Green estimadas en el arreglo A19, filtradas de 0.4 a 0.8 Hz.

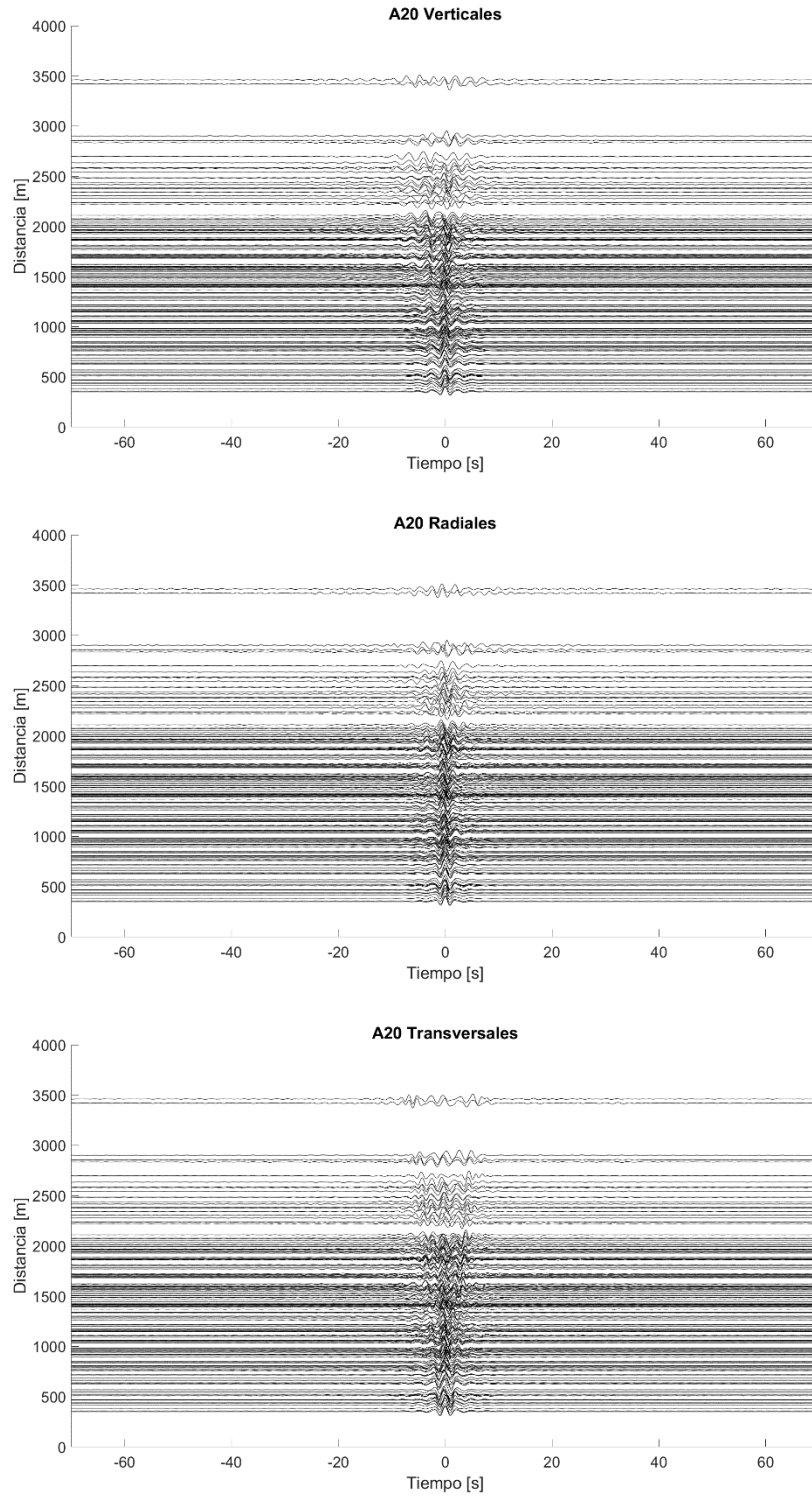


Figura AII_20. Funciones de Green estimadas en el arreglo A20, filtradas de 0.4 a 0.8 Hz.

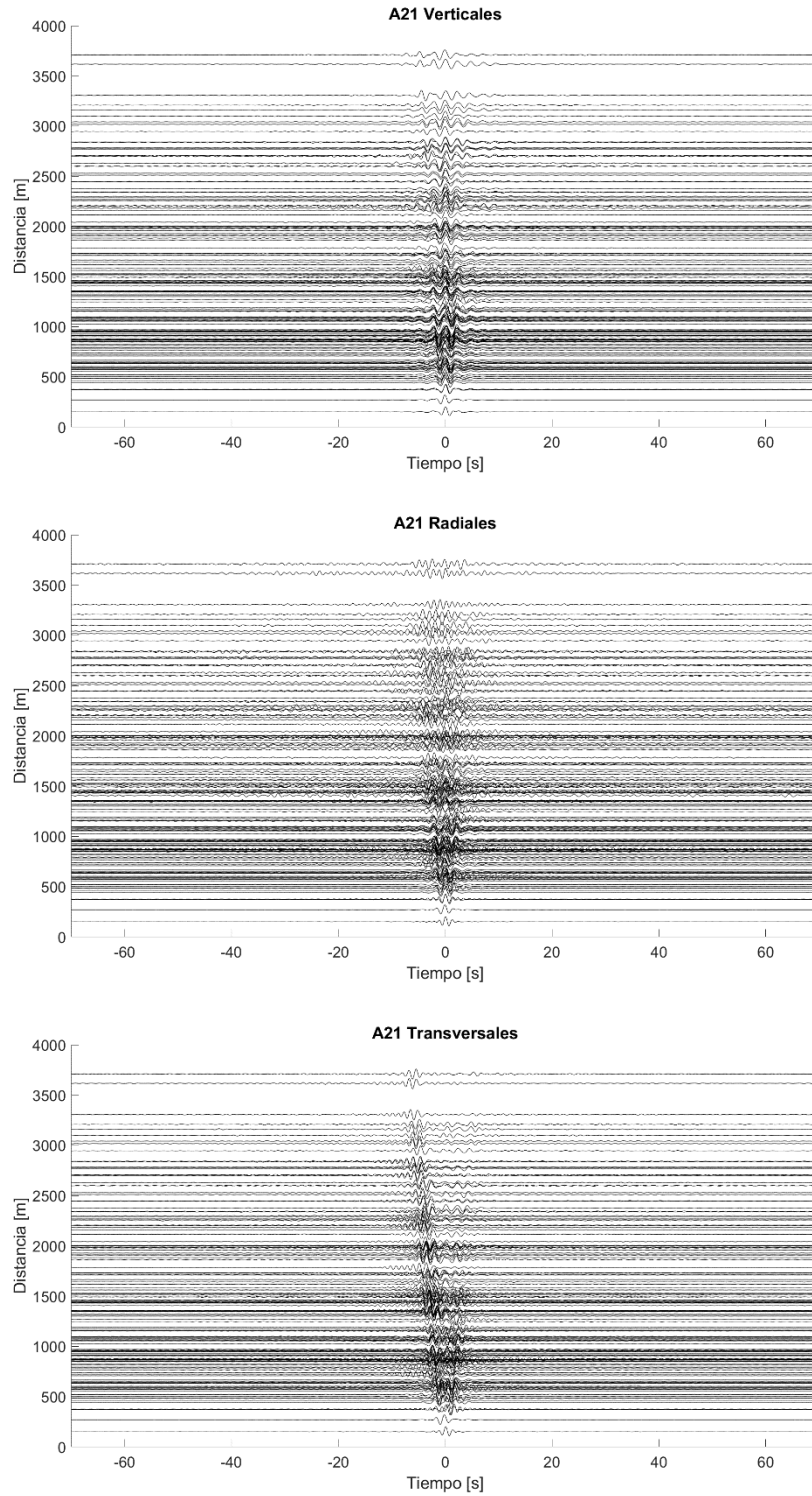


Figura AII_21. Funciones de Green estimadas en el arreglo A21, filtradas de 0.4 a 0.8 Hz.

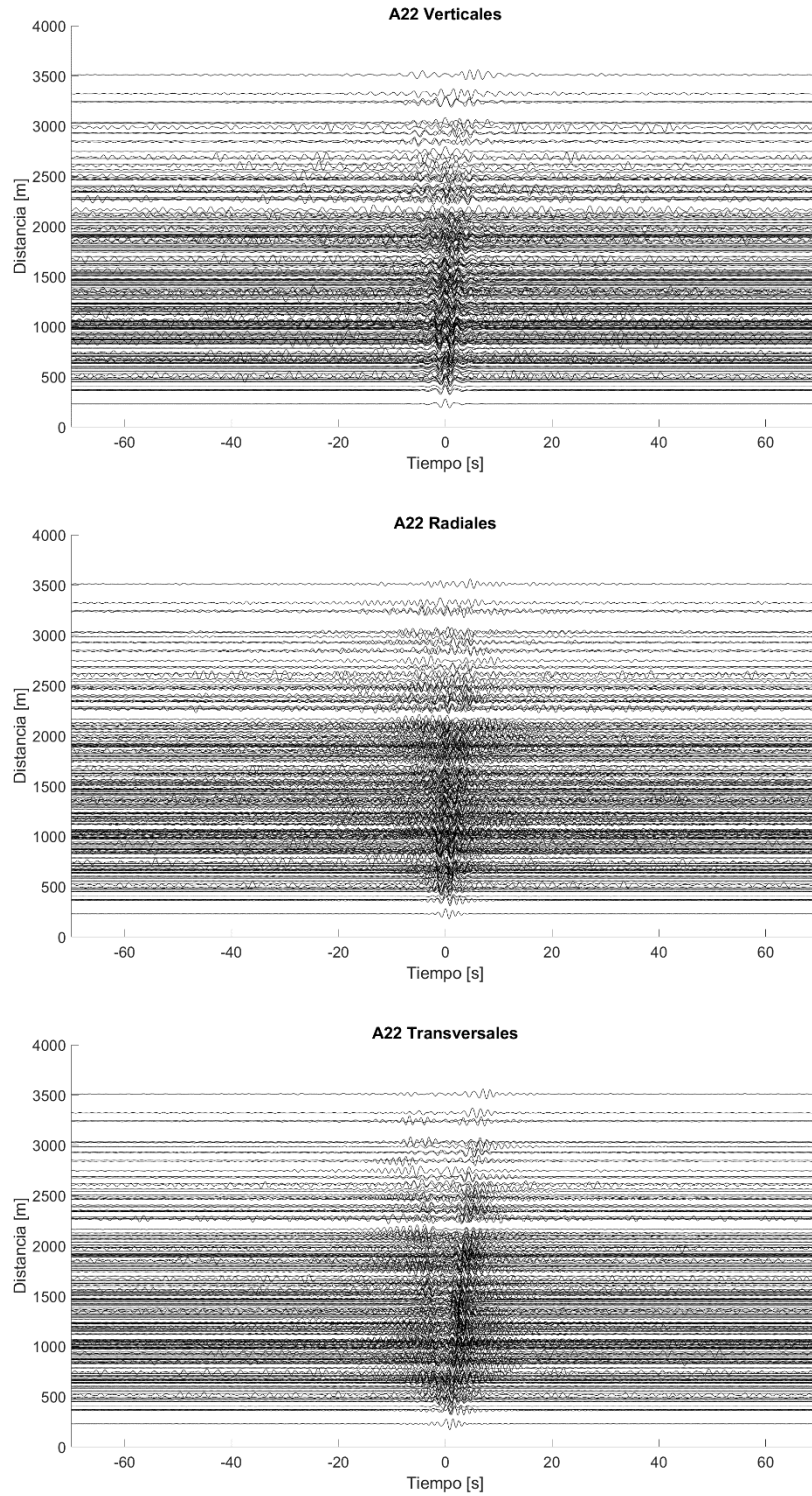


Figura AII_22. Funciones de Green estimadas en el arreglo A22, filtradas de 0.4 a 0.8 Hz.

Anexo III. Cálculo de los tiempos de viaje por arreglo.

En el arreglo A2 fueron utilizados los resultados del análisis de componentes independientes para calcular los tiempos de viaje. En este arreglo se formaron 153 pares de estaciones diferentes, pero sólo se observó un pulso coherente en 14. Además, se recuperaron los pulsos en rangos muy cortos de frecuencias y diferentes. Las matrices de coeficientes de correlación de densidad espectral calculadas en los tres componentes de todas las estaciones de este arreglo muestran correlaciones entre frecuencias vecinas en 5 estaciones. Debido a la cantidad de pares en los que no se tuvo éxito fue difícil determinar una relación entre la orientación de los pares de estaciones o la distancia. Sin embargo, se deben considerar los siguientes elementos: 1) El 52 % de los pares de estaciones tenían una orientación similar a NW-SE (con azimuts entre $135^\circ \pm 22.5^\circ$ o $315^\circ \pm 22.5^\circ$), que coincide con la dirección donde se obtuvo la mayor cantidad de pares de estaciones donde no se recuperó la función de Green en el Arreglo 1. 2) Las distancias entre las estaciones que formaban los pares eran grandes. La mediana de la distancia entre estaciones fue de 2047 m, con algunos pares a distancias de más de 6300 m. 3) Como se observa en la Figura AIII_1, las funciones PSD muestran diferencias significativas de niveles de energía en los tres componentes de todas las estaciones en el arreglo A2 y en el rango de frecuencias de investigación.

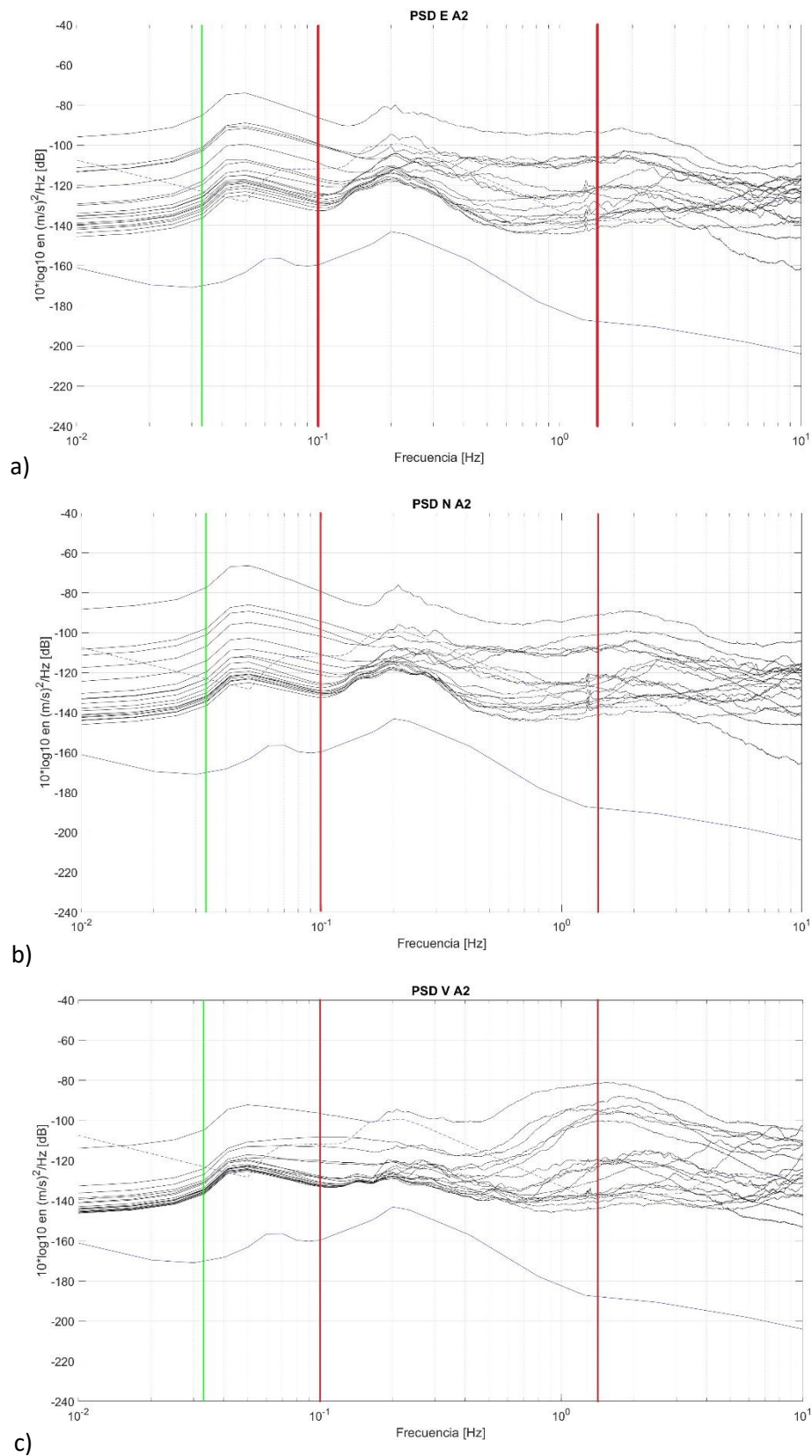


Figura AIII_1. Percentil 50 de las funciones PSD por componente, estimadas en todas las estaciones del arreglo A2. Se observan diferencias significativas de energía en el rango de

frecuencias de investigación (0.1 a 1.5 Hz, en rojo). a) Componente este. b) Componente norte. c) Componente vertical

En el arreglo A3 se utilizaron los resultados del análisis de componentes independientes, de 153 pares de estaciones formados en el arreglo se observó un pulso coherente en 19 de ellos. En estos pares los pulsos fueron obtenidos en rangos cortos de frecuencias y diferentes entre sí. Como se muestra en la Figura AIII_2, las matrices de coeficientes de correlación de densidad espectral muestran frecuencias vecinas correlacionadas en rangos amplios de frecuencias, esto fue observado en al menos la mitad de las estaciones. De la misma manera que en el arreglo A2, las funciones PSD muestran diferencias significativas de energía en los tres componentes de todas las estaciones en el rango de frecuencias de investigación.

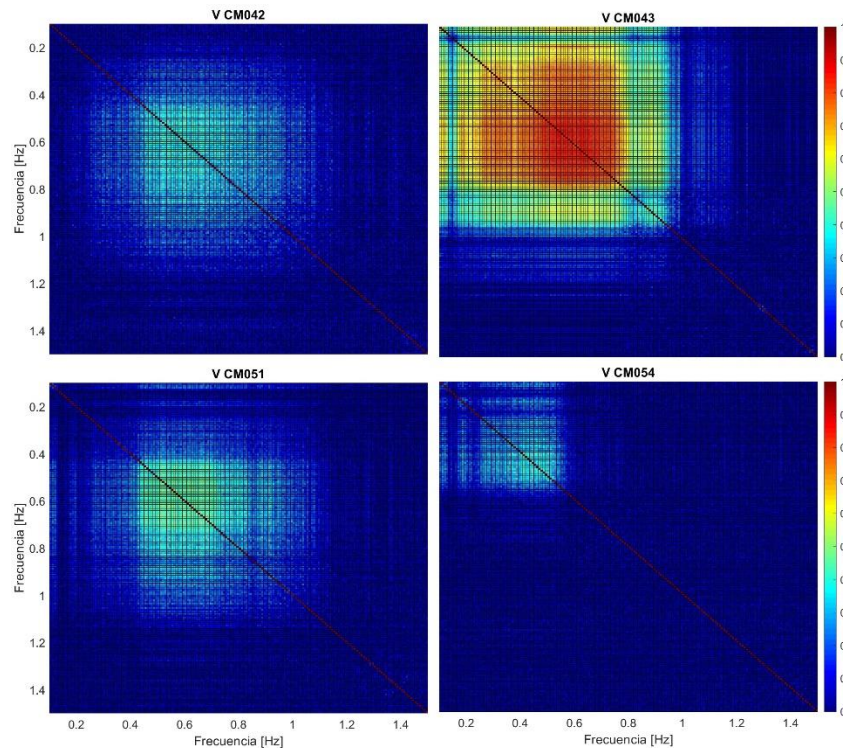


Figura AIII_2. Matrices de coeficientes de correlación de densidad espectral obtenidas en la componente vertical de cuatro estaciones pertenecientes al arreglo A3. Se observa correlación entre frecuencias vecinas en rangos amplios de frecuencias.

En el arreglo A4 fueron utilizadas las componentes verticales, de 153 pares de estaciones posibles se observó un pulso coherente en 113 de ellos. Los tiempos de viaje fueron estimados en un rango de frecuencias entre 0.38 y 0.95 Hz. Se estimaron velocidades entre 30 y 900 m/s. En este arreglo no se encontró una relación entre la recuperabilidad de la función de Green y el azimut de los pares

de estaciones, pero sí con la distancia entre estaciones. En la Figura AIII_3 se muestran en un histograma las distancias entre los pares formados en el arreglo y las distancias en los pares donde no se recuperó la función de Green, se observa que existe una mayor proporción de estaciones donde no se recuperó la función de Green (17 de 31) en pares de estaciones con distancias menores a 800 m. En la Figura AIII_4 se ejemplifica el picado de las curvas de dispersión en la parte causal y no causal de un par de estaciones, en la Figura AIII_5 se muestra el filtrado múltiple para el mismo par de estaciones.

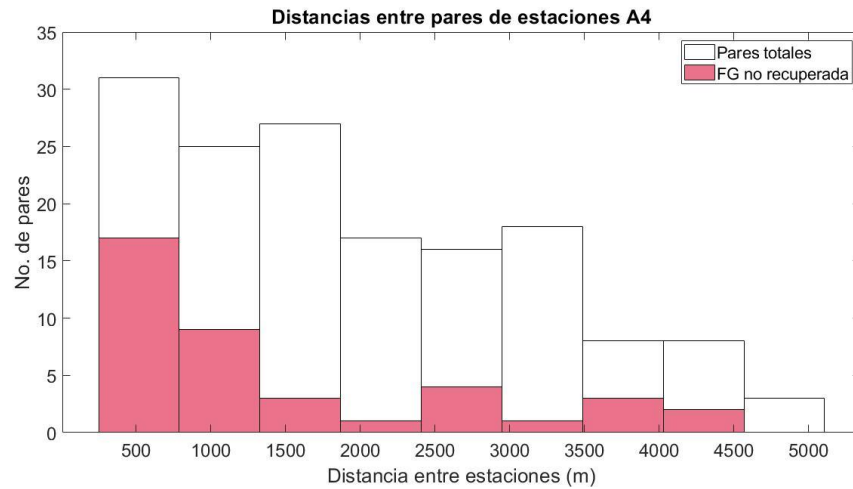


Figura AIII_3. Histograma de las distancias entre pares de estaciones formados en el arreglo A4 (barras blancas) y de las estaciones dónde no se recuperó la función de Green (barras rojas). Para distancias menores a 800 ms no se recuperó la función de Green en más de la mitad de los pares totales a esas distancias.

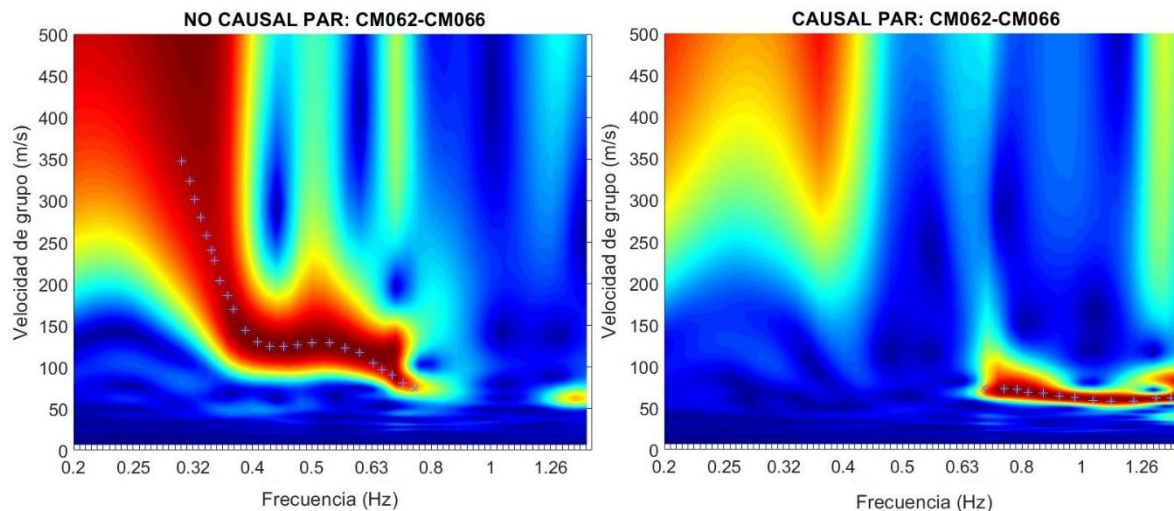


Figura AIII_4. Curvas de dispersión obtenidas en la componente vertical entre el par de estaciones CM062-CM066 del arreglo A4. En algunos casos se picó en la parte causal y la no causal para complementar la curva. Los asteriscos representan los picados manuales

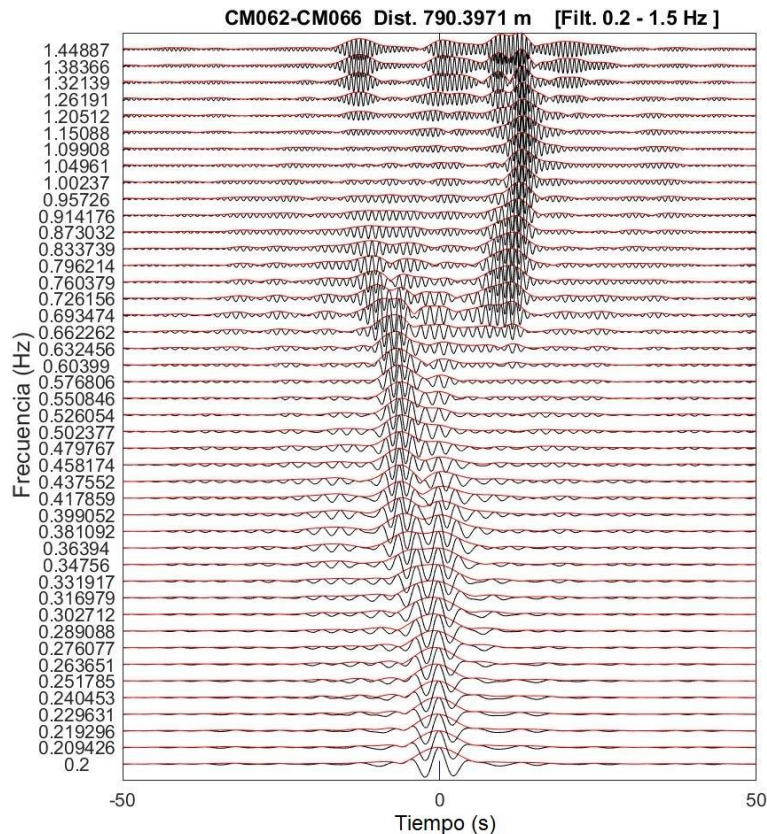


Figura AIII_5. Filtrado múltiple de la función de Green recuperada entre el par de estaciones CM062-CM066 del arreglo A4. Las líneas rojas representan la envolvente.

En el arreglo A5 se utilizó la componente transversal de la función de Green recuperada. Se observó un pulso coherente y en un rango de frecuencias amplio en 130 pares de estaciones de 153 posibles. Los tiempos de viaje fueron calculados en un rango de 0.4 a 1.3 Hz. Se estimaron velocidades desde 40 a 600 m/s. En 15 de los 22 pares de estaciones donde no fue recuperada la función de Green, se observaba una orientación NW-SE (azimuts entre 112.5° y 157.5°) y en 10 una distancia entre estaciones mayor a 2000 m. En la Figura AIII_6 se muestra la curva de dispersión estimada utilizando la parte causal del componente transversal de la función de Green recuperada en el par CM081-CM083, el filtrado múltiple se muestra en la Figura AIII_7.

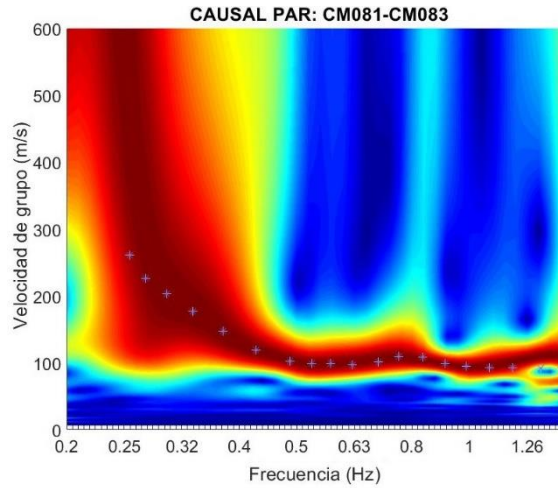


Figura AIII_6. Curva de dispersión obtenida en la parte causal la componente transversal de la función de Green recuperada en el par CM081-CM083.

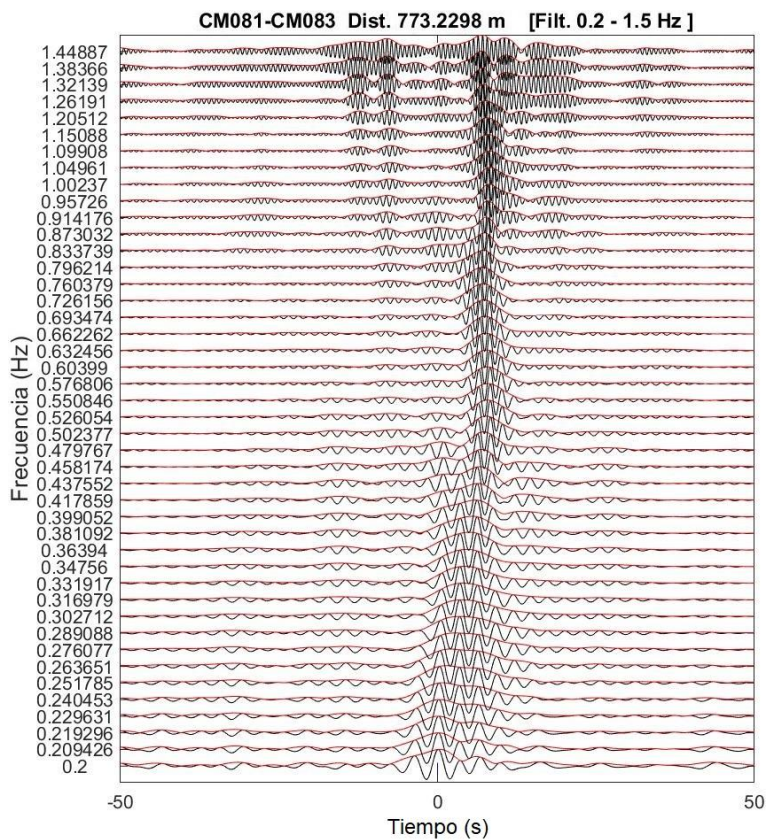


Figura AIII_7. Filtrado múltiple de la función de Green recuperada en el par de estaciones CM081-CM083 del arreglo A5. Las líneas rojas representan la envolvente.

En el arreglo A6 fueron utilizados los resultados del análisis de componentes independientes. De 105 pares formados en el arreglo, la función de Green fue recuperada en 78 de ellos. Los tiempos de viaje fueron estimados en un rango entre 0.3 y 1.3 Hz. Se observaron velocidades entre 50 y 500 m/s. Al igual que en el arreglo 1, más de la mitad de los pares de estaciones donde no se recuperó la función de Green tenían una orientación similar a la Este-Oeste ($90^\circ \pm 22.5^\circ$ o $270^\circ \pm 22.5^\circ$). Sin embargo, en este caso la proporción entre las funciones recuperadas respecto a las no recuperables fue mayor. Como se muestra en la Figura AIII_8 en distancias mayores a 3000 m había una proporción mayor de funciones no recuperadas. En la Figura AIII_9 se muestra la curva de dispersión obtenida de la parte causal de una de las soluciones del análisis de componentes independientes para un par de estaciones. En la Figura AIII_10 se muestra el filtrado múltiple que corresponde a la Figura AIII_9.

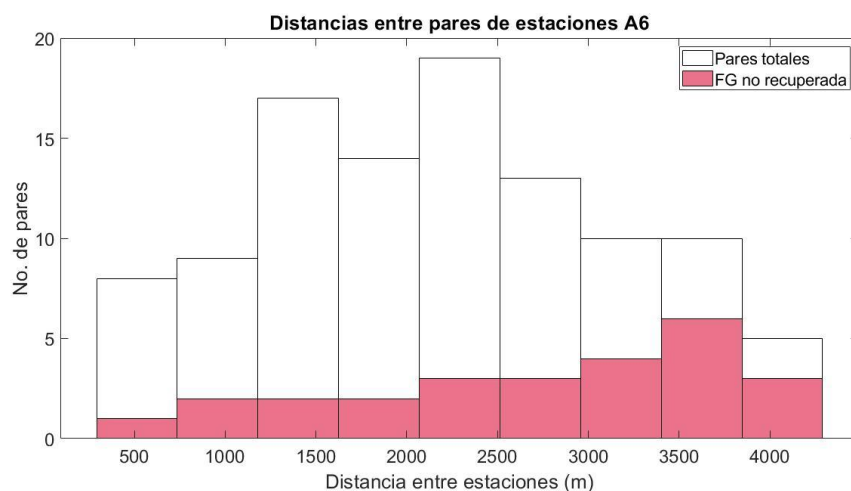


Figura AIII_8. Histograma de las distancias entre pares de estaciones formados en el arreglo A6 (barras blancas) y de las estaciones dónde no se recuperó la función de Green (barras rojas). Para distancias mayores a 3000 metros no se recuperó la función de Green en mayor proporción.

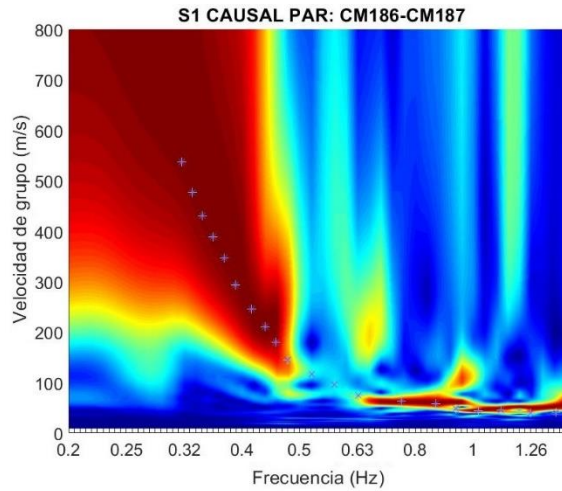


Figura AIII_9. Picado de la curva de dispersión obtenida de la parte causal de una solución del análisis de componentes independientes aplicado a las funciones de Green recuperadas en la componente radial y vertical entre las estaciones CM186 y CM187.

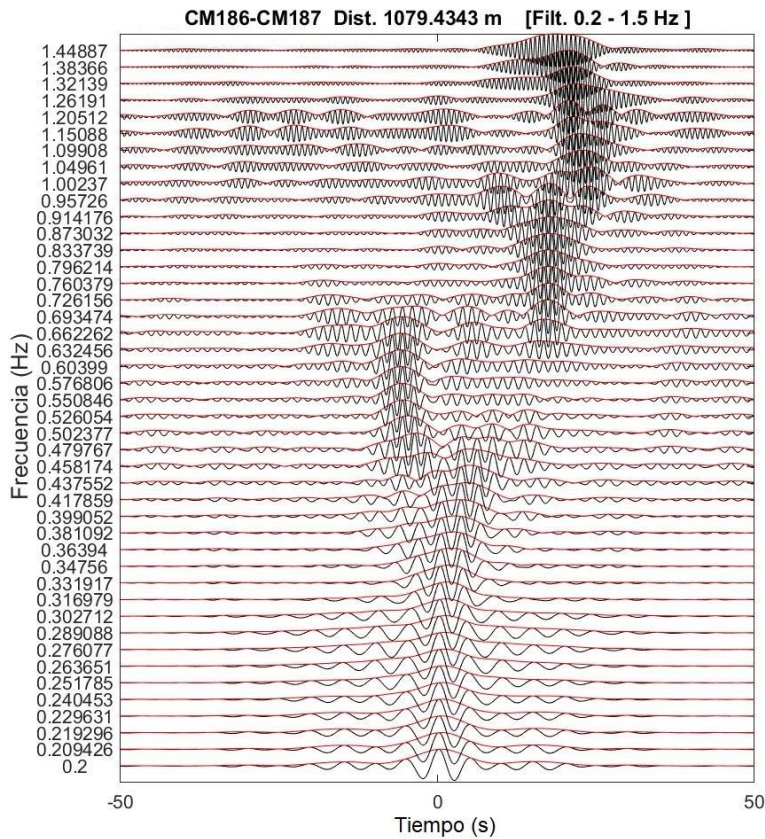


Figura _A10. Filtrado múltiple de la función de Green recuperada en el par de estaciones CM186-CM187 del arreglo A6. Las líneas rojas representan la envolvente.

En el arreglo A7 los tiempos de viaje fueron calculados en la componente vertical de la función de Green recuperada. De 15 pares de estaciones formados en el arreglo, se obtuvo un pulso coherente entre 0.32 y 1.4 Hz en 14 pares. Se estimaron velocidades entre 50 y 250 m/s. Es la Figura AIII_11 se muestra una curva de dispersión obtenida a partir del análisis FTAN de la función de Green recuperada en un par de estaciones, en la Figura AIII_12 se muestra el filtrado múltiple en el dominio del tiempo.

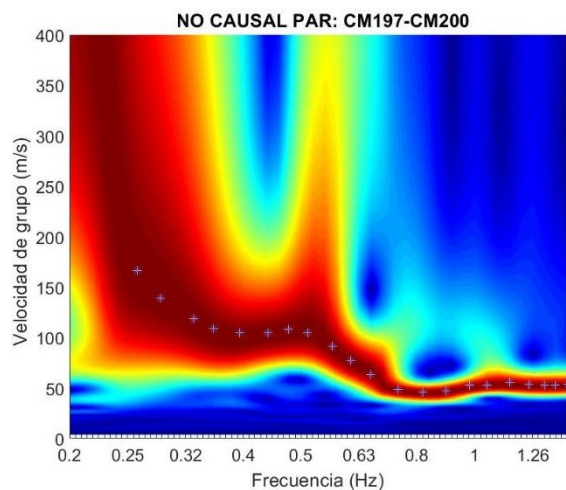


Figura AIII_11. Curva de dispersión obtenida en la parte no causal de la función de Green recuperada entre las estaciones CM197-CM200. Los asteriscos representan el picado manual.

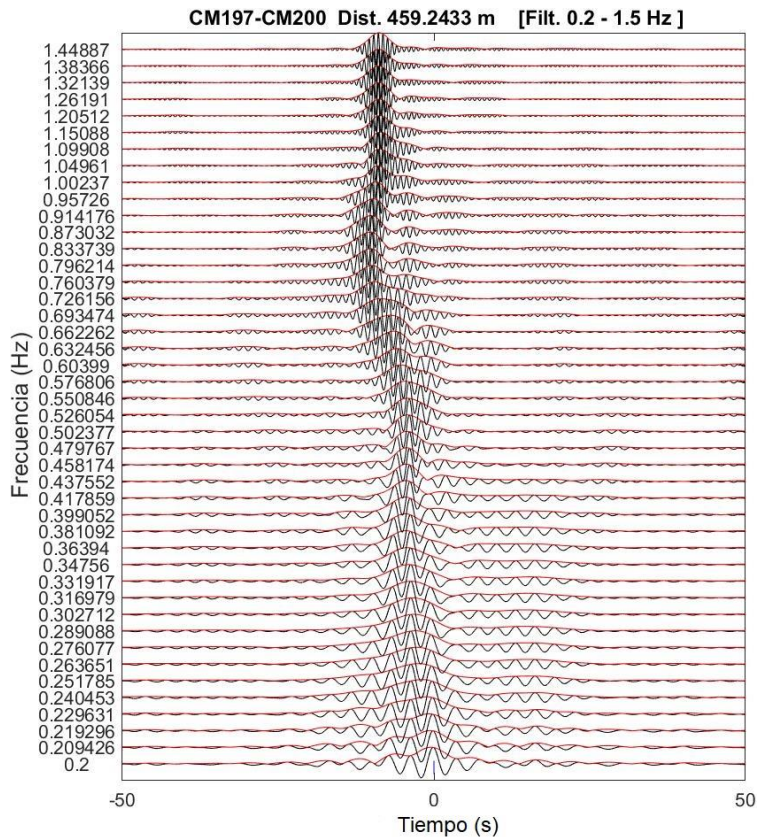


Figura AIII_12. Filtrado múltiple de la función de Green recuperada en componente vertical entre el par de estaciones CM197-CM200 del arreglo A7. Las líneas rojas representan la envolvente.

En el arreglo A8 se utilizaron los resultados del análisis de componentes independientes, de 136 pares de estaciones formadas en el arreglo, la función de Green fue recuperada en 95 de ellos. Los tiempos de viaje fueron estimados en un rango de frecuencias entre 0.35 y 1 Hz. Se calcularon velocidades en un rango de 30 a 250 m/s. Como se observa en la Figura AIII_13, la mayoría de los pares de estaciones donde no fue recuperada la función de Green (31 de 41) tenían distancias de más de 3000 metros. En la Figura AIII_14 se muestra el picado de una curva de dispersión obtenida de la parte causal de una solución del análisis de componentes independientes, el filtrado múltiple en el dominio del tiempo que corresponde a esta curva se muestra en la Figura AIII_15.

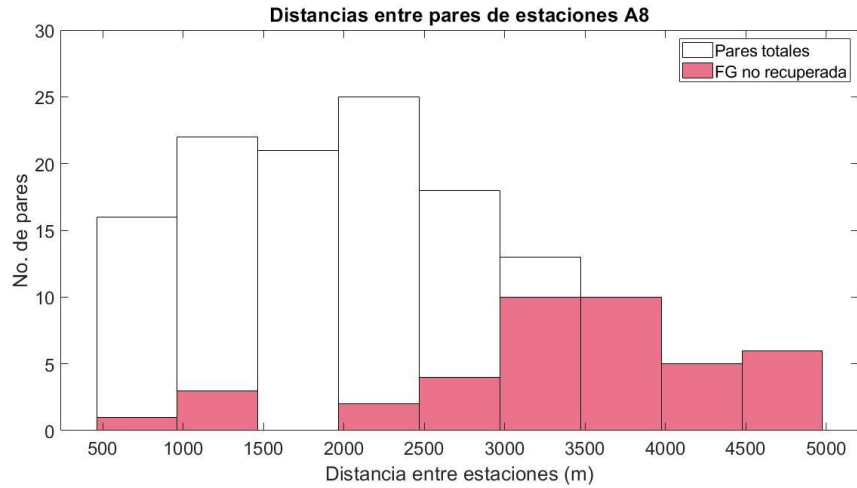


Figura AIII_13. Histograma de las distancias entre pares de estaciones formados en el arreglo A8 (barras blancas) y de las estaciones dónde no se recuperó la función de Green (barras rojas). En distancias mayores a 3 000 m se concentra la mayor cantidad de pares donde no se recuperó la función de Green

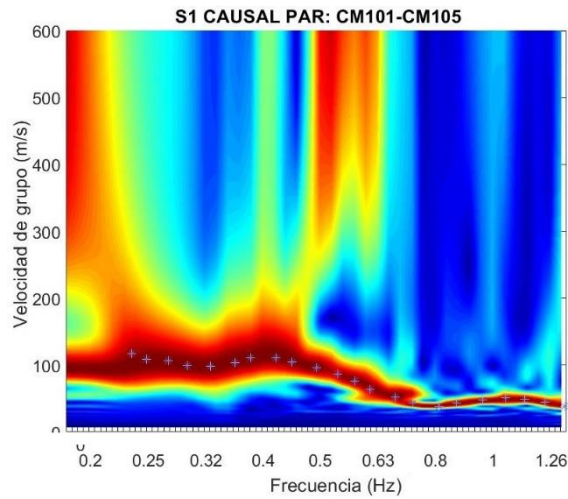


Figura AIII_14. Picado de la curva de dispersión obtenida de la parte causal de una solución del análisis de componentes independientes en el par CM101-CM105.

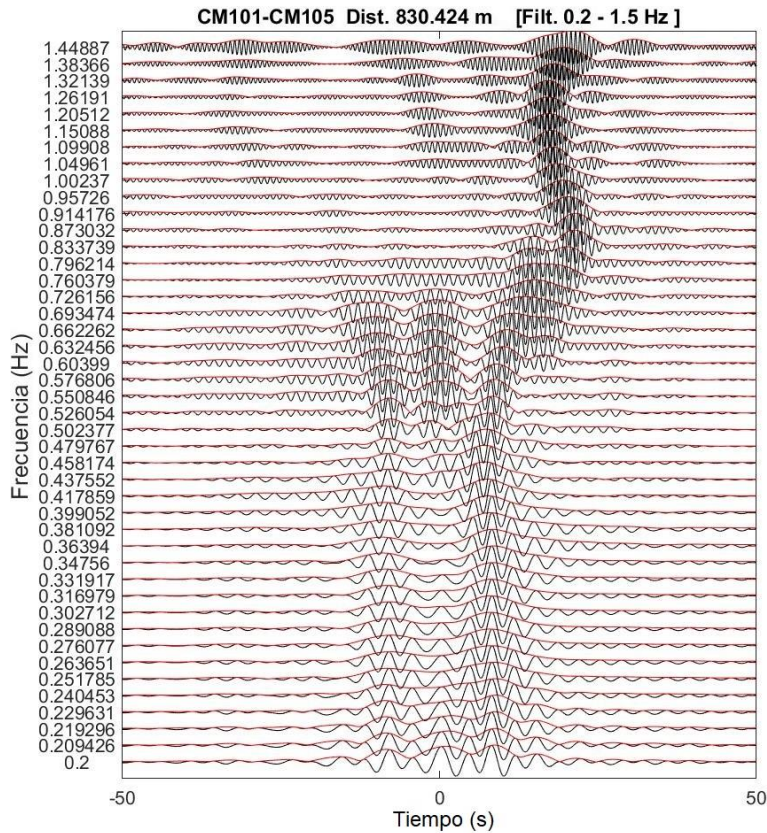


Figura AIII_15. Filtrado múltiple de la función de Green recuperada en el par de estaciones CM101-CM105 del arreglo A8. Las líneas rojas representan la envolvente.

En el arreglo A9 se utilizó la componente transversal de la función de Green para calcular los tiempos de viaje en un rango entre 0.4 y 1.3 Hz. Se estimaron velocidades ente 60 y 600 m/s. De 136 pares formados en este arreglo, se observó un pulso coherente y en un rango amplio de frecuencias en 94 de ellos. Como se observa en la Figura AIII_16, la proporción de las funciones de Green no recuperadas aumentó en pares de estaciones con distancias mayores a 1000 m. En la Figura AIII_17 se muestra la curva de dispersión obtenida en la parte causal del componente transversal de la función de Green para un par de estaciones pertenecientes al arreglo A9, en la Figura AIII_18 se muestra el filtrado múltiple correspondiente.

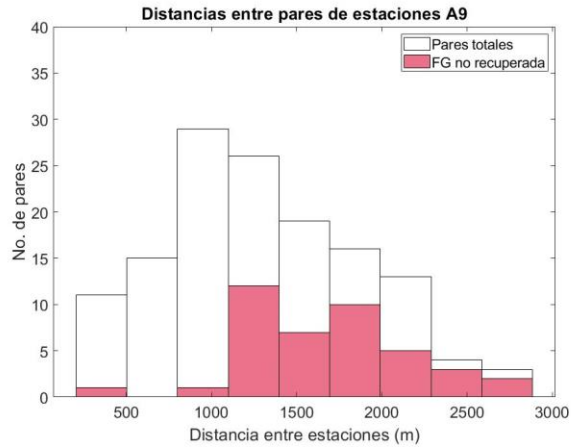


Figura AIII_16. Histograma que muestra las distancias entre pares de estaciones para todos los pares posibles del arreglo A9 (blanco) y para los pares donde no fue recuperada la función de Green (rojo). Se puede observar que en distancias mayores a 1000 metros crece la proporción de los pares donde no fue recuperada la función de Green.

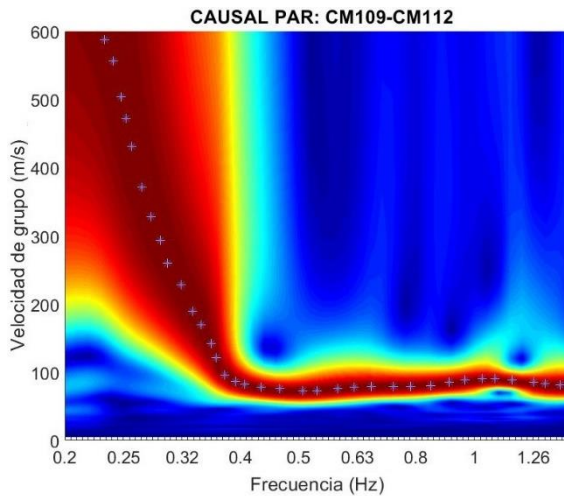


Figura AIII_17. Curva de dispersión obtenida en la parte causal la componente transversal de la función de Green recuperada en el par CM109-CM112.

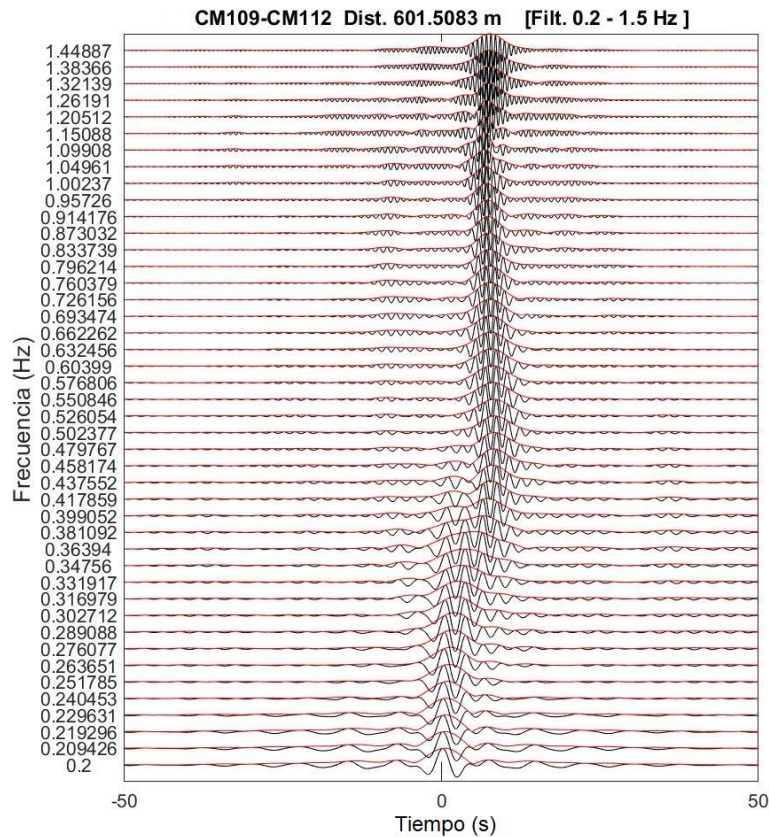


Figura AIII_18. Filtrado múltiple de la función de Green recuperada en el par de estaciones CM081-CM083 del arreglo A5. Las líneas rojas representan la envolvente.

