



Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas  
Universidad Nacional de La Plata

ANÁLISIS DEL RUIDO SÍSMICO MEDIANTE  
INTERFEROMETRÍA PARA EL MODELADO  
CORTICAL EN LA CUENCA CHACO-PARANÁ

Alumna: Melina Lunansky  
Directora: Dra. María Laura Rosa  
Codirectora: Dra. Carolina Buffoni

Tesis presentada para obtener el grado académico de  
Geofísico

LA PLATA, ARGENTINA  
- MARZO DE 2019 -



# ANÁLISIS DEL RUIDO SÍSMICO MEDIANTE INTERFEROMETRÍA PARA EL MODELADO CORTICAL EN LA CUENCA CHACO-PARANÁ

Alumna: Melina Lunansky  
Directora: Dra. María Laura Rosa  
Codirectora: Dra. Carolina Buffoni

Tesis presentada para obtener el grado académico de  
Geofísico

Tribunal examinador:

Dra. María Laura Rosa  
Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas. Universidad Nacional de La Plata

Dra. Gabriela Alejandra Badi  
Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas. Universidad Nacional de La Plata

Dr. Juan Ignacio Sabbione  
Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas. Universidad Nacional de La Plata



A Joaquín



# Agradecimientos

A la Universidad Nacional de La Plata y a la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas por la formación. A los profesores que me enseñaron, alentaron y aconsejaron.

Al departamento de sismología por permitirme ser parte del grupo.

A mi directora María Laura por darme un lugar, ayudarme, acompañarme y entenderme. Por ser lo que esperaba como directora y como persona.

A mi codirectora Carolina por aceptarme sin conocerme, por su ayuda siempre justo en momentos complicados.

A los que están desde el principio, Lu (y Viggo), Sole, Hilario y Augusto, por seguir estando, por tantas anécdotas, por las risas y los tequilas!

A los que me acompañaron los últimos años, que sin saberlo y sin quererlo me fueron empujando.

A Ma, Geor, A, Bahi, Indhi y Ku por apoyarme siempre, por creer en mi.

A Julián por estar conmigo en todo momento, por ser profesor, ayudante, compañero, por los ejemplos insoportables.

A Joaquín por aguantar tantos "tengo que estudiar", y por ser el mejor.

Gracias.





# Resumen

En este trabajo se modela la estructura somera de la corteza en la región límite entre las cuencas Chaco-Paraná y Paraná. Para ello se analizan las curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh obtenidas por interferometría de ruido sísmico entre pares de estaciones y se determinan modelos de velocidad de la onda S mediante inversión. Los datos utilizados corresponden a estaciones de la red XC perteneciente al proyecto Pantanal-Chaco-Paraná Basins: Crust and Upper Mantle Seismic Structure and Evolution (Proyecto Tres Cuencas), con distancias entre estaciones que van desde 131 Km hasta 785.2 Km, permitiendo resolver los primeros kilómetros de la corteza.

Para el cálculo de las correlaciones cruzadas se utiliza la técnica *phase cross-correlation* (PCC). Luego se realiza el apilamiento lineal con el fin de calcular la correlación simétrica y así obtener la función empírica de Green. A partir de ella se calculan las curvas de dispersión aplicando la técnica de filtrado múltiple y finalmente, se hace su inversión por mínimos cuadrados.

En la parte sudeste de la cuenca Chaco-Paraná se observan escasos espesores sedimentarios. Hacia el centro de la zona de estudio se encuentran sedimentos que llegan hasta los 5 Km de profundidad, volviendo a disminuir su espesor hacia el norte.

Los modelos de velocidad de onda S muestran dos capas de sedimentos con velocidades entre 0.7 y 1.1 Km/s y entre 1.8 y 2.1 Km/s, corteza superior con velocidades entre 3.4 y 3.8 Km/s y un aumento de velocidad (3.6-4 Km/s) a los 12 Km de profundidad que estaría indicando el inicio de la corteza inferior.

Se comprueba que la resolución de la técnica depende exclusivamente del número, la geometría y la distancia entre las estaciones sísmicas.

El conjunto de datos utilizados permitió determinar con mayor certeza los espesores sedimentarios comparados con otros análisis realizados en la región, ya que se contó con períodos menores a 10 s para estaciones ubicadas sobre la cuenca.



# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>ix</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Geología de la región . . . . .	2
1.2. Antecedentes . . . . .	4
1.3. Objetivos . . . . .	7
<b>2. Interferometría sísmica</b>	<b>9</b>
2.1. Marco teórico . . . . .	9
2.1.1. Ruido sísmico . . . . .	9
2.1.2. Correlación cruzada . . . . .	12
2.1.3. Función de Green . . . . .	14
2.2. Aplicación de la técnica . . . . .	15
2.2.1. Datos utilizados . . . . .	15
2.2.2. Preprocesamiento de los datos . . . . .	16
2.2.3. Cálculo de las correlaciones cruzadas . . . . .	17
2.2.4. Apilado de las correlaciones cruzadas . . . . .	19
2.2.5. Correlación simétrica . . . . .	21
<b>3. Curvas de dispersión</b>	<b>23</b>
3.1. Ondas superficiales . . . . .	23
3.2. Obtención de las curvas de dispersión . . . . .	25
3.2.1. Efecto de la longitud del apilamiento . . . . .	28
<b>4. Inversión de las velocidades de grupo</b>	<b>31</b>
<b>5. Conclusiones</b>	<b>41</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>45</b>
<b>A. Correlaciones simétricas</b>	<b>51</b>
<b>B. Resultados de la inversión</b>	<b>69</b>



# Índice de figuras

1.1.	Cuencas intracratónicas de la plataforma Sudamericana. <i>Extraída de Milani and Zalán (1999)</i> . . . . .	3
1.2.	Mapa de la cuenca Chaco-Paraná. Los límites de la cuenca corresponden a Dragone et al. (2012). . . . .	4
1.3.	Espesor de sedimentos para las cuencas Chaco-Paraná y Paraná. <i>Extraída de Dragone (2013)</i> . . . . .	6
1.4.	Mapa del espesor cortical para la cuenca Chaco-Paraná. <i>Extraída de Rosa et al. (2016)</i> . . . . .	6
2.1.	Registro sísmico de la componente vertical de 40 minutos de duración obtenido en la estación TBOT, donde se observa ruido sísmico previo a la llegada de un terremoto ocurrido en México el 08/09/2017 de magnitud 8.0 Mw. . . . .	10
2.2.	Ejemplo de los principales componentes presentes en el espectro del ruido ambiente. Los microsismos primario (Primary Microseism) y secundario (Secondary Microseism) están indicados. <i>Extraída y modificada de McNamara and Boaz (2019)</i> . . . . .	11
2.3.	Esquema de los mecanismos de generación de microsismos: a) primario y b) secundario. En el caso del microsismo secundario, la zona de interacción de ondas con direcciones de propagación opuestas está indicada con X y L representa una zona de baja presión. <i>Extraída de Friedrich et al. (1998)</i> . . . . .	12
2.4.	Ilustración del efecto en la correlación cruzada entre dos receptores 1 y 2, para una distribución de fuentes de ruido sísmico a) homogénea, b) y c) no homogénea. <i>Extraída y modificada de Stehly et al. (2006)</i> . . . . .	13
2.5.	Correlación cruzada de ruido sísmico registrado el día 21/03/2017 en las estaciones AZCA y ARAP (izquierda) y la correspondiente correlación simétrica (derecha). La ubicación de las estaciones puede verse en la Figura (2.6). . . . .	14
2.6.	Localización de las estaciones utilizadas en este trabajo. Los límites de la cuenca Chaco-Paraná corresponden a Dragone et al. (2012). . . . .	15

2.7.	Trayectorias entre las estaciones utilizadas. Los límites de la cuenca Chaco-Paraná corresponden a Dragone et al. (2012). . . . .	16
2.8.	Correlación cruzada (PCC) entre las estaciones SJPY y TICA, distanciadas 456.1 Km, calculada con tiempo de retraso 200 s. . . . .	19
2.9.	Correlación cruzada (PCC) entre las estaciones SJPY y TBOT, distanciadas 740.2 Km, calculada con tiempo de retraso 400 s. . . . .	19
2.10.	Apilado lineal de las correlaciones cruzadas (PCC) de registros de ruido sísmico, calculadas con tiempo de retraso 200 s. . . . .	20
2.11.	Apilado lineal de las correlaciones cruzadas (PCC) de registros de ruido sísmico, calculadas con tiempo de retraso 400 s. . . . .	21
2.12.	Correlación simétrica obtenida a partir de las correlaciones cruzadas entre las estaciones EDMB y RODS, calculadas con tiempo de retraso 200 s. La distancia entre estaciones es 448.4 Km. . . . .	22
2.13.	Correlación simétrica obtenida a partir de las correlaciones cruzadas entre las estaciones EDMB y TBOT, calculadas con tiempo de retraso 400 s. La distancia entre estaciones es 607.5 Km. . . . .	22
3.1.	Movimiento generado por las ondas Rayleigh. <i>Extraída de Shearer (2009)</i> . . . . .	24
3.2.	Curvas de dispersión para el modo fundamental de ondas Rayleigh. <i>Extraída de Shearer (2009), calculadas a partir del modelo isotrópico PREM (Preliminary Reference Earth Model) por G. Laske</i> . . . . .	25
3.3.	Curva de dispersión del modo fundamental de ondas Rayleigh para la trayectoria SCCA-AZCA. El gráfico de la izquierda muestra los valores de amplitud de la envolvente en función del período. Los puntos rojos representan las mayores amplitudes. El gráfico central muestra los valores de la envolvente filtrada en función de la velocidad y el período en distintos colores. El color naranja representa las mayores amplitudes. La línea de puntos blancos representa los valores de la velocidad de grupo inferida de los contornos. El gráfico de la derecha corresponde a la señal filtrada.	26
3.4.	Curvas de dispersión para el modo fundamental de ondas Rayleigh de las 83 trayectorias. . . . .	27
3.5.	Curvas de dispersión para el modo fundamental de ondas Rayleigh. En azul las curvas correspondientes a las trayectorias ARAP-TBOT, PSAL-TBOT, RODS-ARAP, RODS-PSAL y RODS-TBOT, en rojo las curvas correspondientes a las trayectorias MECA-ARAP, MECA-RODS, MECA-TBOT, UNIS-ARAP y UNIS-TBOT, en amarillo la curva correspondiente a la trayectoria MECA-UNIS. Se muestra también a la derecha el mapa con la ubicación de las estaciones y las trayectorias. . . . .	27

---

3.6.	Curvas de dispersión para las trayectorias AZCA-ARAP (en negro) y AZCA-PSAL (en rojo). . . . .	28
3.7.	Curvas de dispersión para las trayectorias CRSM-ARAP (en negro) y CRSM-PSAL (en rojo). . . . .	29
3.8.	Curvas de dispersión para las trayectorias EDMB-ARAP (en negro) y EDMB-PSAL (en rojo). . . . .	29
4.1.	Salida del código <i>surf96</i> para la inversión de la curva de dispersión entre las estaciones SCCA y TBOT a partir del modelo inicial A. A la izquierda: el modelo inicial en azul y el modelo final en rojo. A la derecha: las velocidades de grupo observadas (triángulos negros) y las calculadas (línea roja). . . . .	36
4.2.	Resultado de la inversión de las 83 curvas de dispersión. . . . .	37
4.3.	Curvas de dispersión (izquierda) y resultado de la inversión (derecha) de las 83 trayectorias. Trayectorias largas en rojo y trayectorias cortas en negro. . . . .	37
4.4.	A la izquierda: resultado de la inversión para las trayectorias ESFA-ARAP (rojo), ESFA-PSAL (rojo), ESFA-MECA (rojo), ESFA-SCCA (amarillo), MECA-ARAP (azul), SCCA-ARAP (azul), SCCA-PSAL (azul) y SCCA-MECA (azul). A la derecha: mapa con la ubicación de las estaciones y las trayectorias analizadas. . . . .	38
4.5.	A la izquierda: resultado de la inversión para las trayectorias SJPY-EDMB (azul) y SJPY-CRSM (rojo). A la derecha: mapa con la ubicación de las estaciones y las trayectorias analizadas. . . . .	39
4.6.	A la izquierda: resultado de la inversión para las trayectorias EDMB-AZCA (amarillo), EDMB-MECA (rojo), AZCA-CRSM (azul) y MECA-CRSM (verde). A la derecha: mapa con la ubicación de las estaciones y las trayectorias analizadas. . . . .	40
4.7.	Mapa del espesor sedimentario a partir de la regionalización tomográfica para la onda Rayleigh en la región de la cuenca Chaco-Paraná. <i>Extraída de Sagarra (2016)</i> . . . . .	40





# Capítulo 1

## Introducción

La sismología es la disciplina que aporta la mayor resolución del interior terrestre (Christensen and Mooney, 1995), ya que la velocidad de las ondas sísmicas depende de los parámetros elásticos del medio, es por esto que la observación y el análisis de los tiempos de recorrido de las ondas permiten estudiar la distribución de estos parámetros.

Las fuentes utilizadas comúnmente para determinar la estructura sísmica de la Tierra son los terremotos o las fuentes artificiales, lo que limita la cobertura de los datos dado que los terremotos ocurren en zonas específicas de la Tierra y los estudios con fuentes artificiales tienen un elevado costo. Además, estas técnicas no permiten resolver la estructura cortical a escala regional en cualquier lugar de la Tierra, debido a que del análisis de los terremotos se obtiene información desde escalas globales hasta locales, pero sin la resolución necesaria para determinar la estructura cortical superficial; mientras que, de los estudios con fuentes artificiales se obtiene buena resolución de la corteza superficial, pero sólo a escala local. Estas limitaciones pueden superarse utilizando como fuente el ruido sísmico.

El ruido sísmico es una fuente natural, continua, detectable en cualquier lugar de la Tierra y con un contenido de frecuencias amplio que va desde  $10^{-3}$  Hz hasta  $10^1$  Hz. La interferometría de ruido sísmico implica la extracción de la función de Green del medio entre dos estaciones a partir de la correlación cruzada de registros continuos de ruido sísmico. En esta técnica cada sensor actúa como fuente virtual para el resto de las estaciones, de modo que tanto la cobertura de rayos como la resolución dependen exclusivamente del número, la geometría y la distancia entre las estaciones sísmicas.

La mayor parte de las fuentes del ruido sísmico están cerca de la superficie (Snieder, 2004; Kedar et al., 2008), en consecuencia, el ruido está compuesto principalmente por ondas superficiales, con mayor energía en el modo fundamental.

Las ondas superficiales presentan el fenómeno de dispersión ya que sus velocidades dependen de la longitud de onda (o frecuencia). Mediante la determinación

de la curva de dispersión para una trayectoria dada, es posible obtener la estructura de velocidad de la onda S en dicha trayectoria mediante un proceso de inversión. Esto permite inferir ciertas características del medio por el que se propagaron las ondas.

En este trabajo se busca estudiar las principales características de la corteza de la cuenca Chaco-Paraná. Para ello, utilizando la técnica *phase cross – correlation* (Schimmel, 1999), se realiza la correlación cruzada de registros de ruido sísmico de 14 estaciones de la red XC. Estas estaciones están ubicadas en el límite entre las cuencas Chaco-Paraná y Paraná, con distancias entre ellas que van desde 131 Km hasta 785.2 Km, lo que permite resolver los primeros kilómetros de la corteza.

A partir del apilamiento lineal de las correlaciones cruzadas entre pares de estaciones se calcula la correlación simétrica. Luego, de las correlaciones simétricas se obtienen las curvas de dispersión de velocidad de grupo de ondas Rayleigh, aplicando la técnica de filtrado múltiple (Dziewonski et al., 1969). Se determina la estructura de velocidad de onda S realizando la inversión por mínimos cuadrados de las curvas de dispersión y se analizan los modelos obtenidos comparándolos con datos de estudios realizados en la zona mediante otras técnicas.

### 1.1. Geología de la región

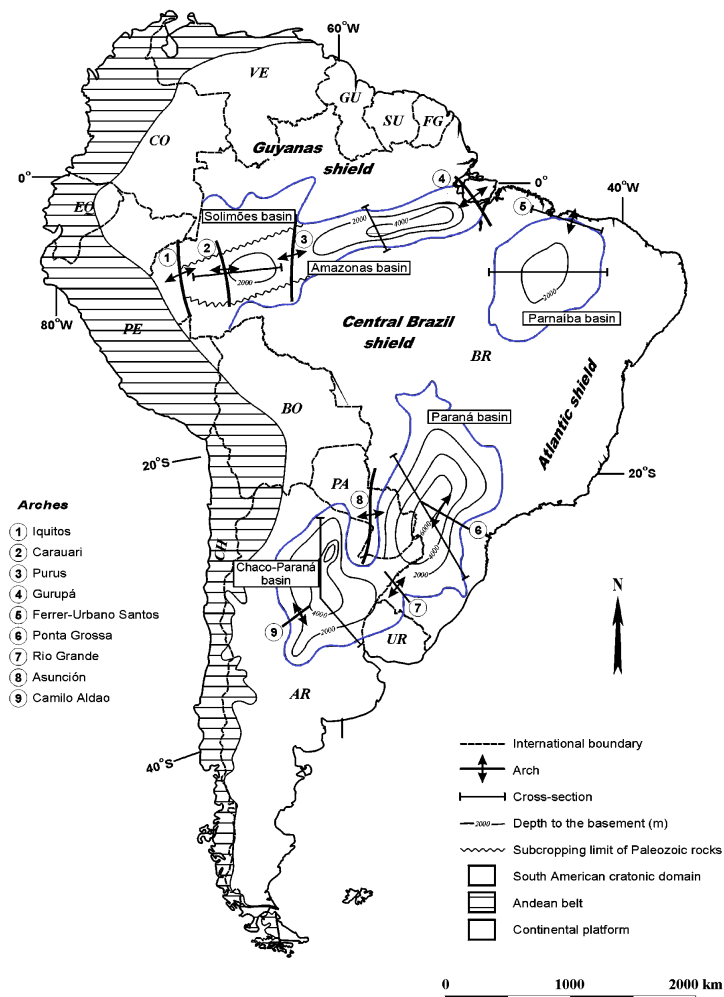
Las cuencas sedimentarias son depresiones donde se acumulan sedimentos, cuyo origen y desarrollo se encuentran enmarcados en la dinámica de la tectónica global.

Hay una gran variabilidad en la forma y el tamaño de las cuencas, así como también en el espesor de sedimentos que ellas contienen. Las secuencias sedimentarias registran la evolución de las cuencas, y en ellas se pueden observar superficies de omisión o hiatos, reflejo de etapas de no deposición y discordancias que evidencian etapas de erosión, acompañadas o no de actividad tectónica.

En la plataforma Sudamericana se preservan cuatro cuencas con procesos de sedimentación Paleozoica: Amazonas, Parnaíba, Paraná y Chaco-Paraná (Figura 1.1). Estas cuencas se encuentran sobre una corteza continental o cuasi continental (Milani and Zalán, 1999).

La cuenca Chaco-Paraná ocupa la parte sur y sudoeste de la plataforma Sudamericana, ubicada en la región noreste de Argentina, abarca un área de 700.000 Km<sup>2</sup> aproximadamente. Se localiza al oeste del extremo sur de la cuenca Paraná y está separada de ella por los arcos de Asunción y Río Grande (Figura 1.2). Se encuentra limitada al oeste por la cordillera oriental, al sur por el cratón del Río de La Plata y al este/noreste por el escudo Brasileño. La geometría de sus márgenes es aproximadamente elíptica, con ejes de orientación ENE-OSO, con depocentros semicirculares y un relleno de aproximadamente 6 Km de sedimentos en su parte más profunda, de los cuales casi 2 Km son volcánicos (Barredo and

Stinco, 2010). Se encuentra incluida en la denominada planicie Chacopampeana, que es una llanura cubierta por sedimentos cuaternarios provenientes de los Andes (Chebli et al., 1999), que se extiende por más de 1.000.000 Km<sup>2</sup> y está elevada 100 m sobre el nivel del mar.

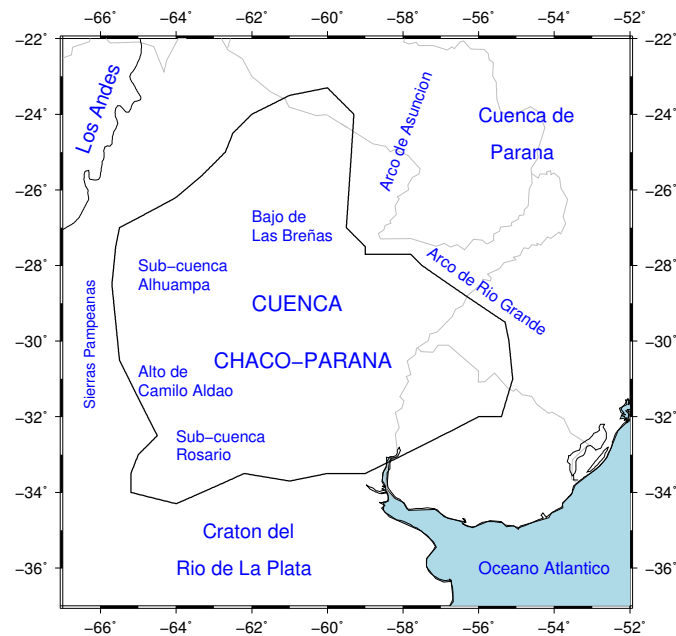


**Figura 1.1.** Cuencas intracratónicas de la plataforma Sudamericana. *Extraída de Milani and Zalán (1999).*

La región posee pocos afloramientos y se caracteriza por la ausencia de eventos tectónicos recientes (Ruso et al., 1986; Pezzi and Mozetic, 1989; Chebli et al., 1999). Esto dificulta el estudio directo de las secuencias sedimentarias previas al Cuaternario. Es entonces de suma importancia la aplicación de técnicas indirectas geofísicas para el estudio de la región.

La cuenca Chaco-Paraná es una cuenca Paleozoica de intraplaca, con una compleja evolución marcada por distintas etapas de subsidencia y elevación a lo largo de su historia (Pezzi and Mozetic, 1989). Según Pezzi et al. (2014), la cuenca se originó durante el Oligoceno tardío como resultado de un acortamiento producido por la convergencia de las placas de Nazca y Sudamericana, que generó

un cinturón de fallas plegadas y corridas en la región de retroarco de los Andes centrales. A pesar de que la llanura existente en el área de la cuenca sugiere cierta pasividad tectónica, existe una importante variabilidad lateral de las estructuras geológicas que controlaron la subsidencia de la cuenca, evidenciando un pasado dinámico.



**Figura 1.2.** Mapa de la cuenca Chaco-Paraná. Los límites de la cuenca corresponden a Dragone et al. (2012).

Pezzi y Mozetic (1989) identifican a la formación Las Breñas como la más antigua de la cuenca, de edad Cambro-Ordovícica. La etapa Silúrico-Devónica incluye más de 3.000 m de sedimentos superficiales de plataforma marina dispuestos en 3 secuencias. Los sedimentos correspondientes a la etapa Carbonífera-Jurásica presentan en la base una fuerte influencia glacial, evolucionando a condiciones más cálidas y áridas en la parte superior. Por último, proveniente del levantamiento de los Andes se encuentra un depósito de sedimentos Continentales del Terciario (Prezzi et al., 2014).

Desde el punto de vista geodinámico, los procesos que controlan la subsidencia de la cuenca no han sido profundamente estudiados.

## 1.2. Antecedentes

Trabajos previos realizados en la zona han evidenciado importantes diferencias en la litósfera de las cuencas Chaco-Paraná y Paraná, como diferentes profundidades de la discontinuidad de Mohorovicic (Moho) y distintos valores de velocidad de propagación de la onda S, lo que será tenido en cuenta en este trabajo debido a la ubicación de las estaciones utilizadas.

Snoke y James (1997) estimaron la profundidad media de la Moho y la velocidad de onda S utilizando inversión de ondas superficiales de un evento andino. Determinaron una profundidad de 32 Km para la Moho y obtuvieron bajas velocidades de onda S en el manto superior, del orden de 4.2 Km/s a una profundidad de 150 Km.

Yuan et al. (2000) a partir de un perfil E-O de los Andes, sugirieron, usando funciones receptoras, que la profundidad de la Moho es menor (30 Km) en la llanura chaqueña.

Feng et al. (2007) presentaron un modelo 3D de velocidad de onda S para el manto superior y un modelo de la Moho en Sudamérica utilizando tomografía. Esto fue realizado mediante inversión conjunta de formas de onda y velocidades de ondas superficiales. Encontraron una profundidad para la Moho de 30 Km en el centro de la cuenca Chaco-Paraná y determinaron una anomalía de baja velocidad en el manto litosférico. Utilizando básicamente el mismo conjunto de datos, Lloyd et al. (2010) presentaron un mapa de la Moho obtenido a partir del análisis de funciones receptoras y ondas Rayleigh, encontrando una profundidad de la Moho de aproximadamente 30 Km en el norte de la cuenca Chaco-Paraná y en la región occidental de la cuenca Paraná.

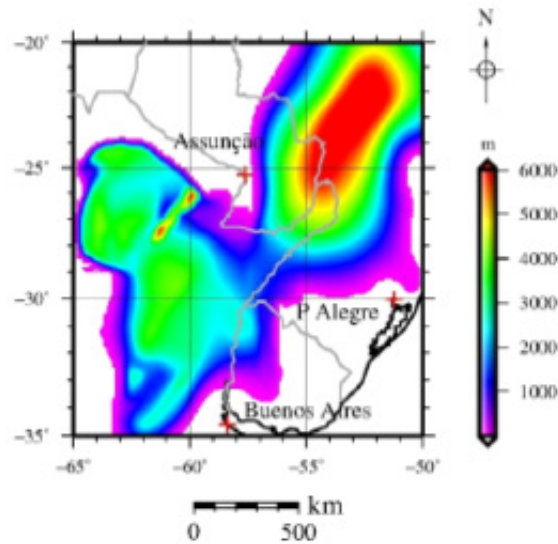
Assumpção et al. (2013) presentaron modelos de espesores de la corteza para América del Sur a partir de la inversión conjunta de dispersión de ondas superficiales y modelado regional de formas de onda, observando una corteza de espesor medio inferior a 35 Km a lo largo de las cuencas que conforman el antepaís andino. En la cuenca Paraná se encontró un espesor de 40 Km en la parte norte, que disminuye hacia el extremo sur y continúa en la cuenca Chaco-Paraná con un espesor menor a 35 Km.

Dragone et al. (2012), a partir de la inversión de los datos de gravedad derivados de la misión GOCE, concluyeron un cambio de espesor en la corteza entre las cuencas, siendo de 35 Km para la cuenca Chaco-Paraná y de 42 Km para la cuenca Paraná, con una discontinuidad importante de la litosfera que sugiere la existencia de una zona de sutura entre las cuencas. Dragone (2013) presentó el mapa de espesores de sedimentos obtenido con datos gravimétricos para las cuencas Chaco-Paraná y Paraná (Figura 1.3).

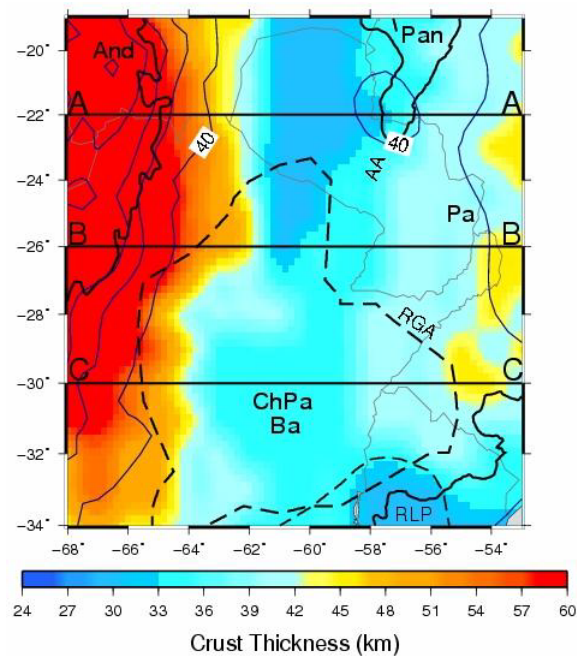
Rosa et al. (2016) presentaron los resultados de la tomografía de velocidad de grupo de ondas superficiales, utilizando curvas de dispersión de terremotos regionales y de la correlación cruzada de ruido ambiental para estaciones en y alrededor de las cuencas Paraná y Chaco-Paraná, encontrando un grosor de la corteza promedio para la cuenca Chaco-Paraná de aproximadamente 35 Km, alcanzando aproximadamente 28-30 Km por debajo de la región norte (Figura 1.4).

Sagarra (2016) presentó el mapa de espesor sedimentario de la cuenca Chaco-Paraná, a partir de inversión 1D de tomografía de ruido ambiental, que muestra un espesor de 4 Km en el centro que aumenta hacia el norte y llega a los 7 Km

de sedimentos cerca de la región del Altiplano. También se observa una franja de aproximadamente 4 Km de espesor desde el centro y hacia el sur de la cuenca que separa dos grandes regiones de menor espesor sedimentario inferiores a los 2 Km.



**Figura 1.3.** Espesor de sedimentos para las cuencas Chaco-Paraná y Paraná. *Extraída de Dragone (2013).*



**Figura 1.4.** Mapa del espesor cortical para la cuenca Chaco-Paraná. *Extraída de Rosa et al. (2016).*

---

### 1.3. Objetivos

La aplicación de técnicas modernas de reciente implementación, que permiten resolver y mapear detalles finos de la estructura de la corteza, es esencial para comprender la evolución geológica y geodinámica de una región. La interferometría de ruido sísmico permite superar las limitaciones de las técnicas que utilizan como fuentes los terremotos o las fuentes artificiales. Esta técnica implica la extracción de la función de Green del medio entre dos estaciones a partir de la correlación simétrica, calculada para el apilamiento de las correlaciones cruzadas de registros continuos de ruido sísmico.

El objetivo de este trabajo es avanzar en el conocimiento de la estructura sísmica de la cuenca Chaco-Paraná con el fin de investigar acerca de su evolución y actual geodinámica implementando estas técnicas modernas, aprovechando la instalación de nuevas estaciones sísmicas en la región noreste de Argentina. En particular, se pretende estudiar las principales características de la corteza de la cuenca en sus primeros kilómetros mediante el análisis de curvas de dispersión y su posterior inversión, utilizando interferometría de ruido sísmico.





# Capítulo 2

## Interferometría sísmica

### 2.1. Marco teórico

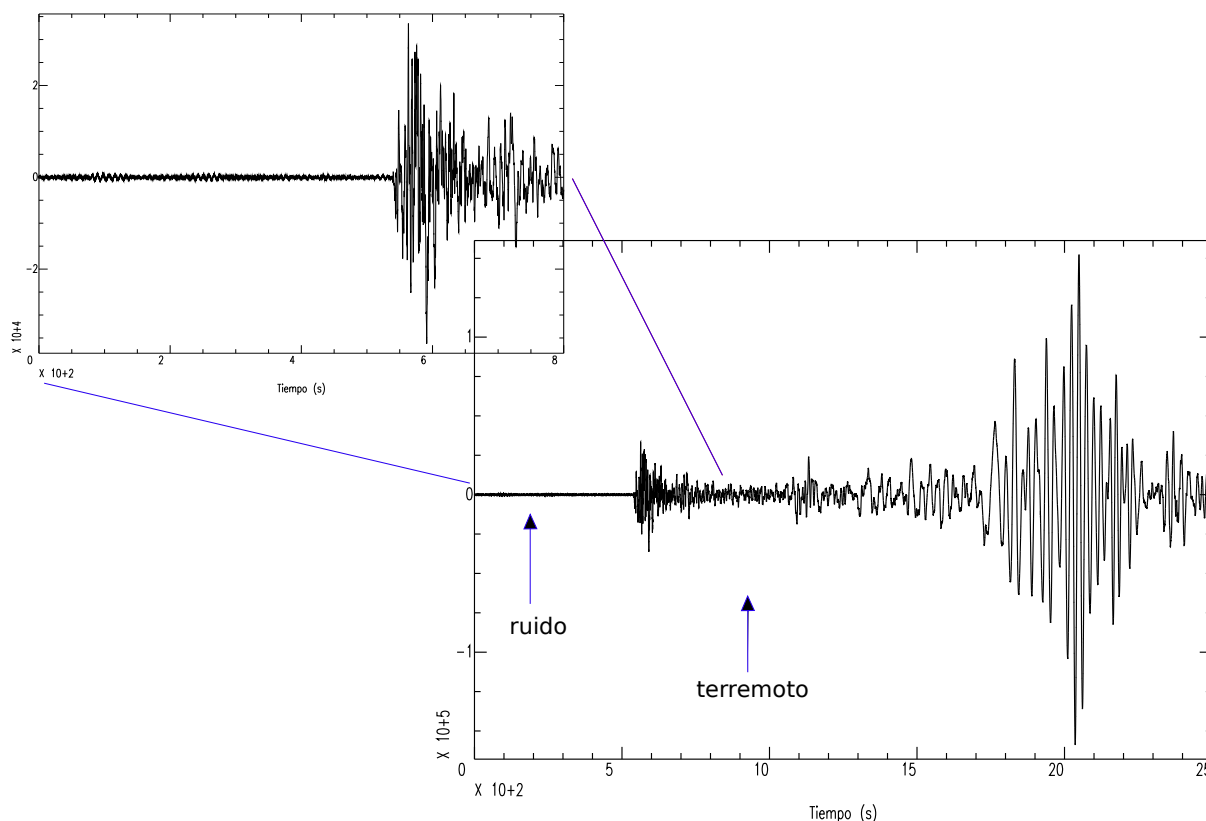
En los últimos años ha habido un gran avance en las técnicas aplicadas para resolver y mapear detalles finos de la estructura sísmica de la Tierra. Hasta el año 2000 las fuentes utilizadas para determinar esa estructura eran terremotos o fuentes artificiales. Luego se introdujo el concepto de interferometría sísmica mediante el cual es posible estimar la estructura interna de la Tierra a través de un campo de ondas. Una de las formas de aplicar esta técnica consiste en calcular la correlación cruzada del ruido sísmico registrado entre pares de estaciones, para obtener información de las propiedades del subsuelo, sin necesidad de la ocurrencia de un terremoto.

Dado que el ruido sísmico es una fuente natural continua, detectable en cualquier lugar de la Tierra y con un contenido de frecuencias amplio, es posible a partir de este método realizar estudios de estructura a diferentes escalas, monitorear una región ininterrumpidamente o detectar las fuentes principales de ruido, entre otros. En todos los casos, la resolución obtenida dependerá del número, la geometría y la distancia entre las estaciones sísmicas. Esto permite iluminar las heterogeneidades de manera más uniforme que con ondas generadas por terremotos, cuya ocurrencia espacial y temporal está limitada por su distribución inhomogénea de fuentes.

La interferometría sísmica ha supuesto una revolución en la sismología dado el elevado número de aplicaciones que se están generando.

#### 2.1.1. Ruido sísmico

También llamado ruido ambiente o ruido sísmico ambiental. Es el registro temporal continuo de un sismómetro que no contiene eventos sísmicos tales como un terremoto o una explosión (Figura 2.1).



**Figura 2.1.** Registro sísmico de la componente vertical de 40 minutos de duración obtenido en la estación TBOT, donde se observa ruido sísmico previo a la llegada de un terremoto ocurrido en México el 08/09/2017 de magnitud 8.0 Mw.

Previamente al año 2000, el ruido sísmico era una señal no deseada que se removía de los registros sísmicos para poder analizar eventos, como por ejemplo el arribo de un terremoto. Luego se demostró desde el marco teórico (Lobkis and Weaver, 2001; Derode et al., 2003; Wapenaar, 2004; Snieder, 2004; Roux et al., 2005; Larose et al., 2005; Wapenaar et al., 2006; Snieder et al., 2007) y práctico (Campillo and Paul, 2003; Paul et al., 2005; Shapiro and Campillo, 2004; Sabra et al., 2005; Roux et al., 2005; Schimmel et al., 2011) que el ruido sísmico sirve para determinar las propiedades de la propagación de ondas sísmicas entre dos receptores, donde uno de ellos es considerado como fuente virtual. Es por esto, entre otras cosas, que en la actualidad tanto el registro como el almacenamiento de señales sísmicas son continuos.

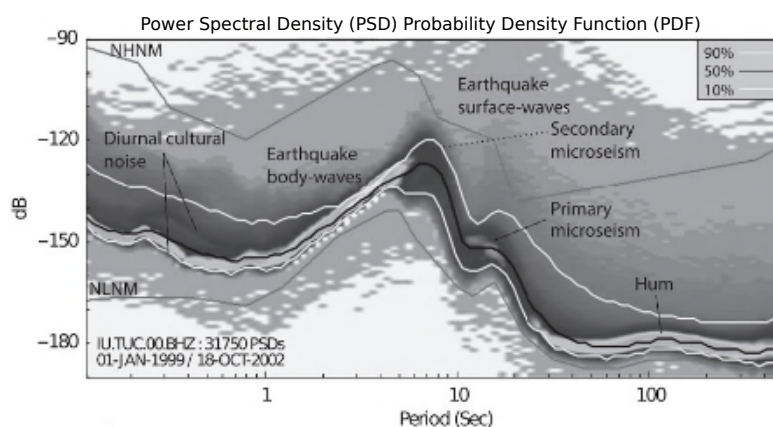
El ruido tiene básicamente dos orígenes diferentes: natural o artificial, que difieren en el contenido de frecuencia (Bonnefoy-Claudet et al., 2006). El espectro de frecuencias abarca un rango amplio que va desde  $10^{-3}$  Hz hasta  $10^1$  Hz. En frecuencias por debajo de 1 Hz las fuentes son naturales (los océanos y las condiciones meteorológicas a gran escala); en frecuencias intermedias (1 a 5 Hz) las fuentes son naturales (condiciones meteorológicas locales) o artificiales (urbanas, industriales, actividades mineras, agrícolas, etc); y en frecuencias más altas las fuentes son esencialmente culturales cercanas al receptor (Tabla 2.1).

	Gutenberg (1958)	Asten (1978) Asten and Henstridge (1984)
Olas oceánicas golpeando en las costas	0.05-0.1 Hz	0.5-1.25 Hz
Monzones y perturbaciones meteorológicas a gran escala	0.1-0.25 Hz	0.16-0.5 Hz
Ciclones sobre los océanos	0.3-1 Hz	0.5-3 Hz
Condiciones meteorológicas a escala local	1.4-5 Hz	
Tremor volcánico	2-10 Hz	
Urbano	1-100 Hz	1.4-30 Hz

**Tabla 2.1.** Fuentes de ruido ambiental en función de la frecuencia. *Extraída y modificada de Bonnefoy-Claudet et al. (2006).*

La señal con menor frecuencia está relacionada con las oscilaciones libres de la Tierra y se denomina “hum”. Dicha señal está generada por vibraciones continuas del océano y la atmósfera en el rango de  $10^{-3}$  -  $10^{-2}$  Hz (Nishida et al., 2009).

