

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO PARA EL CÁLCULO DE FUNCIONES RECEPTORAS PARA DATOS TELESÍSMICOS

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por el Br. Balaguera P. Jeiker E.

Para optar al título
de ingeniero Geofísico

Caracas, junio 2017

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO PARA EL CÁLCULO DE FUNCIONES RECEPTORAS PARA DATOS TELESÍSMICOS

Tutor académico: Prof. Mariano Arnaiz

Cotutor académico: Prof. José Cavada

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Balaguera P. Jeiker E.

Para optar al título
de ingeniero Geofísico

Caracas, junio 2017

Caracas, junio de 2017

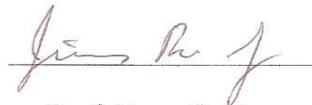
Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Geología, Minas y Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Jeiker Eduardo Balaguera Peña, titulado:

“Desarrollo e implementación de un algoritmo para el cálculo de funciones receptoras para datos telesísmicos”

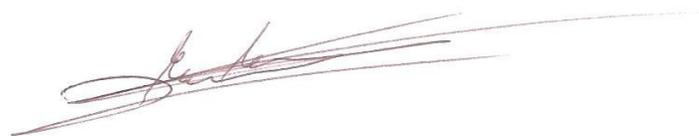
Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Geofísico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.



Prof. Herbert Rendon
Jurado



Prof. Rosa Jiménez
Jurado



Prof. Mariano Arnaiz
Tutor Académico

A mis padres:

Keila Peña y

Jesus Balaguera

Agradecimientos

Primero que nada, a dios por permitirme levantarme cada día para ir a la universidad y darme la fortaleza para soportar el metro cada mañana desde el día en el que empecé mi carrera universitaria.

A mis padres por ser mi apoyo, guía y ejemplo durante toda la vida, por orientarme en mis decisiones para tomar el camino correcto cuando vacilaba y por siempre estar presentes a mi lado.

A mi hermana entre peleas y pleitos por las labores del hogar, me hiciste crecer al nacer, porque me toco asumir el papel de hermano mayor, lo que me ayudo a madurar y ser más responsable.

A mi novia que a pesar de los días sin poder vernos mientras estudiaba siempre estabas ahí como apoyo cuando te necesitaba, y por todos los momentos compartidos que me hacías olvidar las tareas y el estrés generado por las evaluaciones y el metro.

A mi tutor por haberme dado la idea de programar, que ha sido una gran herramienta desde que empecé a hacerlo, y que me ha dado una gran oportunidad, y por aguantar todas las teteadas durante la elaboración del teg.

A mi cotutor por haberme enseñado los primeros fundamentos para la programación, que me ayudaron a avanzar en esta área y por su ayuda cuando me teteaba también.

A todos los profesores que me impartieron clase durante toda la carrera, sin sus enseñanzas no habría avanzado hasta este día.

Jeiker Balaguera

**DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO PARA EL
CÁLCULO DE FUNCIONES RECEPTORAS PARA DATOS TELESÍSMICOS**

Tutor académico: Prof. Mariano Arnaiz, cotutor: Prof. José Cavada

**TEG. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y
Geofísica. Departamento de Geofísica. Año 2017.**

Palabras clave: funciones receptoras, profundidad de discontinuidad, cambio de fase, apilamiento, análisis H-kappa.

Resumen

La sismología en su labor por estudiar la estructura interna de la Tierra se vale de distintas herramientas como la tomografía sísmica, refracción profunda y las funciones receptoras, que son una herramienta matemática que a partir de la diferencia de tiempo que existe entre la llegada de la onda P y la onda convertida Pds, puede determinar la profundidad de la discontinuidad más cercana por debajo de una estación sismológica de tres componentes. En todo el mundo esta es una técnica que ha sido utilizada numerosas veces, desarrollándose algoritmos que realizan su cálculo automático. En Venezuela no se cuentan con algoritmos extranjeros de libre uso, ni de desarrollo propio que realicen dicho cálculo, por lo que el objetivo de este trabajo especial de grado es el desarrollo de una herramienta computacional que realice el cálculo de las funciones receptoras para datos telesísmicos y de esta manera contribuir con el desarrollo nacional. El programa fue probado con datos de tres estaciones sismológicas con estructura cortical conocida tomados de la red sismológica internacional del *IRIS* para verificar su correcto funcionamiento dando resultados satisfactorios con errores menores a 1.5 km de profundidad y menores a 0.01 para la relación V_p/V_s , lo que garantiza el buen funcionamiento del mismo, es de fácil uso, eficiente y permite el manejo de una gran cantidad de datos, la interfaz usuario-máquina es directa y permite modificar los parámetros para mejorar los resultados obtenidos sin tener que reprocesar los datos.

ÍNDICE

	Página
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos.....	v
Resumen	vi
Índice de figuras.....	ix
Índice de tablas.....	x
CAPITULO I	1
1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1 Objetivo general.....	3
1.2.2 Objetivos específicos	3
CAPITULO II	4
MARCO TEÓRICO	4
1.3. Ondas.....	4
1.4. Funciones receptoras	5
1.5. Deconvolución wáter-level	8
1.6. Análisis H-kappa.....	9
CAPITULO III.....	12
MARCO METODOLÓGICO	12
1.7. Búsqueda del dato	12
1.8. Desarrollo del programa	13
1.8.1 Lectura de datos.....	13
1.8.2 Pre-procesamiento y cortes de la señal.....	14
1.8.3 Cálculo de la función receptora	17

1.8.4 Apilamiento	20
1.8.5 Calculo de espesores	21
1.8.6 Modelado directo	23
CAPITULO IV	26
RESULTADOS.....	26
1.9. Estación II.FFC, Flin Flon, Canadá.....	26
1.10. Estación IUKIEV, Kiev, Ucrania.....	33
1.11. Estación IU.BILL, Billibino, Rusia.	39
CAPITULO V	47
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	47
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49
APENDICES	¡Error! Marcador no definido.
APENDICE A: Manual de usuario de REKIEJRF V 1.0	¡Error! Marcador no definido.
APENDICE B: REKIEJRF V 1.0 Guion	¡Error! Marcador no definido.

Índice de figuras

	Página
Figura 1.1.1. Profundidad de Moho. Modificado de Niu et al., (2007).	2
Figura 2.1.1. Conversión de fase de onda.....	4
Figura 2.2.1. Trayectoria de los rayos de las ondas y conversión de onda P a S.....	6
Figura 2.2.2. Fases del tren de onda y función receptora.	6
Figura 2.2.3. Rotación de componentes. Tomado de Rondenay, (2009).....	7
Figura 2.2.4. Cálculo de función receptora usando la deconvolución.....	8
Figura 3.2.1. Orden de los archivos de las componentes para cada sismo	133
Figura 3.2.2. header de un archivo SAC.....	14
Figura 3.2.3. Líneas verdes representan los tiempos de llegada de las ondas P y S.....	15
Figura 3.2.4. Señal cortada en el intervalo de interés.....	16
Figura 3.2.5. Parámetros del filtro pasa banda.	16
Figura 3.2.6. Señal pre-procesada.....	17
Figura 3.2.7. Señal rotada.	18
Figura 3.2.8. Función receptora.....	19
Figura 3.2.9. Función receptora apilada.	21
Figura 3.2.10. Análisis H-kappa con la ubicación de la mayor amplitud.	22
Figura 3.2.11. Modelado directo, con función receptora teórica en color rojo.....	24
Figura 3.2.12. a) Distribución de funciones receptoras por backazimuth donde 0 es la estación, b) distribución de sismos con respecto a backazimuth en un gráfico polar.....	24
Figura 4.1.1. Funciones receptoras apiladas.....	27
Figura 4.1.2. Análisis H-kappa calculado por el EARS del IRIS para la estación II.FFC.....	28
Figura 4.1.3. Análisis H-kappa apilado por el método Nth-Root.	28
Figura 4.1.4. Análisis H-kappa apilado por el método sum.....	29
Figura 4.1.5. Análisis H-kappa apilado por el método Nth-Root.	29
Figura 4.1.6. Análisis H-kappa apilado por el método sum.....	30
Figura 4.1.7. Modelado directo.	31
Figura 4.1.8. a) Funciones receptoras ordenadas por backazimuth, b) Distribución de sismos respecto a la estación.....	32

Figura 4.2.1. Funciones receptoras apiladas	33
Figura 4.2.2. Análisis H-kappa calculado por el EARS del IRIS para la estación IU.KIEV.....	34
Figura 4.2.3. Análisis H-kappa apilado por el método Nth-Root	35
Figura 4.2.4. Análisis H-kappa apilado por sum.....	35
Figura 4.2.5. Análisis H-kappa apilado por Nth-Root	36
Figura 4.2.6. Análisis H-kappa apilado por sum.....	36
Figura 4.2.7. Modelado directo.	37
Figura 4.2.8. a) Funciones receptoras ordenadas por backazimuth se puede observar como todas tienen comportamientos similares, b) Distribución de sismos respecto a la estación, se muestra que los sismos provienen desde distintas direcciones.....	38
Figura 4.3.1. Funciones receptoras apiladas.	39
Figura 4.3.2. Análisis H-kappa calculado por el EARS del IRIS para la estación IU.BILL.....	40
Figura 4.3.3. Análisis H-kappa apilado por Nth-Root	41
Figura 4.3.4. Análisis H-kappa apilado por sum.....	41
Figura 4.3.5. Análisis H-kappa apilado por el método Nth-Root.	42
Figura 4.3.6. Análisis H-kappa apilado por suma simple.	42
Figura 4.3.7. Modelado directo.	43
Figura 4.3.8. a) Funciones receptoras ordenadas por backazimuth se puede observar como todas tienen comportamientos similares, b) Distribución de sismos respecto a la estación, se muestra que los sismos provienen desde distintas direcciones.....	44

Índice de tablas

	Página
Tabla 4.1. Parámetros IRIS	45
Tabla 4.2. con parámetros de kappa modificados.	45

CAPITULO I

Planteamiento del problema

La dinámica interna de la Tierra es capaz de producir el movimiento de las placas tectónicas que componen la litosfera, generando esfuerzos en las zonas de contacto y acumulación de energía que, cuando es liberada, origina terremotos. Al momento de ocurrir el evento sísmico, se produce un tren de ondas elásticas que viajan a través de la Tierra llevando consigo información importante sobre su estructura interna. Esta puede ser estudiada empleando ciertas herramientas de la sismología como: la refracción profunda y las funciones receptoras que permiten, a partir de los tiempos de llegada de la onda P y la convertida Pds, modelar la estructura de la Tierra por debajo de una estación sismológica de tres componentes (Ammon, 1990; Langston, 1979). Durante la década de 1990 se dio un auge en el desarrollo e implementación del cálculo de funciones receptoras telesísmicas, particularmente desde el punto de vista computacional.

En Venezuela, a pesar de tener una red sismológica y que se han realizado estudios para la determinación de la dinámica y estructura litósferica (*e.g.* el proyecto Geociencia Integral de los Andes de Mérida), los sismólogos no se han interesado en la aplicación de esta herramienta. Una de las limitantes más claras es la inexistencia de una rutina de cálculo de libre acceso que permita su aplicación. Los últimos estudios realizados en Venezuela con esta técnica fueron el de Niu *et al.* (2007) y Quinteros (2007), como parte del proyecto GEODINOS (Geodinámica Reciente del Límite Norte de la Placa Sudamericana), Quinteros *et al.* (2009), donde se estableció la profundidad de la discontinuidad Moho para gran parte del país (figura 1.1.1).

Dado lo anterior, en este trabajo especial de grado se propone el desarrollo de un algoritmo utilizando el lenguaje de programación de cuarta generación Matlab, para el cálculo de las funciones receptoras para eventos telesísmicos, contribuyendo al desarrollo de los estudios sismológicos nacionales. La investigación a realizar resulta de gran importancia en la Geofísica Nacional porque implica un aporte metodológico al tema de funciones receptoras. Evidentemente, la elaboración de un algoritmo que calcule funciones receptoras de datos

telesísmicos contribuye al desarrollo de los estudios estructurales. Así mismo, el proyecto a realizar puede representar un avance computacional para la sismología nacional, ya que ésta se encuentra desactualizada en el uso de esta técnica, y será de utilidad para futuros proyectos tanto de investigación estructural, como para investigaciones posteriores que se relacionen con la optimización del algoritmo.

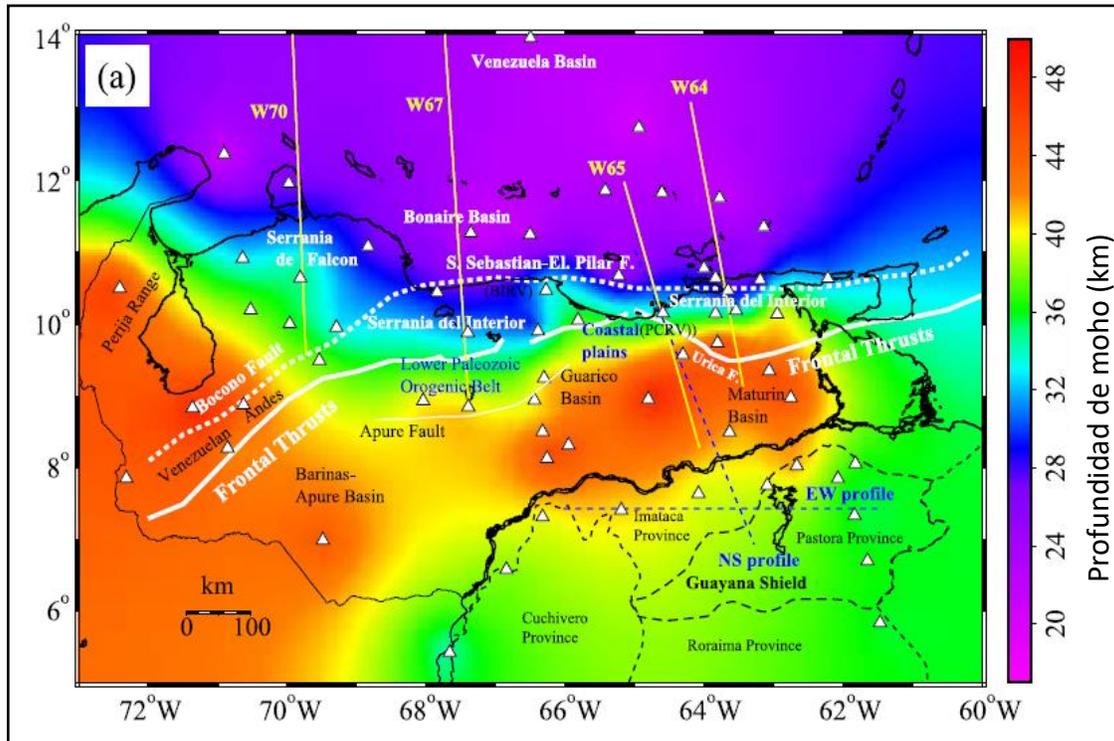


Figura ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..1. Profundidad de Moho. Modificado de Niu et al., (2007).

Objetivos

Objetivo general

- Desarrollar algoritmo para el cálculo de funciones receptoras de datos telesísmicos.

Objetivos específicos

- Compilar datos telesísmicos de una estación sismológica ubicada en una zona con estructura cortical conocida.
- Diseñar una rutina de programación para la selección de los archivos sismológicos.
- Implementar en un programa el algoritmo de Ammon (1991) para el cálculo de la función receptora.
- Incorporar una rutina de modelado directo de funciones receptoras al programa de cómputo a desarrollar.
- Probar el programa con datos de sismos registrados en una estación sismológica ubicada en una zona con estructura cortical conocida.
- Elaborar manual de usuario del programa.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

Ondas

Aquellas oscilaciones que viajan desde una fuente a través de un medio material elástico dentro de la Tierra son conocidas como ondas sísmicas. Éstas se producen durante la liberación de energía durante un sismo. Existen dos tipos de ondas: las ondas corpóreas y las superficiales. Las primeras viajan por el interior de la Tierra, éstas se componen de dos tipos: las ondas primarias u ondas P y las ondas secundarias u ondas S; y las segundas que viajan por la superficie de la Tierra que se componen de dos tipos igualmente: las ondas Love y las ondas Rayleigh.

Al ocurrir un sismo, la energía en forma de onda se transmite a través de las diferentes capas de la Tierra causando en la onda los fenómenos de refracción, reflexión y conversión (figura 2.1). La energía que regresa a la superficie puede ser captada por un receptor. En su viaje hacia la superficie, las ondas atraviesan la interfaz corteza-manto llevando información acerca de su localización en profundidad. El estudio del cambio de fase de la onda sísmica permite a la sismología conocer cómo es el interior de la Tierra desde una perspectiva estructural.

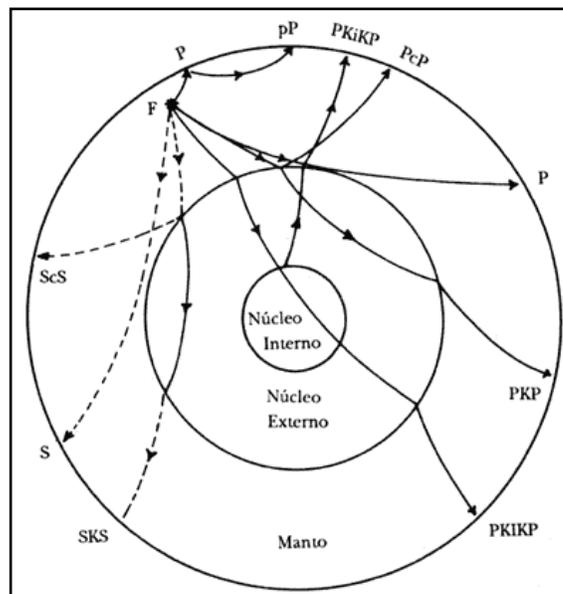


Figura 2.1. Conversión de fase de onda al pasar por los distintos medios en el interior de Tierra.

Los cambios de fase de la onda ocurren en zonas donde los contrastes de velocidad son grandes, de acuerdo al objetivo que se tenga se estudian distintas fases, cuando se quiere estudiar el núcleo externo, las fases PKP y SKS son de interés porque parte de la onda viaja a través del núcleo. Cuando se quiere estudiar discontinuidades menos profundas como el contacto corteza-manto (Moho), se estudian las fases Pp, Pds, Psps, Ppss, Ppps (donde las letras minúsculas corresponden a las fases de onda que viajan por la corteza, figura 2.2.1).

Funciones receptoras

Las funciones receptoras son una herramienta matemática que permite, a partir de los tiempos de llegada de las ondas P y S registrados en una estación de tres componentes, calcular la respuesta relativa de la Tierra por debajo del receptor (Ammon *et al.*, 1990). El estudio de las funciones receptoras telesísmicas proporciona información de la estructura local donde existen contrastes significativos de velocidades, definiendo la transición entre el manto y la corteza y el límite entre el basamento y la capa sedimentaria (*e.g.* Langston, 1979; Owen *et al.*, 1984; Ammon y Zandt, 1993). La información obtenida está relacionada con el área que rodea a la estación receptora; que lateralmente es de 10 km y verticalmente es igual a la distancia del reflector más profundo, que generalmente suele ser la profundidad de la discontinuidad de Moho. Existen dos tipos de funciones receptoras, las calculadas a partir de onda P y las calculadas a partir de onda S.