En el arreglo A10 se utilizó la componente transversal de la función de Green para calcular los tiempos de viaje en un rango entre 0.45 y 1.3 Hz. Se estimaron velocidades de 80 a 1200 m/s. De 153 pares formados en este arreglo, se observó un pulso coherente y en un rango amplio de frecuencias en 104. Se identificaron tres estaciones (CM130, CM137 y CM139) con desfases y problemas de sincronización en tiempo, 48 de los 49 pares de estaciones donde no se observó un pulso coherente están asociados a estas estaciones. En la Figura AIII_19 se muestra la curva de dispersión obtenida en la parte causal y no causal del componente transversal de la función de Green para un par de estaciones pertenecientes al arreglo A10, en la Figura AIII_20 se muestra el filtrado múltiple correspondiente.

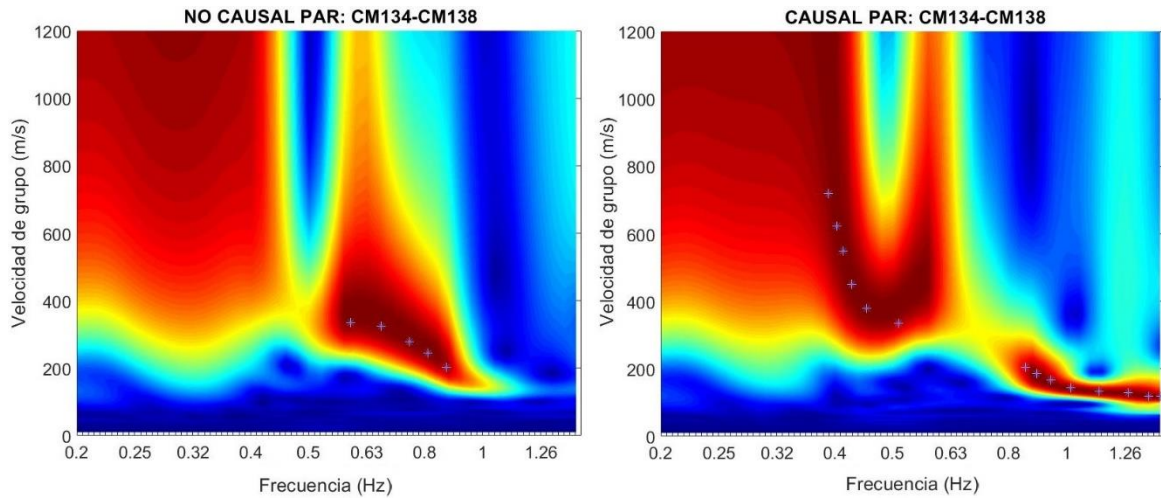


Figura AIII_19. Curva de dispersión obtenida en la parte causal y no causal del componente transversal de la función de Green recuperada en el par CM134-CM138. Los asteriscos representan los picados manuales, en algunos casos se consideró la parte causal y la no causal.

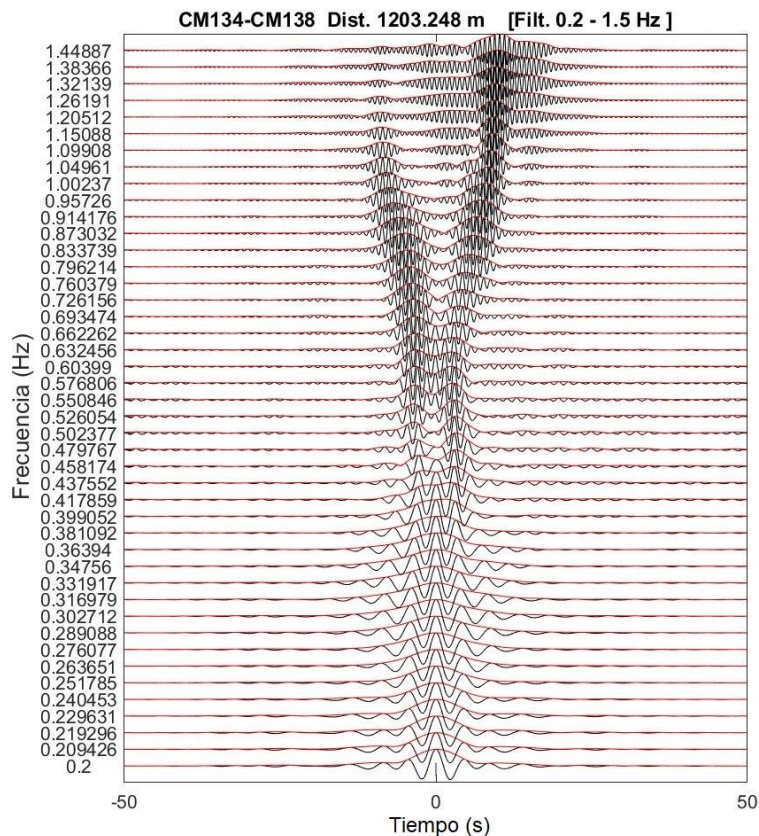


Figura AIII_20. Filtrado múltiple de la función de Green recuperada en el par de estaciones CM134-CM138 del arreglo A10. Las líneas rojas representan la envolvente.

En el arreglo A11 fueron utilizados los resultados del análisis de componentes independientes, de 153 pares que se forman en el arreglo, en 90 fue observado un pulso coherente y en un rango de frecuencias similar. En la estación CM159 se detectaron problemas de sincronización en tiempo por lo que todos los pares que la incluían fueron descartados. Los tiempos de viaje fueron calculados en un rango de frecuencias entre 0.45 y 1.1 Hz, se estimaron velocidades en un rango de 60 a 500 m/s. En este arreglo no se observó una relación obvia entre la orientación de los pares de estaciones o la distancia entre estaciones y la existencia de un pulso coherente. Las matrices de coeficientes de correlación de densidad espectral obtenidas para este arreglo muestran fuertes correlaciones entre frecuencias vecinas en los tres componentes, debidas a la influencia de fuentes cercanas. Posiblemente una cantidad importante de estas fuentes se localizaron en las zonas de fase estacionaria, impidiendo la separación de las componentes difuso y no difuso, y consecuentemente, la recuperación de la función de Green de forma precisa o total. En la Figura AIII_21 se muestra el picado de una curva de dispersión obtenida de la parte causal de una solución del análisis de componentes independientes, el filtrado múltiple que corresponde a esta curva se muestra en la Figura AIII_22.

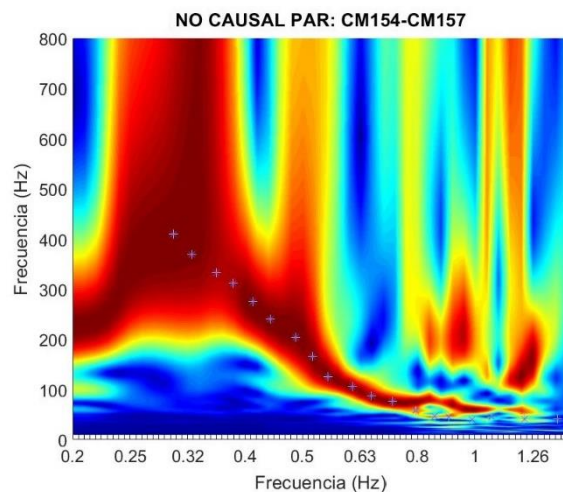


Figura AIII_21. Picado de la curva de dispersión obtenida de la parte no causal de una solución del análisis de componentes independientes en el par CM154-CM157.

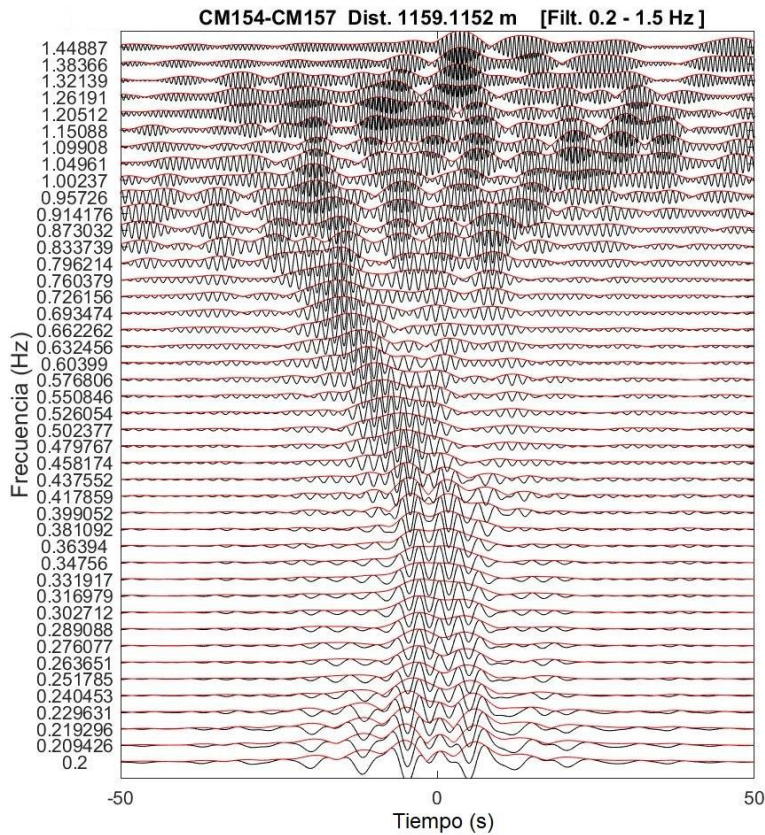


Figura AIII_22. Filtrado múltiple de la función de Green recuperada en el par de estaciones CM154-CM157 del arreglo A11. Las líneas rojas representan la envolvente.

En el arreglo A12 se utilizó la componente transversal de la función de Green para calcular los tiempos de viaje en un rango entre 0.51 y 1.3 Hz. Las velocidades estimadas variaron de 50 a 1200 m/s. De 153 pares formados en este arreglo, se observó un pulso coherente y en un rango amplio de frecuencias en 103. Se identificó una estación (CM163) con problemas de sincronización en tiempo, por lo que fueron descartados todos los pares que la incluían, no fue posible recuperar la función de Green en distancias mayores a 2600 m. En la Figura AIII_23 se muestra la curva de dispersión obtenida en la parte no causal del componente transversal de la función de Green para un par de estaciones pertenecientes al arreglo A12, en la Figura AIII_24 se muestra el filtrado múltiple correspondiente.

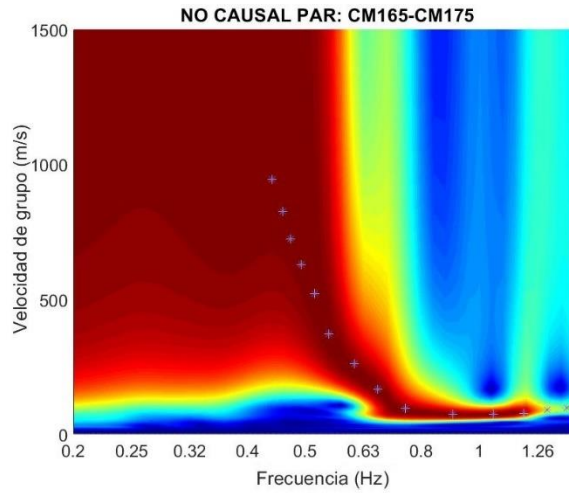


Figura AIII_23. Curva de dispersión obtenida en la parte no causal del componente transversal de la función de Green recuperada entre las estaciones CM165-.CM175, los asteriscos representan el picado manual.

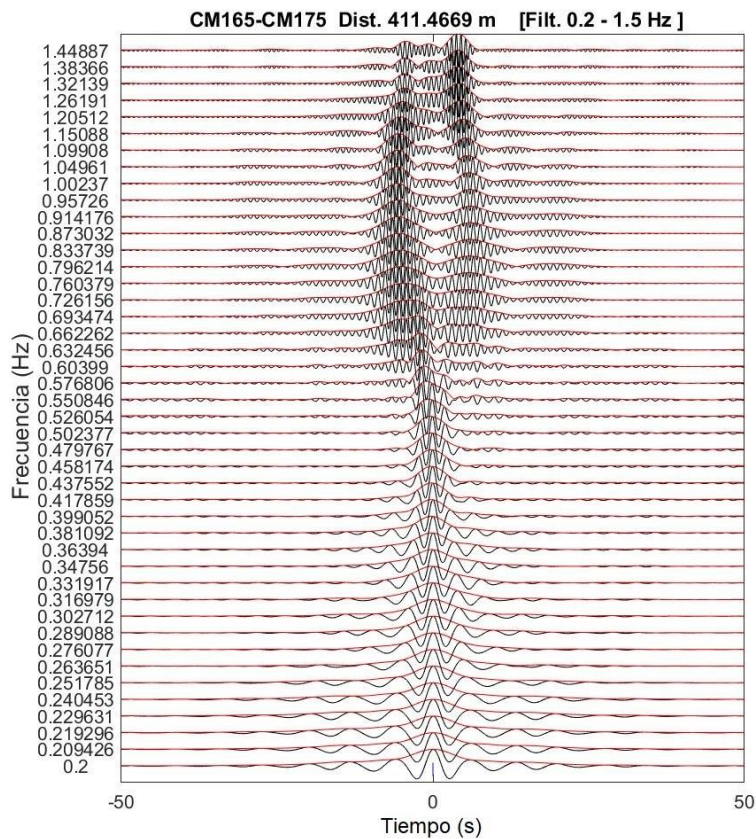


Figura AIII_24. Filtrado múltiple de la función de Green recuperada en el par de estaciones CM165-CM175 del arreglo A12. Las líneas rojas representan la envolvente.

En el arreglo A13 fueron utilizadas las componentes verticales de la función de Green recuperada, de 153 pares de estaciones se observó un pulso coherente en 86. Los tiempos de viaje fueron estimados en un rango de frecuencias entre 0.4 y 1 Hz, las velocidades variaron entre 30 y 800 m/s. En este arreglo se detectaron 2 estaciones con problemas de sincronización en tiempo (CM204 y CM2017), por lo que todas las correlaciones cruzadas que incluían a cualquiera de estas fueron descartadas (32 pares). En el resto de los pares donde no se recuperó la función de Green no se observó una relación directa con la orientación de los pares. En 10 (de 14 totales) pares de estaciones con distancias inferiores a 700 metros no se observó un pulso coherente en el rango de frecuencias buscado, la mayoría de estos pares se localizaban en la zona de lomas o de transición. En la Figura AIII_25 se muestra el picado de una curva de dispersión obtenida de la parte causal de la función de Green del par CM202-CM203, el filtrado múltiple que corresponde a esta curva se muestra en la Figura AIII_26.

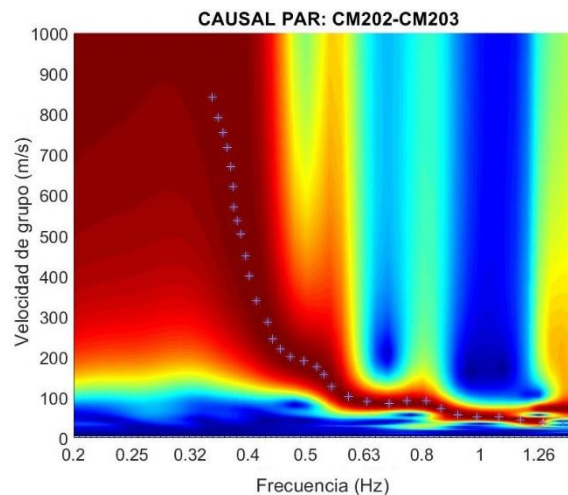


Figura AIII_25. Picado de la curva de dispersión obtenida de la parte no causal de una solución del análisis de componentes independientes en el par CM202-CM203.

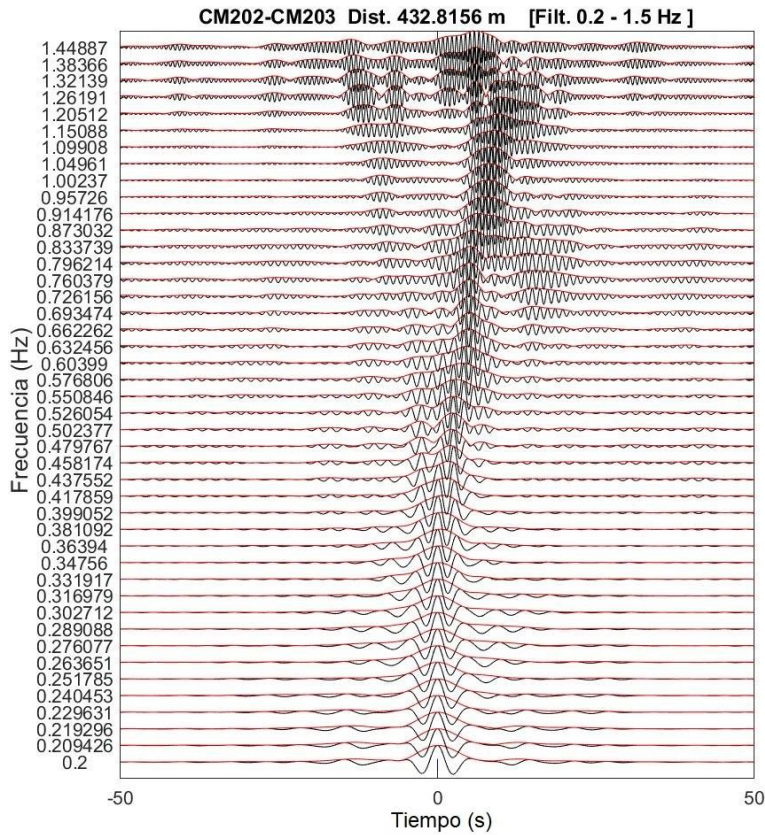


Figura AIII_26. Filtrado múltiple de la función de Green recuperada en el par de estaciones CM202-CM204 del arreglo A13. Las líneas rojas representan la envolvente.

En el arreglo A14 fueron utilizados los resultados del análisis de componentes independientes, de 153 pares formados en el arreglo se obtuvo un pulso coherente en un rango amplio de frecuencias en 102 de ellos. En este arreglo no se observó una relación entre la orientación de los pares de estaciones y la recuperabilidad de la función de Green. Los tiempos de viaje fueron calculados entre 0.45 y 1.1 Hz, las velocidades variaron entre 40 y 600 m/s. En la parte norte del arreglo, algunas estaciones se encontraban en los límites de la zona de lago y de transición, en los pares vecinos más cercanos entre estas estaciones no fue posible recuperar la función de Green, o en algunos casos, no se recuperó en el rango de frecuencias esperado. En la Figura AIII_27 se muestra una curva de dispersión obtenida a partir del análisis FTAN de la parte causal de una solución del análisis de componentes independientes, en la Figura AIII_28 se muestra el filtrado múltiple correspondiente.

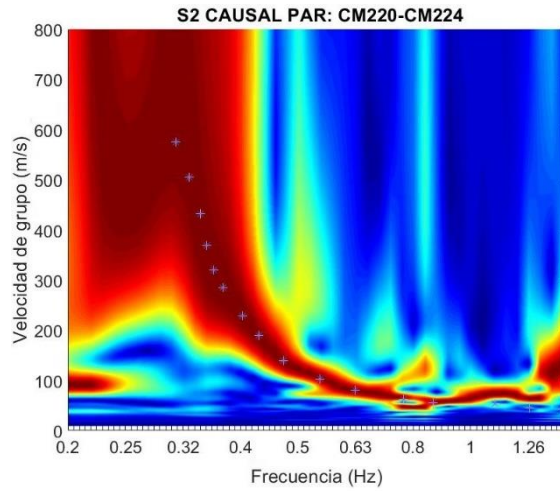


Figura AIII_27. Picado de la curva de dispersión obtenida de la parte causal de una solución del análisis de componentes independientes en el par CM220-CM224.

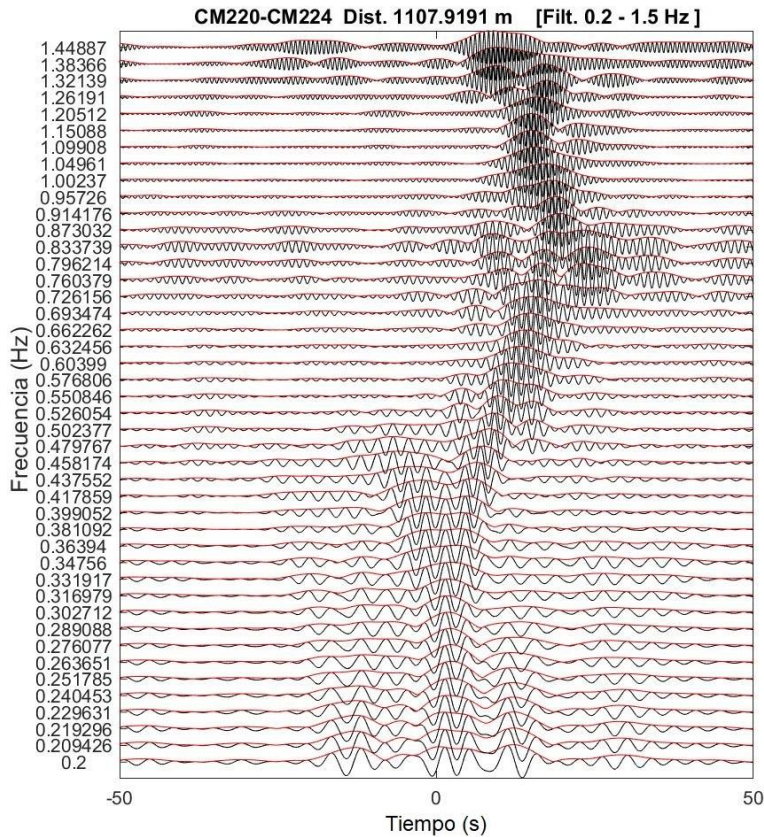


Figura AIII_28. Filtrado múltiple de la función de Green recuperada en el par de estaciones CM220-CM224 del arreglo A14. Las líneas rojas representan la envolvente.

En el Arreglo A15, se recuperó la función de Green en 81 pares de 153 posibles. Los tiempos de viaje fueron calculados utilizando la componente transversal de la función de Green en un rango de frecuencias de 0.3 a 1.3 Hz. Las velocidades estimadas variaron de 60 a 1200 m/s. Los registros de las estaciones CM247 y CM253 presentaron problemas de sincronización, por lo que fueron descartadas todas las correlaciones cruzadas que las involucraban. Entre los otros pares de estaciones donde no fue recuperada la fusión de Green, había una proporción mayor a distancias superiores a los 3200 m. No se observó una relación con la orientación. En la Figura AIII_29 se muestra una curva de dispersión obtenida a partir del análisis FTAN aplicado en la parte causal de una función de Green recuperada, el filtrado múltiple correspondiente se muestra en la Figura AIII_30.

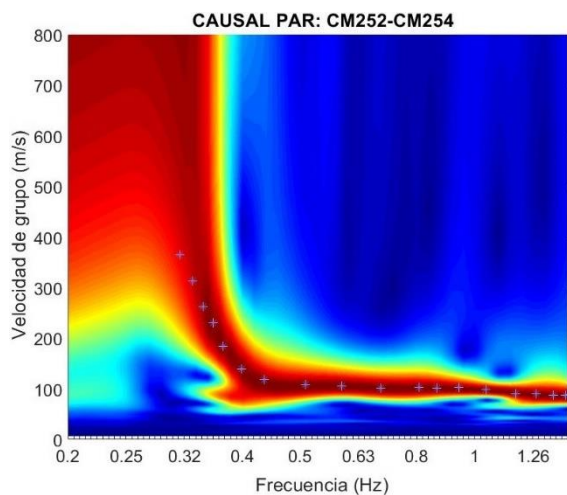


Figura AIII_29. Curva de dispersión obtenida en la parte causal del componente transversal de la función de Green recuperada entre las estaciones CM252 y CM254 del arreglo A15. Los asteriscos representan el picado manual.

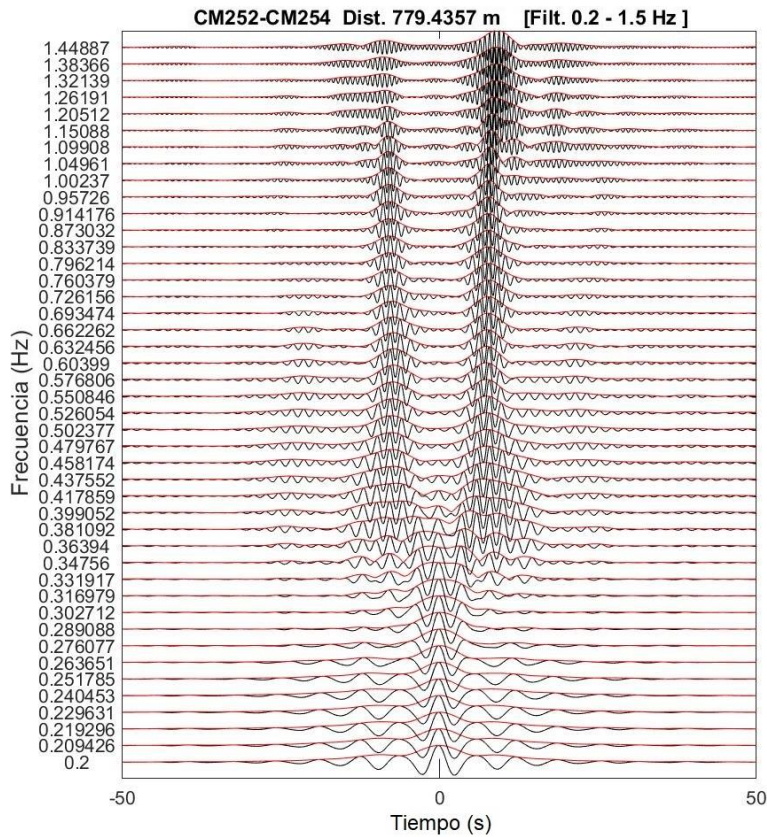


Figura AIII_30. Filtrado múltiple del componente transversal de la función de Green recuperada entre las estaciones CM252 y CM254 del arreglo A15.

Después de muchas pruebas utilizando los tres componentes y los resultados del análisis de componentes independientes, en el arreglo A16 los tiempos de viaje fueron calculados utilizando la componente transversal de la función de Green recuperada. De 153 pares de estaciones formados en el arreglo, en 55 de ellos fue observado un pulso coherente. Los tiempos de viaje fueron calculados en un rango entre 0.45 Hz y 1.1 Hz, las velocidades estimadas variaron de 70 a 800 m/s. Las matrices de coeficientes de correlación de densidad espectral indicaron que el ruido sísmico registrado en la mayoría de las estaciones no era completamente difuso. No se observó una relación con la distancia entre estaciones y la recuperabilidad de la función de Green. Respecto a la orientación, se observó que existe una mayor proporción de pares de estaciones donde no se recuperó la función de Green en pares con orientación NE-SW (azimuts entre $45^\circ \pm 22.5^\circ$ o $225^\circ \pm 22.5^\circ$). En la Figura AIII_31 se muestran las matrices de coeficientes de correlación de densidad espectral en los tres componentes de tres estaciones pertenecientes al arreglo A16. En la Figura AIII_32 se muestra una curva de dispersión obtenida en la parte causal del componente transversal

de la función de Green recuperada en un par de estaciones y en la Figura AIII_33 el filtrado múltiple de la misma función de Green.

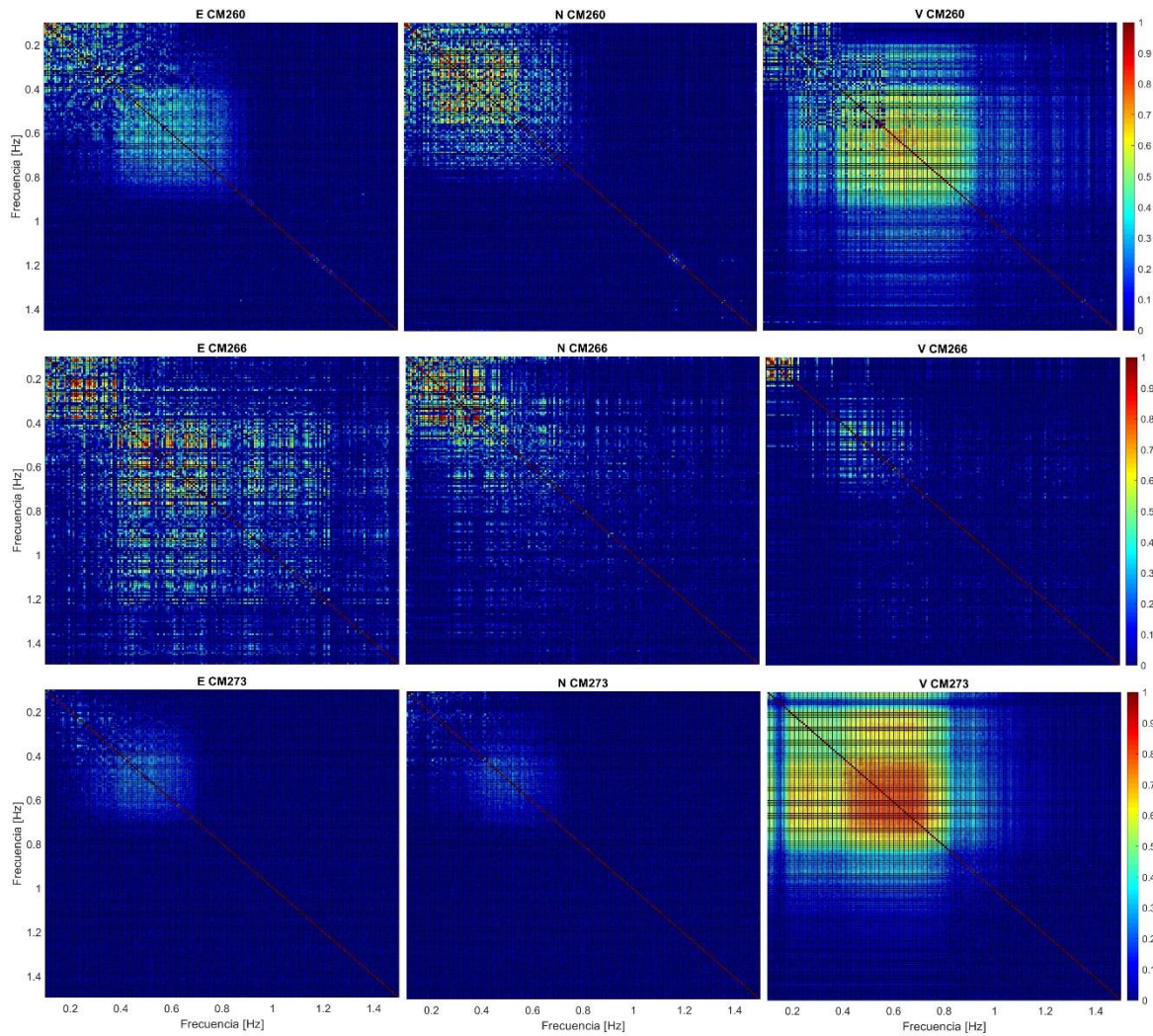


Figura AIII_31. Matrices de coeficientes de correlación de densidad espectral obtenidas en los tres componentes de las estaciones CM260, en la primera fila; CM266, en la segunda fila y CM273 en la tercera fila. Las matrices se calcularon en un rango entre 0.1 y 1.5 Hz. Se puede observar alta correlación en frecuencias vecinas en rangos amplios de frecuencias (0.1-0.8). En la mayoría de las estaciones pertenecientes al arreglo A16 se observaron resultados similares.

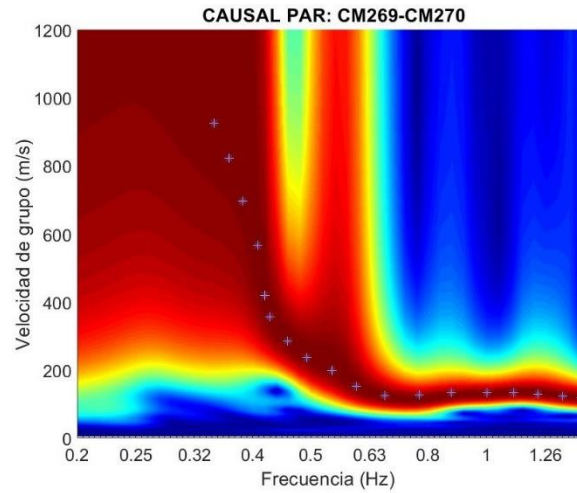


Figura AIII_32. Curva de dispersión obtenida en la parte causal del componente transversal de la función de Green recuperada entre las estaciones CM268 y CM270. Los asteriscos representan el picado manual.

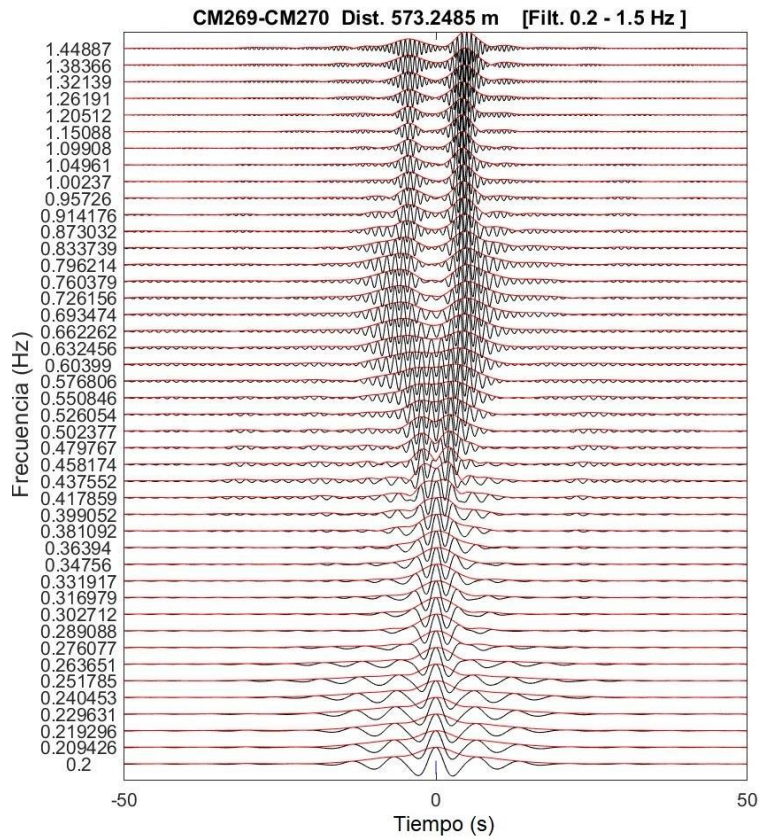


Figura AIII_33. Filtrado múltiple del componente transversal de la función de Green recuperada entre las estaciones CM269 y CM270 del arreglo A16.

En el Arreglo A17 se utilizó la componente vertical de la función de Green recuperada en el cálculo de los tiempos de viaje. Estos fueron estimados en un rango de 0.5 a 1.1 Hz, las velocidades estimadas de los trenes de onda variaron de 80 a 800 m/s. De 153 pares existentes en el arreglo, se observó un pulso coherente y en un amplio rango de frecuencias en 81 de ellos. No se encontró una relación entre la recuperabilidad de la función de Green y la orientación o distancia entre pares de estaciones. Sin embargo, las matrices de coeficientes de correlación de densidad espectral muestran una fuerte correlación entre frecuencias vecinas en el rango de estudio, en todas las estaciones y en los tres componentes. La no difusividad del campo de onda registrado es la causa más probable del poco éxito en la recuperación de la función de Green en este arreglo. Además, se observaron resultados pobres al aplicar en análisis de componentes independientes, sugiriendo que las fuentes de ruido están cercanas a las estaciones. Es importante mencionar que este arreglo fue desplegado en una zona densamente poblada. En la Figura AIII_34 se muestran las matrices de coeficientes de correlación de densidad espectral obtenidas en los tres componentes de tres estaciones del arreglo A17, se puede observar alta correlación entre frecuencias vecinas en amplios rangos de frecuencias, todas las estaciones tuvieron el mismo comportamiento. En la Figura AIII_35 se muestra una curva de dispersión obtenida en un par de estaciones y en la Figura AIII_36 el filtrado múltiple correspondiente.

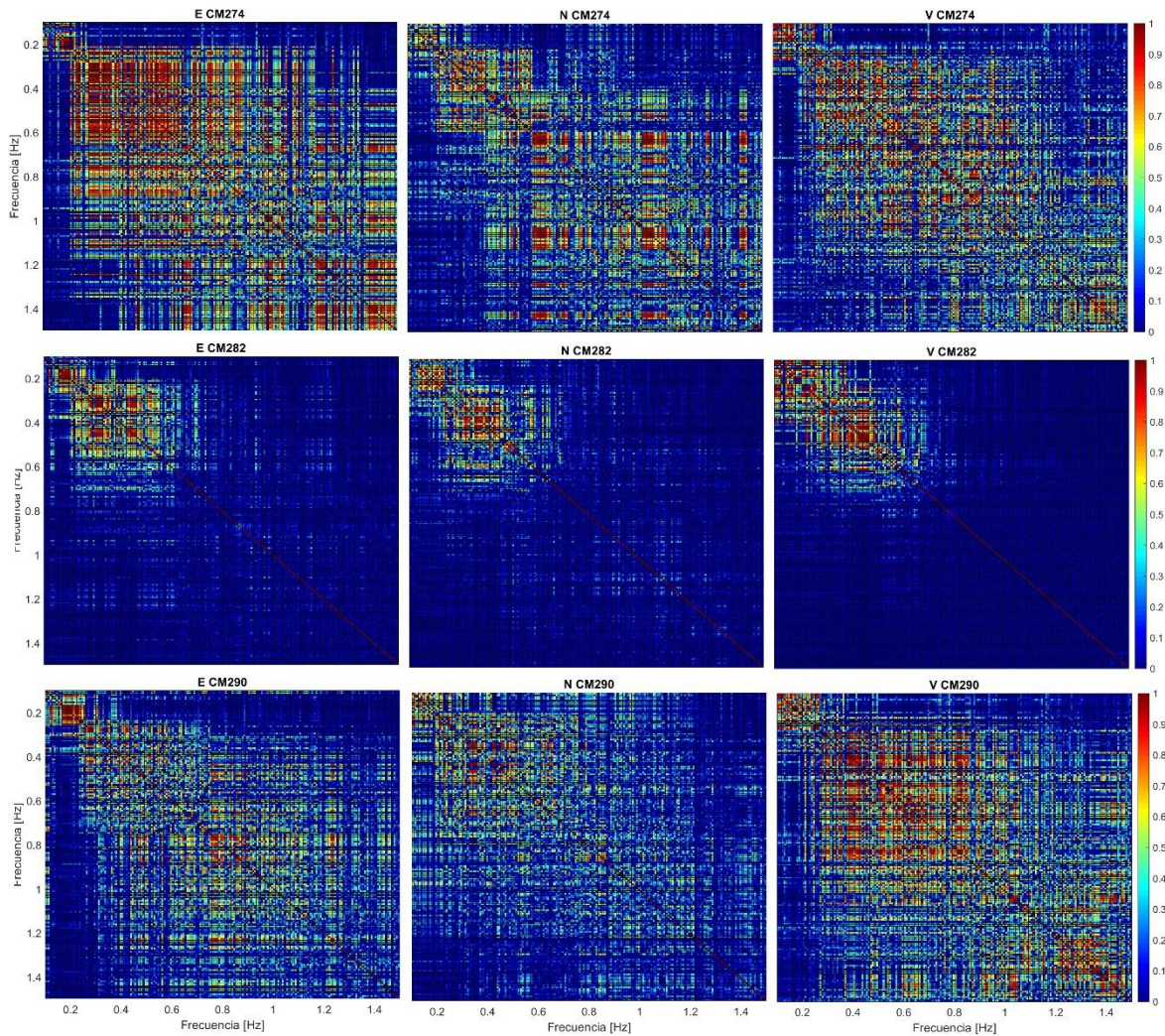


Figura AIII_34. Matrices de coeficientes de correlación de densidad espectral obtenidas en los tres componentes de las estaciones CM274, en la primera fila; CM82, en la segunda fila y CM290 en la tercera fila. Las matrices se calcularon en un rango entre 0.1 y 1.5 Hz. Se puede observar alta correlación en frecuencias vecinas en todo el rango de frecuencias. En todas las estaciones pertenecientes al arreglo A17 se observaron resultados similares.

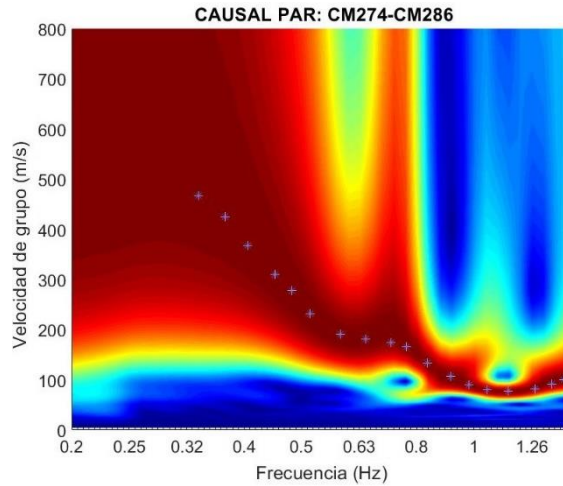


Figura AIII_35. Curva de dispersión obtenida en la parte causal del componente vertical de la función de Green recuperada entre los pares CM274-CM286. Los asteriscos representan el picado manual.

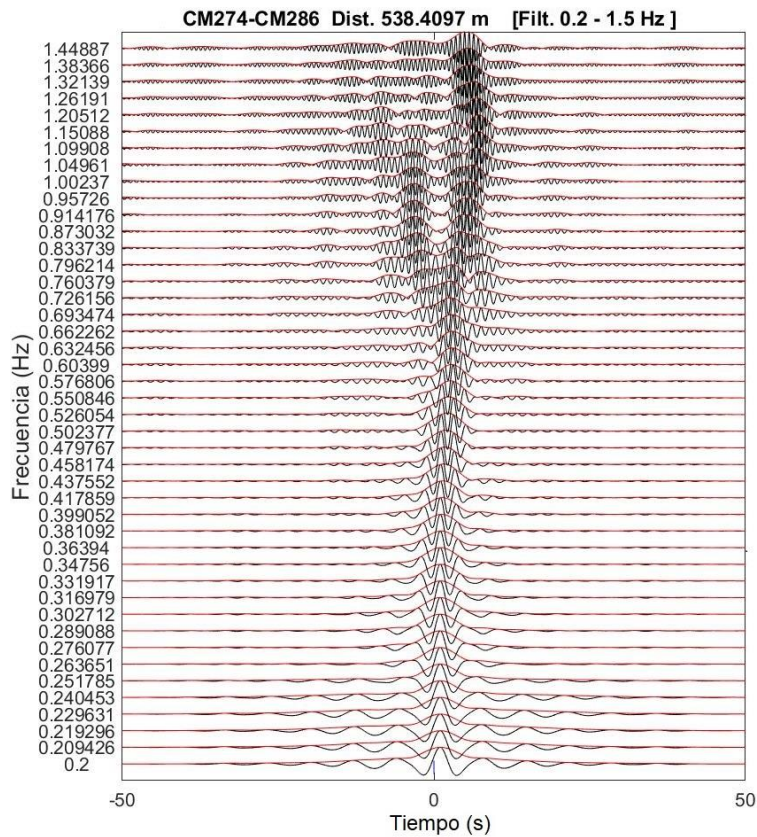


Figura AIII_36. Filtrado múltiple del componente vertical de la función de Green recuperada entre las estaciones CM274 y CM286 del arreglo A17. Las líneas rojas representan la envolvente.

En el arreglo A18 los tiempos de viaje fueron calculados utilizando la componente vertical de la función de Green recuperada, se estimaron en un rango de 0.4 a 1.1 Hz. Las velocidades de los trenes de onda observados variaron en un rango de 60 a 1000 m/s. Se observaron pulsos coherentes en 98 pares de 153 posibles. La estación CM304 presentó problemas de sincronización en tiempo por lo que todos los pares que la incluían fueron ignorados. No se observó una relación directa entre la orientación de los pares de estaciones o la distancia entre estaciones y la recuperabilidad de la función de Green. En la Figura AIII_37 se muestra el picado de una curva de dispersión para un par de estaciones y en la Figura AIII_38 se muestra el filtrado múltiple correspondiente.

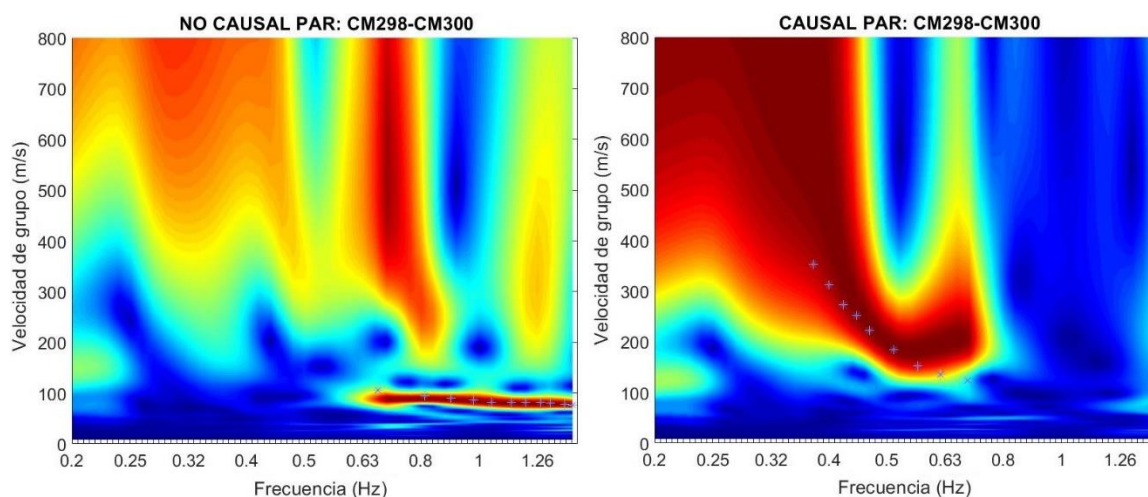


Figura AIII_37. Curva de dispersión obtenida y picada en la parte causal y no causal para el par de estaciones CM298-CM300. Los asteriscos representan los picados manuales.

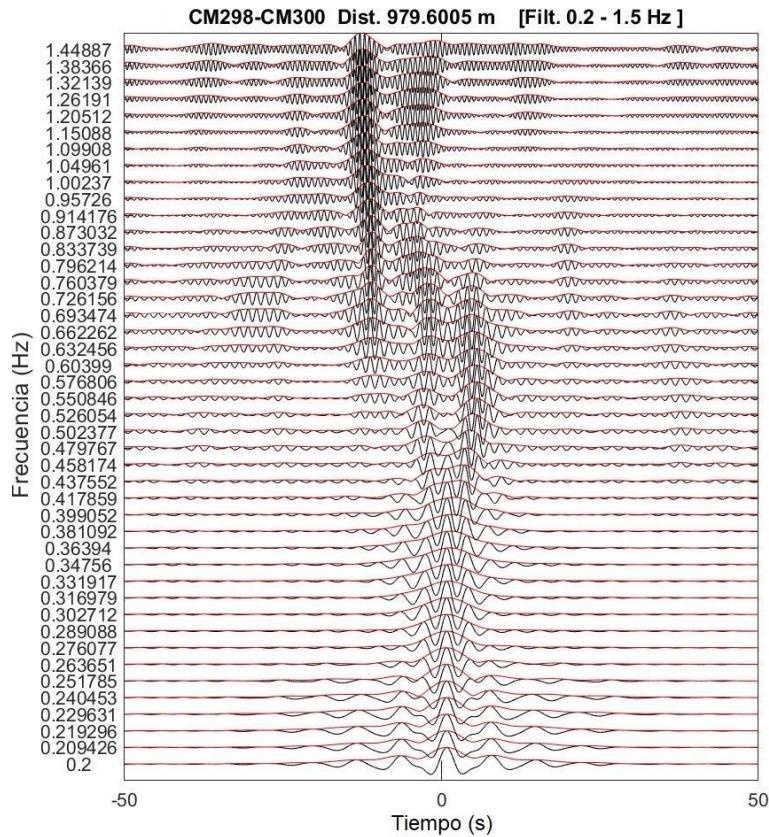


Figura AIII_38. Filtrado múltiple del componente vertical de la función de Green recuperada en el par de estaciones CM298-CM300. Las líneas rojas representan la envolvente.

En el arreglo A19 se utilizó la componente transversal de la función de Green recuperada. De 153 pares de estaciones formados en el arreglo, en 64 se observó un pulso coherente y en un amplio rango de frecuencias (de 0.7 a 1.4 Hz). Las velocidades estimadas variaron de 50 a 600 m/s. Cabe mencionar que no se obtuvo información en frecuencias menores a 0.63 Hz en ninguna estación. Como se muestra en la Figura AIII_39, se observó que no fue posible recuperar la función de Green en pares con distancias mayores a 1730 m. En la Figura AIII_40 se muestra la curva de dispersión obtenida en la parte causal y no causal en un par de estaciones, en la Figura AIII_41 se muestra el filtrado múltiple correspondiente.

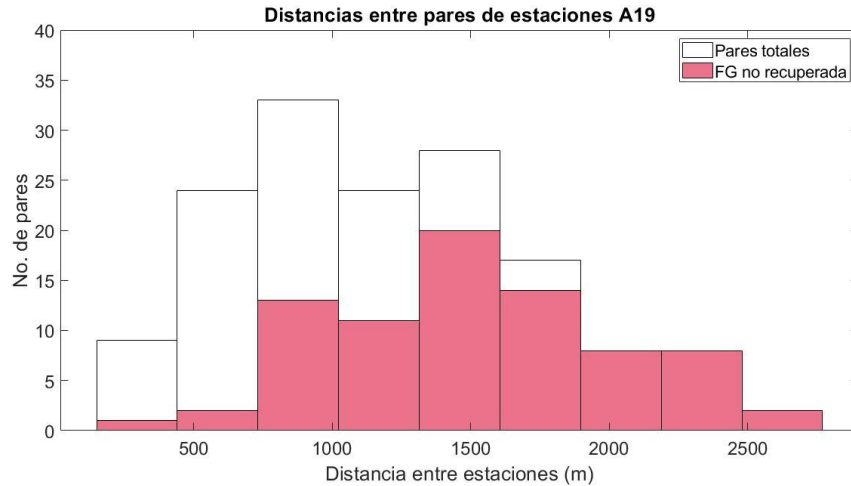


Figura AIII_39. Histograma que muestra las distancias entre pares de estaciones para todos los pares posibles del arreglo A19 (blanco) y para los pares donde no fue recuperada la función de Green (rojo). Se puede observar una clara relación entre la distancia entre estaciones y la recuperabilidad de la función de Green, la distancia máxima entre estaciones donde se recuperó la función de Green fue de 1730 m.