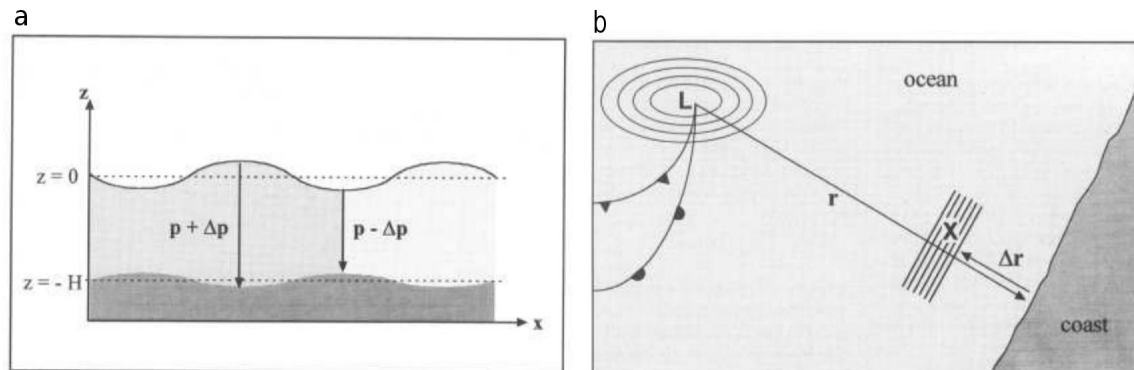
Los eventos sísmicos como son los terremotos, abarcan un amplio rango del espectro que dependerá de la fuente del mismo, la estructura del medio y de la distancia que recorren las ondas sísmicas (desde  $10^{-2}$  hasta  $10^1$  Hz). Un registro sísmico de ruido que no contenga señales debido a la actividad antropogénica o a la presencia de un terremoto, tendrá señales que dominan el espectro en el rango 0.02 - 0.4 Hz conocido como “banda microsísmica”. Dentro de esta banda el espectro del ruido sísmico está dominado por dos picos microsísmicos (primario y secundario), cuyos máximos se observan alrededor de los 15 y 7 s de período respectivamente (Figura 2.2). El ancho, amplitud y período en el que prevalecen, dependen de la localización del receptor respecto a la costa, de la latitud y de la época del año ya que su generación está directamente vinculada con la actividad oceánica (Webb, 2007), dependiente a su vez de la ocurrencia de tormentas.



**Figura 2.2.** Ejemplo de los principales componentes presentes en el espectro del ruido ambiente. Los microsismos primario (Primary Microseism) y secundario (Secondary Microseism) están indicados. *Extraída y modificada de McNamara and Boaz (2019).*

El microsismo primario se genera en aguas someras mediante la interacción de las olas con el fondo marino. La energía de las ondas del agua es convertida en energía sísmica a través de las variaciones verticales de presión o a través de las olas cuando rompen en la playa (Hasselmann, 1963; Haubrich et al., 1963) (Figura 2.3-a).

Por otro lado, el mecanismo de generación del microsismo secundario está relacionado con la superposición de ondas del océano de igual período pero con dirección de propagación opuesta (Longuet-Higgins, 1950; Tanimoto, 2007). Esta superposición genera ondas superficiales en el suelo oceánico que oscilan al doble de la frecuencia de las ondas originales. Por ejemplo, las ondas generadas en zonas de bajas presiones pueden interactuar con las ondas reflejadas en la costa como se observa en la Figura 2.3-b. Las interacciones pueden ser con ondas generadas por una misma tormenta o incluso por diferentes tormentas separadas cientos a miles de kilómetros y días (Ardhuin et al., 2011). La excitación más eficiente de ondas sísmicas se da para frecuencias a las cuales las perturbaciones de presión están en resonancia con el agua (Stutzmann et al., 2012; Gualtieri et al., 2013). Una característica de los microsismos oceánicos (primario y secundario) es que experimentan poca atenuación por lo que se pueden propagar cientos de kilómetros tierra dentro. Además, el ruido microsísmico está presente en todo el globo terrestre.



**Figura 2.3.** Esquema de los mecanismos de generación de microsismos: a) primario y b) secundario. En el caso del microsismo secundario, la zona de interacción de ondas con direcciones de propagación opuestas está indicada con X y L representa una zona de baja presión. *Extraída de Friedrich et al. (1998).*

### 2.1.2. Correlación cruzada

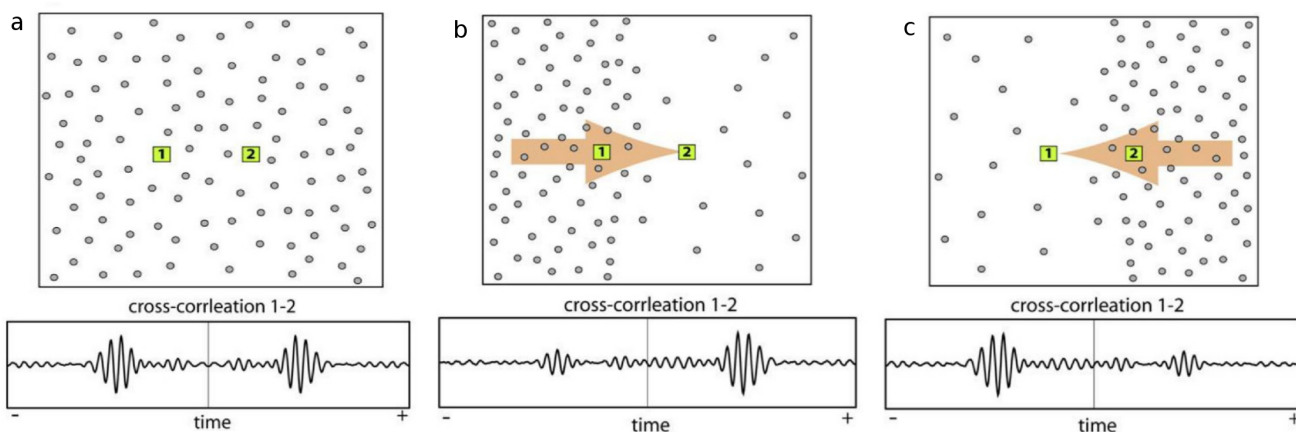
La correlación cruzada es una operación que mide la semejanza entre dos series temporales identificando el tiempo de retraso o “lag time” como se suele llamar en inglés, que se define como el tiempo que una de las señales está desfasada respecto a la otra. La correlación cruzada  $C(\tau)$  de dos señales temporales

$u_1(t)$  y  $u_2(t)$  está definida por la ecuación:

$$C(\tau) = u_1(t) * u_2(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u_1(t)u_2(t + \tau)dt \quad (2.1)$$

donde  $*$  es el operador de correlación cruzada,  $t$  el tiempo,  $\tau$  el tiempo de retraso o tiempo que se desplaza la función  $u_2(t)$  respecto a  $u_1(t)$ .

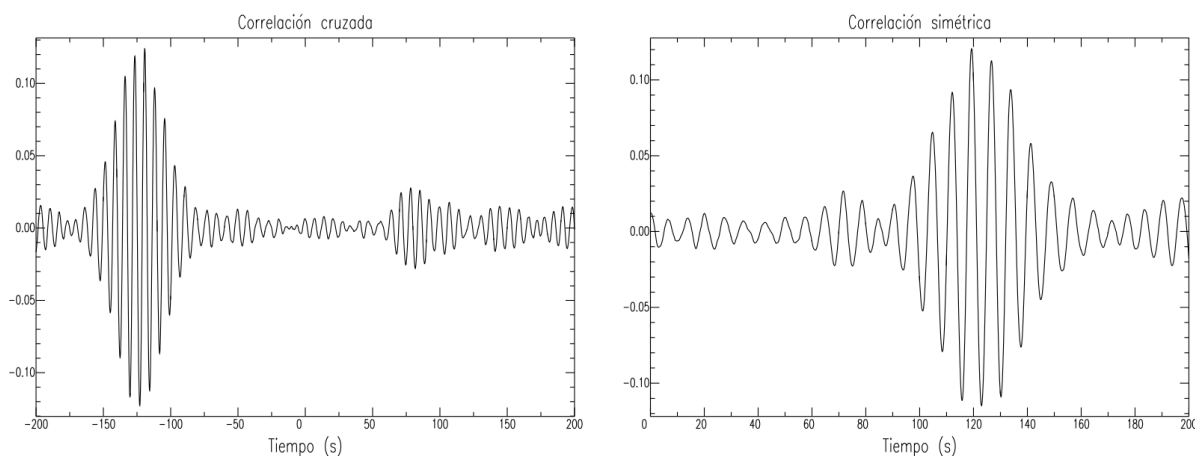
Se ha demostrado teóricamente que si se considera una distribución espacial aleatoria de fuentes de ruido, la correlación cruzada de la señal registrada en dos estaciones converge a la función de Green del medio que existe entre ellas (Weaver, 2005; Gouédard et al., 2008). La correlación cruzada de los registros de ruido ambiente entre dos estaciones está compuesta por una parte causal (con tiempo de retraso positivo) y otra acausal (con tiempo de retraso negativo). Dado que el ruido sísmico proviene de todas las direcciones, las correlaciones contendrán energía en ambas partes, siendo simétricas respecto del tiempo de retraso cero si las fuentes de ruido están distribuidas homogéneamente en el espacio (Figura 2.4-a). En la práctica esto no ocurre porque generalmente el campo ondulatorio no es isótropo ya que las fuentes no están distribuidas de forma homogénea y por lo tanto la energía no es la misma en todas las direcciones. Debido a esto la correlación cruzada de dos registros de ruido sísmico suele ser asimétrica (Figura 2.4-b y 2.4-c).



**Figura 2.4.** Ilustración del efecto en la correlación cruzada entre dos receptores 1 y 2, para una distribución de fuentes de ruido sísmico a) homogénea, b) y c) no homogénea. *Extraída y modificada de Stehly et al. (2006).*

En el caso de la correlación cruzada asimétrica, se calcula la media entre la parte causal y la acausal con el fin de obtener lo que se denomina señal o correlación simétrica (Figura 2.5). El cálculo de la señal simétrica promedia el efecto de fuentes de ruido distribuidas en forma no homogénea e incrementa la energía de fases coherentes frente a la de las señales incoherentes. Normalmente,

la extracción de información de ondas superficiales a través de la medición de velocidades se suele realizar considerando la señal simétrica.



**Figura 2.5.** Correlación cruzada de ruido sísmico registrado el día 21/03/2017 en las estaciones AZCA y ARAP (izquierda) y la correspondiente correlación simétrica (derecha). La ubicación de las estaciones puede verse en la Figura (2.6).

### 2.1.3. Función de Green

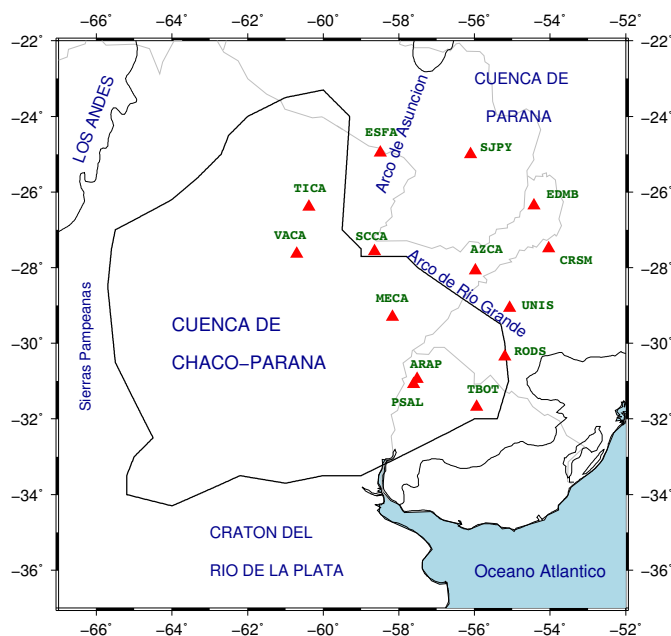
La función de Green se define como la respuesta del medio a una fuerza impulsiva y su estimación permite predecir el comportamiento del suelo frente a ciertas perturbaciones.

Con el fin de obtener las funciones completas de Green, las fuentes que generan ruido sísmico deben estar distribuidas uniformemente en el subsuelo (Wapenaar, 2004). En general el ruido sísmico no está uniformemente distribuido y la mayor parte de las fuentes que lo generan están cerca de la superficie (Snieder, 2004; Kedar et al., 2008), por lo que el ruido está compuesto principalmente por ondas superficiales, con mayor energía en el modo fundamental. Sin embargo, es posible reconstruir parcialmente la función de Green del medio entre dos receptores considerando la energía correspondiente a las ondas superficiales que se propagan entre ellos.

## 2.2. Aplicación de la técnica

### 2.2.1. Datos utilizados

Para realizar este estudio se utilizaron registros sísmicos de 14 estaciones de banda ancha de la red XC (Figura 2.6, Tabla 2.2) perteneciente al proyecto Pantanal-Chaco-Paraná Basins (PCPB): Crust and Upper Mantle Seismic Structure and Evolution (Proyecto Tres Cuencas), acreditado por el FAPESP (Fundação de Amparo á Pesquisa do Estado de São Paulo) Research Program. Estos datos son obtenidos a través del Centro de Sismología de la Universidad de São Paulo (<http://moho.iag.usp.br>), que es la institución responsable de la adquisición, mantención y divulgación de los mismos. El Departamento de Sismología tiene acceso a estos datos a través de un convenio firmado entre el Instituto de Astronomía, Geofísica y Ciencias Atmosféricas de la Universidad de São Paulo (IAG-USP), Brasil y la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata (FCAG-UNLP).



**Figura 2.6.** Localización de las estaciones utilizadas en este trabajo. Los límites de la cuenca Chaco-Paraná corresponden a Dragone et al. (2012).

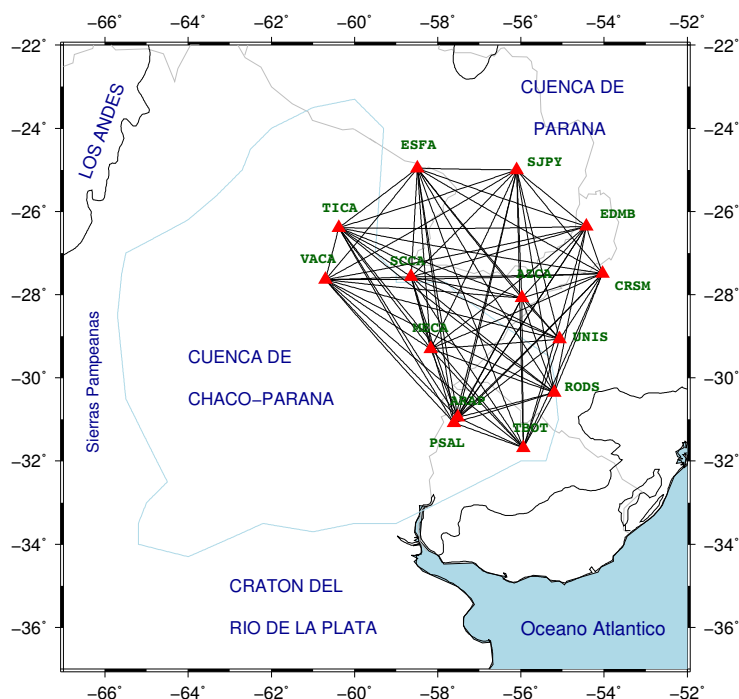
Dado que se utilizaron 14 estaciones se obtendrían 91 trayectorias de ondas superficiales:

$$n = 14 \rightarrow n(n - 1)/2 = 91, \quad (2.2)$$

debido a que la estación ARAP fue reemplazada por la estación PSAL no se realiza la correlación entre ambas, por lo que se tienen 90 trayectorias y no 91 (Figura 2.7).

Nombre	Inicio	Fin	Lon.[°]	Lat.[°]	Elev.[m]	Ubicación
ARAP	01/01/2017	29/01/2018	-57.52	-30.95	40	Arapey, Salto, Uruguay.
PSAL	01/02/2018	-	-57.61	-31.0	66	Palomas, Salto, Uruguay
TBOT	01/01/2017	-	-55.94	-31.68	160	Tacuarembó, Uruguay
TICA	05/12/2016	02/07/2018	-60.38	-26.39	101	Tres Isletas, Corrientes, Argentina
VACA	11/12/2016	01/07/2018	-60.7	-27.64	83	Villa Angelo, Chaco, Argentina
SCCA	06/01/2017	04/07/2018	-58.64	-27.57	28	San Cayetano, Corrientes, Argentina
ESFA	09/12/2016	02/07/2018	-58.49	-24.96	86	Espinillo, Formosa, Argentina
MECA	21/08/2016	05/07/2018	-58.17	-29.30	93	Mercedes, Corrientes, Argentina
AZCA	16/08/2016	06/07/2018	-55.98	-28.08	212	Azaras, Corrientes, Argentina
EDMB	28/07/2016	07/07/2018	-54.43	-26.36	228	Misiones, Argentina
RODS	07/05/2016	07/10/2018	-55.20	-30.35	241	Rosario do Sul, Brasil
UNIS	05/05/2016	14/10/2018	-55.07	-29.07	319	Unistalda, Brasil
CRSM	17/05/2016	13/10/2018	-54.04	-27.49	304	Crissiumal, Brasil
SJPY	16/03/2017	-	-56.10	-25	377	San Joaquín, Paraguay

**Tabla 2.2.** Fecha de actividad y ubicación de las 14 estaciones de la red XC utilizadas en este trabajo.



**Figura 2.7.** Trayectorias entre las estaciones utilizadas. Los límites de la cuenca Chaco-Paraná corresponden a Dragone et al. (2012).

### 2.2.2. Preprocesamiento de los datos

Con el fin de calcular las correlaciones cruzadas de ruido sísmico, los datos fueron preprocesados teniendo en cuenta los siguientes pasos (Buffoni, 2017):



- **Obtención de los datos:** se extrajeron registros sísmicos de la componente vertical entre el 16 de marzo de 2017 y el 01 de julio de 2018, en formato SAC (Tapley and Tull, 2000), con 24 hs. de duración. Se eliminaron registros que tuvieran irregularidades o gaps con el fin de tener registros continuos para la posterior correlación cruzada.
- **Remoción de la media y la tendencia:** son dos procesos utilizados comúnmente en el tratamiento de señales sísmicas y se suelen realizar mediante el software SAC con los comandos “rmean” y “rtrend”. La remoción de la media consiste en desplazar la línea media del registro al nivel cero. La remoción de la pendiente consiste en eliminar del registro cualquier sesgo con el fin de obtener una media horizontal.
- **Remoción de la respuesta de instrumento:** consiste en realizar la deconvolución del registro con la respuesta del instrumento en la banda de frecuencias de interés, para eliminar el efecto del sensor en cada registro y poder comparar los datos registrados en estaciones sismológicas equipadas con diferentes instrumentos. La respuesta se remueve mediante el software SAC y el resultado final son registros de desplazamiento del suelo.
- **Corte de los extremos:** el filtrado afecta a la forma de la onda disminuyendo la amplitud de los extremos del registro, efecto que se conoce con el nombre de tapering. Por esto, es necesario cortar los extremos del registro luego de realizar la deconvolución del mismo con la respuesta del instrumento. Es conveniente realizar este paso antes de decimar el registro y no después, ya que el corte puede introducir un error al tiempo inicial que es proporcional al intervalo de muestreo, y al decimar este intervalo aumenta. Es decir, cuanto menor sea el intervalo de muestreo, menor será el error en el tiempo inicial al cortar el registro.
- **Decimación:** su objetivo consiste en reducir el tiempo de cómputo mediante la reducción del número de muestras del registro. Los datos originales estaban obtenidos a 100 mps, y fueron decimados a 10 mps, lo que significa una frecuencia de Nyquist de 5 Hz, suficiente para la extracción de ondas superficiales.
- **Filtro pasabanda:** se filtraron los datos con un pasabanda cuya frecuencia máxima fue fijada en 0.4 Hz, mientras que la frecuencia mínima se fijó en 0.07 Hz en función de las distancias entre pares de estaciones, de manera que se cumpla la condición de contener al menos tres longitudes de onda.

### 2.2.3. Cálculo de las correlaciones cruzadas

Luego del preprocesamiento de los datos, se calcularon las correlaciones cruzadas entre pares de estaciones. El número de correlaciones calculadas depende

de los días de registro que tuvieran en común los pares de estaciones.

Se aplicó la técnica conocida como *phase cross – correlation* (PCC) (Schimmel, 1999) que se basa en la coherencia de fase de señales analíticas. La señal analítica  $s(t)$  de una serie temporal  $u(t)$  se define como:

$$s(t) = u(t) + iH[u(t)], \quad (2.3)$$

siendo  $H[u(t)]$  la transformada de Hilbert de la serie temporal  $u(t)$ . La forma exponencial de la señal analítica  $s(t)$  se puede escribir como:

$$s(t) = a(t)e^{i\phi(t)}, \quad (2.4)$$

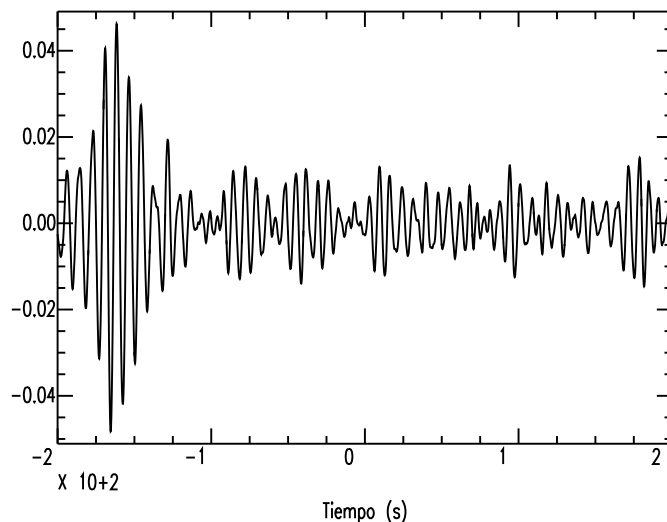
siendo  $a(t)$  la envolvente y  $\phi(t)$  la fase instantánea. De esta manera la PCC queda definida de la siguiente forma:

$$C_{pcc}(t) = \frac{1}{2T} \sum_{\tau=\tau_0}^{\tau_0+T} [ |e^{i\phi(t+\tau)} + e^{i\psi(\tau)}|^\nu - |e^{i\phi(t+\tau)} - e^{i\psi(\tau)}|^\nu ], \quad (2.5)$$

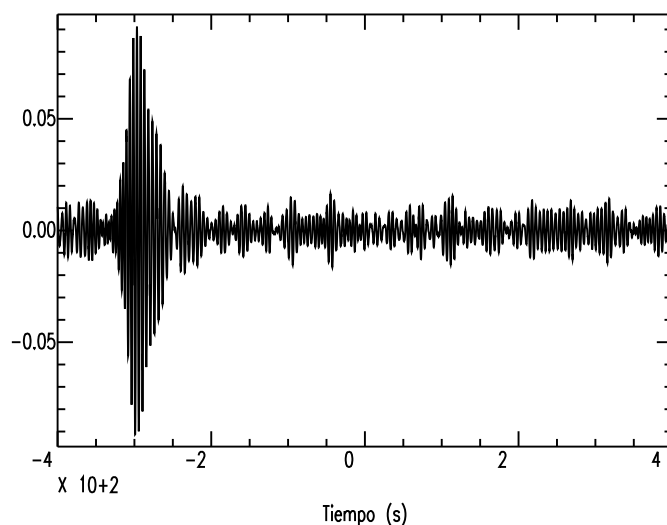
en este caso  $C_{pcc}$  mide la similitud de dos series temporales  $u_1$  y  $u_2$  como funciones del tiempo de retraso. Las fases instantáneas de  $u_1$  y  $u_2$  son  $\phi(\tau)$  y  $\psi(\tau)$  respectivamente. La sensibilidad de  $C_{pcc}(t)$  se puede aumentar utilizando la potencia  $\nu > 1$ . En este trabajo se utiliza únicamente  $\nu = 1$ . Además, la norma de PCC es  $|C_{pcc}| \leq 1$ , indicando una perfecta correlación cuando  $C_{pcc} = 1$  y una anticorrelación cuando  $C_{pcc} = -1$ .

Esta técnica permite evitar la normalización temporal y espectral, para influir lo mínimo posible en la forma de onda, además de eliminar un paso del preprocesamiento de la señal. Esto se debe a que la PCC es más sensible a la semejanza de la forma de onda, pero menos sensible a grandes amplitudes que la correlación cruzada convencional (Schimmel et al., 2011).

Las distancias entre las estaciones utilizadas van desde 131 Km hasta 785.2 Km, lo que requiere ajustar el tiempo de retraso utilizado para el cálculo de las correlaciones de manera de poder observar la llegada de las ondas Rayleigh. Realizando pruebas se determinó que un tiempo de retraso de 200 s es suficiente para distancias menores a 460 Km. Para distancias mayores, se utilizó un tiempo de retraso de 400 s, el mínimo necesario para observar las ondas Rayleigh en las correlaciones entre el par de estaciones más alejadas. A modo de ejemplo, en la Figura 2.8 se muestra una correlación entre las estaciones SJPY y TICA, distanciadas 456.1 Km, calculada con tiempo de retraso 200 s y en la Figura 2.9 se muestra una correlación entre las estaciones SJPY y TBOT, distanciadas 740.2 Km, calculada con tiempo de retraso 400 s.



**Figura 2.8.** Correlación cruzada (PCC) entre las estaciones SJPY y TICA, distanciadas 456.1 Km, calculada con tiempo de retraso 200 s.



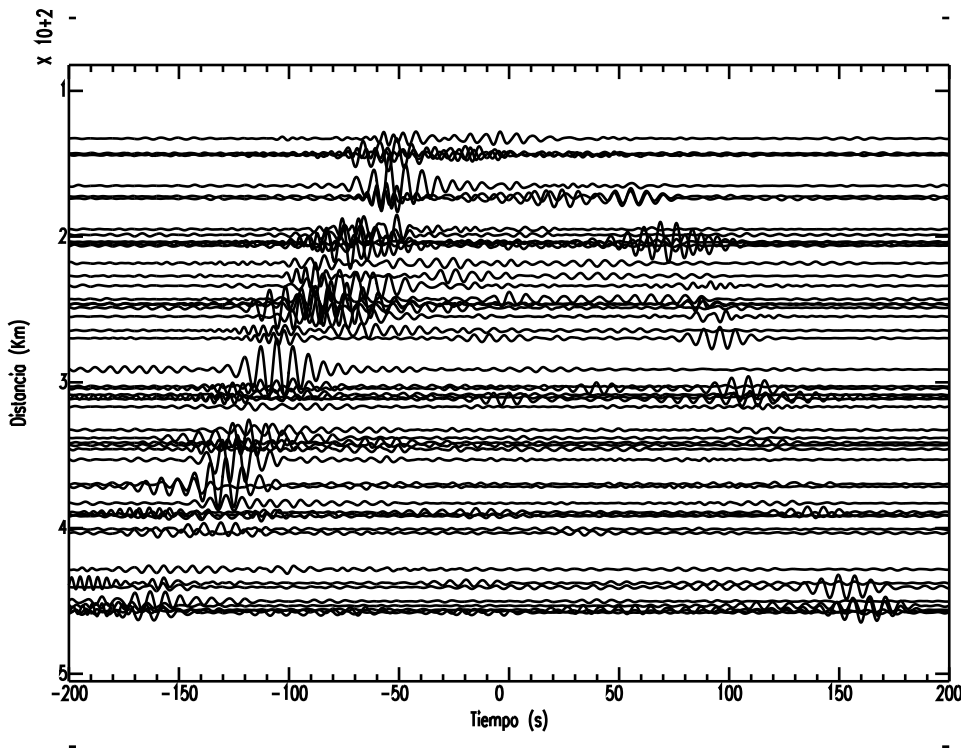
**Figura 2.9.** Correlación cruzada (PCC) entre las estaciones SJPY y TBOT, distanciadas 740.2 Km, calculada con tiempo de retraso 400 s.

#### 2.2.4. Apilado de las correlaciones cruzadas

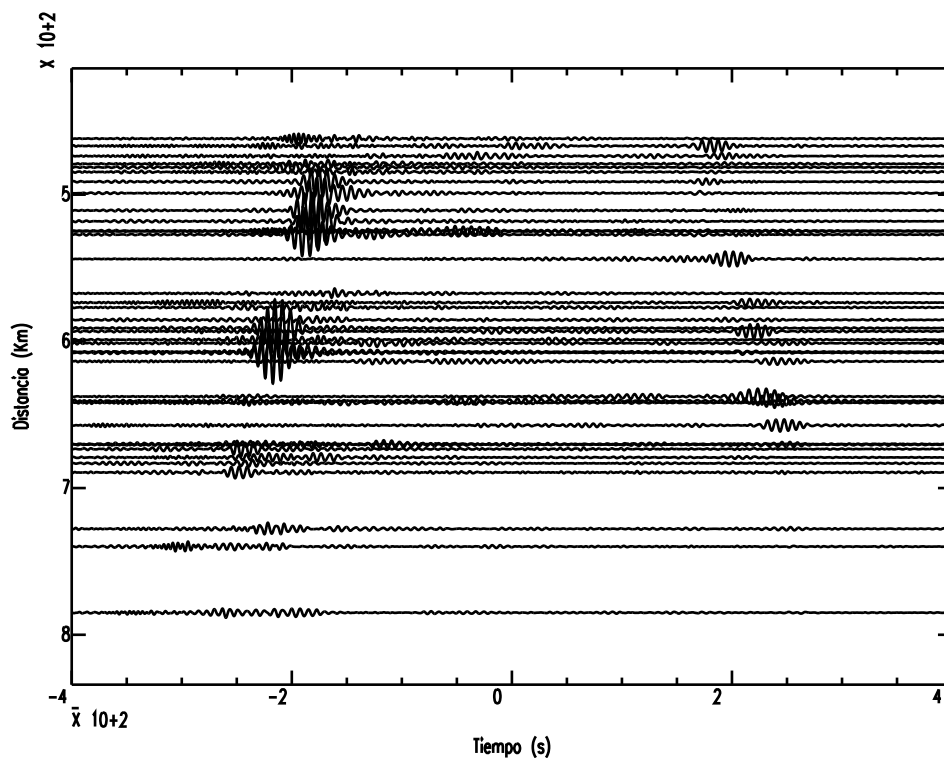
El apilado o stack consiste en sumar las correlaciones cruzadas calculadas con trazas registradas en diferentes rangos de tiempo para el mismo par de estaciones. Este procedimiento se lleva a cabo con el fin de aumentar la proporción de

señal coherente frente a la señal incoherente de la correlación, y aproximar a la condición teórica de una distribución isotropa de fuentes de ruido sísmico. El registro de ruido varía con la época del año, lo que se observa en los cambios de la forma de onda de las correlaciones. Esto se debe a que el origen del ruido sísmico está vinculado con los océanos y costas, como ya se ha mencionado. La suma de las correlaciones cruzadas de registros en distintas épocas del año promedia las variaciones de los cambios de forma que pueden surgir por la variabilidad estacional. Generalmente cuanto mayor sea el número de correlaciones sumadas, mejor se verá la señal coherente (Bensen et al., 2007).

En este trabajo se utilizó el stack lineal, realizando la suma lineal de las correlaciones cruzadas en el dominio del tiempo. El número de correlaciones apiladas varía entre 54 y 468, dependiendo de la cantidad de correlaciones calculadas entre cada par de estaciones. En la Figuras (2.10) y (2.11) se muestra el apilado lineal de las correlaciones en función de las distancias entre pares de estaciones.



**Figura 2.10.** Apilado lineal de las correlaciones cruzadas (PCC) de registros de ruido sísmico, calculadas con tiempo de retraso 200 s.

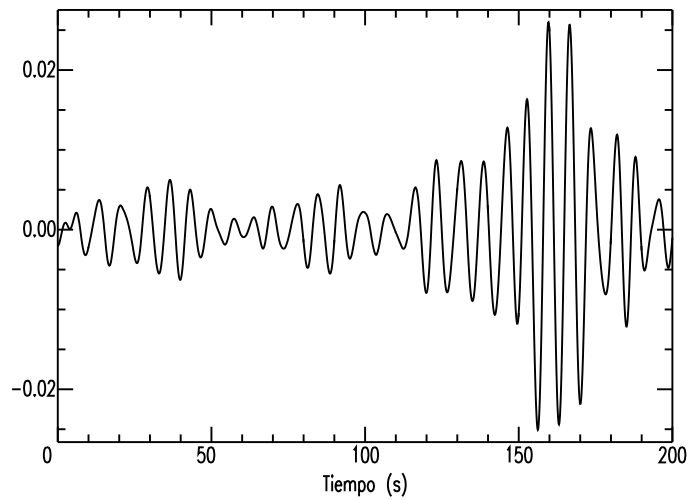


**Figura 2.11.** Apilado lineal de las correlaciones cruzadas (PCC) de registros de ruido sísmico, calculadas con tiempo de retraso 400 s.

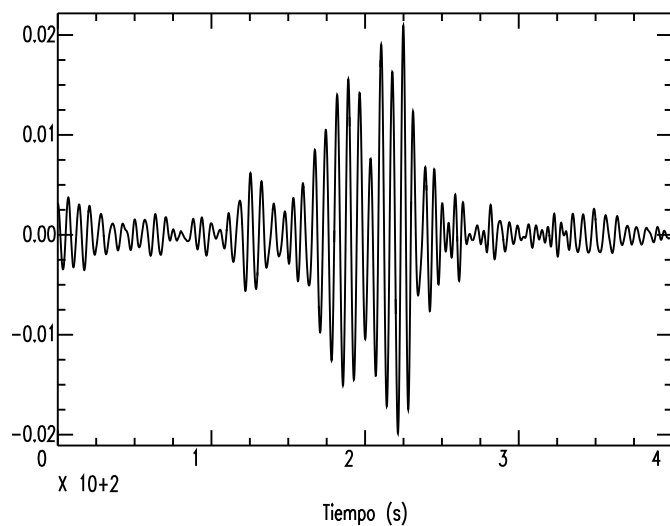
### 2.2.5. Correlación simétrica

Se calcula la correlación simétrica para cada trayectoria, y luego, a partir de ella se obtienen las curvas de dispersión, con el fin de extraer información de la estructura media entre pares de estaciones. La forma más común de cálculo de la correlación simétrica es realizar la media de la parte causal y acausal.

En las Figuras (2.12) y (2.13) se muestran ejemplos de las correlaciones simétricas calculadas a partir de las correlaciones cruzadas entre dos pares de estaciones, la primera con tiempo de retraso 200 s y la segunda con tiempo de retraso 400 s. El resto de las correlaciones simétricas se muestran en el Apéndice A, en el cual se encuentra también una tabla con las distancias entre estaciones.



**Figura 2.12.** Correlación simétrica obtenida a partir de las correlaciones cruzadas entre las estaciones EDMB y RODS, calculadas con tiempo de retraso 200 s. La distancia entre estaciones es 448.4 Km.



**Figura 2.13.** Correlación simétrica obtenida a partir de las correlaciones cruzadas entre las estaciones EDMB y TBOT, calculadas con tiempo de retraso 400 s. La distancia entre estaciones es 607.5 Km.

# Capítulo 3

## Curvas de dispersión

Existen dos tipos de ondas superficiales: las ondas Rayleigh y las ondas Love. Una de las características principales de las ondas superficiales es que presentan el fenómeno de dispersión, es decir, que su velocidad depende de la frecuencia. Además, son sencillas de detectar y medir en registros de ruido sísmico, ya que el ruido está compuesto mayoritariamente por este tipo de ondas. Incluso pueden registrarse a grandes distancias, debido, en parte, a que su atenuación por expansión geométrica es proporcional a  $1/\sqrt{r}$ , donde  $r$  es la distancia.

A partir de las correlaciones cruzadas de registros de ruido sísmico es posible extraer información acerca de la dispersión de las ondas superficiales a través del cálculo de velocidades de grupo o de fase.

La dispersión es utilizada para determinar las características del medio por el que se propagan las ondas, pues, en un medio con distintas propiedades elásticas, las ondas superficiales con distintas longitudes de onda se propagan a velocidades que dependen de las propiedades de este medio. Los períodos cortos ( $T \leq 10$  s) generan información sobre estructuras corticales superficiales, mientras que los períodos mayores ( $T = 30$  s) son sensibles a contrastes en la corteza inferior y al espesor de la corteza.

Calculando las velocidades de propagación de las ondas superficiales es posible realizar gráficos de velocidad en función del período. A partir de estos gráficos o curvas de dispersión, y mediante un proceso de inversión, se pueden inferir ciertas características del medio por el que se propagaron las ondas.

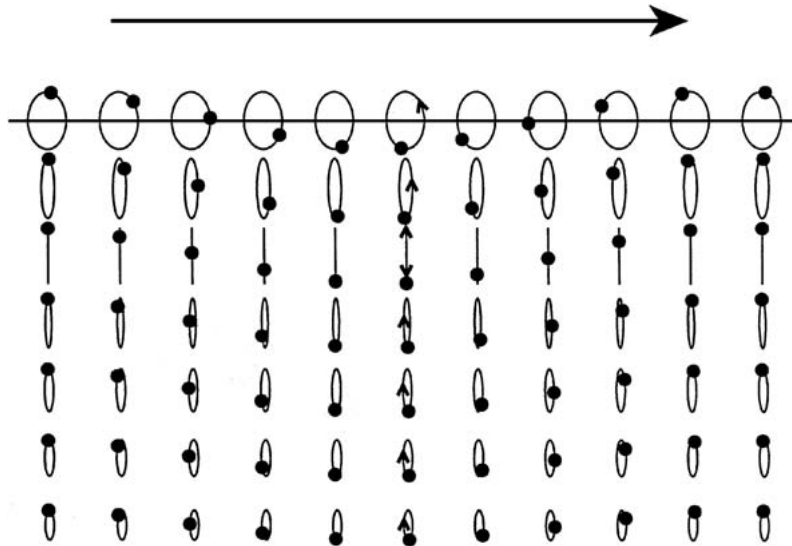
### 3.1. Ondas superficiales

Si se considera un medio elástico con una superficie libre, las ondas Rayleigh pueden generarse y propagarse a través del medio. En el caso de las ondas Love existen además otras restricciones para su formación.

Cada una de las ondas superficiales presenta un modo fundamental y un número finito de modos superiores, para los que la amplitud se hace cero en los nodos y se caracterizan por viajar más rápido que el modo fundamental. En este

trabajo nos centramos en la extracción de ondas Rayleigh (modo fundamental) y en el cálculo de sus velocidades de dispersión.

Las ondas Rayleigh se generan por la superposición constructiva de ondas P y SV en la superficie libre de la Tierra. El desplazamiento de las partículas del medio tiene lugar en el plano vertical, perpendicular a la dirección de propagación. Este movimiento es elíptico y retrógrado en la superficie, cambiando a una cierta profundidad a un movimiento directo (Figura 3.1).



