TOMOGRAFÍA PRELIMINAR DE PUERTO RICO

Por:

DENNY MARIANA TORRES ORTIZ

Tesis sometida en cumplimiento parcial de los requerimientos para el grado de

MAESTRÍA EN CIENCIAS
EN
INGENIERÍA CIVIL

UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO
RECINTO UNIVERSITARIO DE MAYAGÜEZ
2013

Aprobado por:

_____	_____
Víctor A. Huérfano Moreno, PhD. Presidente, Comité graduado	Fecha
_____	_____
Beatriz I. Camacho Padrón, PhD. Miembro, Comité graduado	Fecha
_____	_____
Luis E. Suárez Colche, PhD. Miembro, Comité graduado	Fecha
_____	_____
Ismael Pagán Trinidad, M.S.C.E. Director de Departamento.	Fecha
_____	_____
Pedro Vásquez Urbano, PhD. Representante de Estudios Graduados	Fecha

ABSTRACT

Seismic Tomography has been used by researchers to obtain information about the internal structure of the Earth at different depths. This method is applied to identify and visualize the seismic wave velocity propagation through the Earth interior. In this research we use seismic wave data recorded in the stations operated by the Puerto Rico Seismic Network (PRSN) from local sources.

PRSN locates seismic events using specialized systems like Earlybird (EB), EarthWorm (EW), and the Puerto Rico Data Analysis and Information System (PRDANIS) software. Arrival times of all seismic waves are recorded with these systems, but final location of the seismic event can only be obtained by using the P, S, and Coda phases in the PRDANIS software which uses a five horizontal layers velocity model in 1D. The 1D velocity model was used initially, along with the arrival times to the seismic stations and the location errors ($T_{obs} - T_{cal}$) to develop the 3D velocity model.

The secondary phases of the primary wave (P) were identified with its theoretical and observed travel times using wave reflections on upper earth layers using the Puerto Rico velocity model in 1D. In order to obtain the 3D velocity model, the Fast Marching Tomography Software (FMTOMO) was used.

In this thesis the tomography results for Puerto Rico were based on an estimation of the primary seismic wave's velocities traveling in the upper layers of the Earth at depths less

than 40 km. As a result, a better understanding of the upper crust geology structure and related velocity anomalies beneath Puerto Rico and Virgin Island (US and British) was obtained.

RESUMEN

La tomografía sísmica actualmente está siendo utilizada por investigadores, dado que sus resultados ayudan a obtener información de las propiedades de la estructura interna de la Tierra a diferentes profundidades. este método es aplicado para identificar y visualizar las velocidades de las ondas sísmicas a través de la Tierra usando datos de ondas de fuentes locales registrados por la Red Sísmica de Puerto Rico (RSPR).

La RSPR obtiene la localización revisada de los eventos sísmicos mediante sistemas especializados como Earlybird (EB), EarthWorm (EW) y el programa de Análisis de Datos y Sistemas de Información de Puerto Rico (PRDANIS). Los tiempos de arribo de todas las ondas sísmicas se registran en estos sistemas pero la localización final del evento sísmico solo se puede obtener usando las fases P, S, y coda en el programa PRDANIS, el cual utiliza un modelo de velocidad de cinco capas horizontales en 1D. El modelo de velocidad es usado junto con los tiempos de llegada a las estaciones sísmicas y los errores de localización (T_{obs}-T_{cal}) para desarrollar el modelo de velocidad en 3D.

Inicialmente se utiliza este modelo y los primeros tiempos de llegada a las estaciones, así como el error obtenido en la localización para desarrollar el modelo de velocidad en 3D.

Se identificaron las fases secundarias de la onda primaria (P), con sus tiempos de viaje teóricos y observados utilizando las reflexiones en distintas capas superiores de la

Tierra acorde al modelo de velocidad en 1D de Puerto Rico. Para obtener el modelo de velocidad en 3D, se utilizó el programa de Tomografía de Marcha Rápida (conocido por sus siglas en inglés como FMTOMO).

En esta tesis, la tomografía realizada para Puerto Rico fue generada utilizando un estimado de las velocidades de las ondas sísmicas primarias que viajan en la capa superior de la Tierra a profundidades no mayores de 40 km. Como resultado, obtuvimos un mayor conocimiento de la estructura geológica de la corteza, y las anomalías de velocidad relacionadas bajo Puerto Rico e Islas Vírgenes (Británicas y Norteamericanas).

Dedicada a:

A Dios quien me dio fortaleza,

A mi mamá Esperanza, y mis hermanos Andrea y Jesús quienes estuvieron presentes de corazón brindándome todo el apoyo,

A mi papá Euclides que desde el cielo estoy segura estuvo presente,

A mi tía la madre Marianita que con sus oraciones me ayudo a continuar,

Y a mi novio Carlos quien me brindo su incondicional apoyo y consejos.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar le agradezco a Dios por darme esta gran oportunidad, a mi mamá y hermanos que me dieron su incondicional amor y soporte, por guiarme a través de toda mi vida y hacer de mi lo que soy hoy como persona tanto en lo personal como profesional.

Un especial agradecimiento por el apoyo económico a la Red Sísmico de Puerto Rico, por permitirme usar sus facilidades y por los valiosos consejos dados por el personal de Análisis y las demás áreas. En especial a Harold, Benjamín, Lilian, Javier, María, José F., Carolina, Ángel, Gisela, Arlenys, Cristina, Daniel, Fátima, Marianela, y Félix.

Un agradecimiento especial al Dr. Víctor Huérfano quien me brindó la oportunidad de realizar este proyecto, me aconsejo, guio y ayudo en todo el proceso, a él le agradezco por ser mi consejero.

Al departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura quién me brindo los conocimientos necesarios en los cursos para poder culminar este grado. En especial a la Dra. Beatriz Camacho por todos sus consejos a lo largo de la maestría, igualmente al Doctor Luis Suárez. Le agradezco a Puerto Rico por brindarme la oportunidad de pertenecer al Recinto de Mayagüez como estudiante.

A mis amigos con quienes compartí durante el proceso de formación, quienes estuvieron pendientes del desarrollo de mi tesis, amigos de Perú, Guatemala, Colombia, México y Puerto Rico que con su apoyo, consejos y comprensión hicieron el camino más

agradable. Especialmente a Carlos Calero quién me dio su apoyo incondicional. A mis amigos César, Ruth, Fernando, Esmeralda, José Roberto, Katia, Davis, María, Ulises, Elluz, Paty, Ana, Angie, Luis, Mauricio, Omar y Víctor.

Finalmente un agradecimiento muy especial al Ingeniero Iván Perdomo quien fue uno de los que me apoyo y quien me ayudo a lograr esta meta, sin él esto no habría sido posible. Ingeniero gracias por hacer esto realidad.

Tabla de Contenido

ABSTRACT ..... **II**

RESUMEN ..... **IV**

AGRADECIMIENTOS ..... **VII**

1. INTRODUCCIÓN **1**

1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 5

1.2 OBJETIVOS 10

1.2.1 Objetivo general *10*

1.2.2 Objetivos específicos *10*

1.3 ALCANCE DEL TRABAJO 10

1.4 BENEFICIOS ESPERADOS 11

1.5 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS 12

2. REVISIÓN DE LITERATURA **13**

2.1 INTRODUCCIÓN 13

2.2 TECTÓNICA LOCAL PARA PUERTO RICO 14

2.3 ONDAS SÍSMICAS 16

2.3.1 Tipos de ondas *16*

2.3.2 Fases de ondas *18*

2.4 REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN 21

2.4.1 Teoría de rayos *22*

2.5 MÉTODO DE LOCALIZACIÓN 25

2.6 ESTUDIO DE ERRORES GENERADOS EN LA LOCALIZACIÓN 30

2.7 ECUACIÓN EIKONAL 31

2.8 DERIVADAS DE FRÉCHET 32

2.9 TOMOGRAFÍA 33

2.9.1 Métodos Símicos 37

2.9.2 Problema Inverso 43

2.10 MODELO DE VELOCIDAD 1D 44

2.10.1 Puerto Rico y regiones adyacentes. 44

2.10.2 Modelo de velocidad de la corteza de la Tierra en 1D 44

2.10.3 Modelo de velocidad en 1D Ak135 45

3. PROGRAMA FMTOMO 47

3.1 GENERALIDADES 47

3.2 PARAMETRIZACIÓN DEL MODELO 50

3.3 SUBRUTINAS DE FMTOMO 50

3.4 SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DIRECTO 52

3.5 SOLUCIÓN DEL PROBLEMA INVERSO 52

3.6 TOMOGRAFÍA 53

4. METODOLOGÍA 55

4.1 SELECCIÓN DE DATOS 59

4.2 AJUSTE DEL MODELO DE VELOCIDAD EN 1D 60

4.3 TIEMPOS TEÓRICOS 63

4.4 ALINEAMIENTO DE ESTACIONES 64

4.5 TIEMPOS OBSERVADOS 65

5. SELECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS 68

5.1 SELECCIÓN DE DATOS 68

5.2 DETERMINACIÓN DE TIEMPOS DE TRANSITO TEÓRICOS 68

5.3 IDENTIFICACIÓN DE TIEMPOS DE LLEGADA OBSERVADOS 70

5.4 DATOS DE ENTRADA 71

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS 74

6.1 REGIÓN 1- REGIÓN NOR-OESTE DE PUERTO RICO 74

6.2 REGIÓN 2- REGIÓN SUR-OESTE DE PUERTO RICO 76

6.3 REGIÓN 3- REGIÓN NORTE DE PUERTO RICO 79

6.4 REGIÓN 4- REGIÓN SUR DE PUERTO RICO 81

6.5 REGIÓN 5- REGIÓN NOR-ESTE DE PUERTO RICO 84

6.6 REGIÓN 6- REGIÓN SUR-ESTE DE PUERTO RICO 86

6.7 REGIÓN 7- ISLAS VÍRGENES (BRITÁNICAS Y NORTEAMERICANAS) 89

6.8 IMAGEN TOMOGRÁFICA DE LAS 7 REGIONES COMBINADAS 92

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 98

7.1 RESUMEN 98

7.2 CONCLUSIONES 98

7.3 RECOMENDACIONES 100

8. REFERENCIAS 102

9. APÉNDICE A 106

9.1 DATOS ANALIZADOS PARA LA REGIÓN DE PUERTO RICO E ISLAS VÍRGENES (BRITÁNICAS Y NOTEAMERICANAS). 106

9.2 FASES PICADAS PARA LOS EVENTOS POR REGIÓN 108

10. APÉNDICE B 124

10.1 PROGRAMAS REALIZADOS EN FORTRAN 90: 124

Lista de Tablas

Tabla **Página**

Tabla 1. Eventos sísmicos seleccionados para la Región 7. ..... *68*

Tabla 2. Características del evento. *69*

Tabla 3. Tiempos de tránsito de la onda P en el modelo (salida del programa Terrasa). *69*

Tabla 4. Tiempos de tránsito de la onda P corregidos. *69*

Tabla 5. Picados de onda P primer arribo para evento en la región 7. ..... *73*

Tabla 6. Resultados obtenidos región 1. ..... *76*

Tabla 7. Resultados obtenidos región 2. ..... *78*

Tabla 8. Resultados obtenidos región 3 ..... *81*

Tabla 9. Resultados obtenidos región 4 ..... *83*

Tabla 10. Resultados obtenidos región 5. ..... *86*

Tabla 11. Resultados obtenidos región 6. ..... *89*

Tabla 12. Resultados obtenidos región 7. ..... *91*

Tabla 13. Resultados obtenidos para Puerto Rico. *95*

Lista de Figuras

Figura **Página**

Figura 1. Ubicación geográfica de la placa del Caribe (página electrónica: Map of Central America and the Caribbean Plate, 2013) 2

Figura 2. Sismos bajo Puerto Rico en el año 2012, (página electrónica de la RSPR, 2013). 3

Figura 3. Velocidades de las ondas de cuerpo e interfaces principales de la estructura interna de la Tierra (modificado de IRIS EMC, 2013; y United States Geological Survey, 2013). 5