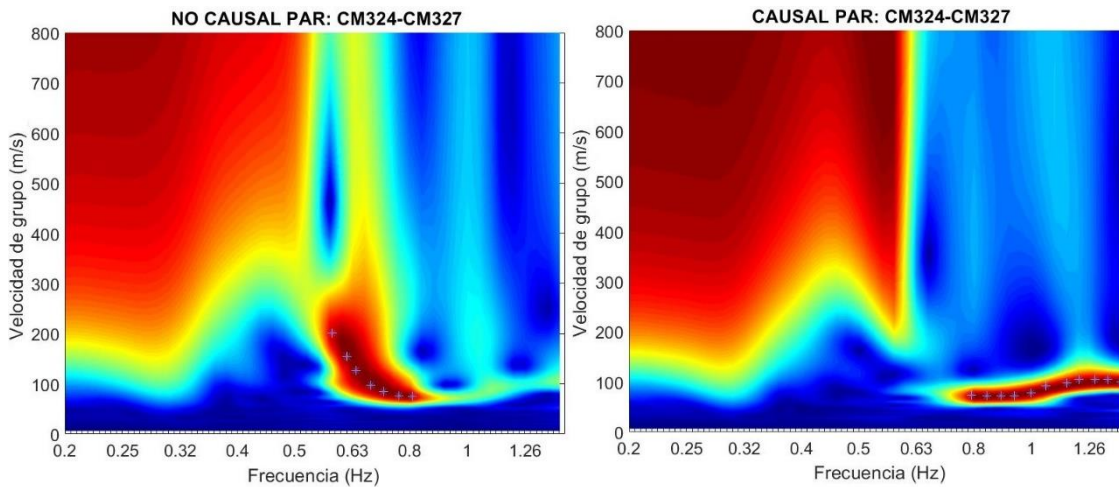


Figura AIII_40. Curvas de dispersión obtenidas en la parte no causal (izquierda) y causal (derecha) para la función de Green recuperada entre el par de estaciones CM324 y CM327. Los asteriscos representan el picado manual.

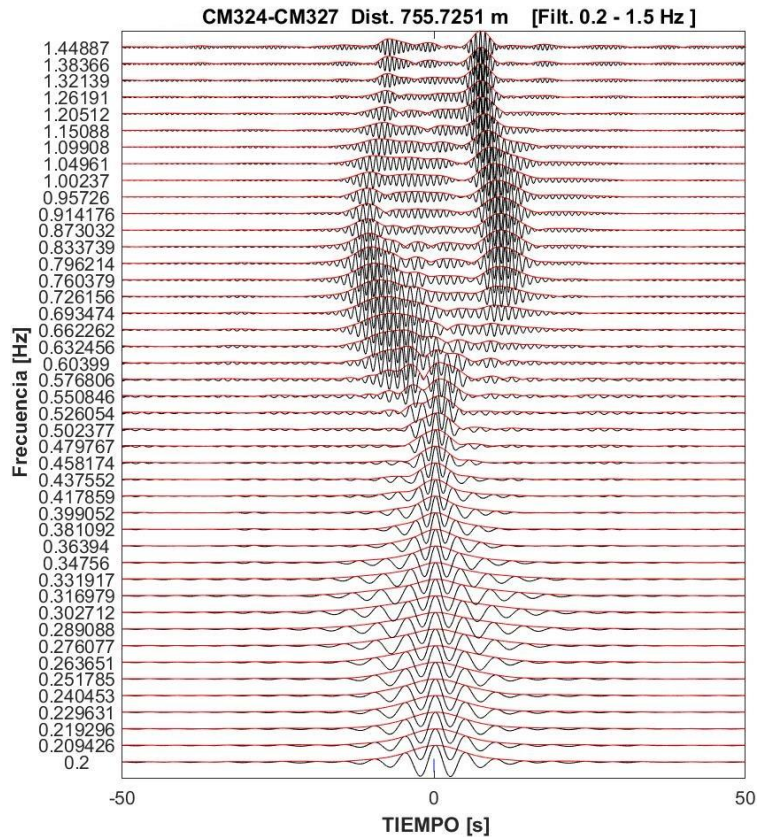


Figura AIII_41. Filtrado múltiple del componente vertical de la función de Green recuperada en el par de estaciones CM324-CM327. Las líneas rojas representan la envolvente.

En el arreglo A20 los tiempos de viaje fueron calculados utilizando la componente transversal de la función de Green recuperada. En casi todos los pares de estaciones se obtuvieron pulsos coherentes. Sin embargo, sólo en 86 fueron observados en un amplio rango de frecuencias, entre 0.59 y 1.45 Hz. Al estar localizado en zona de lomas, en este arreglo se observaron velocidades de propagación más altas, hasta de 1100 m/s. Como se observa en la Figura AIII_42, en los pares de estaciones donde los pulsos no fueron recuperados en rangos amplios de frecuencias las distancias entre estaciones son menores a 1.7 km. En la Figura AIII_43 se muestra una curva de dispersión obtenida en la parte causal de la función de Green recuperada en un par de estaciones, el filtrado múltiple se muestra en la Figura AIII_44.

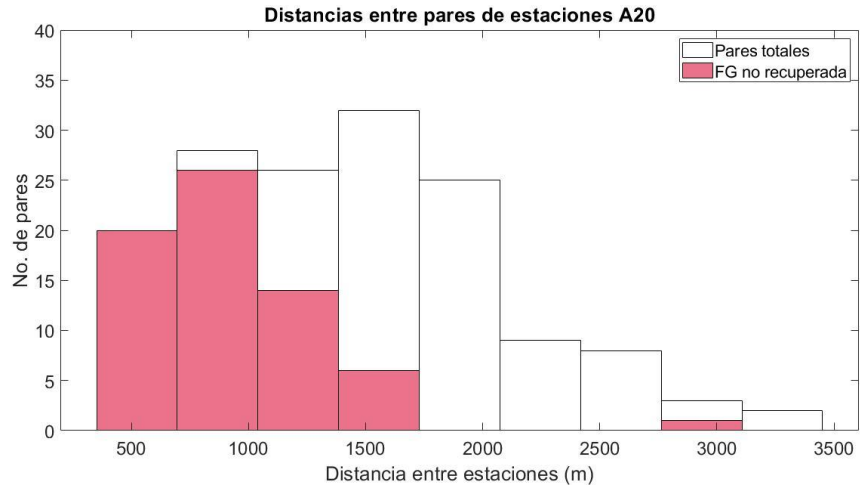


Figura AIII_42. Histograma que muestra la distancia entre estaciones de cada par formado en el arreglo (blanco) y la distancia en los pares donde no fue recuperado un pulso coherente en el rango de frecuencias de investigación. Se puede notar que las barras rojas se concentran en distancias menores, posiblemente debido a las altas velocidades de grupo observadas.

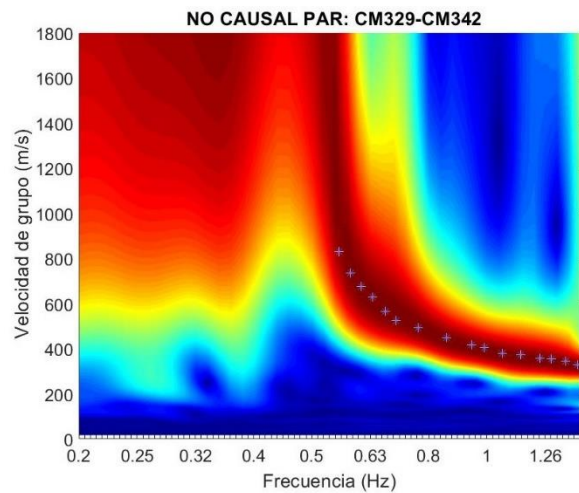


Figura AIII_43. Curva de dispersión obtenida en la parte no causal de la función de Green recuperada entre las estaciones CM329-CM342. Los asteriscos representan los picados manuales.

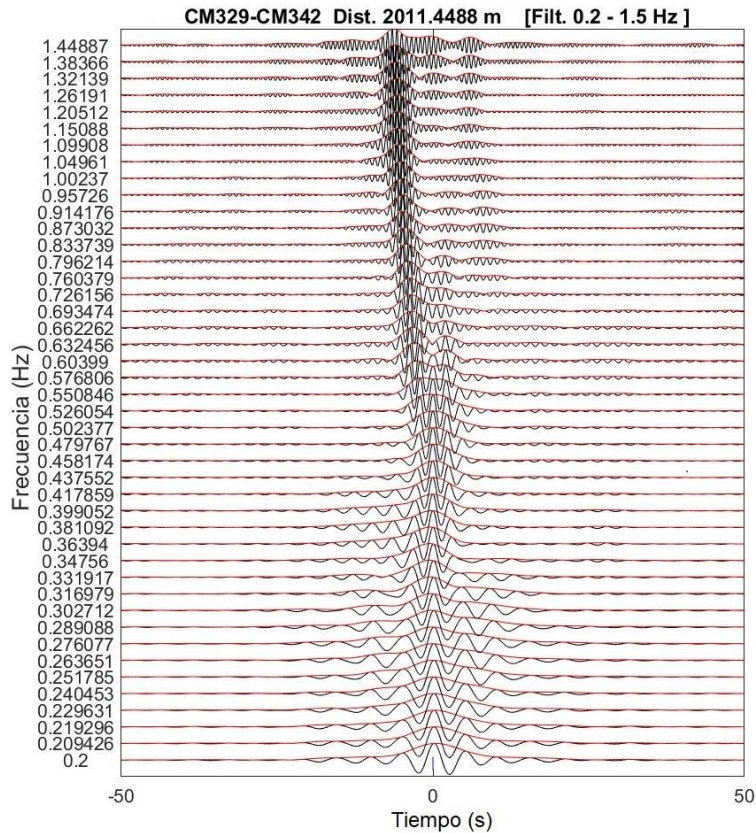


Figura AIII_44. Filtrado múltiple del componente transversal de la función de Green recuperada en el par de estaciones CM329-CM342. Las líneas rojas representan la envolvente.

En el arreglo A21 se utilizaron las componentes transversales de la función de Green recuperada para calcular los tiempos de viaje. De 153 pares de estaciones formados en el arreglo, se obtuvo un pulso coherente en 87 de ellos. El rango de frecuencias fue de 0.58 a 1.44 Hz y las velocidades estimadas de los trenes de onda variaron de 250 a 1000 m/s. De la misma en el arreglo A21, la mayor cantidad de funciones de Green que no fueron recuperadas en rangos amplios de frecuencia correspondieron a pares de estaciones con distancias menores a 1700 m. En la Figura AIII_45 se muestra una curva de dispersión obtenida en la parte no causal de la función de Green recuperada en un par de estaciones, el filtrado múltiple se muestra en la Figura AIII_46.

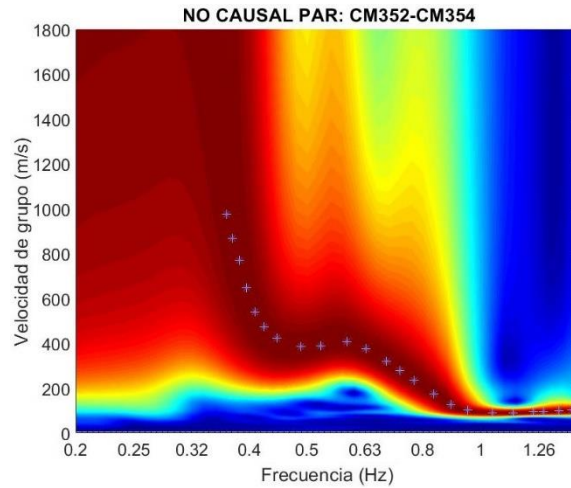


Figura AIII_45. Curva de dispersión obtenida en la parte no causal de la función de Green recuperada en la componente transversal entre las estaciones CM352 y CM354. Los asteriscos representan los picados manuales.

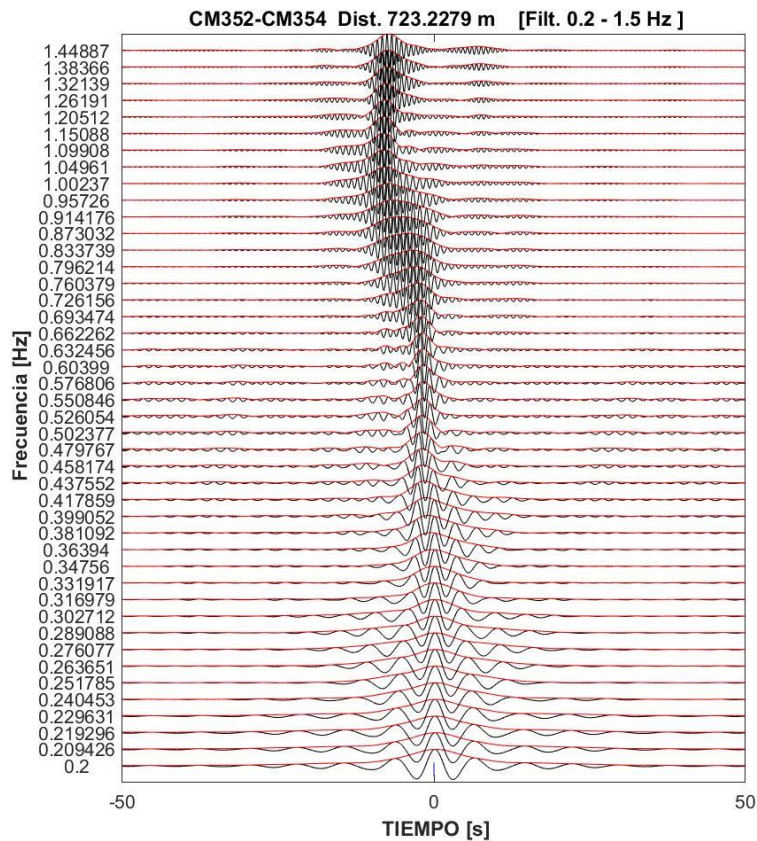


Figura AIII_46. Filtrado múltiple del componente transversal de la función de Green recuperada en el par de estaciones CM352-CM354. Las líneas rojas representan la envolvente.

En el arreglo A22 se utilizaron las componentes transversales para calcular los tiempos de viaje. De 210 pares de estaciones formados en el arreglo, en 137 fue observado un pulso coherente en un amplio rango de frecuencias (entre 0.55 y 1.46 Hz). En este arreglo se observó una proporción mayor de funciones de Green no recuperadas en los pares con orientación NW-SE (azimuts de $135^\circ \pm 22.5^\circ$ o de $315^\circ \pm 22.5^\circ$), de 46 pares en esta dirección se obtuvo un pulso coherente en 22 de ellos. En este caso no se observó una relación con la distancia. En la Figura AIII_47 se muestra la curva de dispersión obtenida a partir del filtrado múltiple de la parte causal de la función de Green recuperada entre dos estaciones, en la Figura AIII_48 se muestra el filtrado múltiple correspondiente.

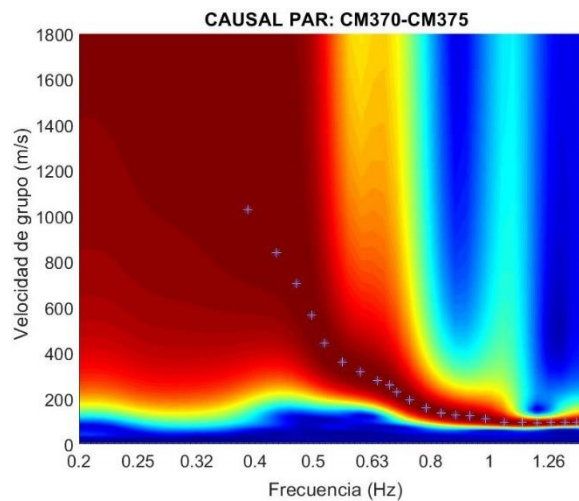


Figura AIII_47. Curva de dispersión obtenida en la parte causal de la función de Green recuperada entre las estaciones CM370-CM375. Los asteriscos representan los picados manuales.

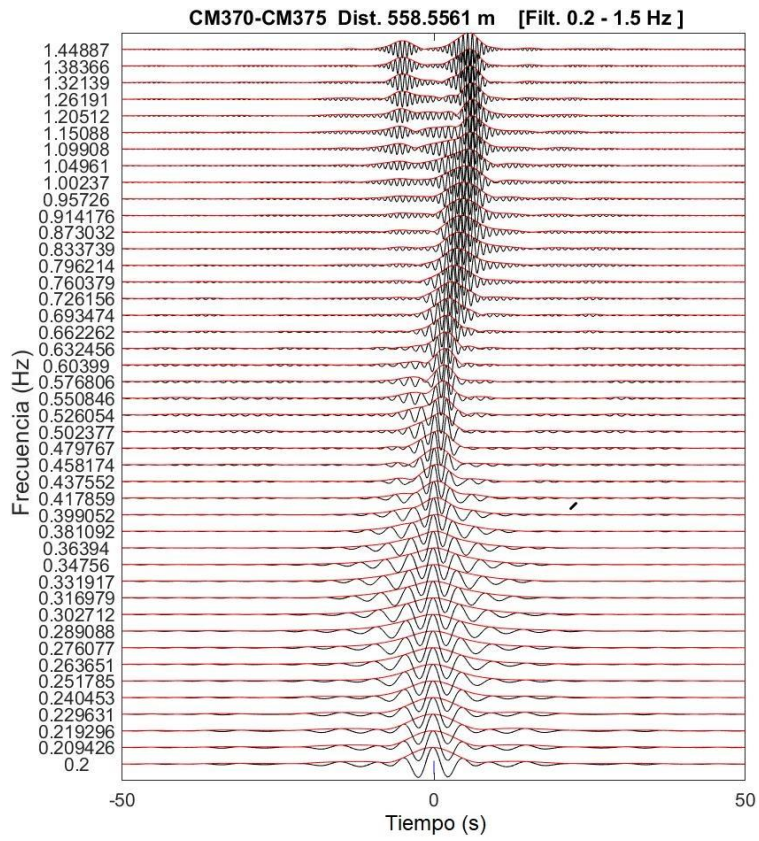


Figura AIII_48. Filtrado múltiple del componente transversal de la función de Green recuperada en el par de estaciones CM370-CM375. Las líneas rojas representan la envolvente.

Anexo IV. Tomografías por arreglo.

Debido a las pocas trayectorias donde se recuperó la función de Green en los arreglos A2 y A3, además de los diferentes rangos de frecuencia donde si fue recuperada, en estos arreglos no se obtuvieron tomografías de tiempos de viaje. En el arreglo A4 el tamaño de celdas adecuado fue de 1800 m por lado, cabe destacar que en este arreglo dominan las trayectorias en dirección similar Este-Oeste, siendo esta una posible causa por la cual no se obtuvieron buenos resultados con celdas más chicas. En la Figura AIV_1 se muestra la prueba del tablero de ajedrez y la Figura AIV_2 se muestran algunos ejemplos de las tomografías obtenidas en este arreglo. Las curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh extraídas se muestran en la Figura AIV_3.

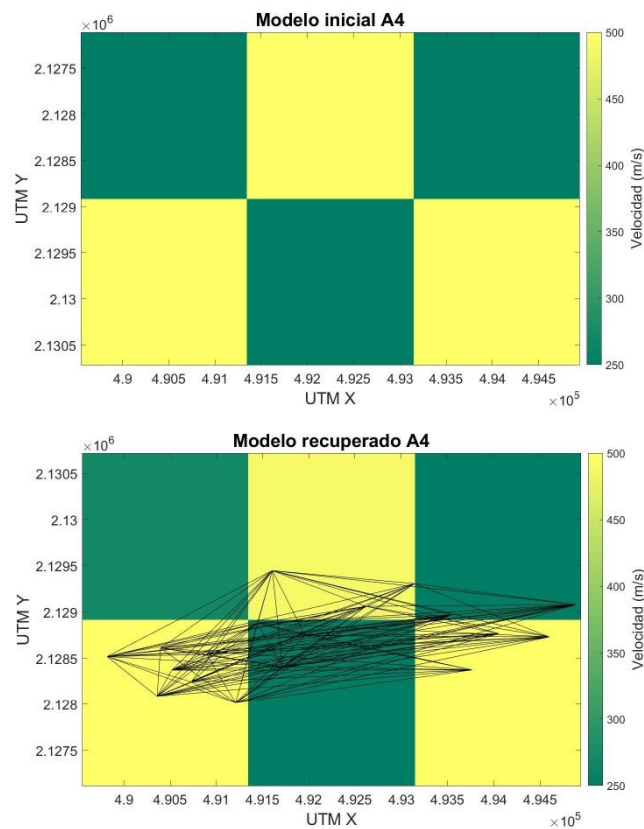


Figura AIV_1. Arriba, modelo inicial en la prueba del tablero de ajedrez. Abajo, modelo recuperado en la prueba. Las líneas negras representan las trayectorias de los rayos donde se recuperó la función de Green. La norma L_2 del modelo recuperado fue 0.5608.

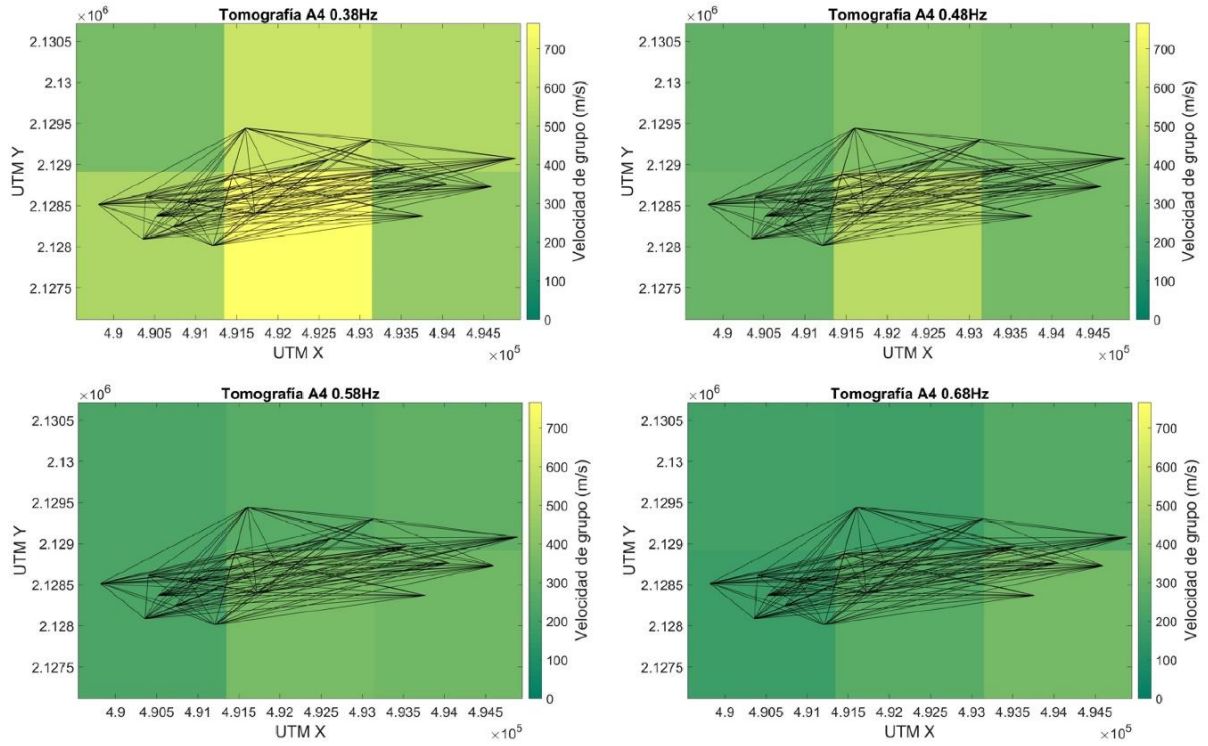


Figura AIV_2. Tomografías obtenidas a partir de la inversión de los tiempos de viaje calculados en las frecuencias 0.38, 0.48, 0.58, 0.68 Hz del arreglo A4.

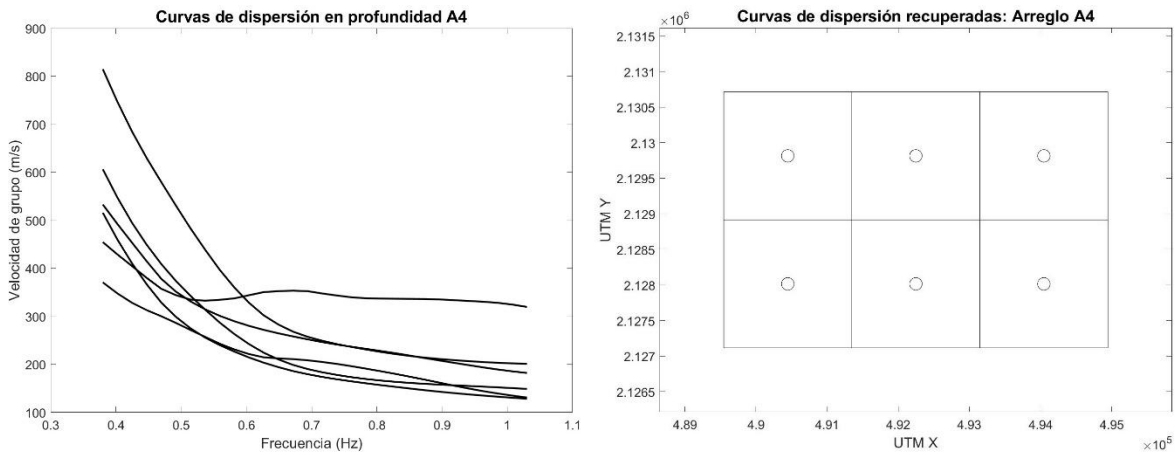


Figura AIV_3. Izquierda. Curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh extraídas de las tomografías. Derecha. Con un círculo negro se señalan las celdas de donde fueron extraídas las curvas de dispersión.

En el arreglo A5 el tamaño de celdas elegido fue de 600 m, en la Figura AIV_4 se muestra la prueba del tablero de ajedrez llevada a cabo en este arreglo. En la Figura AIV_5 se muestran algunos ejemplos de las tomografías de tiempos de viaje obtenidas en diferentes frecuencias. En la Figura AIV_6 se muestran las curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love extraídas de la tomografía. Todas estaciones de este arreglo se localizaron en zona de lago.

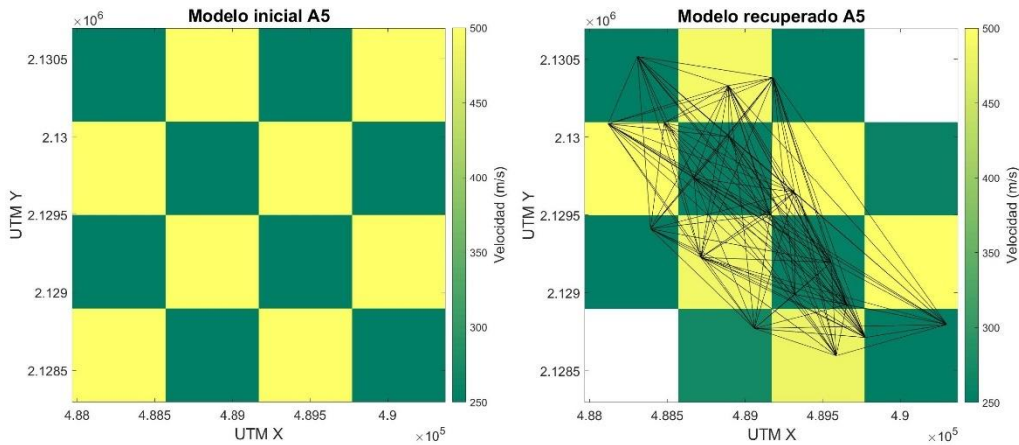


Figura AIV_4. Izquierda, modelo inicial en la prueba del tablero de ajedrez. Derecha, modelo recuperado en la prueba. Las líneas negras representan las trayectorias de los rayos donde se recuperó la función de Green. La norma L_2 del modelo recuperado fue 0.9923.

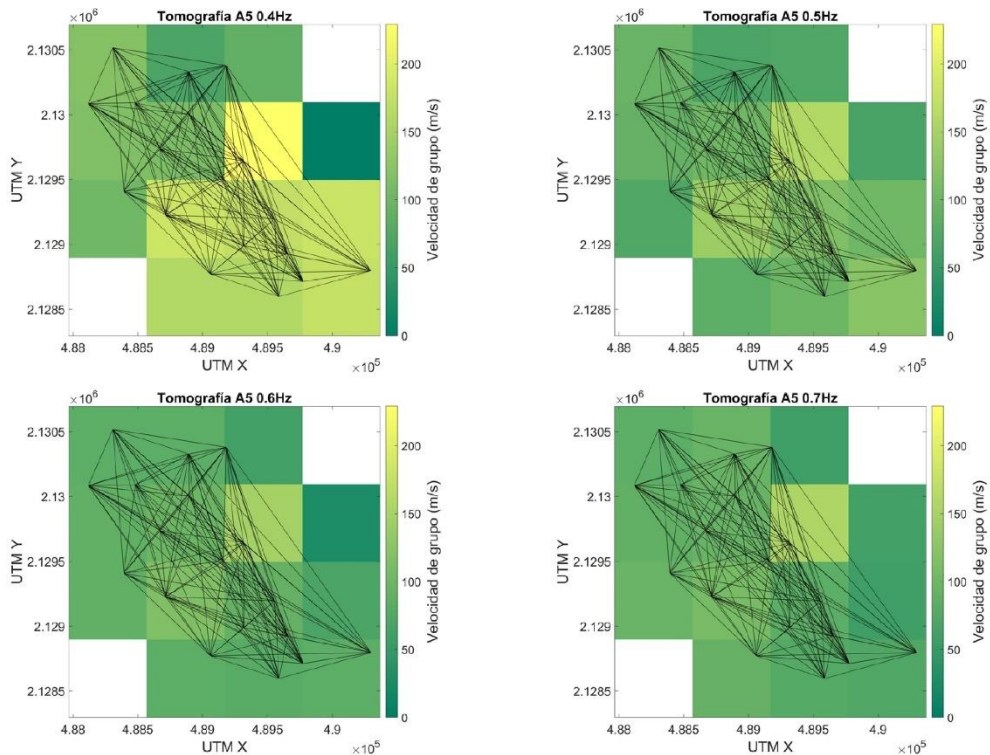


Figura AIV_5. Tomografías obtenidas a partir de la inversión de los tiempos de viaje calculados en las frecuencias 0.45, 0.55, 0.65, 0.75 Hz del arreglo A5.

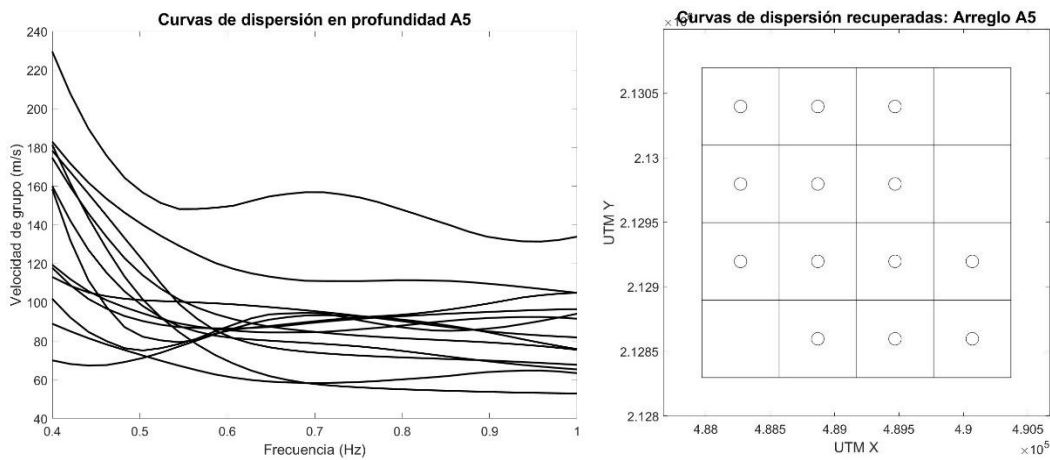


Figura AIV_6. Izquierda. Curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love extraídas de las tomografías. Derecha. Con un círculo negro se señalan las celdas de donde fueron extraídas las curvas de dispersión.

En el arreglo A6 el tamaño adecuado de las celdas fue de 1400 m, en la Figura AIV_7 se muestra la prueba de tablero de ajedrez aplicada. En la Figura AIV_8 se muestran algunos ejemplos de las tomografías de tiempos de viaje obtenidas en diferentes frecuencias y en la Figura AIV_9 se muestran las curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh extraídas de la tomografía. Todas las estaciones de este arreglo se localizaron en zona de lago.

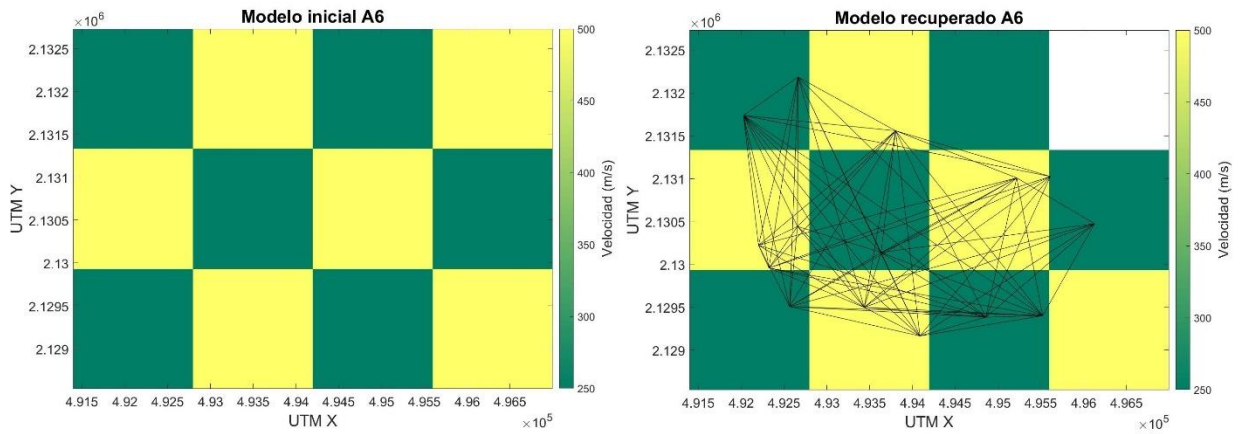


Figura AIV_7. Izquierda, modelo inicial en la prueba del tablero de ajedrez. Derecha, modelo recuperado en la prueba. Las líneas negras representan las trayectorias de los rayos donde se recuperó la función de Green. La norma L_2 del modelo recuperado fue 1.0371.

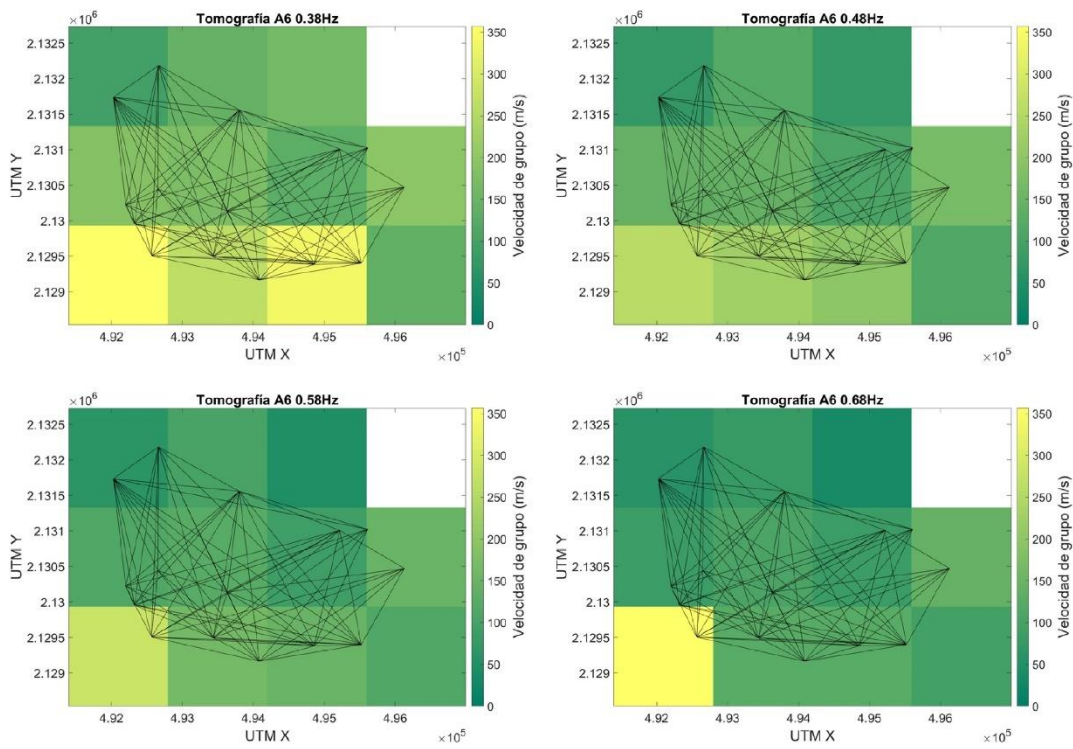


Figura AIV_8. Tomografías obtenidas a partir de la inversión de los tiempos de viaje calculados en las frecuencias 0.38, 0.48, 0.58, 0.68 Hz del arreglo A6.

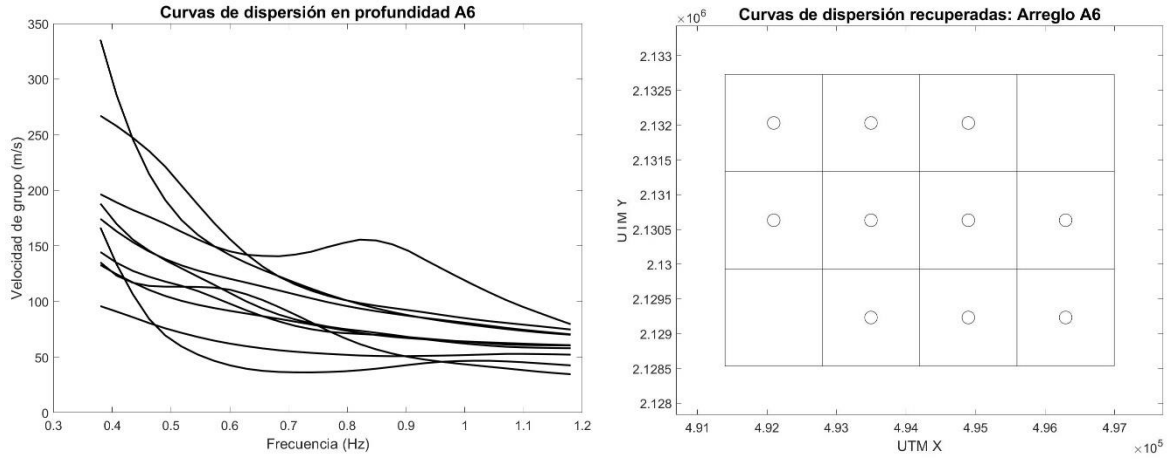


Figura AIV_9. Izquierda. Curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh extraídas de las tomografías de tiempos de viaje. Derecha. Con un círculo se señalan las celdas donde fue posible extraer las curvas de dispersión.

En la Figura AIV_10 se muestra la prueba del tablero de ajedrez hecha para las trayectorias del arreglo A7 donde se recuperó la función de Green. A pesar de tener sólo 14 trayectorias en este arreglo se observaron buenos resultados para celdas de 500 m por lado. En la Figura AIV_11 se muestran algunas imágenes tomográficas obtenidas y en la Figura AIV_12 se muestran las curvas de dispersión extraídas. Todas las estaciones de este arreglo se localizaron en zona de lago.

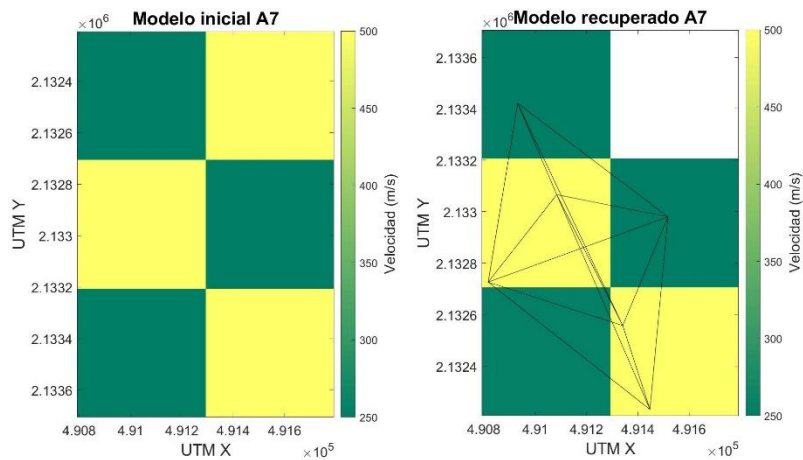


Figura AIV_10. Izquierda, modelo inicial en la prueba del tablero de ajedrez. Derecha, modelo recuperado en la prueba. Las líneas negras representan las trayectorias de los rayos donde se recuperó la función de Green. La norma L_2 del modelo recuperado fue 0.1672.

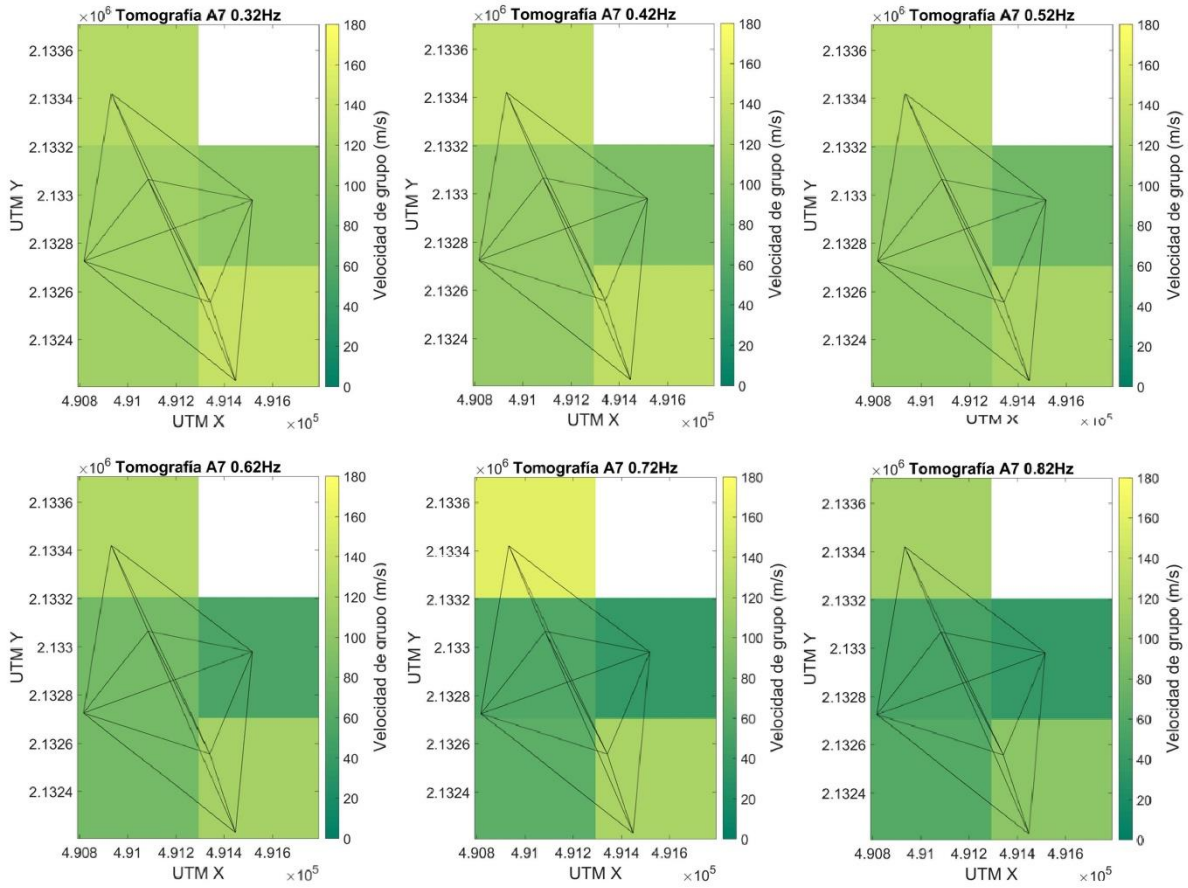


Figura AIV_11. Tomografías obtenidas a partir de la inversión de los tiempos de viaje calculados en las frecuencias 0.32, 0.42, 0.52, 0.62, 0.72, 0.82 Hz del arreglo A7.

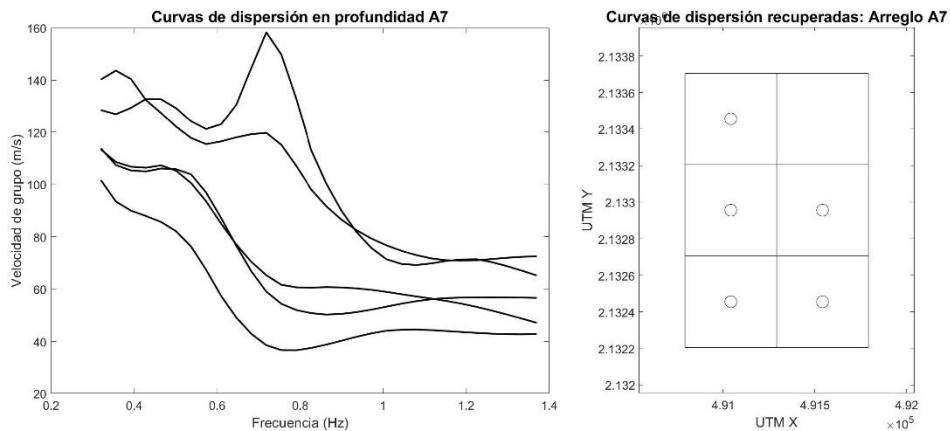


Figura AIV_12. Izquierda. Curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh extraídas de las tomografías en el arreglo A7. Derecha. Con un círculo se señalan las celdas de donde fueron extraídas las curvas de dispersión.

En el arreglo A8 el tamaño de celdas adecuado fue de 1100 m por lado, la prueba del tablero de ajedrez realizada se muestra en la Figura AIV_13. Algunas imágenes de la inversión tomográfica se muestran en la Figura AIV_14. En la Figura AIV_15 se muestran las curvas de dispersión extraídas. Todas las estaciones de este arreglo se localizaron en zona de lago.

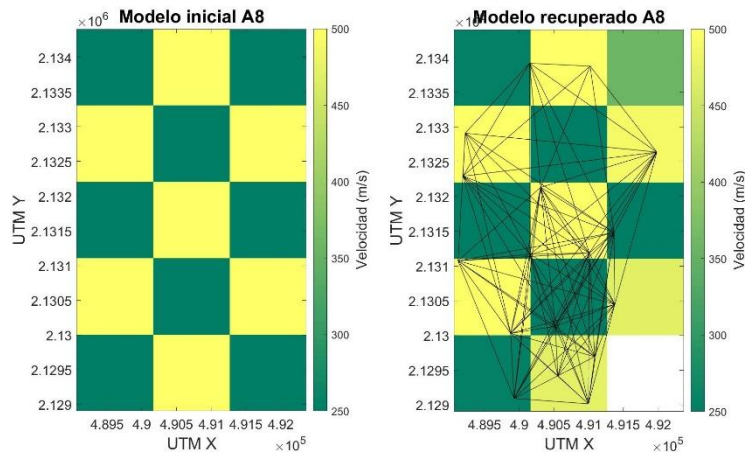


Figura AIV_13. Izquierda, modelo inicial en la prueba del tablero de ajedrez. Derecha, modelo recuperado en la prueba. Las líneas negras representan las trayectorias de los rayos donde se recuperó la función de Green. La norma L_2 del modelo recuperado fue 1.1264

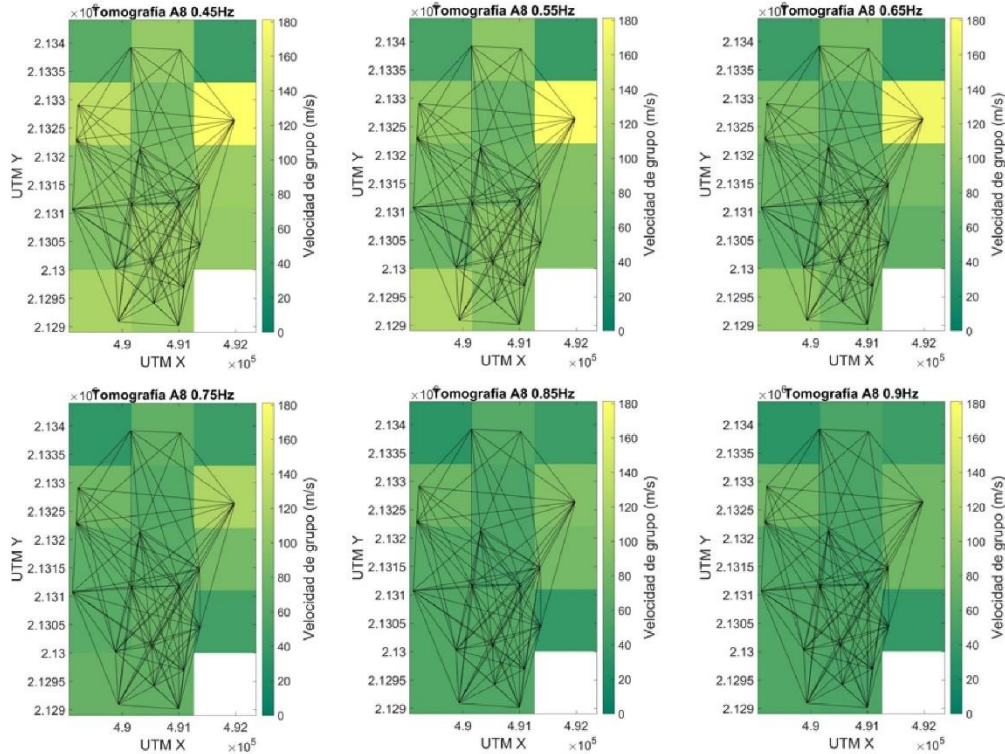


Figura AIV_14. Tomografías obtenidas a partir de la inversión de los tiempos de viaje calculados en las frecuencias 0.45, 0.55, 0.65, 0.75, 0.85, 0.9 Hz del arreglo A8.

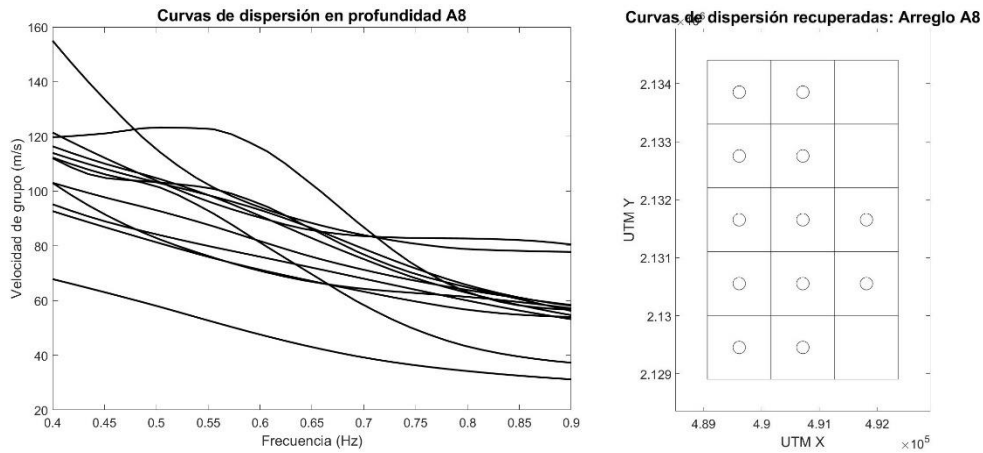


Figura AIV_15. Izquierda. Curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh extraídas de las tomografías de tiempos de viaje obtenidas en el arreglo A8. Con un círculo se señalan las celdas de donde fueron extraídas las curvas.