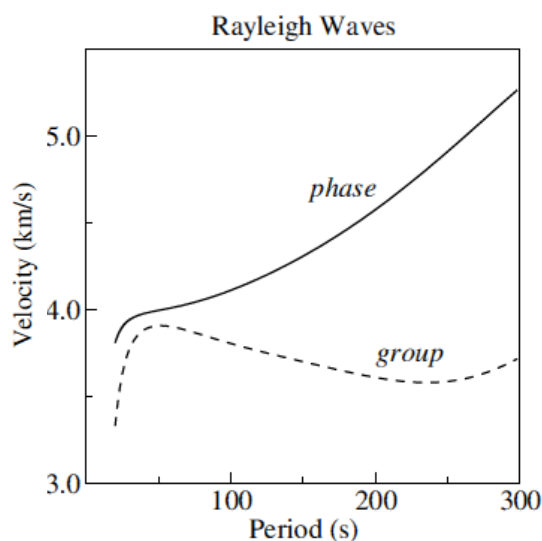
**Figura 3.1.** Movimiento generado por las ondas Rayleigh. *Extraída de Shearer (2009).*

La velocidad de las ondas superficiales se puede medir como la velocidad con que se propaga la fase de cada componente armónico (velocidad de fase) o como la velocidad de la onda envolvente que transporta la energía (velocidad de grupo). En el caso de una onda monocromática en un medio homogéneo, la velocidad de fase es igual a la velocidad de grupo.

La velocidad de fase se define como:  $c(\omega) = \omega/k$ , donde  $\omega$  es la frecuencia angular y  $k$  es el número de onda, que está definido por:  $k = 2\pi/\lambda$ , con  $\lambda$  longitud de onda. La velocidad de grupo se define como:  $U(\omega) = d\omega/dk$ .

La velocidad de grupo y de fase son principalmente sensibles a la velocidad de onda S en función de la profundidad y del período. En particular, la velocidad de grupo es sensible a estructuras más superficiales que la de fase para un mismo período (Ritzwoller and Levshin, 1998).





**Figura 3.2.** Curvas de dispersión para el modo fundamental de ondas Rayleigh. *Extraída de Shearer (2009), calculadas a partir del modelo isotrópico PREM (Preliminary Reference Earth Model) por G. Laske.*

### 3.2. Obtención de las curvas de dispersión

Las curvas de dispersión de ondas superficiales se obtenían normalmente de los registros de terremotos superficiales. A raíz de los trabajos de Shapiro et al. (2005) y Sabra et al. (2005) se comienza a medir la velocidad de ondas Rayleigh a partir de la correlación simétrica del apilamiento de las correlaciones cruzadas de ruido sísmico. Los métodos utilizados son los mismos, independientemente de si son sismogramas o correlaciones de ruido.

Las curvas de dispersión de la velocidad de grupo en función del período de las ondas superficiales, a partir de las correlaciones de ruido sísmico, se calcularon utilizando un análisis frecuencia-temporal aplicando la técnica de filtrado múltiple (Dziewonski et al., 1969). Esta técnica utiliza filtros gaussianos de ancho de banda angosto en el dominio de la frecuencia para tener información de cada frecuencia central o de interés,

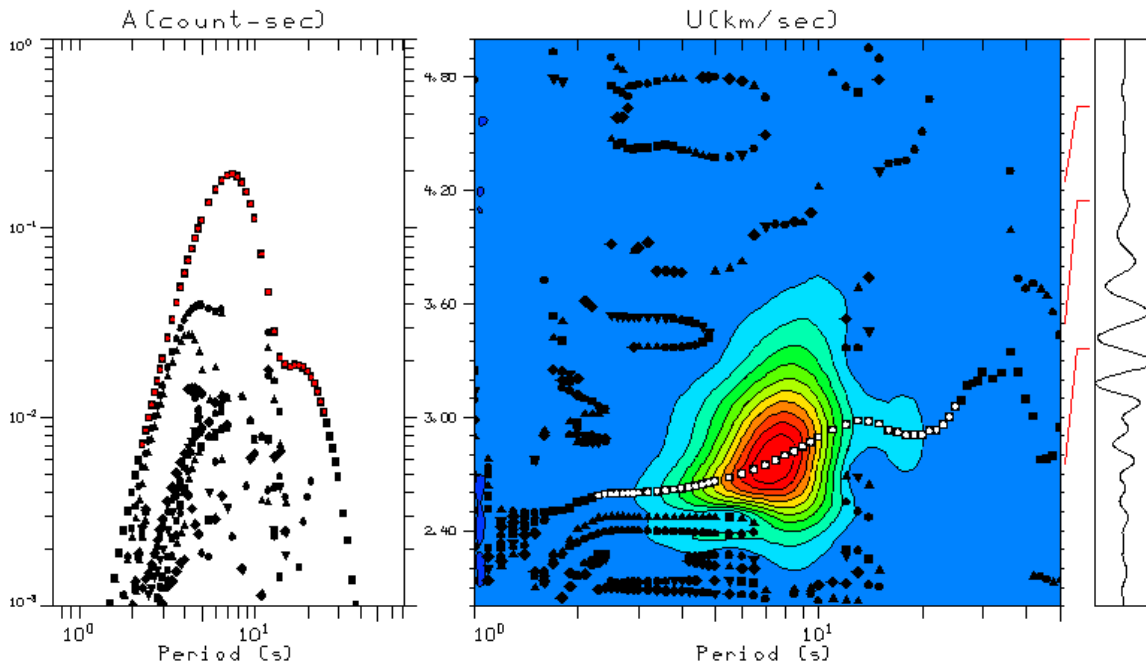
$$H_n(\omega) = e^{-\alpha\left(\frac{\omega-\omega_n}{\omega_n}\right)^2}, \quad (3.1)$$

donde  $\omega_n$  es la frecuencia central del filtro y  $\alpha$  es el parámetro que define el ancho de banda del filtro. La elección de un ancho de banda representa un compromiso entre la resolución tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia, debido a que una mejora en un dominio causa el efecto contrario en el otro.

En este trabajo se utilizó el código *do\_mft* del software Computer Programs in Seismology (Herrmann, 2013). En el mismo se sugiere que el valor de  $\alpha$  varíe con la distancia entre estaciones, basándose en Levshin et al. (1972) que recomienda, a partir de pruebas realizadas en distintos datos globales, utilizar

valores del ancho del filtro gaussiano variables con la distancia. En este caso se uso  $\alpha = 6.25$  para distancias hasta 500 Km y  $\alpha = 12.5$  para distancias mayores.

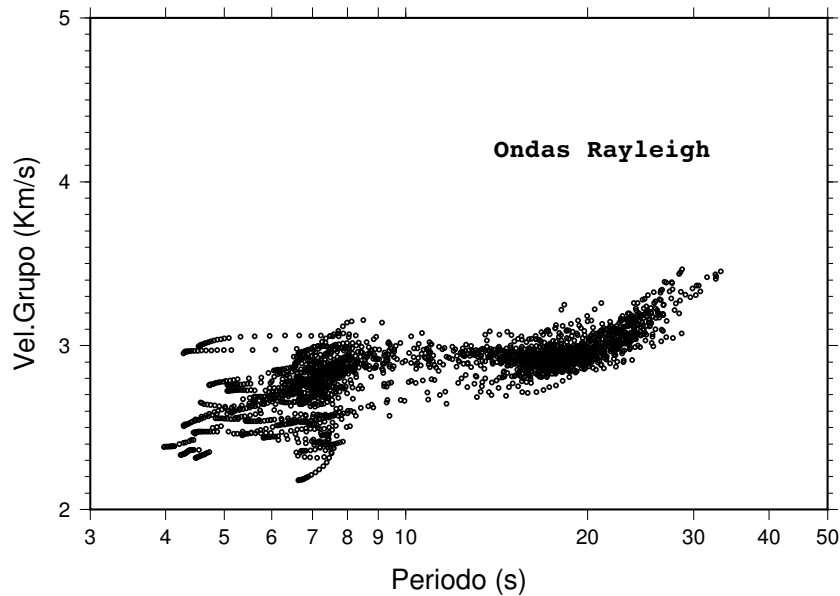
Mediante la representación en período-velocidad de grupo de las correlaciones simétricas se seleccionan los máximos del espectro de amplitud de dicha representación. Este procedimiento se llevó a cabo para todas las correlaciones calculadas en este trabajo. En la Figura (3.3) se presenta la curva de dispersión para la trayectoria SCCA-AZCA.



**Figura 3.3.** Curva de dispersión del modo fundamental de ondas Rayleigh para la trayectoria SCCA-AZCA. El gráfico de la izquierda muestra los valores de amplitud de la envolvente en función del período. Los puntos rojos representan las mayores amplitudes. El gráfico central muestra los valores de la envolvente filtrada en función de la velocidad y el período en distintos colores. El color naranja representa las mayores amplitudes. La línea de puntos blancos representa los valores de la velocidad de grupo inferida de los contornos. El gráfico de la derecha corresponde a la señal filtrada.

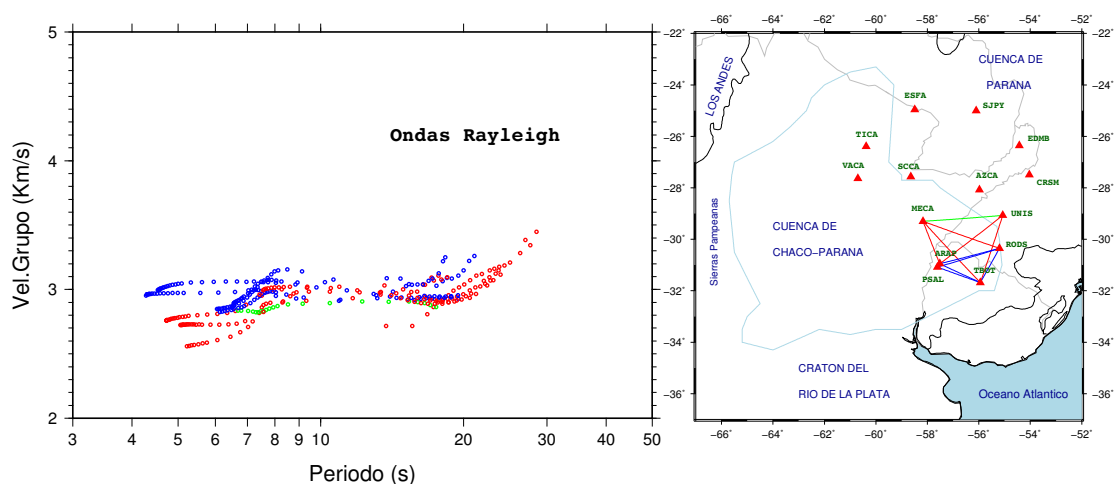
Una vez obtenidas todas las curvas de dispersión se hizo un análisis visual de cada una. Aquellas curvas que presentaron un comportamiento distinto al esperado para una curva de dispersión correspondiente a un modelo clásico de corteza fueron eliminadas. En estos casos, se hará luego un examen más exhaustivo de las correlaciones cruzadas obtenidas para definir de dónde proviene el error en las curvas. Las trayectorias eliminadas fueron 7: EDMB-UNIS, UNIS-RODS, MECA-PSAL, AZCA-MECA, EDMB-UNIS, UNIS-PSAL y AZCA-TBOT.

En la Figura (3.4) se muestran las 83 curvas de dispersión, donde se observa una buena similitud entre todas las curvas, en particular para los períodos comprendidos entre 6 y 8 s y los comprendidos entre 12 y 28 s.



**Figura 3.4.** Curvas de dispersión para el modo fundamental de ondas Rayleigh de las 83 trayectorias.

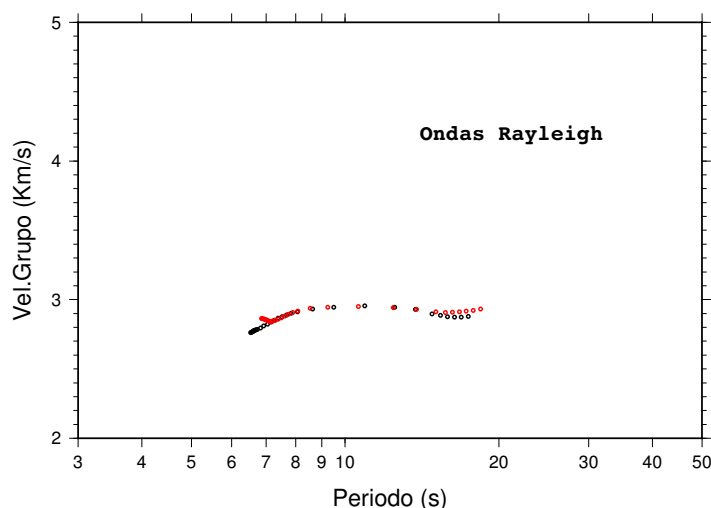
Analizando distintos grupos de trayectorias, se encontró, por ejemplo, que las curvas de dispersión correspondientes a las correlaciones simétricas entre pares de estaciones del grupo ARAP, PSAL, MECA, UNIS, RODS y TBOT presentan velocidades altas para períodos bajos sólo en las trayectorias ARAP-TBOT, PSAL-TBOT, RODS-ARAP, RODS-PSAL y RODS-TBOT, indicando un escaso espesor de sedimentos (Figura 3.5), lo que se corresponde con los resultados obtenidos por Dragone (2013).



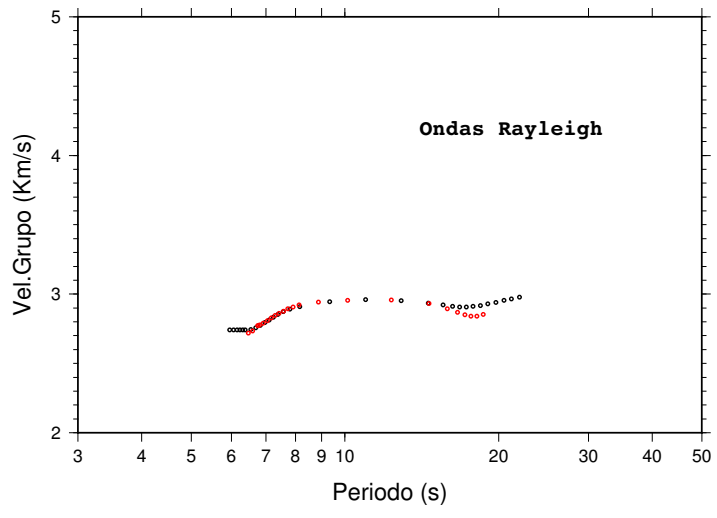
**Figura 3.5.** Curvas de dispersión para el modo fundamental de ondas Rayleigh. En azul las curvas correspondientes a las trayectorias ARAP-TBOT, PSAL-TBOT, RODS-ARAP, RODS-PSAL y RODS-TBOT, en rojo las curvas correspondientes a las trayectorias MECA-ARAP, MECA-RODS, MECA-TBOT, UNIS-ARAP y UNIS-TBOT, en amarillo la curva correspondiente a la trayectoria MECA-UNIS. Se muestra también a la derecha el mapa con la ubicación de las estaciones y las trayectorias.

### 3.2.1. Efecto de la longitud del apilamiento

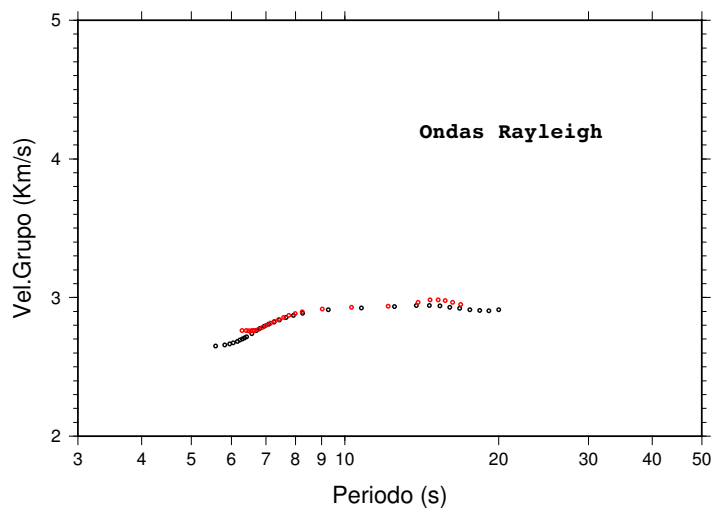
Es interesante comprobar la robustez de los resultados analizando si diferentes longitudes de apilamiento de las correlaciones pueden indicar cambios en las curvas de dispersión determinadas. Para ello, se comparan las curvas de dispersión de las estaciones ARAP y PSAL con otras estaciones, teniendo en cuenta que la estación ARAP fue reemplazada por la estación PSAL y que la cantidad de días de registros disponibles para PSAL es menor que para ARAP. En la Figura (3.6) se muestran las curvas de dispersión para las trayectorias AZCA-ARAP con 239 correlaciones cruzadas apiladas y AZCA-PSAL con 151 correlaciones cruzadas apiladas. En la Figura (3.7) se muestran las curvas de dispersión para las trayectorias CRSM-ARAP con 232 correlaciones cruzadas apiladas y CRSM-PSAL con 147 correlaciones cruzadas apiladas. En la Figura (3.8) se muestran las curvas de dispersión para las trayectorias EDMB-ARAP con 186 correlaciones cruzadas apiladas y EDMB-PSAL con 143 correlaciones cruzadas apiladas. En ellas se puede observar la estabilidad de las curvas y la convergencia del apilamiento de las correlaciones con menos de 6 meses de registros.



**Figura 3.6.** Curvas de dispersión para las trayectorias AZCA-ARAP (en negro) y AZCA-PSAL (en rojo).



**Figura 3.7.** Curvas de dispersión para las trayectorias CRSM-ARAP (en negro) y CRSM-PSAL (en rojo).



**Figura 3.8.** Curvas de dispersión para las trayectorias EDMB-ARAP (en negro) y EDMB-PSAL (en rojo).



# Capítulo 4

## Inversión de las velocidades de grupo

A partir de la inversión de las velocidades de grupo de las ondas superficiales es posible obtener la estructura de velocidad de la onda S, ya que las velocidades de fase ( $c$ ) y de grupo ( $U$ ) de las ondas superficiales están relacionadas con las velocidades de la onda P ( $V_p$ ), de la onda S ( $V_s$ ), con la densidad del medio ( $\rho$ ) y con los espesores de las capas ( $e$ ):  $c = f(V_p, V_s, \rho, e)$  y  $U = f(V_p, V_s, \rho, e)$ .

Dicha relación es no-lineal y los valores de  $V_p$ ,  $V_s$  y  $\rho$  calculados a partir de curvas de dispersión no son únicos, por lo que diferentes modelos pueden ajustar a los mismos datos de dispersión.

En general, las velocidades de las ondas superficiales son principalmente sensibles a la velocidad de onda S y por este motivo, normalmente se calcula sólo  $V_s$ .

Para determinar la estructura de velocidad de onda S a partir de los datos de dispersión, se utilizan métodos de inversión que buscan, mediante iteraciones, el modelo que mejor ajusta a los valores observados de las ondas superficiales.

En este trabajo se utilizó el código *surf96* del software Computer Programs in Seismology (Herrmann, 2013). Dicho programa realiza la inversión por mínimos cuadrados, por lo que el modelo inicial tiene una importante influencia sobre los resultados. De modo que, para obtener modelos confiables, es recomendable partir de información previa de la zona de estudio o realizar la inversión de varios modelos iniciales para encontrar las diferentes familias de modelos que puedan explicar las observaciones. Además, el código ofrece la posibilidad de asignar pesos a las capas.

Para definir los modelos iniciales se consideró como punto de partida el modelo CRUST 1.0 (Laske et al., 2013) para un punto medio de la zona de estudio (Tabla 4.1).

Espesor [Km]	$V_p$ [Km/s]	$V_s$ [Km/s]	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]
0.41	2.50	1.07	2.11
0.60	4.00	2.13	2.37
12.77	6.10	3.53	2.74
14.36	6.50	3.71	2.83
12.77	6.90	3.93	2.92

**Tabla 4.1.** Modelo CRUST 1.0 correspondiente a la zona de estudio (Laske et al., 2013).

Se dividieron las primeras capas de dos maneras, generando los modelos iniciales A (Tabla 4.2) y B (Tabla 4.3), que fueron los utilizados para realizar la inversión. Esta discretización en capas se llevó a cabo con el fin de permitir la variación de las velocidades en espesores menores, teniendo en cuenta que los valores obtenidos de las curvas de dispersión en este trabajo son sensibles a los primeros kilómetros de profundidad de la corteza. Los valores de velocidad y densidad considerados para el manto en los dos modelos iniciales fueron:  $V_p = 8.16$  Km/s,  $V_s = 4.53$  Km/s y  $\rho = 3.36$  g/cm<sup>3</sup>, según el modelo CRUST 1.0.

Fueron realizadas varias pruebas preliminares con el fin de establecer los valores de los parámetros de la inversión, suavizados y factores de pesos. Considerando que la inversión se centró en los primeros kilómetros de la corteza, se asignaron pesos bajos a las últimas capas de manera que sus valores permanezcan constantes. Finalmente, se llevaron a cabo las dos inversiones (entre 30 y 100 iteraciones) para cada curva de dispersión considerando los dos modelos iniciales A y B.

Espesor [Km]	$V_p$ [Km/s]	$V_s$ [Km/s]	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]
0.41	2.50	1.07	2.11
0.60	4.00	2.13	2.37
4.26	6.10	3.53	2.74
4.26	6.10	3.53	2.74
4.26	6.10	3.53	2.74
7.18	6.50	3.71	2.83
7.18	6.50	3.71	2.83
12.77	6.90	3.93	2.92

**Tabla 4.2.** Modelo inicial A.



Espesor [Km]	$V_p$ [Km/s]	$V_s$ [Km/s]	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]
0.41	2.50	1.07	2.11
0.60	4.00	2.10	2.37
1.00	6.10	3.53	2.74
1.00	6.10	3.53	2.74
1.00	6.10	3.53	2.74
1.00	6.10	3.53	2.74
1.00	6.10	3.53	2.74
1.00	6.10	3.53	2.74
1.00	6.10	3.53	2.74
1.00	6.10	3.53	2.74
1.00	6.10	3.53	2.74
1.00	6.10	3.53	2.74
2.26	6.10	3.53	2.74
2.26	6.50	3.71	2.83
2.26	6.50	3.71	2.83
3.18	6.50	3.71	2.83
3.18	6.50	3.71	2.83
3.18	6.50	3.71	2.83
8.77	6.90	3.93	2.92

**Tabla 4.3.** Modelo inicial B.

Luego, se eligió el modelo final correspondiente al modelo inicial que logró un mejor ajuste de la curva de dispersión.

En la Tabla (4.4) se muestra el error obtenido en la inversión de cada curva para los dos modelos iniciales, indicando el modelo inicial elegido.

Trayectoria	Error Modelo A [Km/s]	Error Modelo B [Km/s]	Modelo Elegido
AZCA-UNIS	0.0133	0.0149	A
TICA-VACA	0.0223	0.0338	A
RODS-TBOT	0.0185	0.0195	B
ARAP-TBOT	0.0233	0.0180	B
PSAL-TBOT	0.0413	0.0372	B
MECA-ARAP	0.0241	0.0282	A
SCCA-MECA	0.0363	0.0427	A
AZCA-CRSM	0.0441	0.0434	B
CRSM-UNIS	0.0193	0.0184	A
VACA-SCCA	0.0533	0.0442	B
TICA-SCCA	0.0087	0.0113	A
SJPY-EDMB	0.0155	0.0164	A
RODS-ARAP	0.0205	0.0239	A
ESFA-SJPY	0.0073	0.0076	A
RODS-PSAL	0.0239	0.0255	A

Continúa en la página siguiente.

## Inversión de las velocidades de grupo

Trayectoria	Error Modelo A [Km/s]	Error Modelo B [Km/s]	Modelo Elegido
EDMB-AZCA	0.0034	0.0067	A
ESFA-TICA	0.0358	0.0331	B
AZCA-RODS	0.0174	0.0164	B
SCCA-AZCA	0.0283	0.0199	B
ESFA-SCCA	0.0044	0.0039	B
UNIS-TBOT	0.0266	0.0129	B
MECA-UNIS	0.0106	0.0127	A
VACA-MECA	0.0312	0.0360	A
MECA-RODS	0.0413	0.0397	B
UNIS-ARAP	0.0402	0.0271	B
CRSM-RODS	0.0174	0.0164	B
MECA-TBOT	0.0260	0.0183	B
SJPY-AZCA	0.0208	0.0340	A
SJPY-CRSM	0.0275	0.0223	B
AZCA-ARAP	0.0082	0.0064	B
AZCA-PSAL	0.0133	0.0105	B
ESFA-VACA	0.0338	0.0304	B
SJPY-SCCA	0.0331	0.0554	B
SCCA-UNIS	0.0173	0.0222	A
TICA-MECA	0.0187	0.0125	B
SCCA-ARAP	0.0206	0.0281	A
SCCA-PSAL	0.0206	0.0248	A
ESFA-AZCA	0.0129	0.0097	B
ESFA-EDMB	0.0173	0.0116	B
SCCA-EDMB	0.0183	0.0162	B
EDMB-RODS	0.0154	0.0181	A
MECA-CRSM	0.0144	0.0141	B
SCCA-CRSM	0.0118	0.0202	A
SCCA-RODS	0.0178	0.0296	A
SJPY-TICA	0.0162	0.0120	B
SJPY-UNIS	0.0331	0.0554	A
VACA-AZCA	0.0283	0.0232	B
TICA-AZCA	0.0162	0.0100	B
VACA-ARAP	0.0055	0.0151	A
ESFA-MECA	0.0230	0.0141	B
VACA-PSAL	0.0072	0.0259	A
EDMB-MECA	0.0070	0.0085	A
CRSM-TBOT	0.0133	0.0105	B
CRSM-ARAP	0.0166	0.0140	B

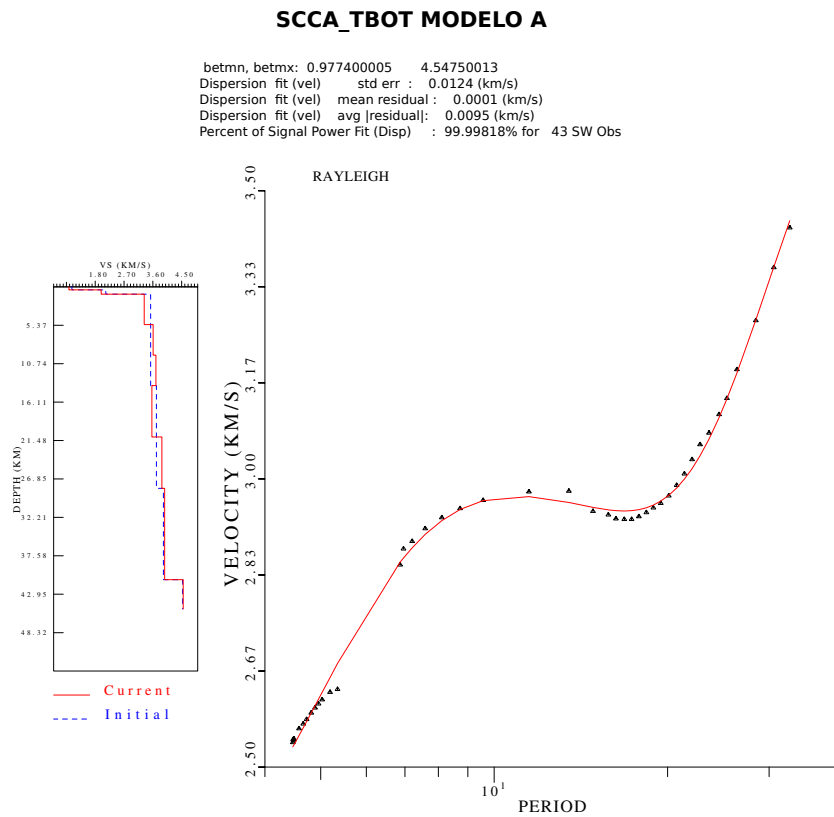
Continúa en la página siguiente.

Trayectoria	Error Modelo A [Km/s]	Error Modelo B [Km/s]	Modelo Elegido
SJPY-MECA	0.0063	0.0058	B
SCCA-TBOT	0.0124	0.0210	A
ESFA-CRSM	0.0215	0.0235	A
CRSM-PSAL	0.0101	0.0112	B
VACA-SJPY	0.0297	0.0299	A
ESFA-UNIS	0.0323	0.0286	B
VACA-UNIS	0.0083	0.0129	A
TICA-ARAP	0.0175	0.0086	B
TICA-PSAL	0.0136	0.0146	A
EDMB-ARAP	0.0120	0.0155	A
TICA-EDMB	0.0347	0.0261	A
SJPY-RODS	0.0079	0.0152	A
TICA-UNIS	0.0168	0.0181	B
EDMB-TBOT	0.0147	0.0101	B
EDMB-PSAL	0.0140	0.0145	A
VACA-RODS	0.0227	0.0219	B
VACA-EDMB	0.0212	0.0202	B
TICA-CRSM	0.0149	0.0119	B
VACA-TBOT	0.0140	0.0111	B
VACA-CRSM	0.0092	0.0087	B
ESFA-ARAP	0.0368	0.0285	B
TICA-RODS	0.0364	0.0280	B
SJPY-ARAP	0.0225	0.0161	B
ESFA-RODS	0.0133	0.0118	B
ESFA-PSAL	0.0449	0.0437	B
SJPY-PSAL	0.0177	0.0226	A
TICA-TBOT	0.0060	0.0197	A
SJPY-TBOT	0.0154	0.0286	A
ESFA-TBOT	0.0043	0.0071	A

**Tabla 4.4.** Tabla comparativa de errores estándar para ambos modelos iniciales y modelo elegido para realizar la inversión en cada trayectoria.

En seis de las inversiones se eligió el modelo con mayor error, debido a que dicho modelo ajustaba mejor los datos observados en el rango de períodos bajos.

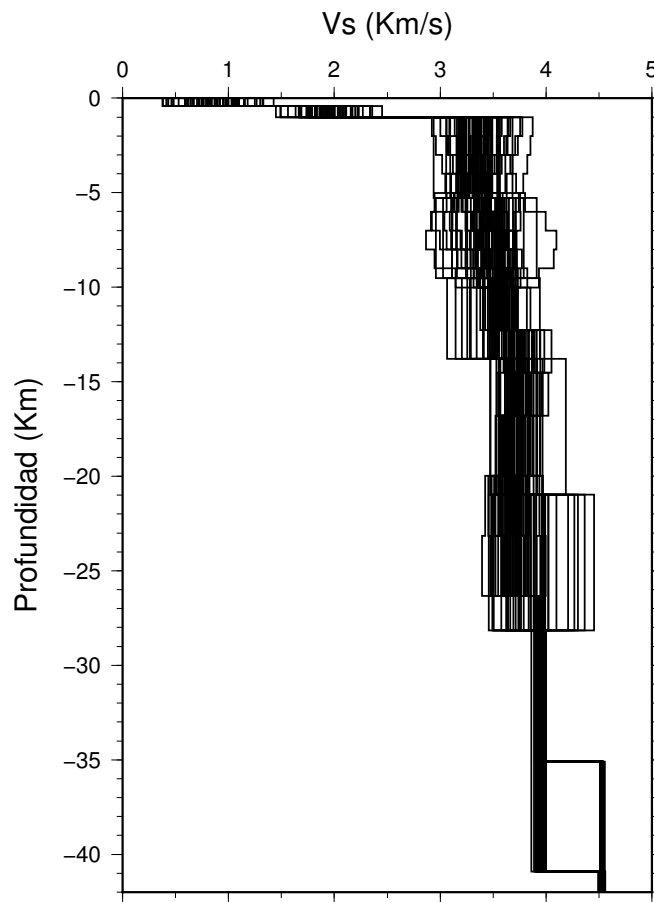
Un ejemplo de la salida del código *surf96* para la inversión de la curva de dispersión entre las estaciones SCCA y TBOT a partir del modelo inicial A (modelo elegido) se muestra en la Figura (4.1). El resto de las salidas para cada modelo elegido se muestran en el Apéndice B.



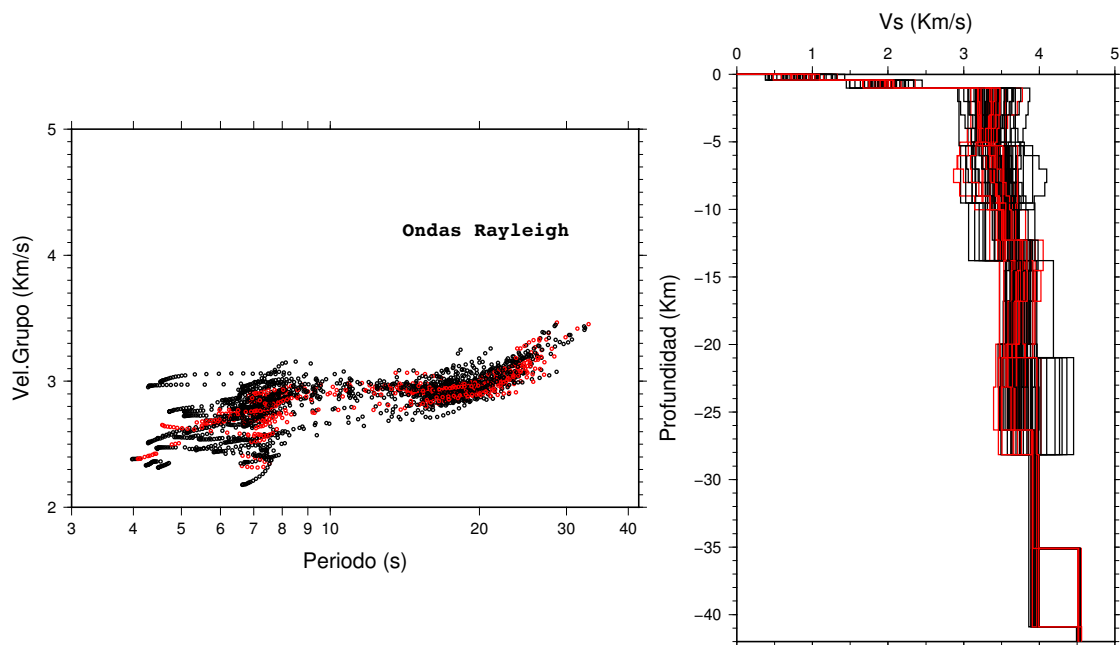
**Figura 4.1.** Salida del código *surf96* para la inversión de la curva de dispersión entre las estaciones SCCA y TBOT a partir del modelo inicial A. A la izquierda: el modelo inicial en azul y el modelo final en rojo. A la derecha: las velocidades de grupo observadas (triángulos negros) y las calculadas (línea roja).

En la Figura (4.2) se muestran los modelos finales (velocidad de onda S en función de la profundidad) de la inversión para las 83 curvas de dispersión, donde se distinguen algunas discontinuidades coincidentes en muchos modelos. Se observan dos capas de sedimentos con velocidades entre 0.7 y 1.1 Km/s y entre 1.8 y 2.1 Km/s. La corteza superior presenta velocidades entre 3.4 y 3.8 Km/s y un aumento de velocidad (3.6-4 Km/s) a los 12 Km de profundidad que estaría indicando el inicio de la corteza inferior.

Observando las curvas de dispersión y los modelos finales de la inversión de las 83 trayectorias, se puede ver que las trayectorias más largas promedian los resultados (Figura 4.3).



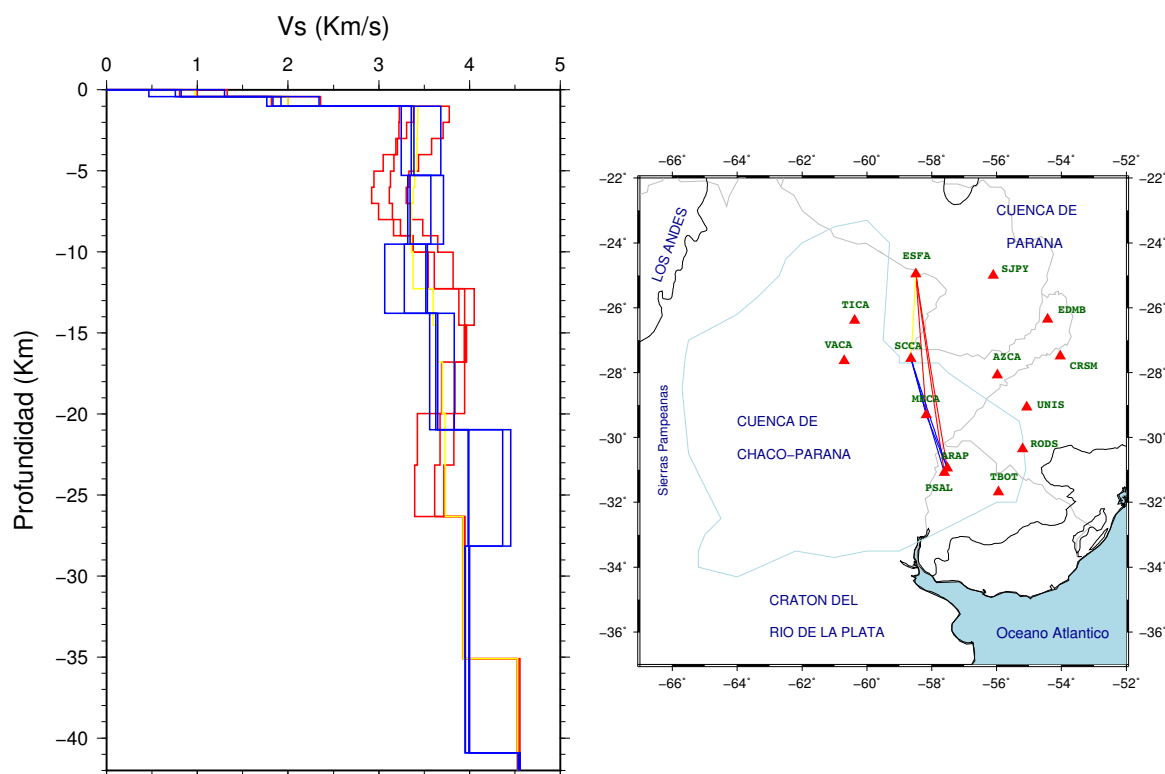
**Figura 4.2.** Resultado de la inversión de las 83 curvas de dispersión.



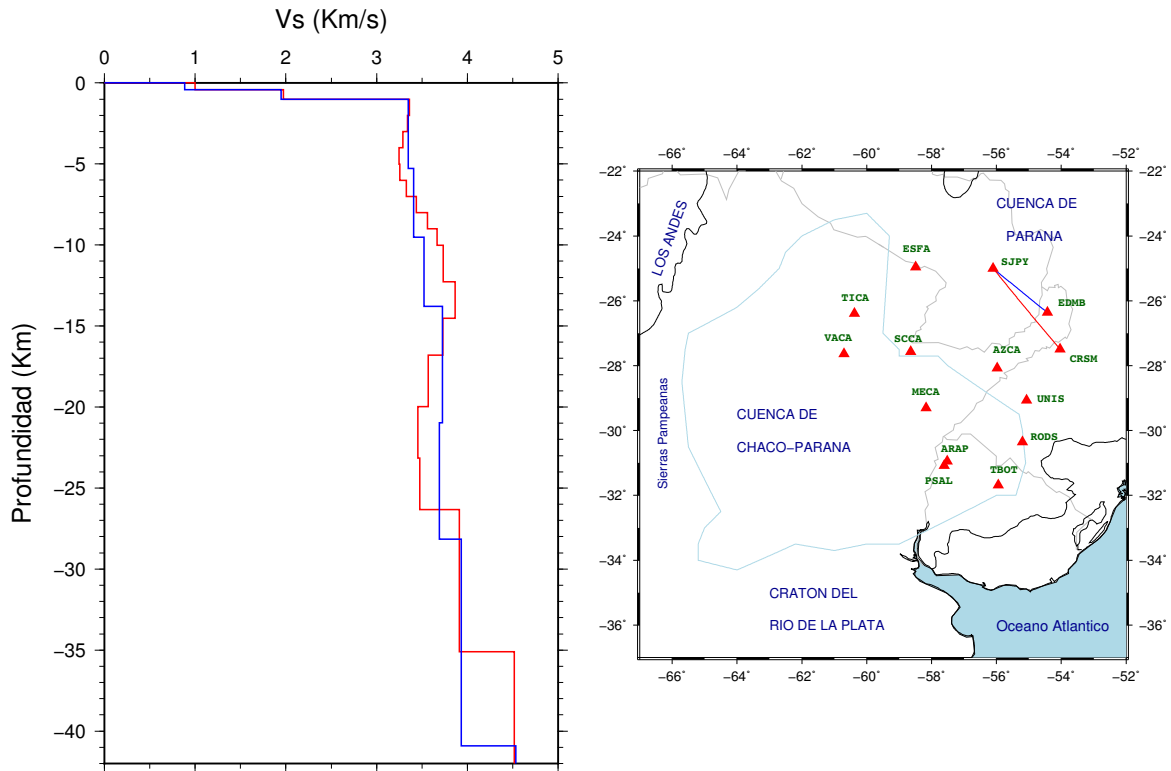
**Figura 4.3.** Curvas de dispersión (izquierda) y resultado de la inversión (derecha) de las 83 trayectorias. Trayectorias largas en rojo y trayectorias cortas en negro.