Figura 4. Modelo de velocidad 1D de la onda P para Puerto Rico, (modificado de Huérfano, 1994). 7

Figura 5. Localización sísmica de un evento al Oeste de Puerto Rico, se observa errores significativos (*) en las estaciones sísmicas. 8

Figura 6. Mapa de Puerto Rico con las estaciones locales operadas por la Red Sísmica Puerto Rico (página electrónica de RSPR, 2013). 14

Figura 7. Zonas de sismicidad para Puerto Rico (2013). 15

Figura 8. Ondas de cuerpo primarias (modificado de Bormann et al., 2012). 17

Figura 9. Ondas de cuerpo secundarias, (modificado de Bormann et al., 2012). 18

Figura 10. Trayectoria de rayos sísmicos "P" que se propagan por la corteza terrestre (modificado de Subiza, 1986). 19

Figura 11. Estructura interna de la Tierra, (modificado de United States Geological Survey, 2013). 20

Figura 12. Distintas fases de onda a través de la Tierra (modificado de Subiza, 1986). 21

Figura 13. Demostración de la Ley de Snell. 23

Figura 14. Ley de Snell, (modificado de Morrison et al., 2004). 24

Figura 15. Ángulo crítico, (modificado de Morrison et al., 2004). 25

Figura 16. Localización de un evento sísmico, diferencia entre P, S y coda (salida del programa. PRDANIS, 2013) 27

Figura 17. Localización final de sismo local en la región de Puerto Rico (salida del programa PRDANIS, 2013). 27

Figura 18. Errores de la onda P por estación, para el modelo de velocidad en 1D de Puerto Rico (Lin and Huérfano, 2011).....31

Figura 19. Tiempos teóricos vs tiempos observados para un evento sísmico (salida del programa Gnuplot, 2013).....36

Figura 20. Método de tomografía. 36

Figura 21. Métodos sísmicos, propagación del frente de onda, (modificado de Rawlinson and Sambridge, 2003). 38

Figura 22. Propagación de frente de onda (modificado de Rawlinson and Sambridge, 2004).....39

Figura 23. Banda reducida que forma la interfaz, (modificado de Rawlinson and Sambridge, 2003). 40

Figura 24. Velocidad de onda P para la región del caribe (Bassin et al, 2000).....45

Figura 25. Modelo de velocidad ak135 de la estructura de la Tierra en 1D, (modificado Kennet et al., 1995)....46

Figura 26. Resumen de ejecución de rutinas en FMTOMO para obtener el modelo de velocidad. 48

Figura 27. Parametrización del modelo en 3D.....49

Figura 28. Representación de nodos de velocidad y de interface para varias capas, (modificado de Rawlinson, 2007a).....50

Figura 29. Configuración de trayectorias para el modelo según FMTOMO, (modificado Rawlinson, 2007a).....51

Figura 30. Resultados de tomografía para Tasmania, a la izquierda una vista en planta de las anomalías de velocidad, y a la derecha vista en planta de las variaciones en profundidad (Rawlinson and Urvoy, 2006).....54

Figura 31. Evento sísmico 2013-01-21 para la estación de HUMP Humacao, (salida de programa PRDANIS, 2013).....56

Figura 32. Localización de eventos (salida del programa PRDANIS, 2011). 57

Figura 33. Arribos en una estación (salida del programa Terrasa, 2013).....57

Figura 34. Metodología de investigación. 59

Figura 35. División de Puerto Rico entre 7 regiones. 60

Figura 36. Modelo de velocidad en 1D (salida del programa Terrasa, 2013).....61

Figura 37. Velocidades del modelo de velocidad de 1D, ajustado con ak135 (salida del programa Terrasa, 2013).....62

Figura 38. Reflexiones para una fuente y un receptor (salida del programa Terrasa, 2013). 63

Figura 39. Tiempos de viaje de la onda P para la capa 3 (salida del programa Terrasa, 2013) 64

Figura 40. Alineación de eventos sísmicos, evento de 16 de noviembre de 2006 (salida del programa Gnuplot, 2013).....65

Figura 41. Reflexiones en cada capa a través de la estructura de la Tierra (modificado de Rawlinson, 2007a). .66

Figura 42. Mapa de eventos y estaciones incluidas en el estudio de tomografía para Puerto Rico e Islas Vírgenes (Británicas y Norteamericanas). 67

Figura 43. Tiempos teóricos y observados en un evento con cuatro estaciones (salida del programa Gnuplot, 2013).....70

Figura 44. Red de nodos en 3D, 7 interfaces para 6 capas. 72

Figura 45. Número de interfaces, trayectorias y capas utilizadas. 72

Figura 46. Vista en planta para Región 1: (a) presenta anomalías de velocidad a 5km de profundidad, (b).variaciones en profundidad.....74

Figura 47. Corte longitudinal para la Región 1, Este-Oeste (EW) en la latitud 18.3. 75

Figura 48. Corte longitudinal para la Región 1, Norte-Sur (NS).....75

Figura 49. Vista en planta para la Región 2: (a) presenta anomalías de velocidad a 5km de profundidad, (b).variaciones en profundidad.....77

Figura 50. Corte longitudinal para la Región 2, Este-Oeste (EW) en la latitud 18.3 77

Figura 51. Corte longitudinal para la Región 2, Norte-Sur (NS). *78*

Figura 52. Vista en planta para la Región 3: (a) presenta anomalías de velocidad a 5km de profundidad, (b) variaciones en profundidad. *79*

Figura 53. Corte longitudinal para la Región 3, Este-Oeste (EW) en la latitud 18.3. ..... *80*

Figura 54. Corte longitudinal para la Región 3, Norte-Sur (NS). *80*

Figura 55. Vista en planta para la Región 4: (a) presenta anomalías de velocidad a 5km de profundidad, (b) variaciones en profundidad *82*

Figura 56. Corte longitudinal para la Región 4, Este-Oeste (EW) en la latitud 18.3. ..... *82*

Figura 57. Corte longitudinal para la Región 4, Norte-Sur (NS). *83*

Figura 58. Vista en planta para la Región 5 (a) presenta anomalías de velocidad a 5km de profundidad, (b) variaciones en profundidad. *84*

Figura 59. Corte longitudinal para la Región 5, Este-Oeste (EW) en la latitud 18.20° *85*

Figura 60. Corte longitudinal para la Región 5, Norte-Sur (NS) longitud -66.0° (294°). *85*

Figura 61. Vista en planta para la Región 6 (a) presenta anomalías de velocidad a 5km de profundidad, (b) variaciones en profundidad *87*

Figura 62. Corte longitudinal para la Región 6, Este-Oeste (EW) en la latitud 18.10° *88*

Figura 63. Corte longitudinal para la Región 6, Norte-sur (NS) longitud -65.9° (294.10°) *88*

Figura 64. Vista en planta para la Región 7 (a) presenta anomalías de velocidad a 5km de profundidad, (b) variaciones en profundidad *90*

Figura 65. Corte longitudinal para la Región 7, Este-Oeste (EW) en la latitud 17.8° *90*

Figura 66. Corte longitudinal para la Región 7, Norte-Sur (NS) en la longitud -64.8° (295.20°). *91*

Figura 67. Vista en planta presenta anomalías de velocidad para la Región combinada. a). 2.6km, b) 8.0 km, c) 14km, d) 20 km, e) 35 km, f) 75km de profundidad que corresponde a cada capa del modelo. *93*

Figura 68. Vista en planta con las variaciones en profundidad para la primera interfaz. *94*

Figura 69. Corte longitudinal de Este-Oeste (EW) en la latitud 17.8°. *94*

Figura 70. Corte longitudinal Norte-Sur (NS) en la longitud -64.8° (295.20°). *95*

Figura 71. Criterio para finalizar el proceso de iteraciones: (a) Varianza, (b) RMS. *96*

Figura 72. Determinación del Moho bajo Puerto Rico e Islas Vírgenes, la línea marcada representa el rango de velocidades asociadas al Moho entre (7.6-8.0) km/seg. *97*

1. INTRODUCCIÓN

El presente documento tiene como finalidad dar a conocer un estudio preliminar de un modelo de velocidad tridimensional, y una imagen tomográfica de la estructura interna de la Tierra bajo Puerto Rico, utilizando la base de datos de la Red Sísmica de Puerto Rico (RSPR).

La RSPR pertenece al departamento de Geología del Recinto Universitario de Mayagüez de la Universidad de Puerto Rico (UPRM). La función principal de la RSPR es detectar, procesar, informar e investigar la actividad sísmica y de Tsunamis de la Región de Puerto Rico e Islas Vírgenes, Británicas y Norteamericanas (Área de responsabilidad para Puerto Rico). Gracias al avance tecnológico se han podido desarrollar varios programas para obtener en tiempo casi real de la localización (latitud, longitud, profundidad) y magnitud de los eventos sísmicos, este proceso se realiza por medio del programa de localización y análisis de datos conocido como: Análisis de Datos e Información de Puerto Rico ("Puerto Rico Data Análisis and Información System,", PRDANIS por sus siglas en inglés) desarrollado por Huérfano (2004), y programas de localización automática como: Earlybird (EB) y Earthworm (EW), donde se procesan todas las formas de ondas que se registran en las 25 estaciones sísmicas locales y 95 estaciones regionales.

Puerto Rico se localiza al Nor-Este de la placa del Caribe (PC), la PC se encuentra en constante movimiento con respecto a las placas que la rodean: (1) Cocos, (2) Caribe y (3) Suramérica como se observa en la Figura 1. La placa del Caribe presenta al Norte un movimiento lateral donde predomina una falla geológica con movimiento horizontal hacia la

izquierda “strike slip”, y en la parte Sur un movimiento lateral hacia la derecha. Debido a la tectónica y fallas geológicas, se puede decir que Puerto Rico es una zona de alta actividad sísmica dado que la mayor parte de los sismos ocurren a lo largo de los contactos entre las placas y fallas geológicas. Se ha realizado estudios para determinar el movimiento relativo entre la placa del Caribe y las placas Norte y Sur América donde se observa una zona de subducción (Brink, 2003; Asencio, 1980).

Figura 1. Ubicación geográfica de la placa del Caribe (página electrónica: Map of Central America and the Caribbean Plate, 2013)

Estudios recientes indican que Puerto Rico y las Islas Vírgenes se encuentran en una microplaca, la cual está limitada al Nor-Este por la trinchera de Puerto Rico, al Este por la zona de extensión en el pasaje de la Anegada, al Oeste por el pasaje de la Mona y al Sur por la depresión de Muertos.

Puerto Rico se encuentra localizado en una zona sísmicamente activa. En la Figura 2 se presenta la sismicidad en Puerto Rico e Islas Vírgenes (Británicas y Norteamericanas) para el año 2012 donde se observa actividad sísmica en toda la región (Latitud: 17 a 20 y Longitud: -63.5 a -69). Existe un gran número de eventos sísmicos ocurridos debido a la gran cantidad de fallas sísmicas existentes en esta microplaca, ya que los sismos se producen entre los contactos en las placas, o en las fallas existentes.

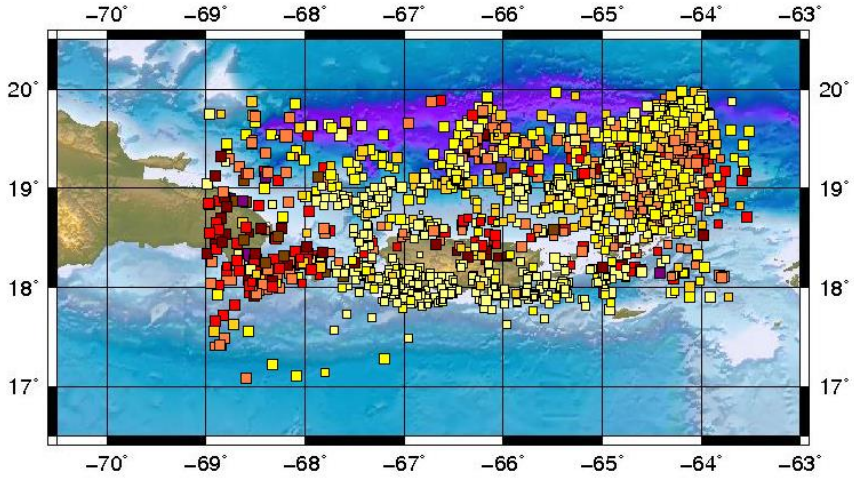


Figura 2. Sismos bajo Puerto Rico en el año 2012, (página electrónica de la RSPR, 2013).