El método de funciones receptoras se basa en las transformaciones (ondas convertidas) de fase que le ocurren a la onda desde su origen hasta su llegada al receptor. Estas ocurren mientras la onda viaja por las distintas capas e interfaces del interior de la Tierra, que tienen diferentes propiedades y alteran las de la onda, en la figura 2.2.1 se puede observar la conversión de la onda P a S. Las funciones receptoras telesísmicas se basan principalmente en la diferencia de tiempo que existe entre la onda directa P y la convertida Ps generada en la discontinuidad corteza-manto. La onda Ps se puede observar con mejor claridad en eventos sísmicos con distancias epicentrales entre 30° y 90° (Ammon, 1997), permitiendo que la onda viaje por el manto y que su incidencia en el receptor sea casi vertical. La profundidad de la discontinuidad puede ser estimada a partir del retraso entre la onda P incidente y la convertida

Ps, y la magnitud de la discontinuidad puede ser estimada de las amplitudes relativas entre estas dos ondas (Rondenay, 2009).

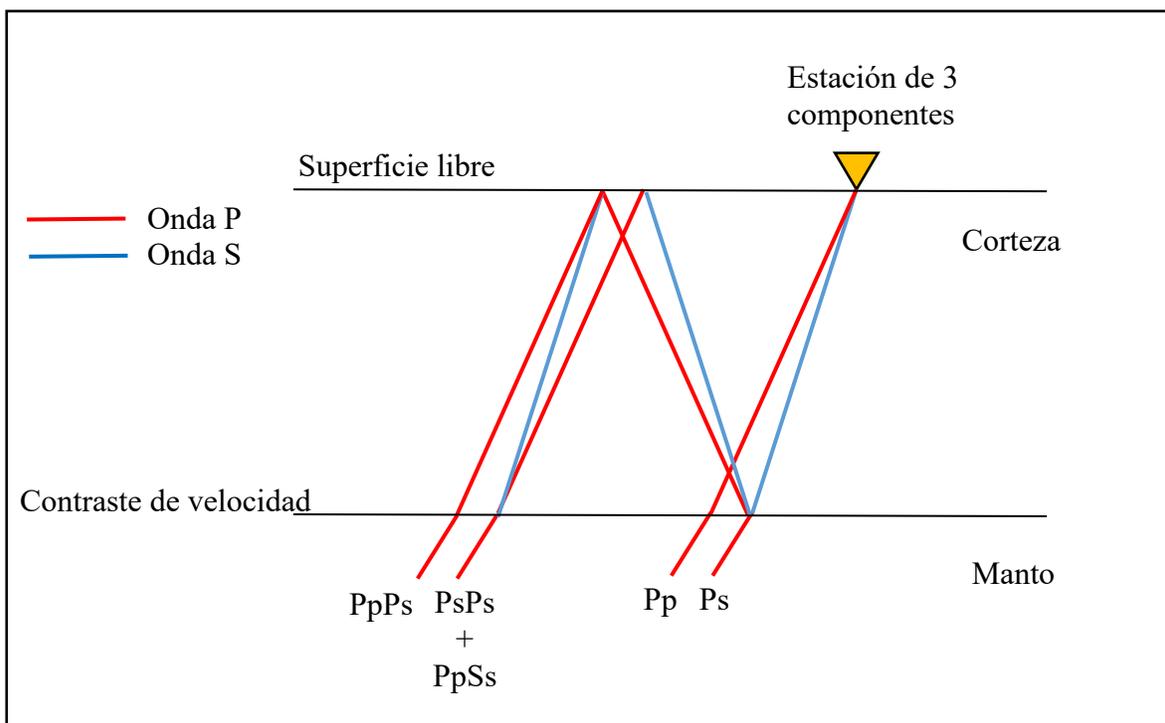


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..3.** Trayectoria de los rayos de las ondas y conversión de onda P a S, por contraste de velocidad en una zona de transición (Modificado de ammon).

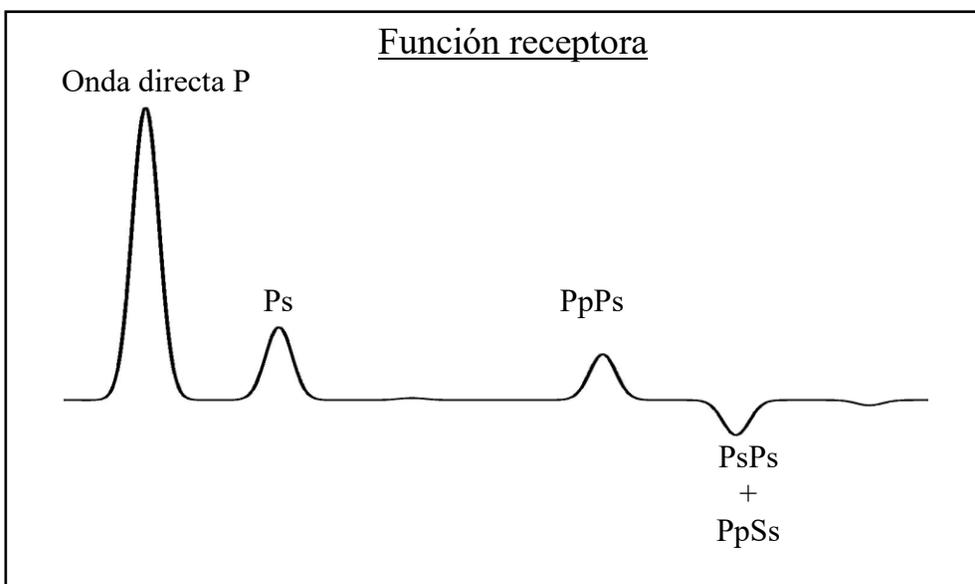


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..4.** Fases del tren de onda y función receptora.

Para el caso de un rayo de incidencia casi vertical proveniente de un telesismo, la fase P poseerá más energía en la componente vertical del sismograma (Z), mientras que la fase Pds la poseerá en la componente radial (R), por tal motivo deben rotarse las componentes de la estación sismológica por su *backazimuth* tal como se muestra en la figura 2.2.3. En consecuencia, el modo más simple de calcular la función receptora consiste en extraer el pulso directo P de la componente vertical y realizar la deconvolución en la componente radial (Arnaiz *et al.*, 2016). Dando como resultado una serie de pulsos que al ser reconstruidos se obtiene la función receptora (figura 2.2.4). Una vez calculada la función receptora, se procede a realizar el mismo proceso con varios eventos, y a apilar las funciones receptoras con el fin de mejorar la relación señal ruido.

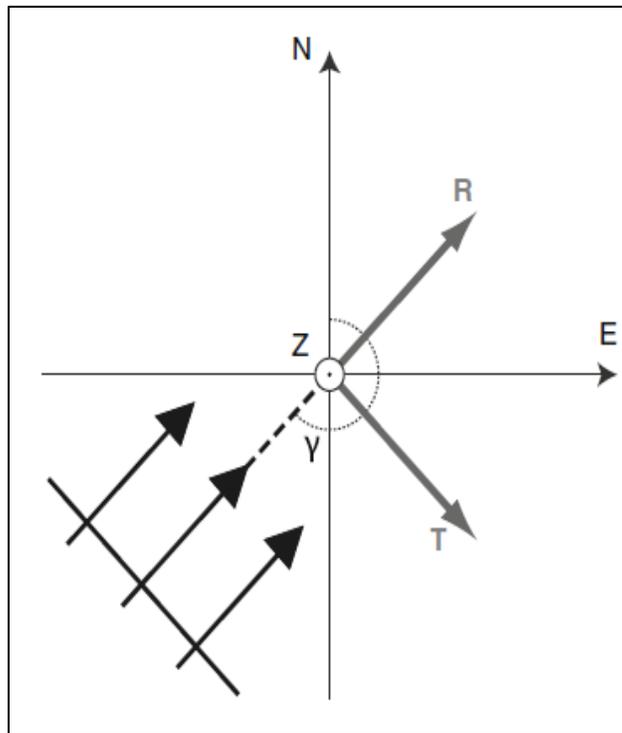


Figura 2.2.3. Rotación de componentes. Tomado de Rondenay, (2009).

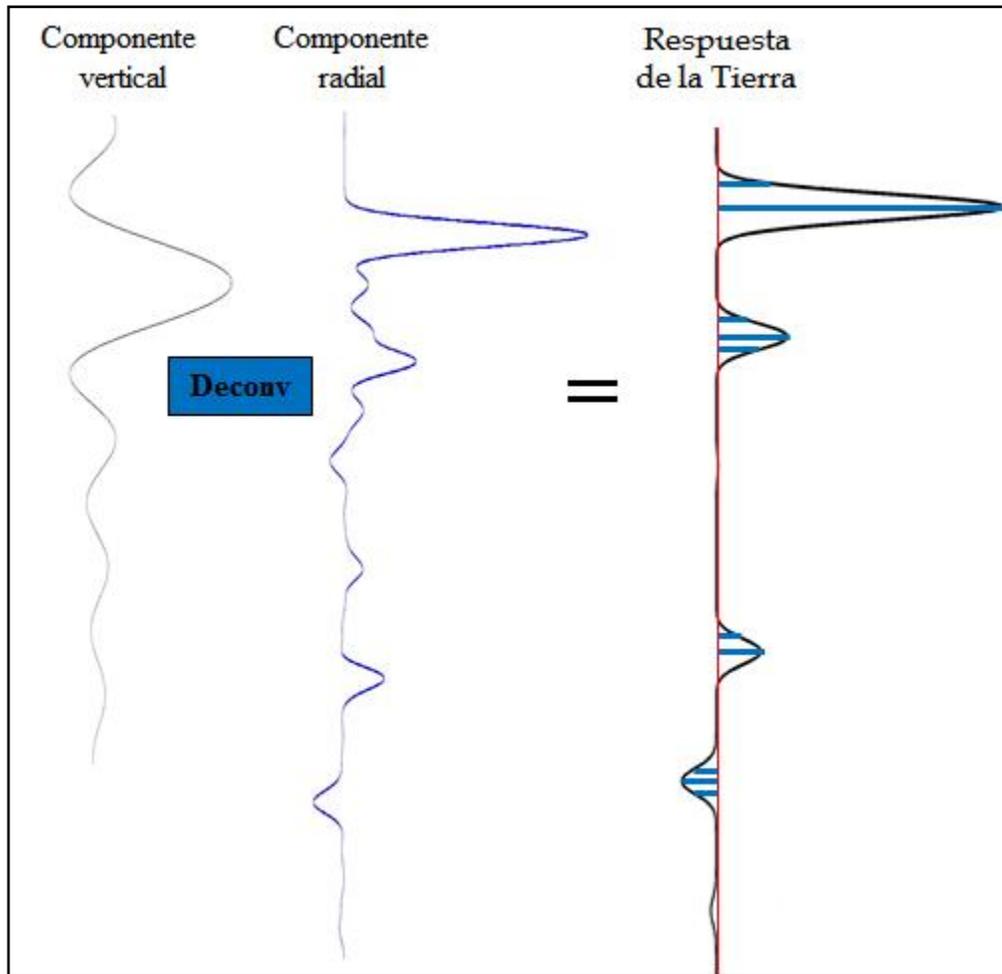


Figura 2.2.4. Cálculo de función receptora usando la deconvolución.

Deconvolución *wáter-level*

Como es de interés para el cálculo de la función receptora aislar la conversión Pds, se realiza una deconvolución de la componente radial (R) y de la componente vertical (Z). Como en el registro sismológico se tienen valores de amplitud muy pequeños (cerca de cero), con el fin de que el proceso de deconvolución sea estable y así evitar la introducción de artefactos numéricos, se utiliza la deconvolución por nivel de agua (*water-level deconvolution*; Langston, 1979; Clayton y Wiggins, 1976; Ammon, 1991) en el dominio de la frecuencia. Al asignar un valor mínimo amplitud permitida, evita que el denominador sea igual a cero, garantizando valores coherentes (ecuación 1).

$$FR(\omega) = \frac{R(\omega)Z^*(\omega)}{\max\{Z(\omega)Z^*(\omega), k|Z_{max}(\omega_o)|^2\}} e^{-\left(\frac{\omega}{2a}\right)^2}$$

(Ecuación 1)

Donde $R(\omega)$ y $Z(\omega)$ son las transformadas de Fourier de R y Z , y $Z^*(\omega)$ es la conjugada imaginaria de Z , k es el valor de la constante del *waterlevel* y a es el valor del factor Gaussiano.

Análisis H-kappa

Cuando una estación sismológica graba un sismo, ella registra todo el tren de onda que viene desde el interior de la tierra trayendo consigo información sobre las zonas donde hay contrastes importantes de velocidad. Cuando la relación señal-ruido es favorable al momento de realizar el cálculo de la función receptora, en ésta pueden observarse las distintas fases sufridas por la onda desde que pasó por la discontinuidad hasta que llegó al receptor (figura 2.2.2).

La información de primer orden sobre la estructura de la corteza bajo una estación puede derivarse de la función receptora radial que está dominada por la energía de la onda convertida P a S, a partir de una serie de discontinuidades de velocidad en la corteza y el manto superior. Debido al gran contraste de velocidad que existe en el límite de la corteza-manto, la conversión P-s de Moho (Pds) es a menudo la señal más grande después de la onda P directa (Zhu y Kanamori, 2000). La separación de tiempo entre la onda convertida Pds y la onda P directa se puede utilizar para estimar el espesor de la corteza, dado el promedio de velocidades de la corteza (ecuación 2).

$$H = \frac{t_{ps}}{\sqrt{\frac{1}{V_s^2} - p^2} - \sqrt{\frac{1}{V_p^2} - p^2}}$$

(Ecuación 2)

Donde V_p corresponde al valor de la velocidad de la onda P, V_s corresponde al valor de la velocidad de la onda S y p es el parámetro de rayo.

Una ventaja de este método es que debido a que el punto de conversión de P a S está cerca de la estación (normalmente dentro de los 10 km lateralmente), la estimación es menos afectada por las variaciones laterales de velocidad y, por lo tanto, proporciona una buena medición puntual. Un problema es establecer el equilibrio entre el espesor y las velocidades de la corteza, porque el valor de este tiene alta dependencia de las velocidades promedio de la corteza, dado que t_{p_s} representa el tiempo de recorrido diferencial de S con respecto a la onda P en la corteza, la dependencia de H sobre V_p no es tan fuerte como en V_s (o más precisamente, en la relación V_p / V_s o kappa), Siendo la dependencia H sobre V_p de 0.5 km por cada 0.1 km/s y varia 4 km por cada 0.1 de relación de kappa. Esta ambigüedad puede ser reducida utilizando las fases posteriores que proporcionan restricciones adicionales (ecuación 3 y 4).

$$H = \frac{t_{p_p p_s}}{\sqrt{\frac{1}{V_s^2} - p^2} + \sqrt{\frac{1}{V_p^2} - p^2}}$$

(Ecuación 3)

$$H = \frac{t_{p_p s_s + p_s p_s}}{2 \sqrt{\frac{1}{V_s^2} - p^2}}$$

(Ecuación 4)

la ubicación de las fases en la función receptora es difícil por las heterogeneidades de la Tierra y el ruido de fondo, por lo que es necesario aumentar la relación señal – ruido, usando múltiples eventos y apilando sus funciones receptoras a fin de obtener una sola con fases mejor definidas. Como se está principalmente interesado en la estimación de la profundidad de la discontinuidad, se usa un apilamiento directo del dominio H-kappa (ecuación 5).

$$s(H, k) = \omega_1 r(t_1) + \omega_2 r(t_2) - \omega_3 r(t_3)$$

(Ecuación 5)

Donde $r(t)$ corresponde a la función receptora radial, t_1 , t_2 y t_3 son los tiempos para cada fase t_{p_s} , $t_{p_p p_s}$ y $t_{p_p s_s + p_s p_s}$, s corresponde al valor de amplitud de la función receptora evaluada para cada posición de los tiempos de los 3 picos, ω_i son los pesos que le dan un valor de importancia a cada pico, la suma de los 3 pesos debe ser igual a 1.

Se establece un rango de profundidades (H) y un rango de valores de la relación Vp/Vs (kappa), se calcula el tiempo para cada fase a partir de ellos y se evalúa su valor de amplitud en la función receptora radial. Cuando las tres fases se apilan coherentemente en $s(H, k)$ se obtiene el mayor valor de amplitud, correspondiendo a los valores de profundidad de la discontinuidad y de relación Vp/Vs del área estudiada.

En cada lugar de la Tierra se tienen propiedades distintas, los picos de cada fase en la función receptora se verán magnificados para uno de los casos y para otros no, por lo que al momento de realizar el análisis H-kappa se debe ver el comportamiento de la función receptora en el área de estudio para asignarle un valor ω_i de importancia a cada reverberación, donde los picos mejor definidos tendrán mayor importancia en el cálculo que aquellos que apenas puedan verse en el registro.

CAPITULO III

MARCO METODOLÓGICO

Este proyecto se realizó en 3 fases: Una de búsqueda y compilación de datos de estaciones sismológicas de 3 componentes con estructura cortical conocida. La segunda de desarrollo del programa, en la que se buscaron las herramientas y funciones a utilizar, culmina con la ejecución y optimización del programa. La última fase de verificación, donde se comparó el resultado obtenido por el programa con investigaciones previas y de esta forma comprobar su buen funcionamiento.

Búsqueda del dato

Para buscar el dato se acudió al *IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology)*, que en su página web en la sección de *Data Services Products* cuenta con el *EARS (EarthScope Automated Receiver Survey)* en donde se puede observar las redes sismológicas tanto norteamericanas como internacionales con las que cuenta el *IRIS*, y la información necesaria para poder adquirir los datos sismológicos de las estaciones de interés, como el nombre, la ubicación, fecha de funcionamiento de la estación.

Ubicadas las estaciones sismológicas con estructura cortical conocida, se procedió a descargar el dato. Para realizar dicha tarea se utilizó el programa *Jweed* versión 4.1.3 (2015) el cual puede descargarse del *IRIS* en la sección de *Data/Services/Nodes/DMC/Software/Downloads/Jweed*.

Se utilizaron los registros de 3 estaciones sismológicas pertenecientes a la *Global seismograph network* (red global de sismógrafos, sus siglas II e IU), ubicadas en Flin Flon Canadá (FFC) perteneciente a la red II, en Billibino Rusia (BILL) y en Kiev Ucrania (KIEV) ambas pertenecientes a la red IU. El dato utilizado se restringió a sismos de magnitudes mayores e iguales a $M_w 6.5$ y distancias epicentrales desde el sismo hasta la estación entre 30° y 90° para tener una mejor definición de las fases de tren de onda de interés. Se descargaron más de 200 sismos para cada estación, a fin de tener una gran densidad de dato.

Desarrollo del programa

Primero se realizó el diseño de una rutina de carga para n datos sísmológicos, se utilizó la función *uigetdir.m* para la selección de carpetas de forma interactiva, luego se usó la función *uigetfile.m* para seleccionar archivos de la carpeta y se activó el modo de multi-selección con el fin de poder seleccionar múltiples archivos. Se reorganizaron los datos en tres subcarpetas, una para cada componente, en cada carpeta los archivos se organizaron de tal forma que todos tuviesen el mismo orden, donde para el primer sismo en cargarse corresponde el primer archivo en la carpeta de la componente norte, que coincide con el primer archivo de las otras dos carpetas correspondientes a las componentes este y vertical, como se muestra en la figura 3.2.1 el orden que deben tener los datos.