Al igual que con las curvas de dispersión, se realizó un estudio para distintos grupos de trayectorias comparando sus modelos finales.

Se pudo observar, por ejemplo, que para las trayectorias ESFA-ARAP, ESFA-PSAL, ESFA-MECA, ESFA-SCCA, MECA-ARAP, SCCA-ARAP, SCCA-PSAL y SCCA-MECA el espesor de los sedimentos es, en promedio, menor a 1 Km (Figura 4.4), ya que para mayores profundidades los valores de velocidad corresponden a valores típicos en corteza. Este valor es un poco menor al encontrado por Dragone (2013) con datos gravimétricos y por Sagarra (2016) con datos sísmológicos. Sin embargo este trabajo presenta una mejor disposición de estaciones sobre la cuenca, lo que permite asegurar la certeza del mismo. En cambio, para las trayectorias SJPY-EDMB y SJPY-CRSM, se observan velocidades correspondientes a sedimentos hasta los 5 Km de profundidad (Figura 4.5), coincidentes con los valores de sedimentos encontrados en esa región de la cuenca Paraná por dichos autores.



**Figura 4.4.** A la izquierda: resultado de la inversión para las trayectorias ESFA-ARAP (rojo), ESFA-PSAL (rojo), ESFA-MECA (rojo), ESFA-SCCA (amarillo), MECA-ARAP (azul), SCCA-ARAP (azul), SCCA-PSAL (azul) y SCCA-MECA (azul). A la derecha: mapa con la ubicación de las estaciones y las trayectorias analizadas.

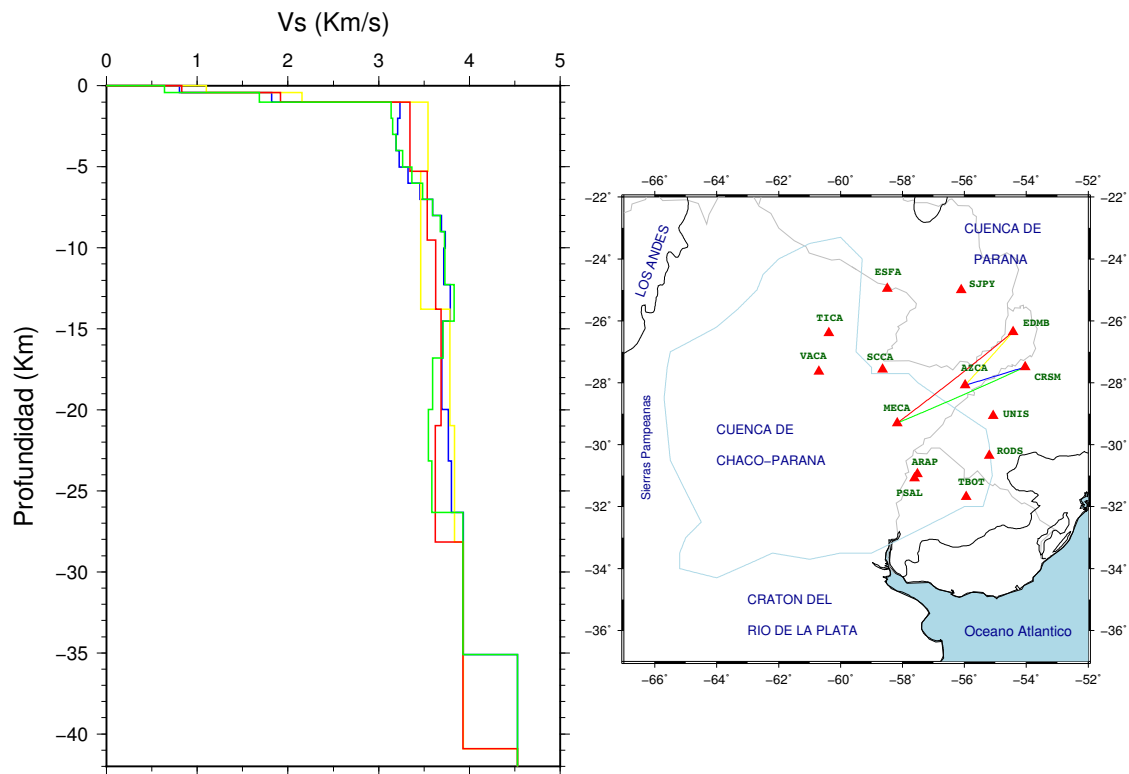


**Figura 4.5.** A la izquierda: resultado de la inversión para las trayectorias SJPY-EDMB (azul) y SJPY-CRSM (rojo). A la derecha: mapa con la ubicación de las estaciones y las trayectorias analizadas.

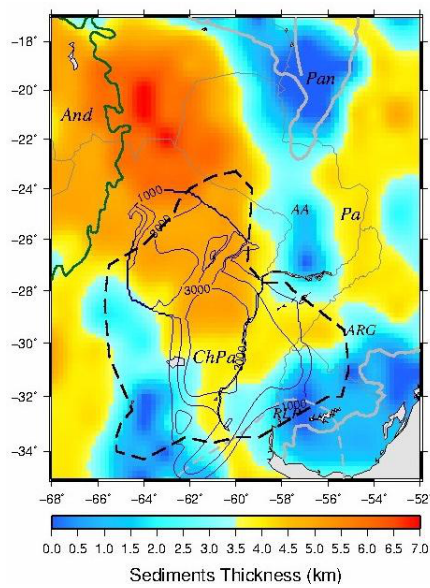
Para el grupo de estaciones AZCA, MECA, EDMB y CRSM (Figura 4.6), se observan en los modelos de las trayectorias EDMB-AZCA y EDMB-MECA valores de velocidad correspondientes a corteza a poca profundidad. No así en los modelos de las trayectorias AZCA-CRSM y MECA-CRSM, donde se observan velocidades correspondientes a sedimentos hasta los 5 Km de profundidad. Lo que concuerda con lo presentado por Sagarra (2016) (Figura 4.7).

Puede observarse que a partir de la técnica empleada en este trabajo, se encuentran resultados que coinciden en ciertas regiones con datos de estudios realizados en la zona mediante otras técnicas.

En la región sudeste de la cuenca (desde los  $-30^\circ$  de latitud hacia el sur) se encontraron escasos espesores sedimentarios. Hacia el centro de la zona de estudio se observaron sedimentos que llegan hasta los 5-6 Km de profundidad, volviendo a disminuir su espesor hacia el norte.



**Figura 4.6.** A la izquierda: resultado de la inversión para las trayectorias EDMB-AZCA (amarillo), EDMB-MECA (rojo), AZCA-CRSM (azul) y MECA-CRSM (verde). A la derecha: mapa con la ubicación de las estaciones y las trayectorias analizadas.



**Figura 4.7.** Mapa del espesor sedimentario a partir de la regionalización tomográfica para la onda Rayleigh en la región de la cuenca Chaco-Paraná. *Extraída de Sagarra (2016).*



# Capítulo 5

## Conclusiones

En este trabajo se obtuvieron curvas de dispersión del modo fundamental de onda Rayleigh y modelos de velocidad de onda S con el fin de caracterizar los primeros kilómetros de la corteza de la cuenca Chaco-Paraná a partir de interferometría de ruido sísmico.

Se utilizó la técnica *phase cross – correlation* (PCC) para el cálculo de las correlaciones cruzadas de los registros de ruido de 14 estaciones de la red XC, ubicadas entre las cuencas Chaco-Paraná y Paraná. Luego se realizó el apilamiento lineal de las correlaciones cruzadas (PCC) y se calculó su correlación simétrica, con la cual, aplicando la técnica de filtrado múltiple, se obtuvieron las curvas de dispersión y finalmente, se hizo su inversión.

Las curvas de dispersión muestran buena similitud entre ellas, en particular para los períodos comprendidos entre 6 y 8 s y los comprendidos entre 12 y 28 s. También presentan estabilidad cuando se las compara en trayectorias muy parecidas, incluso en casos en los que varía bastante la cantidad de registros apilados.

Es simple ver, en ciertas trayectorias, que las curvas de dispersión presentan velocidades altas para períodos bajos indicando un escaso espesor de sedimentos.

Los modelos de velocidad de onda S muestran dos capas de sedimentos con velocidades entre 0.7 y 1.1 Km/s y entre 1.8 y 2.1 Km/s, corteza superior con velocidades entre 3.4 y 3.8 Km/s y un aumento de velocidad (3.6-4 Km/s) a los 12 Km de profundidad que estaría indicando el inicio de la corteza inferior.

Para algunas trayectorias se observan modelos con valores de velocidad correspondientes a corteza a poca profundidad (1Km), y otras donde se observan velocidades correspondientes a sedimentos hasta los 5 Km de profundidad. Pudiéndose determinar zonas de menor y mayor espesor sedimentario.

En la parte sudeste de la cuenca Chaco-Paraná (desde los  $-30^\circ$  de latitud hacia el sur) en la zona donde se ubican algunas de las estaciones utilizadas en este trabajo, se encontraron escasos espesores sedimentarios. Hacia el centro de la zona de estudio se observaron sedimentos que llegan hasta los 5-6 Km de profundidad, volviendo a disminuir su espesor hacia el norte.

Como conclusión de la técnica, se observó que las trayectorias más largas promedian los resultados, comprobándose que la resolución depende exclusivamente del número, la geometría y la distancia entre las estaciones sísmicas.

El conjunto de datos utilizados permitió determinar con mayor certeza los espesores sedimentarios comparados con otros análisis realizados en la región, ya que se contó con períodos menores a 10 s para estaciones ubicadas sobre la cuenca. Esto permitirá a futuro probar nuevas técnicas con datos de velocidad de grupo de ondas Rayleigh en períodos cortos, que hasta el momento no han sido estudiados. Asimismo, durante el análisis de las curvas de dispersión se encontró energía para el primer modo superior, esto determina una herramienta de modelado inédita en esta región.

Este trabajo permitió experimentar el manejo de gran cantidad de datos.

## Trabajos a futuro

Los datos utilizados y los resultados obtenidos en este trabajo seguirán siendo analizados con el fin de confeccionar mapas de espesor sedimentario con mejor certeza y analizar con más detalle las anomalías que presenta la cuenca, principalmente estudiando las trayectorias eliminadas.

Este trabajo permite continuar y avanzar en varias líneas de investigación. A través de proyectos de investigación se ha planeado la instalación de nuevas estaciones en la región. Esto permitirá no solo poder mejorar los resultados obtenidos a partir de nuevos datos aplicando las técnicas empleadas en este trabajo, sino también implementar nuevas metodologías, como por ejemplo, técnicas de inversión conjunta de curvas de dispersión obtenidas del análisis del ruido sísmico entre estaciones usando tomografía de ruido ambiental, relación H/V en función de la frecuencia para la onda Rayleigh y función del receptor de onda P.

Los resultados de este trabajo serán presentados en el 3er Simposio Brasileiro de Sismología que tendrá lugar en Vinhedo, San Pablo, en abril de este año, cuyo resumen ha sido aceptado.



15-17<sup>th</sup> April, 2019  
Vinhedo - SP / Brazil

February 12, 2019

## Shear wave velocity models for the Chaco-Paraná Basin from ambient seismic noise analysis: constraints on upper crustal structure

Lunansky Melina\*<sup>1</sup>, Rosa María Laura<sup>1</sup>, and Buffoni Carolina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata (FCAG-UNLP)*

### Abstract

The seismic structure of the crust and uppermost mantle under the central and eastern region of South America is being a matter of study in recent years due to the installation of new temporary and permanent seismological stations. In this study, the upper structure of the crust beneath the Chaco-Paraná basin (CPB) was modeled in order to provide valuable information about the evolution and present geodynamics of the basin. The CPB is a Neopaleozoic intracratonic basin, formed by a complex history of different processes of subsidence.

For this purpose, Rayleigh-wave group velocity dispersion curves, obtained by the ambient seismic noise cross-correlation technique, were extracted using a time-frequency analysis. The observed group velocities were inverted considering a non-linear iterative damped least-squares inversion procedure and several 1-D shear wave velocity models of the upper crust were obtained. The final models fit reasonably well the measured group velocity curves, which indicate a high degree of robustness.

Dispersion curves estimations using ambient seismic noise allowed the estimation of Rayleigh wave velocities at periods lower than those achieved with earthquakes and, therefore, sensitive to shallower structures.

The data to perform this work was acquired from new seismological stations that have been installed since May 2016 in the CPB region, particularly in Misiones, Corrientes, Chaco and Formosa provinces in Argentina.

The results are in agreement to the major known surface and sub-surface geological and tectonic features recognized in the CPB area. This work is part of a main project (Pantanal-Chaco-Parana Basins: Crust and Upper Mantle Seismic Structure and Evolution) that will enhance the understanding of crustal structure in Southern Brazil and Eastern Argentina and is being carried out by IAG-USP (Brazil) in collaboration with FCAG-UNLP (Argentina) and INPRES (Argentina).

\*Presenting Author.



# Bibliografía

- Ardhuin, F., Stutzmann, E., Schimmel, M., and Mangeney, A. (2011). Ocean wave sources of seismic noise. *Journal of Geophysical Research*, 116:C09004.
- Assumpção, M., Feng, M., Tassara, A., and Julia, J. (2013). Models of crustal thickness for South America from seismic refraction, receiver functions and surface wave tomography. *Tecnophysics*, 609:82–96.
- Barredo, S. and Stinco, L. (2010). Geodinámica de las cuencas sedimentarias: su importancia en la localización de sistemas petroleros en la Argentina. *Petrotecnia*, 2:48–68.
- Bensen, G., Ritzwoller, M., Barmin, M., Levshin, A., Lin, F., Moschetti, M., Shapiro, N., and Yang, Y. (2007). Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements. *Geophysical Journal International*, 169(3):1239–1260.
- Bonnefoy-Claudet, S., Cotton, F., and Bard, P. (2006). The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies. A literature review. *Earth Science Reviews*, 79:205–227.
- Buffoni, C. (2017). *Determinación de la estructura cortical en el sector argentino de la Isla Grande de Tierra del Fuego*. PhD thesis, Universidad Nacional de La Plata.
- Campillo, M. and Paul, A. (2003). Long-range correlations in the diffuse seismic coda. *Science*, 299:547–549.
- Chebli, G., Mozetic, M., Rossello, E., and Bühler, M. (1999). Cuencas sedimentarias de la llanura Chacopampeana. *Geología Argentina anales*, 29:627–644.
- Christensen, N. and Mooney, W. (1995). Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100:9761–9788.
- Derode, A., Larose, E., Tanter, E., de Rosny, J., Tourin, A., Campillo, M., and Fink, M. (2003). Recovering the Green's function from field-field correlations in an open scattering medium. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 113(6):2973–2976.

- Dragone, G. (2013). Estructura crustal da bacia do Chaco-Paraná a partir de dados gravimétricos. *Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo*.
- Dragone, G., Usami, N., and Chaves, C. (2012). The Chaco-Paraná Basin from GOCE and integrated terrestrial/satellite gravity data: unraveling major lithosphere discontinuities. *International Symposium on Gravity, Geoid and Height Systems, GGHS 2012*.
- Dziewonski, A., Bloch, S., and Landisman, M. (1969). A technique for the analysis of transient seismic signals. *Bulletin of the Seismological society of America*, 59:427–444.
- Feng, M., Van der Lee, S., and Assumpção, M. (2007). Upper mantle structure of south america from joint inversion of waveforms and fundamental mode group velocities of rayleigh waves. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112.
- Friedrich, A., Krüger, F., and Klinge, K. (1998). Ocean-generated microseismic noise located with the Grafenberg array. *Journal of Seismology*, 2(1):47–64.
- Gouédard, P., Stehly, L., Brenguier, F., Campillo, M., Colin de Verdière, Y., Larose, E., Margerin, L., Roux, P., Sánchez-Sesma, F., Shapiro, N., and Weaver, R. (2008). Cross-correlation of random fields: mathematical approach and applications. *Geophysical Prospecting*, 56(3):375–393.
- Gualtieri, L., Stutzmann, E., Capdeville, Y., Arduin, F., Schimmel, M., Mangeney, A., and Morelli, A. (2013). Modelling secondary microseismic noise by normal mode summation. *Geophysical Journal International*, 193(3):doi:10.1093/gji/ggt090.
- Hasselmann, K. (1963). Statistical analysis of the generation of microseisms. *Reviews of Geophysics*, 1:177–210.
- Haubrich, R. A., Munk, W., and Snodgrass, F. (1963). Comparative spectra of microseisms and swell. *Bulletin Geological Society of America*, 53:27–37.
- Herrmann, R. (2013). Computer programs in seismology: An evolving tool for instruction and research. *Seismological Research Letters*, 84:1081–1088.
- Kedar, S., Longuet-Higgins, M., Webb, F. Graham, N., Clayton, R., and Jones, C. (2008). The origin of deep ocean microseisms in the North Atlantic Ocean. *Proceedings of the Royal Society A*, 464:777–793.
- Larose, E., Khan, A., Nakamura, Y., and Campillo, M. (2005). Lunar subsurface investigated from correlation of seismic noise. *Geophysical Research Letters*, 32.

- 
- Laske, G., Masters, G., Ma, Z., and Pasyanos, M. (2013). Update on CRUST1.0 - A 1-degree Global Model of Earth's Crust. *Geophysical Research Abstracts, EGU2013-2658*.
- Levshin, A., Pisarenko, V., and Pogrebinsky, G. (1972). Frequency-time analysis of oscillations. *Annales de Geophysique*, 28.
- Lloyd, S., Van der Lee, S., França, G., Assumpção, M., and Feng, M. (2010). Moho map of south america from receiver functions and surface waves. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115.
- Lobkis, O. and Weaver, R. (2001). On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field. *Journal of the Acoustical Society of America*, 110:894–903.
- Longuet-Higgins, M. (1950). A theory of the origin of microseisms. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 243:1–35.
- McNamara, D. and Boaz, R. (2019). Visualization of the Seismic Ambient Noise Spectrum. *Seismic Ambient Noise*.
- Milani, E. and Zalán, P. (1999). An outline of the geology and petroleum systems of the Paleozoic interior basins of South America. *Episodes-News magazine of the International Union of Geological Sciences*, 22:199–205.
- Nishida, K., Montagner, J.-P., and Kawakatsu, H. (2009). Global surface wave tomography using seismic hum. *Science*, 326:112.
- Paul, A., Campillo, M., Margerin, L., Larose, E., and Derode, A. (2005). Empirical synthesis of time-asymmetrical Green functions from the correlation of coda waves. *Journal of Geophysical Research*, 100:B08302.
- Pezzi, E. and Mozetic, M. (1989). Cuencas sedimentarias de la región chaco-paranense. *Cuencas Sedimentarias Argentinas. Serie Correlación Geológica*, 6:65–78.
- Prezzi, C., Götze, H., and Schmidt, S. (2014). Andean foreland evolution and flexure in NW Argentina: Chaco-Paraná Basin. *Tectonophysics*, 628:228–243.
- Ritzwoller, M. and Levshin, A. (1998). Eurasian surface wave tomography: Group velocities. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103:4839–4878.
- Rosa, M., Collaço, B., Assumpção, M., Sabbione, N., and Sanchez, G. (2016). Thin crust beneath the Chaco-Paraná Basin by surface-wave tomography. *Journal South America Earth Sciences*, 66:1–14.

- Roux, P., Sabra, K., Gerstoft, P., Kuperman, W., and Fehler, M. (2005). P-waves from crosscorrelation of seismic noise. *Geophysical Research Letters*, 32.
- Ruso, A., Archangelshy, S., Andreis, R., and Cuerda, A. (1986). Cuenca chaco-paranense. En el sistema Carbonifero en la República Argentina. *Córdoba, Academia Nacional de Ciencias*, pages 197–212.
- Sabra, K., Gerstoft, P., Roux, P., Kuperman, W., and Fehler, M. (2005). Extracting time-domain Green’s function estimates from ambient seismic noise. *Geophysical Research Letters*, 32:L03310.
- Sagarra, C. (2016). Estructura cortical de la cuenca Chaco-Paraná a partir de la tomografía de ruido ambiental. *Tesis de grado en geofísica, Universidad Nacional de La Plata*.
- Schimmel, M. (1999). Phase Cross-Correlations: Design, Comparisons, and Applications. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89:1366–1378.
- Schimmel, M., Stutzmann, E., and Gallart, J. (2011). Using instantaneous phase coherence for signal extraction from ambient noise data at a local to a global scale. *Geophysical Journal International*, 184:494–506.
- Shapiro, N. and Campillo, M. (2004). Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise. *Geophysical Research Letters*, 31 (7).
- Shapiro, N., Campillo, M., Stehly, L., and Ritzwoller, M. (2005). High resolution surface wave tomography from ambient seismic noise. *Science*, 307:1615–1618.
- Shearer, P. (2009). *Introduction to Seismology*. Cambridge University Press, 2 edition.
- Snieder, R. (2004). Extracting the Green’s function from the correlation of coda waves: a derivation based on stationary phase. *Physical Review E*, 69:1–8.
- Snieder, R., Wapenaar, K., and Wegler, U. (2007). Unified Green’s function retrieval by cross-correlation; connection with energy principles. *Physical Review E*, 75.
- Snoke, J. and James, D. (1997). Lithospheric structure of the Chaco and Paraná basins of South America from surface-wave inversion. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102:2939–2951.
- Stehly, L., Campillo, M., and Shapiro, N. (2006). A study of the seismic noise from its long-range correlation properties. *Journal of Geophysical Research*, 111.



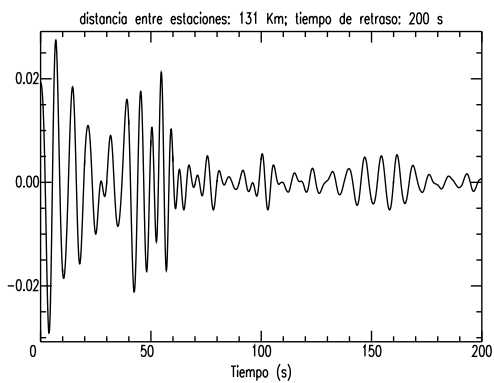
- 
- Stutzmann, E., Ardhuin, F., Schimmel, M., Mangeney, A., and Patau, G. (2012). Modelling long-term seismic noise in various environments. *Geophysical Journal International*, 191:707–722.
- Tanimoto, T. (2007). Excitation of microseisms. *Geophysical Research Letters*, 34.
- Tapley, W. and Tull, J. (2000). Sac2000, seismic analysis code.
- Wapenaar, K. (2004). Retrieving the elastodynamic Green’s function of an arbitrary inhomogeneous medium by cross-correlation. *Physical Review Letters*, 93.
- Wapenaar, K., Slob, E., and Snieder, R. (2006). Unified Green’s function retrieval by cross correlation. *Physical Review Letters*, 97.
- Weaver, R. (2005). Information from seismic noise. *Science*, 307:1568–1569.
- Webb, S. (2007). The Earth’s ‘hum’ is driven by ocean waves over the continental shelves. *Nature*, 445:754–756.
- Yuan, X., Sobolev, S., Kind, R., Oncken, O., Bock, G., Asch, G., Schurr, B., Graeber, F., Rudloff, A., Hanka, W., Wylegalla, K., Tibi, R., Haberland, C., Rietbrock, A., Giese, P., Wigger, P., Röwer, P., Zandt, G., Beck, S., Wallace, T., Pardo, M., and Comte, D. (2000). Subduction and collision processes in the central andes constrained by converted seismic phases. *Nature*, 408.



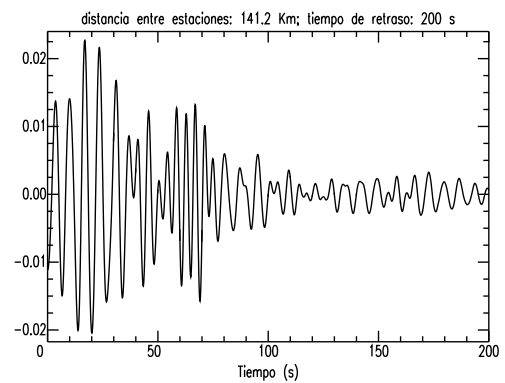
# Apéndice A

## Correlaciones simétricas

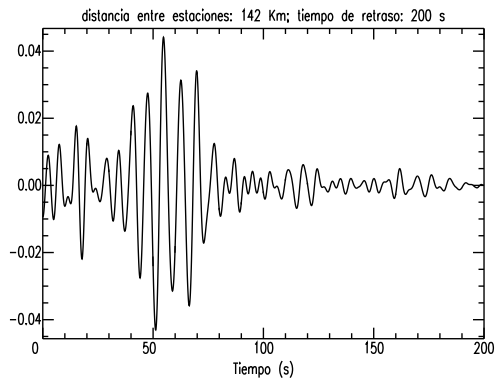
En este anexo se muestran las 90 correlaciones simétricas calculadas a partir del apilamiento de las correlaciones cruzadas (PCC), ordenadas en función de la longitud de la trayectoria. A continuación se encuentra la tabla con las distancias entre estaciones.



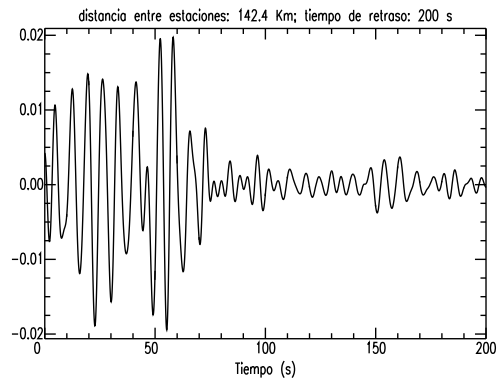
**Figura A.1.** Correlación simétrica entre las estaciones EDMB y CRSM



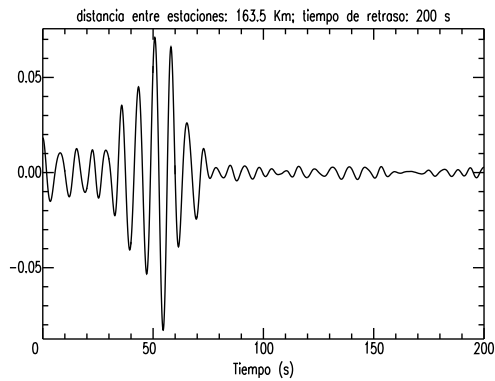
**Figura A.2.** Correlación simétrica entre las estaciones AZCA y UNIS



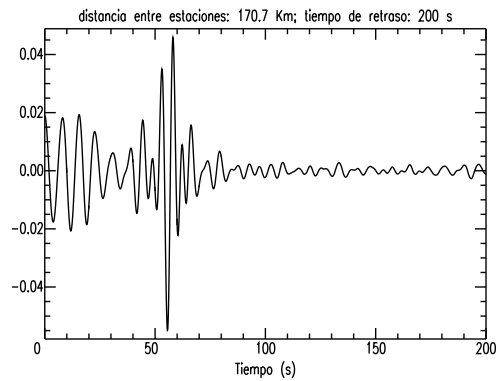
**Figura A.3.** Correlación simétrica entre las estaciones TICA y VACA



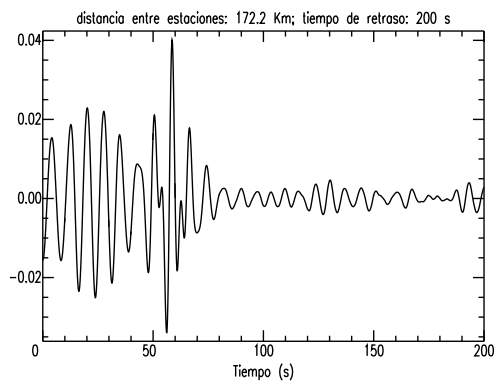
**Figura A.4.** Correlación simétrica entre las estaciones UNIS y RODS



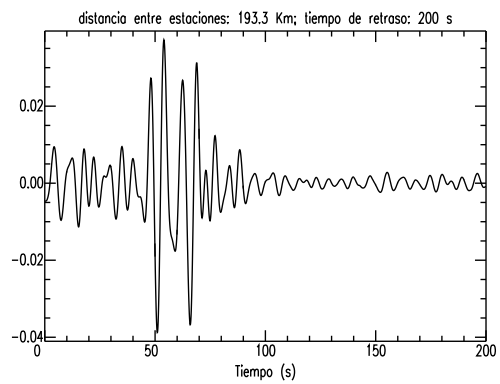
**Figura A.5.** Correlación simétrica entre las estaciones RODS y TBOT



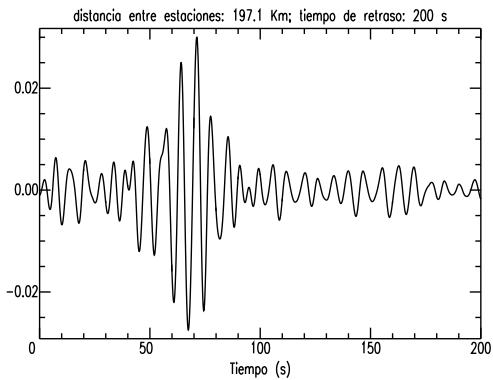
**Figura A.6.** Correlación simétrica entre las estaciones ARAP y TBOT



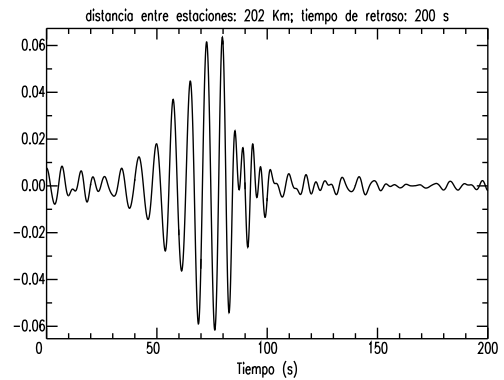
**Figura A.7.** Correlación simétrica entre las estaciones PSAL y TBOT



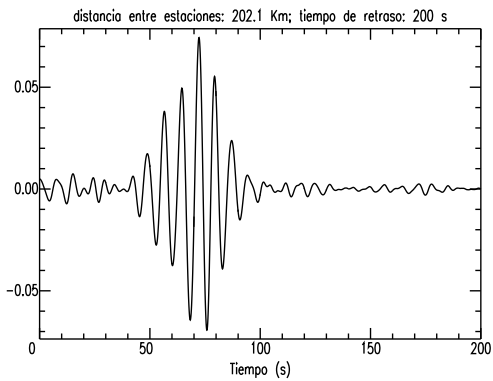
**Figura A.8.** Correlación simétrica entre las estaciones MECA y ARAP



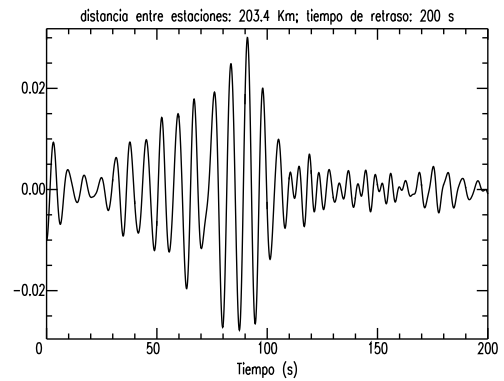
**Figura A.9.** Correlación simétrica entre las estaciones SCCA y MECA



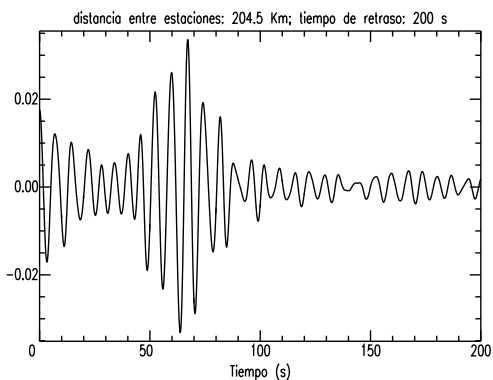
**Figura A.10.** Correlación simétrica entre las estaciones AZCA y CRSM



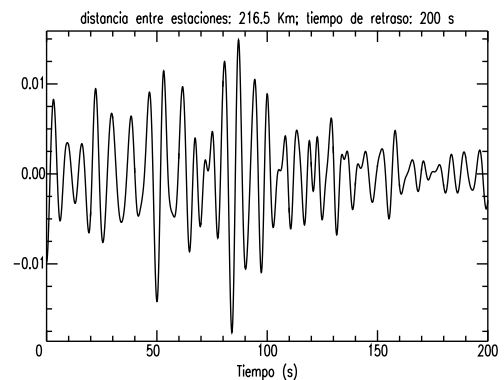
**Figura A.11.** Correlación simétrica entre las estaciones CRSM y UNIS



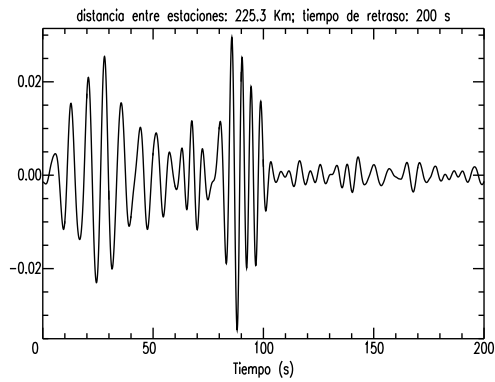
**Figura A.12.** Correlación simétrica entre las estaciones VACA y SCCA



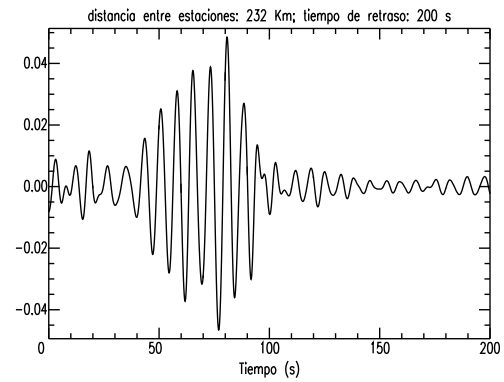
**Figura A.13.** Correlación simétrica entre las estaciones MECA y PSAL



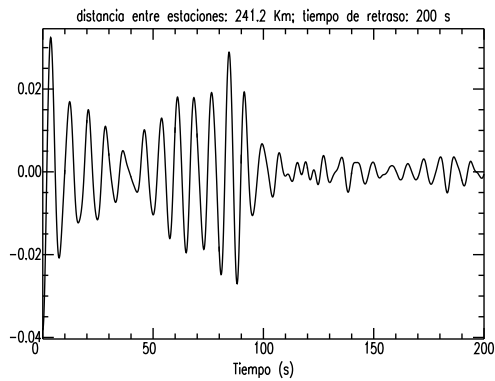
**Figura A.14.** Correlación simétrica entre las estaciones TICA y SCCA



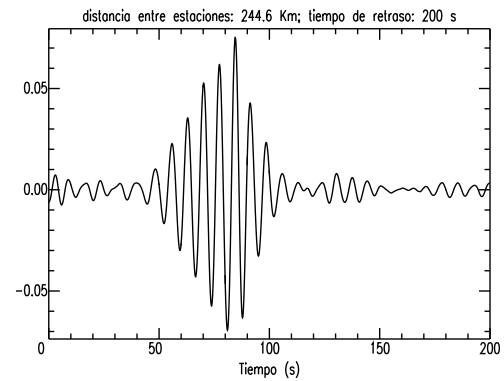
**Figura A.15.** Correlación simétrica entre las estaciones SJPY y EDMB



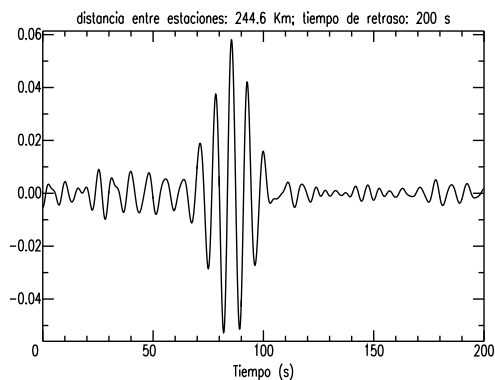
**Figura A.16.** Correlación simétrica entre las estaciones RODS y ARAP



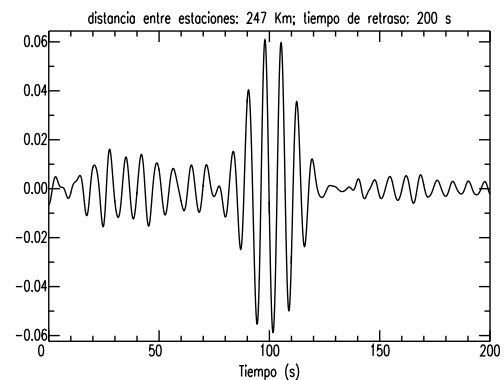
**Figura A.17.** Correlación simétrica entre las estaciones ESFA y SJPY



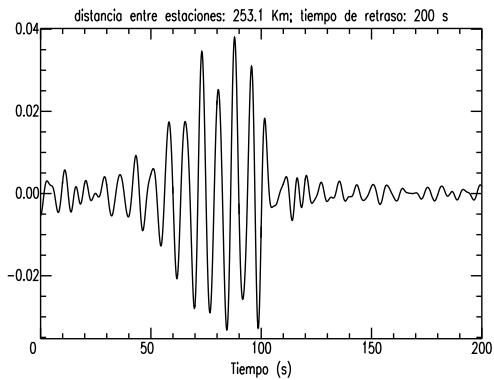
**Figura A.18.** Correlación simétrica entre las estaciones RODS y PSAL



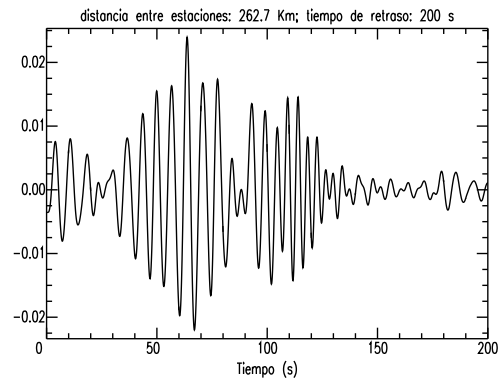
**Figura A.19.** Correlación simétrica entre las estaciones EDMB y AZCA