Conociendo la alta actividad sísmica en la región de Puerto Rico, la complejidad de las fallas geológicas, y la estructura cortical, se desea obtener un modelo de tomografía para Puerto Rico e Islas Vírgenes. Este modelo de tomografía da las velocidades en 2D y 3D en cada capa y se obtiene a partir de un modelo de velocidad en una dimensión (1D) conocido, los tiempos de arribos, las coordenadas y profundidades de los eventos sísmicos (emisores) y estaciones sísmicas (receptores).

La tomografía sísmica permite determinar la presencia de varias formaciones geológicas, o anomalías tanto en la trayectoria como en la velocidad de propagación de las ondas símicas. Se logra conocer en mayor detalle las capas internas de la Tierra las cuales no es posible determinarlas con mediciones directas por sus profundidades. Por tal razón, muchos investigadores utilizan esta técnica cuando estudian terremotos para determinar la localización del hipocentro de la fuente, las anomalías en velocidades y geometría así como la composición de la estructura de la Tierra (Rawlinson and Sambridge, 2003; Rawlinson and Sambridge, 2004; Rawlinson and Sambridge, 2005; Rawlinson and Urvoy, 2006; Kool et al., 2006; Rawlinson y et al., 2008).

Este proceso se ha desarrollado mediante un programa escrito en Fortran el cual trabaja con el sistema operativo Linux e implementa el método del caminante ("Fast Marching Method, FMM conocido por sus siglas en ingles), este programa se conoce como Tomografía de Marcha Rápida ("Fast Marching Tomography", FMTOMO por sus siglas en inglés) (Rawlinson, 2007b). En esta investigación, el programa FMTOMO será aplicado a un selecto grupo de eventos detectados y localizados por la RSPR para obtener el modelo de velocidad en 3D.

Conociendo el modelo de velocidad, se podrá redefinir el catálogo de eventos sísmicos, la estructura interna y se podrá realizar relocalizaciones de los eventos sísmicos obteniendo mayor exactitud y precisión en la localización de los sismos, especialmente tendrá una explicación de las anomalías de velocidad que se obtendrá en Puerto Rico y sus alrededores.

1.1 Problema de investigación

El estudio de la estructura interna de la Tierra a dado paso a muchas investigaciones con el fin de conocer mediante el análisis de datos sísmicos la estructura interna de la Tierra a distintas profundidades. El sismólogo Mohorovicic en 1909 obtuvo el primer modelo de la estructura interna de la Tierra a partir de datos sísmicos donde determina la discontinuidad del Moho (Setein and Wysession, 2003). El Moho representa la división entre la corteza y el manto terrestre y típicamente se encuentra a una profundidad de 35 km aproximadamente (Setein and Wysession, 2003). Dicha discontinuidad genera un cambio en la velocidad de las ondas sísmicas como producto de un cambio drástico en la densidad de los materiales. La discontinuidad de Mohorovicic o Moho se observa en la Figura 3 (Stein and Wysession, 2003).

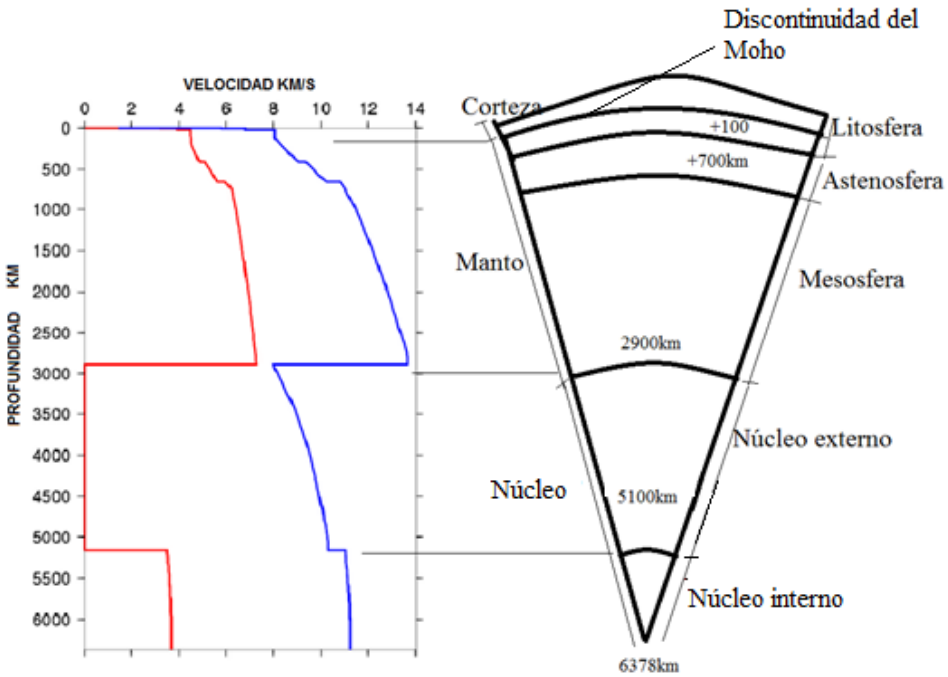


Figura 3. Velocidades de las ondas de cuerpo e interfaces principales de la estructura interna de la Tierra (modificado de IRIS EMC, 2013; y United States Geological Survey, 2013).

A partir de dicho descubrimiento se ha propuesto diversos métodos para obtener los modelos de velocidades en el interior de la Tierra en 1D, 2D y 3D. Existen distintos programas que ayudan a generar los modelos de tomografía de la estructura interna de la Tierra utilizando los registros en los sismogramas de eventos locales, regionales, y tele-sísmicos empleando tiempos de tránsito, amplitudes, y espectros de formas de onda. En Puerto Rico se han desarrollado estudios de velocidad por Mendoza y McCann (2006), y Lin y Huérfano (2011).

La tomografía sísmica da a conocer las distintas velocidades y sus anomalías en el interior de la Tierra con ayuda de datos obtenidos de los eventos sísmicos (fuentes) y las estaciones (receptores) de un área específica. Esto es posible si se parte de un modelo de velocidad unidimensional ya conocido, como el modelo de velocidad ak135 desarrollado por Kennett et al. en 1995, este es un modelo general de velocidad del interior de la Tierra, o partiendo de un modelo de velocidad en 1D desarrollado previamente para la región utilizando los tiempos de llegada reales de los eventos sísmicos a cada estación como en el caso de Puerto Rico.

Para el desarrollo del modelo de velocidad en 3D para Puerto Rico, se trabajó con el modelo inicial de velocidad en 1D desarrollado por Huérfano en 1994, este modelo de velocidades se utiliza actualmente para obtener las localizaciones finales de los eventos sísmicos en Puerto Rico e Islas Vírgenes los cuales se encuentran en el catálogo de la RSPR. El modelo está compuesto por 5 capas horizontales de distintas profundidades y velocidades como se observa en la Figura 4.

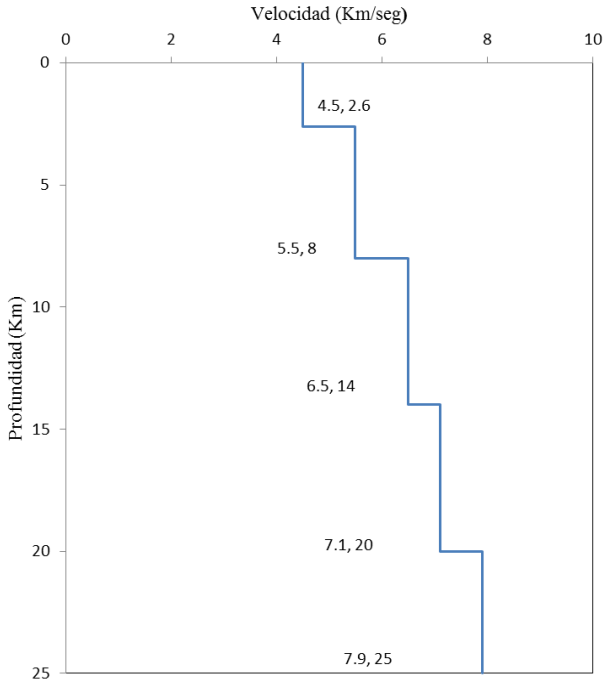


Figura 4**.** Modelo de velocidad 1D de la onda P para Puerto Rico, (modificado de Huérfano, 1994).

El modelo en 1D no es una representación adecuada de la estructura interna de la corteza, ya que las propiedades y características de la estructura interna de la Tierra cambian a lo largo, ancho y profundidad de las diferentes capas, en ocasiones se ve reflejado en las localizaciones de los eventos sísmicos como se aprecia en los errores residuales (tiempo observado-tiempo teórico) en la Figura 5.

La anisotropía de la Tierra se evidencia a partir de los errores residuales que se generan al realizar la localización en PRDANIS, programa que se utiliza para obtener la localización de los eventos sísmicos a partir del modelo de velocidad en 1D. Debido a los a esto se ha llegado a concluir que existen diferencias con respecto al modelo que se está

utilizando dicho supuesto es consistente con el hecho de que la estructura es anisotrópica, y se representara de mejor manera a través de un modelo en 3D de toda el área.

```
YEAR MO DA  --ORIGIN--  --LAT N-  --LON W--  DEPTH   RMS   ERH   ERZ  XMAG  FMAG  PMAG  INT
2012-03-14  1154 18.22  18 10.84   67 22.53  17.05  0.43  1.35  1.60        2.75  2.75D
                                                                                        SOURCE
NSTA NPHS  DMIN MODEL GAP ITR NFM NWR NWS NVR REMRKS-AVH  N.XMG-XMMAD-T   N.FMG-FMMAD-T  L F X
  24   25  25.1  PR1  136  15  14  16   7  25     Q  PPB   0.00  0.00     11.00  0.28 D

XMAG2-N.XMG2-XMMAD-T-S  FMAG2-N.FMG2-FMMAD-T-S  PREF.MAG-N.PMAG-PRMAD-T
                         2.75  11.00  0.28 Z        2.75  11.00  0.28 D

REGION= West of Puerto Rico

STA NET COM CR DIST AZM  AN P/S WT   SEC (TOBS -TCAL -DLY  =RES)  WT   SR  INFO  CAL DUR-W-FMAG-T -AMP-U-PER-W-XMAG-T
IDE  PR SHZ  A 25.1 335 111 EP- 1  23.28  5.06  5.07 0.00 -0.01  1.06      0.236 1.40  34   2.12 Z
IDE  PR SHN  A 25.1 335 111 ES  1  27.20  8.98  9.02 0.00 -0.04  1.06S     0.452
LSP  PR SHZ  A 30.6  90 105 EP+ 1  24.04  5.82  5.82 0.00  0.00  1.06      0.124 1.40  31   2.07 Z
LSP  PR SHE  A 30.6  90 105 ES  1  28.94 10.72 10.36 0.00  0.36  1.06S     0.312
CRPR PR BHZ  A 34.1 124 102 EP+ 1  24.35  6.13  6.29 0.00 -0.16  1.06      0.227 0.73  68   3.09 Z
CRPR PR BHE  A 34.1 124 102 ES  1  29.17 10.95 11.20 0.00 -0.25  1.06S     0.456
AGPR PR BHZ  A 42.3  41  98 EP- 1  25.50  7.28  7.42 0.00 -0.14  1.06      0.118 0.73  43   2.71 Z
AGPR PR BHN  A 42.3  41  98 ES  1  31.07 12.85 13.21 0.00 -0.36  1.06S     0.385
IMPR PR BHZ  A 59.9 260  63 EP- 1  27.92  9.70  9.83 0.00 -0.13  1.06      0.587 0.00  34   1.78 Z
AOPR PR BHZ  A 68.3  74  63 EP+ 1  29.02 10.80 10.89 0.00 -0.09  1.06      0.098 0.73  51   2.89 Z
AOPR PR BHN  A 68.3  74  63 ES  1  37.19 18.97 19.38 0.00 -0.41  1.06S     0.284
OBIP PR BHZ  A 82.8 100  63 EP+ 1  30.31 12.09 12.74 0.00 -0.65* 1.06      0.102 0.73  43   2.75 Z
OBIP PR BHE  A 82.8 100  63 ES  1  40.37 22.15 22.68 0.00 -0.53* 1.06S     0.206
CELP PR SHZ  A 85.1  97  63 EP- 1  31.63 13.41 13.02 0.00  0.39  1.06      0.098 1.40  49   2.59 Z
                            ES  1  41.68 23.46 23.18 0.00  0.28  1.06S     0.207
EMPR PR BHN  A 95.3  69  63 EP- 1  33.76 15.54 14.31 0.00  1.23* 1.04      0.100 0.00  37
EMPR PR BHE  A 95.3  69  63 ES  1  46.03 27.81 25.47 0.00  2.34* 0.00S     0.000
ICMP PR BHZ  A 95.6 109  63 EP- 1  35.41 17.19 14.35 0.00  2.84* 0.00      0.000
SJG  IU BHZ  A129.9  93  63 EP+ 1  39.19 20.97 18.70 0.00  2.27* 0.00      0.000
CBYP PR BHZ  A161.0  86  63 EP+ 1  42.57 24.35 22.63 0.00  1.72* 0.01      0.000 0.00  48
CBYP PR BHE  A161.0  86  63 ES  1  60.94 42.72 40.28 0.00  2.44* 0.00S     0.000
HUMP PR BHZ  A161.5  91  63 EP+ 1  43.53 25.31 22.69 0.00  2.62* 0.00      0.000 0.73  53
HUMP PR BHE  A161.5  91  63 ES  1  61.22 43.00 40.39 0.00  2.61* 0.00S     0.000
MTP  PR BHZ  A193.2  92  63 EP+ 1  47.77 29.55 26.70 0.00  2.85* 0.00      0.000 0.73  54
MTP  PR BHE  A193.2  92  63 ES  1  68.77 50.55 47.53 0.00  3.02* 0.00S     0.000
```