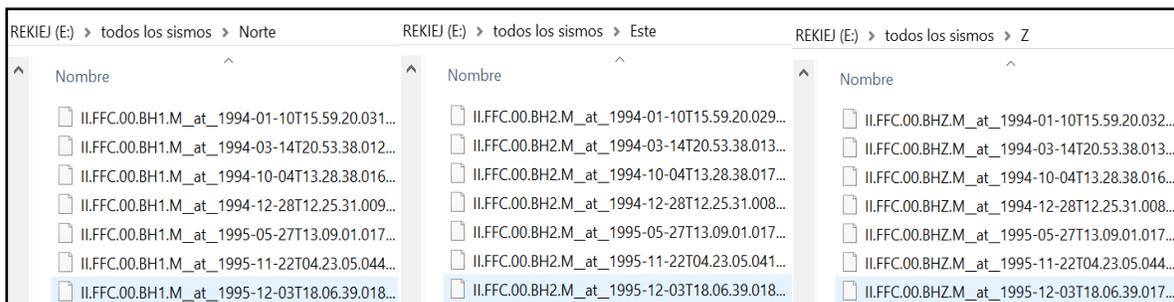


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..5.** Orden de los archivos de las componentes para cada sismo, como muestra la imagen, los archivos están ordenados por fecha de la misma manera en todas las carpetas.

Lectura de datos

Para leer y utilizar los archivos SAC se usó la función *rsac.m* desarrollada por Thorne (2004), que lee el formato binario en el que se encuentran los archivos y cuya salida es una matriz de 3 columnas, donde la columna 1 contiene los valores de tiempo, la columna 2 contiene los valores de amplitud y la columna 3 contiene la información del *header* (encabezado). Para la lectura del encabezado se utilizó la función *lh.m* desarrollada por Thorne (2004) que imprime en pantalla toda la información que contiene el *header* del archivo, como el intervalo de muestreo, latitud-longitud de la estación y del sismo, etc, como se observa en la figura 3.2.2

DELTA	= 0.050000001	NZYEAR	= 2016
SCALE	= 0	NZJDAY	= 108
B	= 0	NZHOUR	= 0
E	= 1374.95	NZMIN	= 3
O	= -283	NZSEC	= 20
T1	= 300	NZMSEC	= 19
T2	= 775	NVHDR	= 6
STLA	= 54.724998	NPTS	= 27500
STLO	= -101.9783	IFTYPE	= 1
STEL	= 338	IDEP	= 5
STDP	= 0	LEVEN	= 1
EVLA	= 0.38190001	LPSPOL	= 0
EVLO	= -79.921799	LOVROK	= 1
EVEL	= 0	LCALDA	= 0
EVDP	= 20.6	KSTNM	= FFC
DIST	= 6345.0288	KHOLE	= 00
AZ	= 344.96481	KT1	= P
BAZ	= 153.43674	KT2	= S
GCARC	= 57.11097	KCMPNM	= BH1
CMPAZ	= 0	KNETWK	= II
CMPINC	= 90		

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**6. *header* de un archivo SAC.

Pre-procesamiento y cortes de la señal

Se utilizó la función *marktimes.m* de Ford (2005), que calcula los tiempos de llegada para las distintas fases de onda, para todos los modelos de velocidad y los registra en el *header*. Para el programa se usó el modelo *AK135*, y se utilizó la función para calcular los tiempos de llegada de las fases P y S, obteniéndose de esta manera la ventana de corte para el intervalo de interés. A esta ventana se le realizó un corrimiento de 5 segundos antes de la llegada de la onda P para el cálculo de la función receptora. Para comprobar que la ventana calculada por la función fuese correcta se graficaron los sismos y se colocaron marcas sobre los límites de la ventana de corte, tal como se observa en la figura 3.2.3.

Con los límites calculados de la ventana de interés, se procedió a cortar la señal como se muestra en la figura 3.2.4. Para iniciar el pre-procesamiento estándar de la señal, se removió

la media del dato y las tendencias lineales, se empleó un filtro *cosine taper* para reducir el ruido en los extremos, se aplicó un filtro pasa-banda en el cual los parámetros se ingresan de manera interactiva (las frecuencias mayores, frecuencias menores y el grado del filtro; figura 3.2.5), y se graficaron las componentes después del pre-procesamiento para verificar el procedimiento, tal como lo ilustra la figura 3.2.6.

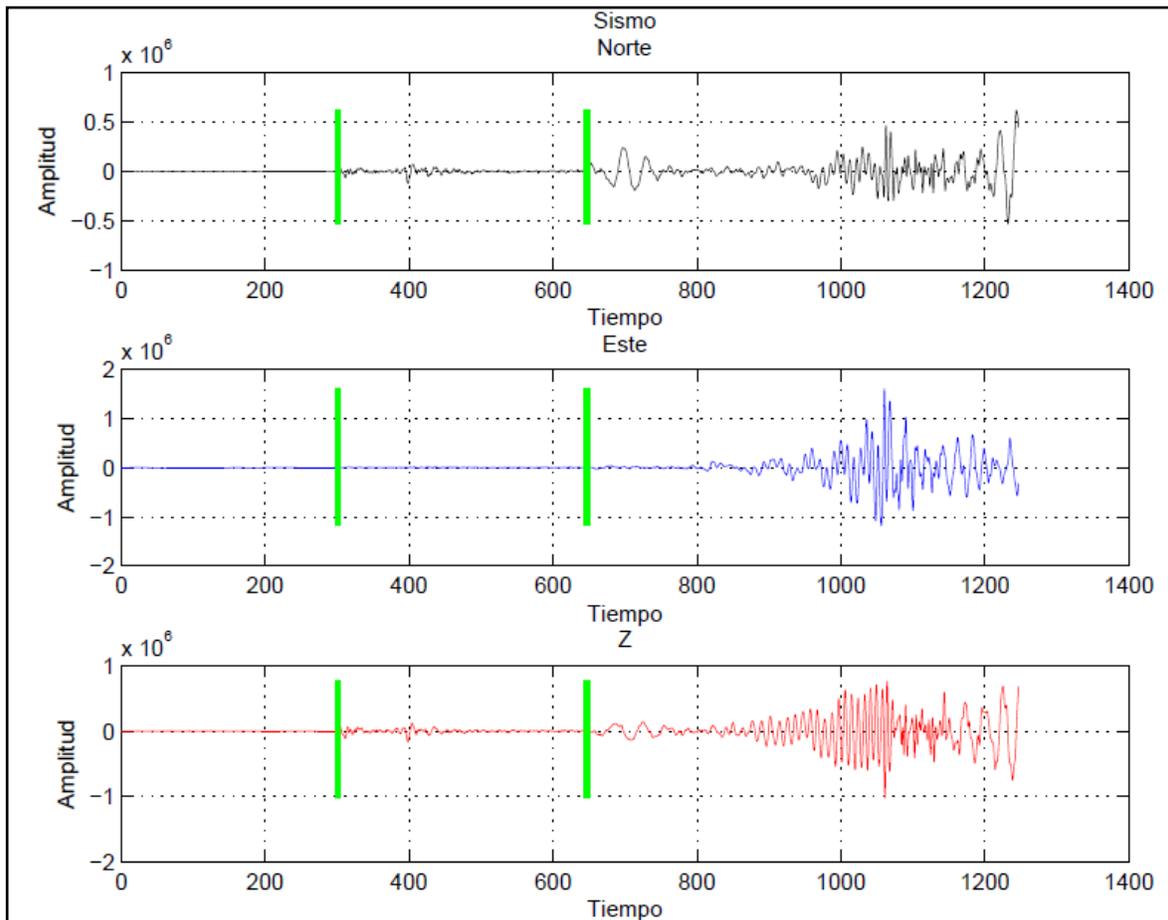


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**7. Líneas verdes representan los tiempos de llegada de las ondas P y S.

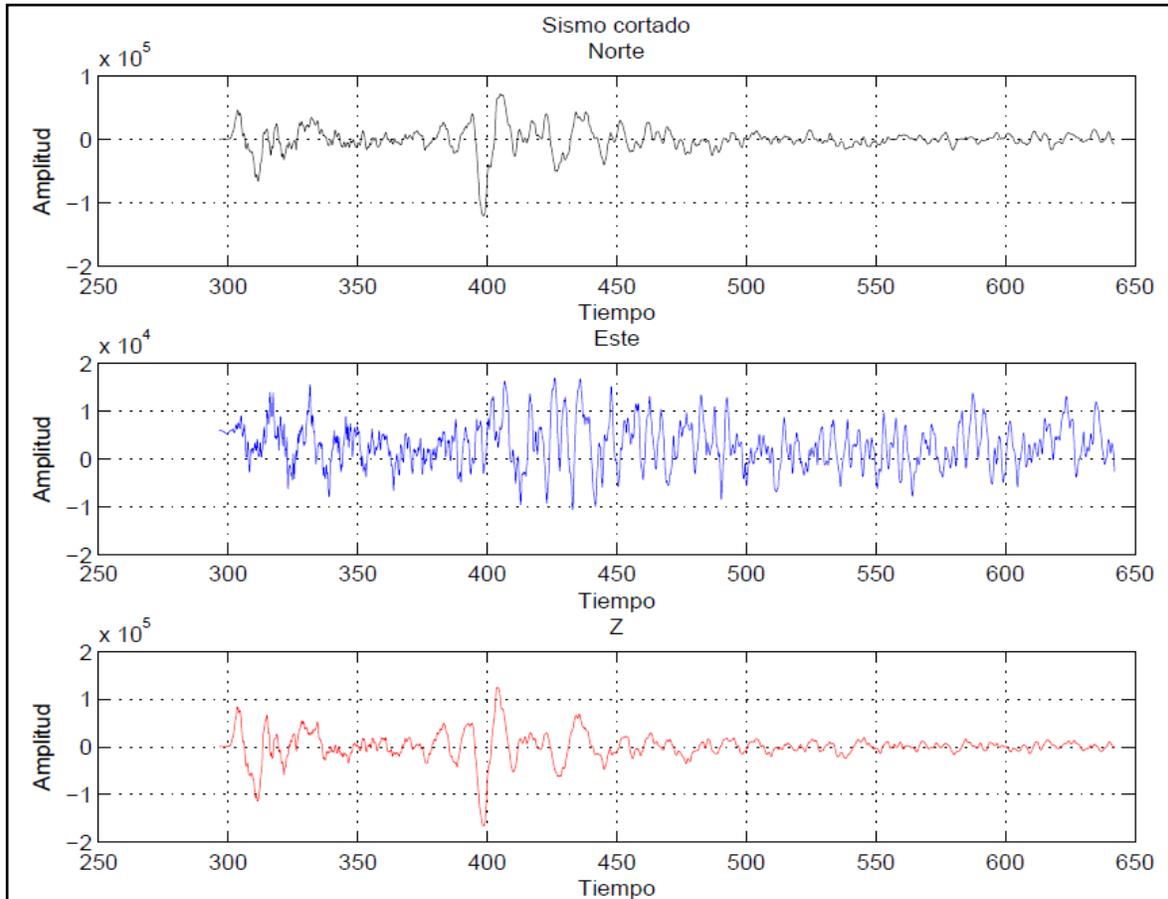


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..8.** Señal cortada en el intervalo de interés.

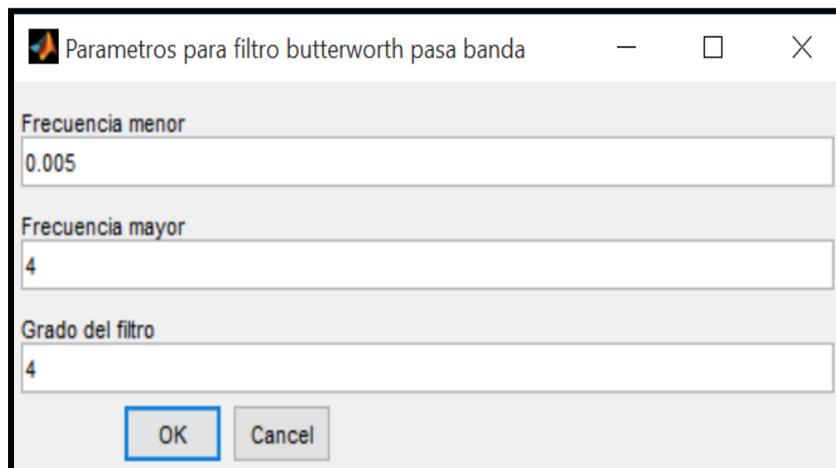


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..9.** Parámetros del filtro pasa banda.

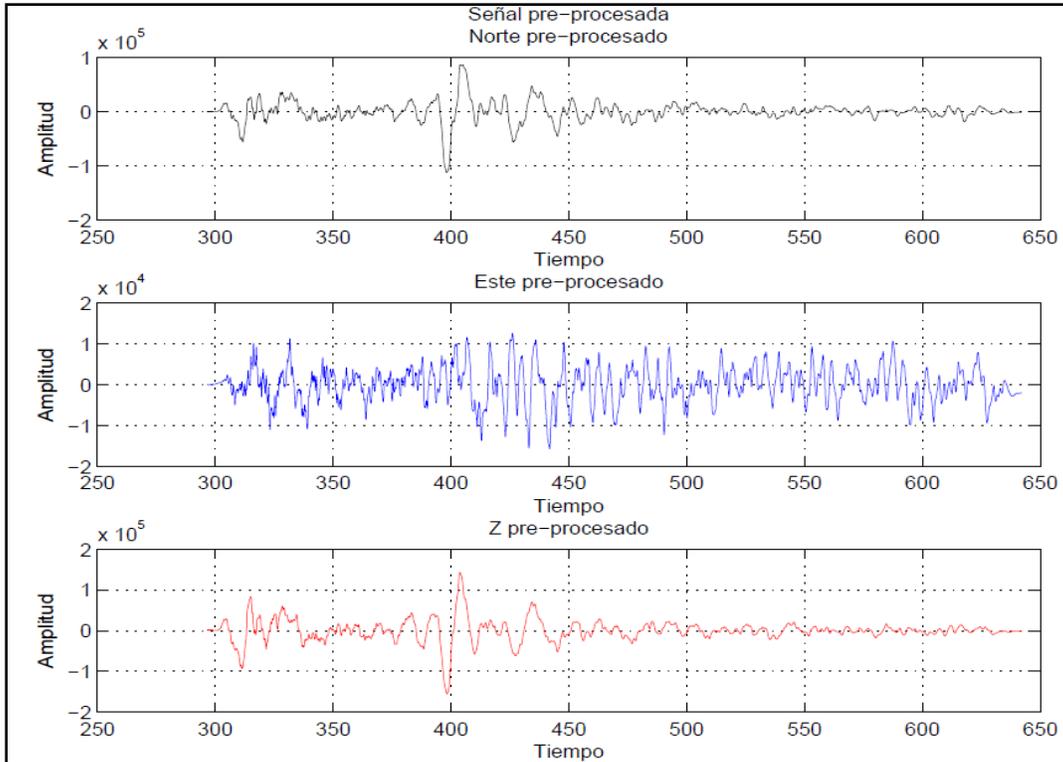


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..10.**
Señal pre-procesada.

Se realizó el cálculo del *backazimuth* según ecuación 3 (Stein y Wysession, 2003) utilizando la información del *header*, para ello fue necesario conocer la longitud y latitud tanto de la estación como del sismo.

$$Y = \arccos\left(\frac{\cos(\theta_e) * \sin(\theta_s) - \sin(\theta_e) * \cos(\theta_s) * \cos(\phi_e - \phi_s)}{\sin(\Delta)}\right)$$

(Ecuación 6)

Donde Y es el *backazimuth*, θ_s es la colatitud de la estación, θ_e es la colatitud del evento, ϕ_s longitud de la estación, ϕ_e longitud del evento y Δ es el menor arco.

Cálculo de la función receptora

Finalizado el pre-procesamiento se realizaron las rotaciones de las componentes utilizando la matriz de rotación según ecuación 7 (Rondenay, 2009). La componente norte (N) es rotada a componente radial (R), la componente este (E) es rotada a componente transversal (T) y la

componente vertical (Z) permanece igual. En la figura 3.6 se muestran las componentes rotadas para verificación.

$$\begin{pmatrix} R \\ T \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos Y & -\sin Y & 0 \\ \sin Y & -\cos Y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N \\ E \\ Z \end{pmatrix}$$

(Ecuación 7)

Donde R es la componente radial, T es la componente transversal, Z componente vertical, N componente norte, E componente este y Y es el backazimuth.

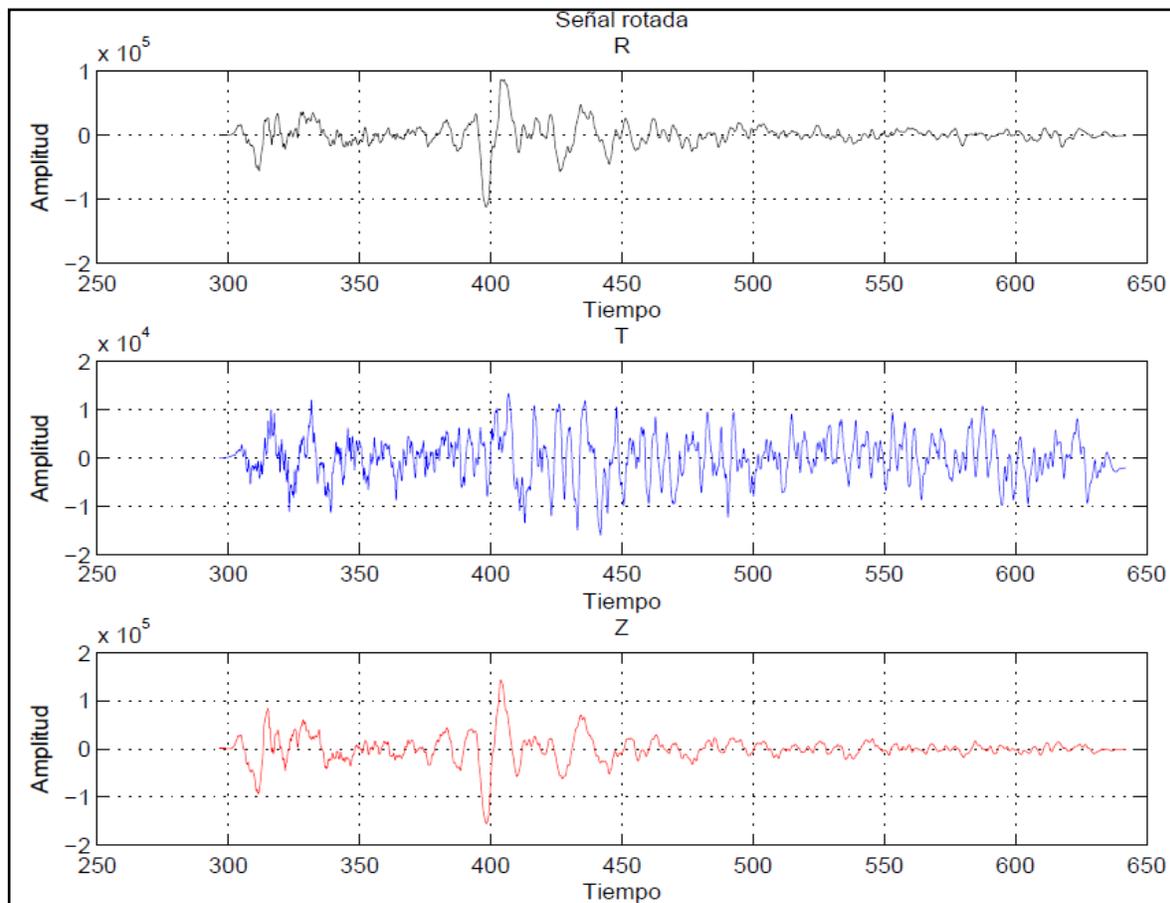


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..11.**
Señal rotada.