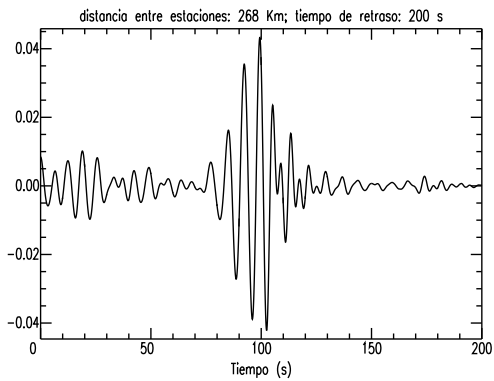
**Figura A.20.** Correlación simétrica entre las estaciones ESFA y TICA



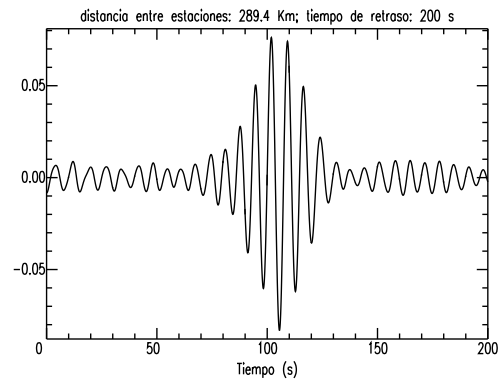
**Figura A.21.** Correlación simétrica entre las estaciones AZCA y MECA



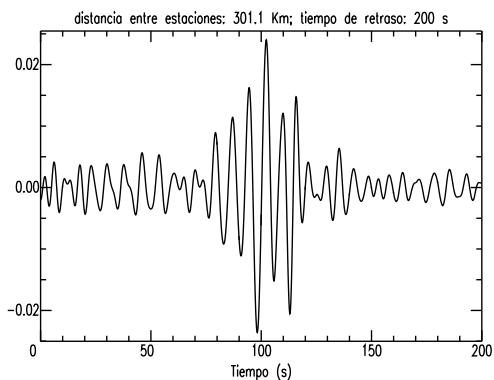
**Figura A.22.** Correlación simétrica entre las estaciones AZCA y RODS



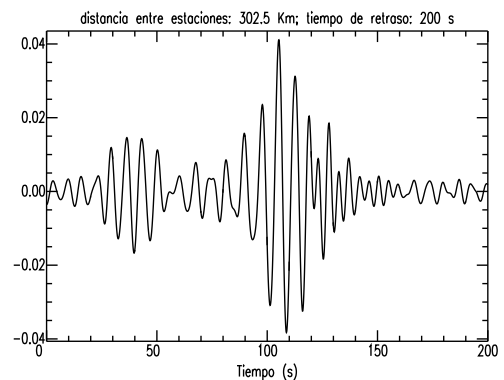
**Figura A.23.** Correlación simétrica entre las estaciones SCCA y AZCA



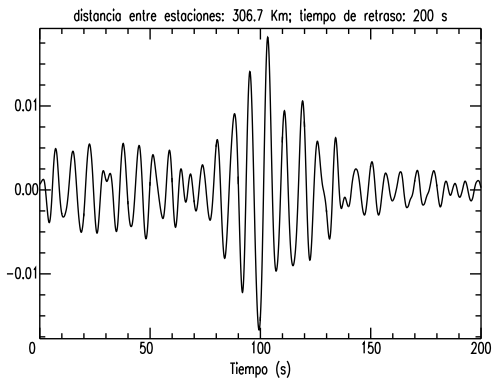
**Figura A.24.** Correlación simétrica entre las estaciones ESFA y SCCA



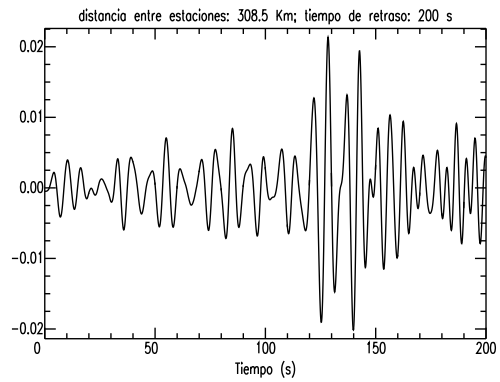
**Figura A.25.** Correlación simétrica entre las estaciones UNIS y TBOT



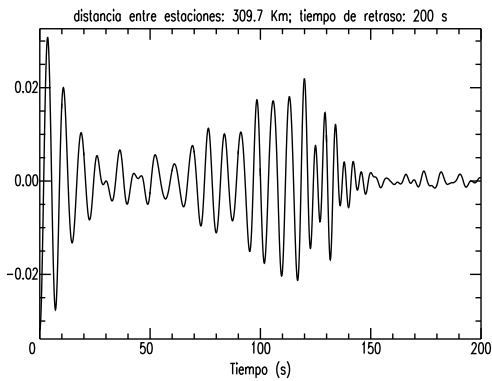
**Figura A.26.** Correlación simétrica entre las estaciones MECA y UNIS



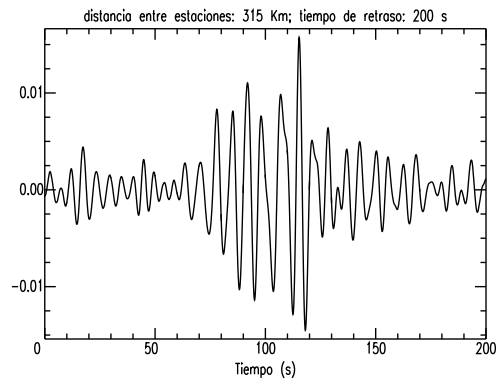
**Figura A.27.** Correlación simétrica entre las estaciones EDMB y UNIS



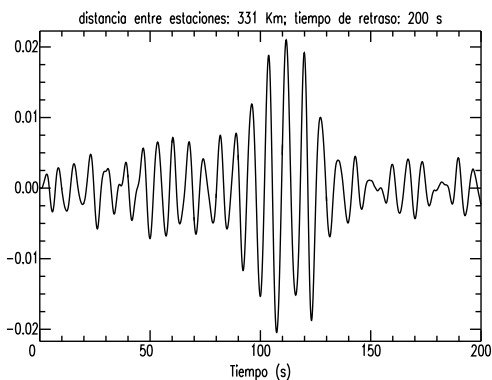
**Figura A.28.** Correlación simétrica entre las estaciones VACA y MECA



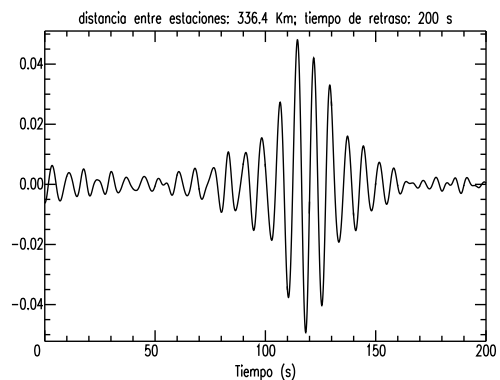
**Figura A.29.** Correlación simétrica entre las estaciones MECA y RODS



**Figura A.30.** Correlación simétrica entre las estaciones UNIS y ARAP

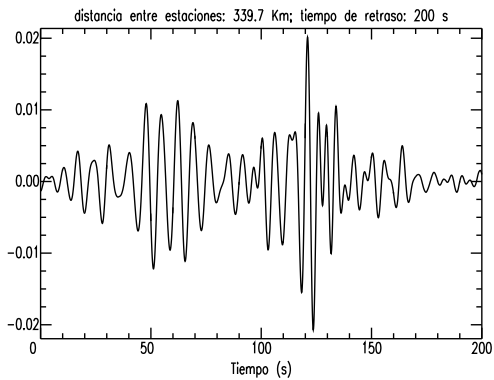


**Figura A.31.** Correlación simétrica entre las estaciones UNIS y PSAL

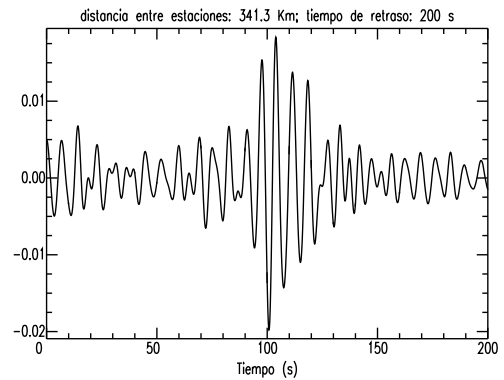


**Figura A.32.** Correlación simétrica entre las estaciones CRSM y RODS

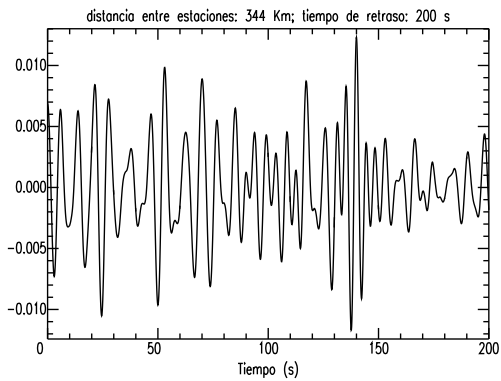




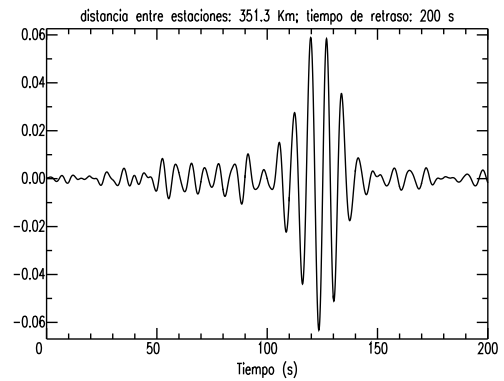
**Figura A.33.** Correlación simétrica entre las estaciones MECA y TBOT



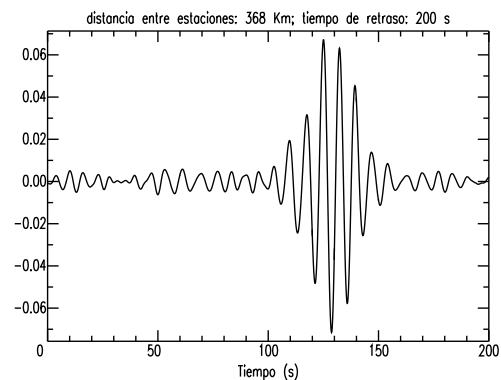
**Figura A.34.** Correlación simétrica entre las estaciones SJPY y AZCA



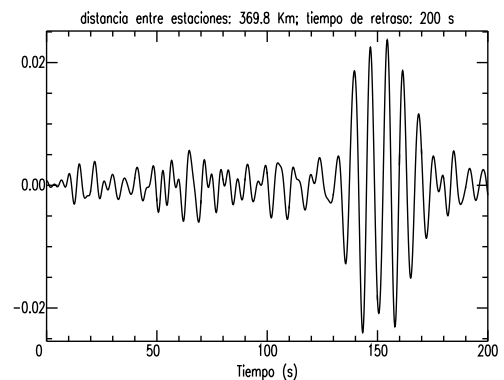
**Figura A.35.** Correlación simétrica entre las estaciones SJPY y CRSM



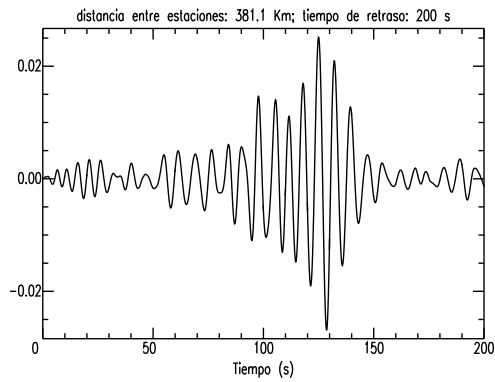
**Figura A.36.** Correlación simétrica entre las estaciones AZCA y ARAP



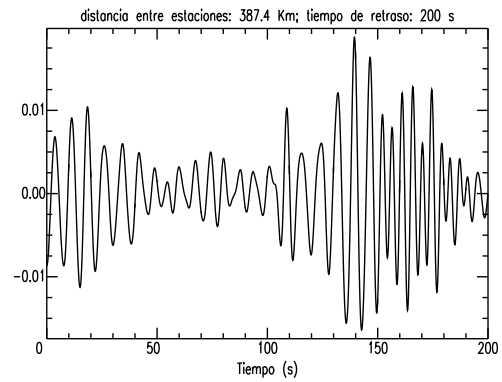
**Figura A.37.** Correlación simétrica entre las estaciones AZCA y PSAL



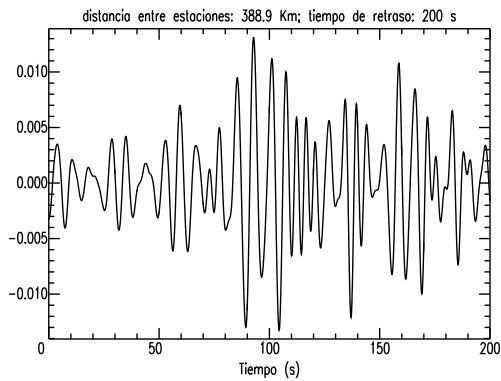
**Figura A.38.** Correlación simétrica entre las estaciones ESFA y VACA



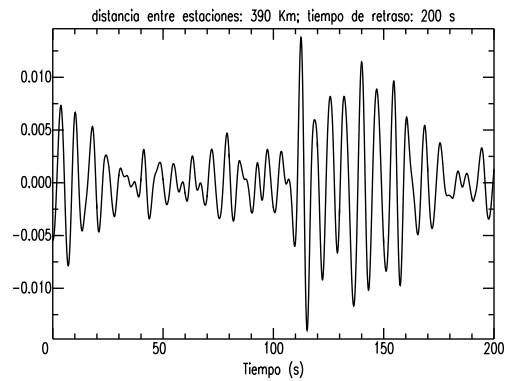
**Figura A.39.** Correlación simétrica entre las estaciones SJPY y SCCA



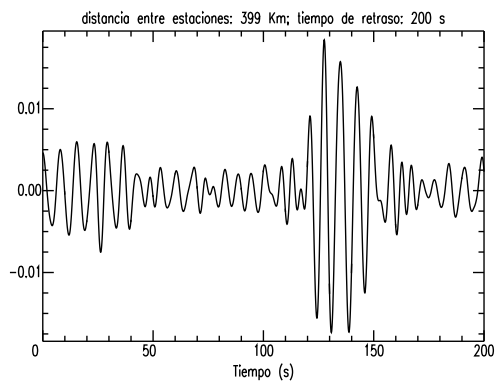
**Figura A.40.** Correlación simétrica entre las estaciones SCCA y UNIS



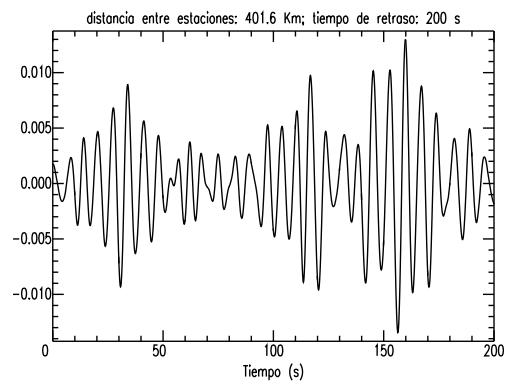
**Figura A.41.** Correlación simétrica entre las estaciones TICA y MECA



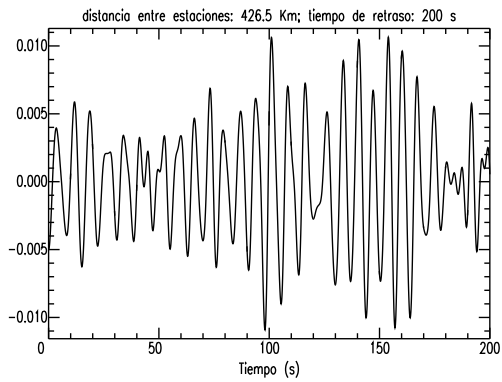
**Figura A.42.** Correlación simétrica entre las estaciones SCCA y ARAP



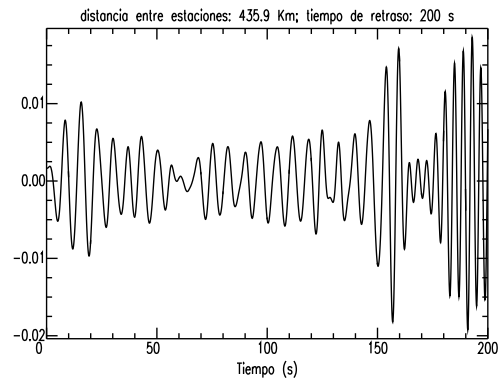
**Figura A.43.** Correlación simétrica entre las estaciones AZCA y TBOT



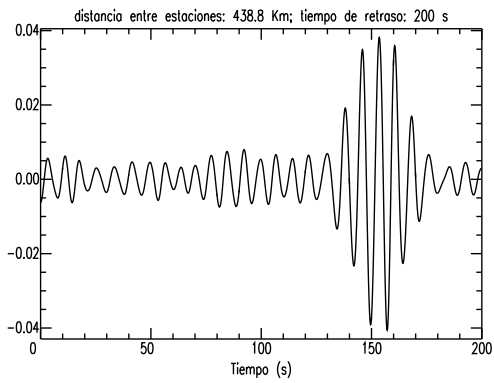
**Figura A.44.** Correlación simétrica entre las estaciones SCCA y PSAL



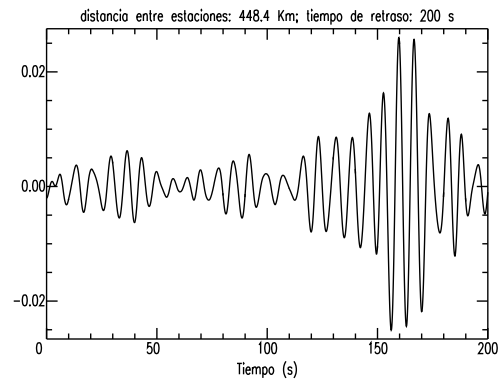
**Figura A.45.** Correlación simétrica entre las estaciones ESFA y AZCA



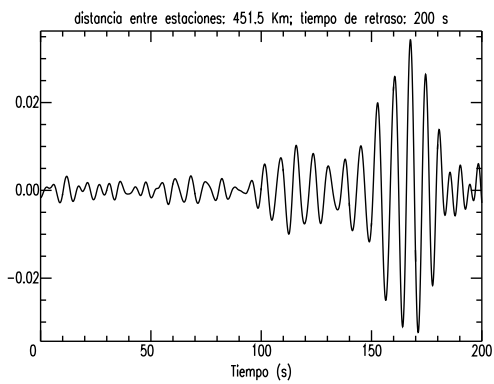
**Figura A.46.** Correlación simétrica entre las estaciones ESFA y EDMB



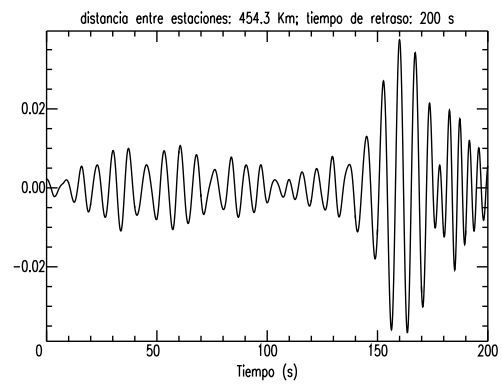
**Figura A.47.** Correlación simétrica entre las estaciones SCCA y EDMB



**Figura A.48.** Correlación simétrica entre las estaciones EDMB y RODS

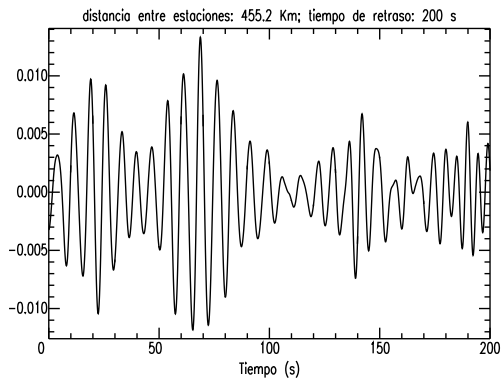


**Figura A.49.** Correlación simétrica entre las estaciones MECA y CRSM

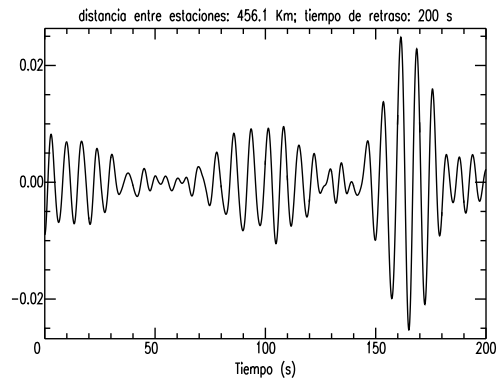


**Figura A.50.** Correlación simétrica entre las estaciones SCCA y CRSM

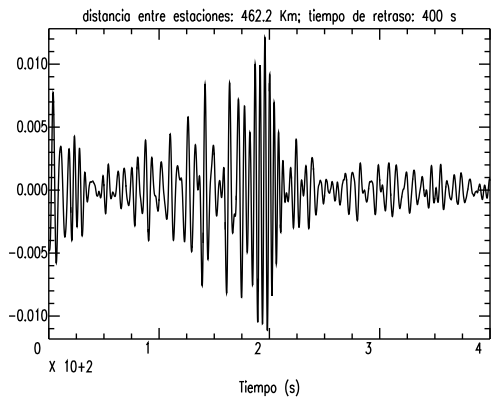
Correlaciones simétricas



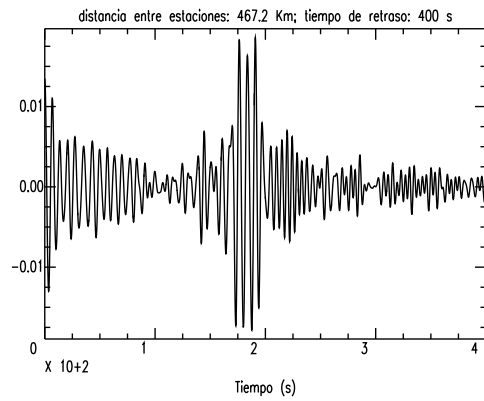
**Figura A.51.** Correlación simétrica entre las estaciones SCCA y RODS



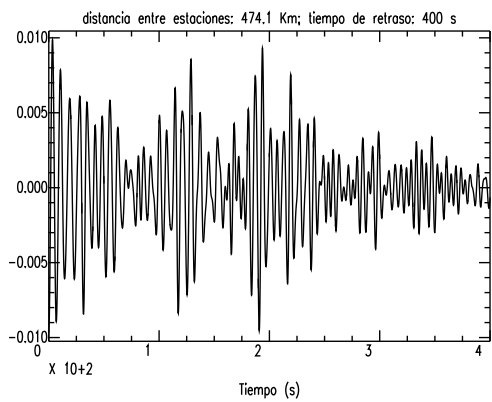
**Figura A.52.** Correlación simétrica entre las estaciones SJPY y TICA



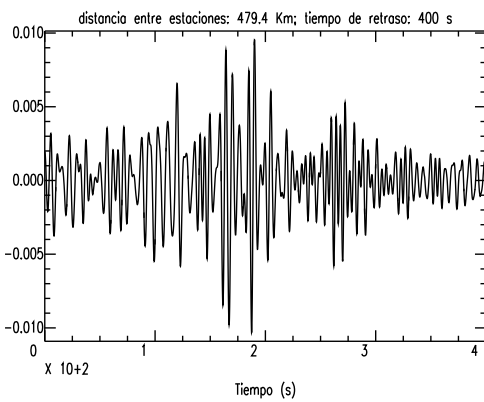
**Figura A.53.** Correlación simétrica entre las estaciones SJPY y UNIS



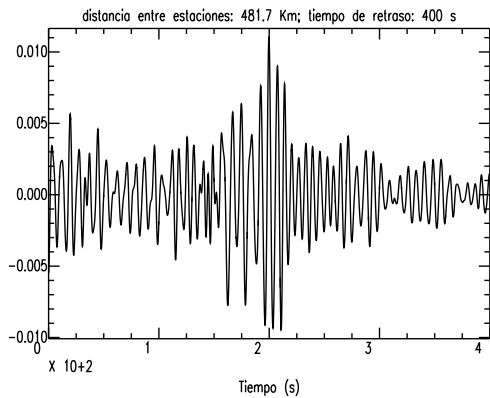
**Figura A.54.** Correlación simétrica entre las estaciones VACA y AZCA



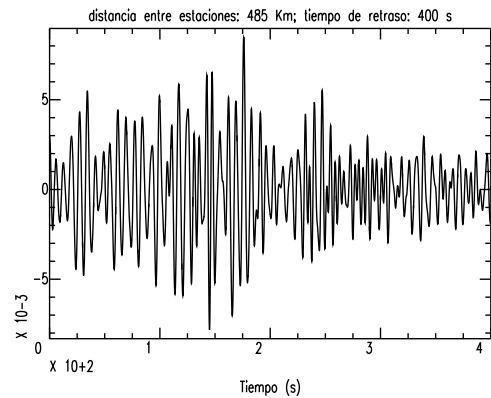
**Figura A.55.** Correlación simétrica entre las estaciones TICA y AZCA



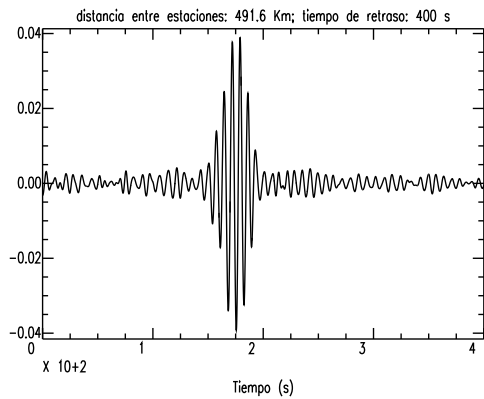
**Figura A.56.** Correlación simétrica entre las estaciones VACA y ARAP



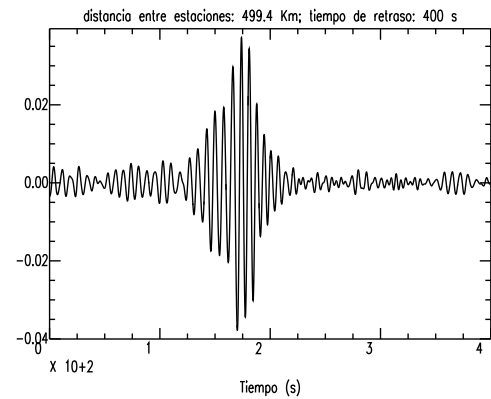
**Figura A.57.** Correlación simétrica entre las estaciones ESFA y MECA



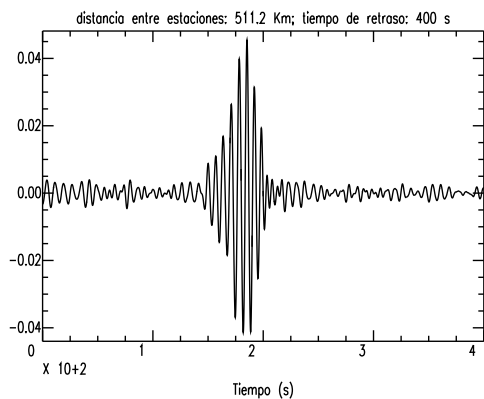
**Figura A.58.** Correlación simétrica entre las estaciones VACA y PSAL



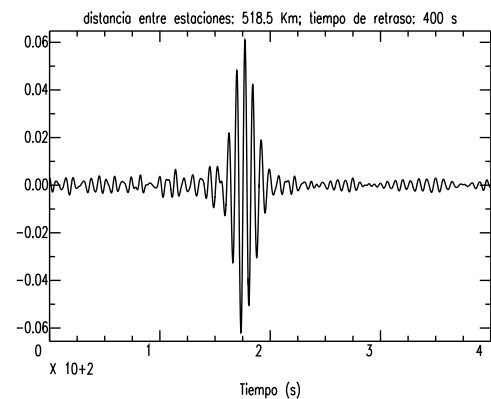
**Figura A.59.** Correlación simétrica entre las estaciones EDMB y MECA



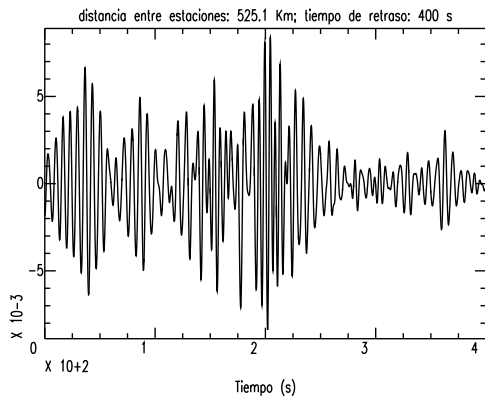
**Figura A.60.** Correlación simétrica entre las estaciones CRSM y TBOT



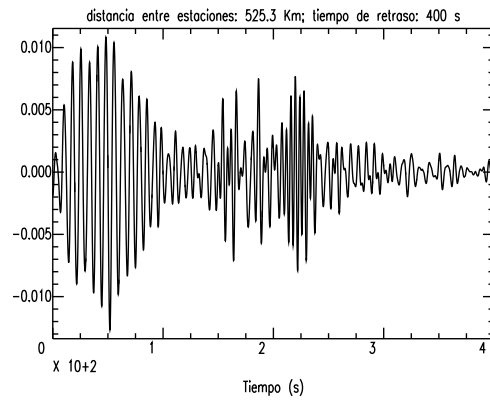
**Figura A.61.** Correlación simétrica entre las estaciones CRSM y ARAP



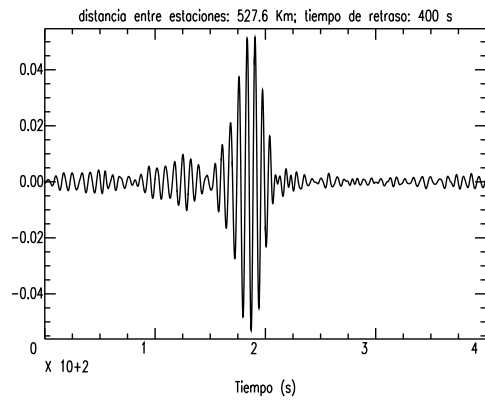
**Figura A.62.** Correlación simétrica entre las estaciones SJPY y MECA



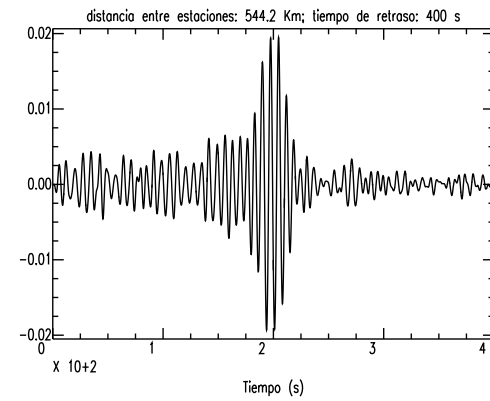
**Figura A.63.** Correlación simétrica entre las estaciones SCCA y TBOT



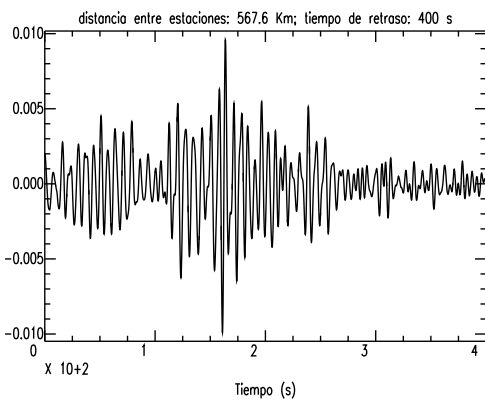
**Figura A.64.** Correlación simétrica entre las estaciones ESFA y CRSM



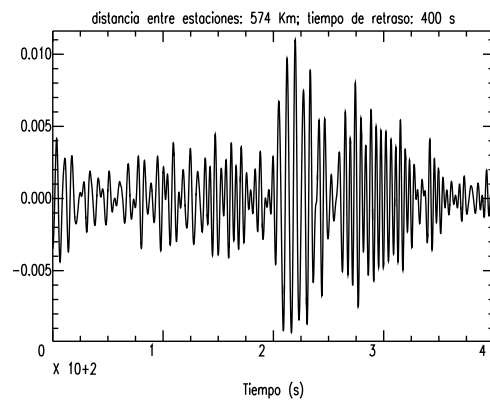
**Figura A.65.** Correlación simétrica entre las estaciones CRSM y PSAL



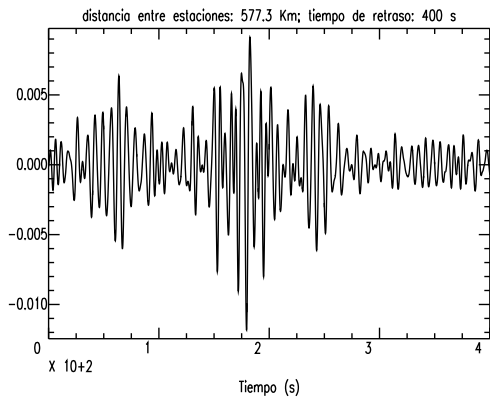
**Figura A.66.** Correlación simétrica entre las estaciones VACA y SJPY



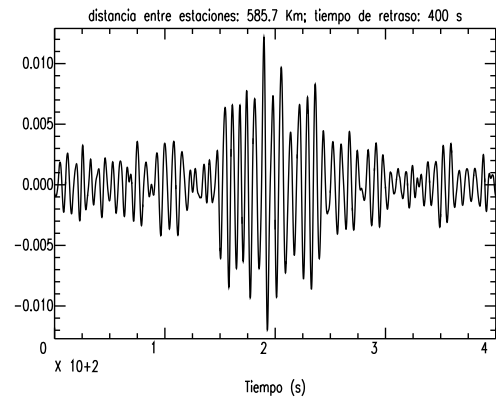
**Figura A.67.** Correlación simétrica entre las estaciones ESFA y UNIS



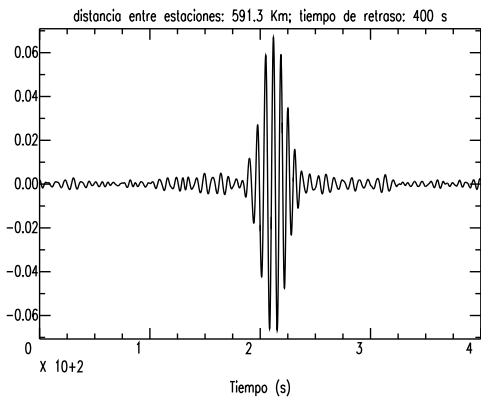
**Figura A.68.** Correlación simétrica entre las estaciones VACA y UNIS



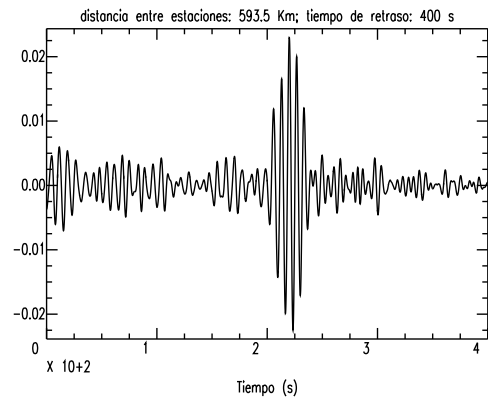
**Figura A.69.** Correlación simétrica entre las estaciones TICA y ARAP



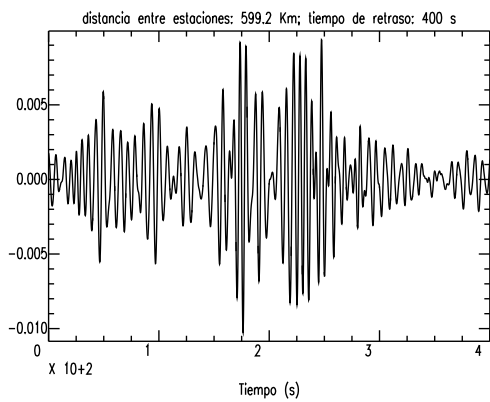
**Figura A.70.** Correlación simétrica entre las estaciones TICA y PSAL



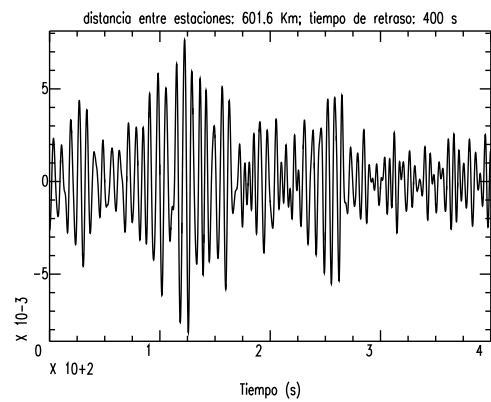
**Figura A.71.** Correlación simétrica entre las estaciones EDMB y ARAP



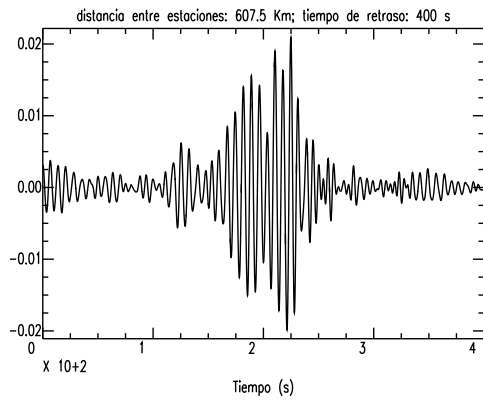
**Figura A.72.** Correlación simétrica entre las estaciones TICA y EDMB



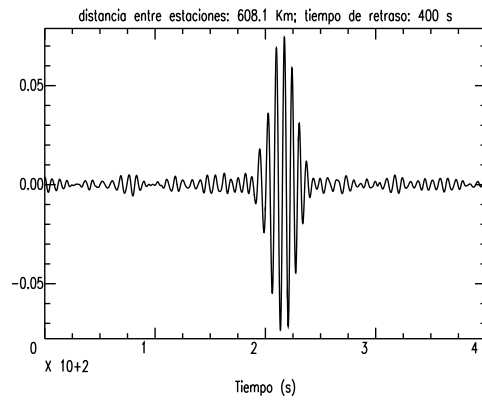
**Figura A.73.** Correlación simétrica entre las estaciones SJPY y RODS