Figura 5. Localización sísmica de un evento al Oeste de Puerto Rico, se observa errores significativos (*) en las estaciones sísmicas.

El desarrollo del modelo de velocidad en 3D ayudará a conocer en mayor detalle las capas del interior de la Tierra. Un estudio realizado en Tasmania, al Sur-Este de Australia se estudió la profundidad del moho, donde se evidencio las anomalías de velocidad bajo Tasmania. Se tomó dos capaz, y tres interfaces, el resultado final fue la profundidad y velocidad de la estructura de la Tierra, especialmente para el moho en esa área (Rawlinson N. and Urvoy M,. 2006).

Para el desarrollo del modelo analizaremos un grupo de eventos sísmicos del catálogo general de la RSPR. De cada sismo se utiliza los primeros tiempos de las localizaciones y se calcula los otros tiempos de onda de las diferentes fases secundarias, estos ayudaran a una mejor definición de las capas de la Tierra. Este procedimiento se explicará en detalle en los próximos capítulos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

El objetivo principal de esta tesis es desarrollar un modelo de tomografía en 3D para el área de Puerto Rico e Islas Vírgenes (Británicas y Norteamericanas), este es desarrollado basado en un modelo de velocidad 1D ya conocido el cual ayudará a obtener el modelo de velocidad en 3D, permitiendo conocer también el modelo de corteza y manto superior en 3D.

1.2.2 Objetivos específicos

Los objetivos que se pretenden con esta investigación son:

- Conocer y utilizar técnicas modernas en sismología.
- Incluir en el modelo de tomografía las ondas P, y las fases sísmicas secundarias de la onda P.
- Correlacionar el modelo de tomografía con el grafico promedio de errores según reportados por la Red Sísmica de Puerto Rico.

1.3 Alcance del trabajo

El alcance de esta tesis es obtener una imagen de tomografía (3D) para Puerto Rico e Islas Vírgenes (Británicas y Norteamericanas). Este modelo 3D será obtenido a partir del modelo actual de velocidad 1D de la RSPR. Con la imagen de tomografía se obtiene un modelo de velocidad en 3D en el cual se visualiza las anomalías de velocidad a diferentes

profundidades y las variaciones en las capas a distintas profundidades de la estructura interna de la Tierra.

Al presente se han realizado diversos estudios de la estructura interna de la Tierra en donde se puede identificar sus características en distintas zonas. Utilizando el análisis de ondas sísmicas o Método de Tomografía es posible obtener información de las variaciones en profundidad en diferentes capas y las anomalías de velocidades en tres dimensiones (Rawlinson and Sambridge, 2004; Rawlinson and Urvoy, 2006; Kool et al., 2006; Rawlinson et al., 2008).

La Tomografía sísmica busca obtener un mayor conocimiento de las velocidades y propiedades de las capas de la Tierra. Debido a la complejidad tectónica de Puerto Rico y regiones cercanas, la RSPR está en el proceso de implementar este método y obtener un mayor conocimiento de las variaciones de velocidades, así como conocer la corteza y estructura interna de la Tierra.

1.4 Beneficios esperados

La contribución de esta tesis es el desarrollo de un modelo de velocidad en 3D que identifique con mayor precisión las localizaciones de eventos sísmicos para el área de Puerto Rico y regiones adyacentes. Se obtiene un aumento de exactitud en la localización en profundidad, latitud y longitud del evento sísmico. Además de conocer en más detalle las propiedades del área como su densidad, velocidad de la onda P y otras propiedades. Aplicando los resultados del modelo en la localización de sismos junto con los protocolos

existentes de la RSPR, se logrará una respuesta en la localización de sismos en menos tiempo.

1.5 Organización de la tesis

Incluyendo este capítulo de introducción, esta tesis se ha organizado en **7** capítulos. Este primer capítulo consta del problema y presentación de la investigación, objetivos y alcance de la tesis así como los beneficios de la misma. En el capítulo dos se muestra la revisión de literatura, donde se describe los tipos de ondas que se producen en el interior de la Tierra, se explica la teoría de tomografía, se describe el método que usa el programa para el desarrollo del modelo de velocidad, y se explican los modelos de velocidades de una y tres dimensiones. En el tercer capítulo se presenta una explicación del procedimiento del programa FMTOMO, los datos necesarios para correr el programa, y los resultados que arroja. El cuarto capítulo presenta todo el proceso previo para el desarrollo del modelo de velocidad en 3D. En el quinto capítulo se muestra la selección de los datos y el desarrollo del modelo, además del proceso utilizado para encontrar las otras fases de onda. En el sexto capítulo se presentan los resultados que se obtienen y el análisis del mismo. En el séptimo capítulo las conclusiones y recomendaciones finales.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Introducción

Un sismo libera gran cantidad de energía, esta viaja por el interior de la Tierra a la superficie, debido a la fractura de las rocas de la corteza o al desplazamiento brusco de las rocas producido por las fuerzas tectónicas. La energía se disipa, y se irradia como ondas sísmicas que viajan desde la fuente en todas las direcciones a través de las distintas capas del interior de la Tierra produciendo vibraciones. Estas ondas son detectadas por sismómetros localizados en distintas estaciones. La Figura 6 presenta la localización de las diferentes estaciones utilizadas por la RSPR para detectar los eventos sísmicos. Estas estaciones se clasifican según su funcionamiento, es decir se asignan colores según la entrada de datos a la estación (rojo: está activa contiene datos, amarillo: con intervalos de tiempo sin datos) el "gap" indica que la entrada de datos es continua, entre menor gap mejor entrada de datos.

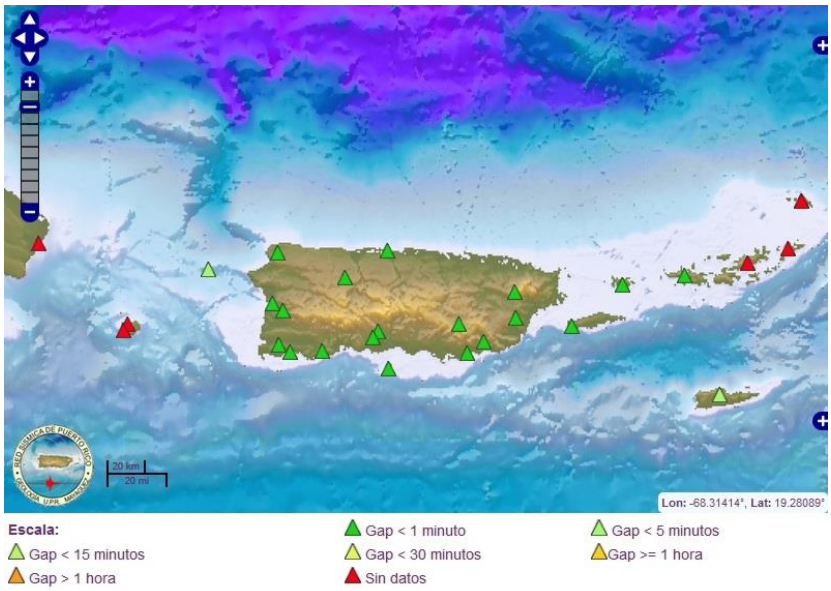


Figura 6**.** Mapa de Puerto Rico con las estaciones locales operadas por la Red Sísmica Puerto Rico (página electrónica de RSPR, 2013).

2.2 Tectónica local para Puerto Rico

Puerto Rico y las Islas Vírgenes (Británicas, y Norteaméricanas) forman una microplaca, están localizadas en la Placa del Caribe que se encuentra entre las placas de Norte y Sur América. En el límite Nor-Oeste de la Placa del Caribe se encuentra localizada esta micloplaca.

Al Norte de Puerto Rico se encuentra localizada de Este a Oeste la trinchera de Puerto Rico, entre el límite de las placas del Caribe y Norte América. Según algunos estudios realizados (Asencio, 1980; Brink, 2003; Jansma et al., 2000) se evidencia una zona de subducción oblicua y desplazamiento lateral entre estas placas. Aún se realizan investigaciones con respecto a la tectónica de esta área, debido a su gran variedad de fallas,

por ello se ha dividido en varias zonas de sismicidad, donde se ha podido apreciar la mayor concentración de sismos, estas zonas se observan en la Figura 7 y son:

- La trinchera de Puerto Rico.
- Las fallas de pendiente Norte y Sur de Puerto Rico,
- Al Nor-Este, en la zona del sombrero,
- El Cañón de la Mona, al Oeste,
- Pasaje de la Mona,
- Depresión de Islas Vírgenes y Anegada, al Este,
- Depresión de Muertos, al Sur, y Sur-Oeste de Puerto Rico.

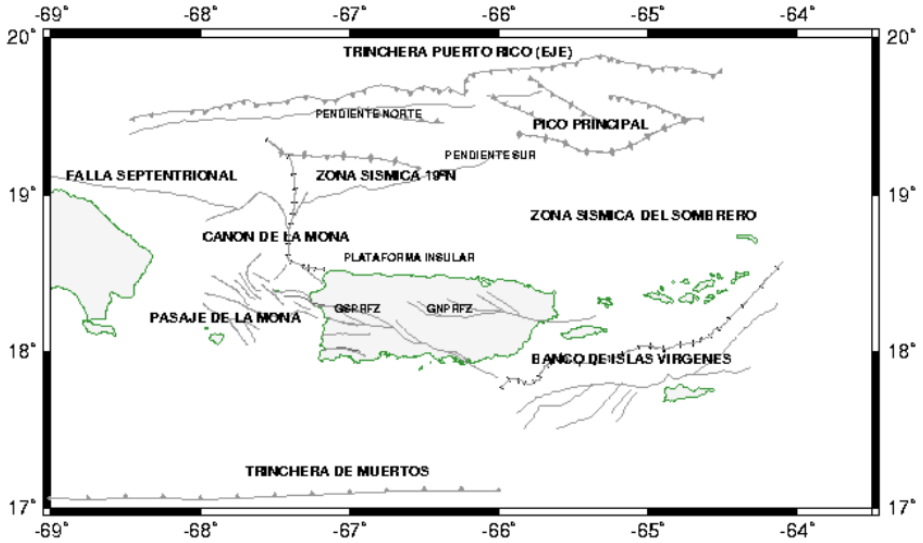


Figura 7. Zonas de sismicidad para Puerto Rico (2013).