La prueba del tablero de ajedrez aplicada en el arreglo A9, que se muestra en la Figura AIV_16, determinó que celdas de 1000 m por lado eran adecuadas. En la Figura AIV_17 se observan algunas tomografías obtenidas, se puede apreciar que las velocidades estimadas son mayores en la parte oeste del arreglo, coincidiendo con las estaciones localizadas en el límite con la zona de lomas, según el mapa mostrado en la Figura AIV_18. En la Figura AIV_19 se muestran las curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love extraídas de las tomografías.

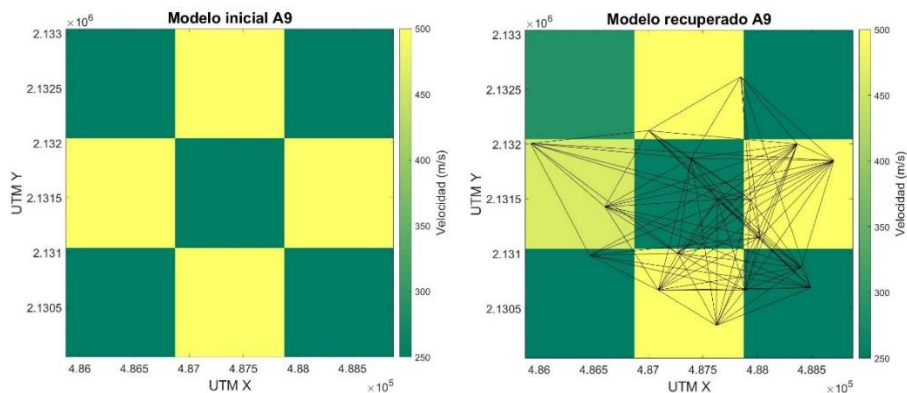


Figura AIV_16. Izquierda, modelo inicial en la prueba del tablero de ajedrez. Derecha, modelo recuperado en la prueba. Las líneas negras representan las trayectorias de los rayos donde se recuperó la función de Green. La norma L_2 del modelo recuperado fue 0.8243.

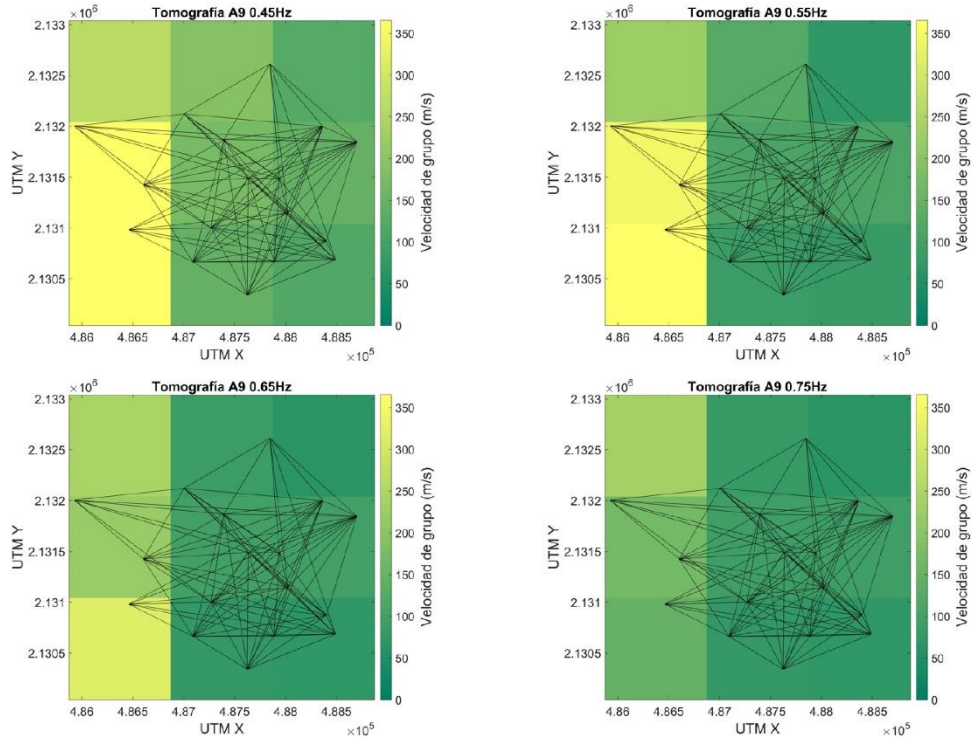


Figura AIV_17. Tomografías obtenidas a partir de la inversión de los tiempos de viaje calculados en las frecuencias 0.45, 0.55, 0.65, 0.75, Hz del arreglo A9.

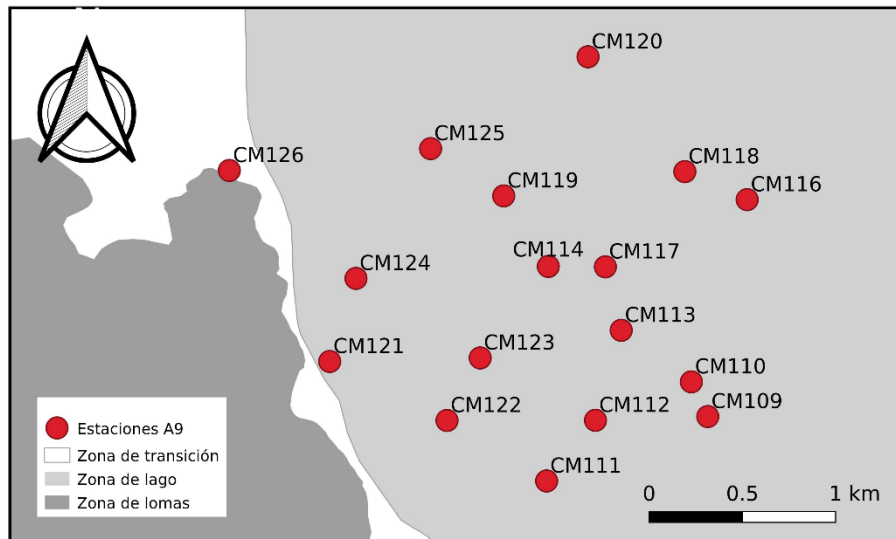


Figura AIV_18. Distribución espacial de las estaciones que forman el arreglo A9. Las estaciones en la parte oeste del arreglo se encuentran cercanas a la zona de lomas, en las tomografías obtenidas mostradas en la Figura AIV_17 se observan velocidades más altas en las celdas que contienen estas estaciones, siendo consistentes con la información geotécnica disponible.

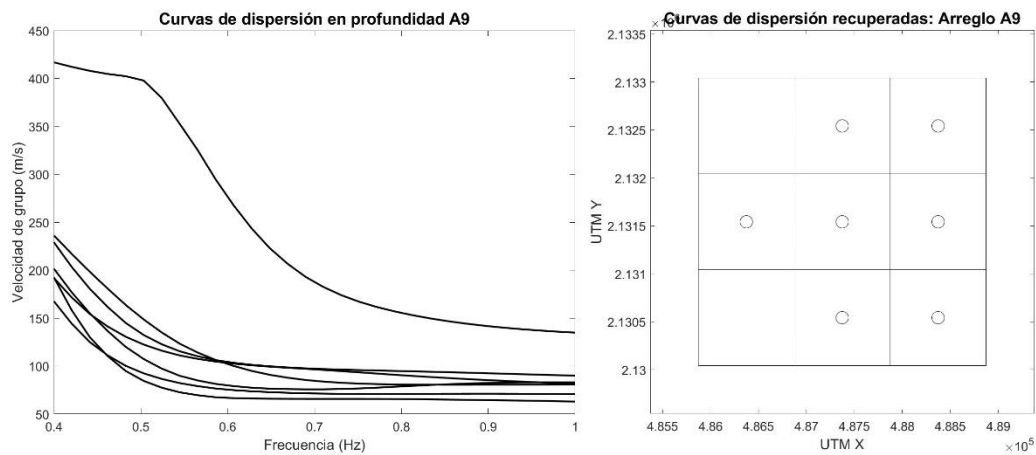


Figura AIV_19. Izquierda. Curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love extraídas de las tomografías de tiempos de viaje obtenidas en el arreglo A9. Derecha. Con un círculo se señalan las celdas de donde fueron extraídas las curvas.

En el arreglo A10 el tamaño adecuado de las celdas fue de 800 m por lado, en la Figura AIV_20 se muestra la prueba del tablero de ajedrez realizada. Algunos ejemplos de la inversión tomográfica se muestran en la Figura AIV_21. De la misma manera que el arreglo A10 se estimaron velocidades más altas en las celdas cuyas estaciones contenidas se encontraban más cerca de las zonas de transición y lomas, como se observa en el mapa de la Figura AIV_22. Por último, en la Figura AIV_23, se muestran las curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love extraídas.

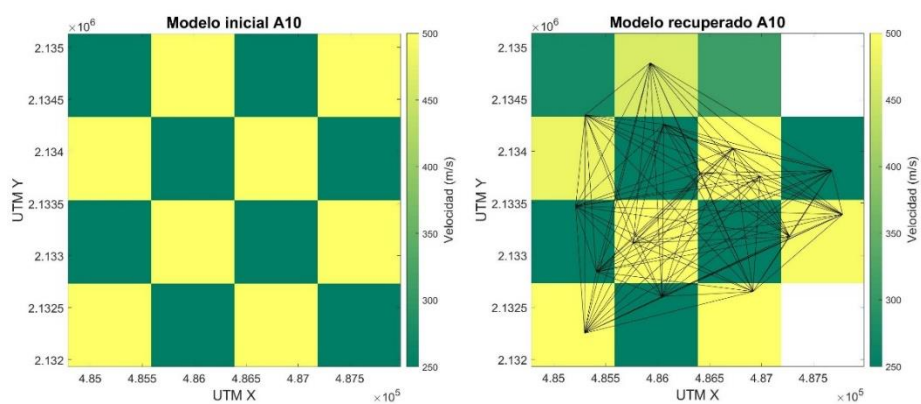


Figura AIV_20. Izquierda. Modelo inicial propuesto para la prueba del tablero de ajedrez en el arreglo A10. Derecha. Modelo recuperado en la prueba. Las líneas negras representan las trayectorias de los rayos donde se recuperó la función de Green. La norma L_2 del modelo recuperado fue 0.7636.

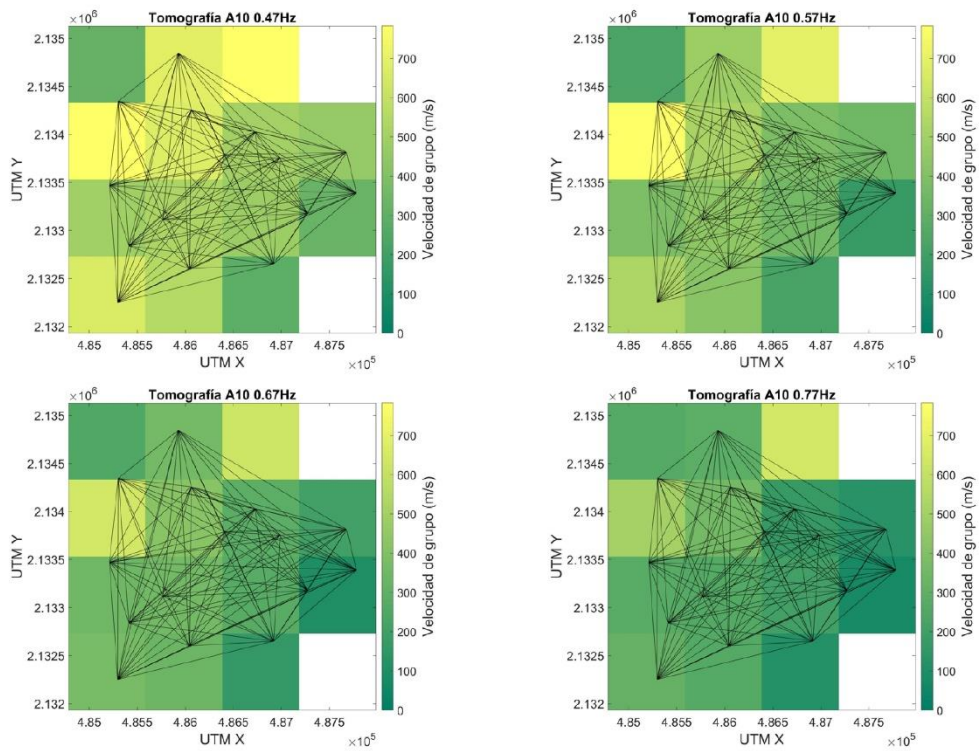


Figura AIV_21. Tomografías obtenidas a partir de la inversión de los tiempos de viaje calculados en las frecuencias 0.47, 0.57, 0.67, 0.77, Hz del arreglo A10.

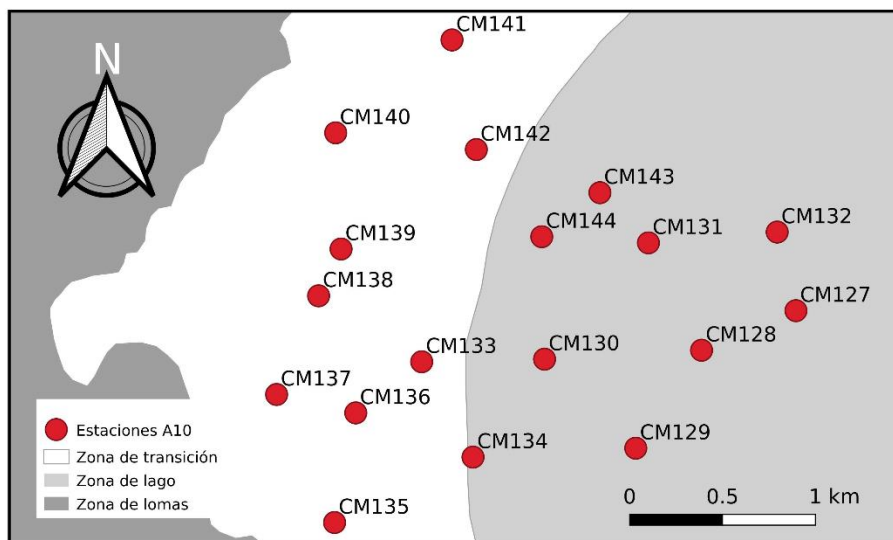


Figura AIV_22. Distribución espacial de las estaciones que forman el arreglo A10. Las estaciones en la parte oeste del arreglo se encuentran en zona de transición y cerca de la zona de lomas, en las tomografías obtenidas mostradas en la Figura AIV_21 se estimaron velocidades más altas en las

celdas que contienen estas estaciones, siendo consistentes con la información geotécnica disponible, de la misma manera que el arreglo anterior.

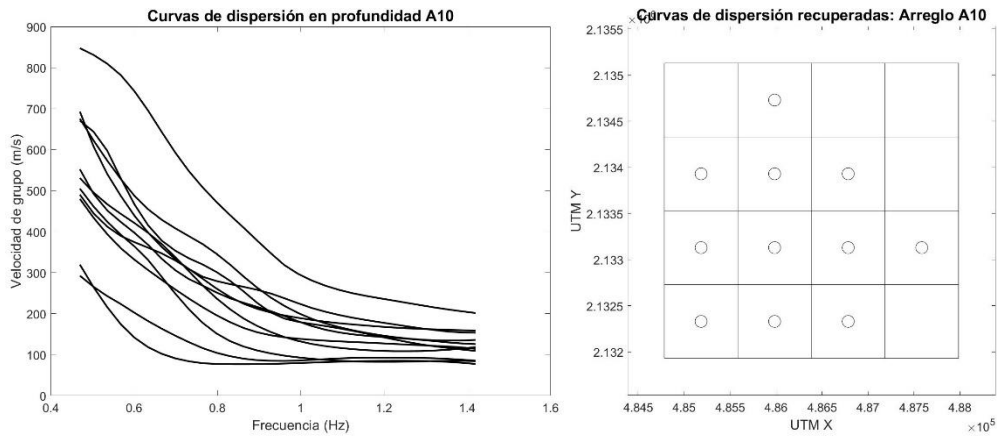


Figura AIV_23. Izquierda. Curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love extraídas de las tomografías de tiempos de viaje obtenidas en el arreglo A10. Derecha. Con un círculo se señalan las celdas de donde fueron extraídas las curvas.

En el arreglo A11 el tamaño adecuado de las celdas de 1000 m por lado, en la Figura AIV_24 se muestra la prueba del tablero de ajedrez realizada. Algunos ejemplos de tomografías de tiempos de viaje se muestran en la Figura AIV_25, en este arreglo no había estaciones cercanas a las zonas de loma y transición por lo que no se observaron cambios bruscos de velocidad. Las curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh extraídas se muestran en la Figura AIV_26.

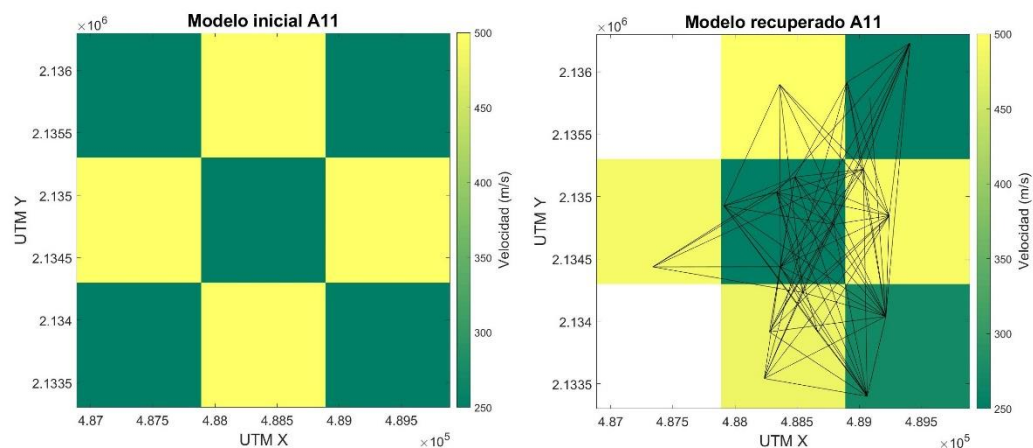


Figura AIV_24. Izquierda. Modelo inicial propuesto para la prueba del tablero de ajedrez en el arreglo A11. Derecha. Modelo recuperado en la prueba. Las líneas negras representan las

trayectorias de los rayos donde se recuperó la función de Green. La norma L_2 del modelo recuperado fue 0.6662.

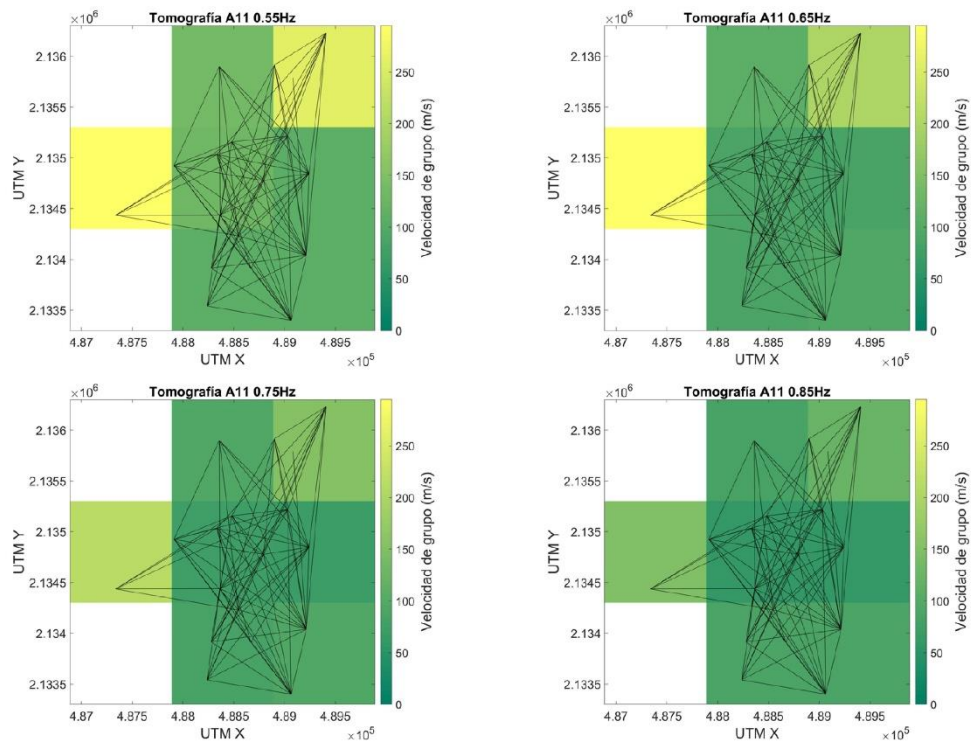


Figura AIV_25. Tomografías obtenidas a partir de la inversión de los tiempos de viaje calculados en las frecuencias 0.55, 0.65, 0.75, 0.85, Hz del arreglo A11.

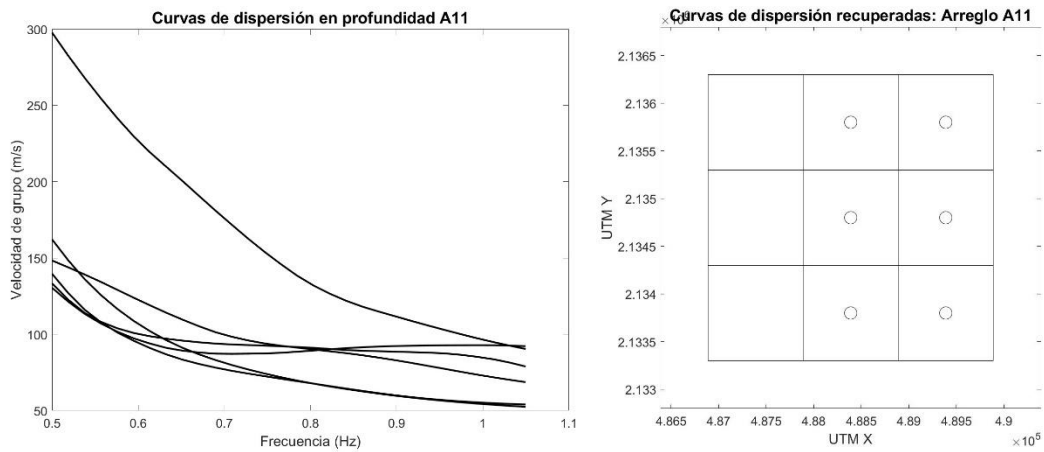


Figura AIV_26. Izquierda. Curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh extraídas de las tomografías obtenidas en el arreglo A11. Derecha. Con un círculo se señalan las celdas de

donde fueron extraídas las curvas de dispersión. La celda ubicada en la parte central de la primera columna no fue considerada ya que en algunas frecuencias la solución fue errática.

En el arreglo A12 el tamaño de las celdas adecuado fue de 900 m por lado, la prueba se muestra en la Figura AIV_27. Algunos ejemplos de las tomografías de tiempos de viaje están en la Figura AIV_28, las curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love extraídas se muestran en la Figura AIV_29. Las estaciones de este arreglo se localizaron en zona de transición.

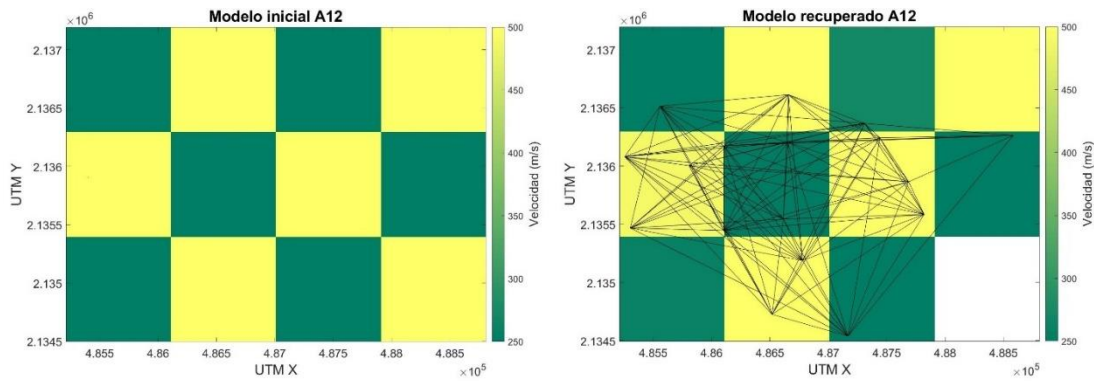


Figura AIV_27. Izquierda. Modelo inicial propuesto para la prueba del tablero de ajedrez en el arreglo A11. Derecha. Modelo recuperado en la prueba. Las líneas negras representan las trayectorias de los rayos donde se recuperó la función de Green. La norma L_2 del modelo recuperado fue 0.7743.

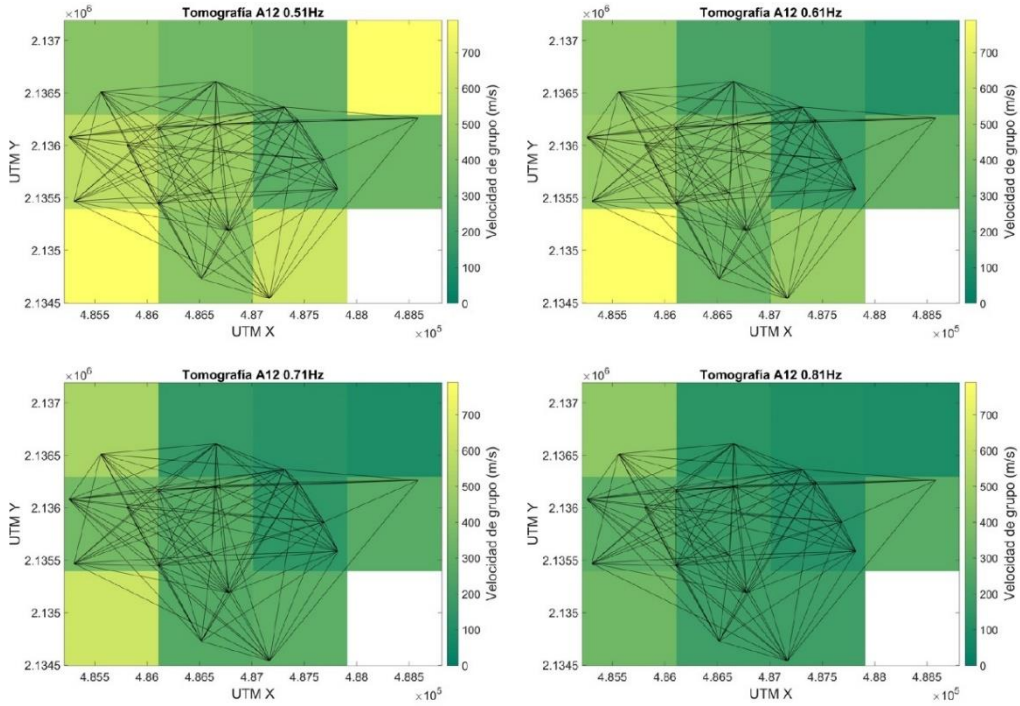


Figura AIV_28. Tomografías obtenidas a partir de la inversión de los tiempos de viaje calculados en las frecuencias 0.51, 0.61, 0.71, 0.81, Hz del arreglo A12.

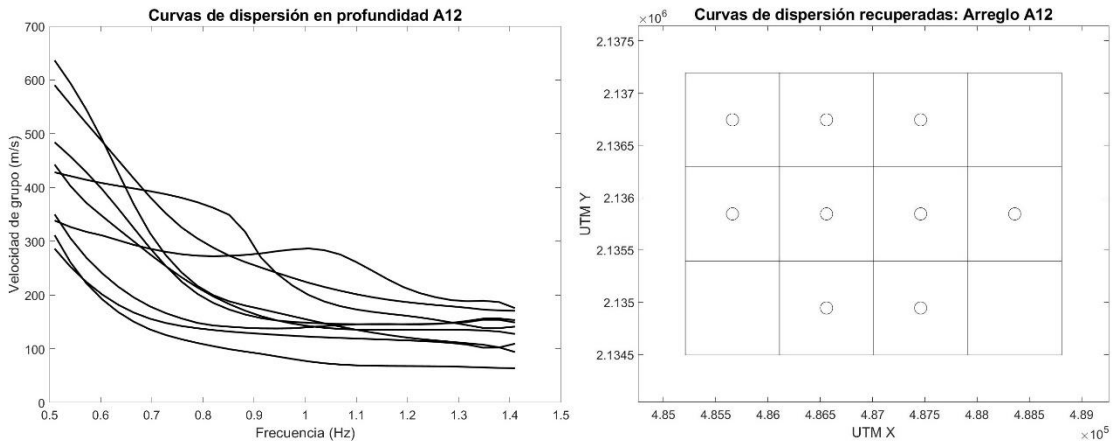


Figura AIV_29. Izquierda. Curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love extraídas de las tomografías obtenidas en el arreglo A12. Derecha. Con un círculo se señalan las celdas de donde fueron extraídas las curvas de dispersión

En el arreglo A13 con la prueba de resolución se determinó que celdas de 600 m por lado era adecuadas, la prueba se muestra en la Figura AIV_30. Algunos ejemplos de las tomografías obtenidas se muestran en la Figura AIV_31. En el mapa de la Figura AIV_32 se aprecia que este

arreglo se localiza en las tres zonas geotécnicas, en las celdas que contenían estaciones en zona de loma se obtuvieron resultados erráticos en la tomografía. Sin embargo, en las celdas que contenían estaciones de zona de transición se observaron velocidades más altas respecto a las celdas que contenían estaciones de zona de lago. En la Figura AIV_34 se muestran las curvas de dispersión extraídas.

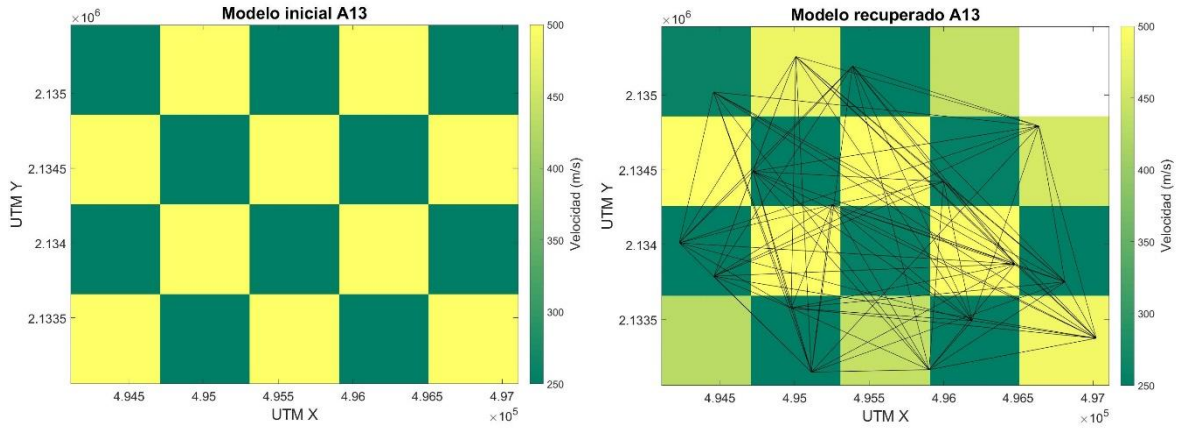


Figura AIV_30. Izquierda. Modelo inicial propuesto. Derecha. Modelo recuperado, las líneas negras representan las trayectorias de los rayos donde se recuperó la función de Green. La norma L_2 del modelo recuperado fue 1.028.

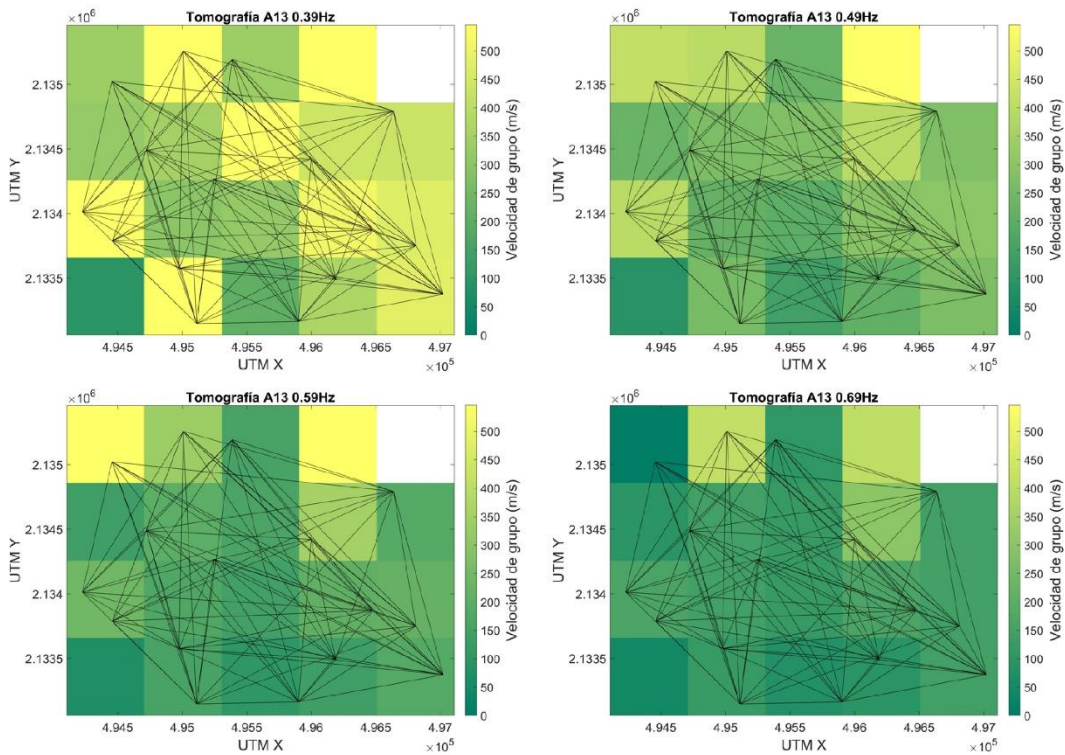


Figura AIV_31. Tomografías obtenidas a partir de la inversión de los tiempos de viaje calculados en las frecuencias 0.39, 0.49, 0.59 y 0.69 Hz del arreglo A13.

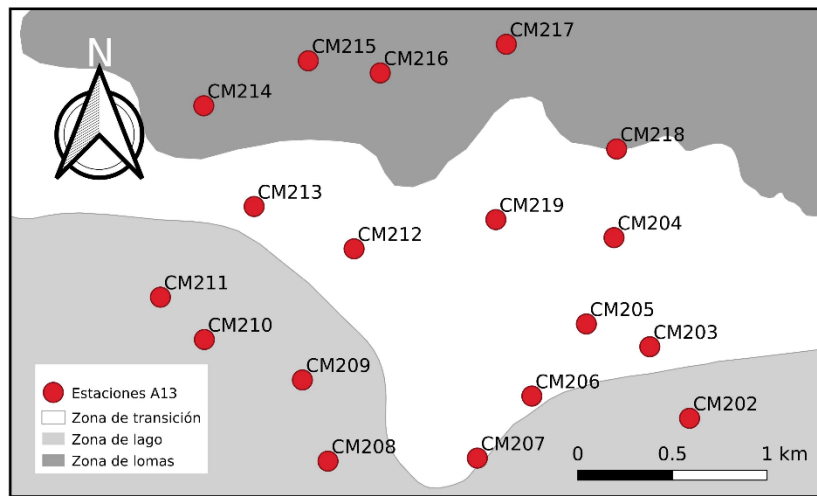


Figura AIV_32. Distribución espacial de las estaciones que forman el arreglo A13. Las estaciones se localizan en las tres zonas geotécnicas, en las celdas que contenían estaciones en zona de loma no se obtuvieron buenos resultados. Sin embargo, en las celdas que contenían estaciones en zona de loma se estimaron velocidades más altas respecto a las celdas que contenían estaciones en zona de lago.

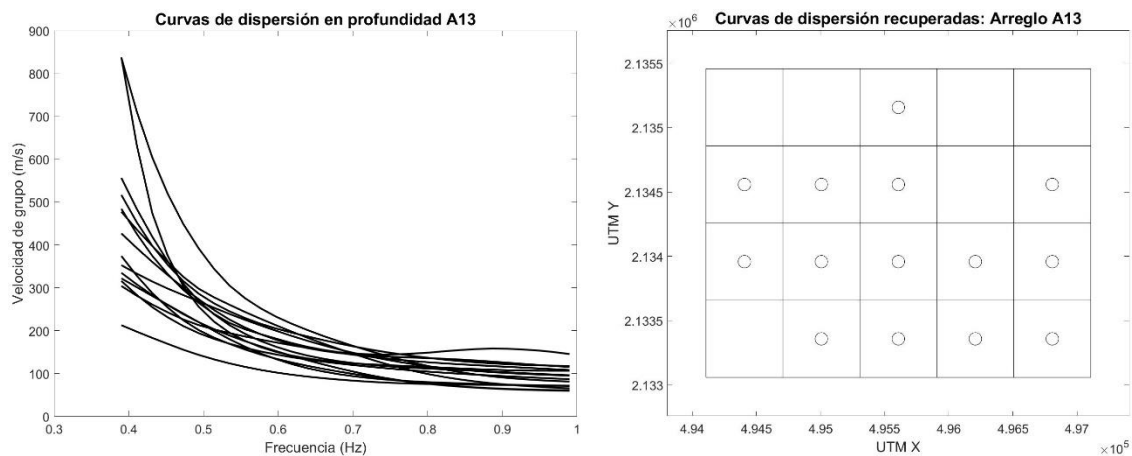


Figura AIV_33. Izquierda. Curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh extraídas de las tomografías de tiempos de viaje obtenidas en el arreglo A13. Derecha. Con un círculo se señalan las estaciones donde fueron extraídas las curvas.

Para el arreglo A14 el medio fue discretizado en celdas de 700 m por lado, según la prueba de resolución aplicada mostrada en la Figura AIV_34. En la Figura AIV_35 se encuentran algunos

ejemplos de las tomografías obtenidas y en la Figura AIV_36 se muestran las curvas de dispersión de ondas Rayleigh extraídas de las tomografías de tiempos de viaje. Las estaciones de este arreglo estaban ubicadas en zona de lago.

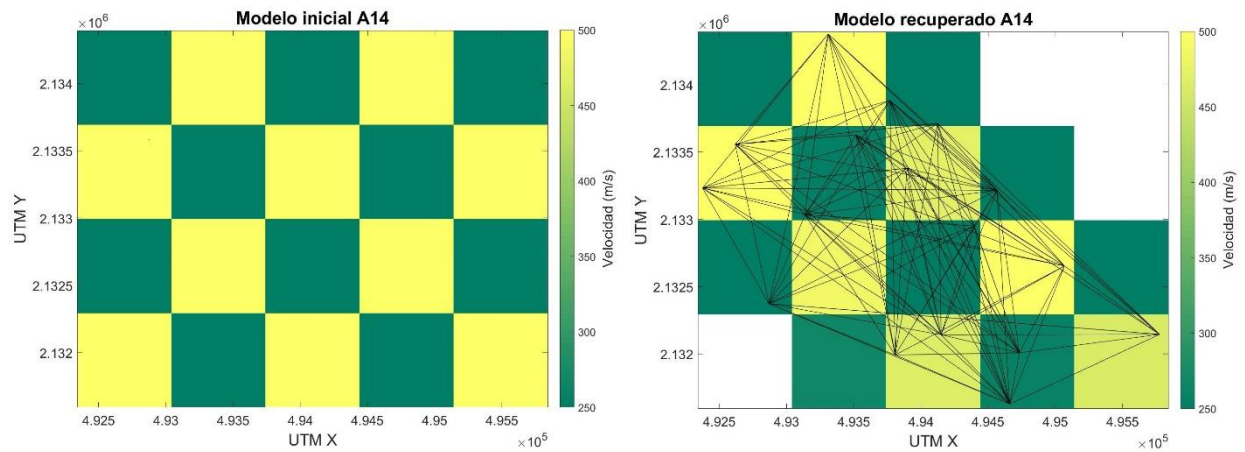


Figura AIV_34. Izquierda. Modelo inicial propuesto en la prueba de resolución. Derecha. Modelo recuperado, las líneas negras representan las trayectorias de los rayos donde se recuperó la función de Green. La norma L_2 fue de 0.8837.

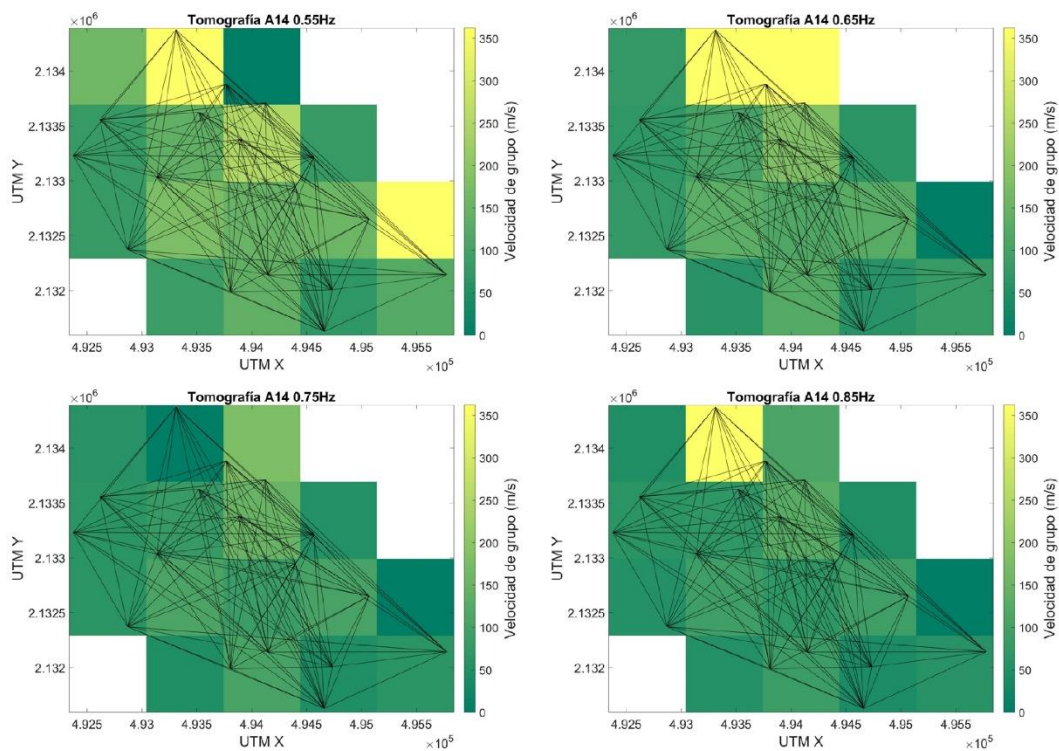


Figura AIV_35. Tomografías obtenidas a partir de la inversión de los tiempos de viaje calculados en las frecuencias 0.55, 0.65, 0.75 y 0.85 Hz del arreglo A14.

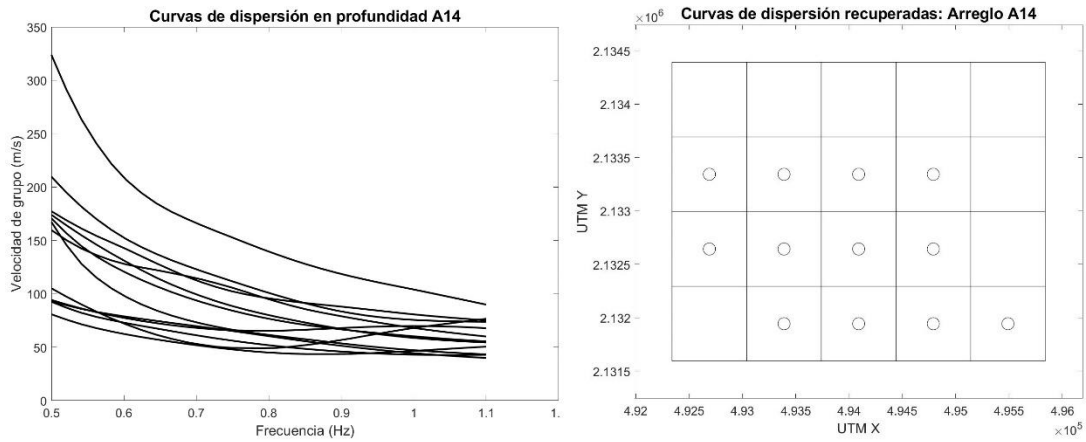


Figura AIV_36. Izquierda. Curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh extraídas de las tomografías de tiempos de viaje. Derecha. Con un círculo se señalan las celdas de donde fue posible extraer alguna curva.

El tamaño adecuado de las celdas en el arreglo A15, según la prueba de resolución mostrada en la Figura AIV_37, fue de 1000 m por lado. Como se puede apreciar en el mapa de la Figura AIV_38, en la parte este del arreglo existe un área que corresponde a zona de lomas, específicamente a la Sierra de Santa Catarina, los resultados obtenidos son consistentes en esta zona porque en las celdas cercanas se estimaron velocidades más altas de propagación, mientras que en la zona sur se encontraron velocidades correspondientes a zona de lago. En la Figura AIV_39 se encuentran algunos ejemplos de las tomografías obtenidas y en la Figura AIV_40 las curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love extraídas de las tomografías.

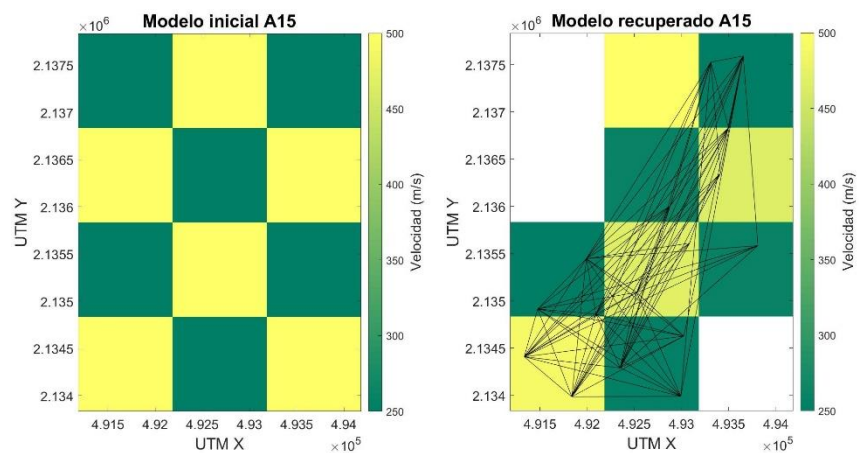


Figura AIV_37. Izquierda. Modelo inicial propuesto en la prueba de resolución. Derecha. Modelo recuperado, las líneas negras representan las trayectorias donde fue recuperada la función de Green. La norma L_2 fue de 0.7772.

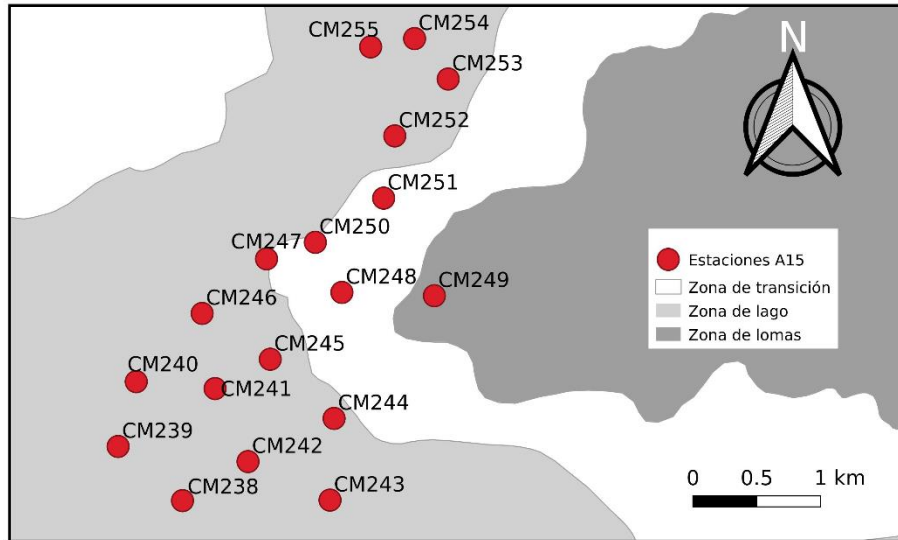


Figura AIV_38. Distribución espacial de las estaciones que forman el arreglo A15. La zona de lomas que se observa en el este corresponde a la Sierra de Santa Catarina.

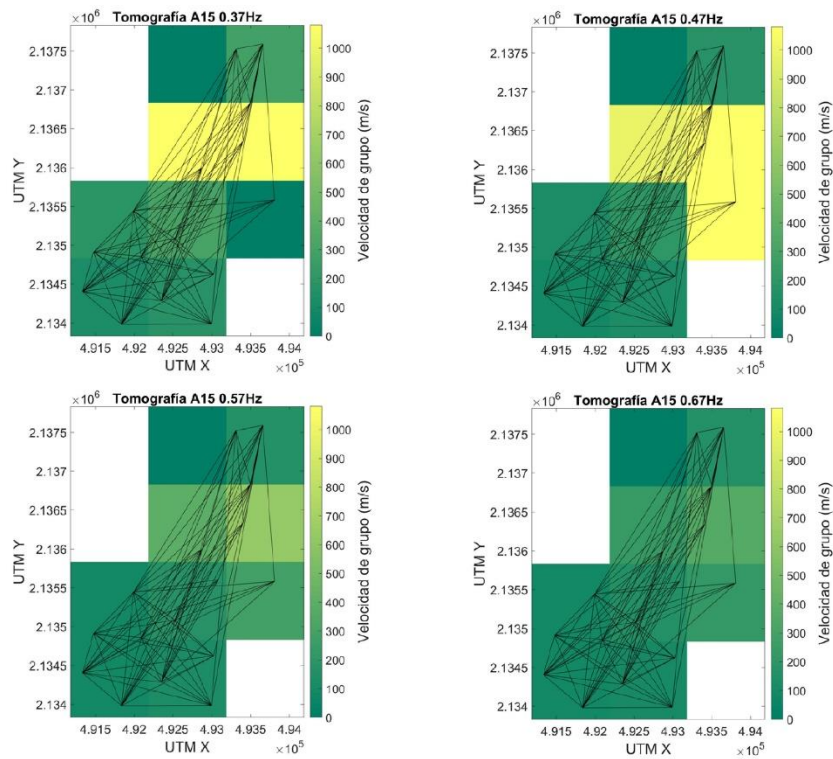


Figura AIV_39. Tomografías obtenidas a partir de la inversión de los tiempos de viaje calculados en las frecuencias 0.37, 0.47, 0.57 y 0.67 Hz del arreglo A15.