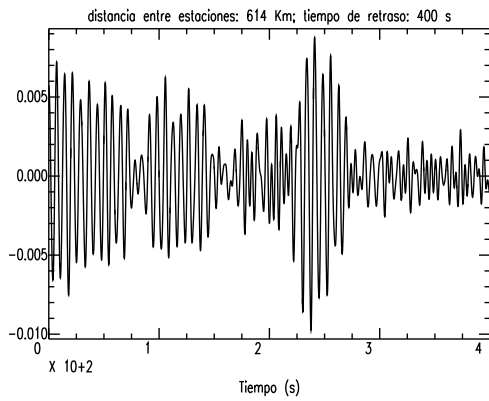
**Figura A.74.** Correlación simétrica entre las estaciones TICA y UNIS



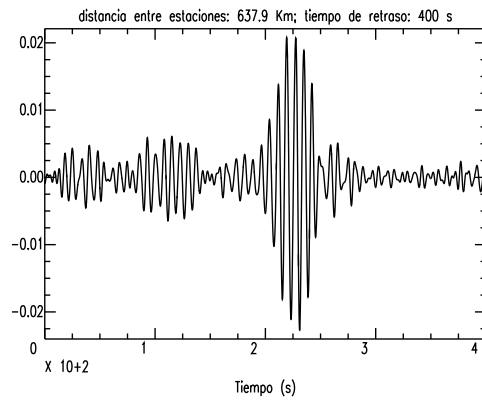
**Figura A.75.** Correlación simétrica entre las estaciones EDMB y TBOT



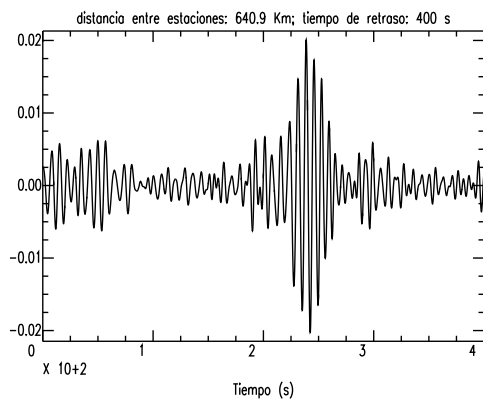
**Figura A.76.** Correlación simétrica entre las estaciones EDMB y PSAL



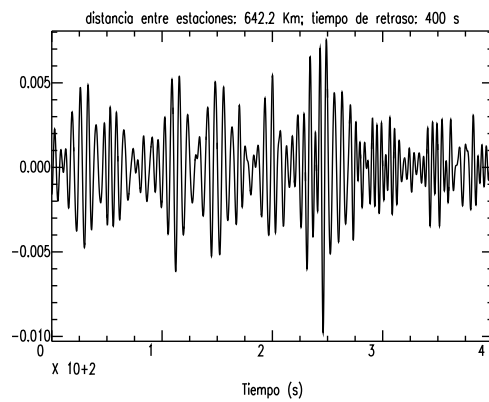
**Figura A.77.** Correlación simétrica entre las estaciones VACA y RODS



**Figura A.78.** Correlación simétrica entre las estaciones VACA y EDMB

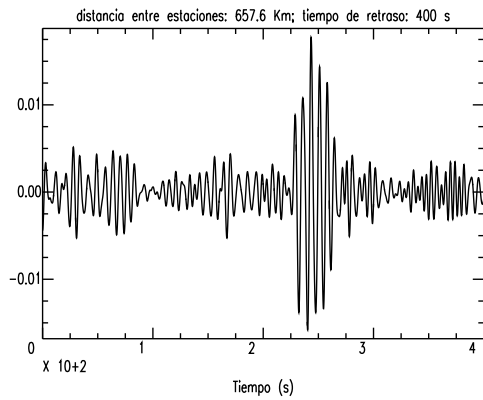


**Figura A.79.** Correlación simétrica entre las estaciones TICA y CRSM

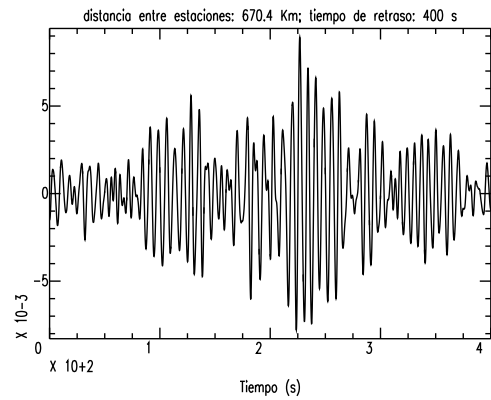


**Figura A.80.** Correlación simétrica entre las estaciones VACA y TBOT

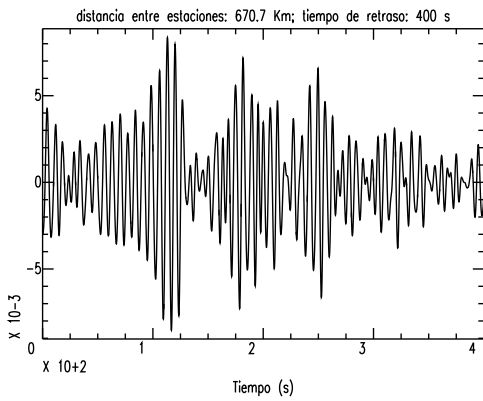




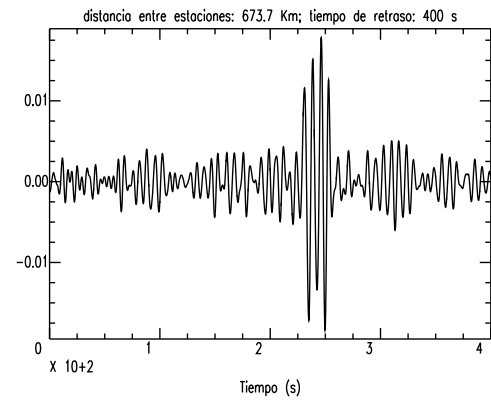
**Figura A.81.** Correlación simétrica entre las estaciones VACA y CRSM



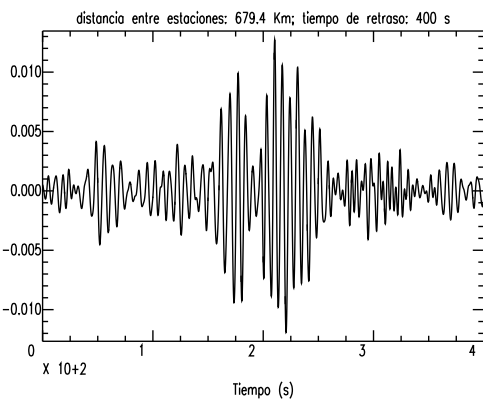
**Figura A.82.** Correlación simétrica entre las estaciones ESFA y ARAP



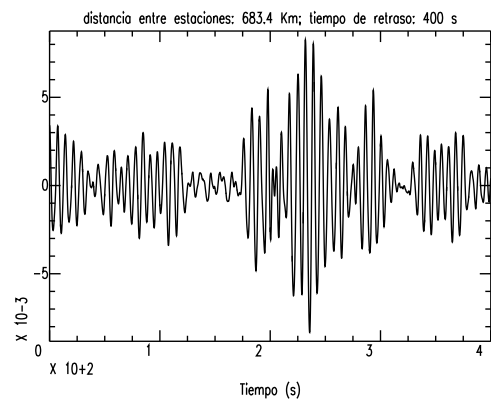
**Figura A.83.** Correlación simétrica entre las estaciones TICA y RODS



**Figura A.84.** Correlación simétrica entre las estaciones SJPY y ARAP



**Figura A.85.** Correlación simétrica entre las estaciones ESFA y RODS



**Figura A.86.** Correlación simétrica entre las estaciones ESFA y PSAL

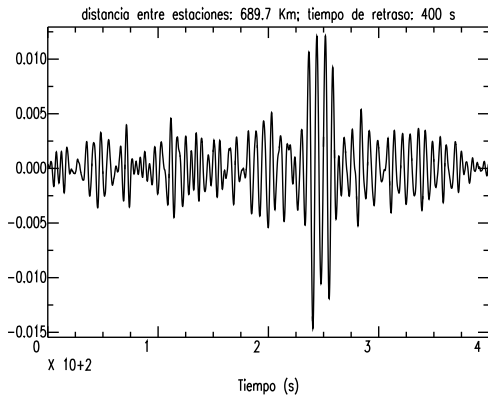


Figura A.87. Correlación simétrica entre las estaciones SJPY y PSAL

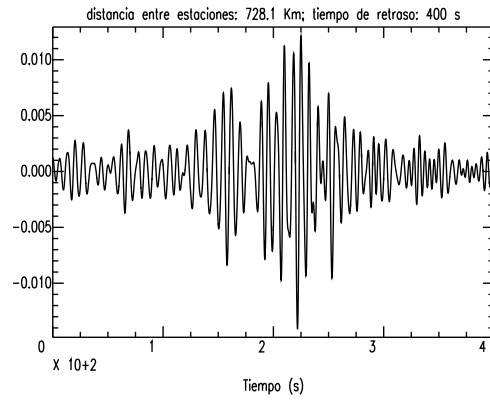


Figura A.88. Correlación simétrica entre las estaciones TICA y TBOT

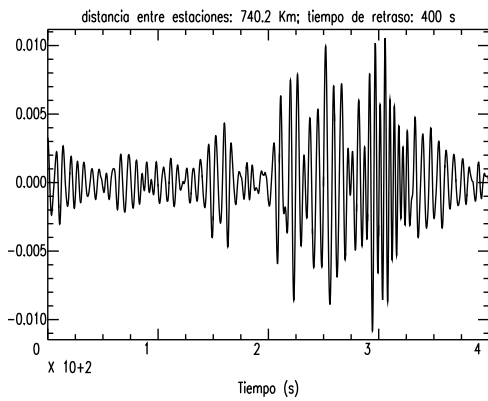


Figura A.89. Correlación simétrica entre las estaciones SJPY y TBOT

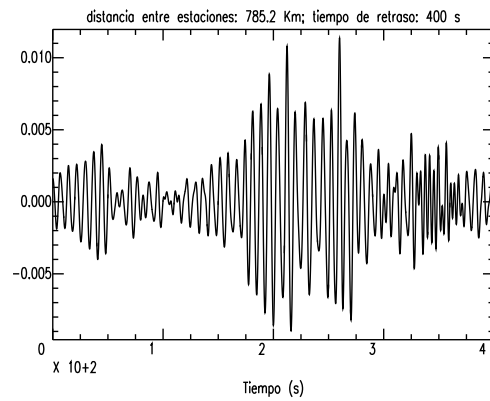


Figura A.90. Correlación simétrica entre las estaciones ESFA y TBOT

Estaciones	Dist. [Km]	Estaciones	Dist. [Km]	Estaciones	Dist. [Km]
EDMB-CRSM	131	UNIS-PSAL	331	CRSM-ARAP	511.2
AZCA-UNIS	141.2	CRSM-RODS	336.4	SJPY-MECA	518.5
TICA-VACA	142	MECA-TBOT	339.7	SCCA-TBOT	525.1
UNIS-RODS	142.4	SJPY-AZCA	341.3	ESFA-CRSM	525.3
RODS-TBOT	163.5	SJPY-CRSM	344	CRSM-PSAL	527.6
ARAP-TBOT	170.7	AZCA-ARAP	351.3	VACA-SJPY	544.2
PSAL-TBOT	172.2	AZCA-PSAL	368	ESFA-UNIS	567.6
MECA-ARAP	193.3	ESFA-VACA	369.8	VACA-UNIS	574
SCCA-MECA	197.1	SJPY-SCCA	381.1	TICA-ARAP	577.3
AZCA-CRSM	202	SCCA-UNIS	387.4	TICA-PSAL	585.7
CRSM-UNIS	202.1	TICA-MECA	388.9	EDMB-ARAP	591.3
VACA-SCCA	203.4	SCCA-ARAP	390	TICA-EDMB	593.5
MECA-PSAL	204.5	AZCA-TBOT	99	SJPY-RODS	599.2
TICA-SCCA	216.5	SCCA-PSAL	401.6	TICA-UNIS	601.6
SJPY-EDMB	225.3	ESFA-AZCA	426.5	EDMB-TBOT	607.5
RODS-ARAP	232	ESFA-EDMB	435.9	EDMB-PSAL	608.1
ESFA-SJPY	241.2	SCCA-EDMB	438.8	VACA-RODS	614
RODS-PSAL	244.6	EDMB-RODS	448.4	VACA-EDMB	637.9
EDMB-AZCA	244.6	MECA-CRSM	451.5	TICA-CRSM	640.9
ESFA-TICA	247	SCCA-CRSM	454.3	VACA-TBOT	642.2
AZCA-MECA	253.1	SCCA-RODS	455.2	VACA-CRSM	657.6
AZCA-RODS	262.7	SJPY-TICA	456.1	ESFA-ARAP	670.4
SCCA-AZCA	268	SJPY-UNIS	462.2	TICA-RODS	670.7
ESFA-SCCA	289.4	VACA-AZCA	467.2	SJPY-ARAP	673.7
UNIS-TBOT	301.1	TICA-AZCA	474.1	ESFA-RODS	679.4
MECA-UNIS	302.5	VACA-ARAP	479.4	ESFA-PSAL	683.4
EDMB-UNIS	306.7	ESFA-MECA	481.7	SJPY-PSAL	689.7
VACA-MECA	308.5	VACA-PSAL	485	TICA-TBOT	728.1
MECA-RODS	309.7	EDMB-MECA	491.6	SJPY-TBOT	740.2
UNIS-ARAP	315	CRSM-TBOT	499.4	ESFA-TBOT	785.2

**Tabla A.1.** Distancias entre estaciones utilizadas en este trabajo.

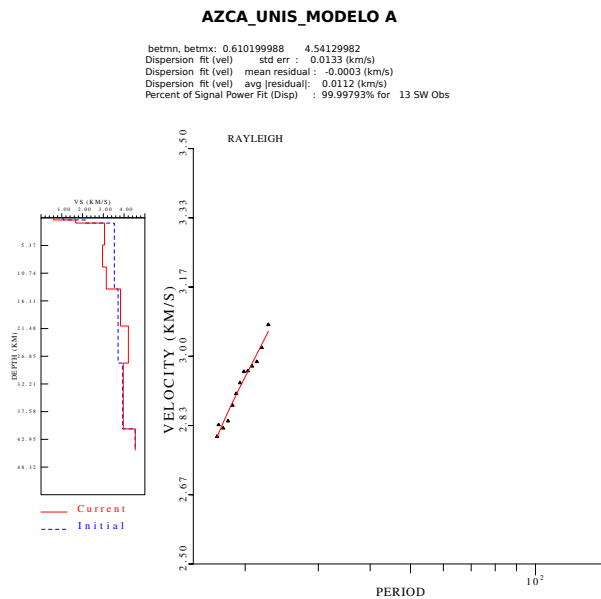


# Apéndice B

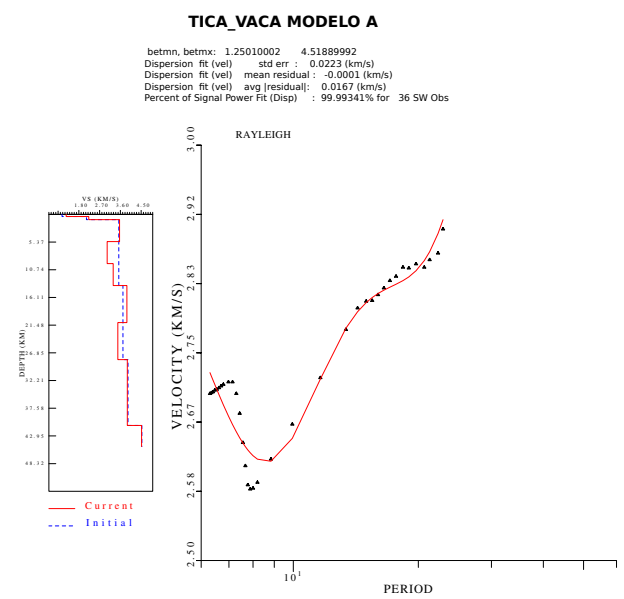
## Resultados de la inversión

En este anexo se encuentran las salidas del código *surf96* de la inversión de las curvas de dispersión, para cada modelo elegido, de las 83 trayectorias.

Las figuras muestran a la izquierda: el modelo inicial en azul y el modelo final en rojo, a la derecha: las velocidades de grupo observadas (triángulos negros) y las calculadas (línea roja).



**Figura B.1.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones AZCA y UNIS



**Figura B.2.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones TICA y VACA

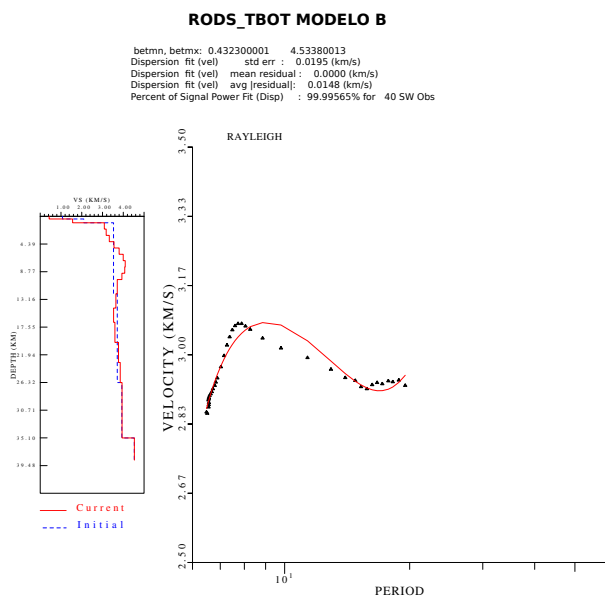


Figura B.3. Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones RODS y TBOT

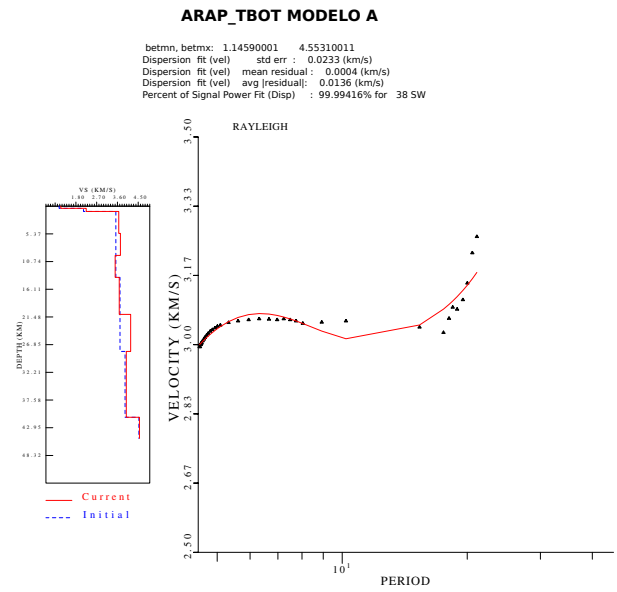


Figura B.4. Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones ARAP y TBOT

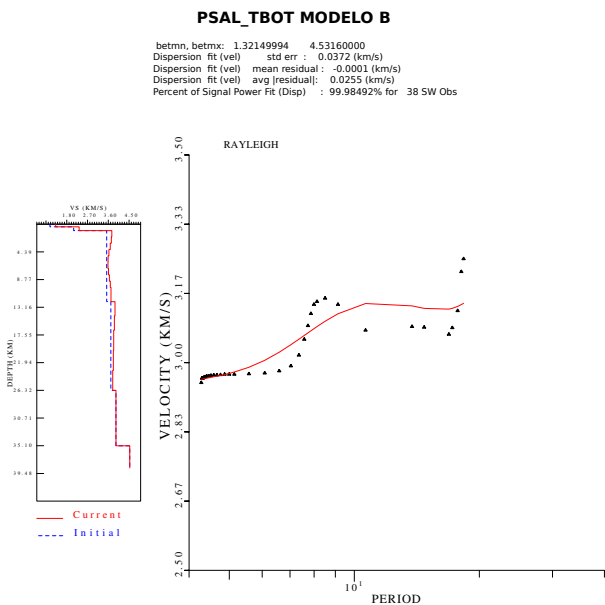


Figura B.5. Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones PSAL y TBOT

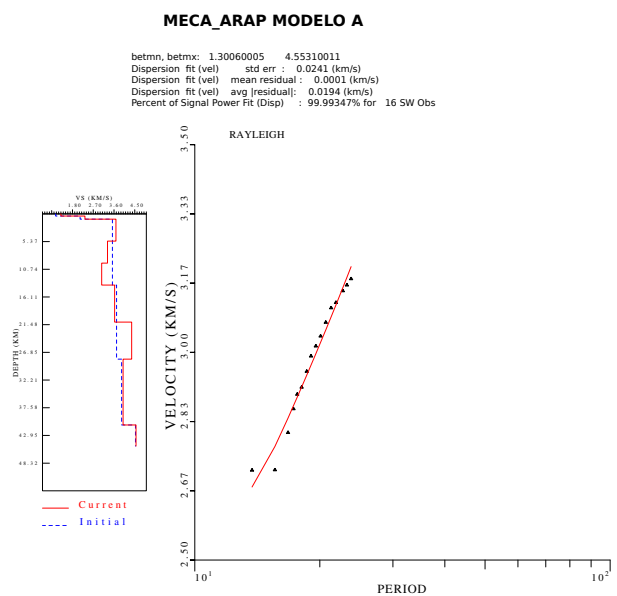
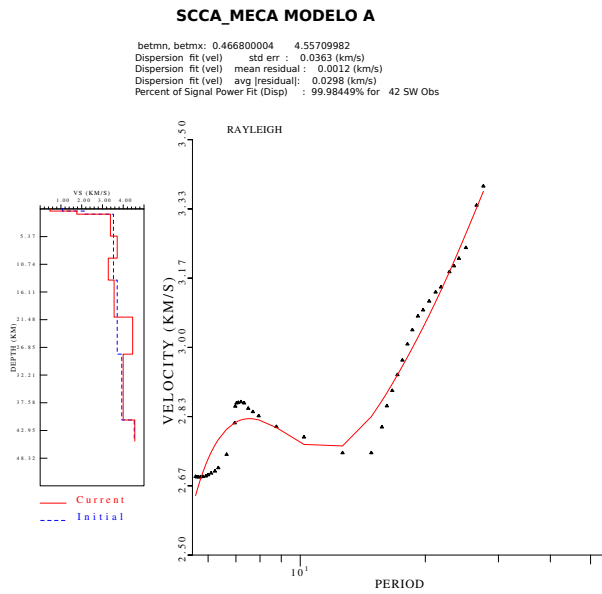
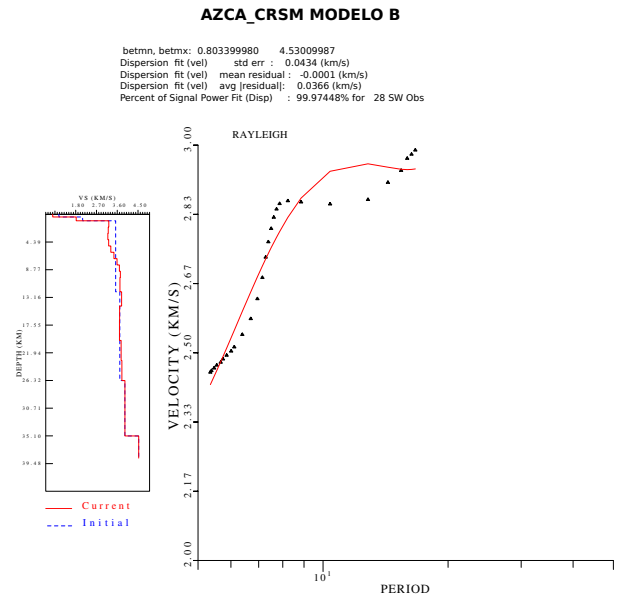


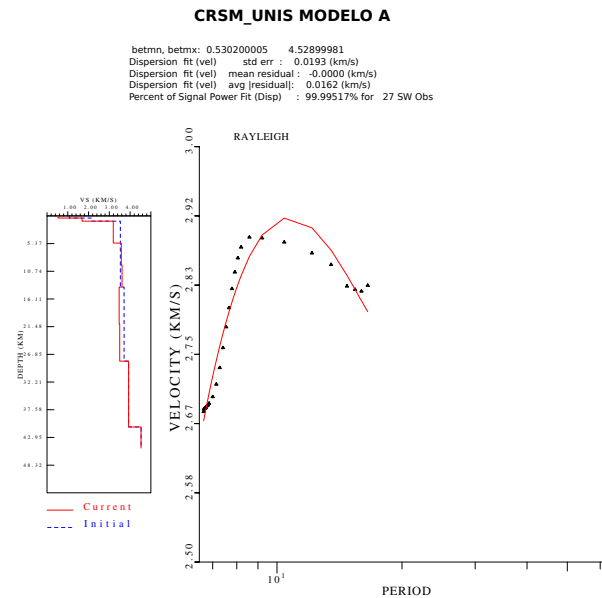
Figura B.6. Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones MECA y ARAP



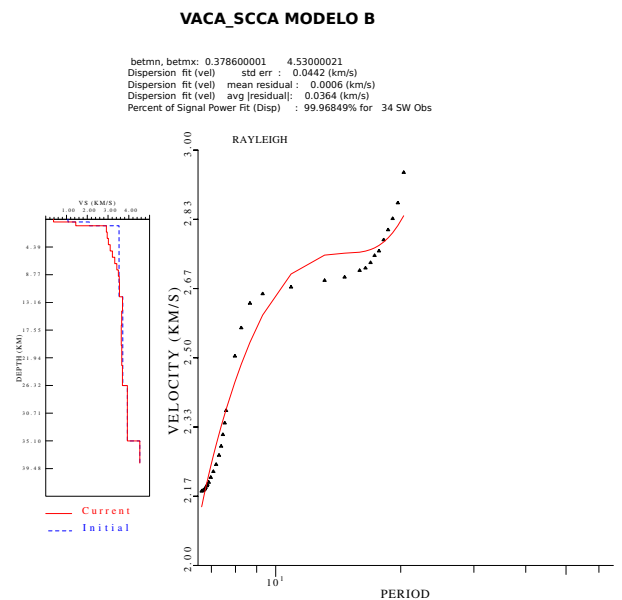
**Figura B.7.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones SCCA y MECA



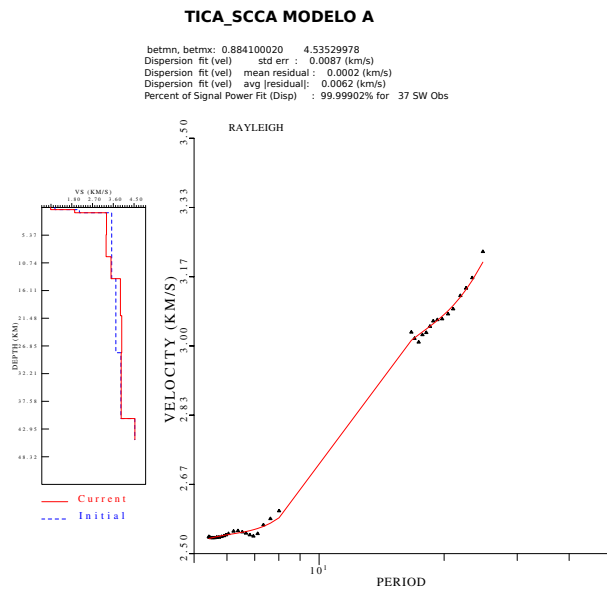
**Figura B.8.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones AZCA y CRSM



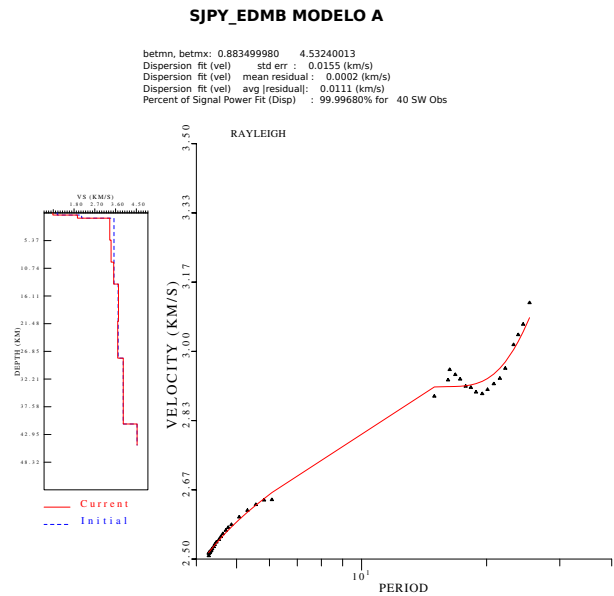
**Figura B.9.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones CRSM y UNIS



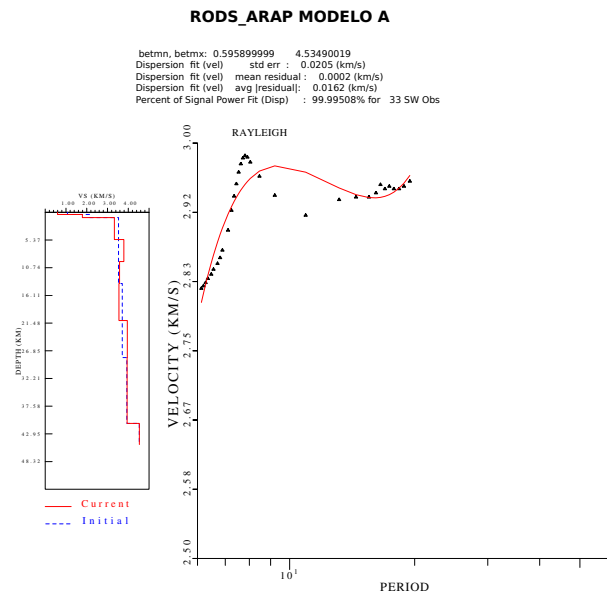
**Figura B.10.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones VACA y SCCA



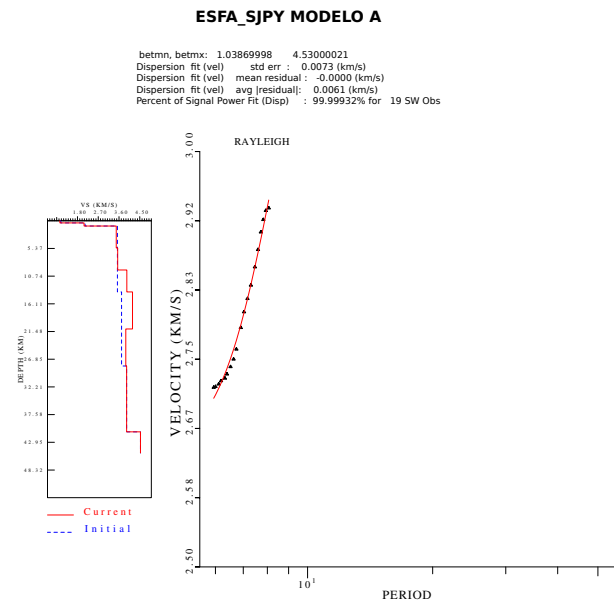
**Figura B.11.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones TICA y SCCA



**Figura B.12.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones SJPY y EDMB

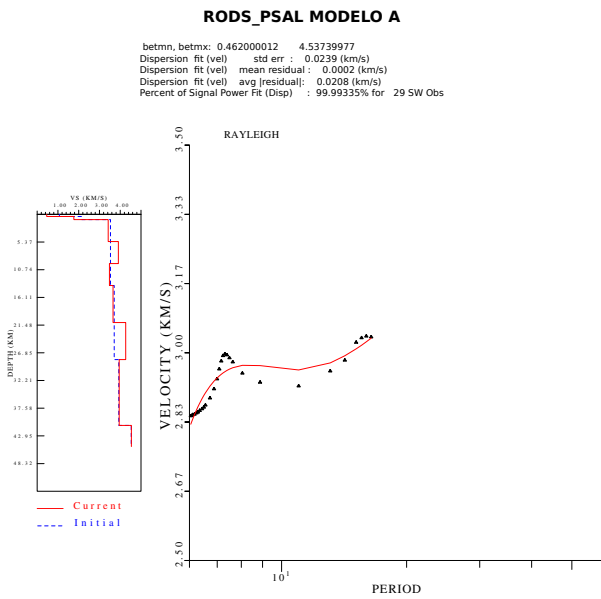


**Figura B.13.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones RODS y ARAP

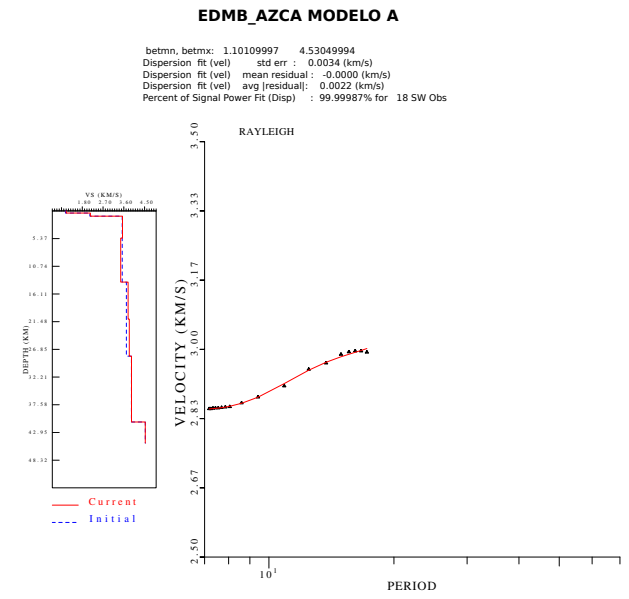


**Figura B.14.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones ESFA y SJPY

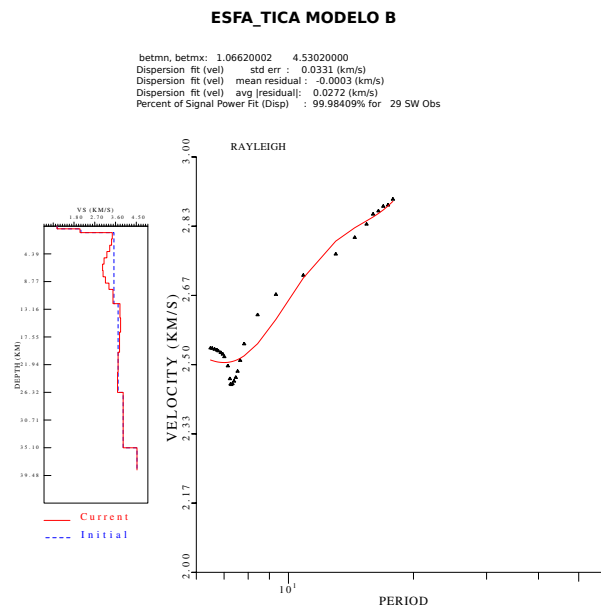




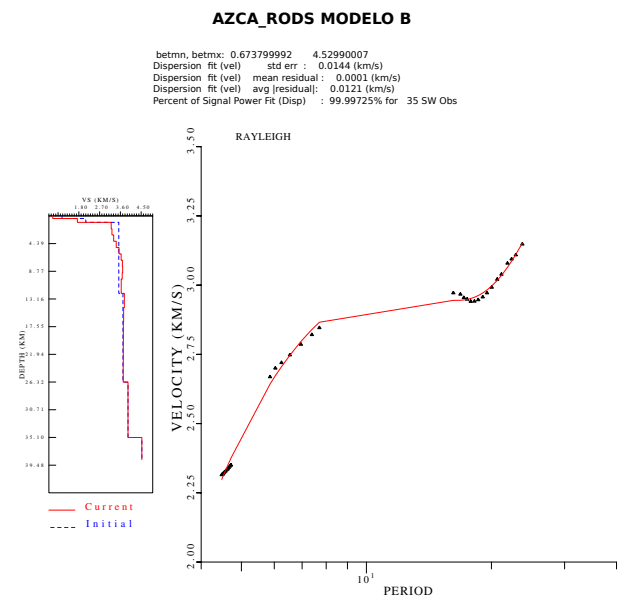
**Figura B.15.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones RODS y PSAL



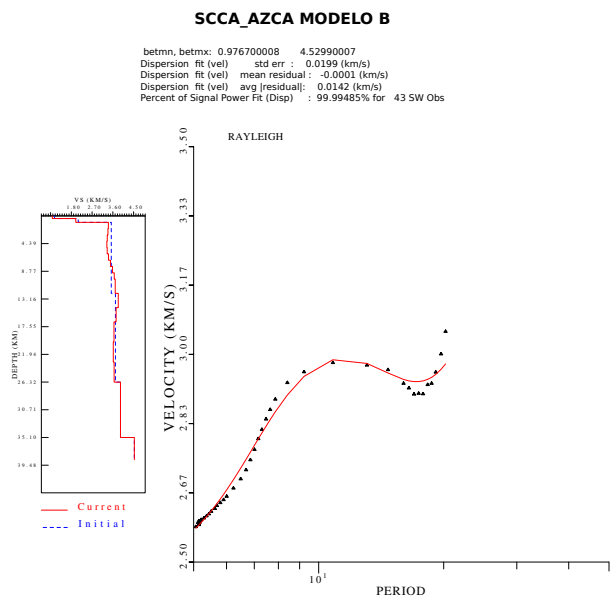
**Figura B.16.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones EDMB y AZCA



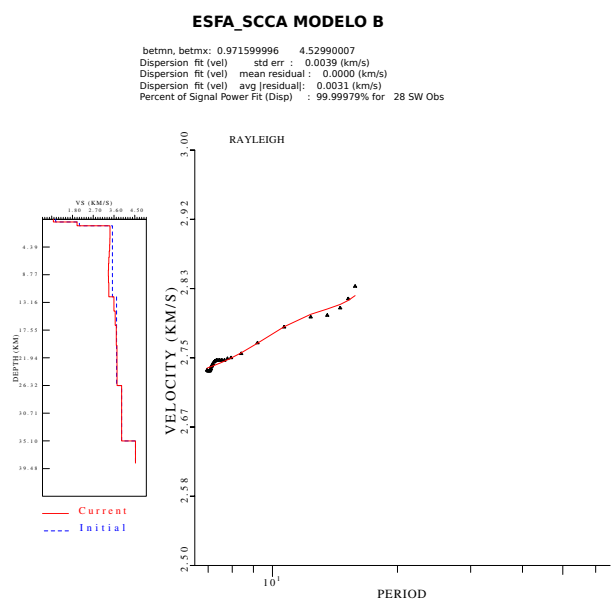
**Figura B.17.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones ESFA y TICA



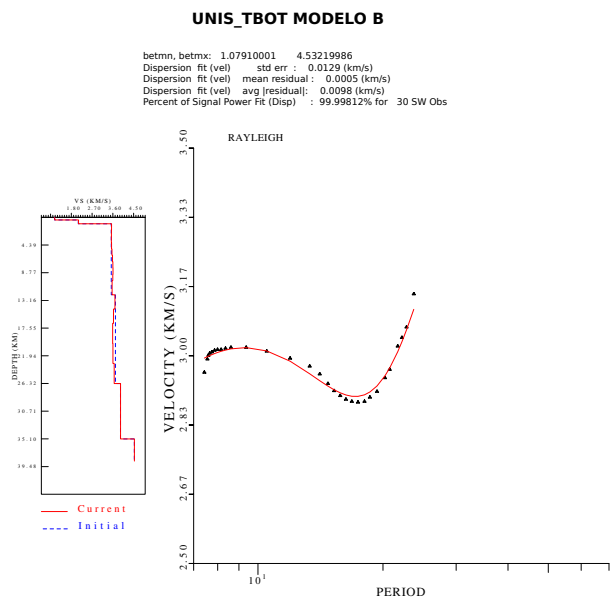
**Figura B.18.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones AZCA y RODS