2.3 Ondas sísmicas

Las ondas sísmicas son generadas debido a un terremoto o temblor de Tierra, el cual se puede definir como un movimiento repentino y violento que se origina en la corteza de la Tierra o manto superior. Los sismos son asociados a fallas geológicas o colisión entre placas tectónicas si son de origen tectónicos, estos terremotos producen una liberación súbita de energía acumulada por movimiento de masas terrestres (placas tectónicas).

2.3.1 Tipos de ondas

Las ondas viajan en el interior de la Tierra a través de las distintas capas de suelo hasta llegar a la superficie donde son detectadas por estaciones sísmicas. Las ondas que se producen durante un terremoto se clasifican como ondas de cuerpo y ondas superficiales.

2.3.1.1 Ondas de cuerpo

Las ondas de cuerpo se originan en el hipocentro, lugar donde se origina el sismo y se dividen en dos tipos de ondas, en ondas de compresión o primarias (P) y ondas transversales o secundarias (S).

2.3.1.1.1 Ondas de comprensión

Se llaman ondas primarias (P) debido a que son las primeras en llegar, son ondas de compresión y extensión por el movimiento de partículas que se generan a medida que la onda viaja, se propagan en sólidos o líquidos con velocidades entre 5.8 km/seg y 8.05 km/seg en la corteza y viajan más rápido que las ondas secundarias (Setein and Wysession, 2003). El comportamiento de las ondas P se puede observar en la Figura 8. Son usadas para distintos

estudios: localizaciones, variaciones en las capas, variaciones en la velocidad. La ecuación (1) nos permite determinar la velocidad de propagación de la onda P y se define:

$$V_P = \sqrt{\frac{k+\left(\frac{4}{3\mu}\right)}{\rho}} \tag{1}$$

donde, k es el módulo de Bulk o compresibilidad que es la relación entre el esfuerzo y cambio unitario de volumen, μ es el módulo de Rigidez y mide la resistencia del cambio de forma sin cambio de volumen, y ρ es la densidad del material.

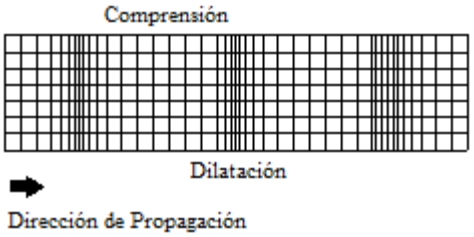


Figura 8. Ondas de cuerpo primarias (modificado de Bormann et al., 2012).

2.3.1.1.2 Ondas transversales

Se llaman ondas secundarias (S) ya que son las segundas en llegar, son ondas transversales debido a que el movimiento de las partículas que se genera a medida que la onda viaja es perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Viajan a una velocidad de propagación de 3.46 km/seg a 4.5 km/seg menor que la velocidad de propagación de la onda P. No se propaga por medios líquidos o gaseosos (Setein and Wysession, 2003). La ecuación (2) nos permite determinar la velocidad de propagación de la onda S y se define:

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \tag{2}$$

donde, μ es el módulo de Rigidez, y ρ es la densidad del material. En la Figura 9 se aprecia el comportamiento de la onda S, su desplazamiento es perpendicular a la dirección de propagación.

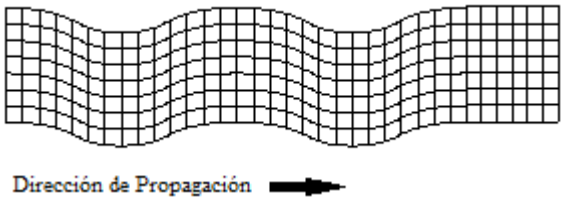


Figura 9**.** Ondas de cuerpo secundarias, (modificado de Bormann et al., 2012).

2.3.1.2 Ondas superficiales

Las ondas superficiales se propagan sobre la superficie de la Tierra, llevan la mayor energía y son causantes de daños a estructuras en un sismo. Su amplitud decrece exponencialmente con la profundidad, son llamadas ondas Rayleigh las cuales se mueve en dirección horizontal y vertical y ondas Love que tienen un movimiento de cortante en su dirección de viaje, semejante a la onda S (Setein and Wysession, 2003).

2.3.2 Fases de ondas

Las ondas se clasifican según su trayectoria, se reflejan y refractan en las distintas capas del interior de la Tierra como ondas primarias (P) o secundarias (S). Estas ondas se dividen en ondas que son clasificados según la trayectoria que toman al transferirse a través de las diferentes capas.

Mediante el proceso de transmisión de energía se generan distintos tipos de ondas donde, dependiendo de las propiedades de la estructura de la Tierra y la profundidad se produce distintas fases de ondas. Estas ondas se pueden clasificar como ondas Pg, onda P que viajan a lo largo de la capa granítica, ondas PmP las cuales son reflejadas en la base de la corteza (Moho), ondas Pn las cuales se refractan por debajo de la corteza y finalmente las ondas P* estas son refractadas y viajan dentro de la capa basáltica, estas fases de onda se generan típicamente cuando ocurren eventos sísmicos locales y se propagan en las capas superficiales del suelo. En cada una de las divisiones de la Tierra se reflejan y refractan estas ondas en distintas fases como se muestra en la Figura 10 (Subiza, 1986).

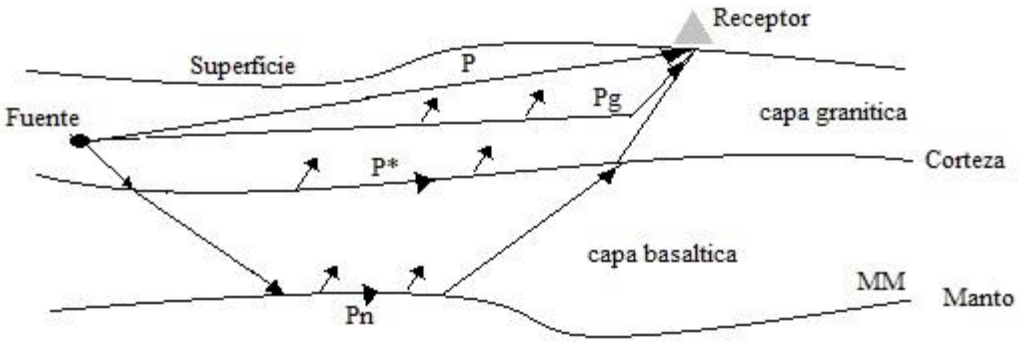


Figura 10**.** Trayectoria de rayos sísmicos "P" que se propagan por la corteza terrestre (modificado de Subiza, 1986).

Las fases de onda generadas por un sismo se transmiten con distintas velocidades, esta velocidad de propagación de las ondas generalmente aumenta con la profundidad y varía según la densidad y elasticidad del material en el que se propaga (Stein and Wysession, 2003). Mediante diferentes métodos se puede obtener la velocidad de la onda y profundidad

de las capas en el interior de la Tierra, lo que permite conocer la estructura interna de la Tierra.

En la Figura 10 se observa la parte superficial de la estructura interna de la Tierra, la cual se divide en varias capas según su composición: la corteza que se encuentran a profundidades entre 20 km a 40 km por debajo de los continentes y a 10 km aproximadamente por debajo del fondo oceánico, esta se divide en dos capas granítica y basáltica. Las divisiones principales de la estructura interna de la Tierra son la corteza, el manto y el núcleo como se observa en la Figura 11 .

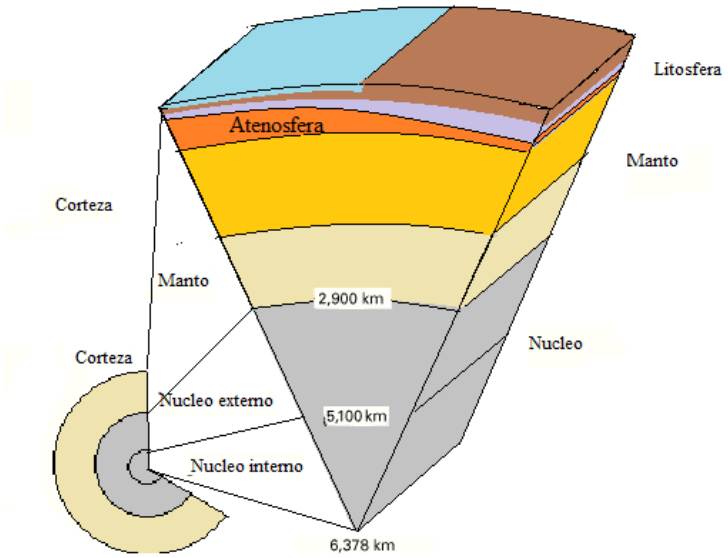


Figura 11**.** Estructura interna de la Tierra, (modificado de United States Geological Survey, 2013).

Dentro de toda la estructura de la Tierra, se van propagando distintas fases de onda, que dependen de las características del sismo, por ejemplo según su distancia (entre el evento y la estación) se producirán fases de onda que atraviesan la corteza y pasan al manto, y

pueden llegar incluso al núcleo según sea el caso, como se observa en la Figura 12. Se asignan distintas letras dependiendo de cómo se transmiten las fases por ejemplo PKIKP (se refleja en la superficie del núcleo interno), PP (se refracta en la superficie dos o más veces) entre otras fases sísmicas, características de eventos lejanos.

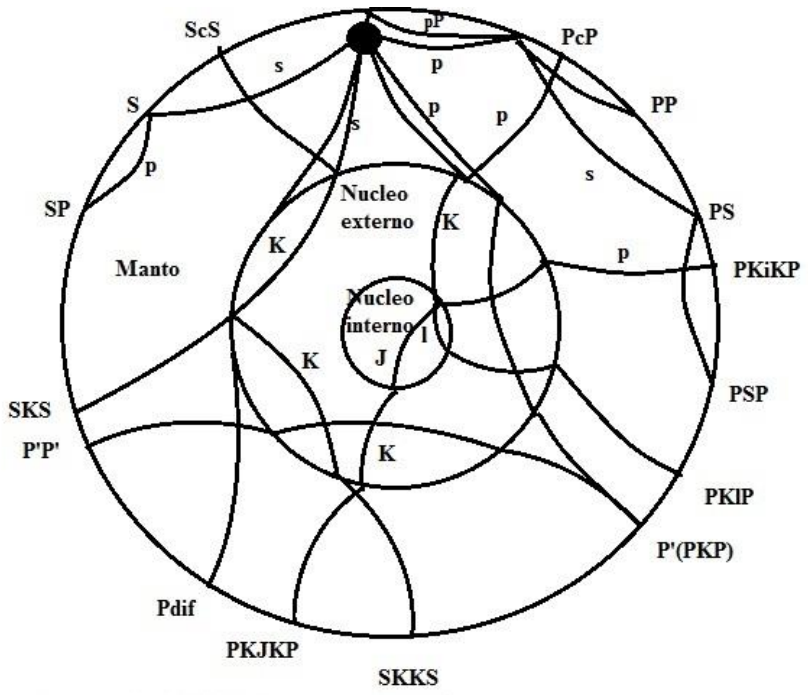


Figura 12**.** Distintas fases de onda a través de la Tierra (modificado de Subiza, 1986).

2.4 Reflexión y Refracción

Por medio de los métodos sísmicos se puede determinar la velocidad de propagación de las ondas en el interior de la Tierra. Los métodos sísmicos permiten encontrar la estratigrafía y geometría del subsuelo, cavidades internas a distintas profundidades, diferencias de profundidad en las capas del interior de la Tierra. En el análisis de propagación de ondas cuando la onda incide en una interface entre medios de distintas propiedades, la

onda es reflejada dentro del primer medio y parte de su energía es trasmitida o refractada dentro del segundo medio, este proceso se basa en la Ley de Snell.