Realizadas las rotaciones, se procedió a calcular la función receptora utilizando la deconvolución por *waterlevel* como se muestra en la ecuación 3, se calculó la transformada de Fourier de las componentes R y Z, y la conjugada de la transformada de Fourier de la

componente Z, luego se ingresó el valor de la constante de *waterlevel* y el factor Gaussiano, ambos valores fueron ingresados de forma interactiva.

$$FR(\omega) = \frac{R(\omega)Z^*(\omega)}{\max\{Z(\omega)Z^*(\omega), k|Z_{\max}(\omega_0)|^2\}} e^{-\left(\frac{\omega}{2a}\right)^2}$$

(Ecuación 1)

Donde $R(\omega)$ y $Z(\omega)$ son las transformadas de Fourier de R y Z , y $Z^*(\omega)$ es la conjugada imaginaria de Z , k es el valor de la constante del *waterlevel* y a es el valor del factor Gaussiano.

Realizada la deconvolución se obtuvo la función receptora en el dominio de la frecuencia y se procedió a calcular la transformada inversa de Fourier posteriormente se tomó la parte real de la misma y se graficó con respecto a el tiempo la función receptora (figura 3.2.8) y se guardaron las amplitudes de las funciones receptoras calculadas en un arreglo celular para luego ser apiladas.

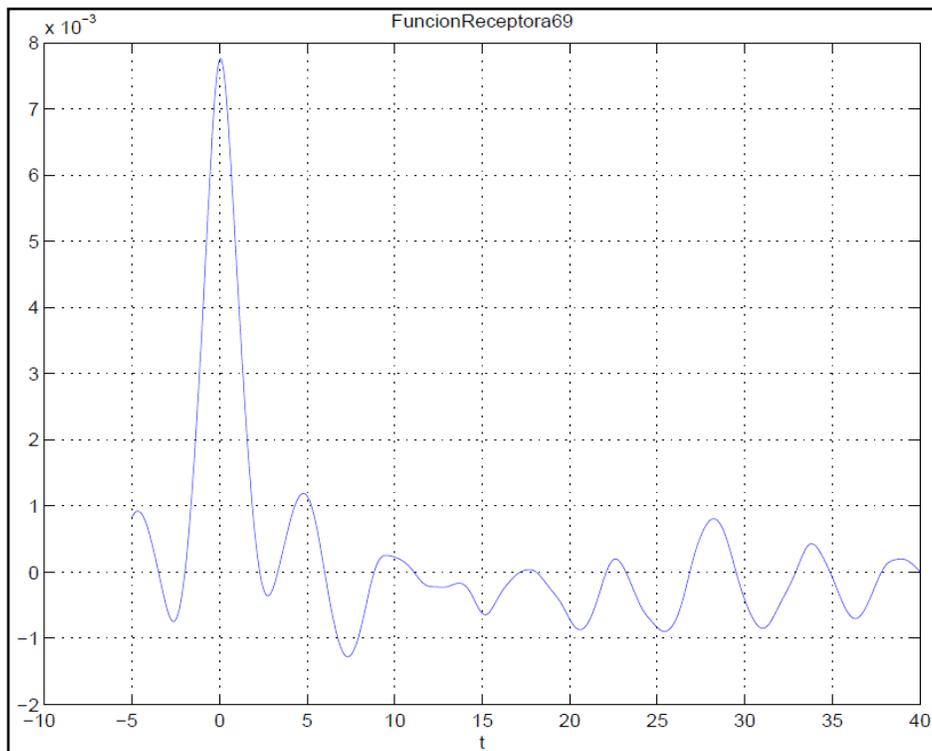


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..12. Función receptora.

Apilamiento

Se tomaron, del arreglo celular, las amplitudes de las funciones receptoras para realizar el apilamiento. Se usaron 2 métodos de apilamiento: 1) lineal el cual hace una suma simple de elemento a elemento de las amplitudes correspondientes a cada función receptora, dando como resultado un vector con los valores apilados, se realiza utilizando la función *sum.m* de *matlab*. 2) *Nth-Root* (Mcfadden *et al.*, 1986) que es un método de apilamiento con el que se reduce de manera eficiente el ruido incoherente de la señal, realizando de igual manera una suma, pero utilizando un valor *N-ésimo* como exponente de apilamiento (para este cálculo se usó la ecuación 8). Para verificar el funcionamiento de ambos métodos de apilamiento se graficaron las funciones receptoras apiladas tal como se muestra en la figura 3.2.9. Para el apilamiento se diseñó una forma interactiva para ingresar las funciones receptoras de interés (para el usuario) a apilar, ingresando el número identificador de las gráficas de interés.

$$R_N = \left(\frac{1}{m} \sum X_i \right)^N = \left(\frac{1}{m} \sum \sqrt[N]{t_i} \right)^N = \left(\frac{1}{m} \sum \sqrt[N]{t_i} \right) * \left| \left(\frac{1}{m} \sum \sqrt[N]{t_i} \right)^{N-1} \right|$$

(Ecuación 8)

Donde R_N es el valor de apilamiento, N es el exponente de apilamiento y X_i viene expresado por la ecuación 9.

$$X_i = \frac{t_i}{|t_i|} [|t_i|]^{1/N}$$

(Ecuación 9)

Donde t_i corresponde al vector de amplitudes y N es el exponente de apilamiento.

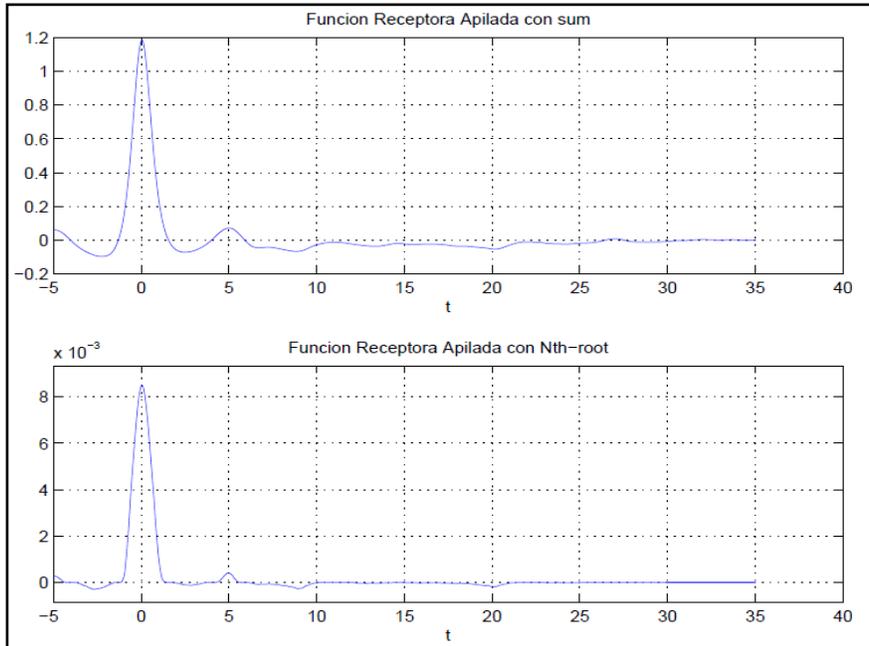


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**13. Función receptora apilada.

Calculo de espesores

Análisis *H-kappa*

Se realizó el análisis H-kappa, donde se utilizaron las funciones receptoras seleccionadas para el apilamiento. Este análisis consiste en variar los valores de kappa o ratio (relación V_p/V_s) y los valores de H (espesor) para obtener distintos valores de tiempo para la onda Pds y sus reverberaciones. Estos se calculan empleando la ecuación 2, 3 y 4, luego aplicando la ecuación 2, se obtiene un valor de amplitud $s(H, k)$ el cual es ubicado en una matriz de acuerdo al valor de H y kappa con el que fue calculado. Al finalizar el análisis se busca el valor que tiene mayor amplitud y donde éste se encuentre corresponde al valor de espesor y ratio de la corteza por debajo de la estación. Esto fue programado utilizando un lazo *for*, donde cada valor de S se guardó en una matriz de n dimensiones, para finalmente ser apilado usando los métodos *sum* y *Nth-Root*.

Donde V_p corresponde al valor de la velocidad de la onda P, V_s corresponde al valor de la velocidad de la onda S y p es el parámetro de rayo que fue calculado usando la función

paray.m y los tiempos corresponden a la onda Pds y sus reverberaciones los cuales son despejados para obtener su valor.

Para hacer el análisis H-kappa se programó una rutina para que se ingresaran de forma interactiva los parámetros: máximos, mínimos e intervalos de H y kappa, valor de velocidad promedio de onda P en la corteza V_p , los valores de los pesos ω_i y grado del exponente de apilamiento.

Debido a que el análisis H-kappa depende de los pesos que se le asignen a cada pico los resultados varían mucho, por lo que se programó una opción donde se pudiera elegir si modificar o no los parámetros. Para graficar el análisis H-kappa se utilizó la función *contourf.m*. Se diseñó una rutina donde el programa de forma automática ubica la máxima amplitud y la identifica con dos líneas perpendiculares tal como lo muestra la figura 3.2.10.

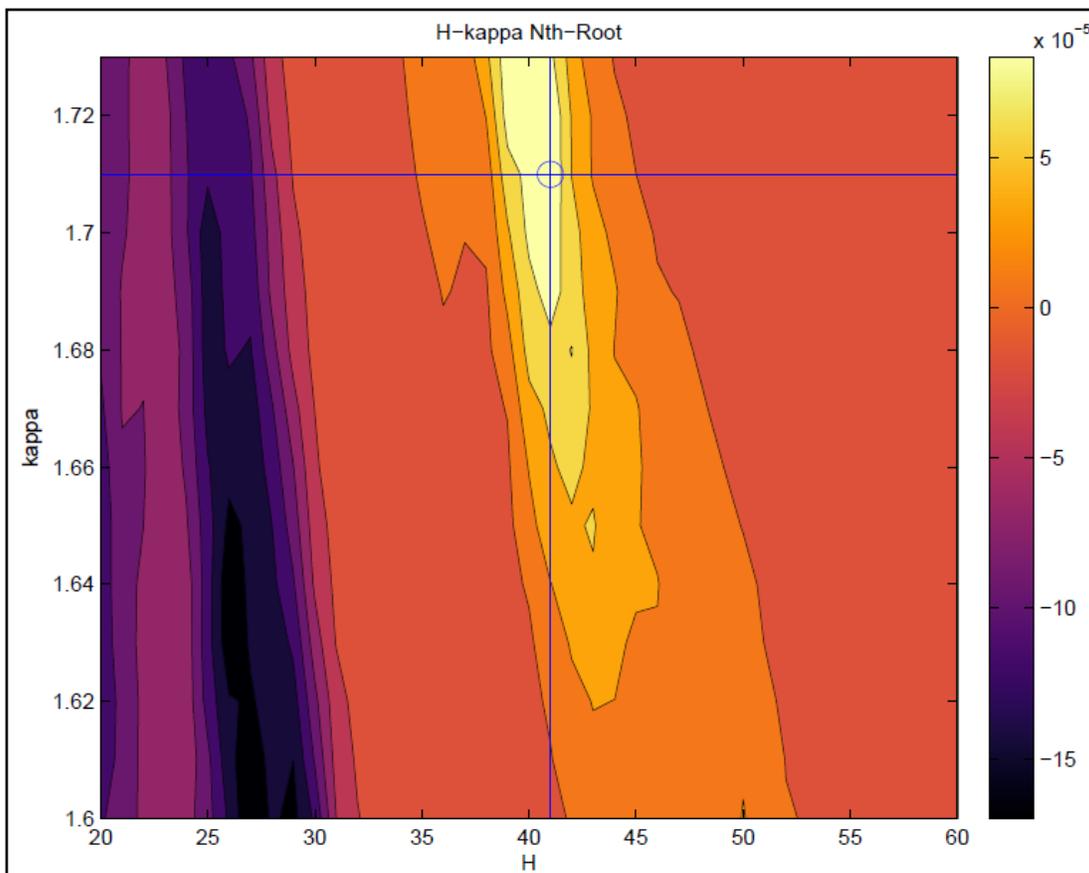


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**14. Análisis H-kappa con la ubicación de la mayor amplitud.

Modelado directo

Se usaron dos formas para calcular los espesores de forma directa:

- 1) Por medio de la selección del pico Pds con lo cual se calculó el espesor utilizando la ecuación 10, tomando los valores de kappa y Vp usados en el análisis H-kappa.

$$\Delta t = H \left(\frac{1}{V_s} - \frac{1}{V_p} \right)$$

(Ecuación 10)

Donde Δt es el tiempo del pico Pds, V_s velocidad de onda S, V_p velocidad de onda P y H es el valor de espesor.

- 2) Ingresando de forma interactiva los valores para un modelo de n capas con $n+1$ velocidades, a partir de estos parámetros el programa calculó una función receptora teórica que se comparó directamente con las funciones receptoras calculadas con el apilamiento, como se muestra en la figura 3.2.11. En caso de no parecerse, se diseñó una rutina para modificar los parámetros.

Para finalizar, se graficaron las funciones receptoras por *backazimuth*, para observar su distribución y también se graficó de forma radial la distribución de sismos con respecto al *backazimuth*, para visualizar la distribución de sismos con respecto a la estación tal como se muestra en la figura 3.2.12.

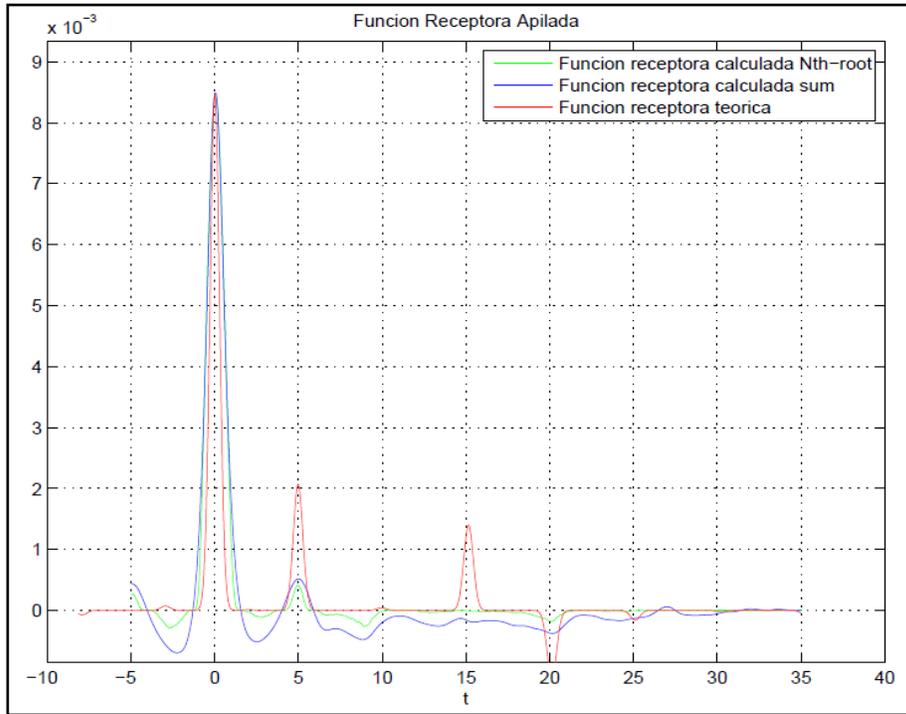


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..15**. Modelado directo, con función receptora teórica en color rojo.

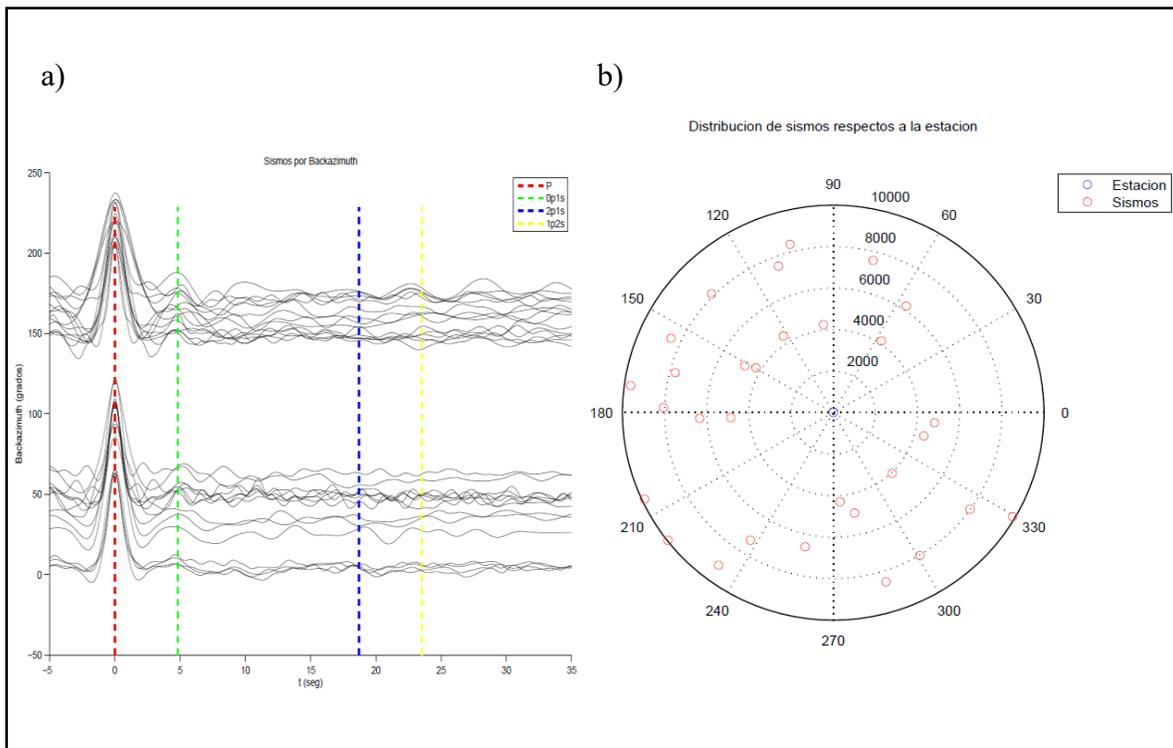


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..16**. a) Distribución de funciones receptoras por *backazimuth* donde 0 es la estación, b) distribución de sismos

Finalizada la fase de desarrollo del programa se realizaron las pruebas de verificación de funcionamiento con el dato adquirido con anterioridad de las estaciones pertenecientes a las redes internacionales del *IRIS*.

CAPITULO IV

RESULTADOS

Para la verificación del programa se utilizaron los datos tomados del *IRIS* correspondientes a tres estaciones sismológicas con estructura cortical conocida, todas pertenecientes a la *Global seismograph network* (II, IU), con estaciones ubicadas en distintas localidades. Los valores de profundidad fueron tomados desde la sección *EARS (earthscope automated receiver survey)* del *IRIS*, en donde se calculan las funciones receptoras y análisis H-kappa de forma automática.

Estación II.FFC, Flin Flon, Canadá.

Se descargaron 215 eventos que cumplían con los requisitos preestablecidos, con magnitudes mayores a M_w 6.5 y distancias epicentrales entre 30° - 90° . Estos fueron procesados para el cálculo de 215 funciones receptoras. Como se desconocía el comportamiento de la función receptora para el área donde se ubica la estación, se tomó la decisión de apilar todos los sismos para poder visualizar su forma característica. se ejecutó el programa de nuevo y se seleccionaron sólo las funciones receptoras que tenían la forma característica para un total de 97 sismos apilados, dando como resultado una función receptora donde se ve claramente la reverberación Pds de la onda P (figura 4.1.1). Al obtener la función receptora apilada de calidad, se realizó el análisis H-kappa y el modelado directo para el cálculo de la profundidad de la discontinuidad.