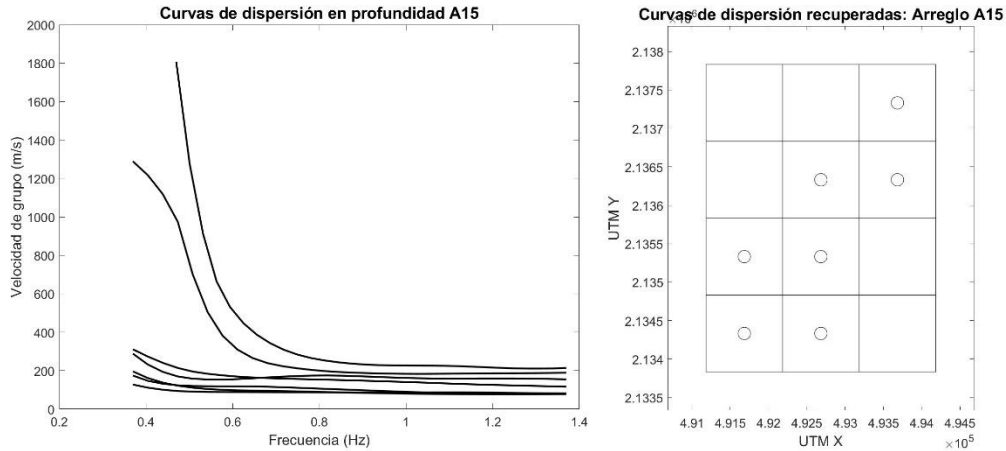


Figura AIV_40. Izquierda. Curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love extraídas de las tomografías de tiempos de viaje. Derecha. Con un círculo se señalan las celdas de donde fue posible extraer las curvas.

En el arreglo A16 el tamaño adecuado de las celdas fue de 1100 m por lado, en la Figura AIV_41 se muestra la prueba realizada. Algunos ejemplos de las tomografías obtenidas se muestran en la Figura AIV_42. Las curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love se muestran en la Figura AIV_43. La mayoría de las estaciones que formaron este arreglo se localizaron en zona de transición.

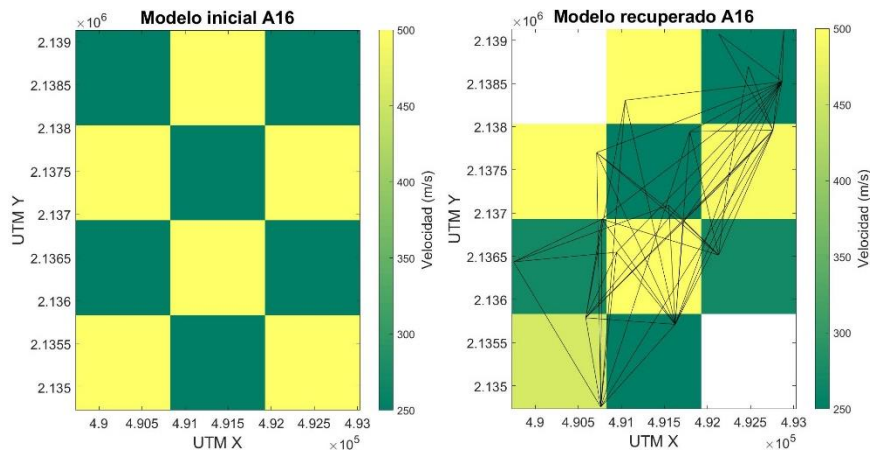


Figura AIV_41. Izquierda. Modelo inicial propuesto en la prueba de resolución. Modelo recuperado, las líneas negras representan las trayectorias donde fue recuperada la función de Green. La norma L_2 fue de 1.1235.

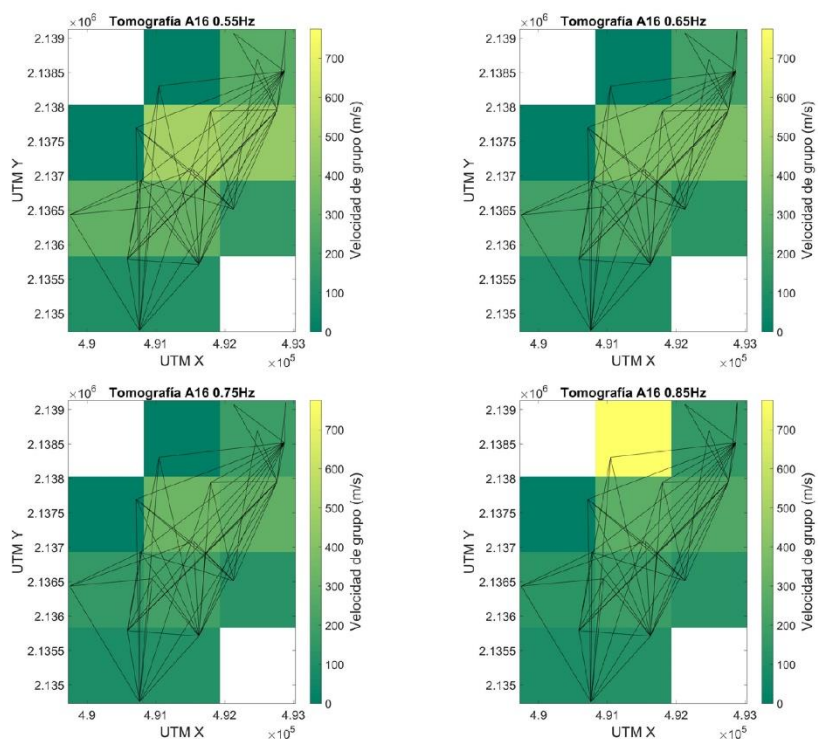


Figura AIV_42. Tomografías obtenidas a partir de la inversión de los tiempos de viaje calculados en las frecuencias 0.55, 0.65, 0.75 y 0.85 Hz del arreglo A16.

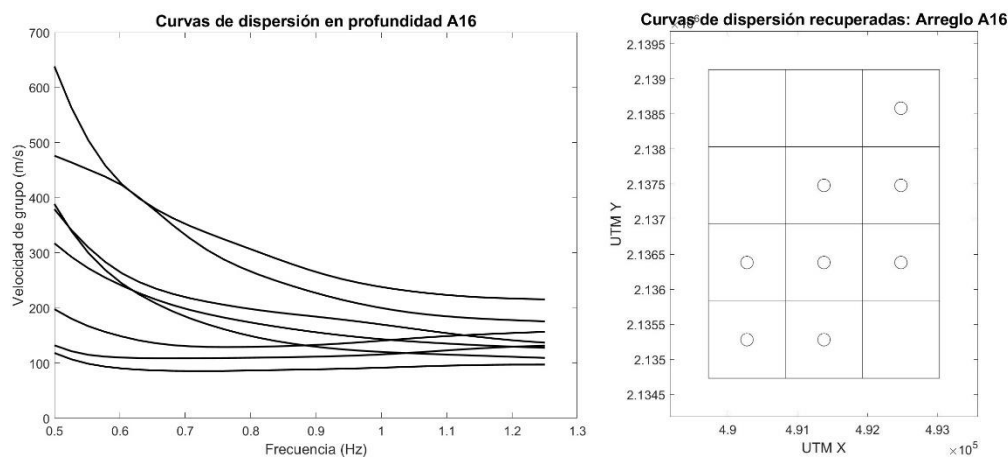


Figura AIV_43. Izquierda. Curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh extraídas de las tomografías de tiempos de viaje. Derecha. Con un círculo se señalan las celdas de donde fue posible extraer las curvas.

En el arreglo A17, con la prueba de resolución que se observa en la Figura AIV_44, se determinó un tamaño de celda adecuado de 800 m. En la Figura AIV_45 se encuentran algunos de los ejemplos de las tomografías obtenidas en este arreglo, en este arreglo también se observó una mayor velocidad de propagación en las celdas que contenían estaciones en zona de lomas, localizadas en la parte este del arreglo. En la Figura AIV_46 se muestran las curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh extraídas.

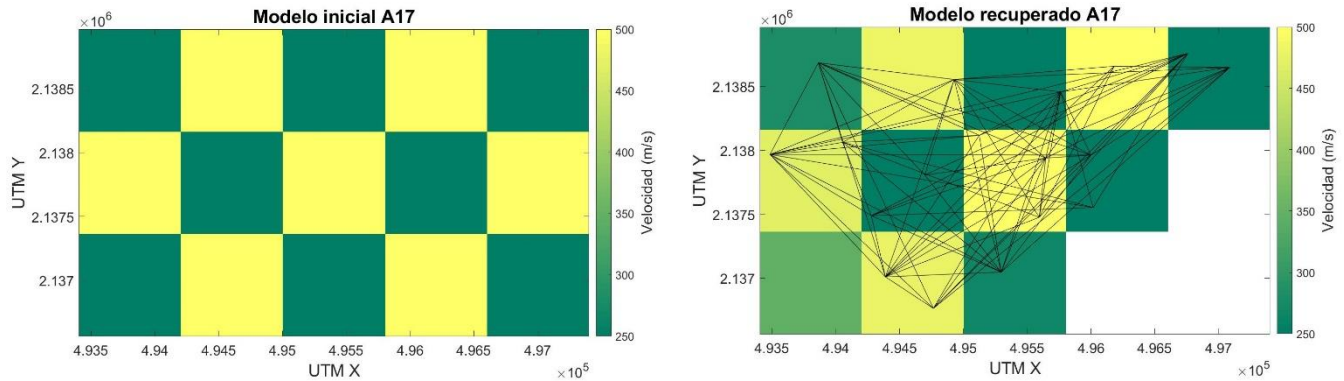


Figura AIV_44. Izquierda. Modelo inicial propuesto en la prueba de resolución. Derecha. Modelo recuperado, las líneas negras representan las trayectorias donde fue recuperada la función de Green. La norma L_2 fue de 0.8686.

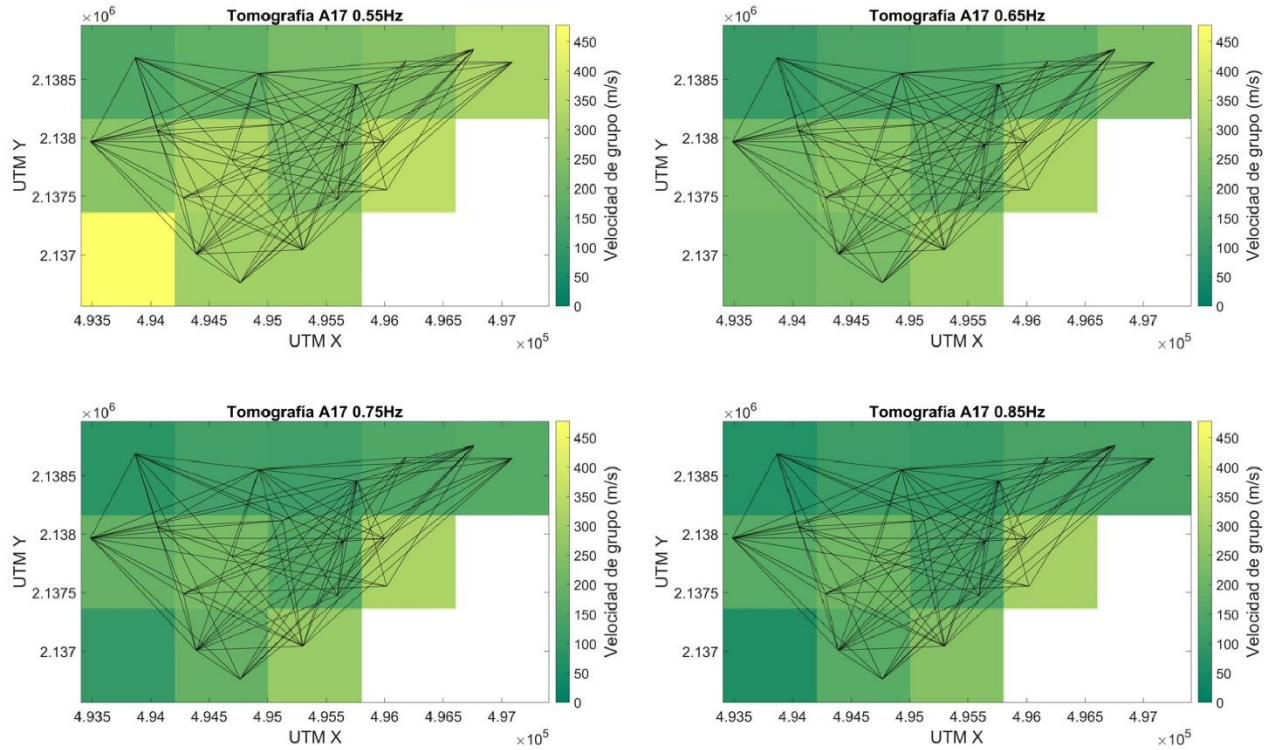


Figura AIV_45. Tomografías obtenidas a partir de la inversión de los tiempos de viaje calculados en las frecuencias 0.55, 0.65, 0.75 y 0.85 Hz del arreglo A17.

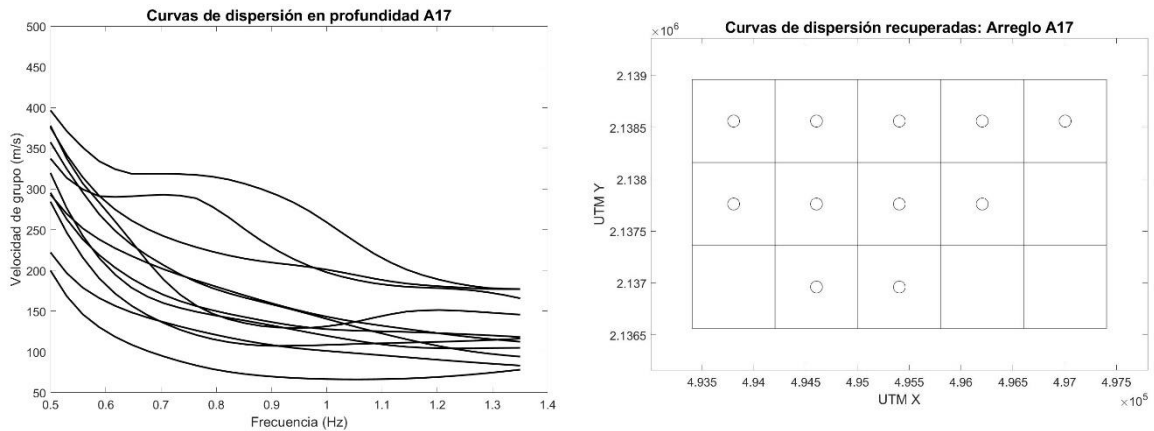


Figura AIV_46. Izquierda. Curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh extraídas de las tomografías estimadas en el arreglo A17. Derecha. Con un círculo se señalan las celdas donde fue posible extraer las curvas de dispersión.

En el arreglo A18 el tamaño de las celdas adecuado fue de 1000 m por lado, según la prueba mostrada en la Figura AIV_47. Algunos ejemplos de las tomografías obtenidas se muestran en la Figura AIV_48, en este arreglo fue complicado recuperar información en la parte sur y suroeste, donde las estaciones se encuentran cercanas en la zona de loma. Sin embargo, se observaron velocidades más altas en esta parte, las curvas de dispersión extraídas se muestran en la Figura AIV_49.

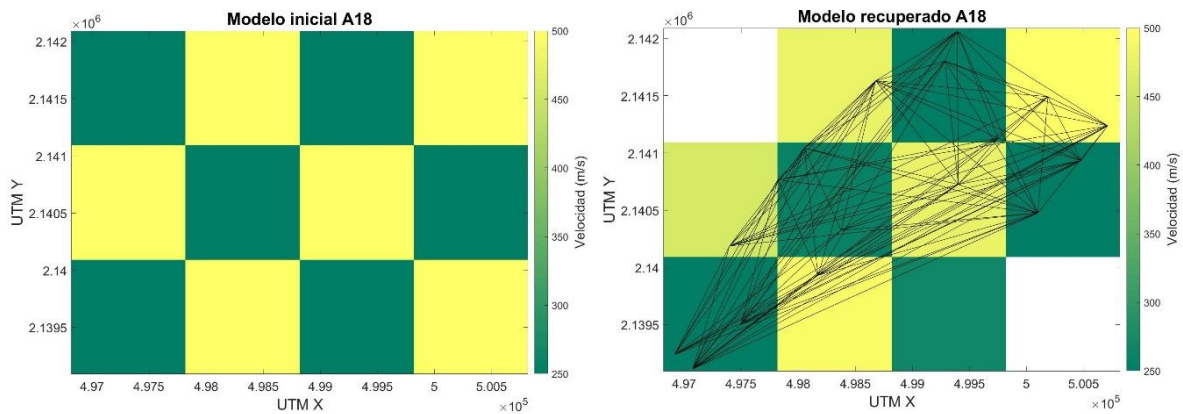


Figura AIV_47. Izquierda. Modelo inicial propuesto en la prueba de resolución. Derecha. Modelo recuperado, las líneas negras representan las trayectorias donde fue recuperada la función de Green. La norma L_2 fue de 1.1108

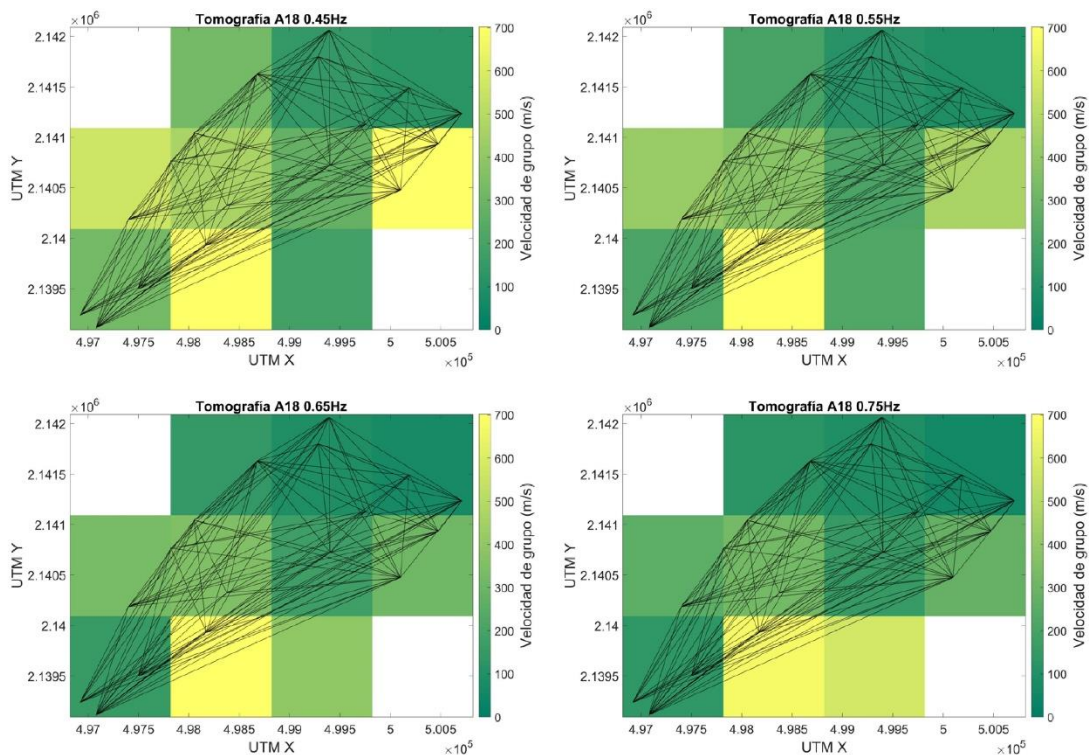


Figura AIV_48. Tomografías obtenidas a partir de la inversión de los tiempos de viaje calculados en las frecuencias 0.45, 0.55, 0.65 y 0.75 Hz del arreglo A18.

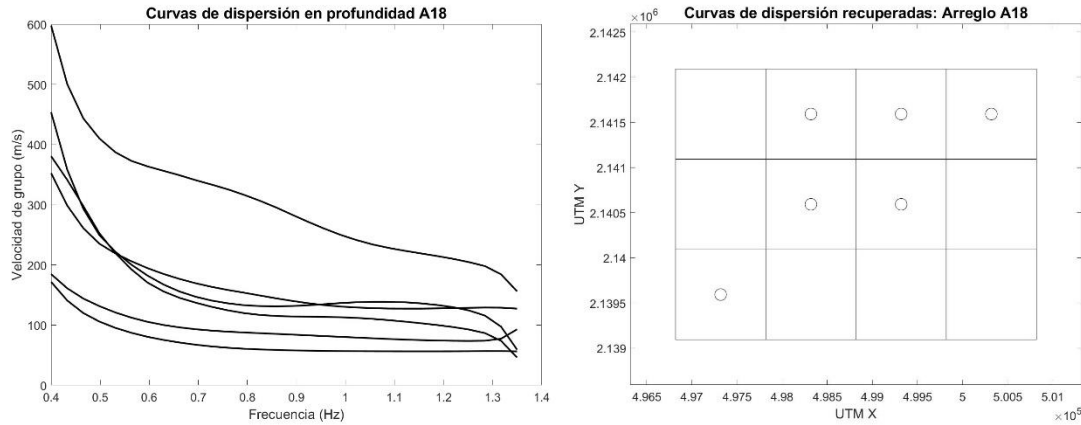


Figura AIV_49. Izquierda. Curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh extraídas de las tomografías estimadas en el arreglo A18. Derecha. Con un círculo se señalan las celdas donde fue posible extraer las curvas de dispersión.

En el arreglo A19 el tamaño de celdas adecuado fue de 650 m por lado, según la prueba de resolución mostrada en la Figura AIV_50. En este arreglo se observaron variaciones muy pequeñas de velocidad en todas las frecuencias e incluso en su distribución lateral. En la Figura AIV_51 se muestran algunos ejemplos de las tomografías obtenidas y en la Figura AIV_52 las curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love extraídas. La mayoría de las estaciones que forman este arreglo se encuentran en zona de transición.

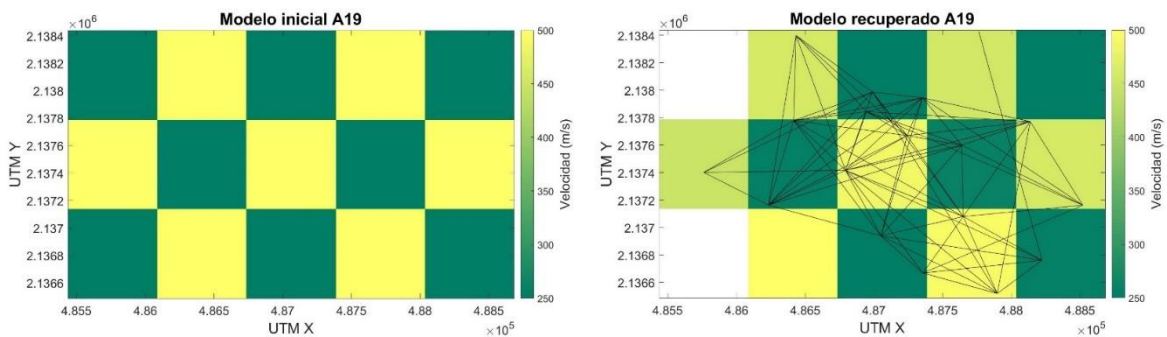


Figura AIV_50. Izquierda. Modelo inicial propuesto en la prueba de resolución. Derecha. Modelo recuperado, las líneas negras representan las trayectorias donde fue recuperada la función de Green. La norma L_2 fue de 0.7453.

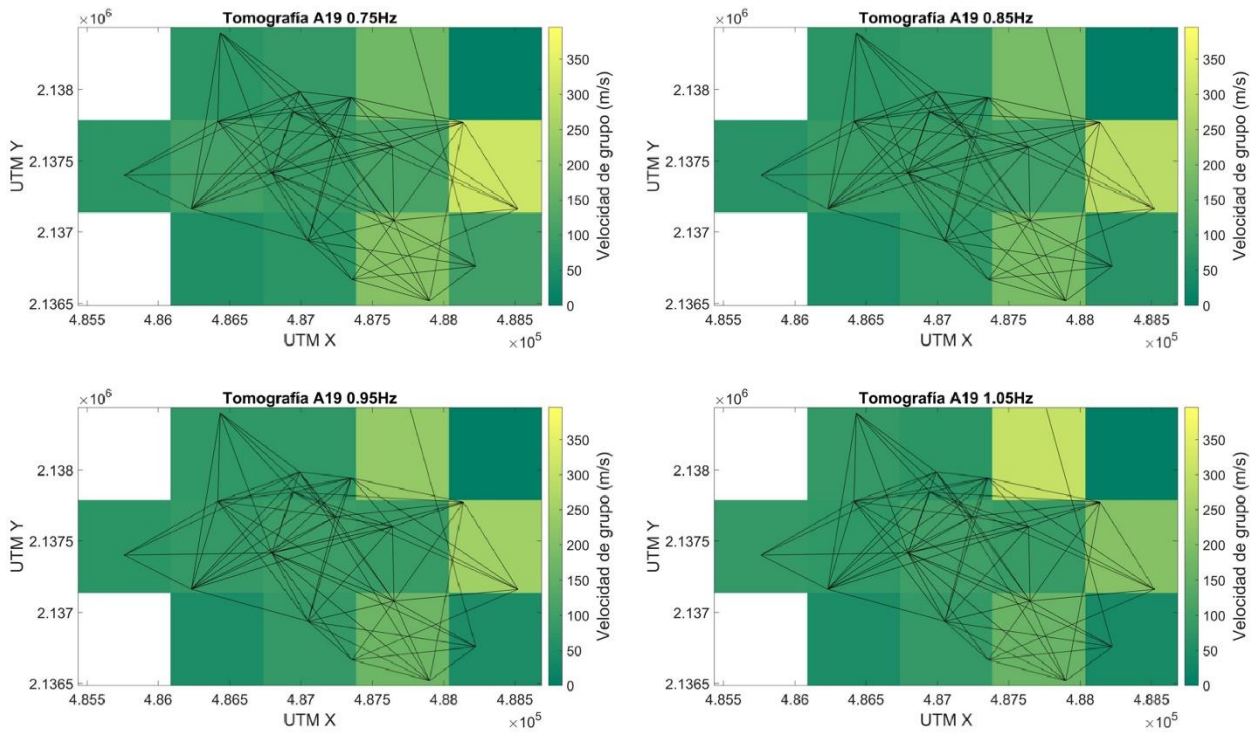


Figura AIV_51. Tomografías obtenidas a partir de la inversión de los tiempos de viaje calculados en las frecuencias 0.75, 0.85, 0.95 y 1.05 Hz del arreglo A19.

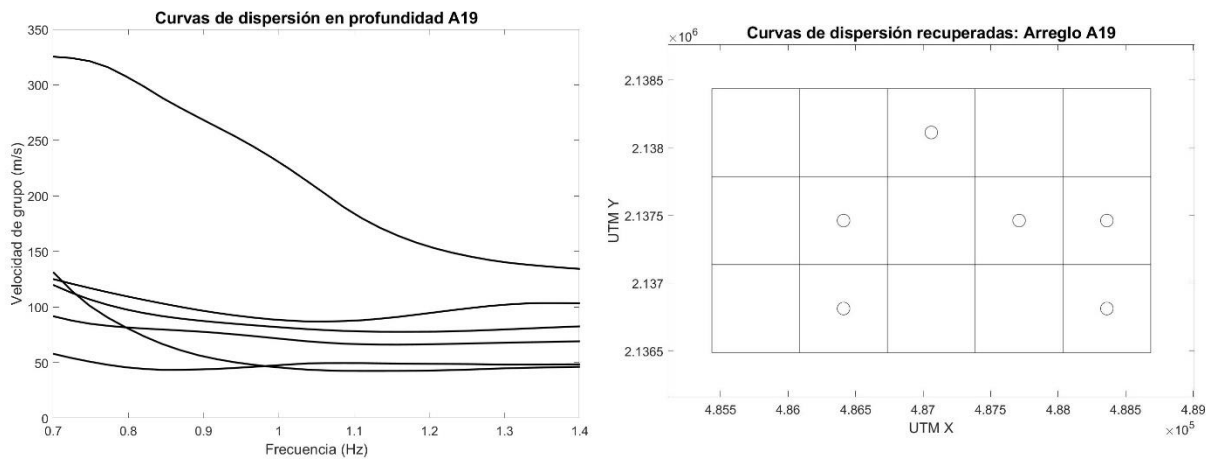


Figura AIV_52. Izquierda. Curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love extraídas de las tomografías obtenidas en el arreglo A19. Derecha. Con un círculo se señalan las celdas donde fue posible extraer las curvas de dispersión.

En el arreglo A20 el tamaño de celdas adecuado fue de 750 m, la prueba de resolución se muestra en la Figura AIV_53. En este arreglo se observó poca variación lateral de velocidades, algunos ejemplos de las tomografías obtenidas están en la Figura AIV_54. Las curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love extraídas se muestran en la Figura AIV_55. Según el mapa de microzonificación geotécnica las estaciones que forman este arreglo se encuentran en zona de lomas.

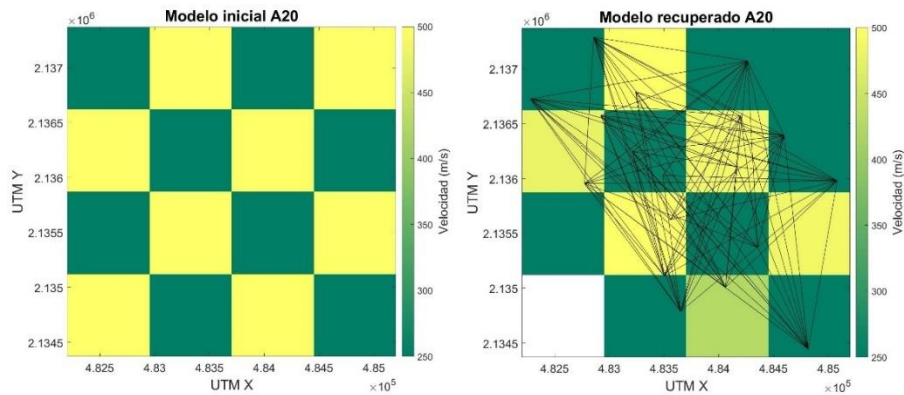


Figura AIV_53. Izquierda. Modelo inicial propuesto en la prueba de resolución. Derecha. Modelo recuperado, las líneas negras representan las trayectorias donde fue recuperada la función de Green. La norma L_2 fue de 1.3726.

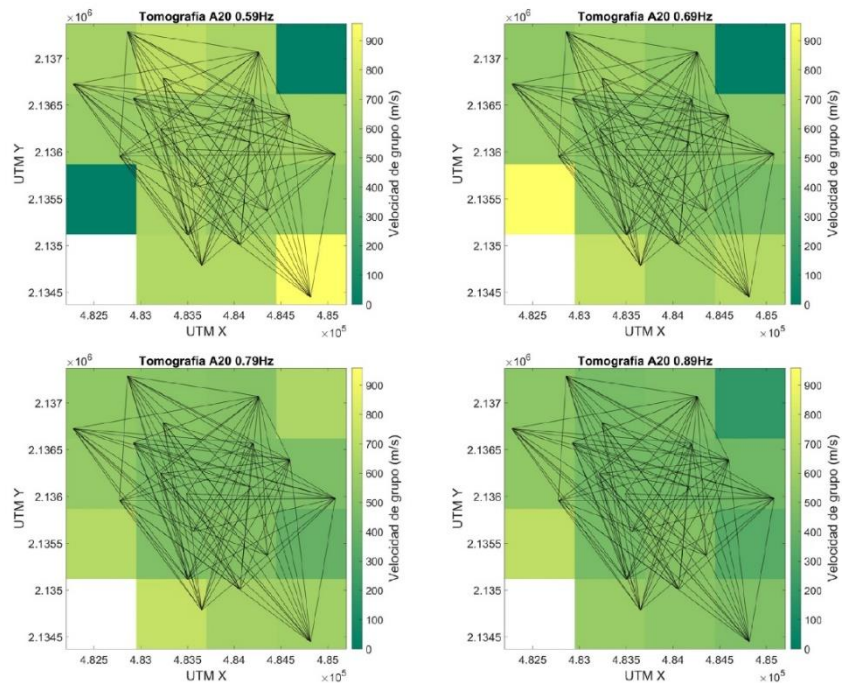


Figura AIV_54. Tomografías obtenidas a partir de la inversión de los tiempos de viaje calculados en las frecuencias 0.59, 0.69, 0.79 y 0.89 Hz del arreglo A19.

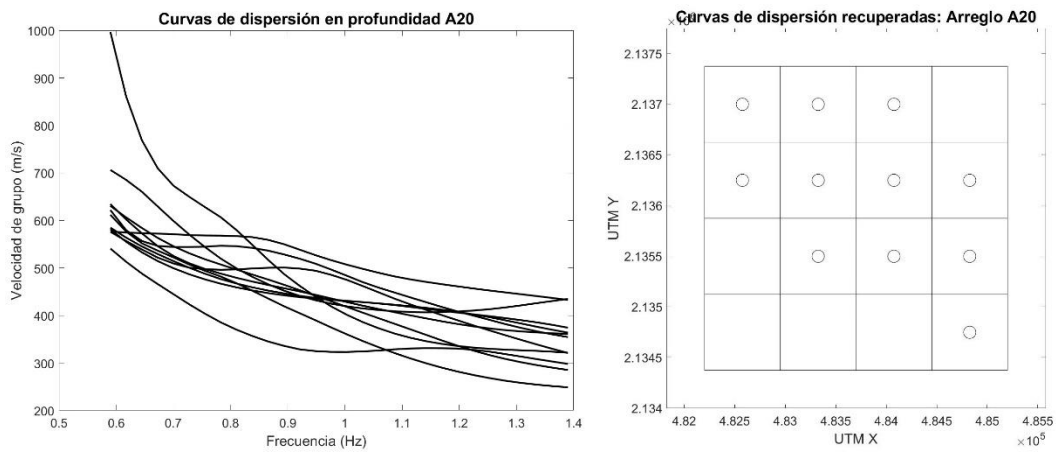


Figura AIV_55. Izquierda. Curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love extraídas de las tomografías obtenidas en el arreglo A20. Derecha. Con un círculo se señalan las celdas donde fue posible extraer las curvas de dispersión.

En el arreglo A21 se obtuvieron mejores resultados con celdas de 750 m por lado, como se muestra en la prueba de resolución de la Figura AIV_56. Este arreglo se localizaba en zona de transición, las estaciones al este limitaban con la zona de lago y en estas celdas en general se observaron velocidades más bajas. En la Figura AIV_57 se muestran algunos ejemplos de las tomografías obtenidas. Las curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love extraídas se muestran en la Figura AIV_58.

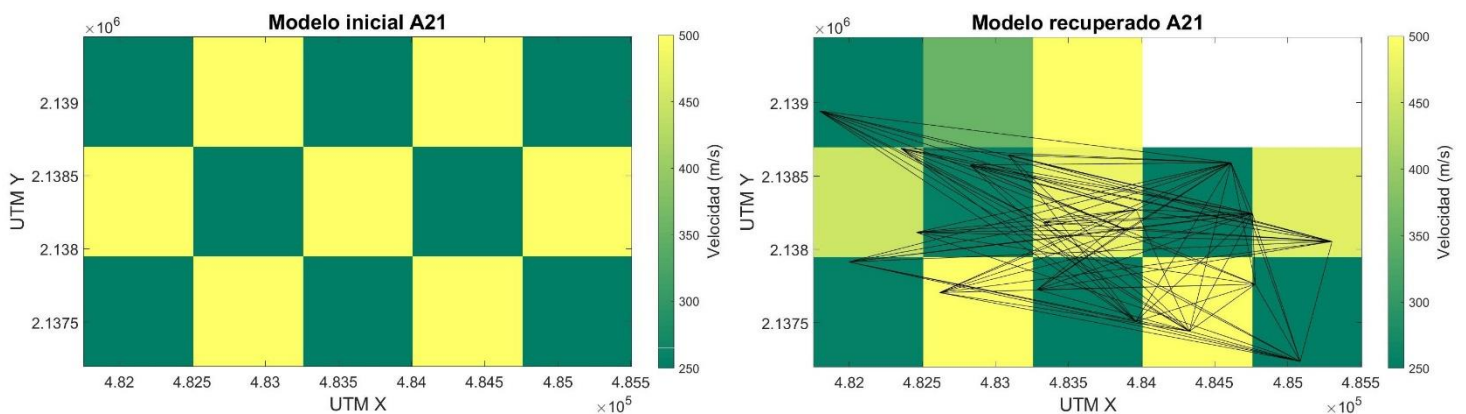


Figura AIV_56. Izquierda. Modelo inicial propuesto en la prueba de resolución. Modelo recuperado, las líneas negras representan las trayectorias donde fue recuperada la función de Green. La norma L_2 fue de 1.3929

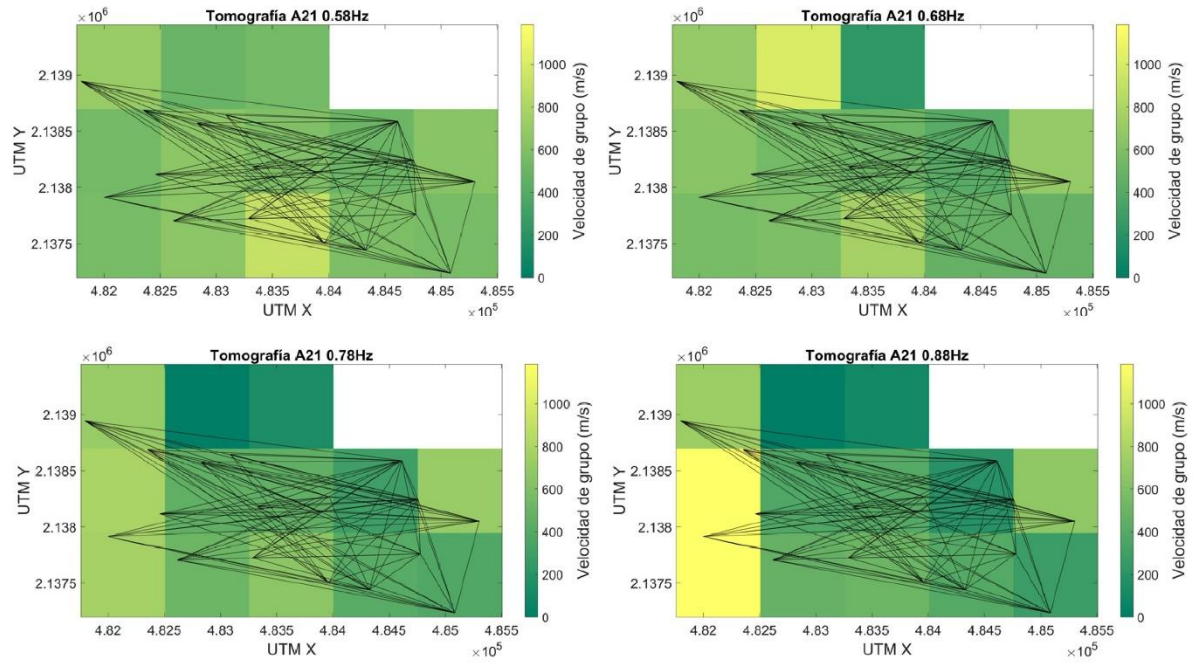


Figura AIV_57. Tomografías obtenidas a partir de la inversión de los tiempos de viaje calculados en las frecuencias 0.58, 0.68, 0.78 y 0.88 Hz.

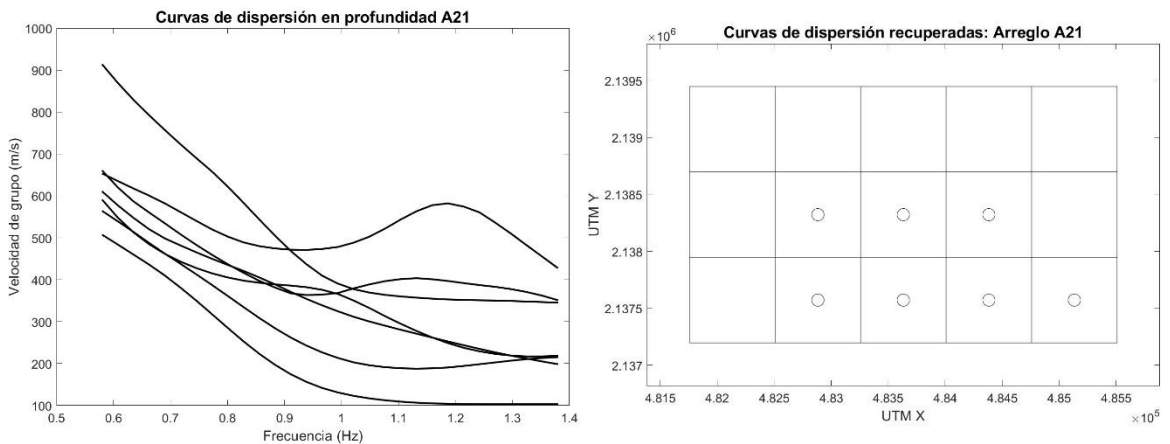


Figura AIV_58. Izquierda. Curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love extraídas de las tomografías obtenidas en el arreglo A21. Derecha. Con un círculo se señalan las celdas donde fue posible extraer las curvas de dispersión.

En el arreglo A22 el tamaño de celdas adecuado fue de 750 m por lado, en la Figura AIV_59 se muestra la prueba de resolución realizada. Como se muestra en el mapa de la Figura AIV_60, este arreglo se encuentra en las zonas de transición y de lago, las velocidades estimadas en las tomografías fueron consistentes con la zonificación geotécnica obteniendo velocidades más altas en la zona de transición, en la Figura AIV_61 se muestran algunos ejemplos de las tomografías obtenidas. Por último, en la Figura AIV_62 se encuentran las curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love extraídas de las tomografías en este arreglo.

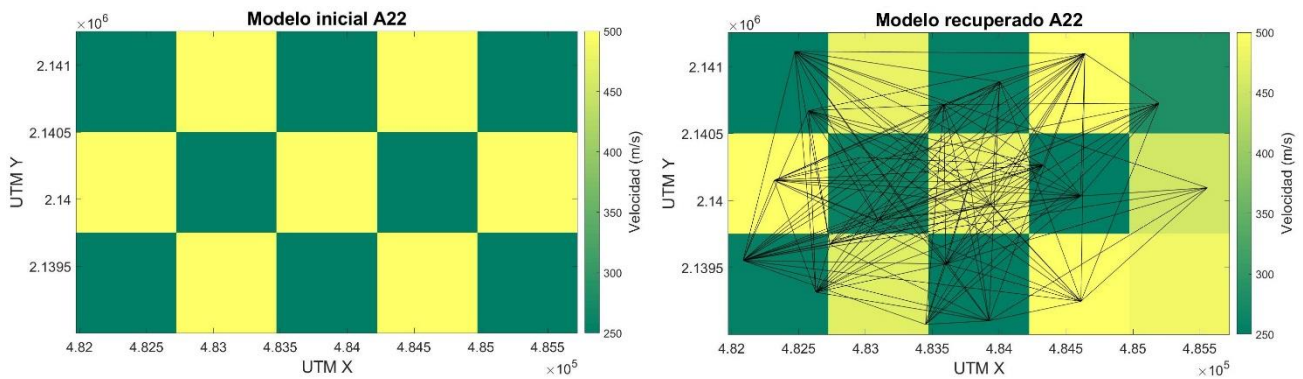


Figura AIV_59. Izquierda. Modelo inicial propuesto en la prueba de resolución. Modelo recuperado, las líneas negras representan las trayectorias donde fue recuperada la función de Green. La norma L_2 fue de 1.1003.

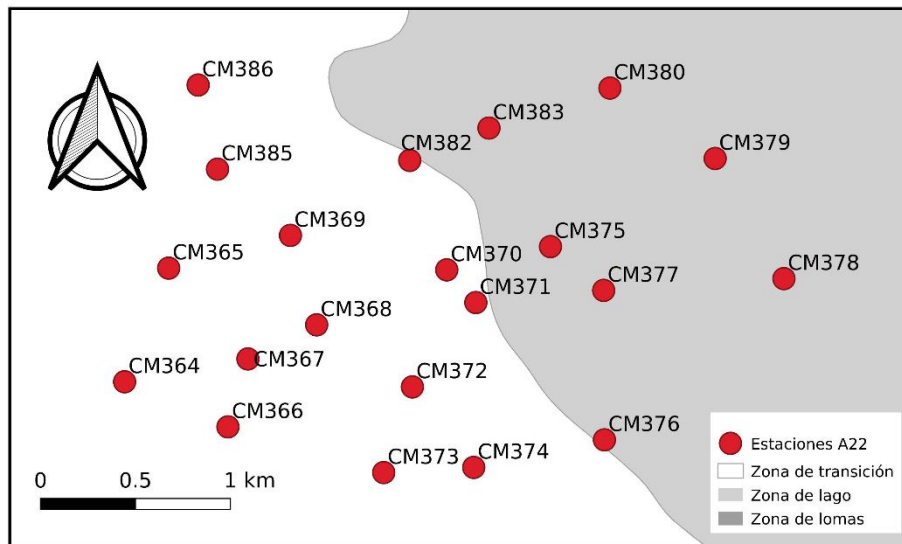


Figura AIV_60. Distribución espacial de las estaciones que forman el arreglo A22, en el este las estaciones se encuentran en zona de lago, en esta zona se observaron velocidades de propagación

menores respecto al lado oeste, donde las estaciones se localizan en zona de transición.

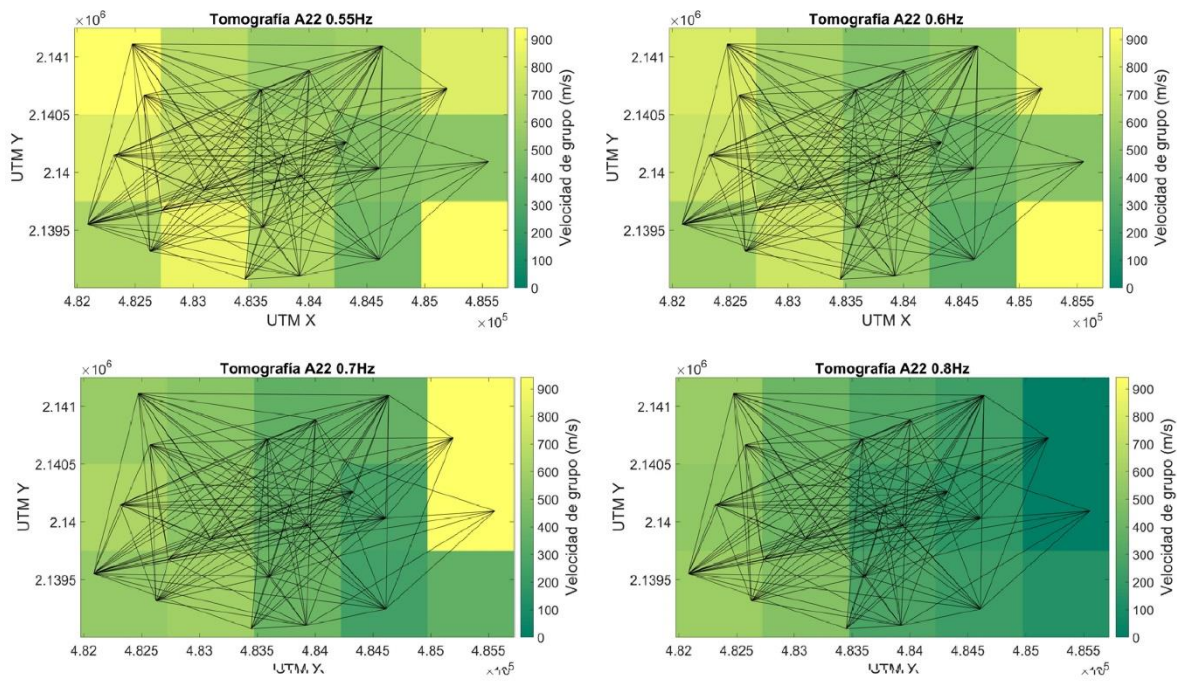


Figura AIV_61. Tomografías obtenidas a partir de la inversión de los tiempos de viaje calculados en las frecuencias 0.58, 0.68, 0.78 y 0.88 Hz.

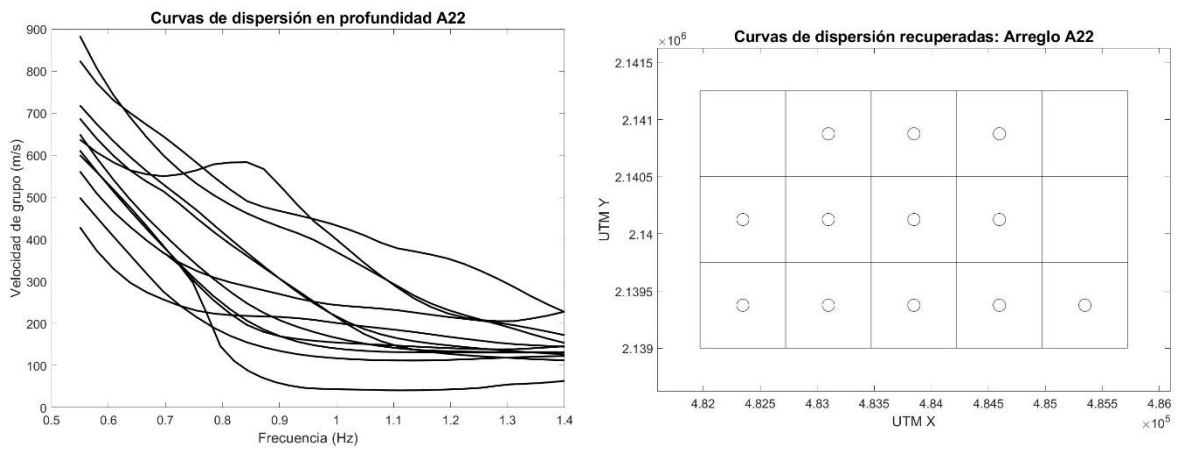


Figura AIV_62. Izquierda. Curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love extraídas de las tomografías obtenidas en el arreglo A22. Derecha. Con un círculo se señalan las celdas donde fue posible extraer las curvas de dispersión.

Anexo V. Inversión por clúster.

Clúster 2

En este clúster la inversión conjunta fue llevada a cabo utilizando los cocientes espectrales HVSR calculados en la estación CM158 y la curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh estimada en la celda que la contenía y que pertenece al arreglo A11. Debido a que no se contaba con información a priori cercana, el modelo inicial fue construido variando el modelo obtenido de la inversión conjunta en el clúster10. En la Figura AV_1 se muestra el mejor ajuste obtenido en el HVSR y en la curva de dispersión en la inversión conjunta.