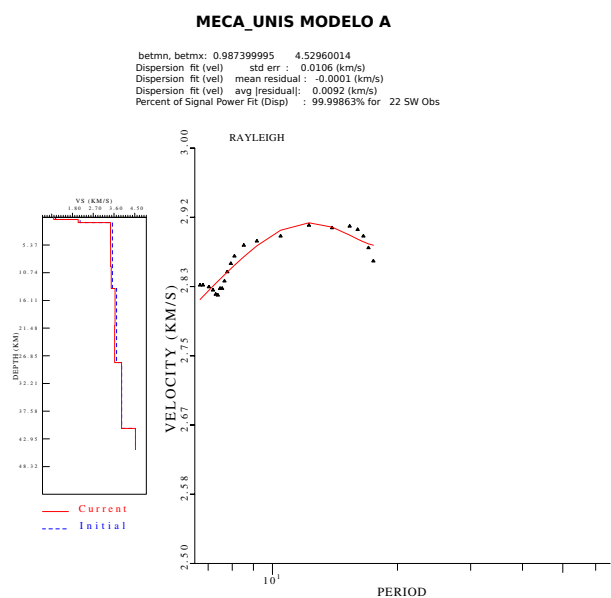
**Figura B.19.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones SCCA y AZCA



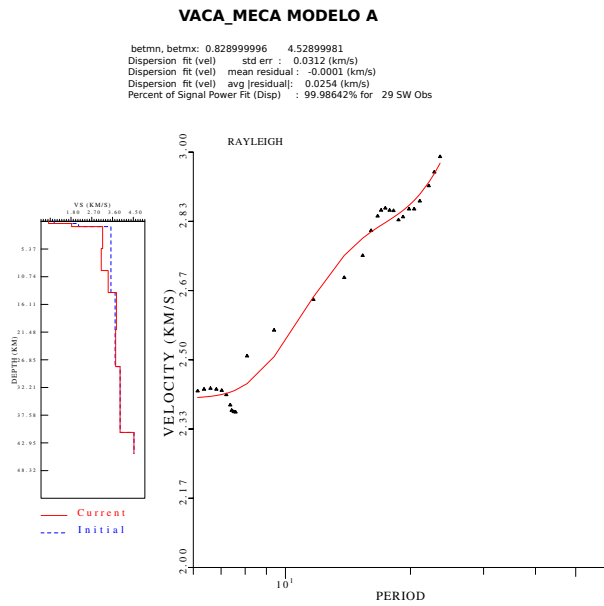
**Figura B.20.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones ESFA y SCCA



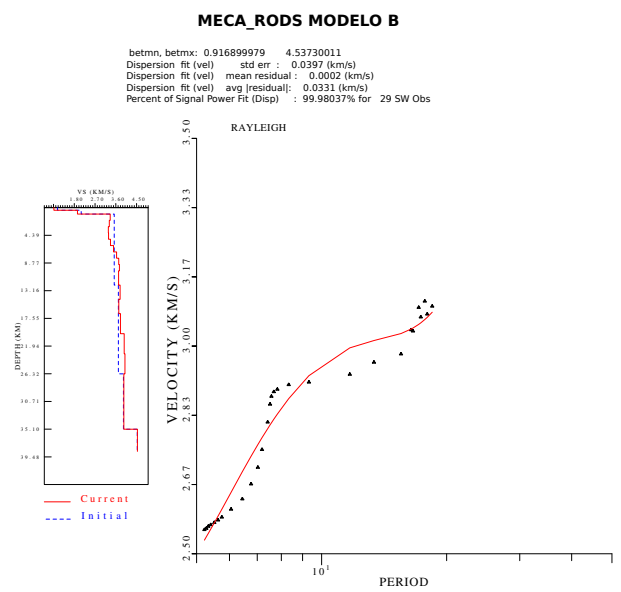
**Figura B.21.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones UNIS y TBOT



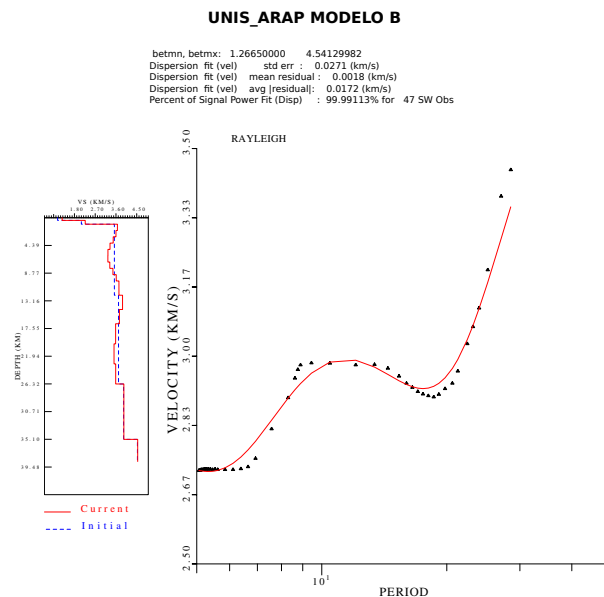
**Figura B.22.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones MECA y UNIS



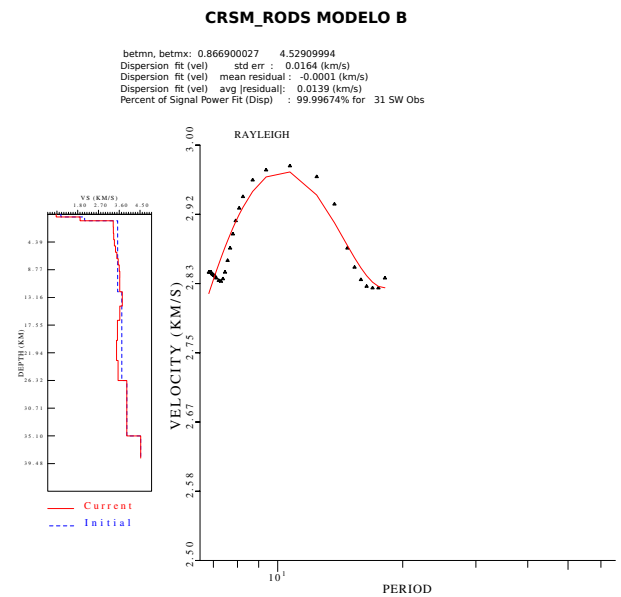
**Figura B.23.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones VACA y MECA



**Figura B.24.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones MECA y RODS

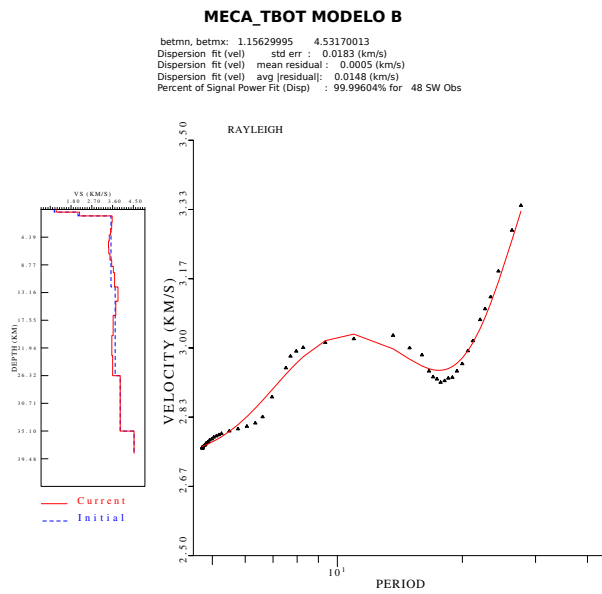


**Figura B.25.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones UNIS y ARAP

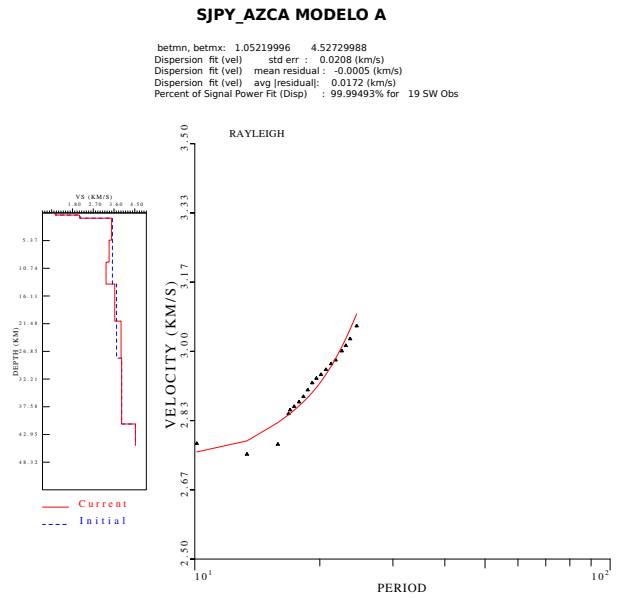


**Figura B.26.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones CRSM y RODS

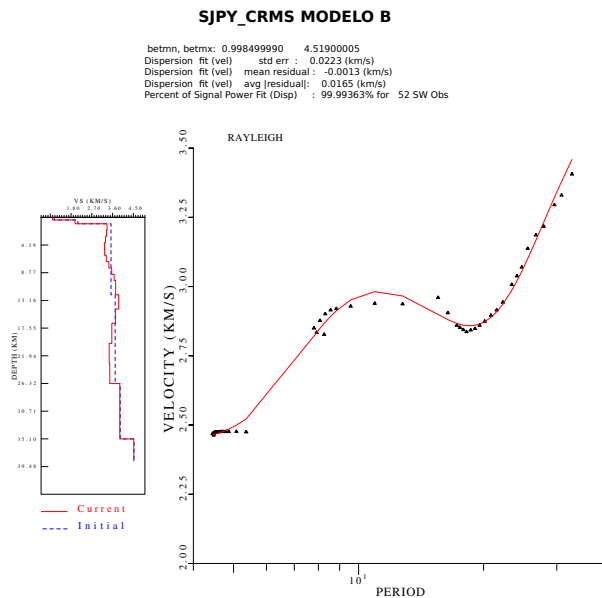
Resultados de la inversión



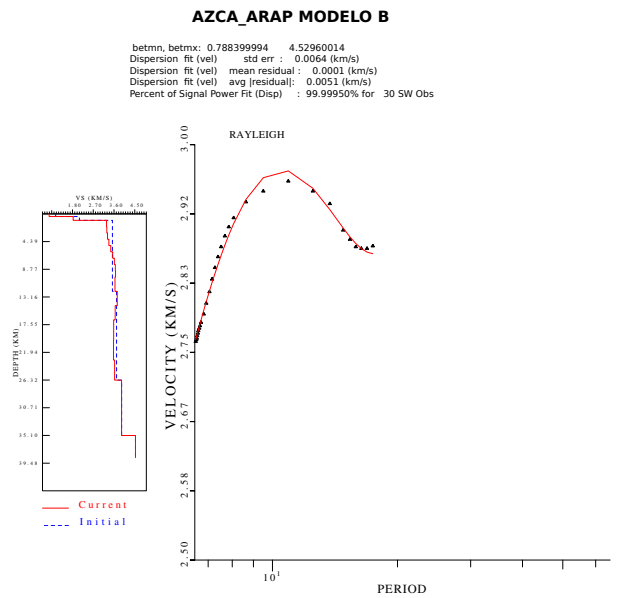
**Figura B.27.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones MECA y TBOT



**Figura B.28.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones SJPY y AZCA



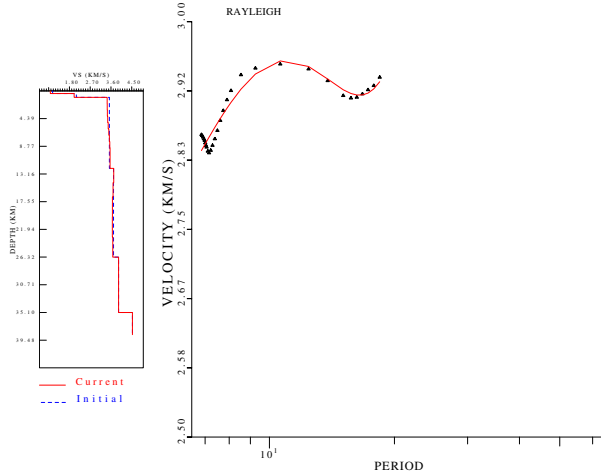
**Figura B.29.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones SJPY y CRSM



**Figura B.30.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones AZCA y ARAP

**AZCA\_PSAI MODELO B**

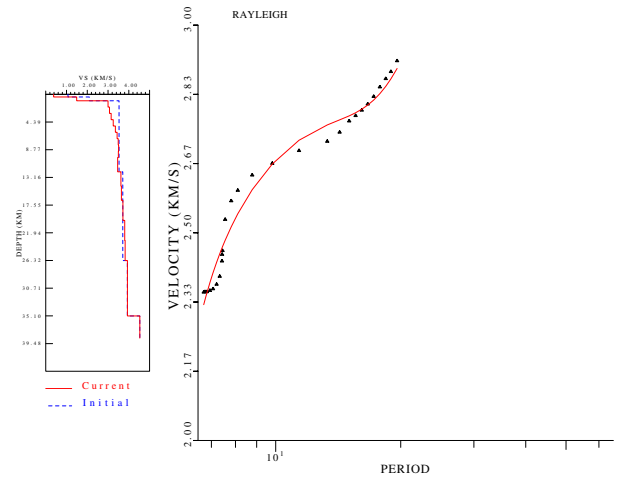
betmn, betmx: 0.971400023 4.52979994  
 Dispersion fit (vel) std err : 0.0105 (km/s)  
 Dispersion fit (vel) mean residual : 0.0050 (km/s)  
 Dispersion fit (vel) avg [residual]: 0.0087 (km/s)  
 Percent of Signal Power Fit (Disp) : 99.99867% for 30 SW Obs



**Figura B.31.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones AZCA y PSAI

**ESFA\_VACA MODELO B**

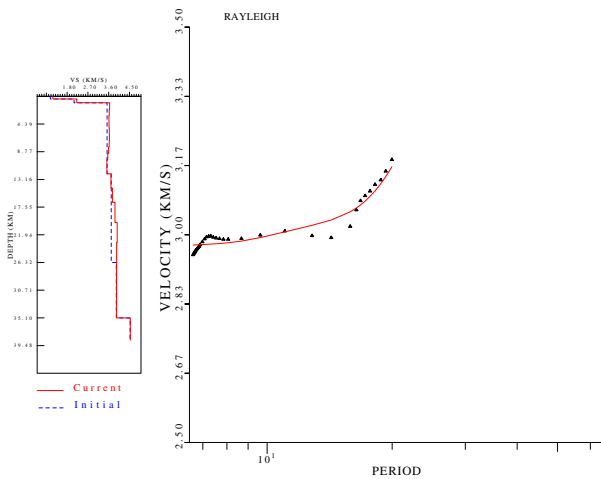
betmn, betmx: 0.380800009 4.53219986  
 Dispersion fit (vel) std err : 0.0304 (km/s)  
 Dispersion fit (vel) mean residual : 0.0005 (km/s)  
 Dispersion fit (vel) avg [residual]: 0.0247 (km/s)  
 Percent of Signal Power Fit (Disp) : 99.98644% for 28 SW Obs



**Figura B.32.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones ESFA y VACA

**SJPY\_SCCA MODELO B**

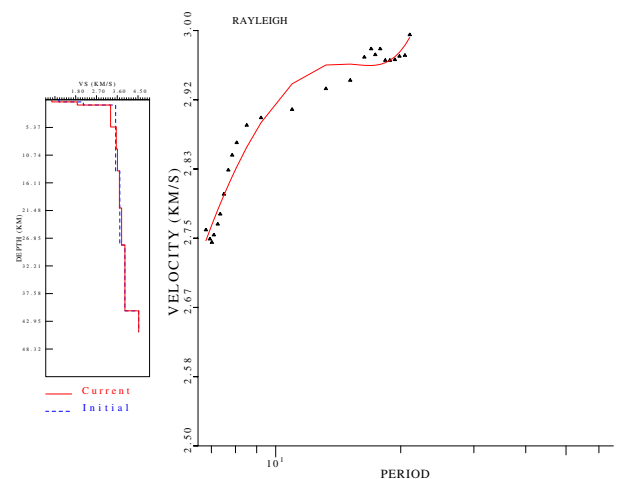
betmn, betmx: 1.18229997 4.53590012  
 Dispersion fit (vel) std err : 0.0164 (km/s)  
 Dispersion fit (vel) mean residual : 0.0005 (km/s)  
 Dispersion fit (vel) avg [residual]: 0.0138 (km/s)  
 Percent of Signal Power Fit (Disp) : 99.99706% for 33 SW Obs



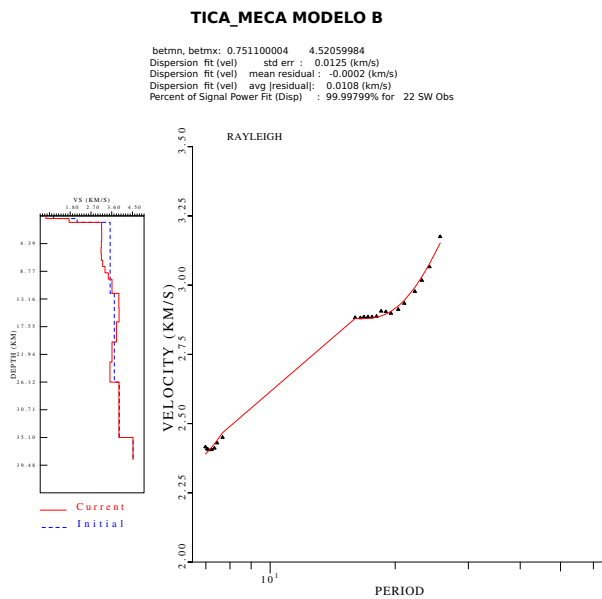
**Figura B.33.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones SJPY y SCCA

**SCCA\_UNIS MODELO A**

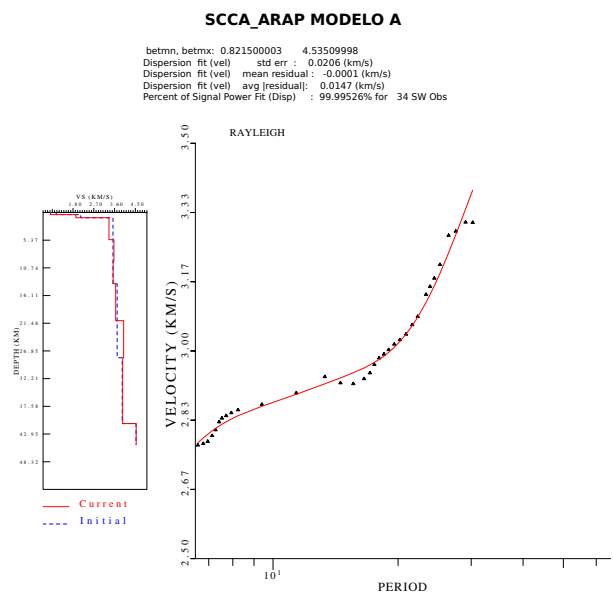
betmn, betmx: 0.763499975 4.52990007  
 Dispersion fit (vel) std err : 0.0173 (km/s)  
 Dispersion fit (vel) mean residual : 0.0003 (km/s)  
 Dispersion fit (vel) avg [residual]: 0.0146 (km/s)  
 Percent of Signal Power Fit (Disp) : 99.99643% for 25 SW Obs



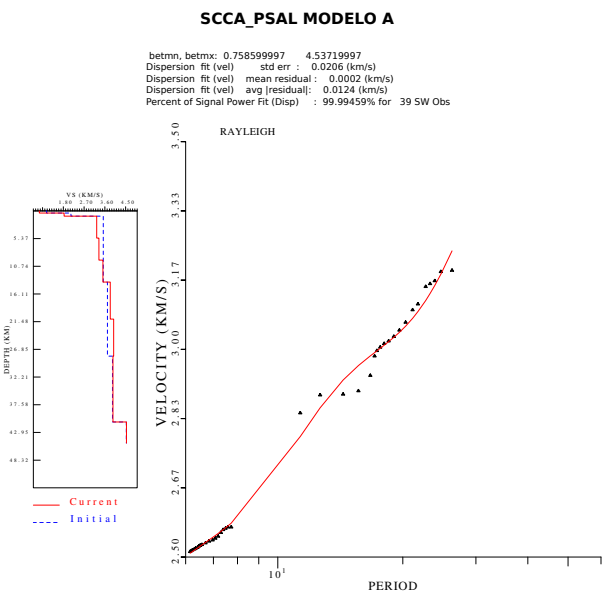
**Figura B.34.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones SCCA y UNIS



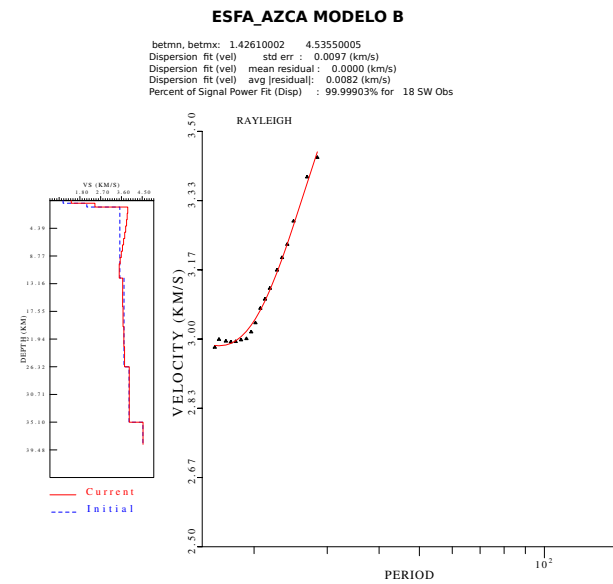
**Figura B.35.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones TICA y MECA



**Figura B.36.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones SCCA y ARAP



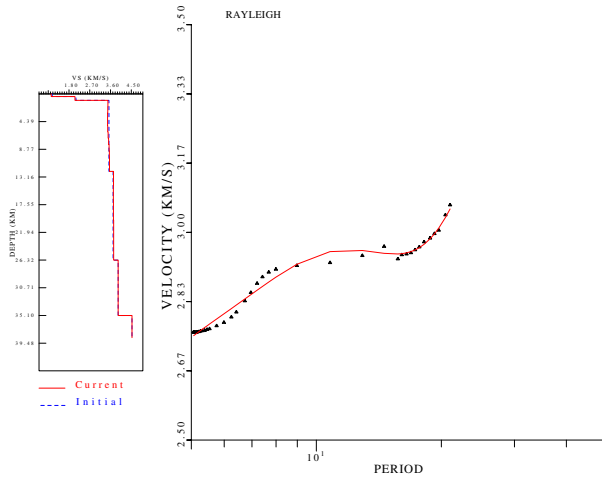
**Figura B.37.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones SCCA y PSAI



**Figura B.38.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones ESFA y AZCA

**ESFA\_EDMB MODELO B**

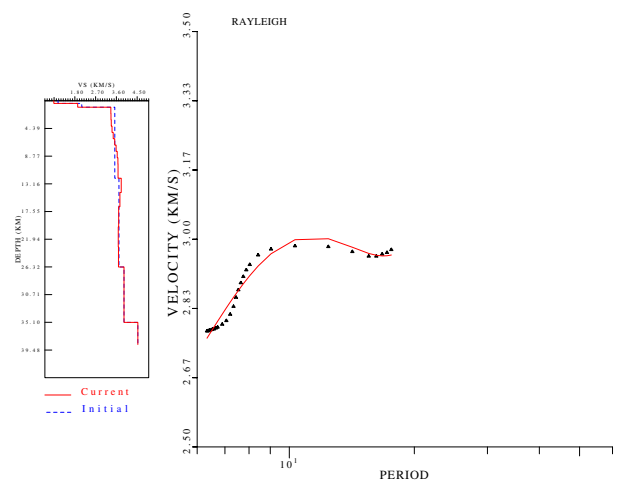
betmn, betmx: 1.03040004 4.53020000  
Dispersion fit (vel) std err : 0.0116 (km/s)  
Dispersion fit (vel) mean residual : -0.0000 (km/s)  
Dispersion fit (vel) avg [residual]: 0.0090 (km/s)  
Percent of Signal Power Fit (Disp) : 99.99837% for 40 SW Obs



**Figura B.39.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones ESFA y EDMB

**SCCA\_EDMB MODELO B**

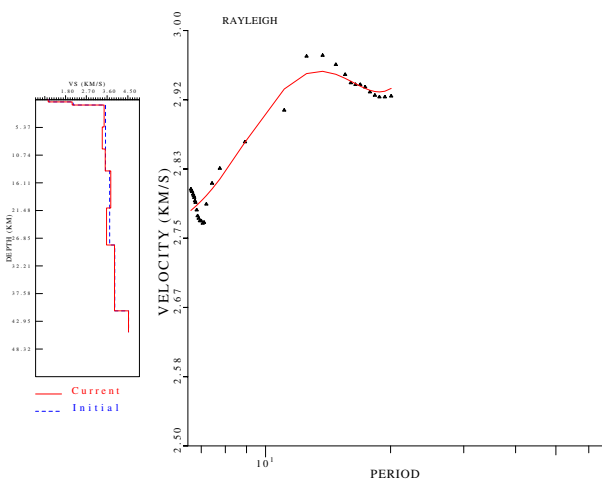
betmn, betmx: 0.888599992 4.52990007  
Dispersion fit (vel) std err : 0.0162 (km/s)  
Dispersion fit (vel) mean residual : -0.0000 (km/s)  
Dispersion fit (vel) avg [residual]: 0.0138 (km/s)  
Percent of Signal Power Fit (Disp) : 99.99683% for 29 SW Obs



**Figura B.40.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones SCCA y EDMB

**EDMB\_RODS MODELO A**

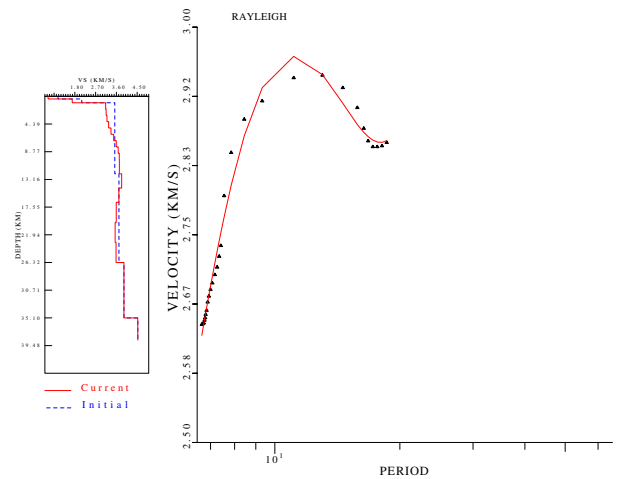
betmn, betmx: 1.04630005 4.52769995  
Dispersion fit (vel) std err : 0.0154 (km/s)  
Dispersion fit (vel) mean residual : -0.0002 (km/s)  
Dispersion fit (vel) avg [residual]: 0.0126 (km/s)  
Percent of Signal Power Fit (Disp) : 99.99711% for 33 SW Obs



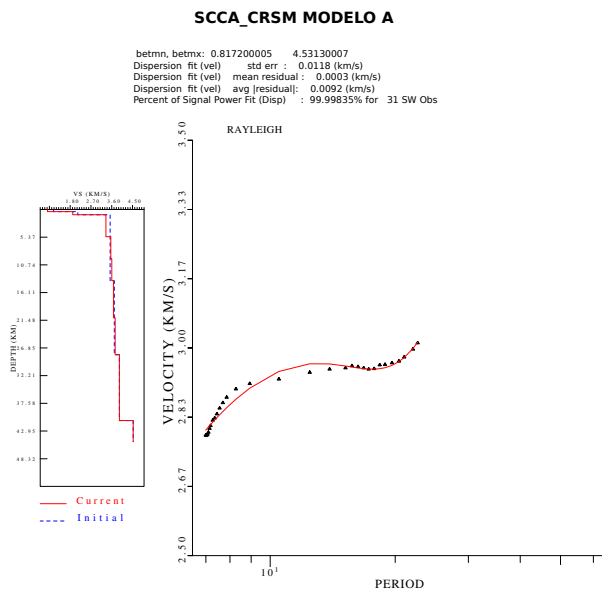
**Figura B.41.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones EDMB y RODS

**MECA\_CRSM MODELO B**

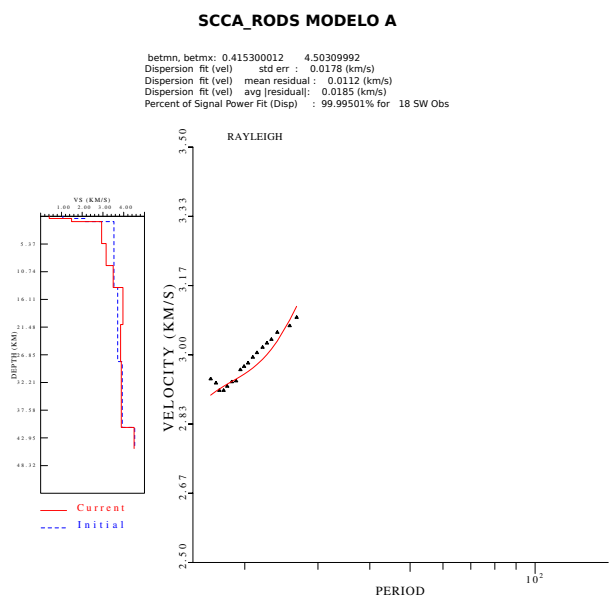
betmn, betmx: 0.638800025 4.52890015  
Dispersion fit (vel) std err : 0.0141 (km/s)  
Dispersion fit (vel) mean residual : -0.0000 (km/s)  
Dispersion fit (vel) avg [residual]: 0.0104 (km/s)  
Percent of Signal Power Fit (Disp) : 99.99742% for 30 SW Obs



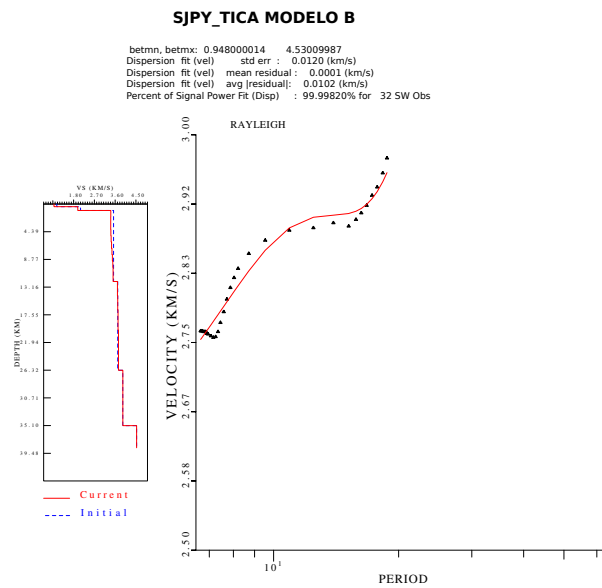
**Figura B.42.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones MECA y CRSM



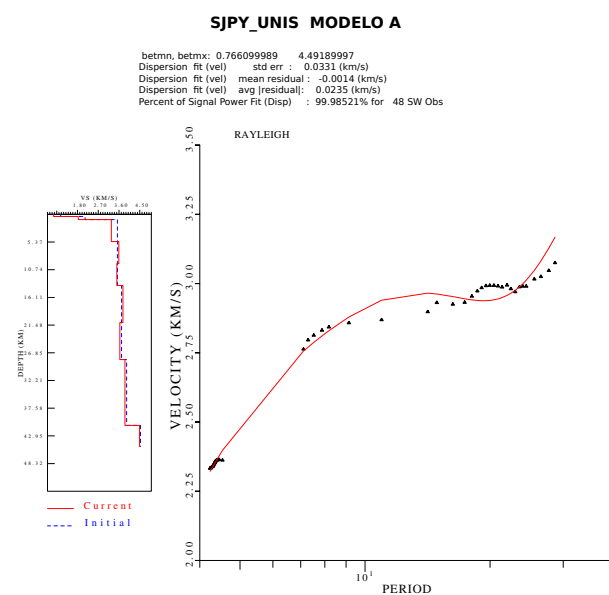
**Figura B.43.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones SCCA y CRSM



**Figura B.44.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones SCCA y RODS

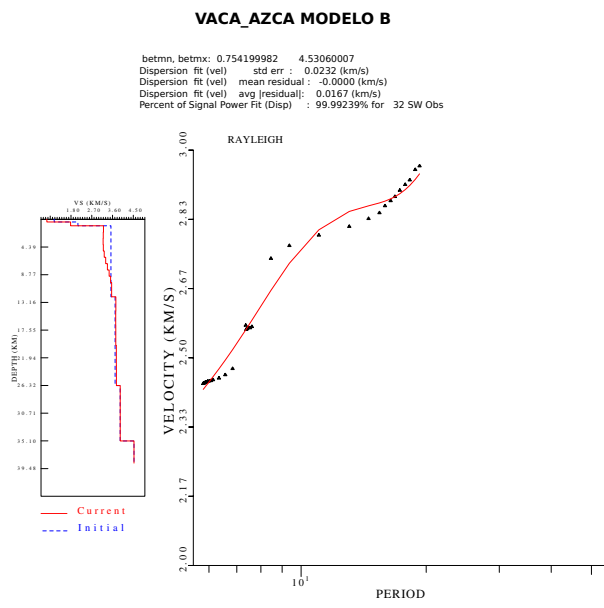


**Figura B.45.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones SJPY y TICA

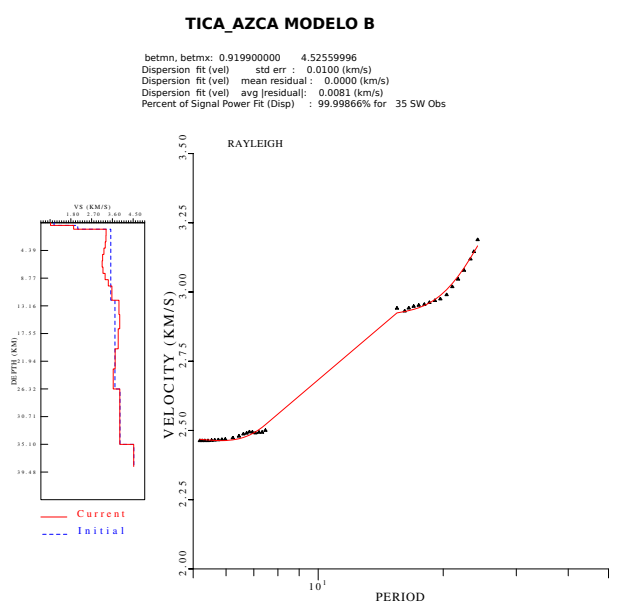


**Figura B.46.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones SJPY y UNIS

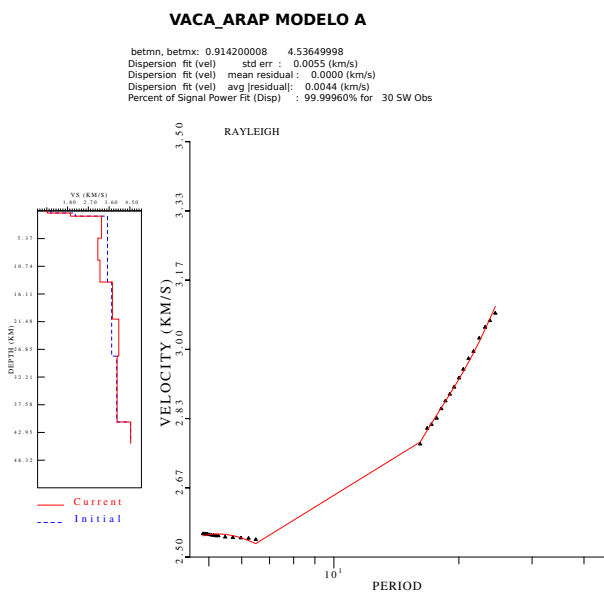




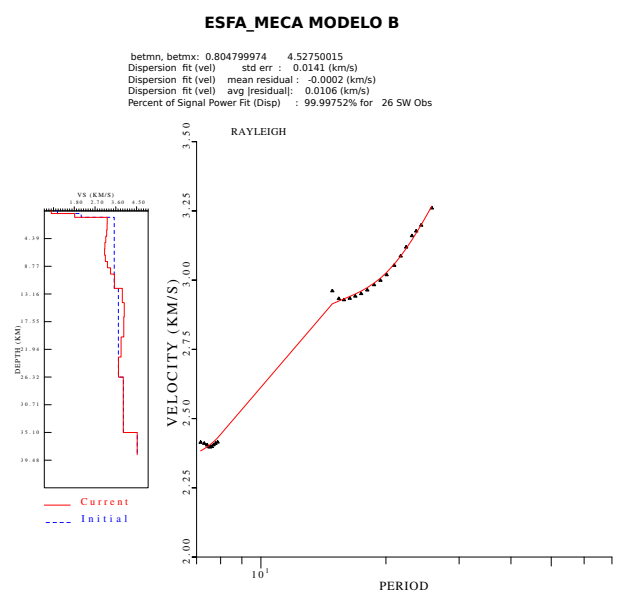
**Figura B.47.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones VACA y AZCA



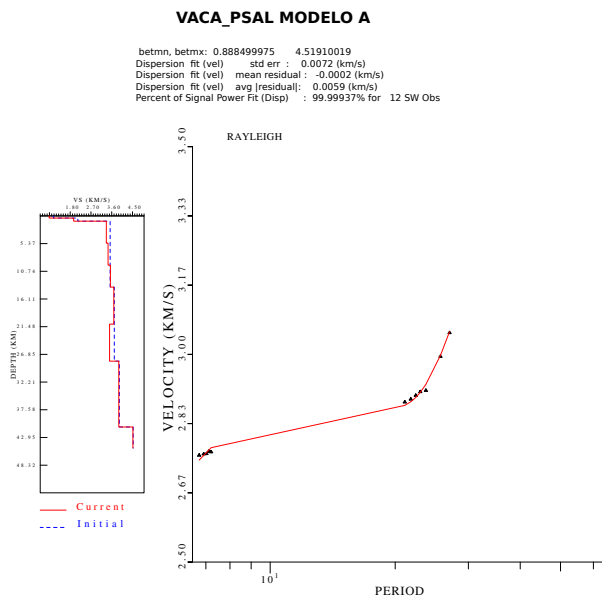
**Figura B.48.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones TICA y AZCA