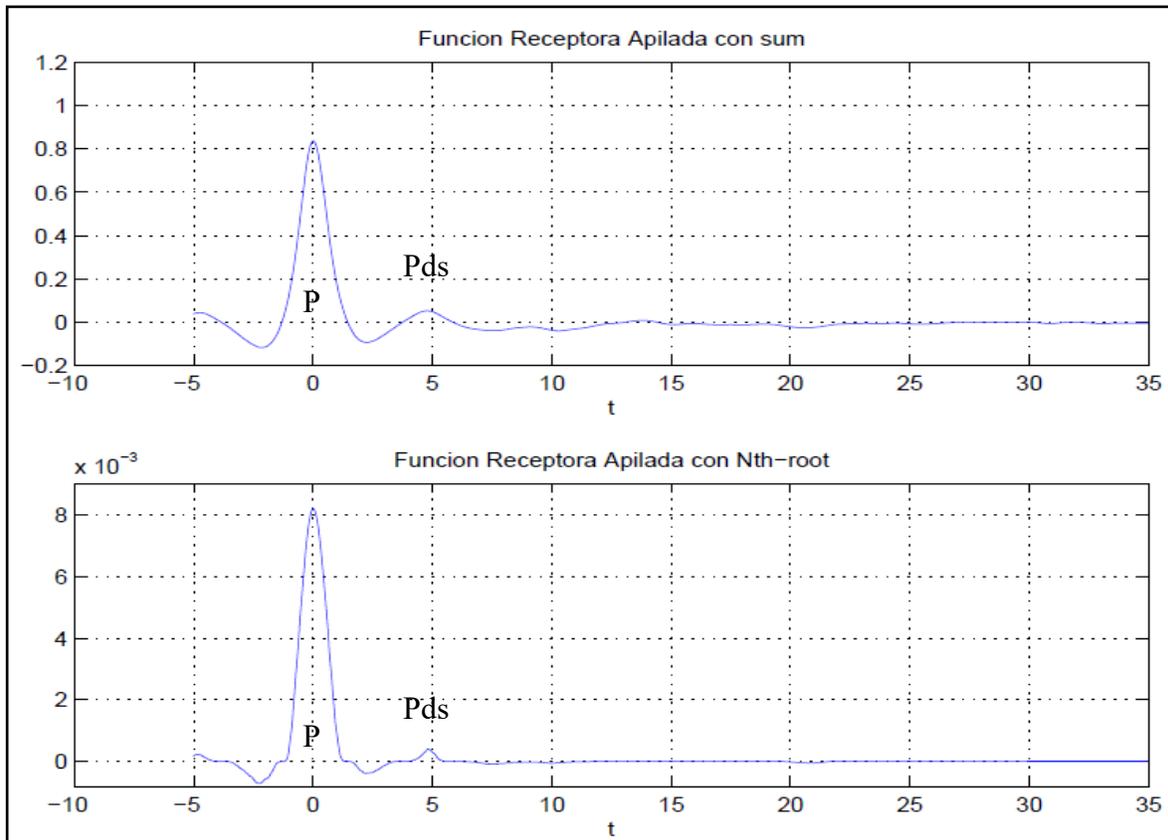


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**17. Funciones receptoras apiladas por los dos métodos utilizados en el programa.

Para el análisis H-kappa se asignaron los mismos parámetros que utilizados por el *EARS* con velocidad de onda P (V_p) de 6.552 km/s, valores para los pesos de $\omega_1=0.33333334$, $\omega_2=0.33333334$ y $\omega_3=0.33333328$, con los mismos límites de profundidad (H) de 20-60 km y de relación V_p/V_s (kappa) de 1.6-2.1 como se observa en la figura 4.1.2. Los valores obtenidos con este amplio rango para kappa fueron de 1.95 por *Nth-Root* y 1.76 por *sum* (figura 4.1.3), para H fue de 39 km por *Nth-Root* y 33 km por *sum* (figura 4.1.4), valores que al compararlos con los obtenidos por el *IRIS* diferían, siendo los valores calculados por el *IRIS* de 1.73 para kappa y de 41 km para H. Se volvió a realizar el análisis H-kappa y se modificó el límite para kappa colocándolo desde 1.6 hasta 1.73 como se puede observar en la figura 4.1.5 y 4.1.6, dando como resultado valores para kappa de 1.71 por *Nth-Root* y 1.73 por *sum*, para H de 41 km por *Nth-Root* y 40 km por *sum* cercanos a los calculados por el *EARS*.

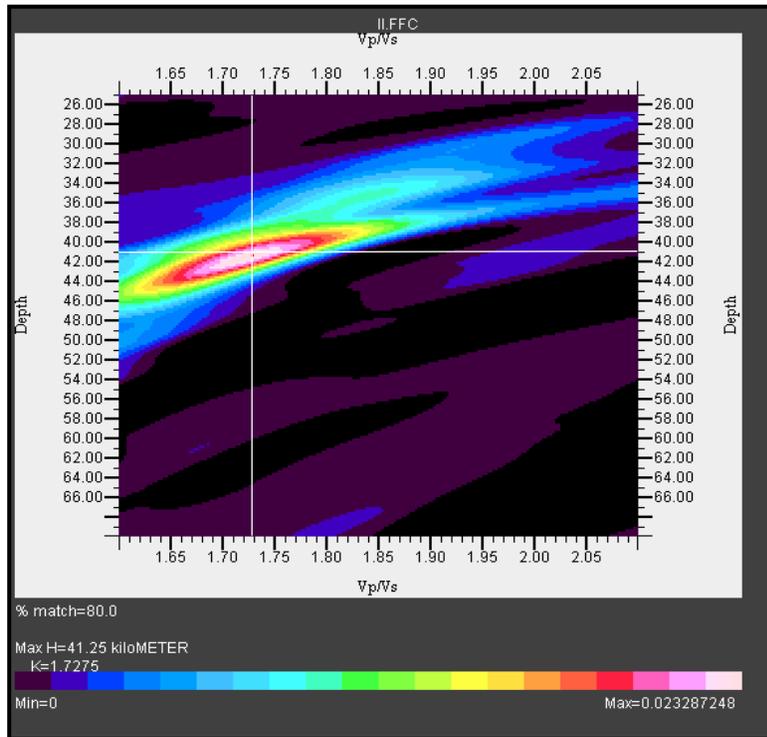


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**18. Análisis H-kappa calculado por el IRIS para la estación II.FFC.

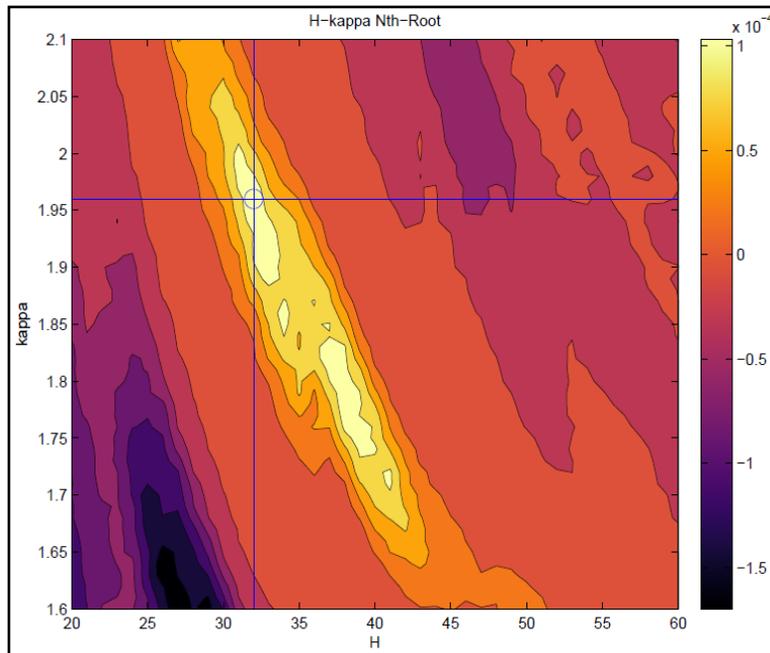


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**19. Análisis H-kappa apilado por el método *Nth-Root*. Se puede observar como la mayor amplitud se encuentra para los valores 1.97 de kappa y 33 km de H, valores que difieren de los calculados

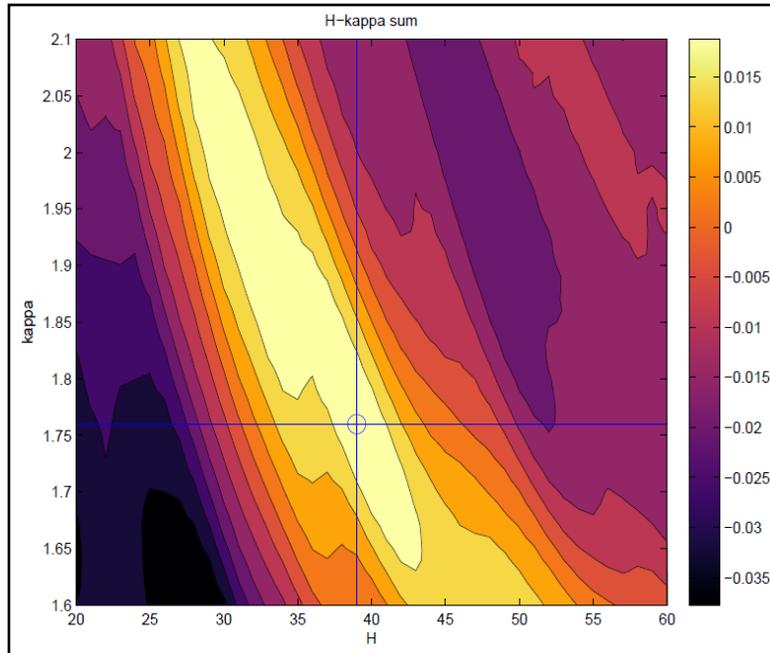


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..20**. Análisis H-kappa apilado por el método *sum*. Se puede observar como la mayor amplitud se encuentra para los valores 1.76 de kappa y 39 km de H, valores que se alejan de los calculados por el

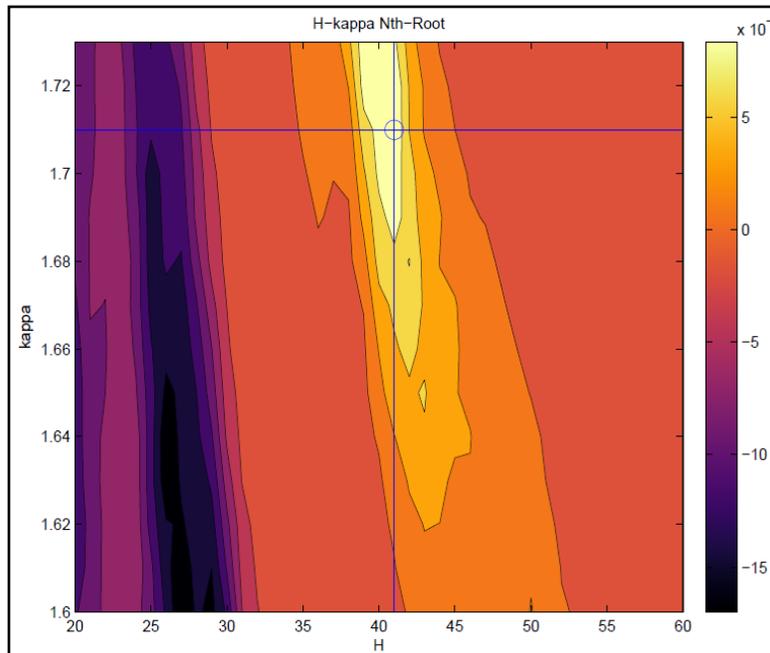


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..21**. Análisis H-kappa apilado por el método *Nth-Root*. Se puede observar como la mayor amplitud se encuentra para los valores 1.71 de kappa y 41 km de H, valores que difieren de los calculados por el *EARS* del *IRIS*.

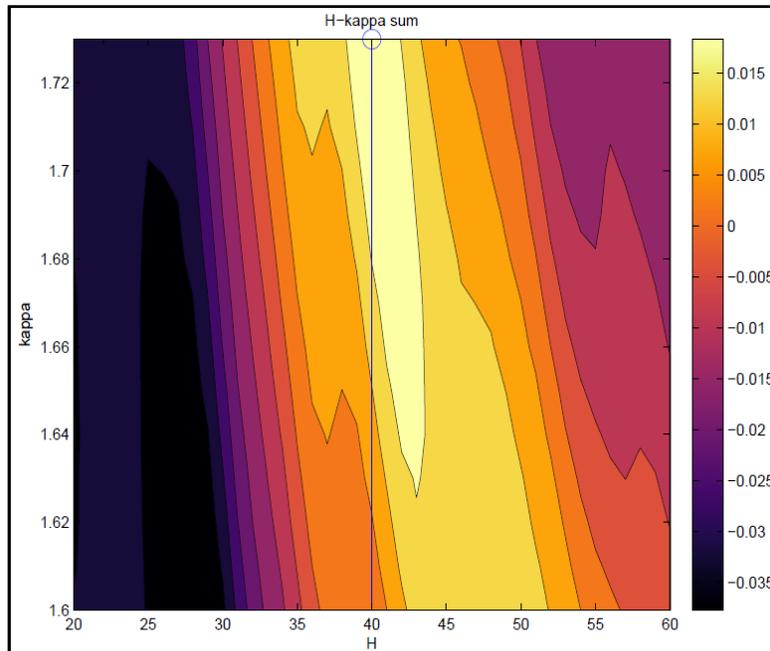


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..22.** Análisis H-kappa apilado por el método *sum*. Se puede observar como la mayor amplitud se encuentra para los valores 1.73 de kappa y 40 km de H, valores que difieren de los calculados por el *EARS* del *IRIS*.

En el modelado directo se seleccionó el pico Pds directamente en la función receptora apilada, dando como resultado del cálculo para una relación V_p/V_s de 1.73 una profundidad de 43.3 km y para una relación de 1.71 la profundidad fue de 44.52 km. Para el cálculo de la función receptora teórica se utilizó un modelo de dos capas, donde la primera capa se le asignó un espesor de 41 km correspondientes a la profundidad de la discontinuidad más cercana, para nuestro caso la profundidad de Mohorovic y una velocidad V_p de 6.552 km/s y para la segunda capa una velocidad de 8 km/s dando como resultado una función receptora muy parecida a las obtenidas al apilar, esto se ilustra en la figura 4.1.7.

Para tener una buena calidad en el cálculo y estimación de espesores, los sismos correspondientes a las funciones receptoras utilizadas para el apilamiento deben provenir desde distintas direcciones para tener una mayor cantidad de información sobre la

discontinuidad de Mohorovic. Como se muestra en la figura 4.1.8, los sismos utilizados para realizar el apilamiento en la estación II.FFC tiene una muy buena distribución alrededor de la estación, lo que indica que la estación tiene una buena cobertura azimutal y los resultados obtenidos son confiables.

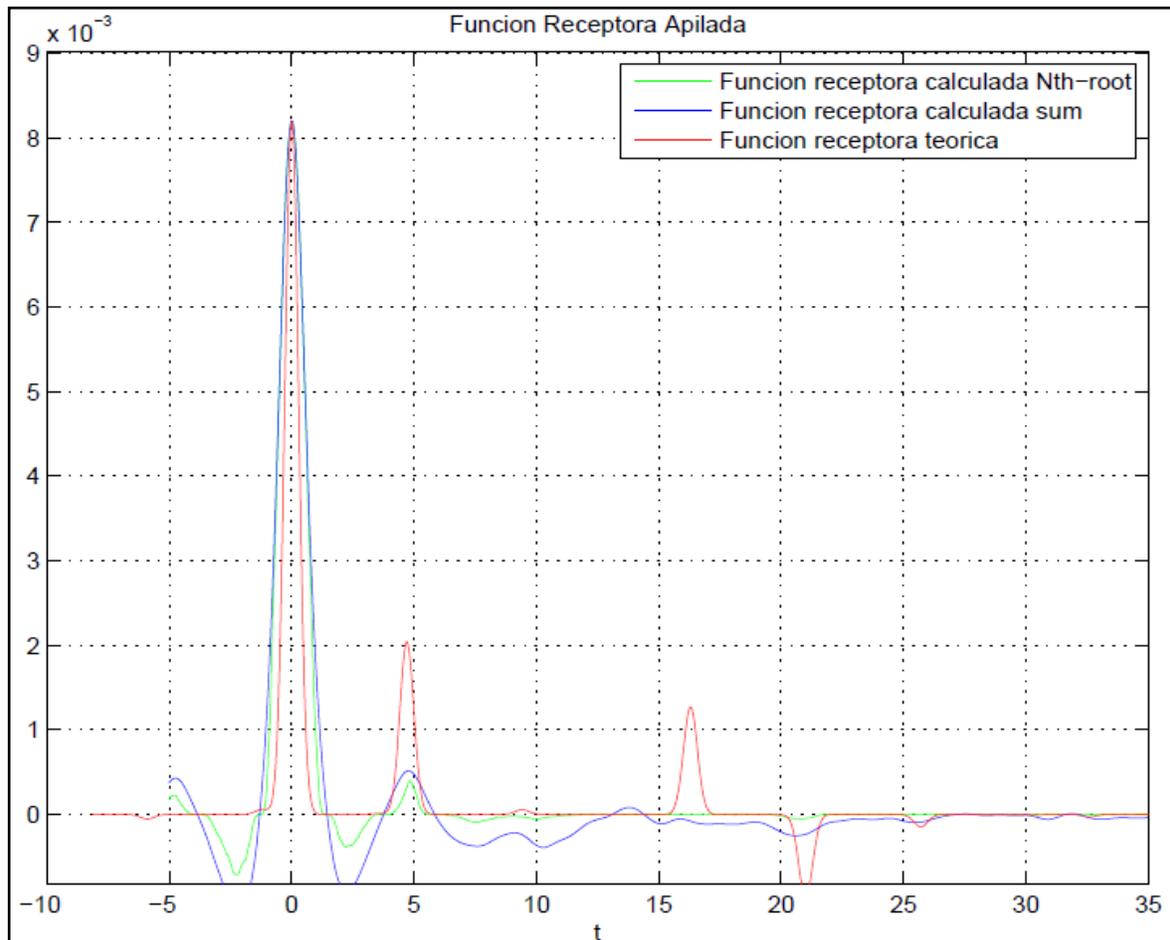


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..23**. Modelado directo, línea color rojo función receptora teórica.