2.4.1 Teoría de rayos

La Ley de Snell estudia los ángulos de incidencia θ_1, reflexión θ'_1 y refracción θ_2, para poder determinar las velocidades del medio homogéneo. El ángulo de refracción se relaciona con el ángulo de incidencia, según la ecuación (3) el ángulo de refracción varía según el tipo de material en el que se transmita, la Ley de Snell se representa mediante la ecuación (3).

$$\frac{\mathrm{sen}(\theta_1)}{V_1} = \frac{\mathrm{sen}(\theta_2)}{V_2} \tag{3}$$

La ecuación (3) se obtiene de la siguiente manera:

De la Figura 13, el ángulo i del triángulo formado por ACD es igual al ángulo j formado por el triángulo BOC por tener los triángulos lados perpendiculares, igualmente para el ángulo r y el ángulo m de los triángulos ADE y GOF son iguales por tener los lados perpendiculares. Tomando i= θ_1, y r= θ_2, se obtiene lo siguiente:

$$\mathrm{sen}(i) = \frac{CD}{DA} \quad \text{y} \quad \mathrm{sen}(r) = \frac{AE}{DA} \tag{4}$$

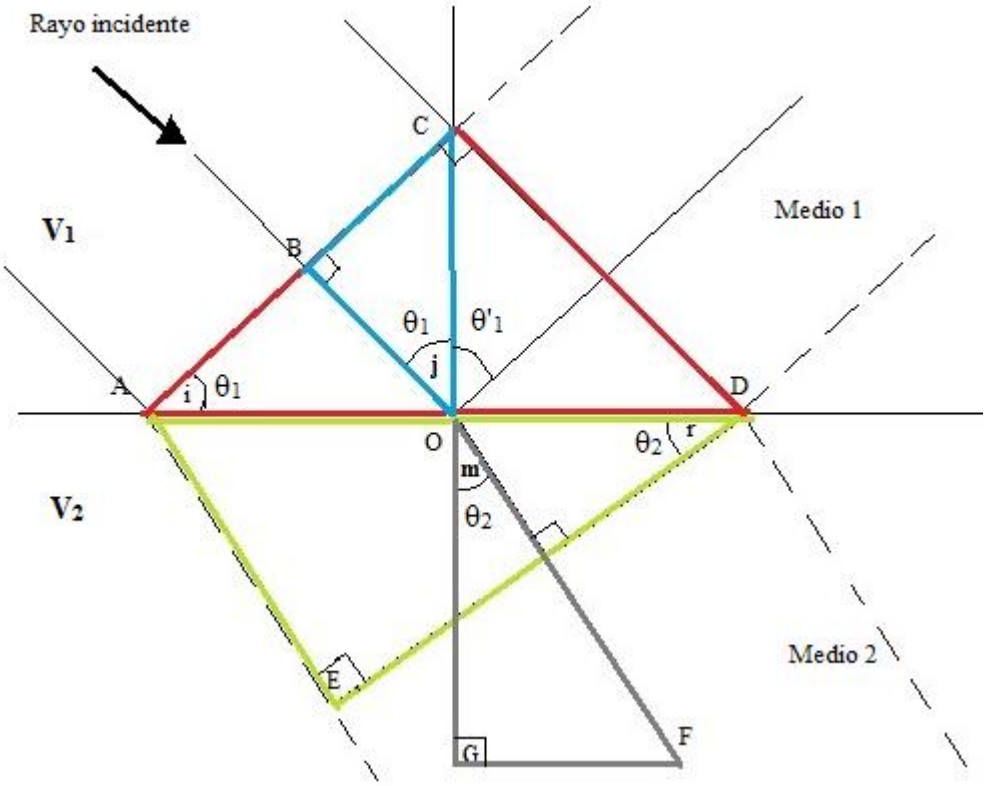


Figura 13. Demostración de la Ley de Snell.

Como los ángulos i y r son proporcionales, dividimos sen(*i*) entre sen(*r*) y obtenemos lo siguiente:

$$\frac{\text{sen}(i)}{\text{sen}(r)} = \frac{CD}{AE} \tag{5}$$

donde, CD y AE son distancias que recorre el frente de onda en un tiempo t a una velocidad V del medio en donde está. Es decir:

$$CD = V_1 t \quad \text{y} \qquad AE = V_2 t \tag{6}$$

Entonces sustituyendo las ecuaciones (6) en la ecuación (5) se obtiene la Ley de Snell de la siguiente manera:

$$\frac{\text{sen}(i)}{\text{sen}(r)} = \frac{V_1}{V_2} \tag{7}$$

Las velocidades de la onda propagada varían al pasar de un medio a otro como se observa en la Figura 14, en el cual se muestra el comportamiento típico para una onda sísmica como la onda P, la cual incide sobre el límite entre un medio que tiene una velocidad V_1 y otro con velocidad V_2 ambos con características diferentes de material, la velocidad variara dependiendo de las características del medio.

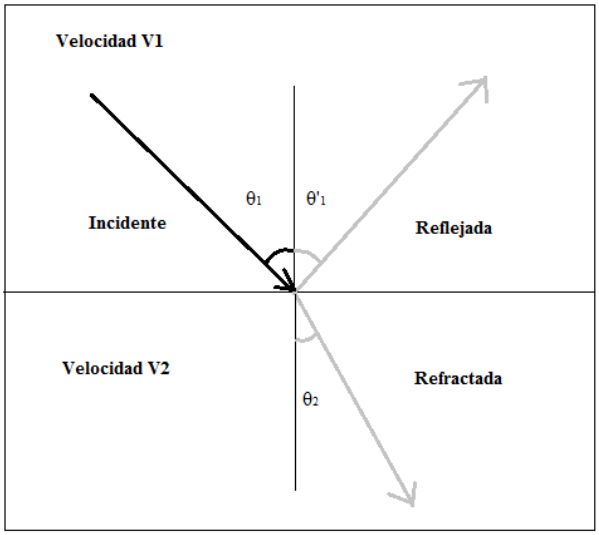


Figura 14**.** Ley de Snell, (modificado de Morrison et al., 2004).

Se puede presentar una condición en la Ley de Snell donde el ángulo de incidencia es llamado ángulo crítico, el cual es el ángulo de refracción que se forma en el medio con

velocidad V_2 con un ángulo igual a 90° (θ_2=90°), en ese caso la onda se refracta y se propaga con la velocidad del medio de abajo como se muestra en la Figura 15.

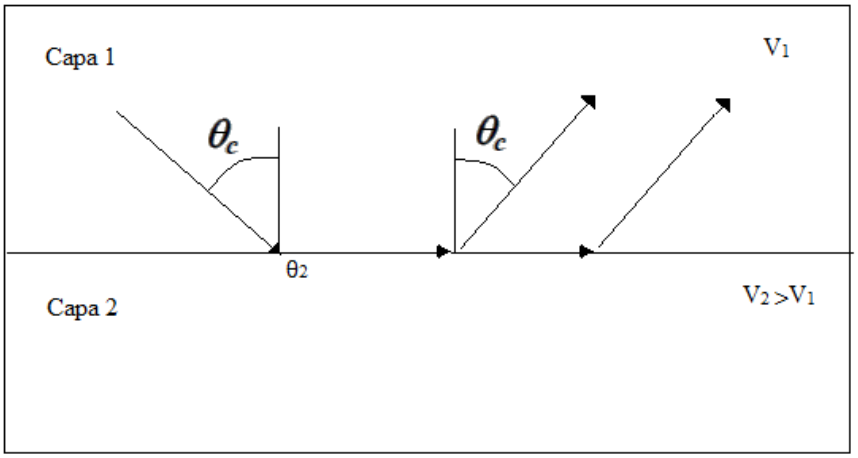


Figura 15**.** Ángulo crítico, (modificado de Morrison et al., 2004).

Esta condición es dada por la siguiente ecuación:

$$\theta_c = sen^{-1}\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \tag{8}$$

donde θ_c es el ángulo crítico, V_1 y V_2 son las velocidades del medio.

2.5 Método de Localización

La localización de un evento sísmico se realiza mediante el método de Geiger, en el cual se realiza un ajuste de los tiempos teóricos y los tiempos observados, y las predicciones de esos mismos tiempos para diferentes localizaciones de eventos utilizando un modelo de velocidad dado, donde la localización que permita el ajuste mínimo entre los tiempos observados y los tiempos teóricos es la localización final (Husen and Hardebeck, 2010). Este

ajuste se hace a través de estimación de errores horizontales, y verticales explicados más adelante.

Se utilizan estaciones donde se detectan los tiempos de arribo de las ondas de cuerpo, la cual debe estar clara para determinar la llegada de la onda P y la onda S en cada estación. Igualmente la coda que se genera después de la llegada de la onda P y se mide desde el inicio del evento hasta que termina, se utiliza para determinar la magnitud del sismo especialmente si es local.

Se pica en todas las estaciones el tiempo de llegada de la onda P y la onda S como en la Figura 16, estos picados son los tiempos observados los cuales se comparan con los tiempos teóricos dados automáticamente por PRDANIS basados en el modelo de velocidad en 1D. Se determina la diferencia entre esos tiempos (T_{obs}-T_{teor}) en cada estación como en la Figura 17. Finalmente el programa sigue realizando iteraciones hasta que se obtienen errores mínimos de los residuales (T_{obs}-T_{teor}), el error horizontal, el error vertical y el RMS. De esta manera se obtiene la localización final de un evento sísmico.

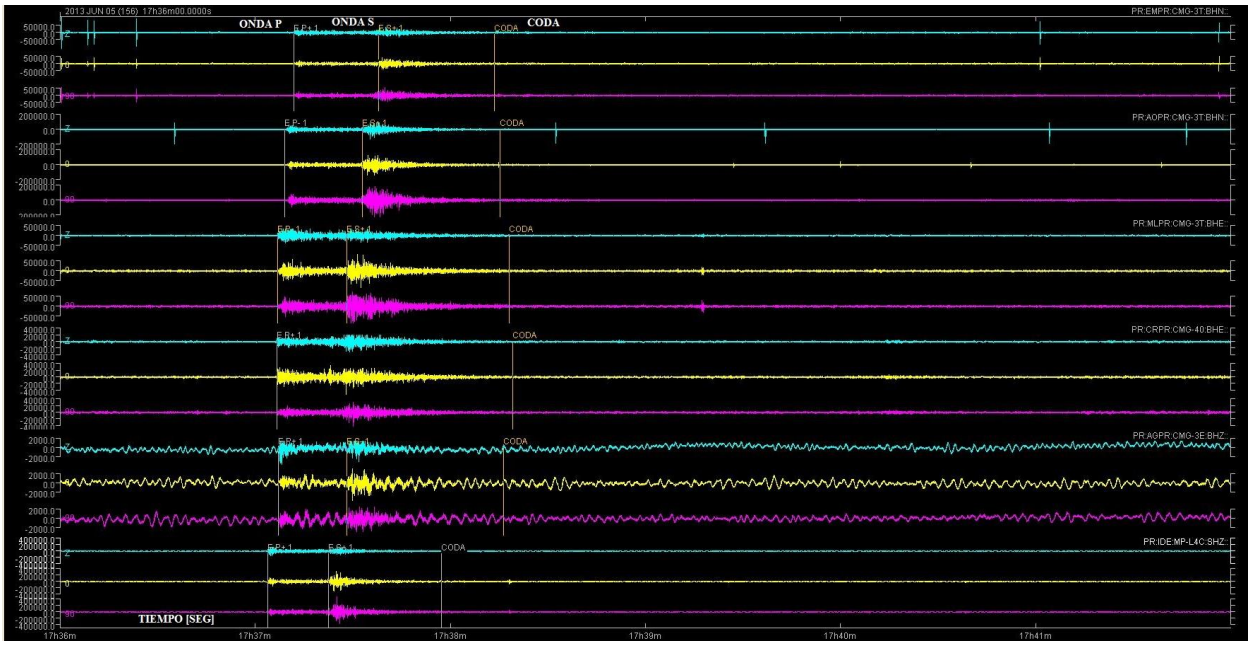


Figura 16**.** Localización de un evento sísmico, diferencia entre P, S y coda (salida del programa.