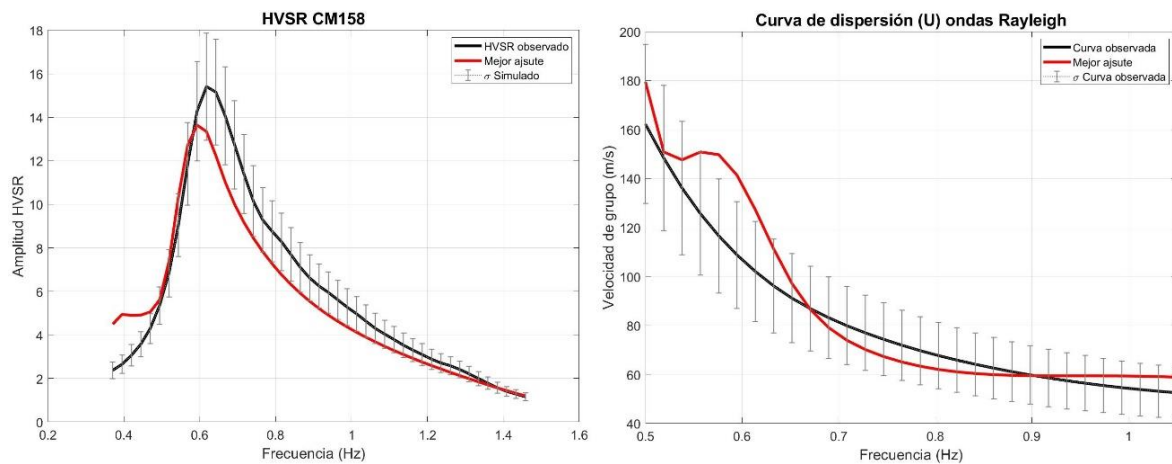


Figura AV_1. Izquierda. La línea negra representa el cociente espectral estimado en la estación CM148, la línea roja representa el mejor ajuste obtenido de la inversión. La desviación estándar simulada representa el 15% de variación de la amplitud del cociente HVSR, usado como parámetro en la inversión. El error relativo del mejor ajuste es de 17.71%. Derecha. La línea negra representa la curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh recuperada en la celda elegida del arreglo A11, la línea roja representa el mejor ajuste obtenido de la inversión. En este caso, la desviación estándar simulada se refiere a la aleatoriedad (alrededor de $\pm 10\%$) observada en los tiempos de viaje en el proceso de inversión tomográfica. El error relativo del ajuste es de 9.48%.

El modelo de velocidad de onda de corte obtenido, así como el kernel de sensibilidad calculado se muestran en la Figura AV_2. Del kernel de sensibilidad de la curva de dispersión se concluye que la profundidad de investigación alcanzada por el modelo es de 250 m, aproximadamente. Por otro lado, al cortar el modelo a diferentes profundidades se observó que el ancho del pulso en los cocientes espectrales era sensible hasta 300 m, aproximadamente. En resumen, se puede decir que

el modelo obtenido de la inversión conjunta de los cocientes espectrales HVSR calculados en la estación CM158 y la curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh estimada en la celda que contenía esta estación alcanzó los 300 m de profundidad de investigación.

Este clúster incluyó todas las celdas de los arreglos A11 y A19, además de la mayor parte de las del arreglo A16. En total se estimaron 24 modelos 1-D de velocidad de onda de corte. Además, se observó que en la inversión de las curvas de dispersión de ondas Love (arreglos, A16 y A19) se alcanzó una profundidad significativamente menor, alrededor de 180 m, respecto a la inversión de las curvas de dispersión de ondas Rayleigh (A11). En las Figuras C_3 y C_4 se muestran dos ejemplos de los modelos obtenidos, así como su ajuste y su kernel de sensibilidad. En la Figura AV_5 se muestran los modelos de velocidad estimados en este clúster considerando la profundidad de investigación sugerida por los kernels de sensibilidad.

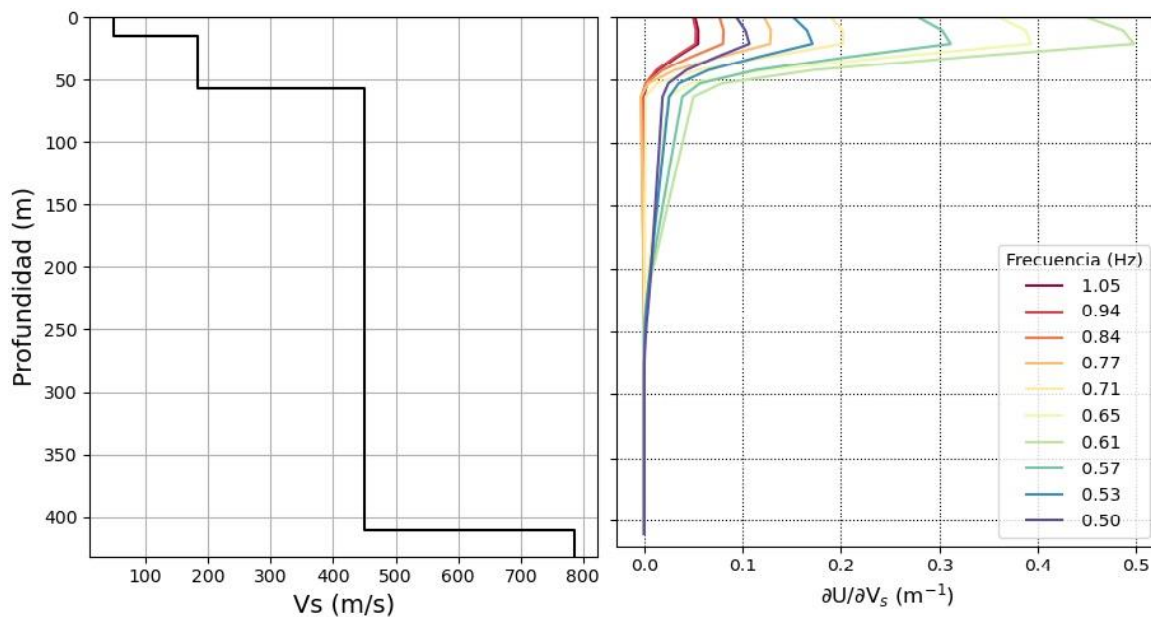
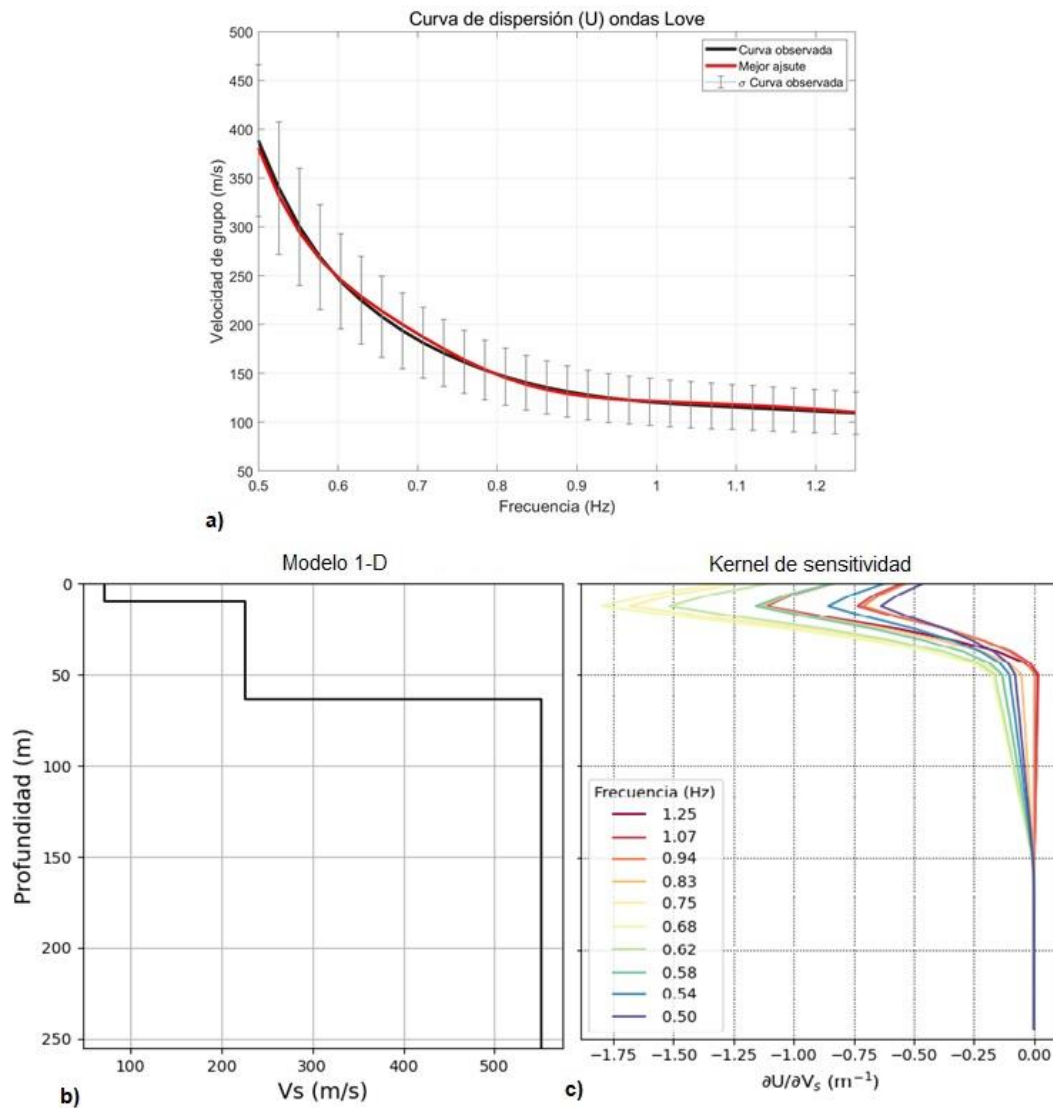
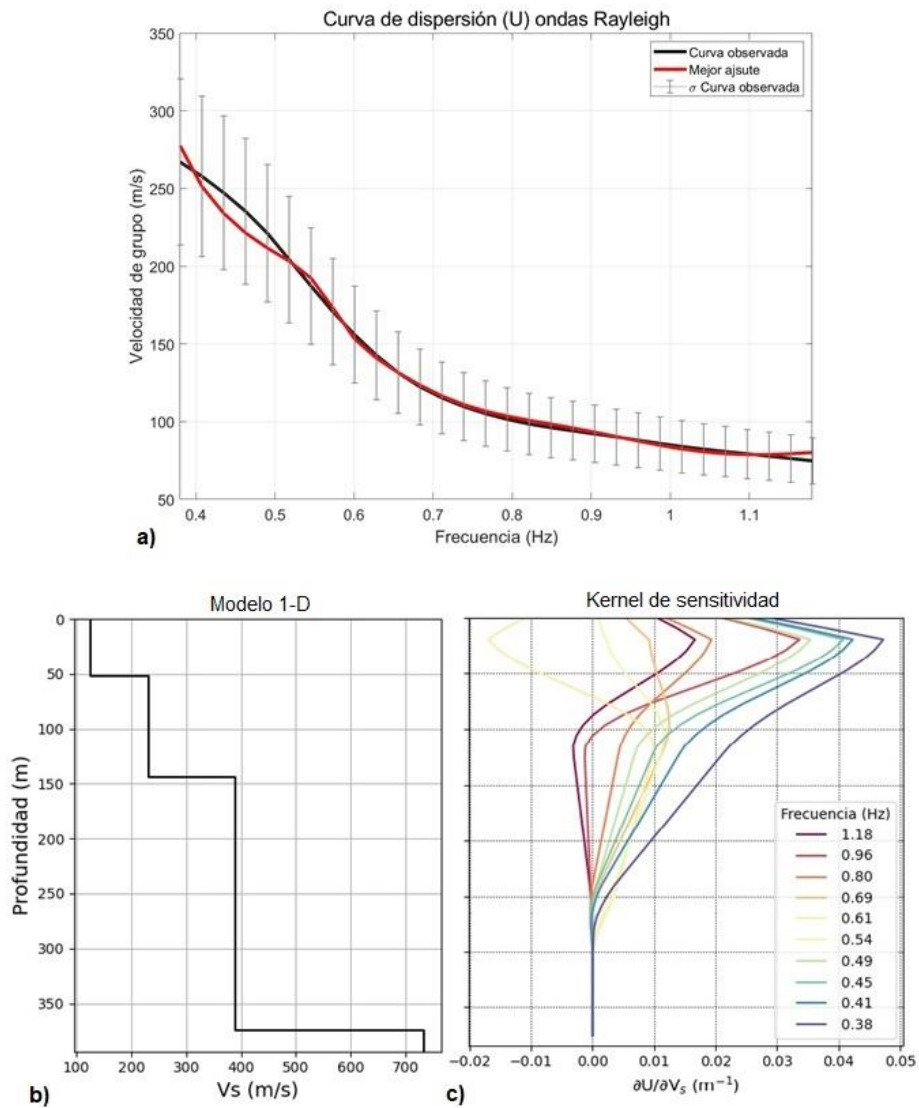


Figura AV_2. Izquierda. Modelo de velocidades obtenido de la inversión conjunta de los cocientes espectrales HVSR calculados en la estación CM158 y la curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh estimada con la inversión tomográfica en la celda que contiene esta estación en el arreglo A11 y cuyos ajustes se muestran en la Figura 164. Derecha. Kernel de sensibilidad estimado dentro del rango de las frecuencias donde fue recuperada la curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh. Se puede observar que, según el modelo, hay cambios en la

velocidad de grupo a perturbaciones en la velocidad de onda de corte hasta una profundidad de ~250 metros.



C_3. a) En negro, curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love estimada a partir de la tomografía de tiempos de viaje en una celda del arreglo A6. En rojo, mejor ajuste obtenido en la inversión. b) Modelo de velocidad 1-D obtenido de la inversión a profundidad. c) Kernel de sensibilidad estimado del modelo resultante en el rango de frecuencias donde fue observada la dispersión.



C_4. a) En negro, curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love estimada a partir de la tomografía de tiempos de viaje en una celda del arreglo A19. En rojo, mejor ajuste obtenido en la inversión. b) Modelo de velocidad 1-D obtenido de la inversión a profundidad. c) Kernel de sensibilidad estimado del modelo resultante en el rango de frecuencias donde fue observada la dispersión.

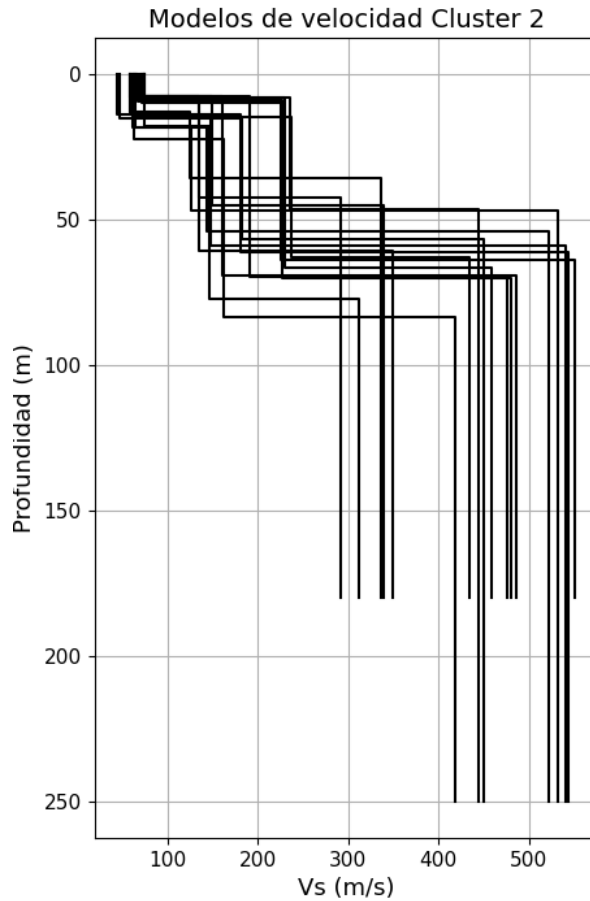


Figura AV_5. Modelos de velocidad de onda de corte 1-D obtenidos al invertir las curvas de dispersión contenidas en el clúster 2.

Clúster 6

En el clúster 6 la inversión conjunta se llevó a cabo con el cociente espectral HVSR calculado en la estación CM133 y la curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love recuperada en la celda del arreglo A10 que contenía esta estación. En la Figura AV_6 se muestra el mejor ajuste obtenido en el HVSR y en la curva de dispersión, mientras que el modelo resultante y el kernel de sensibilidad se muestran en la Figura AV_7. En el modelo resultante se observa que la primera capa tiene un espesor de aproximadamente 10 metros. A partir de un análisis de la curva de dispersión donde se perturbo la velocidad de esta capa se determinó que la curva de dispersión no era capaz de resolverla. Por otro lado, se analizó el modelo directo de los cocientes espectrales y se observó que las características geométricas y elásticas de esta capa eran fundamentales para el ajuste de los cocientes espectrales teóricos a los observados. Con base en estas observaciones se decidió invertir

de manera conjunta todas las curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love de este clúster con los cocientes espectrales HVSR que les correspondieran según cada celda.

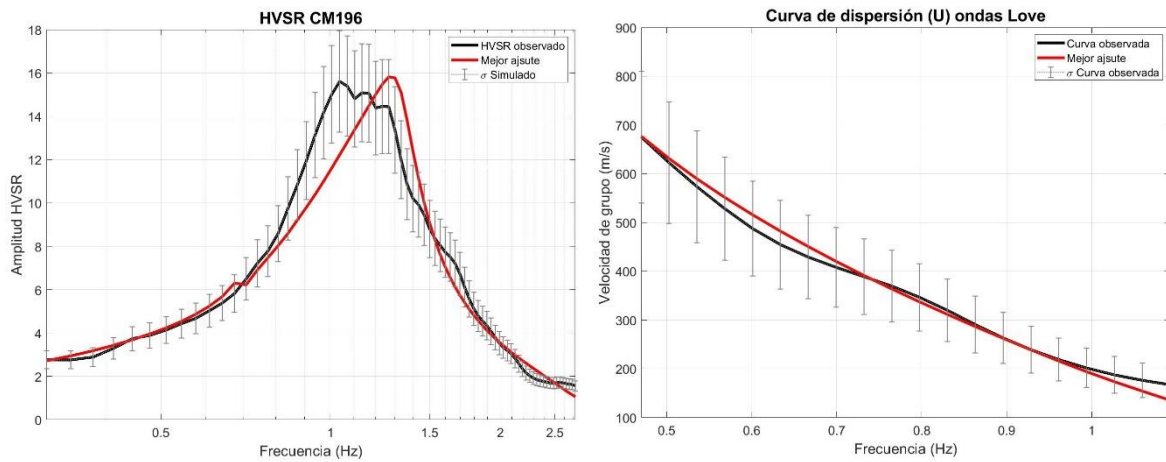


Figura AV_6. Izquierda. La línea negra representa el cociente espectral estimado en la estación CM133, la línea roja representa el mejor ajuste obtenido de la inversión. La desviación estándar simulada representa el 15% de variación de la amplitud del cociente HVSR, usado como parámetro en la inversión. El error relativo del mejor ajuste es de 10.903%. Derecha. La línea negra representa la curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love recuperada en la celda elegida del arreglo A10, la línea roja representa el mejor ajuste obtenido de la inversión. En este caso, la desviación estándar simulada se refiere a la aleatoriedad (alrededor de $\pm 10\%$) observada en los tiempos de viaje en el proceso de inversión tomográfica. El error relativo del ajuste es de 4.1164%.

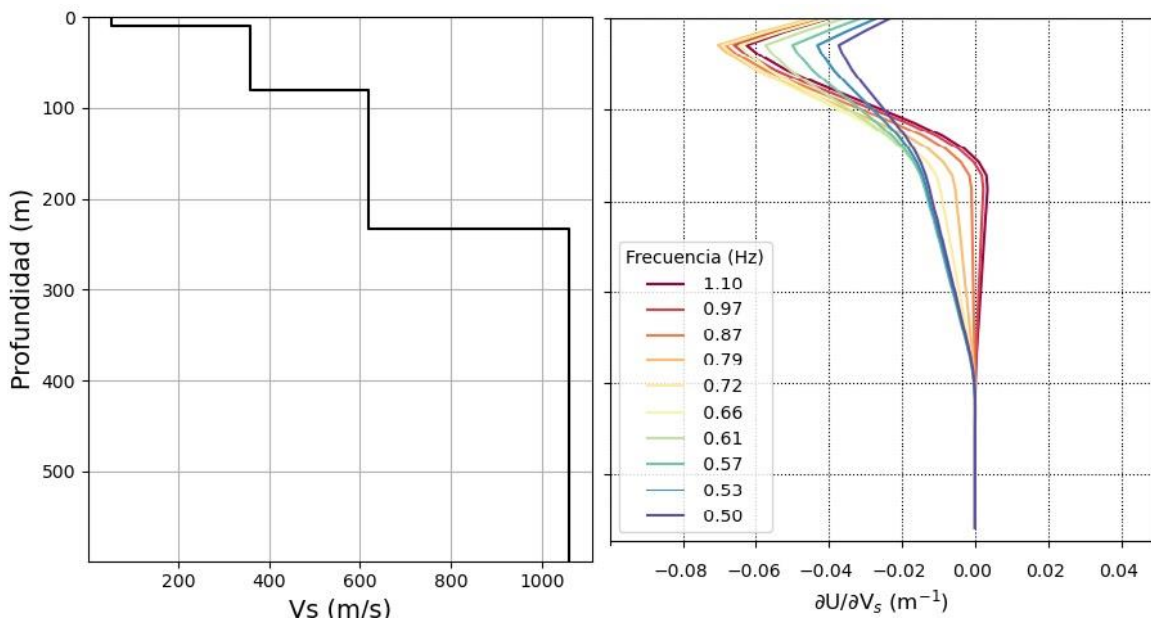


Figura AV_7. Izquierda. Modelo de velocidades obtenido de la inversión conjunta de los cocientes espectrales HVSR calculados en la estación CM133 y la curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love estimada con la inversión tomográfica en la celda que contiene esta estación en el arreglo A10 y cuyos ajustes se muestran en la Figura AV_6. Derecha. Kernel de sensibilidad estimado dentro del rango de las frecuencias donde fue recuperada la curva de dispersión. La profundidad de investigación alcanzada es de aproximadamente 400 m.

En las Figuras C_8 y C_9 se muestran dos ejemplos del proceso de inversión y de los modelos obtenidos en otras celdas. Este clúster sólo incluyó todas las celdas del arreglo A10 y una del arreglo A12. En total se obtuvieron 9 modelos 1-D de velocidad de onda de corte que se presentan en la Figura AV_10.

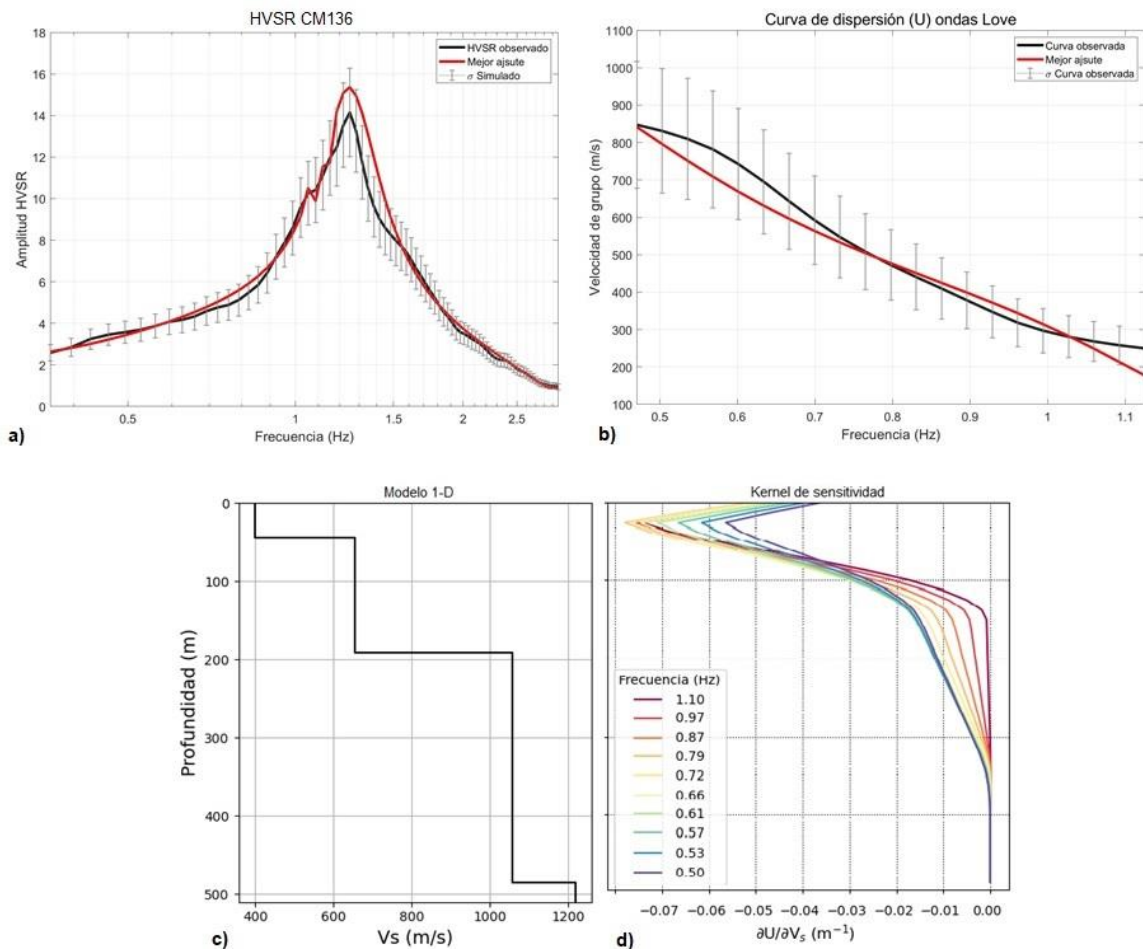


Figura AV_8. a) La línea negra representa el HVSR calculado en la estación CM136. La línea roja representa el mejor ajuste obtenido en la inversión. El error relativo fue del 5.59%. b) La línea negra representa la curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love recuperada a partir de la

tomografía en la celda que contiene a la estación CM136, del arreglo A10. La línea roja representa el mejor ajuste obtenido. El error relativo fue del 6.82%. c) Modelo de velocidades obtenido de la inversión conjunta. d) Kernel de sensibilidad calculado para el modelo resultante en el rango de frecuencias donde fue observada la dispersión. La profundidad de investigación es de aprox. 350m.

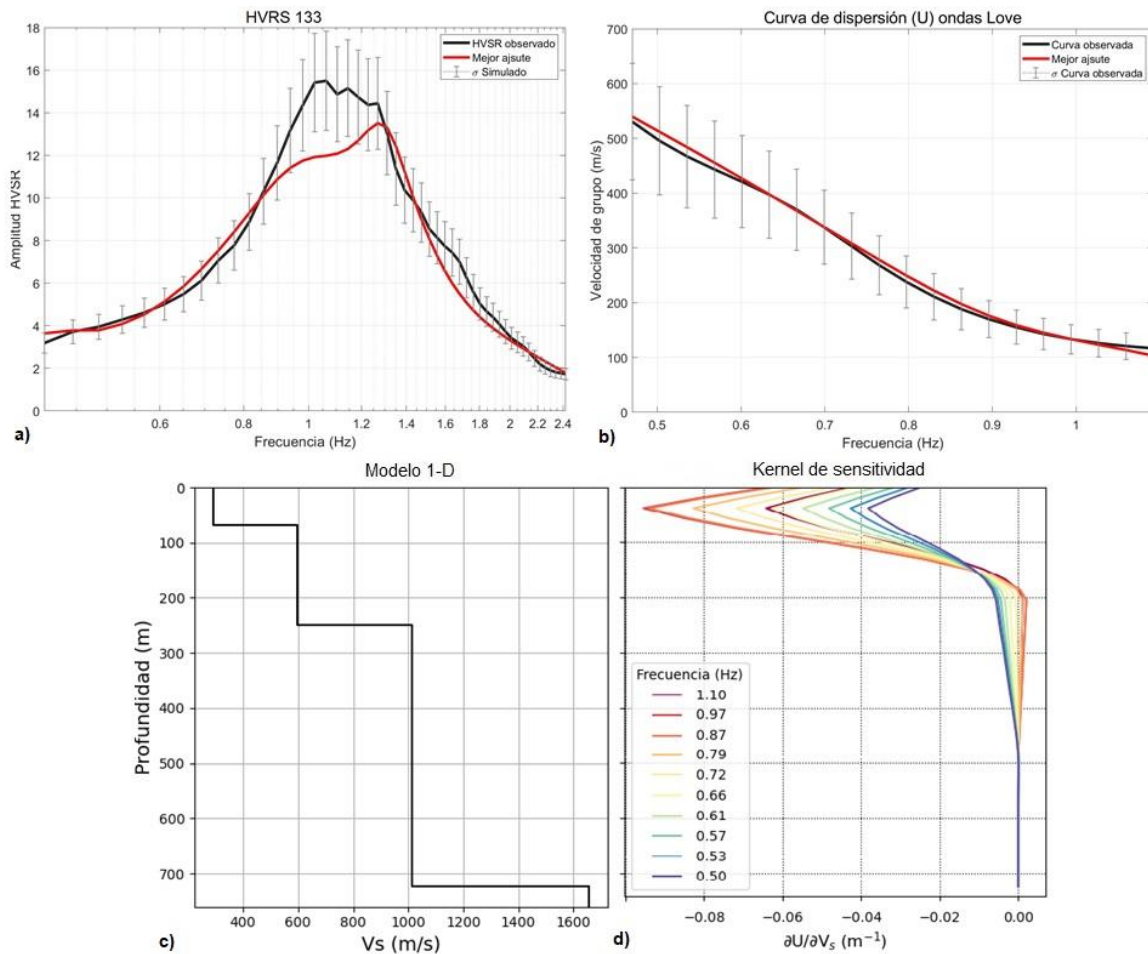


Figura AV_9. a) La línea negra representa el HVSR calculado en la estación CM133. La línea roja representa el mejor ajuste obtenido en la inversión. El error relativo fue del 9.63%. b) La línea negra representa la curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love recuperada a partir de la tomografía en la celda que contiene a la estación CM136, del arreglo A10. La línea roja representa el mejor ajuste obtenido. El error relativo fue del 3.06%. c) Modelo de velocidades obtenido de la inversión conjunta. d) Kernel de sensibilidad calculado para el modelo resultante en el rango de frecuencias donde fue observada la dispersión. La profundidad de investigación es de aprox. 450m.

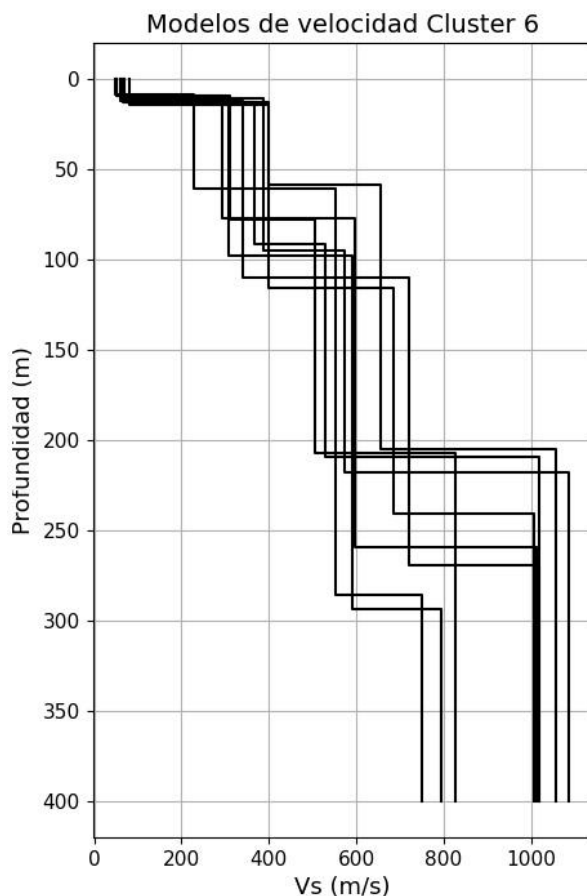


Figura AV_10. Modelos de velocidad de onda de corte 1-D obtenidos al invertir las curvas de dispersión contenidas en el clúster 6.

Clúster 7

En este clúster se agruparon HVSR que en conjunto presentaron grandes variaciones en el valor de sus frecuencias características estimadas, prueba de ello es el valor del índice Inter cuartil (IQR) y los percentiles 10 y 90 mostrados en la Tabla 3. Por este motivo se tomaron estrategias diferentes de inversión para los arreglos contenidos en este clúster, A17 y A18.

El arreglo A17 fue dividido en dos zonas, sur y norte. En la zona sur, en donde se agruparon frecuencias características de 0.9 Hz en promedio, se realizó una inversión conjunta entre el cociente espectral HVSR calculado en la estación CM275 y la curva de dispersión correspondiente, y se utilizó el modelo resultante como modelo inicial para invertir el resto de las curvas de esta zona. En la Figura AV_11 se muestra el ajuste obtenido en la inversión conjunta, así como los modelos obtenidos y el kernel de sensibilidad. En las celdas ubicadas en la zona norte, donde se agruparon frecuencias características entre 0.2 y 0.4 Hz, aquí se utilizó el modelo inicial obtenido de la inversión

conjunta en el clúster 10. En la Figura AV_12 se muestra un ejemplo del procedimiento llevado a cabo en la zona norte. En el arreglo A18 se decidió invertir todas las curvas de dispersión estimadas de manera conjunta con los cocientes espectrales correspondientes, en la Figura AV_13 se muestra un ejemplo del procedimiento.

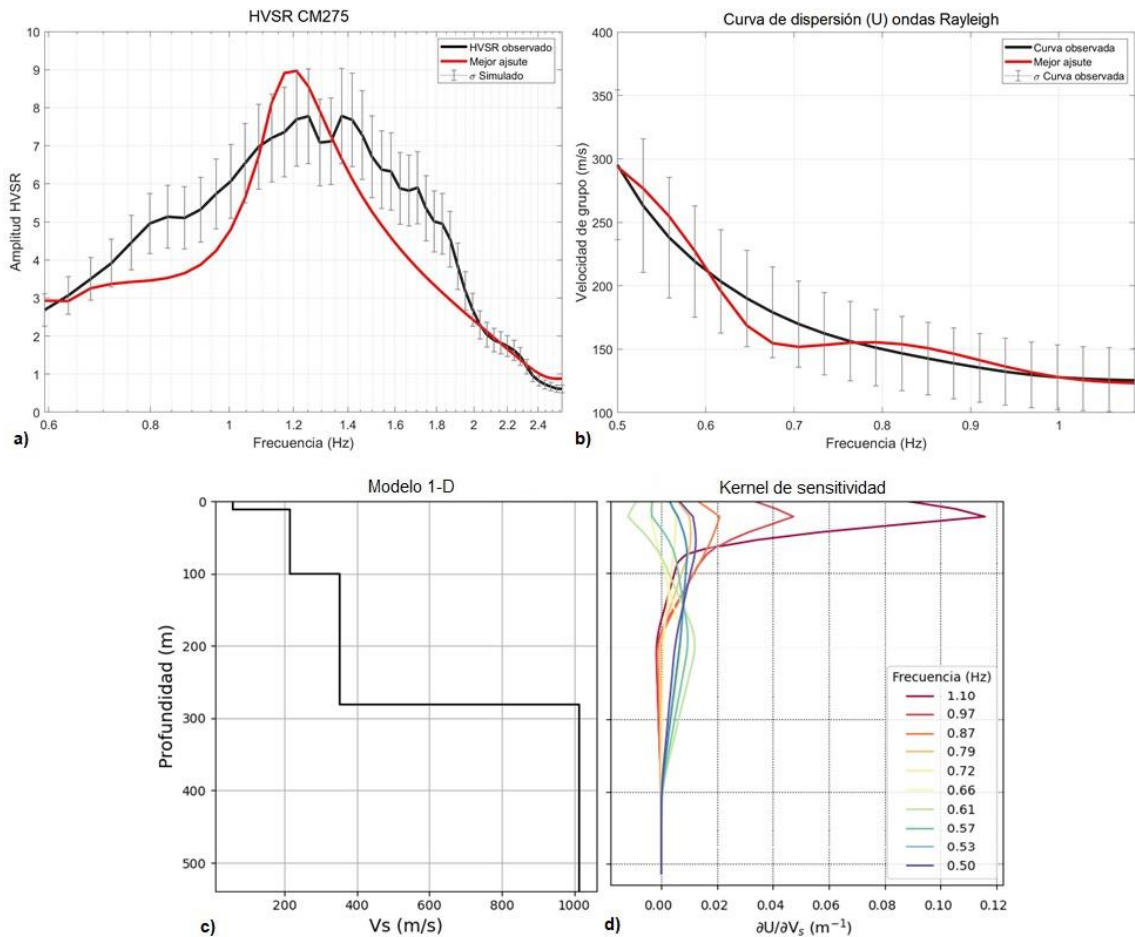


Figura AV_11. a) La línea negra representa el HVSR calculado en la estación CM275. La línea roja representa el mejor ajuste obtenido en la inversión. El error relativo fue del 19.39%. b) La línea negra representa la curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love recuperada a partir de la tomografía en la celda que contiene a la estación CM275 del arreglo A10. La línea roja representa el mejor ajuste obtenido. El error relativo fue del 4.48%. c) Modelo de velocidades obtenido de la inversión conjunta. d) Kernel de sensibilidad calculado para el modelo resultante en el rango de frecuencias donde fue observada la dispersión. La profundidad de investigación es de aprox. 400m. El modelo resultante fue utilizado para invertir las curvas de dispersión localizadas en la zona sur del arreglo A17.

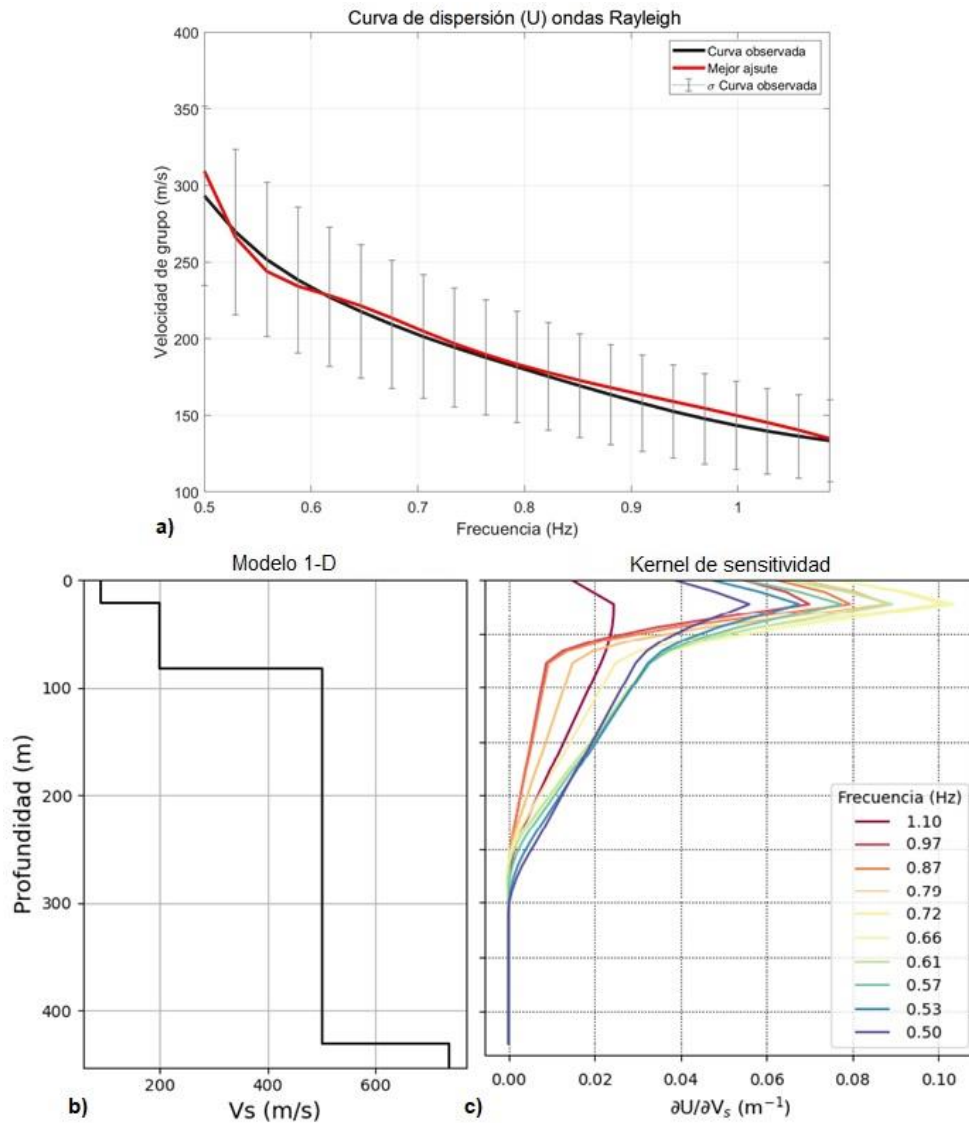


Figura AV_12. a) En negro, curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh estimada a partir de la tomografía de tiempos de viaje en una celda del arreglo A17. En rojo, mejor ajuste obtenido en la inversión. El error relativo fue 2.46%. b) Modelo de velocidad 1-D obtenido de la inversión a profundidad. c) Kernel de sensibilidad estimado del modelo resultante en el rango de frecuencias donde fue observada la dispersión. En este caso, se utilizó como modelo inicial el modelo resultante en la inversión conjunta del clúster 10.

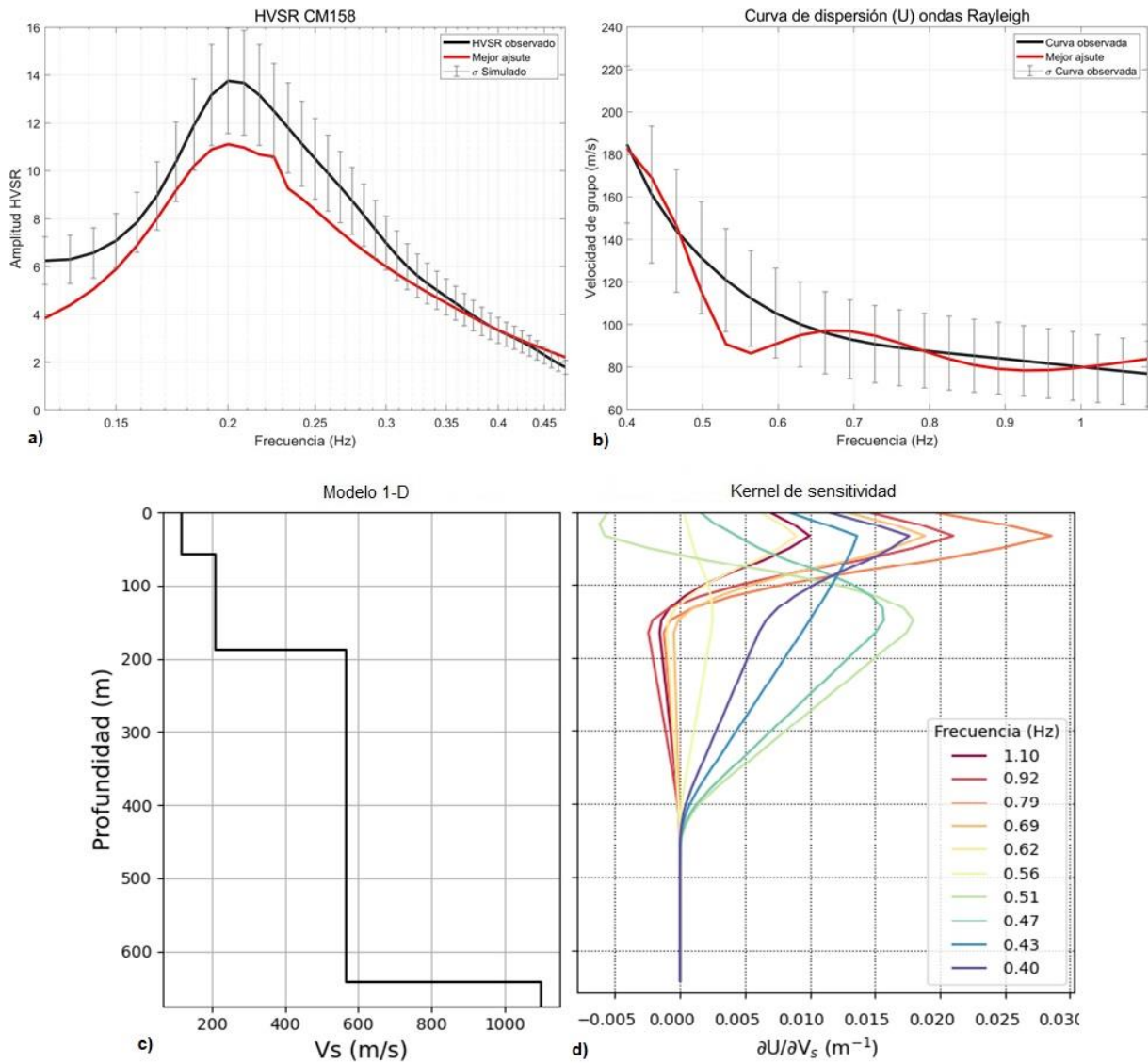


Figura AV_13. Ejemplo de inversión conjunta en el arreglo A18. a) La línea negra representa el HVSr calculado en la estación CM275. La línea roja representa el mejor ajuste obtenido en la inversión. El error relativo fue del 13.02%. b) La línea negra representa la curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love recuperada a partir de la tomografía en la celda que contiene a la estación CM275 del arreglo A10. La línea roja representa el mejor ajuste obtenido. El error relativo fue del 6.35%. c) Modelo de velocidades obtenido de la inversión conjunta. d) Kernel de sensibilidad calculado para el modelo resultante en el rango de frecuencias donde fue observada la dispersión. La profundidad de investigación es de aproximadamente 400m.

En este clúster se obtuvieron 23 modelos 1-D de velocidad de onda de corte que se pueden observar en la Figura AV_14. Los modelos obtenidos presentaron una gran variabilidad, como consecuencia

en los kernel de sensibilidad calculados se obtuvieron profundidades de investigación desde 200 m hasta más de 300 m, en la Figura AV_14 se considera la profundidad de investigación mínima.

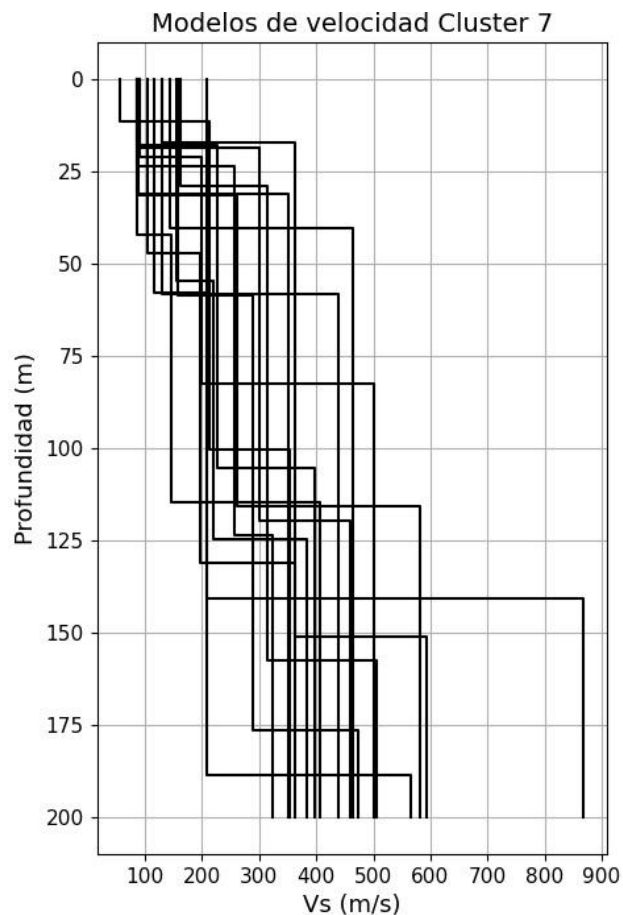


Figura AV_14. Modelos de velocidad de onda de corte 1-D obtenidos al invertir las curvas de dispersión contenidas en el clúster 7.

Clúster 4 y Arreglo A13

El Clúster 4 agrupó estaciones localizadas en la zona de transición al sur del clúster 10, principalmente estaciones del arreglo A4. También incluyó algunas estaciones pertenecientes a los arreglos A15, A16, A17, A18. Sin embargo, las celdas en donde se ubicaron estaban dominadas por estaciones pertenecientes a otro clúster, por lo que no fueron consideradas. En la inversión tomográfica llevada a cabo en el arreglo A4 fue necesario utilizar celdas grandes (1.8 km por lado), en comparación con el resto de los arreglos, ocasionando que en una misma celda se localicen hasta seis estaciones. Además, entre estaciones vecinas se observaron variaciones bruscas en la forma de

los cocientes espectrales HVSR y en las frecuencias características estimadas. Por estos motivos no se consideró conveniente hacer alguna inversión conjunta en este arreglo. Entonces, para darle continuidad a los modelos, estas curvas se invirtieron tomando como modelo inicial los modelos de velocidades estimados más cercanos, permitiendo variar los parámetros en rangos más amplios. En la Figura AV_15 se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos en una inversión.

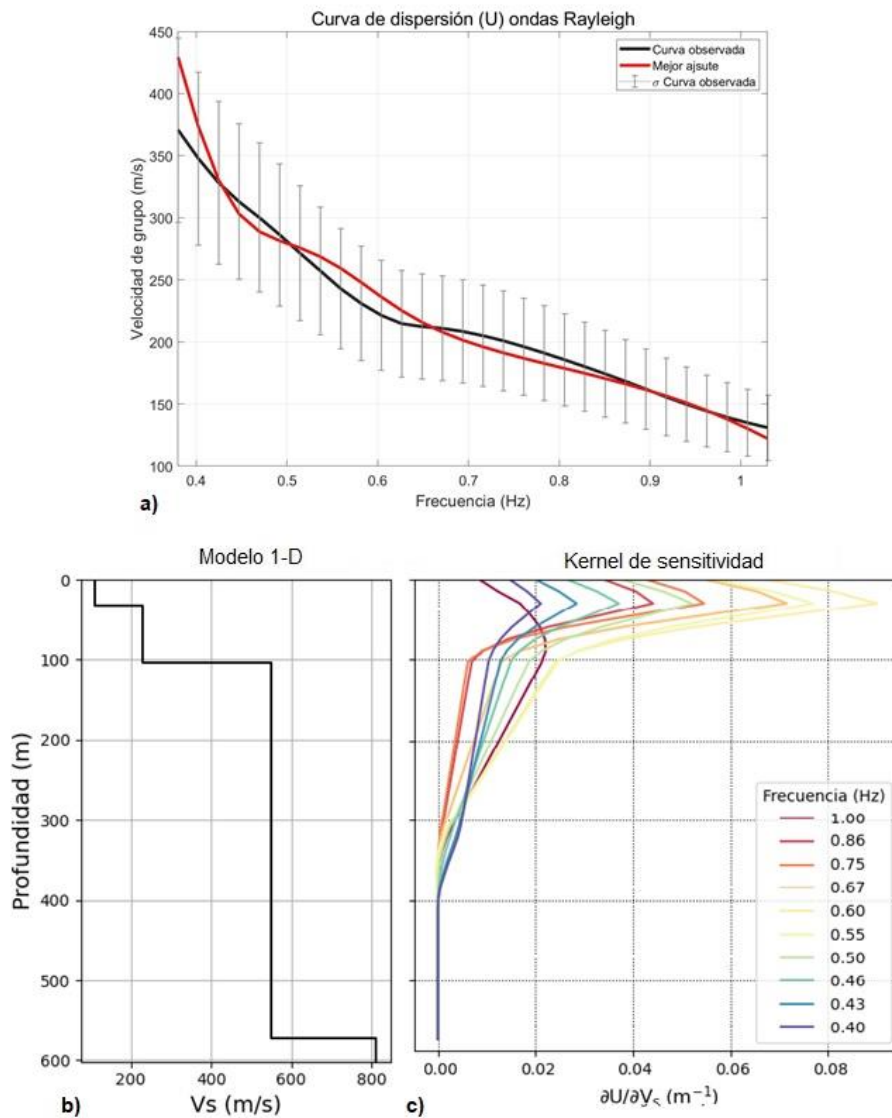


Figura AV_15. a) En negro, curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh estimada a partir de la tomografía de tiempos de viaje en una celda del arreglo A4. En rojo, mejor ajuste obtenido en la inversión. El error relativo fue 3.7383%. b) Modelo de velocidad 1-D obtenido de la inversión a profundidad. c) Kernel de sensibilidad estimado del modelo resultante en el rango de frecuencias donde fue observada la dispersión.