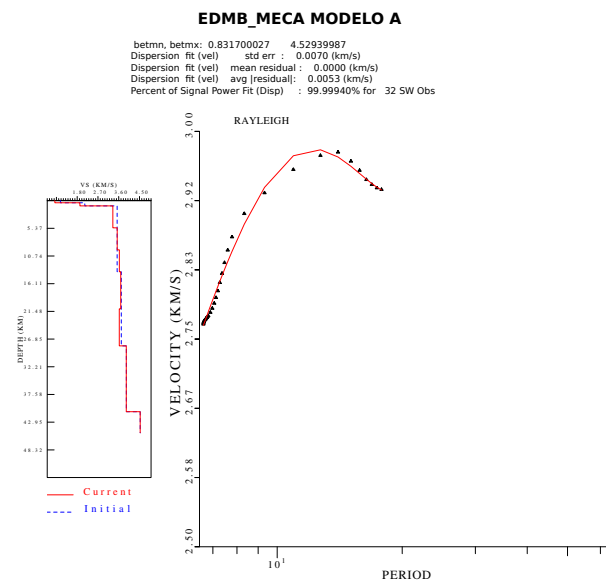
**Figura B.49.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones VACA y ARAP



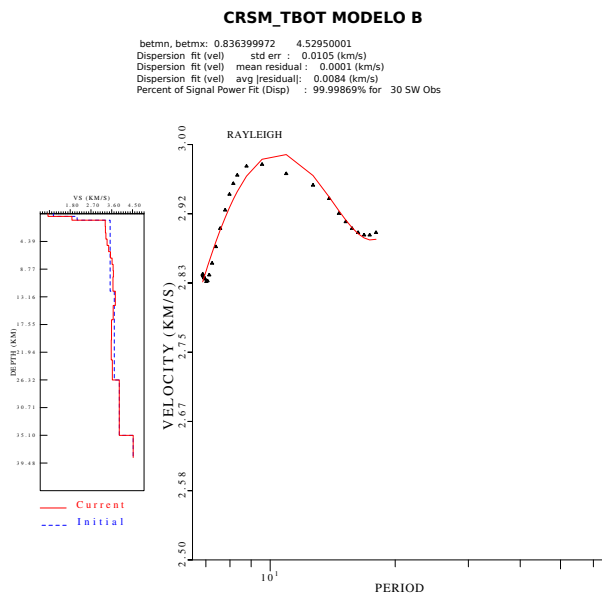
**Figura B.50.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones ESFA y MECA



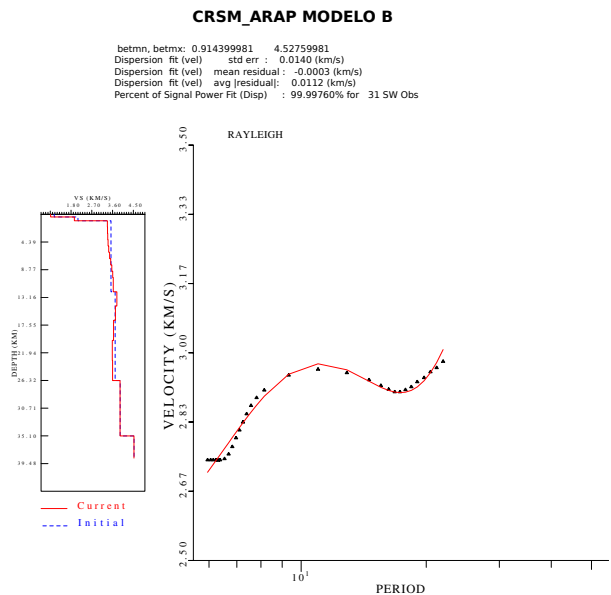
**Figura B.51.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones VACA y PSAL



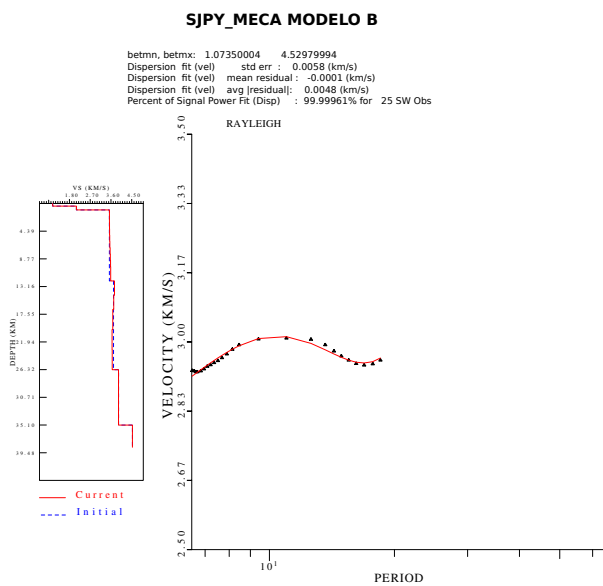
**Figura B.52.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones EDMB y MECA



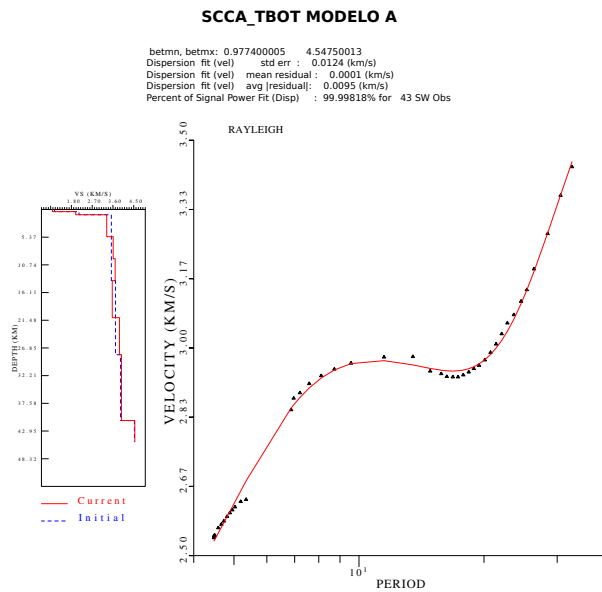
**Figura B.53.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones CRSM y TBOT



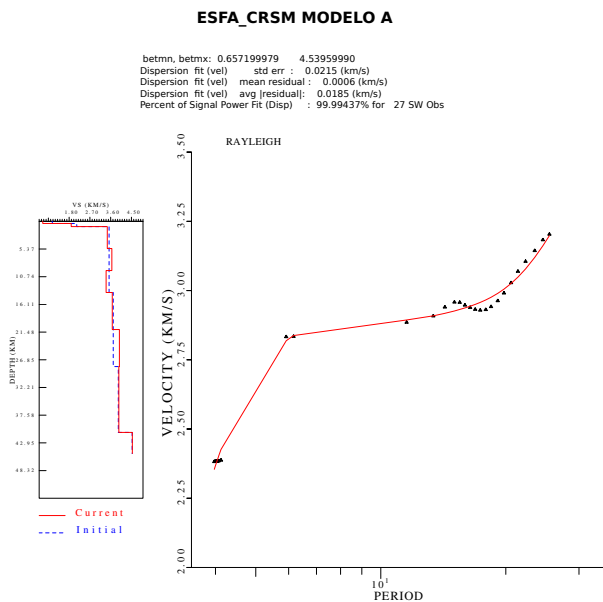
**Figura B.54.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones CRSM y ARAP



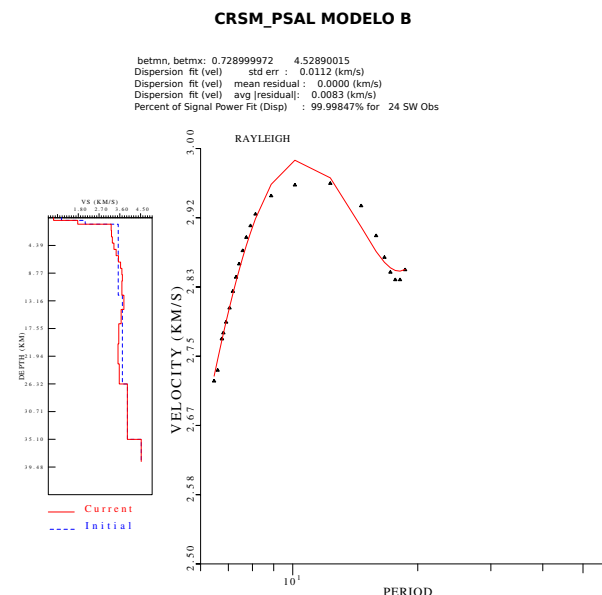
**Figura B.55.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones SJPY y MECA



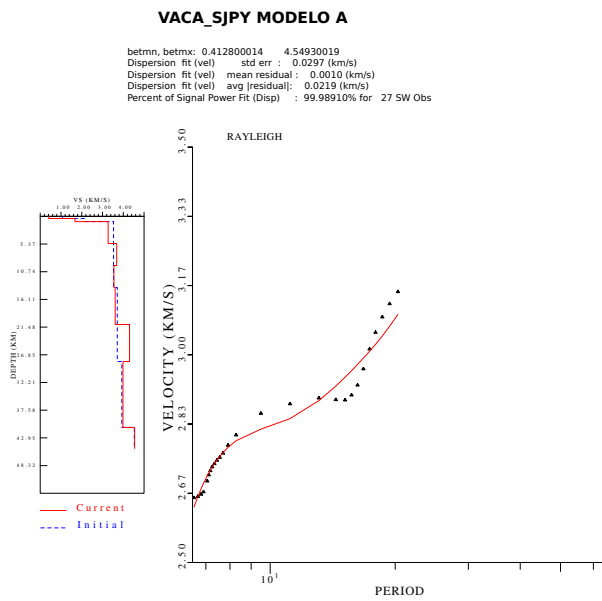
**Figura B.56.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones SCCA y TBOT



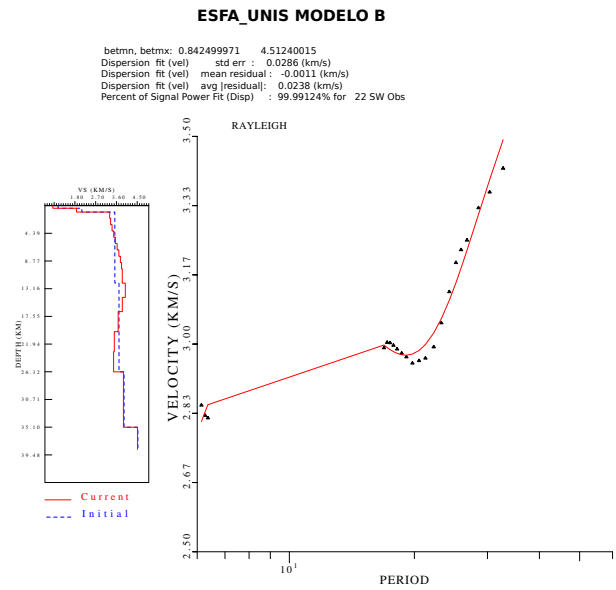
**Figura B.57.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones ESFA y CRSM



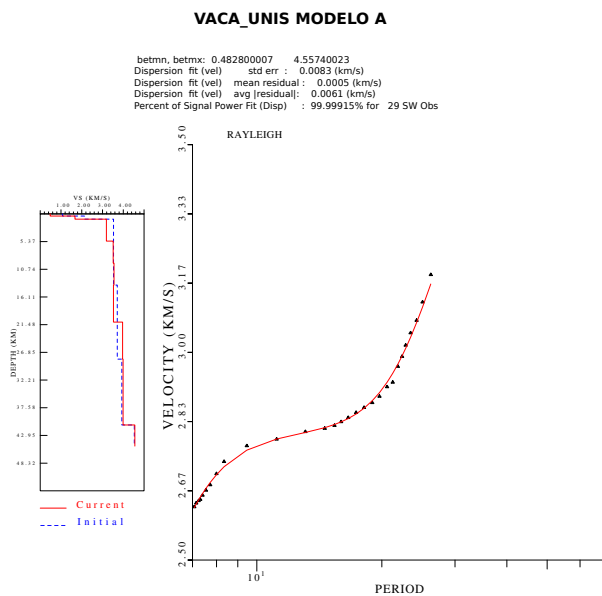
**Figura B.58.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones CRSM y PSAI



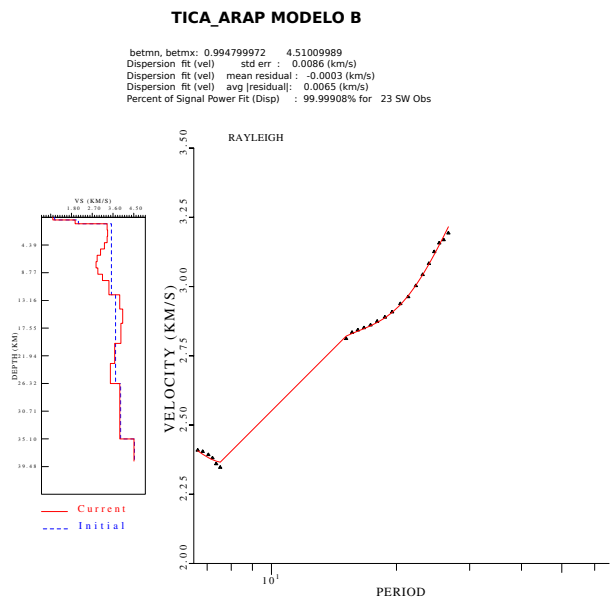
**Figura B.59.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones VACA y SJPY



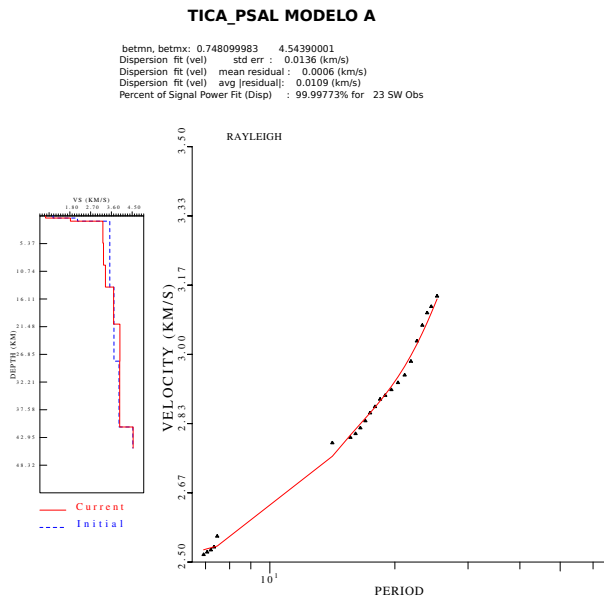
**Figura B.60.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones ESFA y UNIS



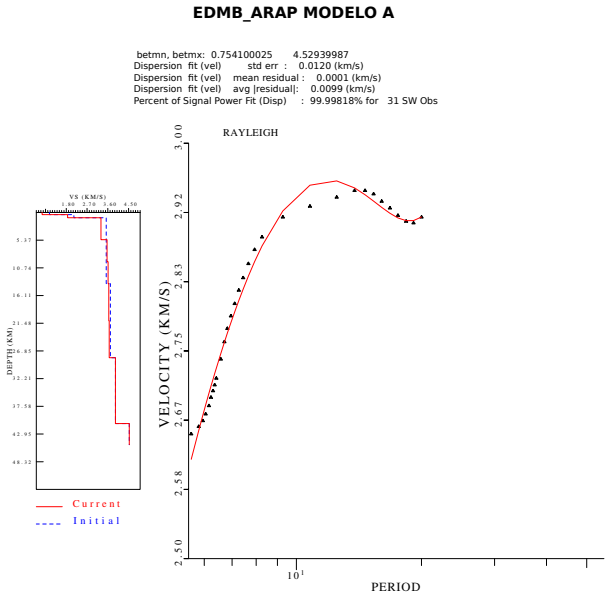
**Figura B.61.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones VACA y UNIS



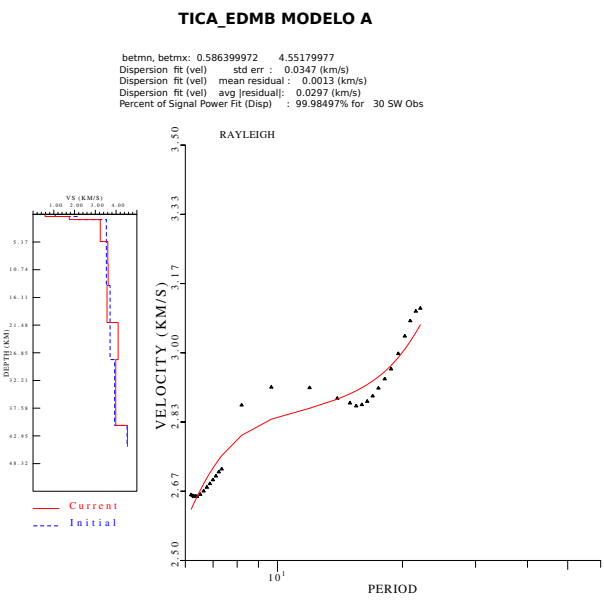
**Figura B.62.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones TICA y ARAP



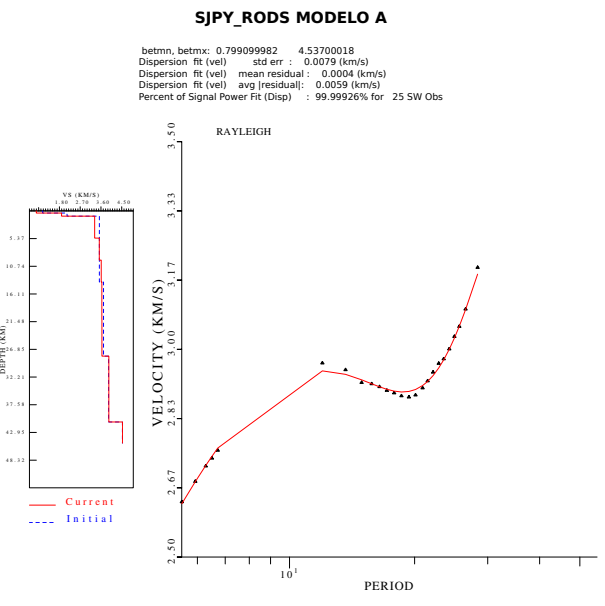
**Figura B.63.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones TICA y PSAI



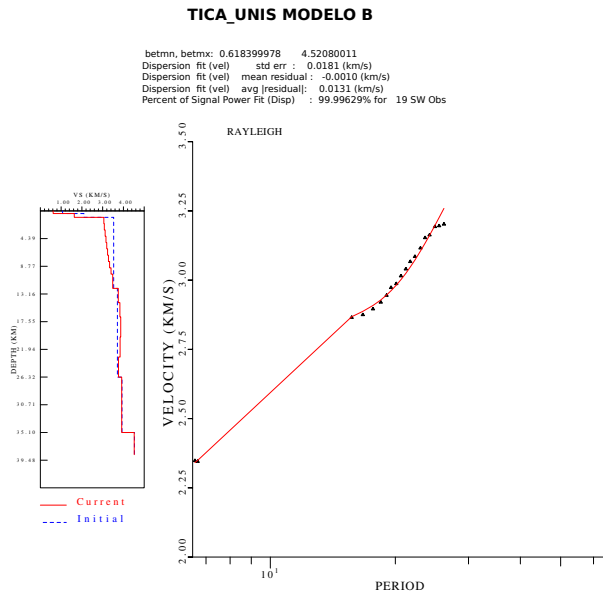
**Figura B.64.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones EDMB y ARAP



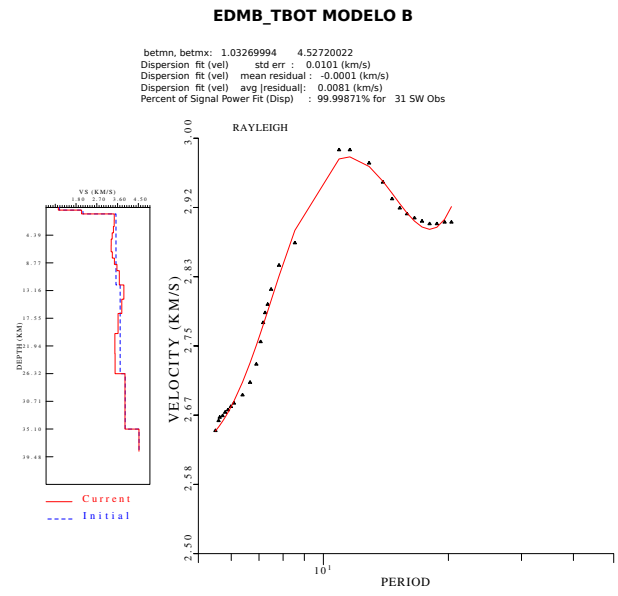
**Figura B.65.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones TICA y EDMB



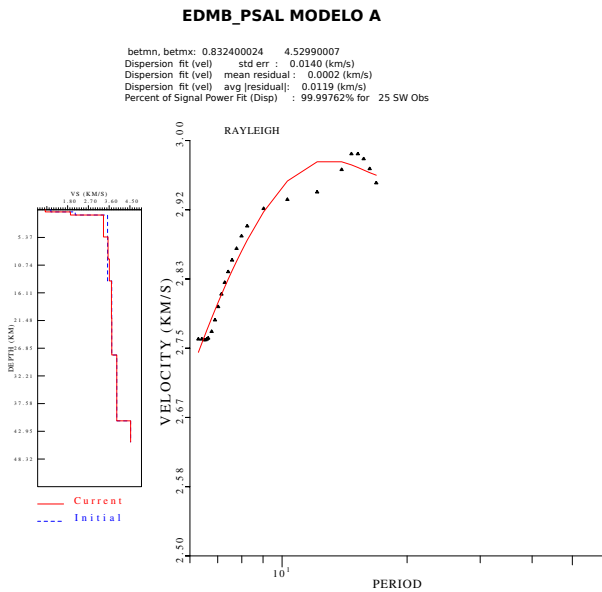
**Figura B.66.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones SJPY y RODS



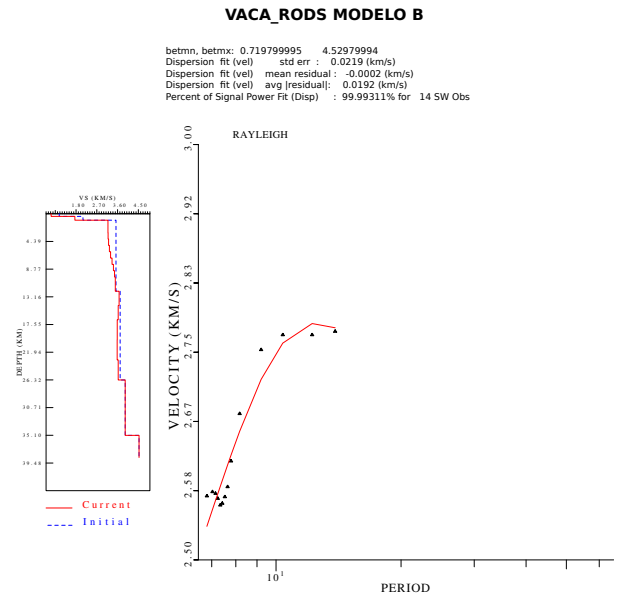
**Figura B.67.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones TICA y UNIS



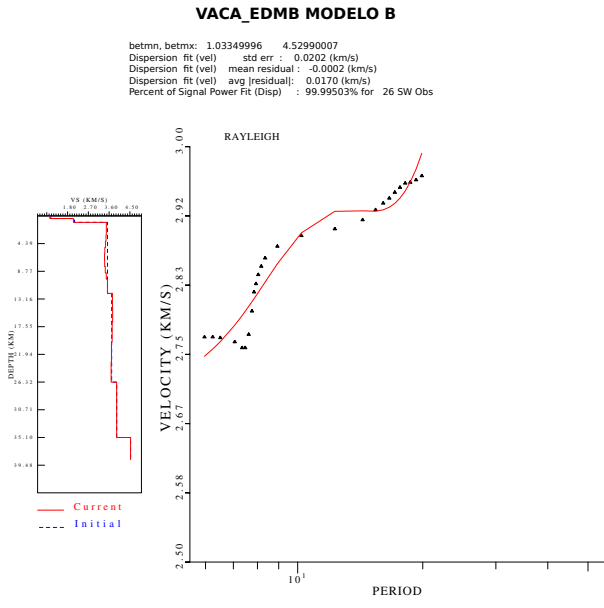
**Figura B.68.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones EDMB y TBOT



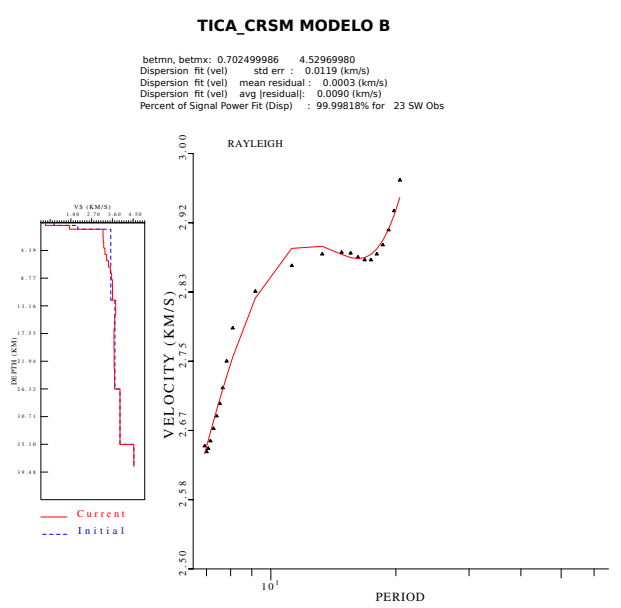
**Figura B.69.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones EDMB y PSAI



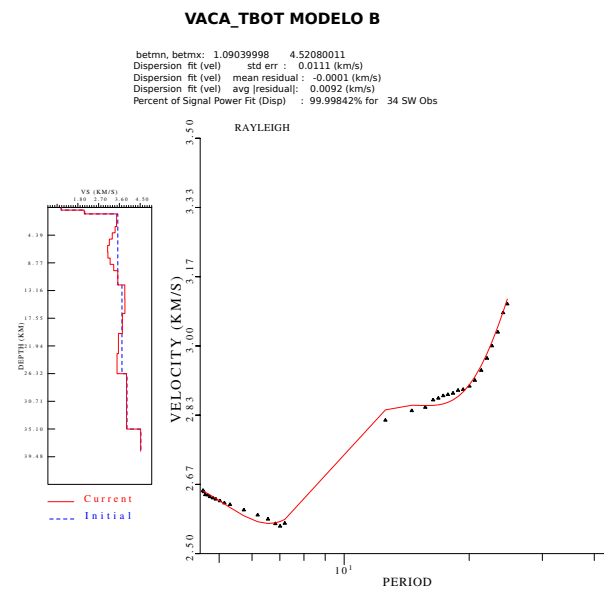
**Figura B.70.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones VACA y RODS



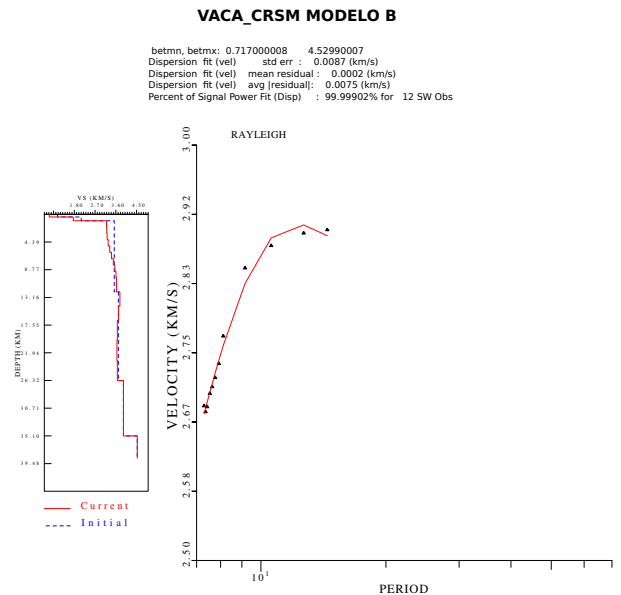
**Figura B.71.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones VACA y EDMB



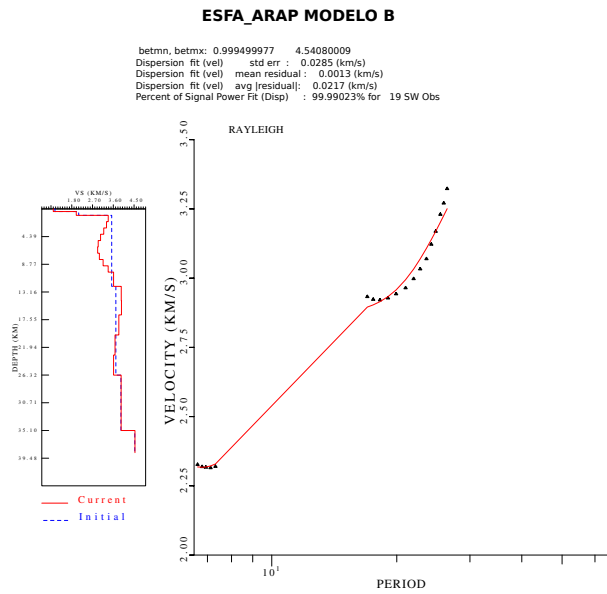
**Figura B.72.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones TICA y CRSM



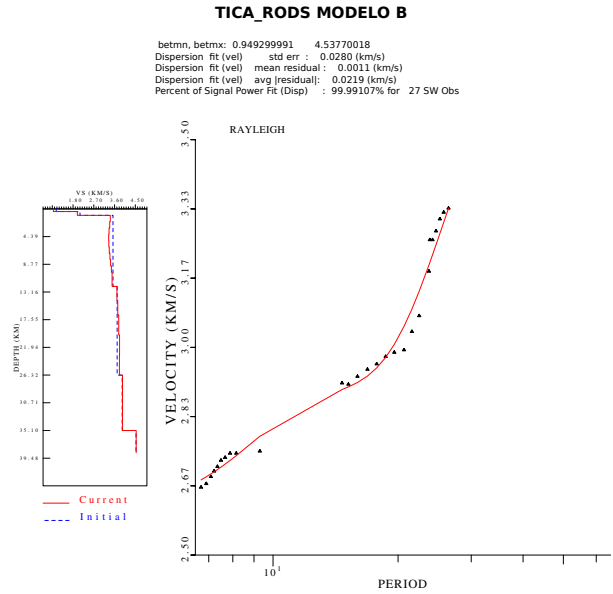
**Figura B.73.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones VACA y TBOT



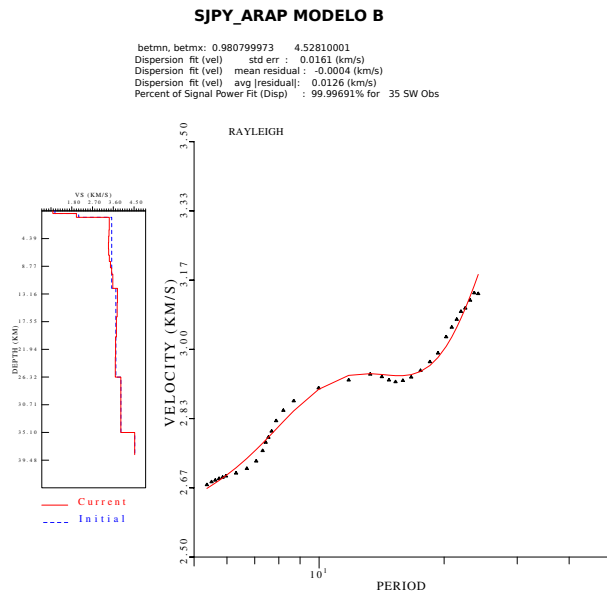
**Figura B.74.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones VACA y CRSM



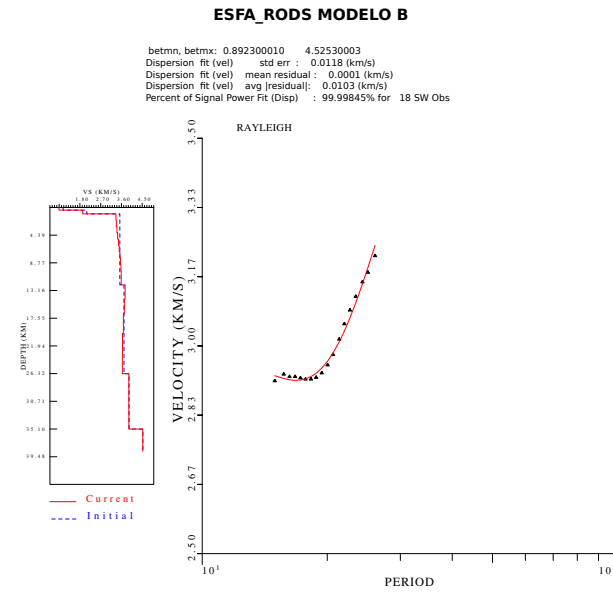
**Figura B.75.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones ESFA y ARAP



**Figura B.76.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones TICA y RODS

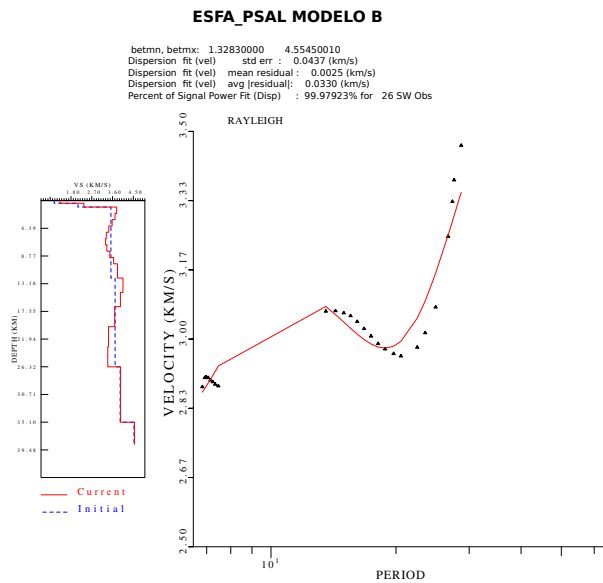


**Figura B.77.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones SJPY y ARAP

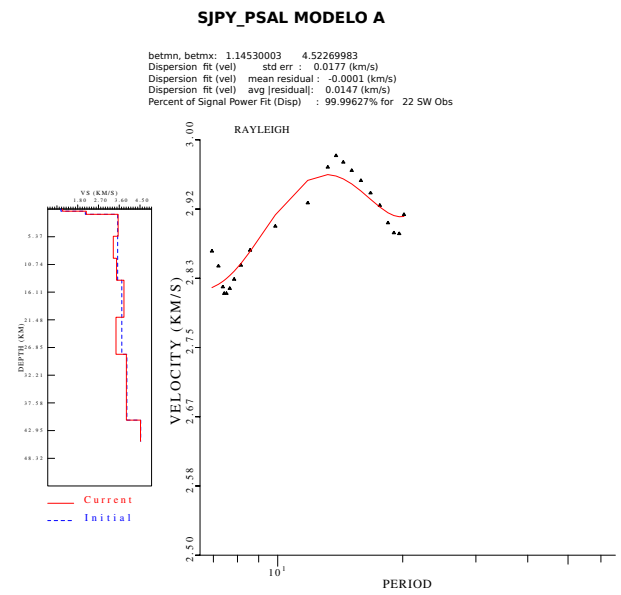


**Figura B.78.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones ESFA y RODS

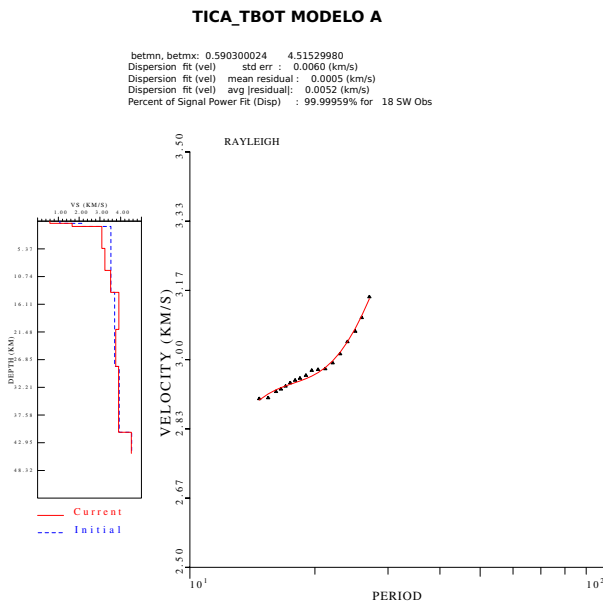




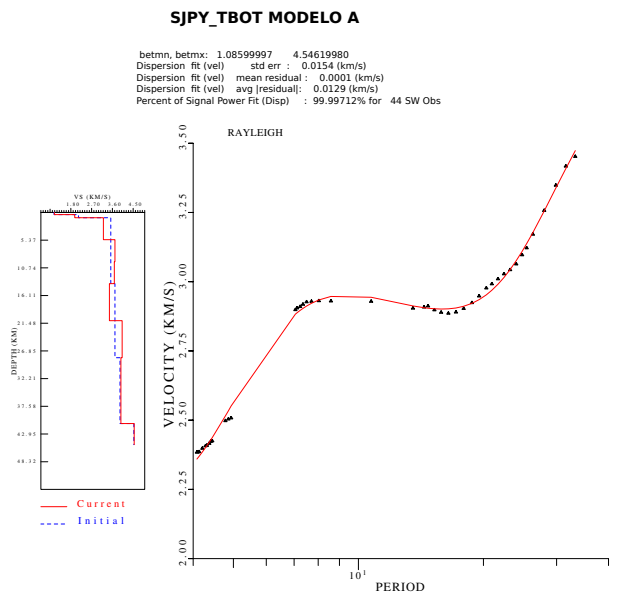
**Figura B.79.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones ESFA y PSAI



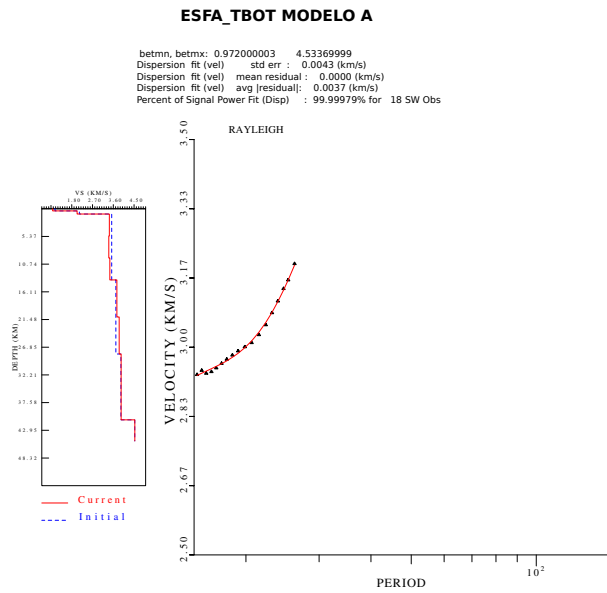
**Figura B.80.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones SJPY y PSAI



**Figura B.81.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones TICA y TBOT



**Figura B.82.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones SJPY y TBOT



**Figura B.83.** Inversión de la curva de dispersión entre las estaciones ESFA y TBOT