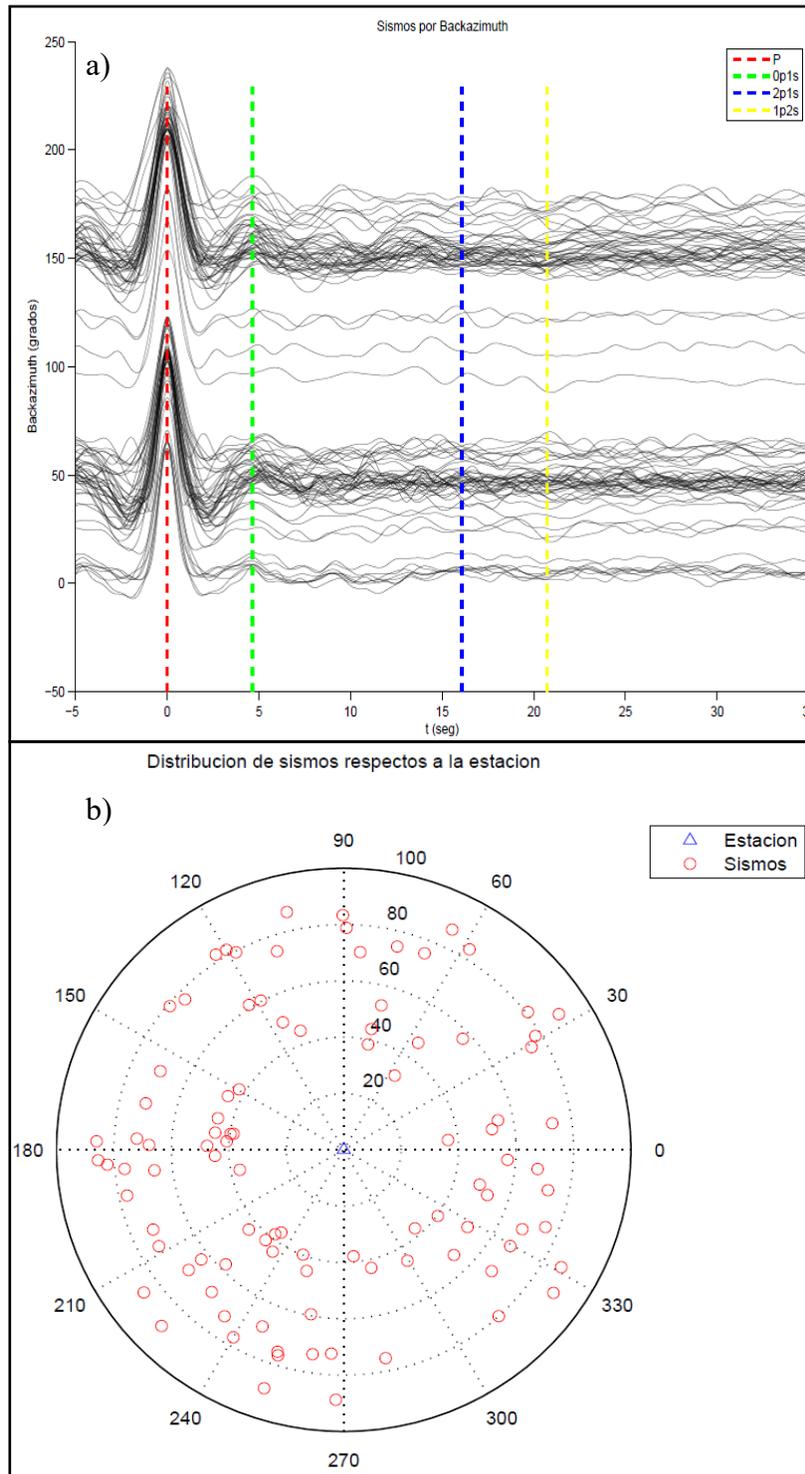


Figura 24. a) Funciones receptoras ordenadas por backazimuth, b) Distribución de sismos respecto a la estación.

Estación IUKIEV, Kiev, Ucrania.

Se descargaron 239 eventos que cumplían con los requisitos preestablecidos, con magnitudes mayores a 6.5 y distancias epicentrales entre 30° y 90°. Estos fueron procesados para el cálculo de 239 funciones receptoras. De igual manera se realizó el apilado de todas las funciones receptoras para conocer la forma característica para el área donde se ubica la estación. se ejecutó el programa de nuevo y se seleccionaron solo las funciones receptoras que tenían la forma característica para un total de 132 sismos apilados, dando como resultado una función receptora donde se ve claramente la reverberación Pds de la onda P (figura 4.2.1). Al obtener la función receptora apilada de calidad, se realizó el análisis H-kappa y el modelado directo para el cálculo de la profundidad de la discontinuidad.

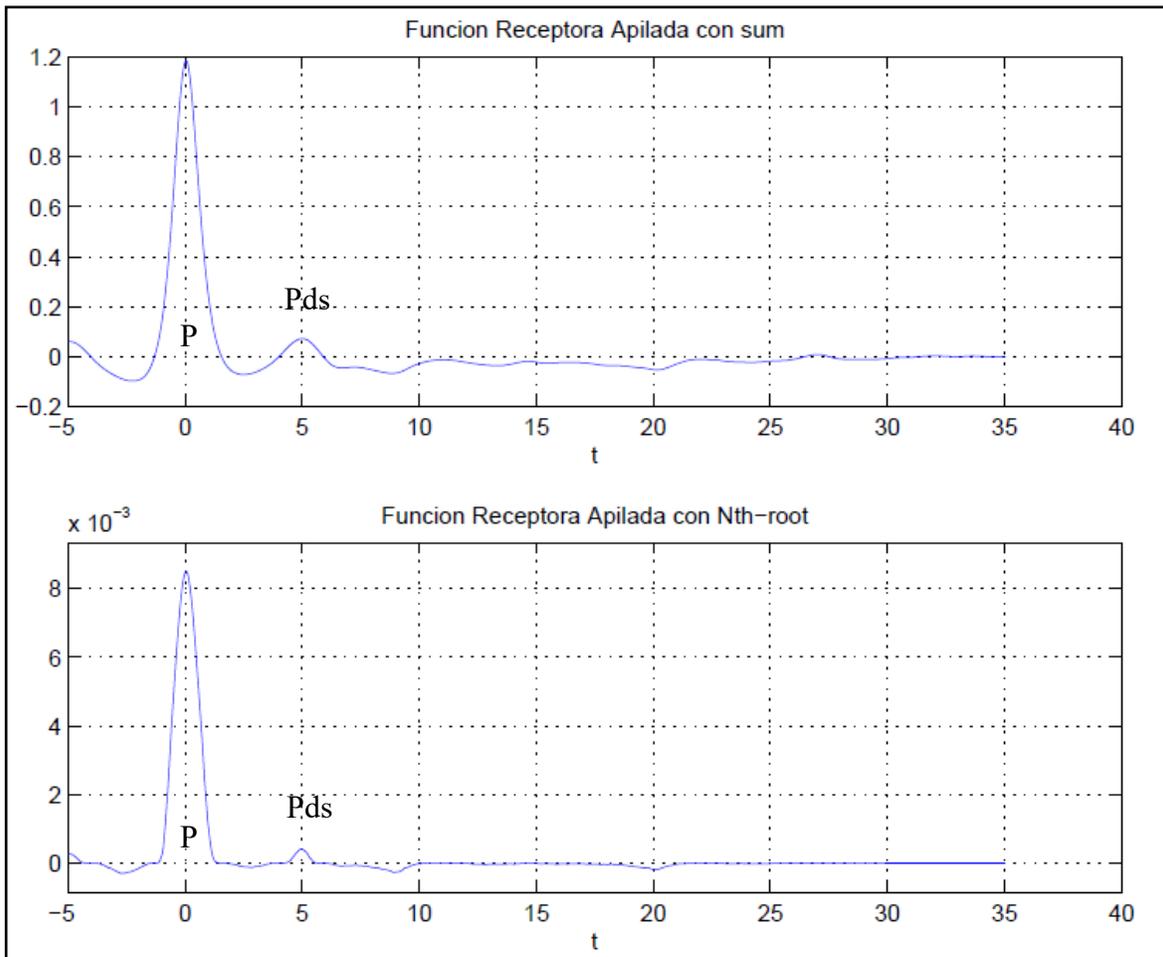


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..25**. Funciones receptoras apiladas por los dos métodos utilizados en el programa.

En el análisis H-kappa se colocaron igualmente los parámetros usados por el *EARS* con velocidad de onda P (V_p) de 6.552 km/s, valores para los pesos de $\omega_1=0.33333334$, $\omega_2=0.33333334$ y $\omega_3=0.33333328$, con los mismos límites de profundidad (H) de 20-60 km y de relación V_p/V_s (κ) de 1.6-2.1 como se observa en la figura 4.2.2. Los valores obtenidos con este amplio rango para κ fueron de 1.97 por *Nth-Root* y 1.94, para H fue de 33 km por *Nth-Root* y 34 km por *sum*, como se puede ver en la figura 4.2.3 y figura 4.2.4, siendo valores que se encuentra en un rango de error alto, cuando los valores del *IRIS* son de 1.87 para κ y 36 km para H . Se volvió a realizar el análisis H-kappa y se modificaron los parámetros los límites para κ colocándolo desde 1.6-1.87. Cuando se realizó el análisis, resultó que los valores de espesor continuaron dando fuera del rango deseado, por lo que se modificaron los valores de los pesos de importancia a partir del estudio de la función receptora apilada donde se asignó para $\omega_1=0.7$ porque es el pico que se observa con mayor claridad, $\omega_2=0.1$ porque es un pico que no se percibe y $\omega_3=0.2$ porque es un pico pequeño pero aun así se puede observar a simple vista cerca de los 20 s, dando como resultado valores para κ de 1.87 por ambos métodos y para H de 36 km por ambos métodos, cercanos a los del *EARS*, tal como se muestra en la figura 4.2.5 y figura 4.2.6.

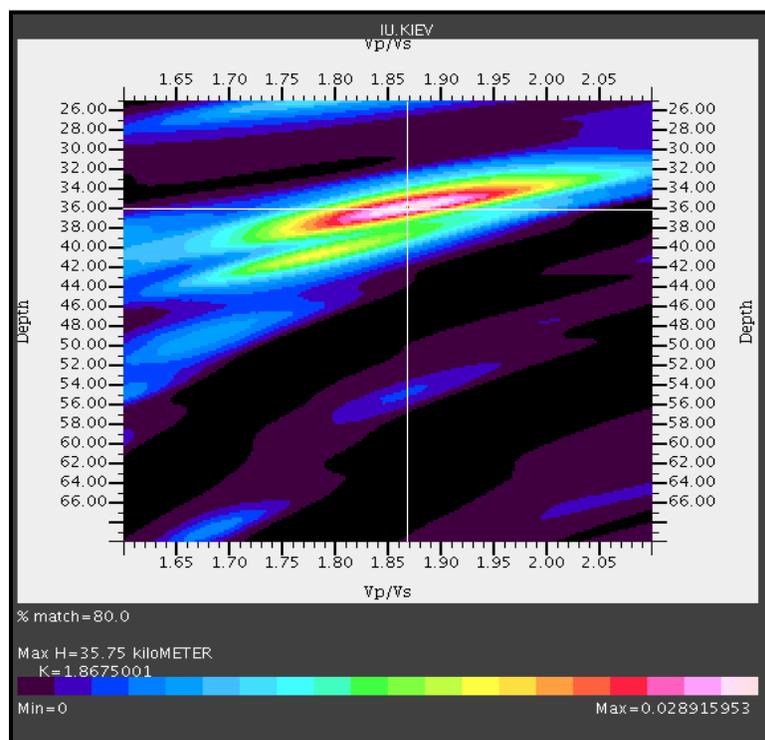


Figura 4.2.6. Análisis H-kappa calculado por el *EARS* del *IRIS* para la estación IU.KIEV.

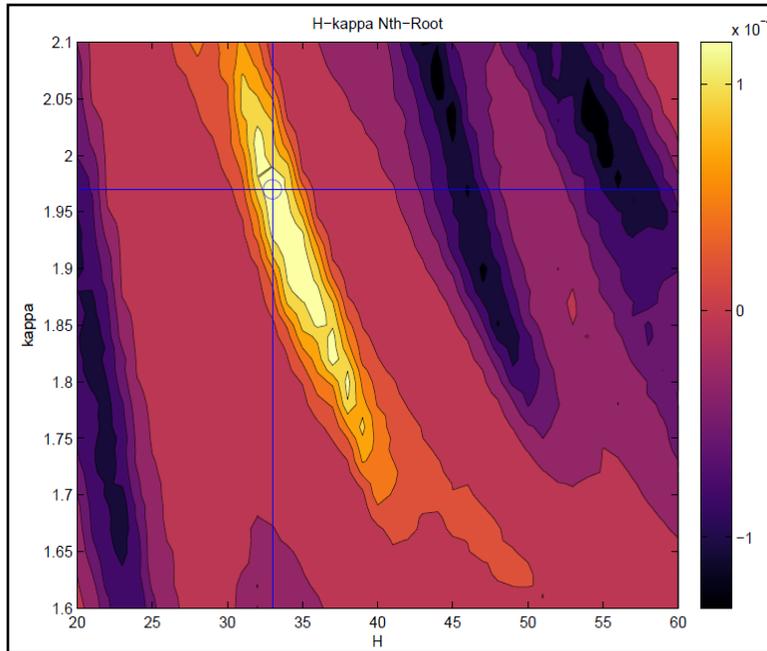


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..27**. Análisis H-kappa apilado por el método *Nth-Root*. Se puede observar como la mayor amplitud se encuentra para los valores 1.97 de kappa y 33 km de H, valores que difieren de los calculados por el *EARS* del IRIS.

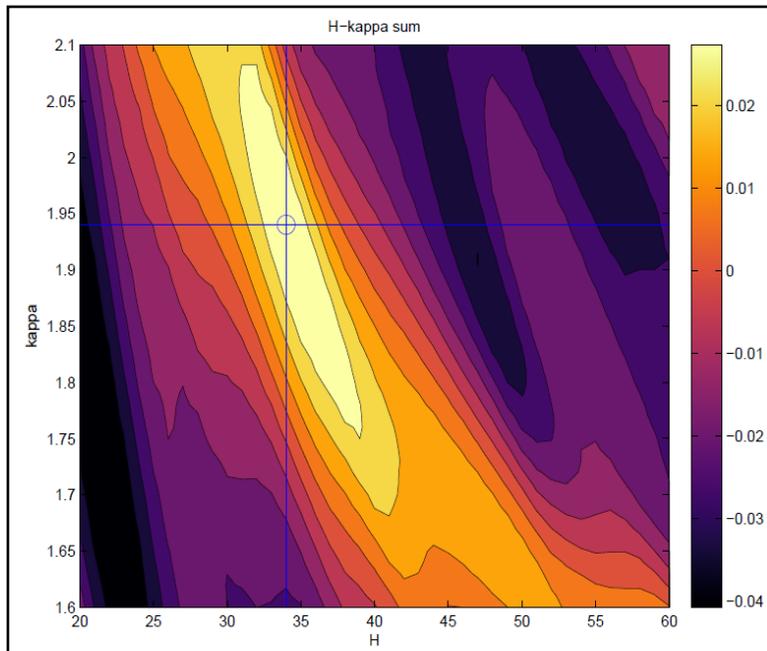


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..28**. Análisis H-kappa apilado por *sum*. Como se observa, la mayor amplitud se encuentra para los valores de 1.94 kappa y 34 km H, valores que difieren de los calculados por el *EARS* del IRIS.

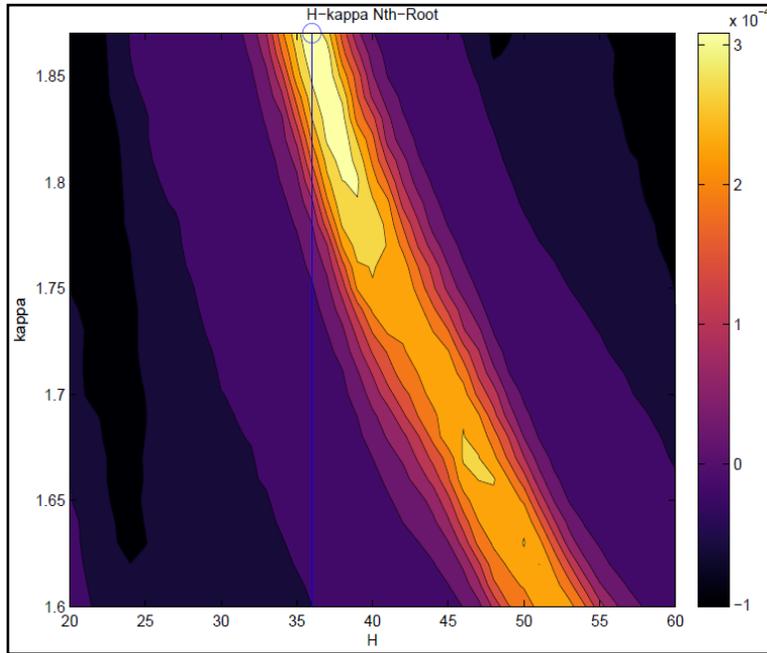


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..29.** Análisis H-kappa apilado por *Nth-Root*. La máxima amplitud se encuentra para los valores de 1.87 de kappa y 36 km de H, valores cercanos a los calculados por el *EARS* del IRIS.

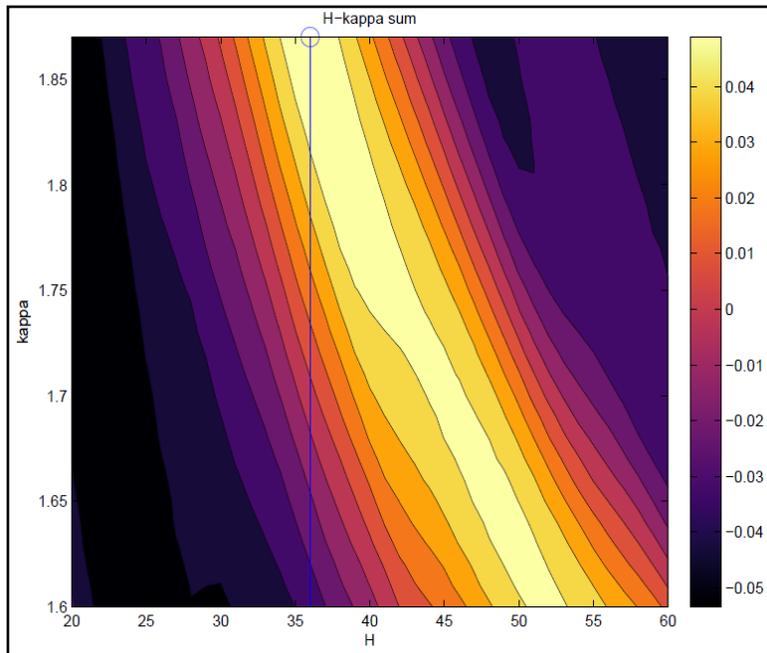


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..30.** Análisis H-kappa apilado por *sum*. La amplitud máxima se encuentra para los valores de 1.87 de kappa y 36 km de H, valores cercanos a los calculados por el *EARS* del IRIS.

En el modelado directo se seleccionó el pico Pds en la función receptora apilada, dando como resultado para la relación V_p/V_s de 1.87 una profundidad de 37.37 km. Para el cálculo de la función receptora teórica se utilizó un modelo de dos capas donde a la primera capa se le asignó un espesor de 36 km correspondientes a la profundidad de la discontinuidad más cercana, para nuestro caso la profundidad de Mohorovic y una velocidad V_p de 6.552 km/s y para la segunda capa una velocidad de 8 km/s dando como resultado una función receptora parecida a las obtenidas al apilar, esto se ilustra en la figura 4.2.7.