El arreglo A13 comprende la zona de transición localizada al norte de clúster 10. En la agrupación por clustering tres estaciones localizadas en la zona suroeste del arreglo se incluyeron en el clúster 10, las demás no fueron incluidas en ningún otro clúster. Los cocientes espectrales HVSR calculados en este arreglo presentaron formas irregulares, picos no claros y cambios bruscos en las frecuencias características estimadas. Por este motivo, se decidió seguir la estrategia empleada en el clúster 4 tomando como modelo inicial los modelos de velocidades estimados más cercanos. En la Figura AV_16 se muestran los resultados obtenidos al invertir una curva de dispersión. En total, en esta etapa se obtuvieron 25 modelos 1-D de velocidad de onda de corte que se muestran en la Figura AV_17.

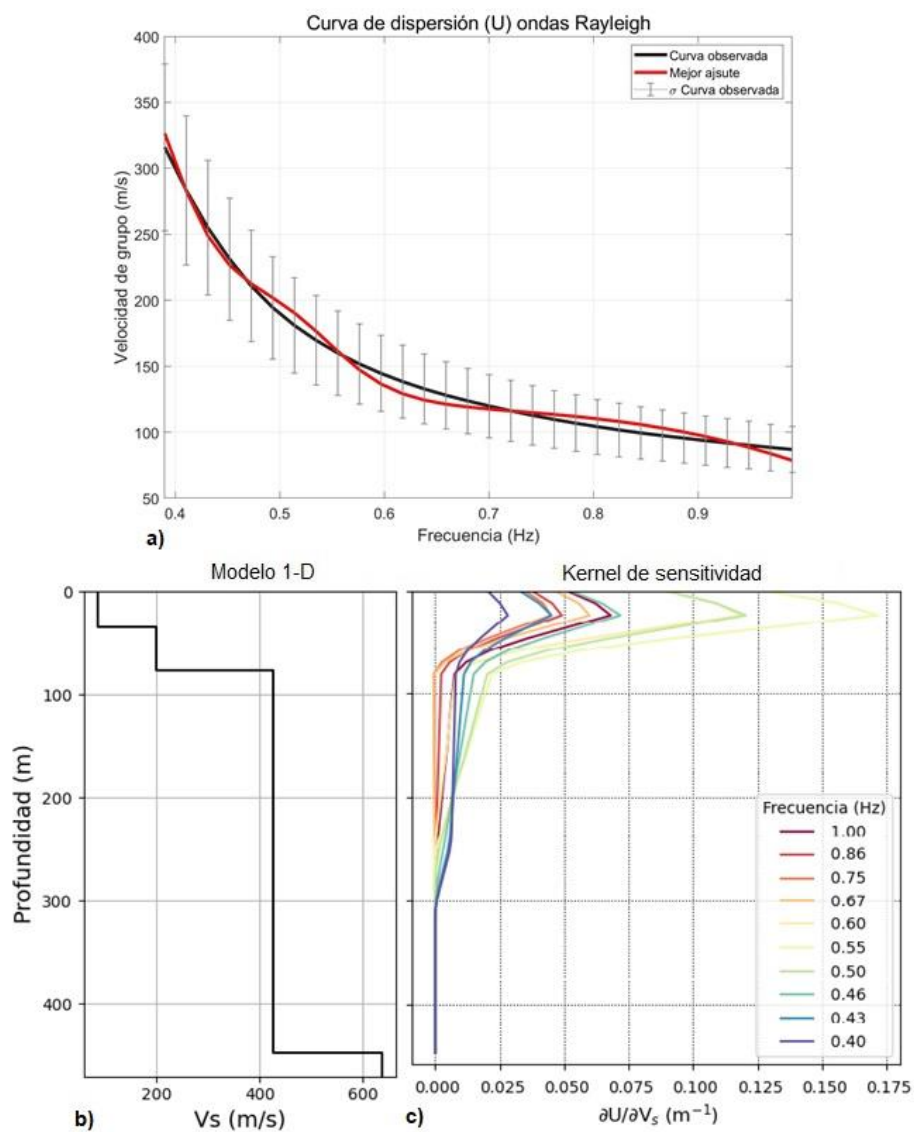


Figura AV_16. a) En negro, curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh estimada a partir de la tomografía de tiempos de viaje en una celda del arreglo A13. En rojo, mejor ajuste obtenido en la inversión. El error relativo fue 3.84%. b) Modelo de velocidad 1-D obtenido de la inversión a profundidad. c) Kernel de sensibilidad estimado del modelo resultante en el rango de frecuencias donde fue observada la dispersión.

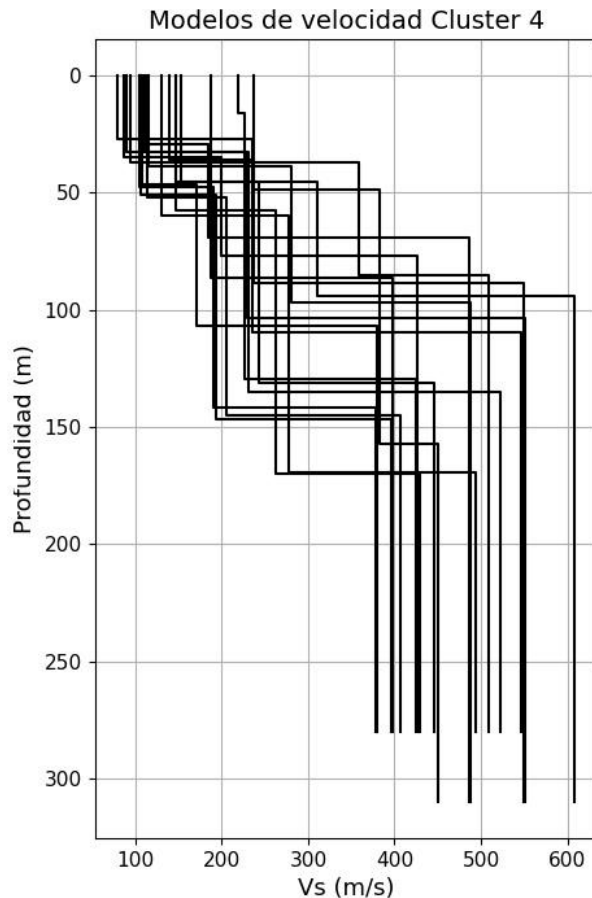


Figura AV_17. Modelos 1-D de velocidad de onda de corte estimados en el clúster4 y en el arreglo A13.

Clúster 1, 9 y Arreglo A20

Como se puede observar en la Tabla 4 y en la Figura 157 el clúster 9 está conformado por 9 estaciones consecutivas al clúster 1. Por la forma que se agruparon estas estaciones, las celdas en donde se encontraban existían estaciones pertenecientes al clúster 1, por este motivo los clústeres 1 y 9 fueron tratados como uno solo. Este clúster incluyó al arreglo A21 que se ubicó a aproximadamente 2 km del pozo Copilco-1, esto permitió proponer un modelo inicial basado en la descripción litológica del pozo hecha por González-Torres *et al.* (2015) y en las velocidades y

densidades reportadas por Pérez-Cruz (1986). Entonces se eligió la curva de dispersión estimada en la celda más cercana al pozo y el cociente espectral calculado en la estación CM356 (contenido en esta celda) para llevar a cabo la inversión conjunta.

En la Figura AV_18 se muestran los ajustes obtenidos y en la Figura AV_19 el modelo de velocidad estimado y su kernel de sensibilidad. En la Figura AV_20 se presenta un ejemplo del proceso de inversión de una curva de dispersión recuperada en el arreglo A22. Por otro lado, el arreglo A20 se localizó en zona de lomas según el mapa de zonificación geotécnica, los cocientes espectrales calculados en los registros del arreglo presentaron bajas amplitudes y frecuencias características no congruentes, por lo que no fueron consideradas en el análisis de clustering. Sin embargo, su ubicación a un lado del arreglo A21 permitió utilizar los modelos de velocidad estimados más cercanos como modelo inicial. En la Figura AV_21 se muestra el proceso de inversión para una curva de dispersión del arreglo A20. En esta etapa se invirtieron las curvas de dispersión pendientes en el arreglo A12 y todas las curvas estimadas en los arreglos A20, A21 y A22. En la Figura AV_22 se muestran los 37 modelos 1-D de velocidad estimados en este clúster a las profundidades de investigación según los kernels de sensibilidad.

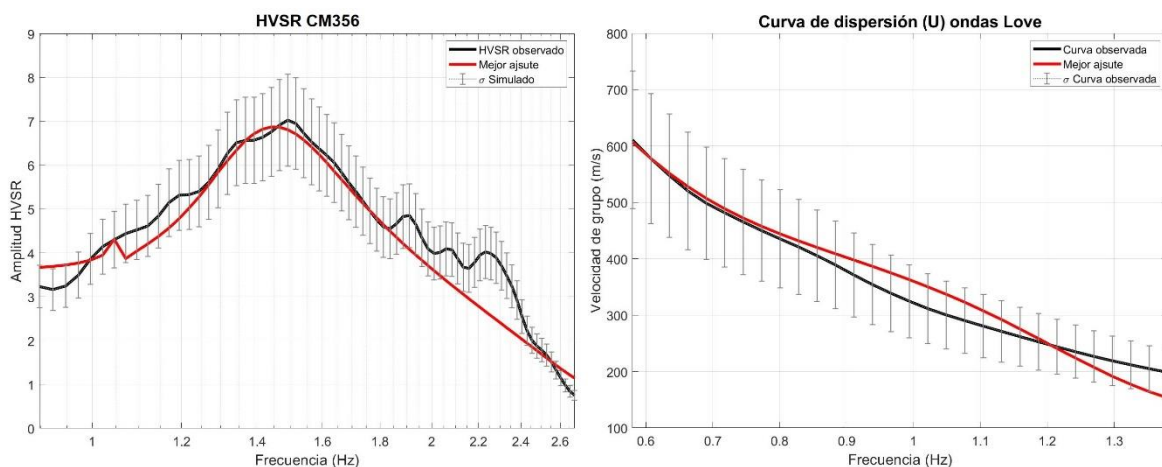


Figura AV_18. Izquierda. La línea negra representa el cociente espectral estimado en la estación CM356, la línea roja representa el mejor ajuste obtenido de la inversión. La desviación estándar simulada representa el 15% de variación de la amplitud del cociente HVSr, usado como parámetro en la inversión. El error relativo del mejor ajuste es de 11.79%. Derecha. La línea negra representa la curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love recuperada en la celda elegida del

arreglo A21, la línea roja representa el mejor ajuste obtenido de la inversión. En este caso, la desviación estándar simulada se refiere a la aleatoriedad (alrededor de $\pm 10\%$) observada en los tiempos de viaje en el proceso de inversión tomográfica. El error relativo del mejor ajuste fue de 6.9%.

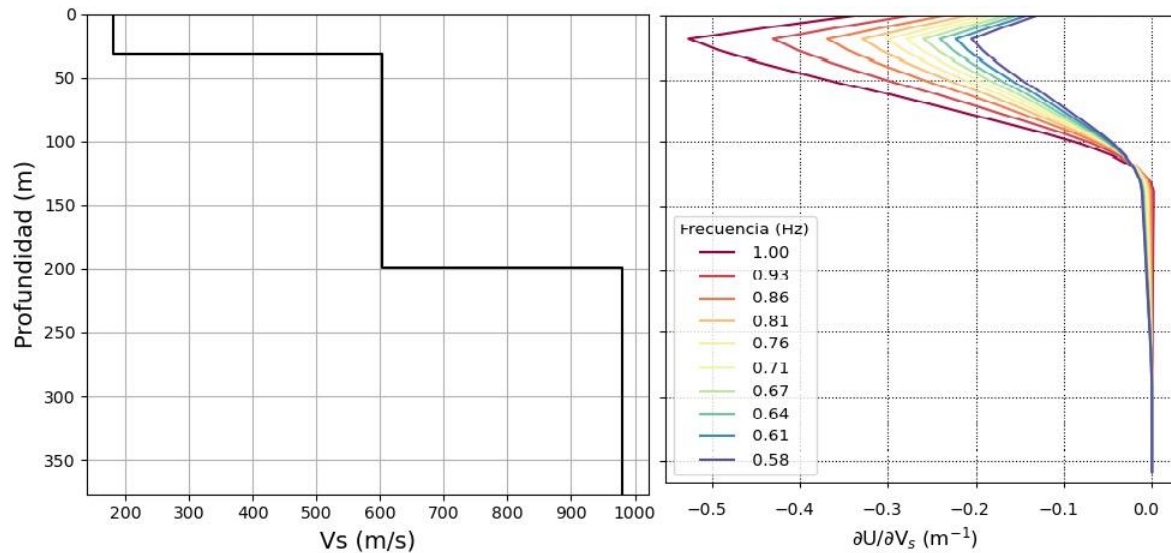


Figura AV_19. Izquierda. Modelo de velocidades obtenido de la inversión conjunta de los cocientes espectrales HVSr obtenidos en la estación CM356 y la curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love estimada con la inversión tomográfica en la misma celda que contiene esta estación en el arreglo A21, cuyos ajustes se muestran en la Figura AV_18. Derecha. Kernel de sensibilidad estimado dentro del rango de las frecuencias donde fue recuperada la curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love.

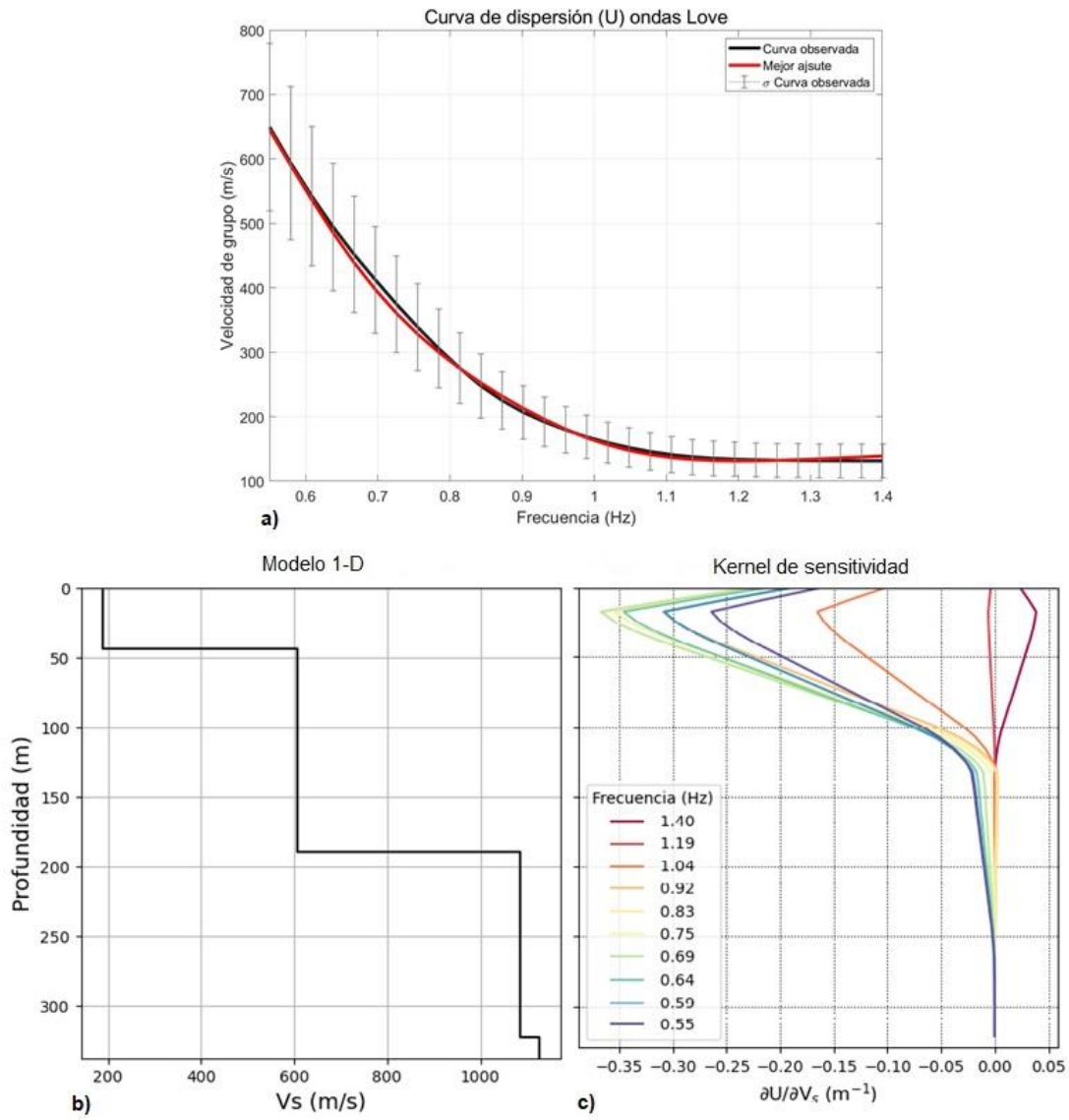


Figura AV_20. a) En negro, curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love estimada a partir de la tomografía de tiempos de viaje en una celda del arreglo A22. En rojo, mejor ajuste obtenido en la inversión. El error relativo fue 1.21%. b) Modelo de velocidad 1-D obtenido de la inversión a profundidad. c) Kernel de sensibilidad estimado del modelo resultante en el rango de frecuencias donde fue observada la dispersión.

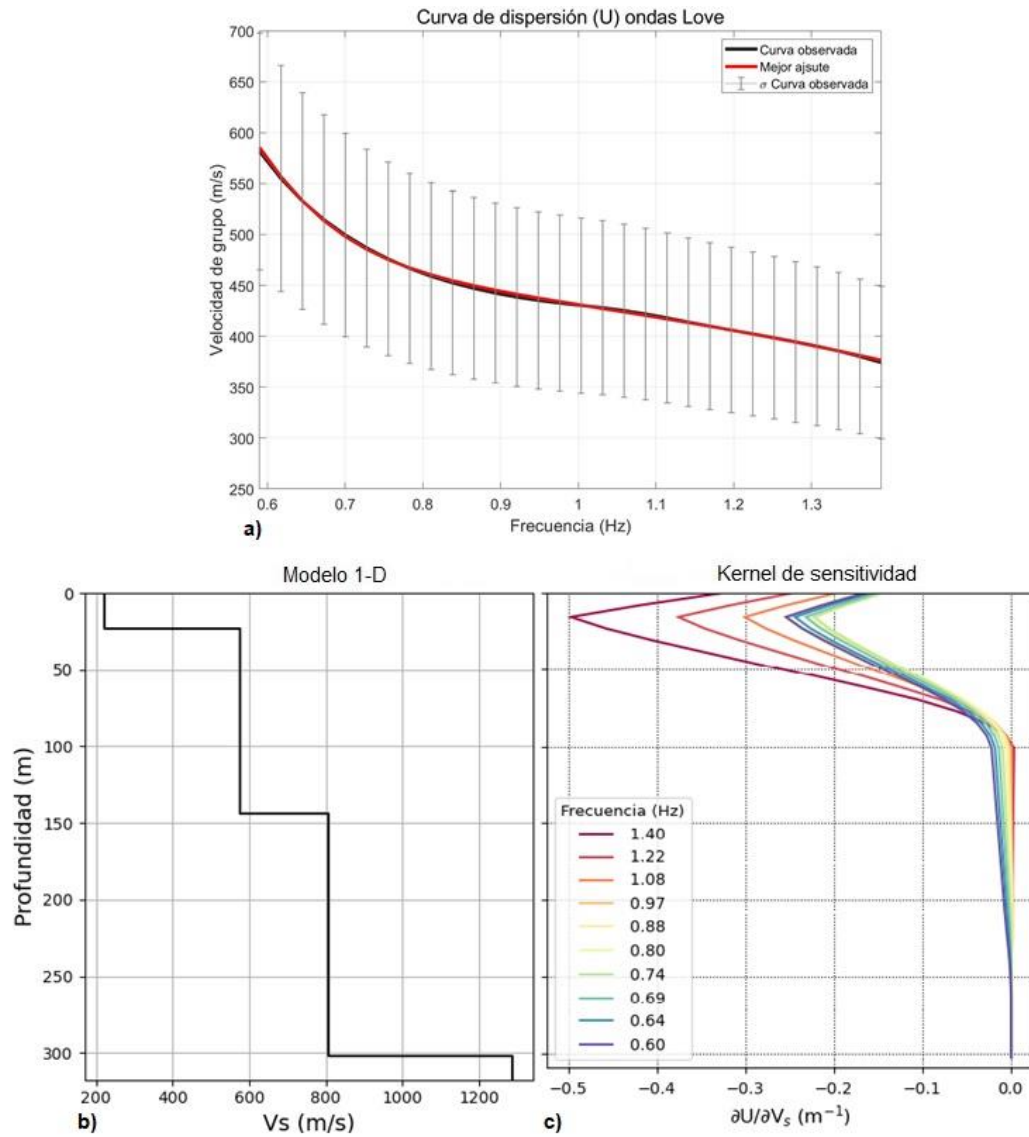


Figura AV_21. a) En negro, curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love estimada a partir de la tomografía de tiempos de viaje en una celda del arreglo A20. En rojo, mejor ajuste obtenido en la inversión. El error relativo fue 1.98%. b) Modelo de velocidad 1-D obtenido de la inversión a profundidad. c) Kernel de sensibilidad estimado del modelo resultante en el rango de frecuencias donde fue observada la dispersión.

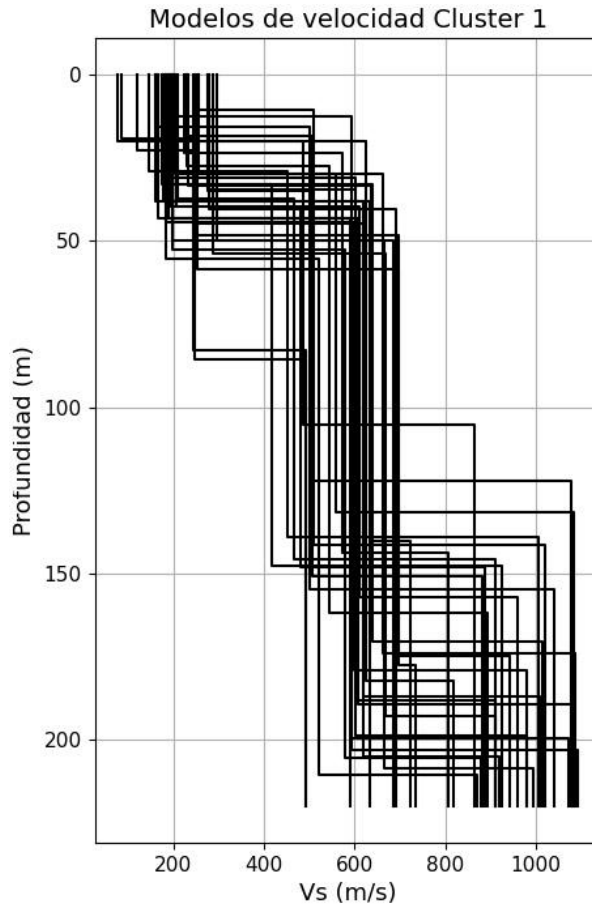


Figura AV_22. Modelos 1-D de velocidad de onda de corte obtenidos al invertir las curvas de dispersión contenidas en el clúster 1, 9 y en el arreglo A20.

Clúster 3

Debido a la distancia con los demás arreglos, en este clúster se agruparon todas las estaciones del arreglo A1. Las frecuencias características en este arreglo se pueden considerar homogéneas por lo que solo fue realizada una inversión conjunta utilizando el cociente espectral calculado en la estación CM007 y la curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh estimada en la celda que contiene esa estación. En la Figura AV_23 se muestran los mejores ajustes obtenidos en la inversión conjunta, mientras que en la Figura AV_24 se presenta el modelo resultante y el kernel de sensibilidad calculado. El modelo resultante fue utilizado como modelo inicial al invertir las curvas de dispersión restantes en el arreglo, un ejemplo del procedimiento con otra curva se muestra en la Figura AV_25. Por último, en la Figura AV_26 se pueden observar los 12 modelos 1-D estimados en este clúster.

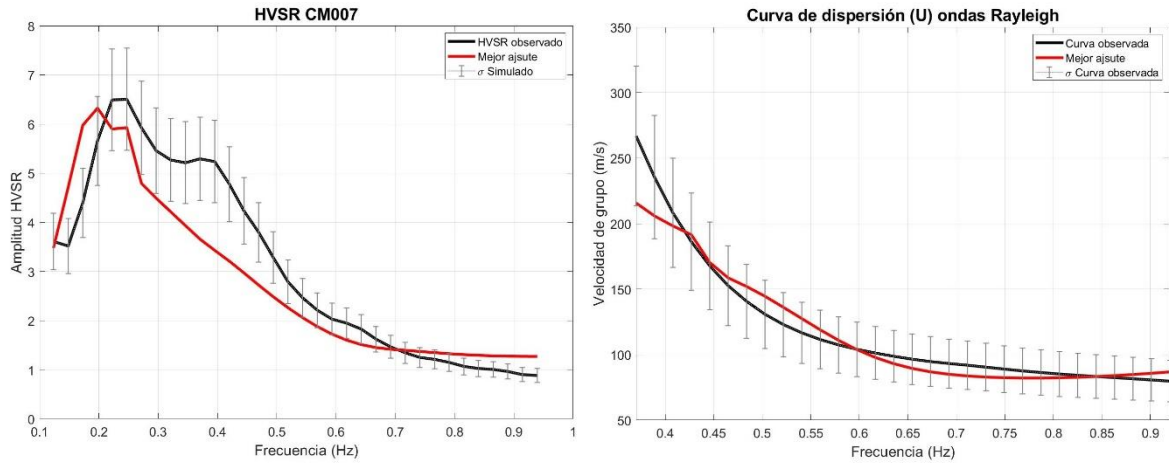


Figura AV_23. Izquierda. La línea negra representa el cociente espectral estimado en la estación CM007, la línea roja representa el mejor ajuste obtenido de la inversión. El error relativo del mejor ajuste es de 21%. Derecha. La línea negra representa la curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love recuperada en la celda elegida del arreglo A1, la línea roja representa el mejor ajuste obtenido de la inversión. En este caso, la desviación estándar simulada se refiere a la aleatoriedad (alrededor del $\pm 10\%$) observada en los tiempos de viaje en el proceso de inversión tomográfica. El error relativo del mejor ajuste fue de 6.3%.

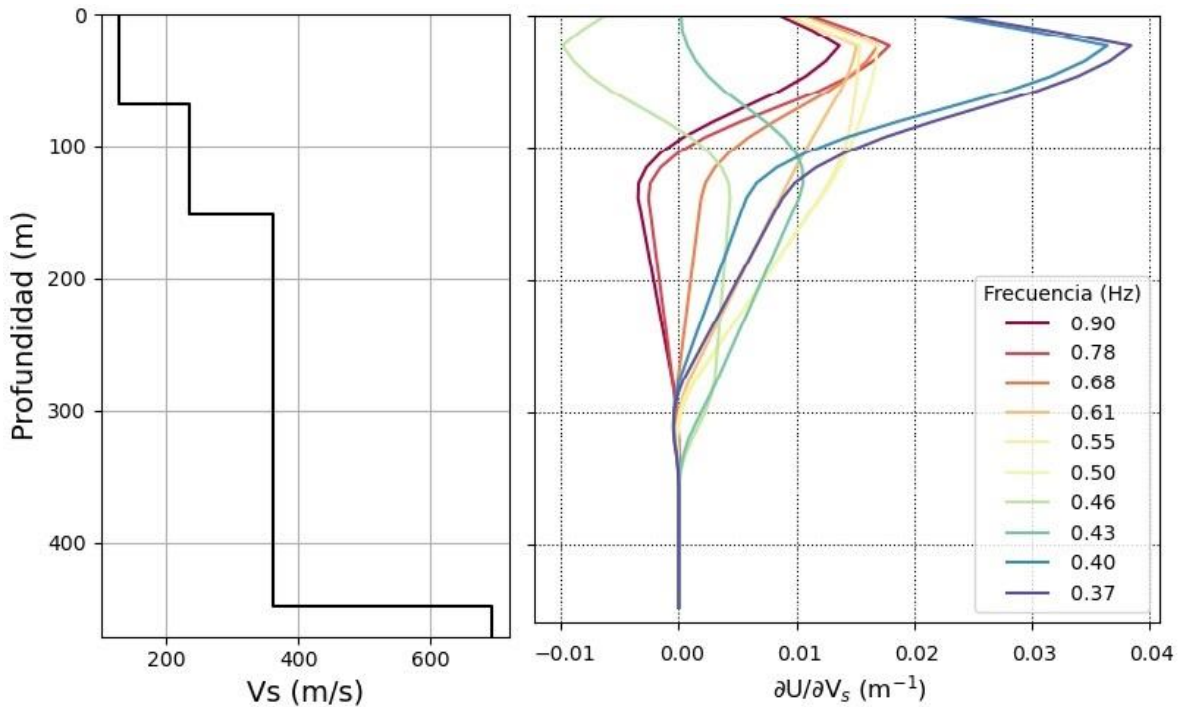


Figura AV_24. Izquierda. Modelo de velocidades obtenido de la inversión conjunta de los cocientes espectrales HVSR obtenidos en la estación CM007 y la curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love estimada con la inversión tomográfica en la misma celda que contiene esta estación en el arreglo A1, cuyos ajustes se muestran en la Figura AV_23. Derecha. Kernel de sensibilidad estimado dentro del rango de las frecuencias donde fue recuperada la curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love.

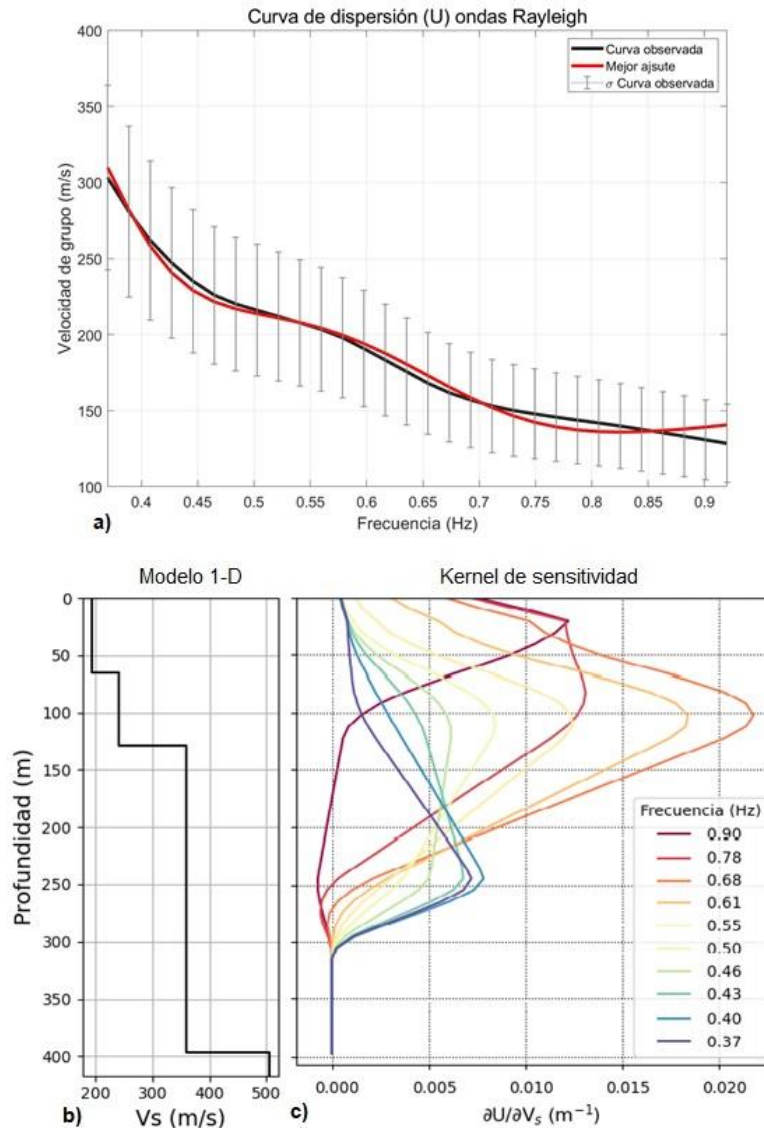


Figura AV_25. a) En negro, curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas Love estimada a partir de la tomografía de tiempos de viaje en una celda del arreglo A20. En rojo, mejor ajuste obtenido en la inversión. El error relativo fue 2.42%. b) Modelo de velocidad 1-D obtenido de la

inversión a profundidad. c) Kernel de sensibilidad estimado del modelo resultante en el rango de frecuencias donde fue observada la dispersión.

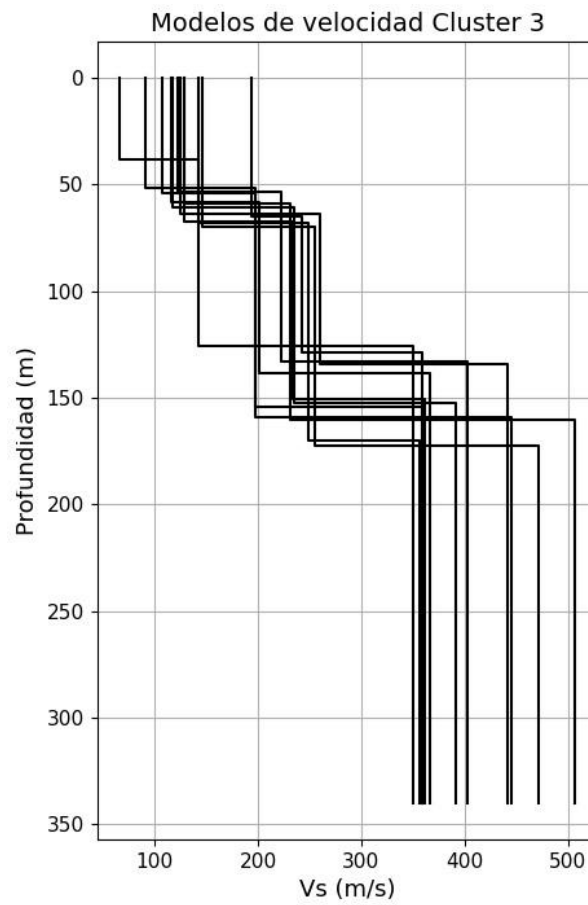


Figura AV_26. Modelos de velocidad 1-D estimados en el clúster 3.

Anexo VI. Frecuencias características estimadas por estación

| Estación | X (UTM) | Y (UTM) | f0 | Arreglo |
|----------|---------|---------|-------|---------|
| CM001 | 504728 | 2123721 | 1.375 | A1 |
| CM002 | 504708 | 2124577 | 0.425 | A1 |
| CM003 | 504370 | 2124913 | 0.292 | A1 |
| CM004 | 504447 | 2124293 | 0.325 | A1 |
| CM005 | 503866 | 2124785 | 1.008 | A1 |
| CM006 | 503738 | 2124125 | 1.192 | A1 |
| CM007 | 503919 | 2125490 | 0.242 | A1 |
| CM008 | 503824 | 2126171 | 0.217 | A1 |
| CM009 | 503763 | 2125742 | 0.258 | A1 |
| CM010 | 503258 | 2125772 | 0.258 | A1 |
| CM011 | 503345 | 2125294 | 0.533 | A1 |
| CM012 | 502788 | 2124737 | 0.225 | A1 |
| CM013 | 503010 | 2124154 | 0.275 | A1 |
| CM014 | 502656 | 2125012 | 0.250 | A1 |
| CM015 | 502354 | 2125406 | 0.258 | A1 |
| CM016 | 502202 | 2124631 | 0.100 | A1 |
| CM017 | 501852 | 2125090 | 0.242 | A1 |
| CM018 | 501194 | 2125199 | 0.233 | A1 |
| CM019 | 501381 | 2125912 | 0.217 | A2 |
| CM020 | 501656 | 2126371 | 0.208 | A2 |
| CM021 | 500661 | 2126868 | 0.225 | A2 |
| CM022 | 500050 | 2127641 | 0.242 | A2 |
| CM023 | 499316 | 2128495 | 0.242 | A2 |
| CM024 | 498911 | 2128123 | 2.200 | A2 |
| CM025 | 498489 | 2128508 | 0.208 | A2 |
| CM026 | 499199 | 2129045 | 0.517 | A2 |
| CM027 | 499558 | 2129409 | 0.350 | A2 |
| CM028 | 499565 | 2129895 | 0.192 | A2 |
| CM029 | 499556 | 2130566 | 0.183 | A2 |
| CM030 | 498452 | 2129787 | 0.200 | A2 |
| CM031 | 498128 | 2129111 | 0.217 | A2 |
| CM032 | 497814 | 2129290 | 0.200 | A2 |
| CM033 | 498275 | 2129598 | 0.192 | A2 |
| CM034 | 497159 | 2129997 | 0.208 | A2 |
| CM035 | 497277 | 2129474 | 0.217 | A2 |
| CM036 | 496117 | 2129358 | 2.442 | A2 |
| CM037 | 498657 | 2132583 | 0.175 | A3 |

| | | | | |
|-------|--------|---------|-------|----|
| CM038 | 499908 | 2131677 | 0.100 | A3 |
| CM039 | 500254 | 2133104 | 1.733 | A3 |
| CM040 | 499473 | 2132763 | 0.642 | A3 |
| CM041 | 498915 | 2132685 | 0.183 | A3 |
| CM042 | 499739 | 2133495 | 1.292 | A3 |
| CM043 | 502989 | 2134792 | 1.100 | A3 |
| CM044 | 503337 | 2134866 | 0.192 | A3 |
| CM045 | 503938 | 2134889 | 0.183 | A3 |
| CM046 | 503586 | 2135158 | 0.200 | A3 |
| CM047 | 503224 | 2135132 | 0.192 | A3 |
| CM048 | 503314 | 2135499 | 3.350 | A3 |
| CM049 | 498639 | 2132773 | 0.492 | A3 |
| CM050 | 498520 | 2133448 | 3.517 | A3 |
| CM051 | 498314 | 2133233 | 0.183 | A3 |
| CM052 | 498470 | 2133975 | 0.192 | A3 |
| CM053 | 497917 | 2133891 | 2.358 | A3 |
| CM054 | 497706 | 2133549 | 0.183 | A3 |
| CM055 | 494892 | 2129079 | 2.433 | A4 |
| CM056 | 494600 | 2128730 | 0.175 | A4 |
| CM057 | 494056 | 2128765 | 1.292 | A4 |
| CM058 | 493766 | 2128373 | 3.083 | A4 |
| CM059 | 493547 | 2128969 | 1.667 | A4 |
| CM060 | 493143 | 2129306 | 2.600 | A4 |
| CM061 | 492617 | 2129061 | 1.033 | A4 |
| CM062 | 491961 | 2128743 | 0.442 | A4 |
| CM063 | 491717 | 2128408 | 0.442 | A4 |
| CM064 | 491210 | 2128015 | 0.742 | A4 |
| CM065 | 491445 | 2128877 | 0.392 | A4 |
| CM066 | 491607 | 2129447 | 0.250 | A4 |
| CM068 | 490897 | 2128541 | 0.458 | A4 |
| CM069 | 490394 | 2128609 | 0.450 | A4 |
| CM070 | 489817 | 2128517 | 0.200 | A4 |
| CM071 | 490516 | 2128370 | 0.500 | A4 |
| CM072 | 490357 | 2128087 | 0.633 | A4 |
| CM073 | 490298 | 2128796 | 0.400 | A5 |
| CM074 | 489775 | 2128713 | 0.392 | A5 |
| CM075 | 489588 | 2128596 | 1.183 | A5 |
| CM076 | 489060 | 2128771 | 0.467 | A5 |
| CM077 | 489655 | 2128924 | 0.408 | A5 |
| CM078 | 489319 | 2128989 | 0.392 | A5 |
| CM079 | 489555 | 2129195 | 0.300 | A5 |

| | | | | |
|-------|--------|---------|-------|----|
| CM080 | 488715 | 2129226 | 0.475 | A5 |
| CM081 | 489160 | 2129503 | 0.308 | A5 |
| CM082 | 489317 | 2129643 | 0.317 | A5 |
| CM083 | 488392 | 2129409 | 0.492 | A5 |
| CM084 | 488671 | 2129737 | 0.358 | A5 |
| CM085 | 488897 | 2130001 | 0.317 | A5 |
| CM086 | 488480 | 2130092 | 0.417 | A5 |
| CM087 | 489181 | 2130380 | 0.283 | A5 |
| CM088 | 488891 | 2130330 | 0.308 | A5 |
| CM089 | 488119 | 2130085 | 0.475 | A5 |
| CM090 | 488307 | 2130517 | 0.425 | A5 |
| CM181 | 492656 | 2130441 | 0.200 | A6 |
| CM182 | 492201 | 2130221 | 0.225 | A6 |
| CM183 | 492323 | 2129956 | 0.192 | A6 |
| CM184 | 492565 | 2129506 | 0.842 | A6 |
| CM185 | 493435 | 2129496 | 1.383 | A6 |
| CM186 | 493633 | 2130137 | 0.192 | A6 |
| CM187 | 494086 | 2129162 | 0.825 | A6 |
| CM188 | 494856 | 2129381 | 0.808 | A6 |
| CM189 | 495520 | 2129399 | 1.150 | A6 |
| CM190 | 496126 | 2130473 | 0.158 | A6 |
| CM191 | 495610 | 2131024 | 0.175 | A6 |
| CM192 | 495217 | 2131008 | 0.167 | A6 |
| CM193 | 493802 | 2131558 | 0.183 | A6 |
| CM194 | 492026 | 2131737 | 0.225 | A6 |
| CM195 | 492663 | 2132185 | 0.225 | A6 |
| CM196 | 491084 | 2133066 | 0.283 | A7 |
| CM197 | 491517 | 2132980 | 0.267 | A7 |
| CM198 | 490817 | 2132726 | 0.292 | A7 |
| CM199 | 490932 | 2133421 | 0.308 | A7 |
| CM200 | 491341 | 2132557 | 0.267 | A7 |
| CM201 | 491447 | 2132231 | 0.275 | A7 |
| CM091 | 491980 | 2132639 | 0.233 | A8 |
| CM092 | 491020 | 2133877 | 0.317 | A8 |
| CM094 | 490149 | 2133919 | 0.350 | A8 |
| CM095 | 490308 | 2132132 | 0.283 | A8 |
| CM096 | 491364 | 2131481 | 0.233 | A8 |
| CM097 | 489222 | 2132912 | 0.408 | A8 |
| CM098 | 489190 | 2132292 | 0.342 | A8 |
| CM099 | 489119 | 2131074 | 0.300 | A8 |
| CM100 | 490155 | 2131167 | 0.250 | A8 |

| | | | | |
|-------|--------|---------|-------|-----|
| CM101 | 491008 | 2131187 | 0.242 | A8 |
| CM102 | 489876 | 2130029 | 0.250 | A8 |
| CM103 | 489927 | 2129092 | 0.325 | A8 |
| CM104 | 490519 | 2130131 | 0.233 | A8 |
| CM105 | 491375 | 2130446 | 0.217 | A8 |
| CM106 | 491085 | 2129694 | 0.250 | A8 |
| CM107 | 490556 | 2129418 | 0.250 | A8 |
| CM108 | 490995 | 2129014 | 0.225 | A8 |
| CM109 | 488489 | 2130686 | 0.383 | A9 |
| CM110 | 488401 | 2130872 | 0.400 | A9 |
| CM111 | 487625 | 2130341 | 0.600 | A9 |
| CM112 | 487887 | 2130666 | 0.533 | A9 |
| CM113 | 488025 | 2131148 | 0.450 | A9 |
| CM114 | 487634 | 2131490 | 0.525 | A9 |
| CM116 | 488700 | 2131848 | 0.358 | A9 |
| CM117 | 487940 | 2131488 | 0.442 | A9 |
| CM118 | 488366 | 2131998 | 0.433 | A9 |
| CM119 | 487395 | 2131868 | 0.600 | A9 |
| CM120 | 487847 | 2132613 | 0.625 | A9 |
| CM121 | 486462 | 2130981 | 0.758 | A9 |
| CM122 | 487091 | 2130665 | 0.667 | A9 |
| CM123 | 487269 | 2131000 | 0.583 | A9 |
| CM124 | 486603 | 2131426 | 0.708 | A9 |
| CM125 | 487003 | 2132121 | 0.717 | A9 |
| CM126 | 485924 | 2132004 | 0.958 | A9 |
| CM127 | 487780 | 2133391 | 0.675 | A10 |
| CM128 | 487272 | 2133178 | 0.733 | A10 |
| CM129 | 486918 | 2132651 | 0.817 | A10 |
| CM130 | 486427 | 2133130 | 1.150 | A10 |
| CM131 | 486986 | 2133756 | 0.867 | A10 |
| CM132 | 487679 | 2133814 | 0.725 | A10 |
| CM133 | 485766 | 2133116 | 1.058 | A10 |
| CM134 | 486042 | 2132603 | 0.917 | A10 |
| CM135 | 485297 | 2132251 | 0.933 | A10 |
| CM136 | 485411 | 2132841 | 0.975 | A10 |
| CM137 | 484985 | 2132940 | 1.175 | A10 |
| CM138 | 485211 | 2133471 | 1.242 | A10 |
| CM139 | 485332 | 2133723 | 1.267 | A10 |
| CM140 | 485303 | 2134348 | 1.267 | A10 |
| CM141 | 485929 | 2134848 | 1.075 | A10 |
| CM142 | 486060 | 2134258 | 1.125 | A10 |

| | | | | |
|-------|--------|---------|-------|-----|
| CM143 | 486725 | 2134026 | 0.967 | A10 |
| CM144 | 486412 | 2133789 | 0.942 | A10 |
| CM145 | 488236 | 2133542 | 0.583 | A11 |
| CM146 | 489063 | 2133400 | 0.433 | A11 |
| CM147 | 488546 | 2134231 | 0.558 | A11 |
| CM148 | 489214 | 2134040 | 0.417 | A11 |
| CM149 | 489240 | 2134847 | 0.433 | A11 |
| CM150 | 488667 | 2133912 | 0.500 | A11 |
| CM151 | 488277 | 2133915 | 0.650 | A11 |
| CM152 | 488366 | 2134438 | 0.617 | A11 |
| CM154 | 487911 | 2134925 | 0.708 | A11 |
| CM155 | 488334 | 2135034 | 0.625 | A11 |
| CM156 | 488793 | 2134776 | 0.500 | A11 |
| CM157 | 489033 | 2135219 | 0.550 | A11 |
| CM158 | 488481 | 2135156 | 0.633 | A11 |
| CM159 | 489085 | 2135792 | 0.625 | A11 |
| CM160 | 489408 | 2136230 | 0.800 | A11 |
| CM161 | 488901 | 2135916 | 0.650 | A11 |
| CM163 | 485898 | 2136877 | 0.933 | A12 |
| CM164 | 487310 | 2136365 | 0.767 | A12 |
| CM165 | 486658 | 2136612 | 0.975 | A12 |
| CM166 | 487441 | 2136242 | 0.792 | A12 |
| CM167 | 488584 | 2136262 | 0.758 | A12 |
| CM168 | 487820 | 2135584 | 0.708 | A12 |
| CM169 | 487168 | 2134539 | 0.967 | A12 |
| CM170 | 486518 | 2134726 | 0.992 | A12 |
| CM171 | 486779 | 2135189 | 0.942 | A12 |
| CM172 | 486104 | 2135445 | 0.975 | A12 |
| CM173 | 486615 | 2135545 | 0.908 | A12 |
| CM174 | 487688 | 2135864 | 0.692 | A12 |
| CM175 | 486652 | 2136203 | 0.858 | A12 |
| CM176 | 486104 | 2136173 | 1.008 | A12 |
| CM177 | 485805 | 2136003 | 1.100 | A12 |
| CM178 | 485302 | 2135467 | 1.217 | A12 |
| CM179 | 485255 | 2136079 | 1.183 | A12 |
| CM180 | 485557 | 2136512 | 1.175 | A12 |
| CM202 | 497022 | 2133374 | 0.408 | A13 |
| CM203 | 496812 | 2133751 | 0.550 | A13 |
| CM205 | 496477 | 2133871 | 2.975 | A13 |
| CM207 | 495901 | 2133164 | 0.475 | A13 |
| CM208 | 495112 | 2133148 | 0.492 | A13 |

| | | | | |
|-------|--------|---------|-------|-----|
| CM209 | 494977 | 2133576 | 0.383 | A13 |
| CM210 | 494459 | 2133789 | 0.550 | A13 |
| CM211 | 494227 | 2134012 | 0.192 | A13 |
| CM212 | 495250 | 2134267 | 0.200 | A13 |
| CM213 | 494722 | 2134490 | 0.800 | A13 |
| CM214 | 494456 | 2135021 | 2.808 | A13 |
| CM215 | 495008 | 2135258 | 4.600 | A13 |
| CM216 | 495388 | 2135194 | 4.108 | A13 |
| CM217 | 496054 | 2135345 | 1.392 | A13 |
| CM218 | 496637 | 2134793 | 2.508 | A13 |
| CM219 | 495999 | 2134421 | 1.892 | A13 |
| CM220 | 494660 | 2131628 | 0.200 | A14 |
| CM221 | 494150 | 2132142 | 0.192 | A14 |
| CM222 | 494732 | 2132008 | 0.250 | A14 |
| CM223 | 495776 | 2132145 | 0.183 | A14 |
| CM224 | 495068 | 2132653 | 0.192 | A14 |
| CM225 | 494397 | 2132950 | 0.742 | A14 |
| CM226 | 494565 | 2133215 | 0.200 | A14 |
| CM227 | 494123 | 2133713 | 1.117 | A14 |
| CM228 | 493769 | 2133883 | 1.000 | A14 |
| CM229 | 493310 | 2134376 | 0.200 | A14 |
| CM230 | 493517 | 2133626 | 3.150 | A14 |
| CM231 | 493896 | 2133379 | 1.158 | A14 |
| CM232 | 493707 | 2132566 | 0.217 | A14 |
| CM233 | 493808 | 2131992 | 0.167 | A14 |
| CM234 | 492869 | 2132373 | 0.217 | A14 |
| CM235 | 493137 | 2133034 | 0.175 | A14 |
| CM236 | 492375 | 2133232 | 0.283 | A14 |
| CM237 | 492618 | 2133557 | 0.275 | A14 |
| CM238 | 491837 | 2133982 | 0.317 | A15 |
| CM239 | 491333 | 2134405 | 0.342 | A15 |
| CM240 | 491475 | 2134911 | 0.392 | A15 |
| CM241 | 492092 | 2134857 | 0.333 | A15 |
| CM242 | 492350 | 2134287 | 0.317 | A15 |
| CM244 | 493024 | 2134624 | 2.192 | A15 |
| CM245 | 492524 | 2135086 | 0.358 | A15 |
| CM246 | 491991 | 2135444 | 0.375 | A15 |
| CM247 | 492495 | 2135870 | 0.583 | A15 |
| CM248 | 493085 | 2135608 | 3.575 | A15 |
| CM249 | 493809 | 2135582 | 0.100 | A15 |
| CM250 | 492877 | 2135999 | 1.442 | A15 |