PRDANIS, 2013)

Coordenadas del evento — Errores en la localizacion

```
YEAR MO DA  --ORIGIN--  --LAT N-  --LON W--  DEPTH   RMS   ERH   ERZ  XMAG  FMAG  PMAG  INT
2013-01-21  0800  6.99  18 33.65   66 41.54  13.99  0.30  0.96  0.94        2.86  2.86D
                                                                                        SOURCE
NSTA NPHS  DMIN MODEL GAP ITR NFM NWR NWS NVR REMRKS-AVH  N.XMG-XMMAD-T   N.FMG-FMMAD-T  L F X
  21   22  19.5  PR1  212  12  11  16   8  22      Q  PPR   0.00  0.00     11.00  0.17 D

XMAG2-N.XMG2-XMMAD-T-S  FMAG2-N.FMG2-FMMAD-T-S  PREF.MAG-N.PMAG-PRMAD-T
                         2.86  11.00  0.17 Z        2.86  11.00  0.17 D

REGION= North of Puerto Rico
```

Tiempos de onda — Diferencia entre tiempos

```
STA NET COM CR DIST AZM  AN P/S WT   SEC (TOBS -TCAL -DLY  =RES)  WT   SR  INFO  CAL DUR-W-FMAG-T -AMP-U-PER-W-XMAG-T
EMPR PR BHZ  A 19.5 118 117 EP+ 1  11.04  4.05  4.19 0.00 -0.14  1.24     0.332 0.00  50   1.99 Z
EMPR PR BHN  A 19.5 118 117 ES  1  14.85  7.86  7.46 0.00  0.40  1.24S    0.594
AGPR PR BHZ  A 45.4 257  66 EP+ 1  14.52  7.53  7.83 0.00 -0.30  1.24     0.276 0.73  57   2.97 Z
AGPR PR BHN  A 45.4 257  66 ES  1  20.95 13.96 13.94 0.00  0.02  1.24S    0.361
CELP PR SHZ  A 55.1 167  66 EP+ 1  15.96  8.97  9.20 0.00 -0.23  1.24     0.082 1.40  53   2.63 Z
                            ES  1  22.84 15.85 16.38 0.00 -0.53* 1.24S    0.326
OBIP PR BHZ  A 58.0 170  66 EP+ 1  16.46  9.47  9.61 0.00 -0.14  1.24     0.081 0.73  50   2.86 Z
OBIP PR BHE  A 58.0 170  66 ES  1  24.05 17.06 17.11 0.00 -0.05  1.24S    0.330
LSP  PR SHZ  A 59.5 225  66 EP+ 1  16.79  9.80  9.82 0.00 -0.02  1.24     0.125 1.40  62   2.78 Z
LSP  PR SHN  A 59.5 225  66 ES  1  24.99 18.00 17.48 0.00  0.52* 1.24S    0.252
CRPR PR BHZ  A 75.6 216  55 EP+ 1  18.80 11.81 12.01 0.00 -0.20  1.21     0.095 0.73  47   2.83 Z
CRPR PR BHN  A 75.6 216  55 ES  1  28.74 21.75 21.38 0.00  0.37  1.21S    0.204
CBYP PR BHZ  A 93.9 109  55 EP+ 1  21.30 14.31 14.33 0.00 -0.02  0.86     0.198 0.00  60   3.07 Z
CBYP PR BHE  A 93.9 109  55 ES  1  32.84 25.85 25.51 0.00  0.34  0.86S    0.418
HUMP PR BHZ  A100.4 117  55 EP- 1  22.63 15.64 15.15 0.00  0.49  0.68     0.101 0.73  55   3.00 Z
HUMP PR BHN  A100.4 117  55 ES  1  34.16 27.17 26.97 0.00  0.20  0.68S    0.217
MTP  PR BHZ  A131.0 112  55 EP- 1  26.05 19.06 19.02 0.00  0.04  0.02     0.000 0.73  55   3.03 Z
MTP  PR BHN  A131.0 112  55 ES  1  41.27 34.28 33.86 0.00  0.42  0.02S    0.000
CUPR PR BHZ  A151.6 100  55 EP+ 1  28.35 21.36 21.63 0.00 -0.27  0.00     0.000 0.00  56   2.34 Z
CUPR PR BHE  A151.6 100  55 ES  1  46.05 39.06 38.50 0.00  0.56* 0.00S    0.000
STVI PR BHZ  A185.1  96  55 EP- 1  33.03 26.04 25.88 0.00  0.16  0.00     0.000 0.00  72   3.33 Z
STVI PR BHN  A185.1  96  55 ES  1  53.26 46.27 46.07 0.00  0.20  0.00S    0.000
```

Figura 17**.** Localización final de sismo local en la región de Puerto Rico (salida del programa

PRDANIS, 2013).

En el proceso de la localización del evento sísmico se comparan los tiempos de llegada de la onda P. Es decir se establece cuál de las estaciones se encuentra más cerca al epicentro para determinar la estación en el cual la onda llega primero, se hace este análisis previo a la localización final con el fin de verificar el orden de las estaciones.

En la localización de un sismo se generan errores debido a las componentes horizontal y vertical que son ERH, ERZ, y la raíz cuadrada media o RMS (por sus siglas en inglés) del tiempo de transito residual. Estos errores indican si la localización es más exacta y depende de esos errores la decisión final.

ERH: Es el error horizontal en las localizaciones, se mide en km.

ERZ: Es el error en profundidad, se mide en km.

RMS: Es la media cuadrática que mide el error de todos los tiempos, es un ajuste entre los tiempos de llegada teórico y observados en la localización utilizando las lecturas de los sismogramas (Klein, 2002). Entre más pequeño el RMS menor es la variabilidad en los datos. Se mide en segundos y se calcula con la ecuación (9):

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(t_o - t_t)^2}{n}} \tag{9}$$

donde, t_o-t_t es el error residual individual de cada estación y n el número de datos.

La solución para la localización del sismo es no lineal, este se resuelve mediante iteraciones que converge para el RMS mínimo. Los pasos de la localización básicamente inicia suponiendo una localización donde se calcula el RMS, se calcula el mejor ajuste donde

el RMS sea el mínimo, una vez se obtenga el ajuste se calcula de nuevo el RMS y sigue iterando hasta que converja o cumpla con otros criterios, como los valores del error vertical y horizontal, la coherencia de llegada de las estaciones al lugar de la localización, y errores entre los tiempos observados y teóricos.

Hay distintos métodos para localizar sismos, entre ellos está la localización de sismos con varias estaciones mencionado anteriormente y otro método es la localización del sismo mediante una sola estación. Aunque según el concepto de localizar un sismo, se debe contar con tres estaciones como mínimo, es posible localizar un evento con una sola estación.

Para localizar un sismo mediante una estación se debe tener la forma de onda registrada en sus tres componentes (Z, N, E), la distancia hipocentral, la cual se calcula utilizando el tiempo de arribo de la onda P y la onda S, y la amplitud de las ondas con el fin de determinar el movimiento de la partícula. El movimiento de la partícula indica el movimiento del suelo donde está instalado el sensor (sismómetro), y permite conocer la dirección del sismo por medio del primer impulso de onda (Lara, 2001).

Se analiza la primera llegada de la onda en las tres componentes. En la componente N-S si la llegada es hacia arriba o hacia abajo indicará la dirección en que se encuentra el sismo, igualmente para la componente E-O. Finalmente la componente Z es la que define la dirección en donde ocurrió el evento.

Ambos métodos de localización de sismos dan resultados aproximados de los eventos. La exactitud del método de una estación se debe al movimiento de la partícula, el

cual es más cercano y más detallado a lo que ocurre dentro de la Tierra al propagarse la onda. En el método de una estación realmente se va a producir un movimiento de cada partícula y este se refleja en el sismógrafo cuando se detecta la primera llegada.

2.6 Estudio de errores generados en la localización

Cuando se realiza la localización de los eventos sísmicos detectados por la RSPR, se recomienda cumplir con algunos valores mínimos de errores ya establecidos. Para cada estación se verifica que el valor residual (tiempo observado menos tiempo teórico) no exceda a 0.5, este valor indica la exactitud de la fase observada que está siendo localizada. Se recomienda tener en cuenta que el valor residual de 0.5 para la localización del sismo en cada lectura de tiempo en las estaciones no sea excedido.

Por ejemplo, como se vio en la Figura 5 presentada anteriormente en la localización final de un evento sísmico se tienen estaciones con errores que varían de -0.01 en la estación IDE localizada en la Isla Desecheo y un error de +3.02 para la estación MTP localizada en el área de Vieques. Se observa una gran diferencia en el error entre IDE y MTP, hay que notar que la estación MTP está más alejada del sismo por lo que genera mayor error. Según el signo del error residual (T_{obs}-T_{teor}) se identifica si la velocidad es más rápida o más lenta en la zona por donde atraviesa la onda. Para este ejemplo quiere decir que para MTP hubo un aumento de velocidad debido a algún cambio de tipo roca mientras viajaba en el interior de la Tierra hasta el lugar donde ocurrió el sismo (hipocentro).

Las localizaciones son realizadas con el modelo de velocidad en 1D, por lo cual se está haciendo la suposición que entre capas horizontales se tiene una misma velocidad, y no se está tomando en cuenta las variaciones laterales que tiene la estructura de la Tierra. Lo cual se ve reflejado en la Figura 18, donde se realizó un promedio de los errores de las estaciones de todo el catálogo de la RSPR. En este grafico se observa diferentes zonas con errores debidos al modelo de velocidad usado actualmente para las localizaciones de los eventos sísmicos.

De esta manera se puede observar que el modelo de velocidades actual no representa las velocidades reales en esta región.

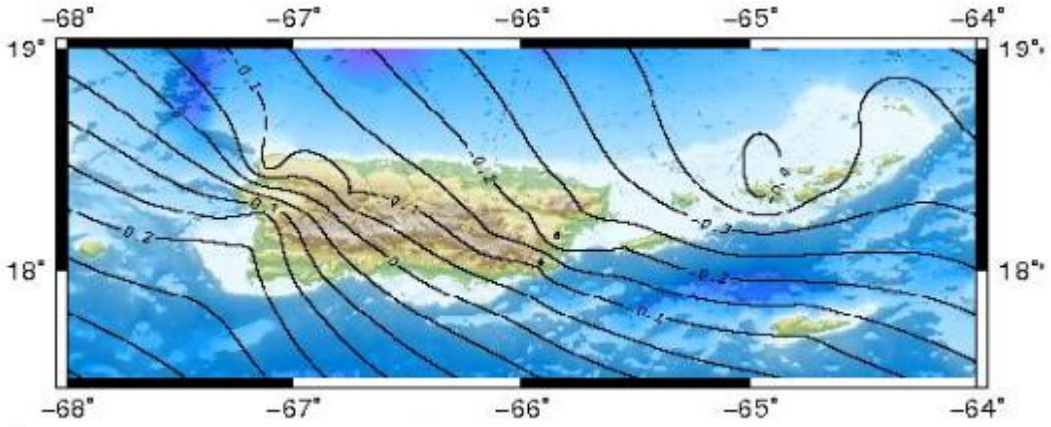


Figura 18. Errores de la onda P por estación, para el modelo de velocidad en 1D de Puerto Rico (Lin and Huérfano, 2011).

2.7 Ecuación Eikonal

La ecuación Eikonal se deriva de la ecuación de onda, la cual permite el cálculo de los tiempos de tránsito, esta representa la propagación del frente de onda sísmico. Hay

distintos métodos desarrollados para determinar la solución de esta ecuación, entre ellos están los métodos basados en rayos y redes, llamados de aproximación de alta frecuencia (Sethian, 1996; Vidale, 1998; Rawlinson et al., 2008), la ecuación elástica de onda puede resumirse mediante la ecuación 10:

$$\nabla^2\Phi - \frac{1}{\alpha^2}\frac{\partial^2\Phi}{\partial t^2} = 0 \tag{10}$$

donde Φ es un potencial escalar de la onda P, α es la velocidad de la onda P y t es el tiempo de que se demora la onda P. Mediante sustituciones matemáticas en la ecuación (10) se obtiene la ecuación Eikonal representada con la ecuación (11):

$$\left|\nabla_x T\right| = S(x) \tag{11}$$

donde, ∇x es el operador gradiente, s(x) es la inversa de velocidad o lentitud y T es el tiempo de tránsito. T(x) es la función de tiempo que describe el frente de onda.