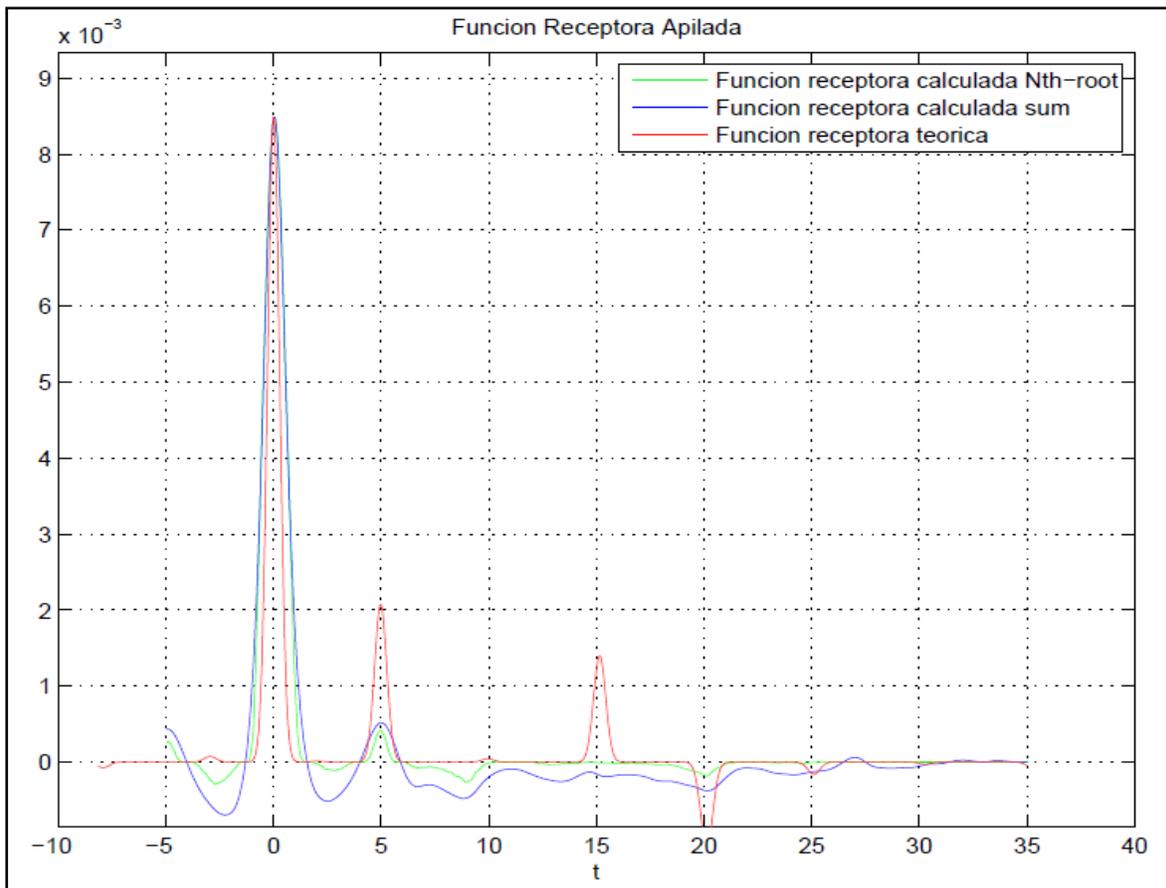


Figura 4.2.7. Modelado directo, línea color roja función receptora teórica.

La distribución de sismos con respecto a la estación es uniforme, proviniendo desde distintas direcciones dando confiabilidad al cálculo de la función receptora hecha por el programa, esto también puede verificarse al observar la distribución de funciones receptoras, todas muestran comportamiento semejante para distintos *backazimuths* (figura 4.2.8).

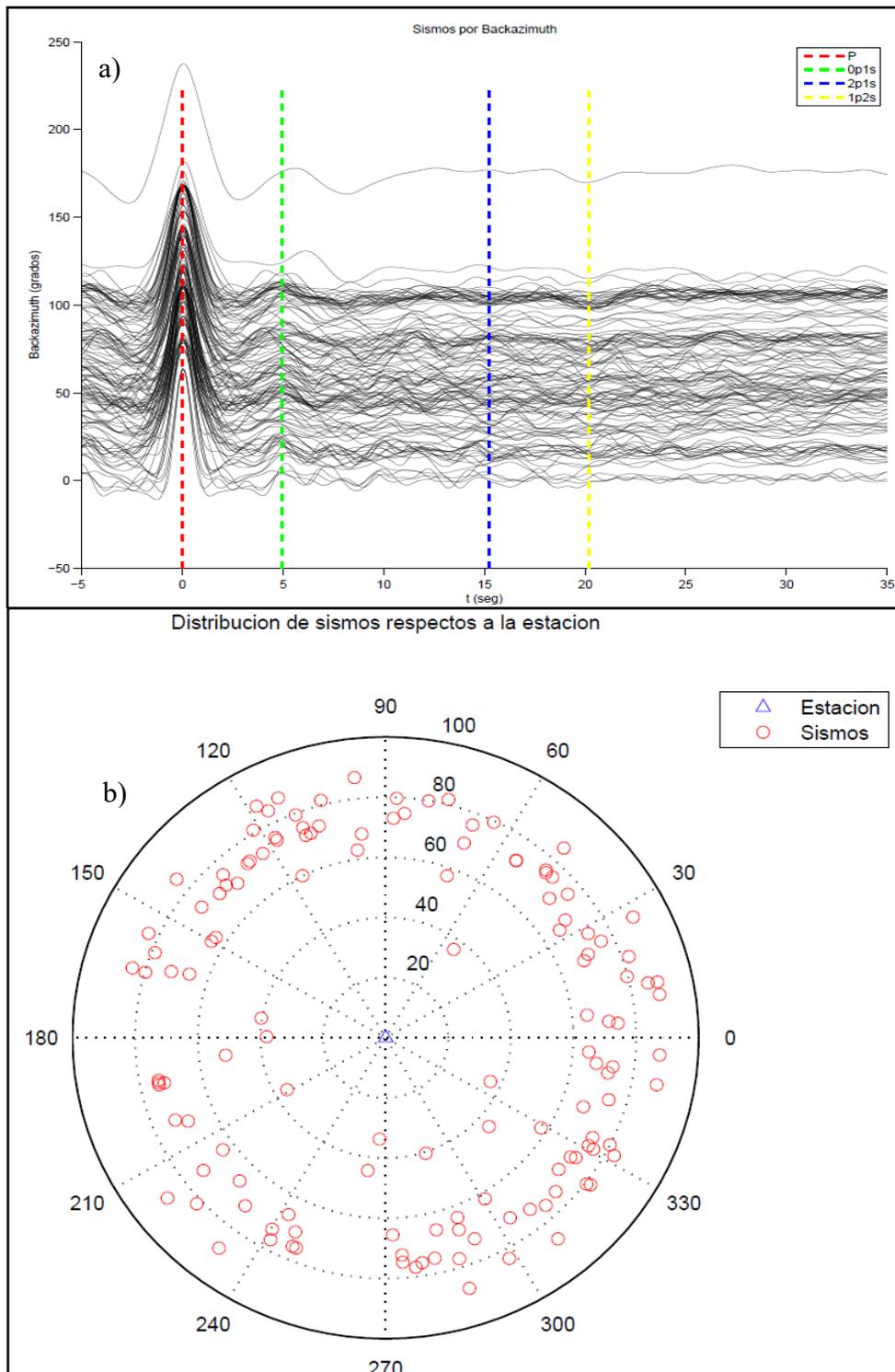


Figura 32. a) Funciones receptoras ordenadas por *backazimuth* se puede observar como todas tienen comportamientos similares, b) Distribución de sismos respecto a la estación, se muestra que los sismos provienen desde distintas direcciones.

Estación IU.BILL, Billibino, Rusia.

Se descargaron 391 eventos que cumplían con los requisitos preestablecidos, con magnitudes mayores a 6.5 y distancias epicentrales entre 30° y 90°. Estos fueron procesados para el cálculo de 391 funciones receptoras. De igual manera se realizó el apilado de todas las funciones receptoras para conocer la forma característica para el área donde se ubica la estación. se ejecutó el programa de nuevo y se seleccionaron solo las funciones receptoras que tenían la forma característica para un total de 133 sismos apilados, dando como resultado una función receptora donde se ve claramente la reverberación Pds de la onda P (figura 4.3.1). Al obtener la función receptora apilada de calidad, se realizó el análisis H-kappa y el modelado directo para el cálculo de la profundidad de la discontinuidad.

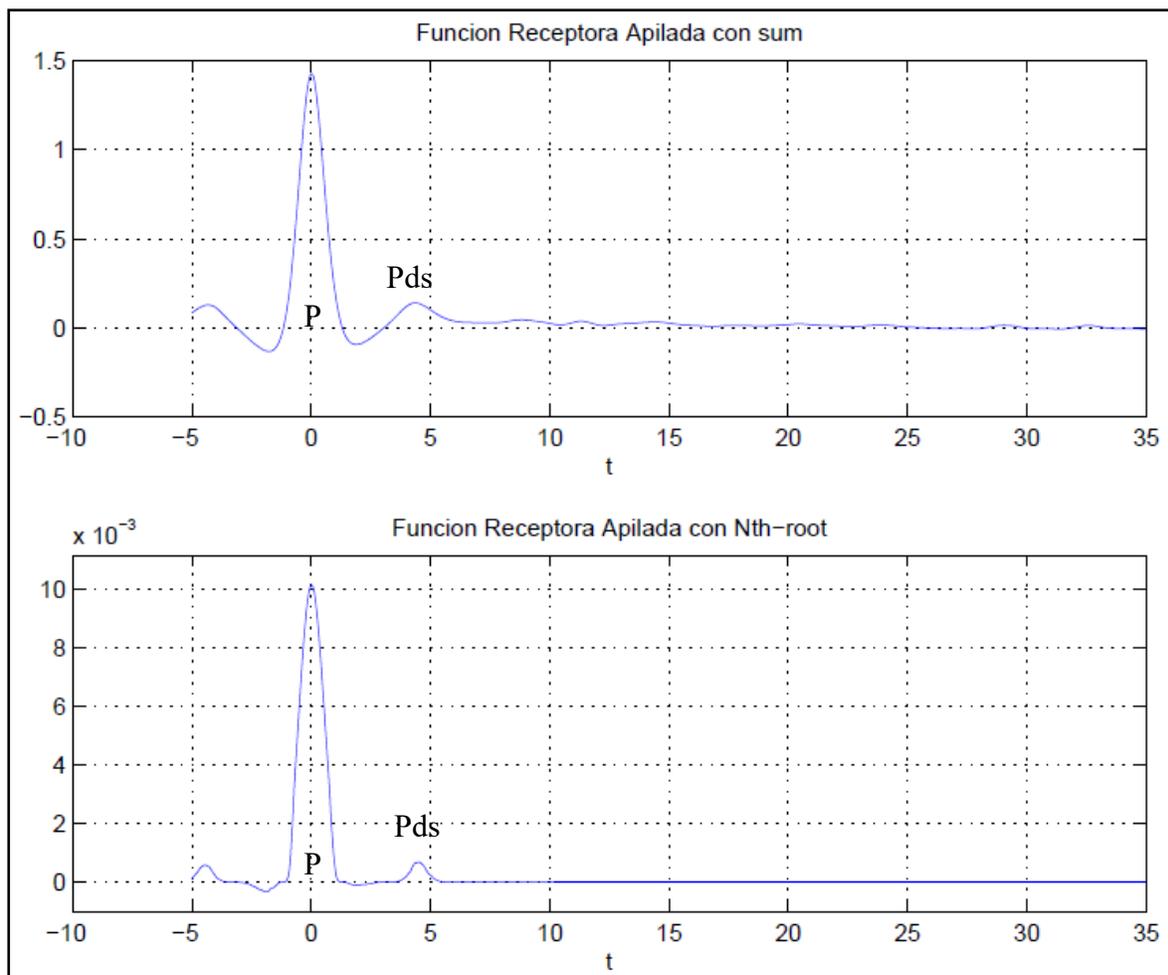


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..33**. Funciones receptoras apiladas por los métodos de suma simple y Nth-root.

En el análisis H-kappa se colocaron igualmente los parámetros usados por el *EARS* del *IRIS* con velocidad de onda P (V_p) de 6.577 km/s, valores para los pesos de $\omega_1=0.33333334$, $\omega_2=0.33333334$ y $\omega_3=0.33333328$, con los mismos límites de profundidad (H) de 20-60 km y de relación V_p/V_s (κ) de 1.6-2.1 como se observa en la figura 4.3.2. Los valores obtenidos con este amplio rango para κ fueron de 1.81 por *Nth-Root* y 1.78 por *sum*, para H fue de 34 por *Nth-Root* y 35 km por *sum*, como se puede ver en la figura 4.3.3 y figura 4.3.4, siendo valores que se encuentra en un rango de error alto, cuando los valores del *IRIS* son de 1.73 para κ y 36 km para H . Se volvió a realizar el análisis H-kappa y se modificaron los parámetros los límites para κ colocándolo desde 1.6-1.73, dando como resultado valores para κ de 1.73 para ambos métodos y para H de 36 km para ambos métodos, cercanos a los del *IRIS*, tal como se muestra en la figura 4.3.5 y figura 4.3.6.

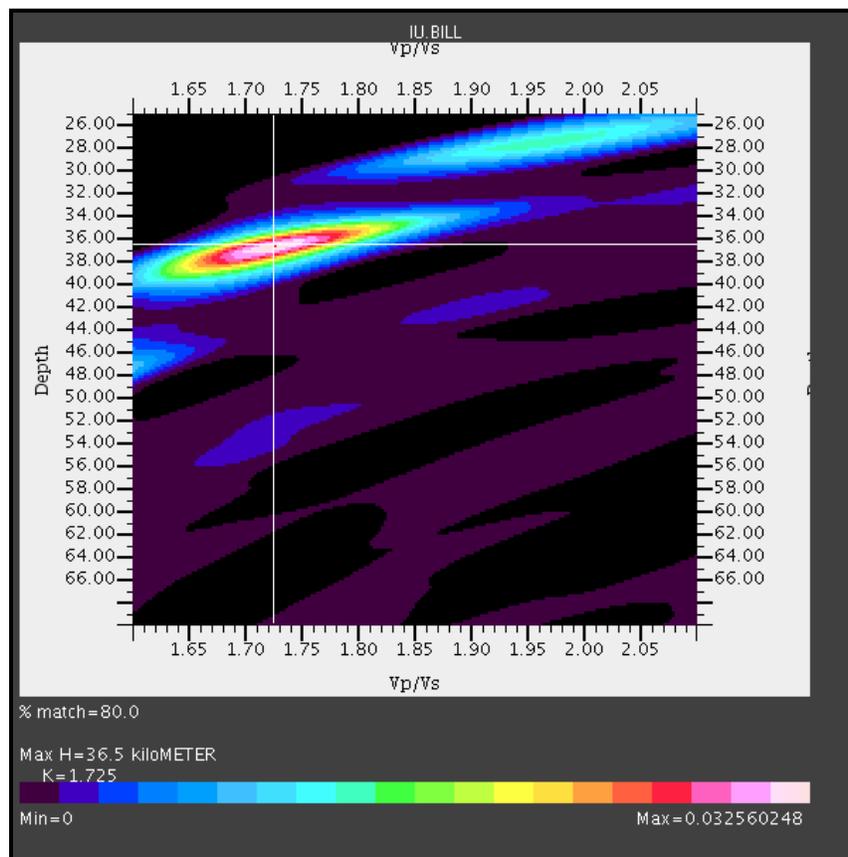


Figura 4.3.6. Análisis H-kappa calculado por el EARS del IRIS para la estación IU.BILL

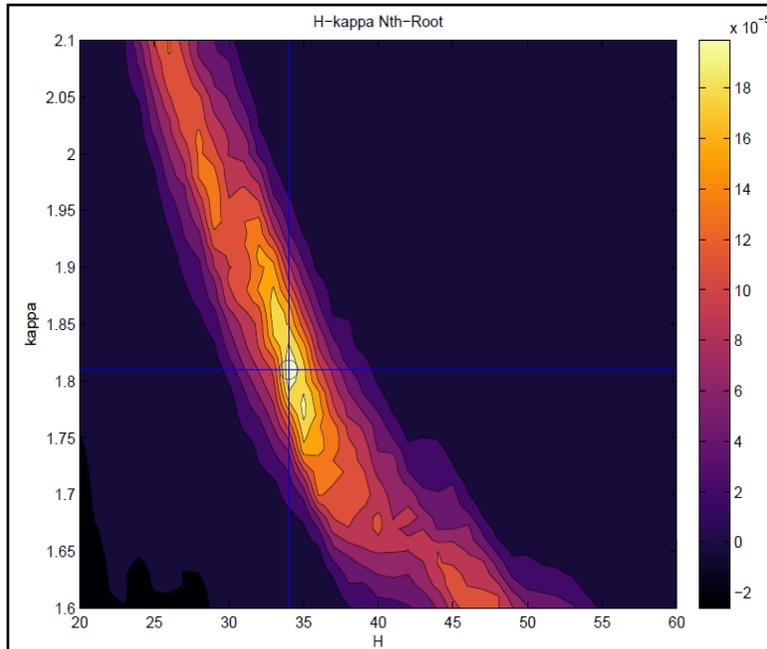


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..3.** Análisis H-kappa apilado por *Nth-Root*. Donde la máxima amplitud se encuentra para los valores de 1.81 de kappa y 34 km de H, valores que difieren a los calculados por el *EARS* del *IRIS*.

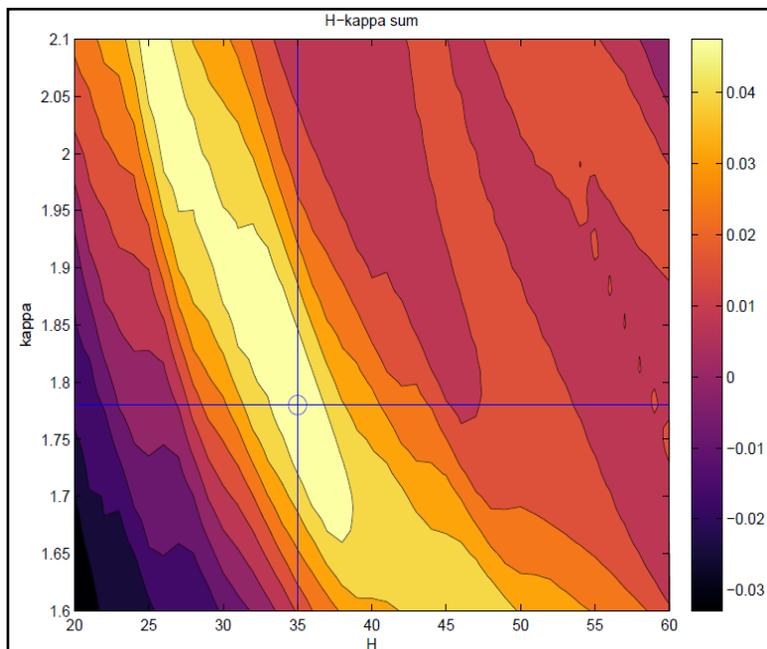


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..4.** Análisis H-kappa apilado por *sum*. La máxima amplitud se encuentra ubicado para los valores de 1.78 de kappa y 35 km de H, valores que difieren a los calculados por el *EARS* del *IRIS*.