| | | | | |
|-------|--------|---------|-------|-----|
| CM251 | 493412 | 2136344 | 4.883 | A15 |
| CM252 | 493499 | 2136830 | 0.192 | A15 |
| CM253 | 493917 | 2137274 | 0.433 | A15 |
| CM254 | 493654 | 2137590 | 0.475 | A15 |
| CM255 | 493310 | 2137525 | 0.517 | A15 |
| CM256 | 490760 | 2134754 | 0.408 | A16 |
| CM257 | 490586 | 2135787 | 0.700 | A16 |
| CM258 | 489749 | 2136435 | 0.917 | A16 |
| CM259 | 490775 | 2136929 | 3.392 | A16 |
| CM260 | 490944 | 2136546 | 1.167 | A16 |
| CM261 | 491625 | 2135711 | 0.533 | A16 |
| CM262 | 492129 | 2136514 | 0.625 | A16 |
| CM263 | 491722 | 2136905 | 0.858 | A16 |
| CM264 | 491550 | 2137090 | 1.258 | A16 |
| CM265 | 490713 | 2137700 | 3.208 | A16 |
| CM266 | 491045 | 2138307 | 4.425 | A16 |
| CM267 | 491796 | 2137943 | 2.125 | A16 |
| CM268 | 492241 | 2137408 | 0.917 | A16 |
| CM269 | 492761 | 2137960 | 1.842 | A16 |
| CM270 | 492865 | 2138521 | 0.725 | A16 |
| CM271 | 492474 | 2138695 | 0.900 | A16 |
| CM272 | 492128 | 2139076 | 1.642 | A16 |
| CM273 | 492887 | 2139109 | 0.900 | A16 |
| CM274 | 496018 | 2137552 | 0.192 | A17 |
| CM275 | 495595 | 2137475 | 1.250 | A17 |
| CM276 | 495297 | 2137046 | 1.217 | A17 |
| CM277 | 494765 | 2136762 | 2.792 | A17 |
| CM278 | 494389 | 2137009 | 0.633 | A17 |
| CM279 | 494278 | 2137488 | 0.725 | A17 |
| CM280 | 493484 | 2137967 | 0.567 | A17 |
| CM281 | 493863 | 2138685 | 0.492 | A17 |
| CM282 | 494928 | 2138554 | 0.458 | A17 |
| CM283 | 494053 | 2138062 | 0.183 | A17 |
| CM284 | 494698 | 2137806 | 5.000 | A17 |
| CM285 | 495125 | 2138117 | 3.925 | A17 |
| CM286 | 495646 | 2137939 | 0.183 | A17 |
| CM287 | 496001 | 2137962 | 1.033 | A17 |
| CM288 | 495763 | 2138457 | 0.458 | A17 |
| CM289 | 496183 | 2138658 | 0.867 | A17 |
| CM290 | 496760 | 2138758 | 1.717 | A17 |
| CM291 | 497091 | 2138649 | 0.192 | A17 |

| | | | | |
|-------|--------|---------|-------|-----|
| CM292 | 497077 | 2139112 | 3.517 | A18 |
| CM293 | 496919 | 2139238 | 2.567 | A18 |
| CM294 | 497499 | 2139500 | 3.367 | A18 |
| CM295 | 497399 | 2140187 | 1.067 | A18 |
| CM296 | 498173 | 2139930 | 0.200 | A18 |
| CM297 | 498375 | 2140323 | 4.542 | A18 |
| CM298 | 500098 | 2140476 | 1.550 | A18 |
| CM299 | 500477 | 2140934 | 0.408 | A18 |
| CM300 | 500710 | 2141238 | 0.475 | A18 |
| CM301 | 500186 | 2141492 | 0.242 | A18 |
| CM302 | 499750 | 2141130 | 0.408 | A18 |
| CM303 | 499402 | 2140725 | 0.650 | A18 |
| CM304 | 498745 | 2140892 | 0.175 | A18 |
| CM305 | 497821 | 2140766 | 0.900 | A18 |
| CM306 | 498054 | 2141044 | 0.783 | A18 |
| CM307 | 498678 | 2141632 | 1.258 | A18 |
| CM308 | 499285 | 2141803 | 0.342 | A18 |
| CM309 | 499391 | 2142063 | 0.200 | A18 |
| CM310 | 488224 | 2136761 | 1.142 | A19 |
| CM311 | 488521 | 2137162 | 2.250 | A19 |
| CM312 | 488138 | 2137771 | 0.933 | A19 |
| CM313 | 487763 | 2138429 | 0.750 | A19 |
| CM315 | 487650 | 2137080 | 0.783 | A19 |
| CM319 | 487242 | 2137669 | 0.742 | A19 |
| CM314 | 487640 | 2137599 | 0.733 | A19 |
| CM316 | 487898 | 2136519 | 0.917 | A19 |
| CM317 | 487357 | 2136668 | 0.858 | A19 |
| CM318 | 487051 | 2136939 | 0.825 | A19 |
| CM320 | 487354 | 2137944 | 0.750 | A19 |
| CM321 | 486990 | 2137986 | 0.742 | A19 |
| CM322 | 486433 | 2138398 | 0.783 | A19 |
| CM323 | 486793 | 2137416 | 0.800 | A19 |
| CM324 | 486416 | 2137778 | 0.758 | A19 |
| CM325 | 486946 | 2137843 | 0.942 | A19 |
| CM326 | 486232 | 2137163 | 0.867 | A19 |
| CM327 | 485761 | 2137401 | 1.033 | A19 |
| CM346 | 483960 | 2137506 | 1.350 | A21 |
| CM347 | 484327 | 2137440 | 1.092 | A21 |
| CM348 | 485085 | 2137234 | 1.200 | A21 |
| CM349 | 484778 | 2137761 | 1.167 | A21 |
| CM350 | 485303 | 2138053 | 0.950 | A21 |

| | | | | |
|-------|--------|---------|-------|-----|
| CM351 | 484758 | 2138244 | 1.117 | A21 |
| CM352 | 484612 | 2138590 | 1.067 | A21 |
| CM353 | 483897 | 2138134 | 1.092 | A21 |
| CM354 | 483963 | 2138270 | 1.108 | A21 |
| CM356 | 483327 | 2138183 | 1.508 | A21 |
| CM357 | 483285 | 2137724 | 1.942 | A21 |
| CM360 | 482459 | 2138115 | 2.425 | A21 |
| CM361 | 482826 | 2138575 | 1.575 | A21 |
| CM362 | 482351 | 2138689 | 3.667 | A21 |
| CM364 | 482085 | 2139553 | 1.725 | A22 |
| CM365 | 482317 | 2140150 | 1.600 | A22 |
| CM366 | 482629 | 2139316 | 1.483 | A22 |
| CM367 | 482734 | 2139673 | 1.458 | A22 |
| CM368 | 483096 | 2139852 | 1.158 | A22 |
| CM370 | 483781 | 2140141 | 0.992 | A22 |
| CM371 | 483934 | 2139969 | 1.000 | A22 |
| CM372 | 483600 | 2139526 | 1.008 | A22 |
| CM373 | 483449 | 2139076 | 1.217 | A22 |
| CM374 | 483923 | 2139103 | 1.025 | A22 |
| CM375 | 484327 | 2140263 | 0.950 | A22 |
| CM376 | 484611 | 2139248 | 0.842 | A22 |
| CM377 | 484607 | 2140033 | 0.908 | A22 |
| CM378 | 485556 | 2140095 | 1.000 | A22 |
| CM379 | 485194 | 2140726 | 0.900 | A22 |
| CM380 | 484640 | 2141096 | 2.733 | A22 |
| CM382 | 483586 | 2140716 | 1.008 | A22 |
| CM383 | 484003 | 2140886 | 1.008 | A22 |
| CM385 | 482574 | 2140670 | 1.483 | A22 |
| CM386 | 482472 | 2141112 | 2.283 | A22 |

Las estaciones: CM067 (A4), CM153 (A11), CM162 (A11), CM204 (A13), CM206 (A13), CM246 (A15), CM269 (A16), CM325 (A19) y CM369 (A22), fueron eliminadas porque presentaron un problema en alguno de los componentes. Las estaciones CM355 (A21), CM358 (A21), CM359 (A21) y CM363 (A21), fueron eliminadas porque se obtuvieron frecuencias características incongruentes con el sitio donde se encontraban (zona de lomas), además de amplitudes muy bajas. Es importante mencionar el cálculo de los cocientes espectrales HVSR y la determinación de la frecuencia característica se hizo de manera automática en un script, por lo que pueden existir errores, sobre todo en el cálculo de las frecuencias características.

Anexo VII. Distribución espacial de las frecuencias características por arreglo

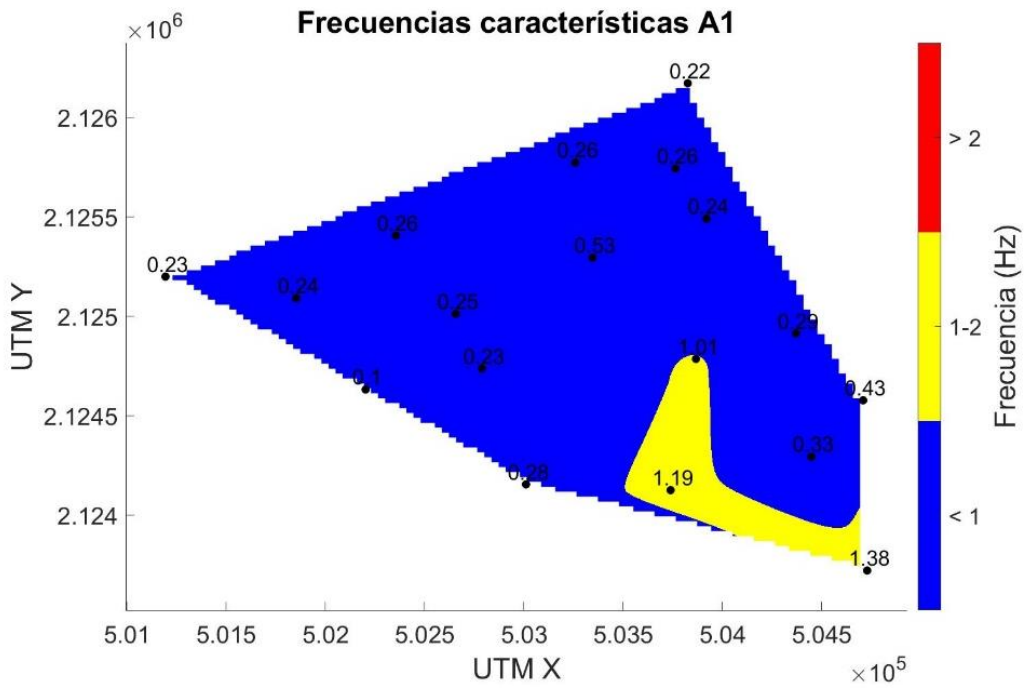


Figura AVII_1. Distribución espacial de las frecuencias características en el arreglo A1.

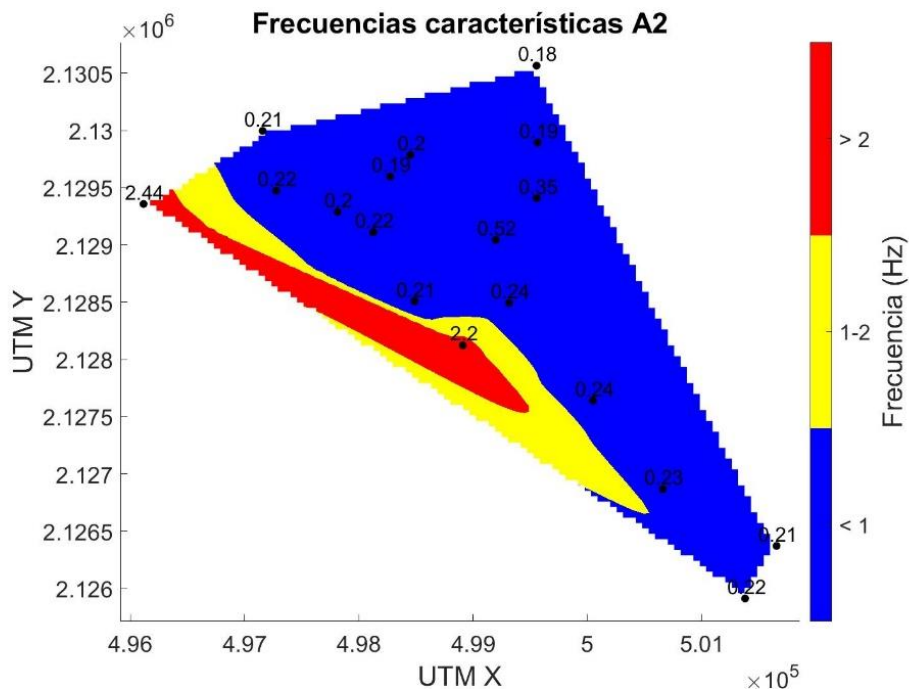


Figura AVII_2. Distribución espacial de las frecuencias características en el arreglo A2.

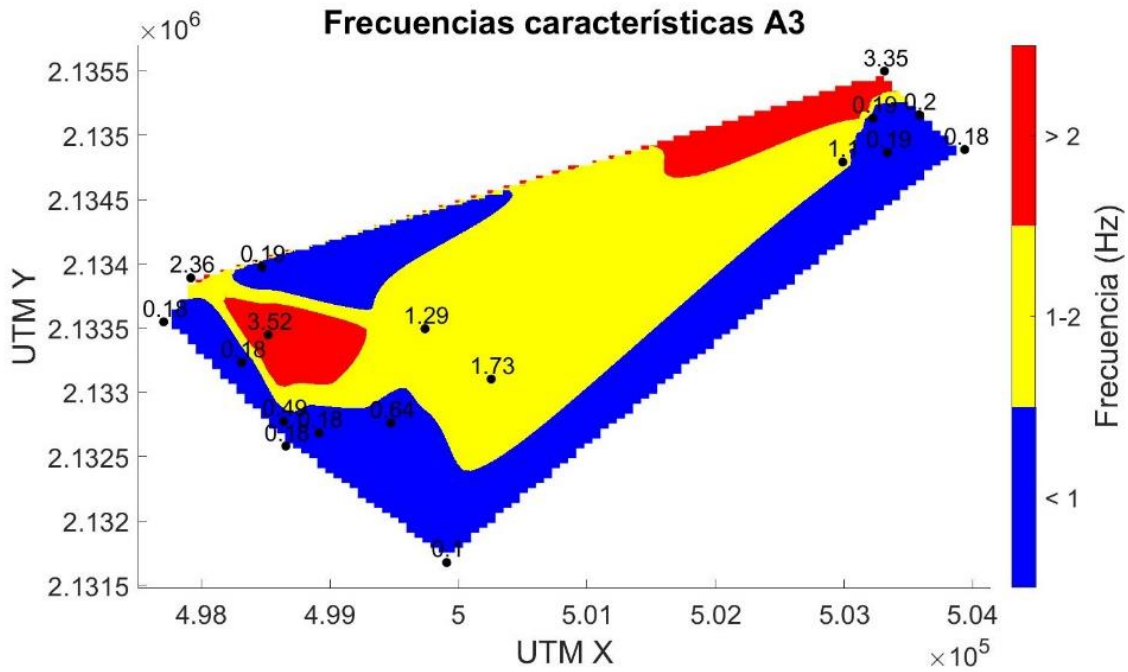


Figura AVII_3 Distribución espacial de las frecuencias características en el arreglo A3.

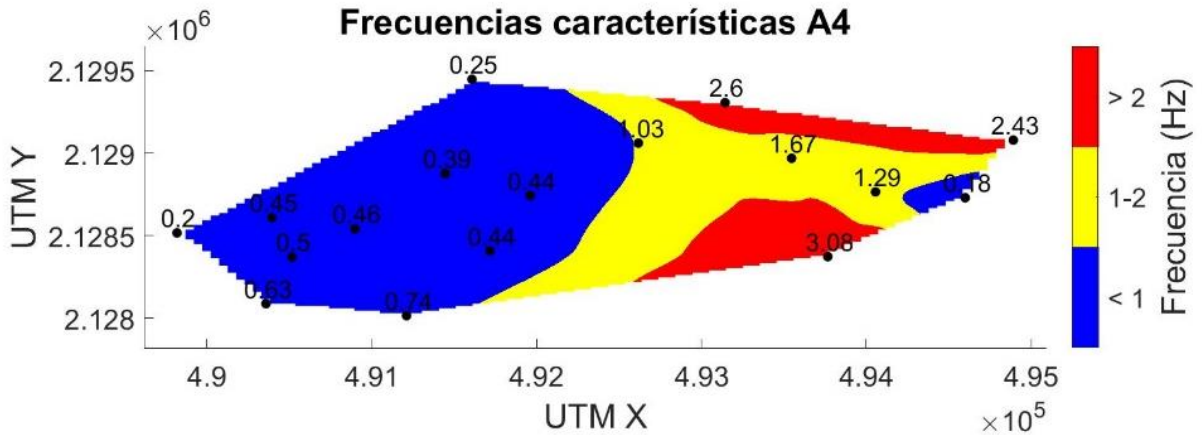


Figura AVII_4. Distribución espacial de las frecuencias características en el arreglo A4.

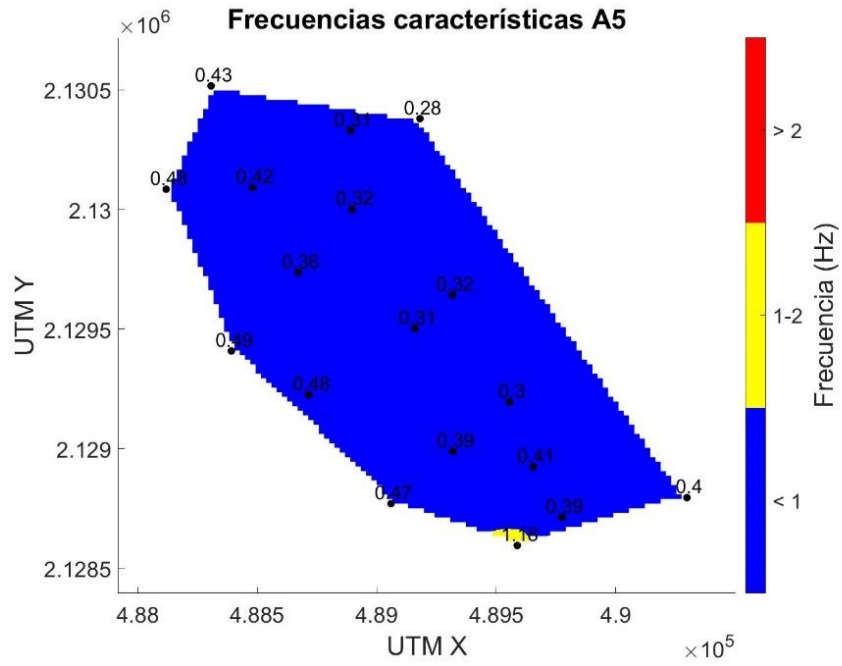


Figura AVII_5. Distribución espacial de las frecuencias características en el arreglo A5.

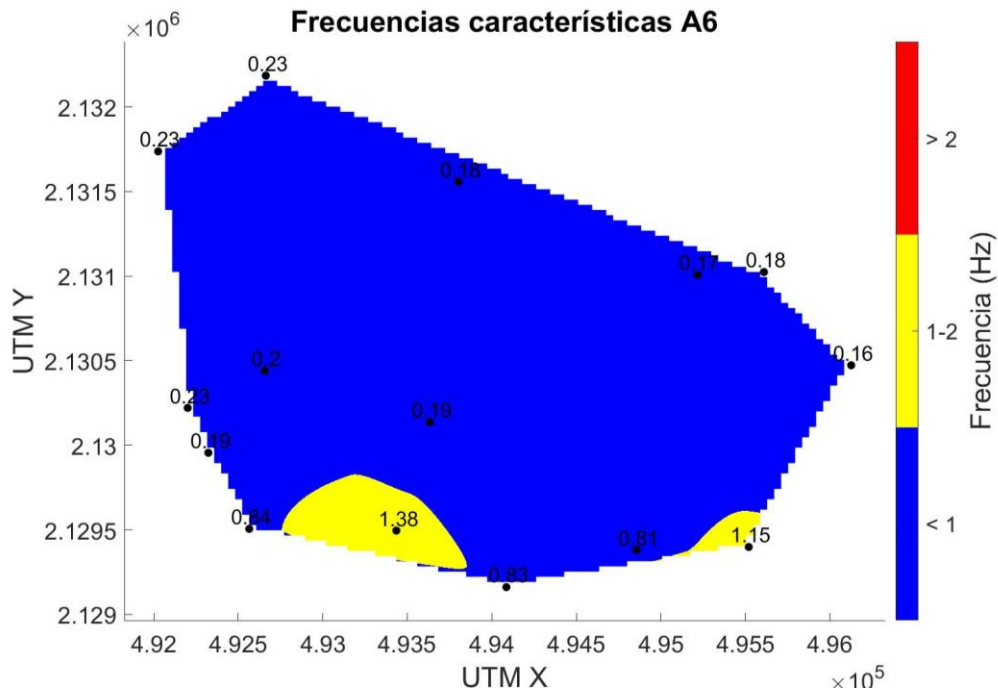


Figura AVII_6. Distribución espacial de las frecuencias características en el arreglo A6.

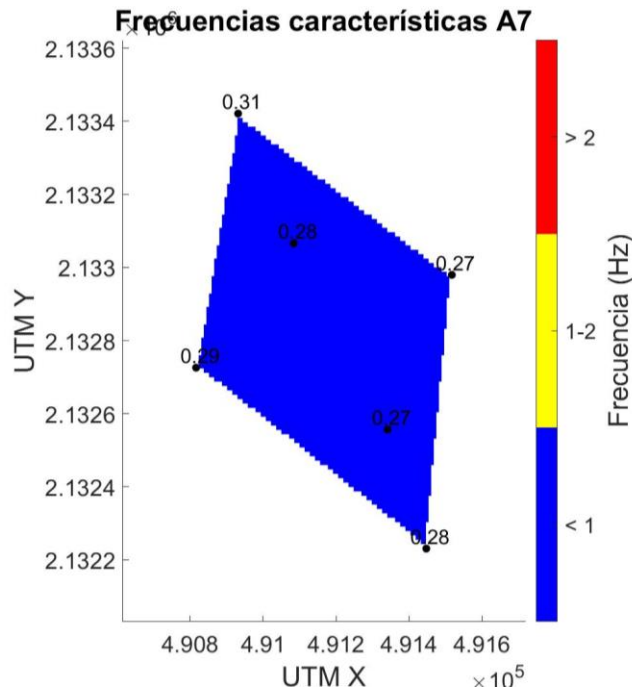


Figura AVII_7. Distribución espacial de las frecuencias características en el arreglo A7.

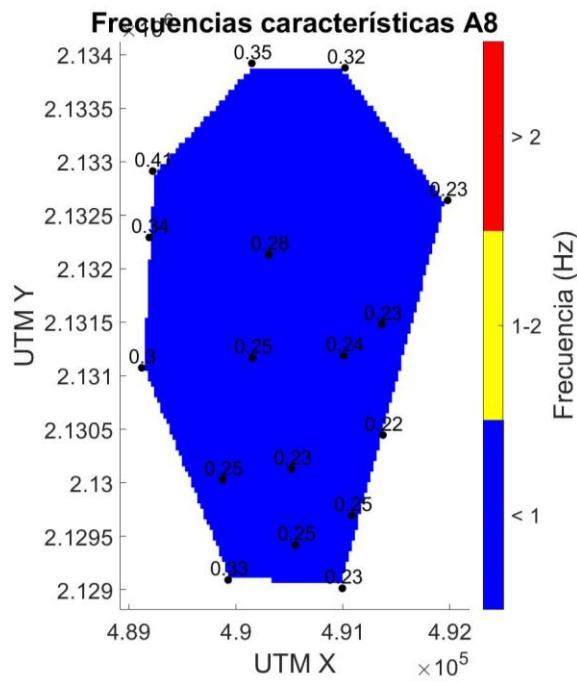


Figura AVII_8. Distribución espacial de las frecuencias características en el arreglo A8.

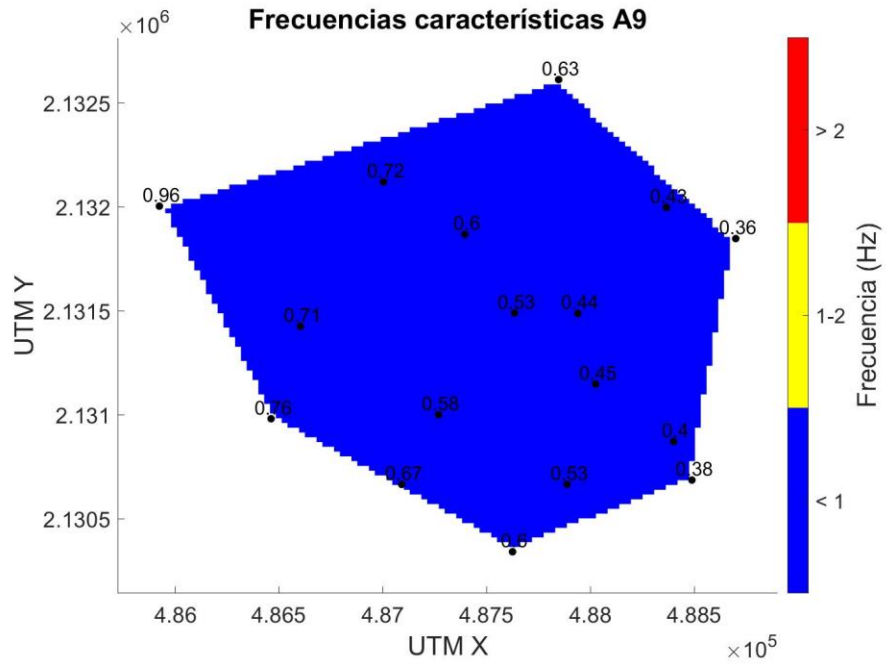


Figura AVII_9. Distribución espacial de las frecuencias características en el arreglo A9.

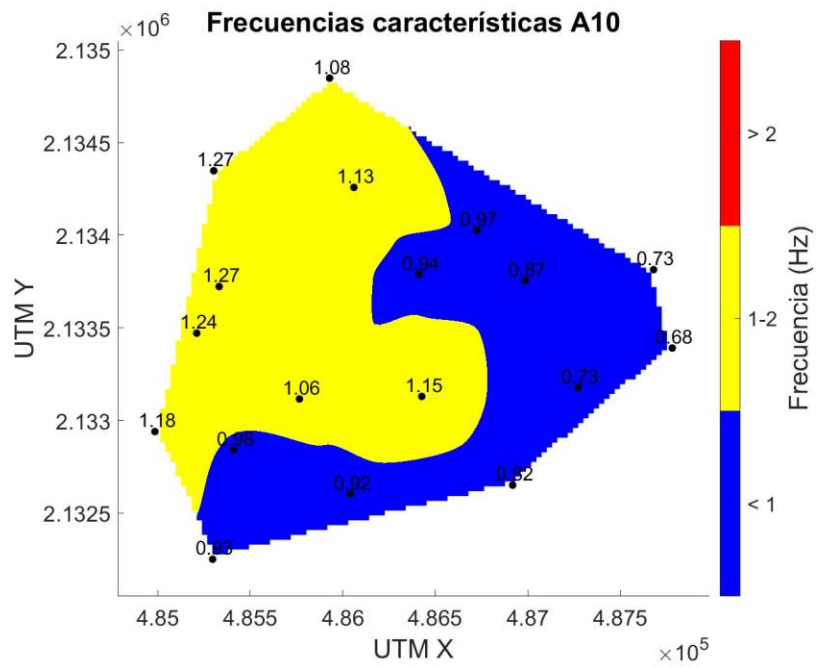


Figura AVII_10. Distribución espacial de las frecuencias características en el arreglo A10.

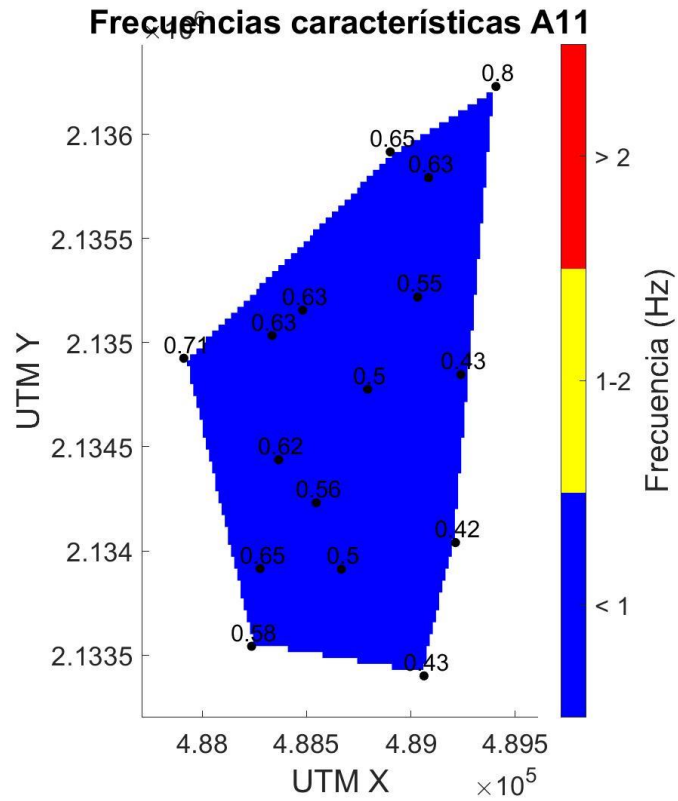


Figura AVII_11. Distribución espacial de las frecuencias características en el arreglo A11.

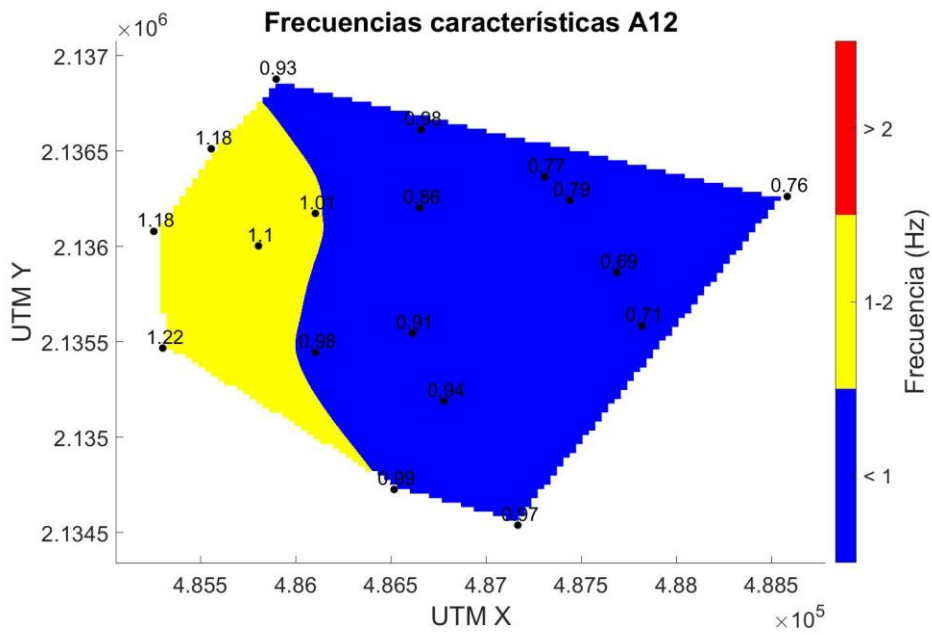


Figura AVII_12. Distribución espacial de las frecuencias características en el arreglo A12.

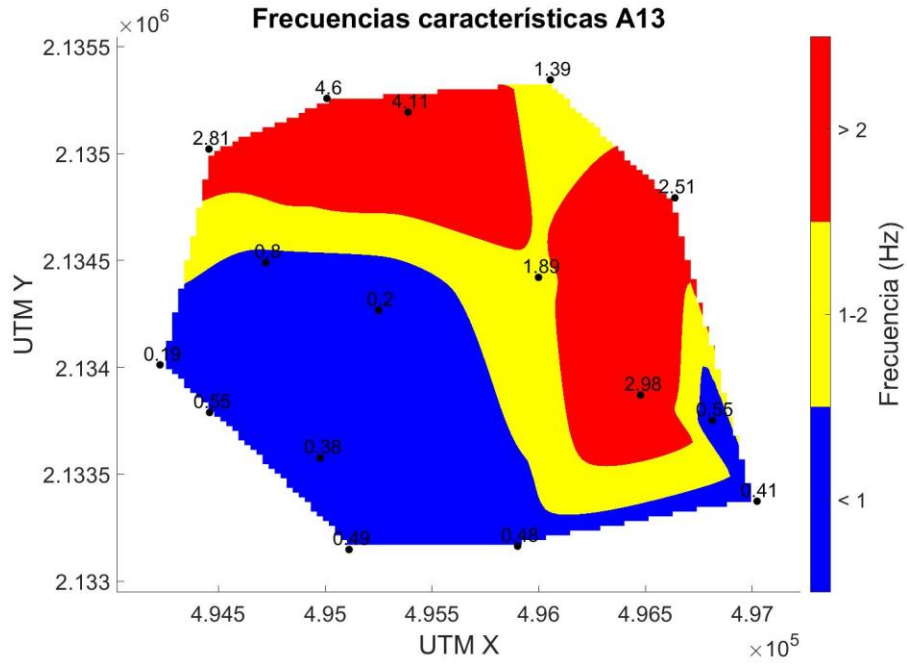


Figura AVII_13. Distribución espacial de las frecuencias características en el arreglo A13.

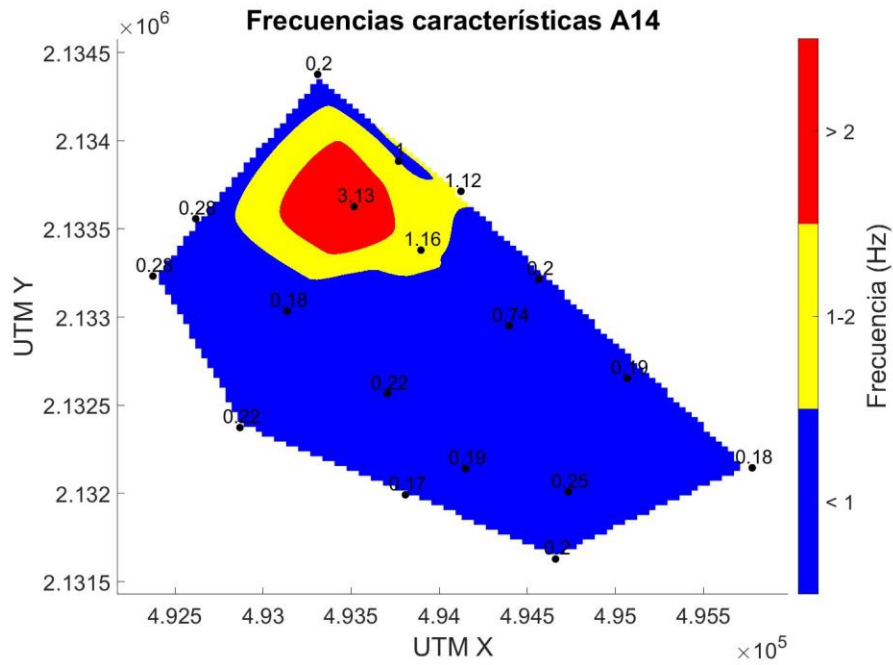


Figura AVII_14. Distribución espacial de las frecuencias características en el arreglo A14.

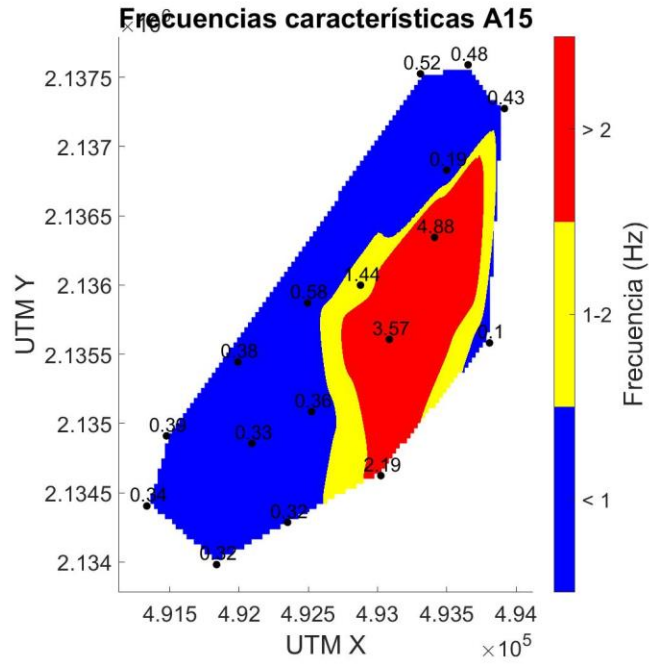


Figura AVII_15 Distribución espacial de las frecuencias características en el arreglo A15.

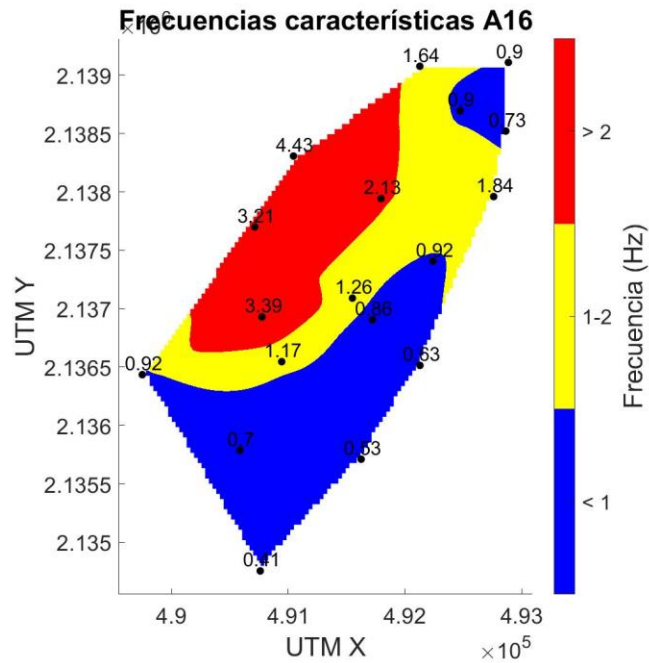


Figura AVII_16. Distribución espacial de las frecuencias características en el arreglo A16.

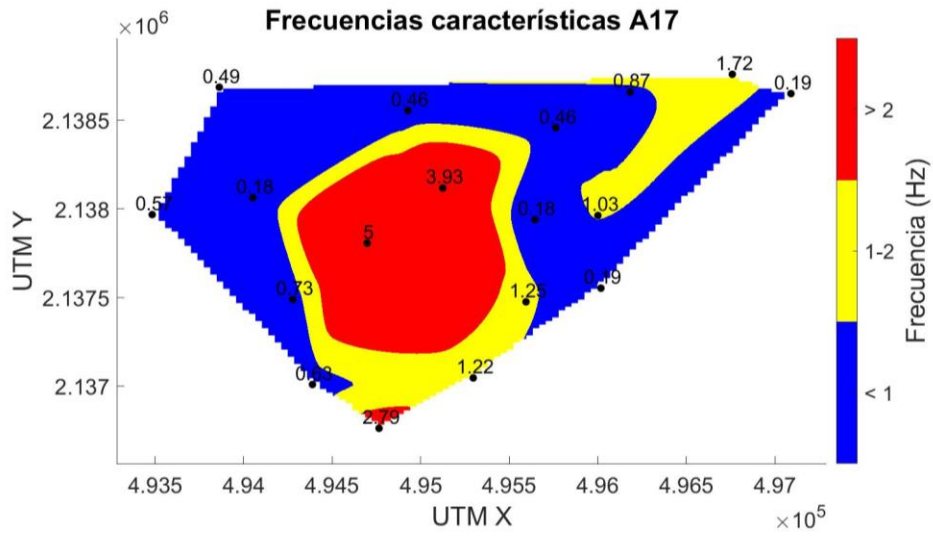


Figura AVII_17. Distribución espacial de las frecuencias características en el arreglo A17.

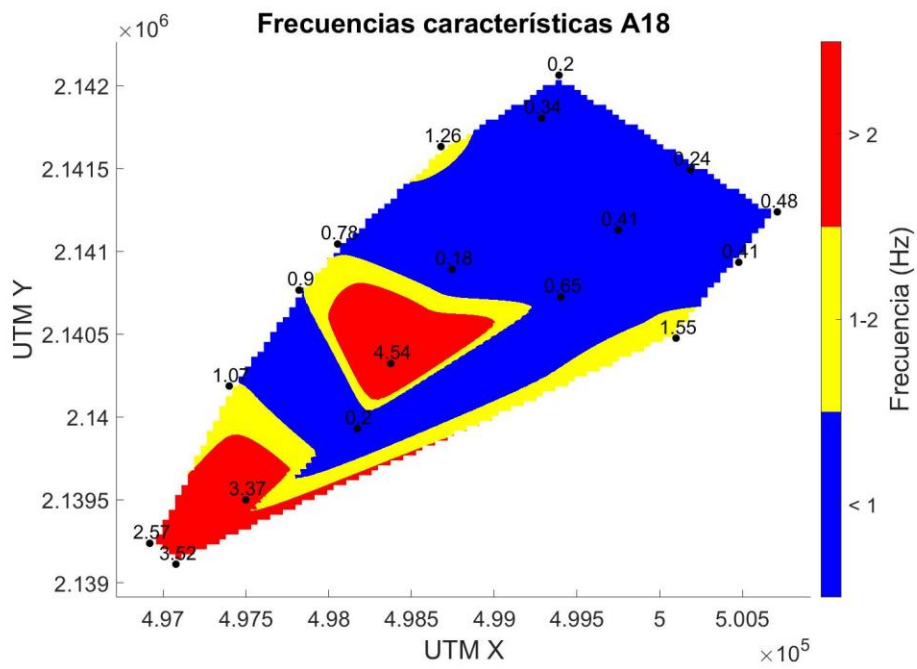


Figura AVII_18. Distribución espacial de las frecuencias características en el arreglo A18.

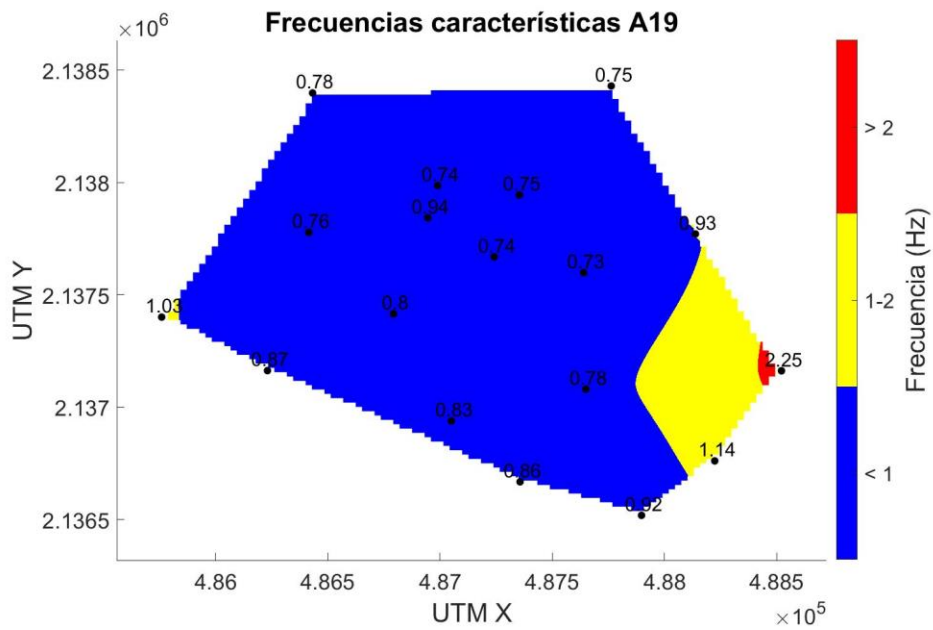


Figura AVII_19. Distribución espacial de las frecuencias características en el arreglo A19.

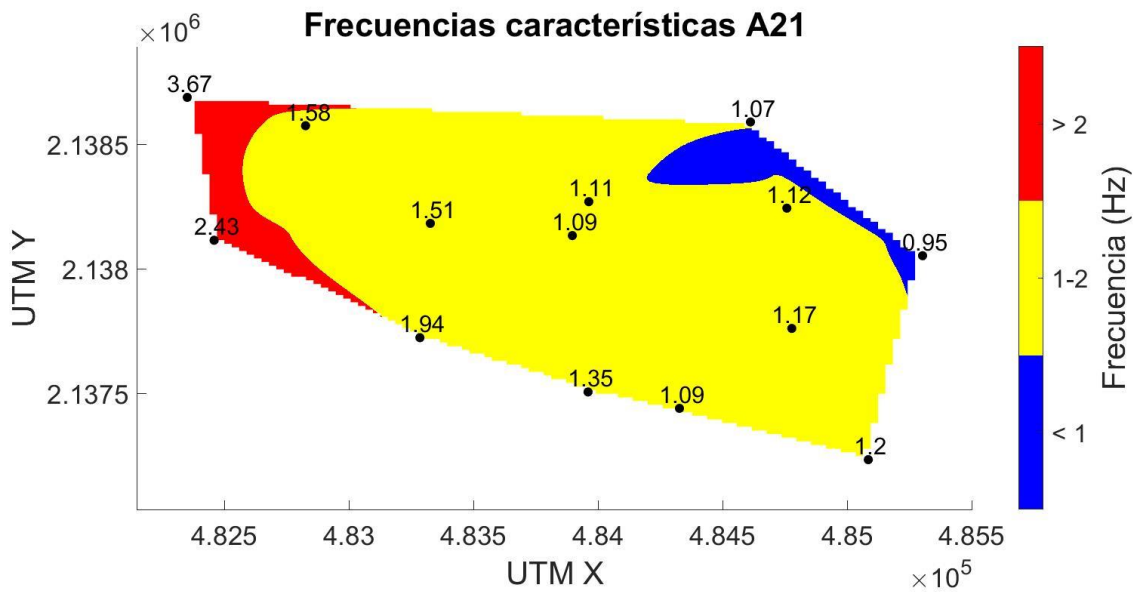


Figura AVII_21. Distribución espacial de las frecuencias características en el arreglo A21.

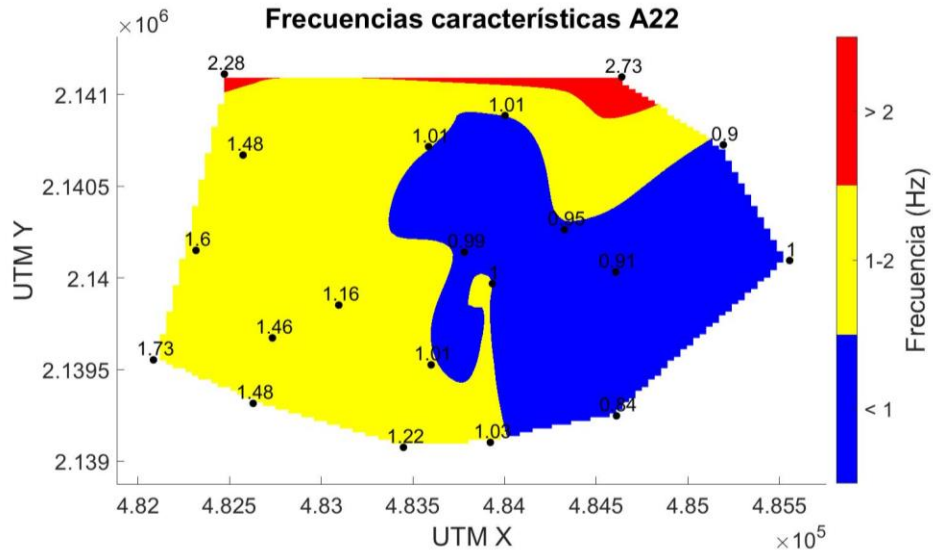


Figura AVII_22. Distribución espacial de las frecuencias características en el arreglo A22.

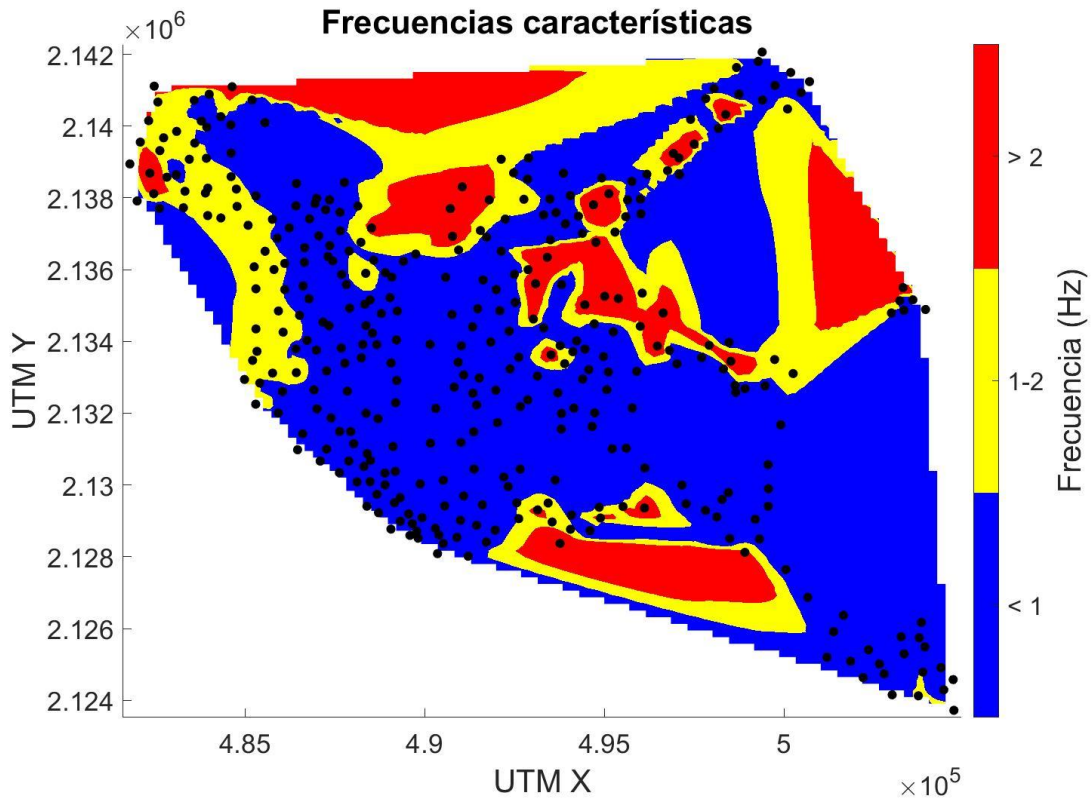


Figura AVII_23. Distribución espacial de las frecuencias características estimadas en este trabajo