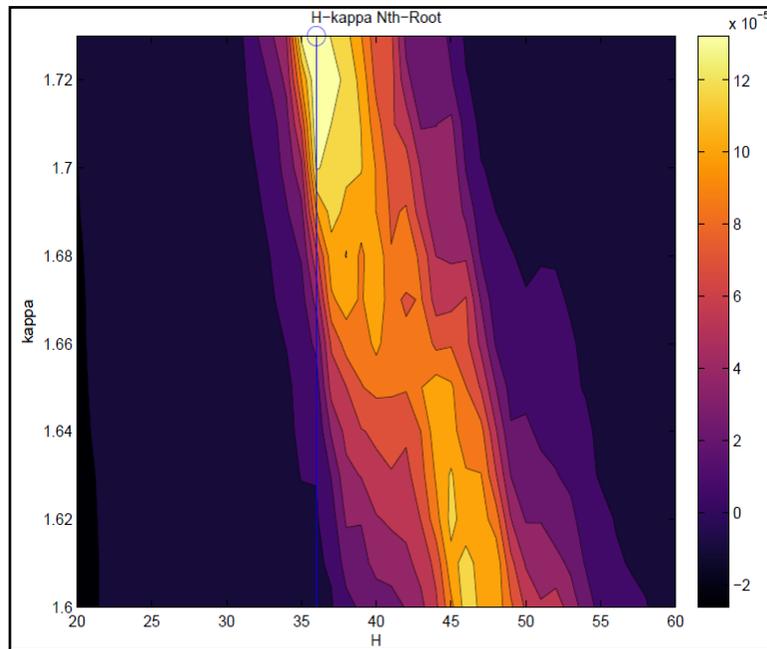


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..5.** Análisis H-kappa apilado por el método *Nth-Root*. La máxima amplitud se ubica para los valores de 1.73 de kappa y 36 km de H, valores que se encuentran cercanos a los calculados por el *EARS* del *IRIS*.

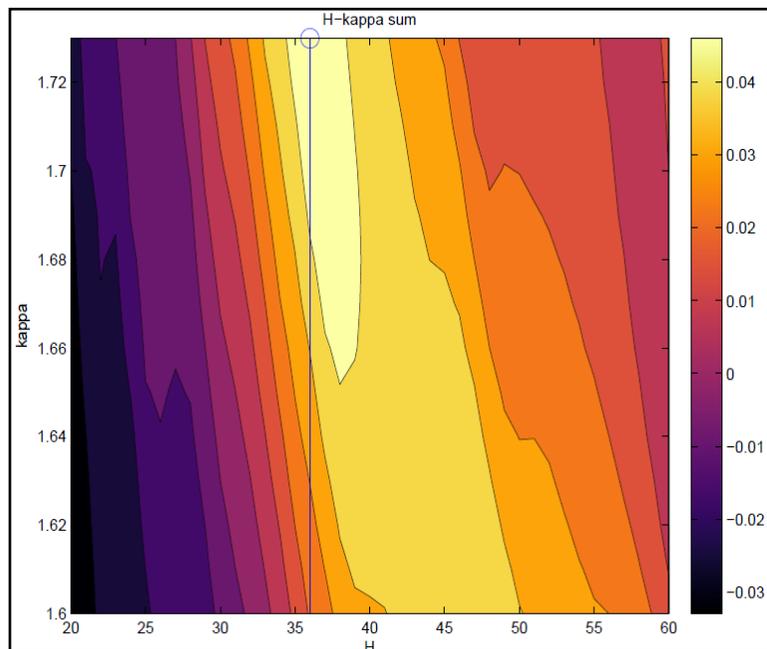


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..6.** Análisis H-kappa apilado por suma simple. La máxima amplitud está ubicada para los valores de 1.73 de kappa y 36 km de H, alores que son cercanos a los calculados por el *EARS* del *IRIS*.

En el modelado directo se seleccionó el pico Pds en la función receptora apilada, dando como resultado para la relación V_p/V_s de 1.73 una profundidad de 39.54 km. Para el cálculo de la función receptora teórica se utilizó un modelo de dos capas, donde a la primera capa se le asignó un espesor de 36 km correspondientes a la profundidad de la discontinuidad más cercana, para nuestro caso la profundidad de Mohorovic y una velocidad V_p de 6.577 km/s y para la segunda capa una velocidad de 8 km/s dando como resultado una función receptora muy parecida a las obtenidas al apilar, esto se ilustra en la figura 4.3.7.

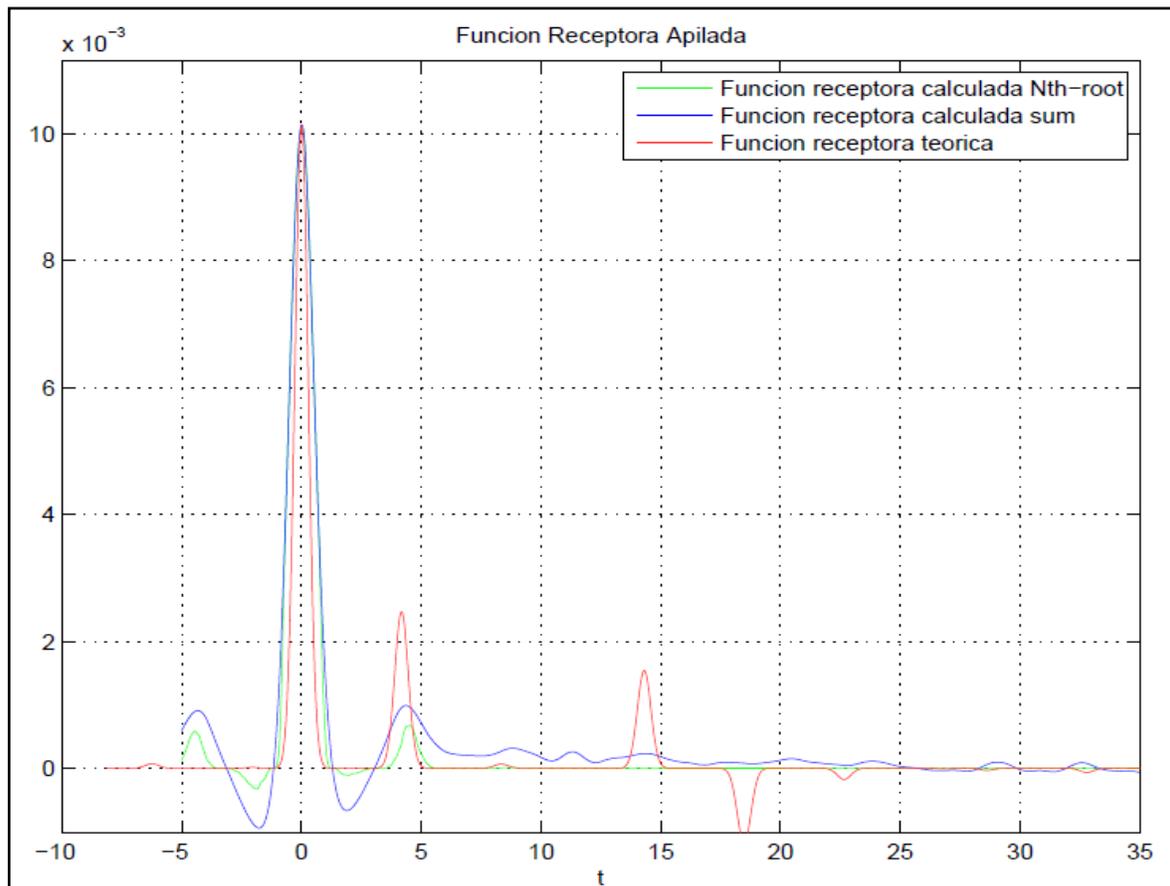


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..7**. Modelado directo, línea color roja función receptora teórica.

La distribución de sismos con respecto a la estación es uniforme, proviniendo desde distintas direcciones dando confiabilidad al cálculo de la función receptora hecha por el programa. Esto también puede verificarse al observar la distribución de funciones receptoras: todas muestran comportamiento semejante para distintos *backazimuths* (Figura 4.3.8).

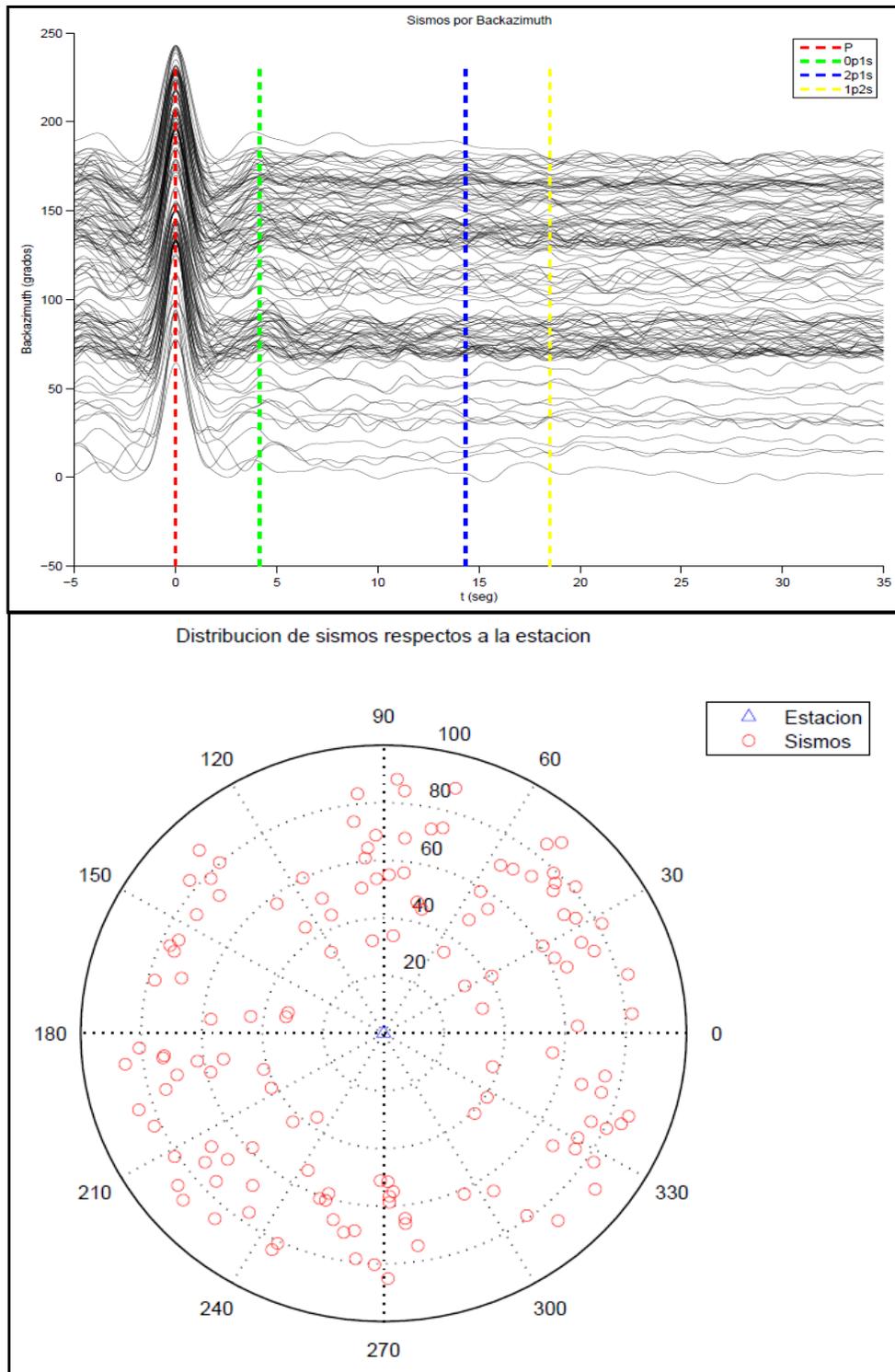


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..8. a) Funciones receptoras ordenadas por *backazimuth* se puede observar como todas tienen comportamientos similares, b) Distribución de sismos respecto a la estación, se muestra que los sismos provienen desde distintas direcciones.

Se observó como para todos los análisis H-kappa presentan una franja de máxima amplitud en color rojo, mostrando la relación inversa que existe entre ambos parámetros, donde si el valor de H aumenta, el valor de kappa disminuye, e igualmente se ilustra en las tablas 4.1 y 4.2.

Tabla 4.1. Parámetros *IRIS*.

		II.FFC	IU.KIEV	IU.BILL
Análisis H-kappa	kappa (sum)	1,76	1,94	1,78
	H (sum)	39	34	35
	kappa (NTH-Root)	1,96	1,97	1,81
	H (NTH-Root)	32	33	34

Tabla 4.2. con parámetros de kappa modificados.

		II.FFC	IU. KIEV	IU. BILL
Análisis H-kappa	kappa (sum)	1,73	1,87	1,73
	H (sum)	40	36	36
	kappa (NTH-Root)	1,71	1,87	1,73
	H (NTH-Root)	41	36	36
selección Pds	H (Kappa sum)	43,3	37,37	39,54
	H (kappa Nth- Root)	44,52	37,37	39,54
modelado directo	H	41	36	36

Para todas las estaciones cuando, se realizó el análisis H-kappa utilizando el intervalo de la relación V_p/V_s kappa de 1.6-2.1, los valores donde se ubicaba la máxima amplitud daban muy alejados con respecto a un rango de error de 1.5 km para H y 0.1 para kappa, en comparación con los calculados por el *IRIS*. Esto puede ser causado porque los sismos usados para realizar los cálculos de las funciones receptoras no son los mismos, otro factor importante es que el *EARS* calcula la deconvolución de manera iterativa mientras que en el programa *REKIEJRF.m* se realiza por el método de *waterlevel*.

En el cálculo de la profundidad por selección del pico Pds los valores de profundidad obtenidos son bastante lejanos a los calculados por los otros métodos, esto se debe a que no se toma en cuenta el parámetro de rayo, ni la lentitud en la fórmula utilizada para realizar el cálculo.

Para el modelado directo se pudo observar como para las tres estaciones, la función receptora teórica coincidía en las llegadas de las ondas P y sus reverberaciones respectivamente, verificándose que los parámetros calculados, son correctos, ya que para el cálculo de la función receptora teórica se usó la misma velocidad de onda P, el espesor H y la relación V_p/V_s k obtenidos por medio del análisis H-kappa.

Para todas las estaciones se tuvo una buena distribución de sismos que provenían de distintas direcciones dando solidez a los cálculos realizados.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Después del desarrollo de la herramienta computacional REKIEJRF y de utilizarlo para el cálculo de la profundidad a Moho en tres estaciones sismológicas, se concluye que:

- La metodología descrita por Ammon (1991) fue implementada en este trabajo de manera correcta permitiendo el cálculo de “n” funciones receptoras para “n” archivos sismológicos.
- El programa diseñado es de fácil uso, eficiente y permite el manejo de una gran cantidad de datos.
- La interfaz usuario-máquina es directa, sencilla de utilizar y permite el cambio de parámetros para mejorar las soluciones obtenidas sin realizar reprocesamiento de los datos, así como para exportar las imágenes generadas en formato PDF.
- Se incorporaron tres módulos para el cálculo de la profundidad:
 - Modelado directo, para el cálculo del espesor a partir de la función receptora teórica.
 - El análisis H- κ que permite conocer la relación “ V_p/V_s ” y el espesor.
 - Cálculo directo del espesor a partir de la selección del tiempo Pds de manera interactiva.
- En las pruebas de verificación se obtuvieron resultados acordes con los reportados por el *IRIS* con errores menores a 0.01 para κ y 1.5 km para H, lo que garantiza el funcionamiento del algoritmo desarrollado.

Se exponen las siguientes recomendaciones para futuras versiones del código:

- Realizar las 2 rotaciones faltantes de las funciones receptoras para mejorar la calidad del resultado obtenido por REKIEJRF.
- Mejorar el apilamiento para el análisis H-K utilizando la semblanza como lo demuestra Chen *et al.*, (2009), de tal manera de reducir el área donde se encuentra la máxima amplitud y facilitar su ubicación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ammon, C.J., Randall G.E., y G. Zandt (1990). "On the nonuniqueness of receiver function inversions", *Journal of Geophysical Research*, 95, 15303-15318.
- Ammon, C.J. (1991). "The isolation of receiver effects from teleseismic P waveforms", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 81 (6), 2504-2510.
- Ammon C.J. y Zandt G. (1993). "The receiver structure beneath the southern Mojave Block", *Bulletin of Seismical Society of America*, 83, 737-755.
- Ammon C.J. (1997). "Receiver function anaisis", publicado por penn state, *Earthquake Seismology*.<http://eqseis.geosc.psu.edu/~cammon/HTML/RftnDocs/rftn01.html>.
- Arnaiz, M., Schmitz, M., y Audemard, F. (2016). "La estructura cortical del arco de las Antillas Menores estimada a partir de la técnica de funciones receptoras", *Revista Mexicana de ciencias geológicas*, v. 33, núm. 3, 286-296
- Chen, Y., Niu, F., Liu, R., Huang, Z., Tkalcic, H., Sun, L., y Chan W. (2009). "Crustal structure beneath China from receiver function analysis", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 115, B03307, doi:10.1029/2009JB006386,
- Clayton, R.W., Wiggins, R.A., 1976, Source shape estimation and deconvolution of teleseismic body waves: *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, v. 47, 151–177.
- Ford, S., 2005, rsac.m [Software de computo] Recuperado de <http://web.utah.edu/thorne/software.html>
- Langston, C. (1979). "Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves", *Journal of Geophysical Research*, 84, 4749-4762.
- Mcfadden, P., Drummond B., y Kravis S. (1986). "The Nth-root stack: Theory, applications, and examples", *Geophysics*, v.51, num. 10, 1879-1892.
- Niu, F., Bravo T., Pavlis, G., Vernon, F., Rendón, H., Bezada, M., y Levander A. (2007). "Receiver function study of the crustal structure of the southeastern Caribbean

plate boundary and Venezuela”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, B11308, Doi: 10.1029/2006JB004802.

Owens T., Zandt G., y Taylor S. (1984). “Seismic evidence for an ancient rift beneath the Cumberland Plateau, Tennessee: A detailed analysis of broadband teleseismic P waveforms”, *Journal of Geophysical Research*, vol. 89, 7783-7795.

Quinteros, C. (2007). “Estudio del espesor de la corteza y caracterización de sus posibles discontinuidades en la región noroccidental de Venezuela, a partir del análisis de funciones receptoras” Trabajo Especial de Grado. Departamento de Geofísica. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Universidad Central, Caracas, Venezuela.

Quinteros, C., Piñero, L., Rendón, H., Schmitz, M., y F. Niu (2008). Estimación del espesor de corteza en el norocidente de Venezuela, a partir del análisis de funciones receptoras. XIV Congreso Venezolano de Geofísica, Caracas, 8 pp.

Quinteros, C., Rojas, K., Amaíz, R., Piñero, L., Schmitz, M., y H. Rendón (2009). Análisis de funciones receptoras para la estimación del espesor de corteza en Venezuela. IX Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica, Caracas, 12 pp.

Rondenay, S. (2009) “Upper Mantle Imaging with Array Recordings of Converted and Scattered Teleseismic Waves” *Surv Geophys*, 30, 377–405. DOI 10.1007/s10712-009-9071-5.

Stein, S., y M. Wysession (2003). *An introduction to seismology, earthquakes and earth structure*. UK: Blackwell publishing. Recuperado de <http://www.blackwellpublishing.com>.

Thorne, M., 2004, ch.m [Software de computo] Recuperado de <http://web.utah.edu/thorne/software.html>

Thorne, M., 2004, lh.m [Software de computo] Recuperado de <http://web.utah.edu/thorne/software.html>

Thorne, M., 2004, rsac.m [*Software de computo*] Recuperado de <http://web.utah.edu/thorne/software.html>.

Xueqing, Li y Xiaohui Yuan, (2003). "Receiver functions in northeast China implications for slab penetration into the lower mantle in northwest Pacific subduction zone", *Earth and Planetary Science Letters*. 216, 679-691.

Zhu L., Kanamori H., (2000). "Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions", *Journal of Geophysical Research*, v. 105, num. 82, 2969-2980.