La ecuación (11) expresa que el gradiente del tiempo de llegada en la superficie es inversamente proporcional a la velocidad del frente. Mediante la solución de la ecuación Eikonal se obtiene el tiempo de tránsito y esto es posible integrando la ecuación a lo largo de la trayectoria del rayo, es decir esta ecuación permite conocer la evolución del frente de onda.

2.8 Derivadas de Fréchet

Las derivadas de Fréchet describen la relación del cambio en los tiempos de viaje con respecto a los parámetros del modelo. Todos los métodos de gradiente requieren determinar las derivadas de Frechet. Se utiliza para realizar el ajuste de los datos durante la solución del

problema inverso en el proceso de tomografía, el cual busca encontrar un equilibrio o igualdad entre los datos observados y teóricos. En problemas no lineales para su cálculo es necesario paramétrizar el modelo (McGillivray and Oldenburg, 1990), las derivadas de Frechet se expresan con la ecuacion (12):

$$G = \frac{\partial g}{\partial m} \tag{12}$$

donde, G es la matriz de derivadas de Fréchet la cual deriva los tiempos de llegada g con respecto a los parámetros del modelo *m.*

2.9 Tomografía

La Tomografía sísmica es una técnica que se utiliza para generar imágenes de dos o tres dimensiones del interior de la Tierra. Esta técnica se utiliza para conocer las velocidades e identificar los espesores de las capas de la estructura interna de la Tierra a distintas profundidades, al mismo tiempo se pueden conocer las anomalías de velocidad por medio de las ondas generadas por eventos sísmicos, las cuales forman trayectorias (rayos) a su paso por la Tierra por lo cual se puede generar una imagen en 3D del interior de la Tierra utilizando distintos métodos.

Utilizando la información registrada en las estaciones de los eventos sísmicos se puede crear una imagen del interior de la Tierra a distintas profundidades, ya sea a la corteza, al manto o a profundidades mayores, según el estudio deseado.

Las ondas sísmicas producidas por el terremoto se transmiten a través de todas las capas de la Tierra y viajan a diferentes velocidades debido a la composición de los materiales que conforman cada capa, por tal razón es posible conocer las velocidades y espesores de las capas de la Tierra y esto es lo que se conoce como tomografía.

Una de las propiedades elásticas de la Tierra que se puede conocer mediante la tomografía es la velocidad de la onda primaria P, con esta velocidad y el tiempo de viaje de las ondas es posible definir la estructura de las capas. Si la velocidad se representa por un conjunto de parámetros de un modelo *m*, se pueden predecir los tiempos de viaje *d* para una fuente y receptor dado mediante integración a través del modelo (Rawlinson et al., 2008), asi el mejor ajuste de los parámetros del modelo m que satisface los datos observados se puede representan con la ecuación (13).

$$d=g(m) \qquad (13)$$

El método de tomografía es basado en la relación entre los datos de tiempos de viaje y los parámetros del modelo. La diferencia entre los tiempos observados (d_{obs}) y el modelo inicial (m_o) es un indicativo de que tan bien se ajusta el modelo a los datos.

Para resolver el problema inverso entonces se manipula *m* de manera que se reduzca la diferencia entre los datos observados y calculados, los cuales se deben someter a alguna normalización impuesta.

Para obtener una imagen de tomografía básicamente se siguen los siguientes pasos:

1) **Parametrización del modelo:** En este paso se asigna las coordenadas de la red, el número de nodos, el número de capas e interface, el número de eventos sísmicos o emisores y el número de receptores.

2) **Cálculo del problema directo:** En este paso se calcula los tiempos de llegada teóricos mediante el método del Caminante.

3) **Inversión de datos:** En este paso se realiza un ajuste de los valores de los parámetros del modelo, con el objetivo de que los datos del modelo se acerquen más a los datos observados.

4) **Validación del modelo:** En esta paso se realiza una validación de los resultados mediante estimaciones estadísticas, a través de la varianza, el RMS y chi cuadrado.

Es decir a partir de un modelo de velocidad inicial, se obtienen los errores de los tiempos de viaje de cada rayo mediante la comparación de los tiempos teóricos con los tiempos observados. En la Figura 19, se observa un evento con las estaciones que detectaron el sismo, estas han sido ordenadas según la distancia epicentral, y alineada según el tiempo de origen del sismo que se representa como el inicio o cero de la figura. Estos errores se corrigen por medio del proceso de inversión y así el modelo de velocidad es actualizado. Seguido de esto se inicia el proceso de iteraciones con el nuevo modelo y se obtiene el modelo ajustado como se observa en la Figura 20.

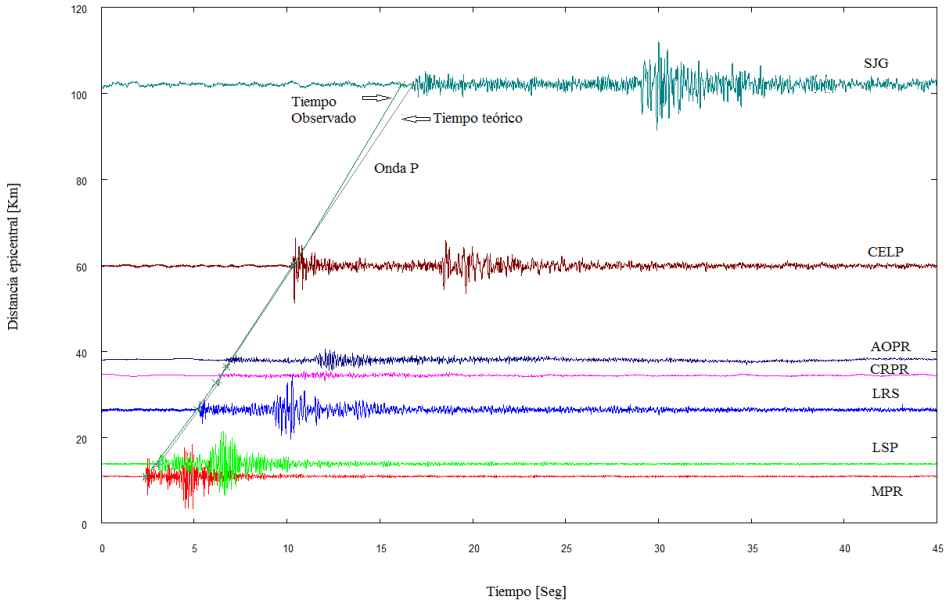


Figura 19. Tiempos teóricos vs tiempos observados para un evento sísmico (salida del programa Gnuplot, 2013).

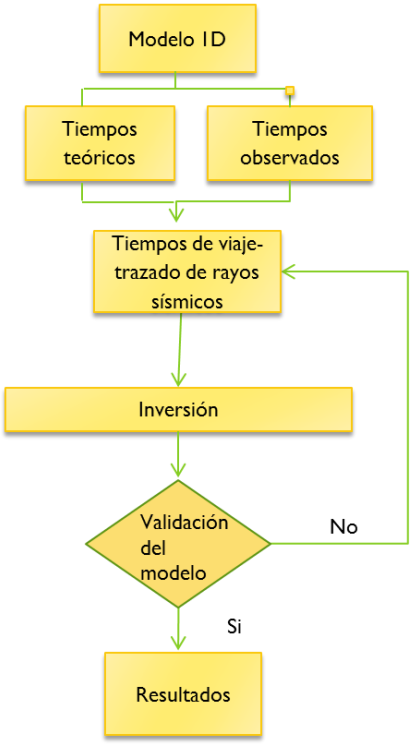


Figura 20. Método de tomografía.

Uno de los métodos que se utiliza para resolver este problema es el método de inversión de sub-espacio, el cual se basa en la técnica del gradiente y requiere el cálculo de las derivadas de Fréchet (Rawlinson and Sambridge, 2003), con la que se describe el cambio en los tiempos de transito con respecto a los parámetros del modelo. Mediante la inversión se pretende minimizar el error entre los tiempos observados y los tiempos calculados.

2.9.1 Métodos Símicos

Para obtener el cálculo de las trayectorias de rayos y tiempos de viaje (solución del problema directo), se utilizan técnicas de trazado de rayos o seguimiento de frentes de ondas. El método de trazado de rayos se realiza por medio de dos métodos llamados de doblamiento (conocido con su nombre en inglés como “Bending”), y el método balístico (conocido por su nombre en inglés como “Shooting”). El método de seguimiento de frentes de onda se realiza siguiendo la trayectoria de propagación de todo el frente de onda obteniéndose el tiempo de viaje desde un punto (fuente) a todos los puntos del medio. El desarrollo del seguimiento del frente de onda es posible mediante las soluciones de diferencias finitas de la ecuación Eikonal (ecuación 6). Se genera una red de puntos en el cual se calcula el tiempo de la primera llegada utilizando el método del caminante FMM (Rawlinson and Sambridge, 2003; Vernaez and Surós, 2009). Estos métodos son ilustrados en la Figura 21.

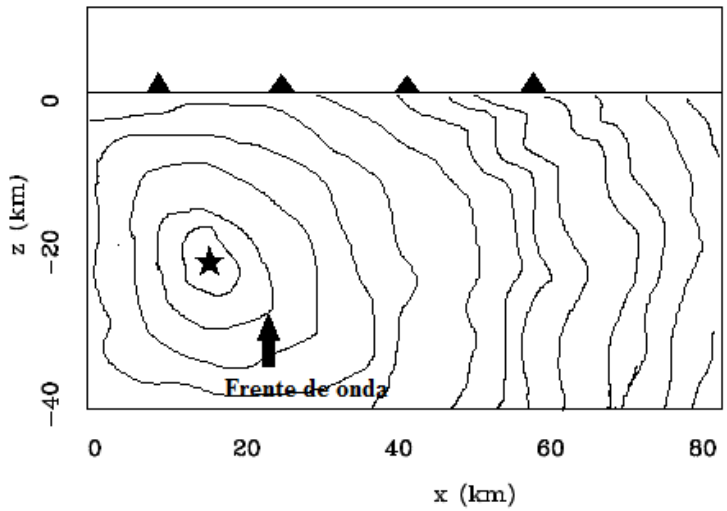


Figura 21. Métodos sísmicos, propagación del frente de onda, (modificado de Rawlinson and Sambridge, 2003).

2.9.1.1 Descripción del método del caminante (FFM)

Se han realizado varios estudios con el fin de obtener resultados cada vez más precisos referentes a la predicción de los tiempos de llegada de la fuente al receptor (Rawlinson and Sambridge, 2004; Rawlinson and Urvoy, 2006; Kool et al., 2006; Rawlinson et al., 2008), en donde se han desarrollado trabajos que involucran eventos locales, Sintéticos, y eventos tele-sísmicos. Estos estudios trabajan con el método del caminante o FMM con el que se ha podido determinar los tiempos de viaje con múltiples trayectorias en un campo heterogéneo (Rawlinson et al., 2008).

FMM es capaz de encontrar para un medio continuo los tiempos del primer arribo de cada estación sin tomar en consideración las demás fases (otros tiempos), sin embargo se han desarrollado varias técnicas que ayudan a integrar otras fases a FMM (Rawlinson and Sambridge, 2004).

El método consiste en un algoritmo donde utiliza una serie de nodos que ayudan a obtener los resultados de tomografía y velocidades de onda partiendo de un frente de onda que se va propagando a través de las distintas capas en todas las direcciones según se muestra en la Figura 22, este frente de onda se propagará en cada nodo, obteniéndose la forma de la interfaz.

Partiendo de ahí, cada nodo contiene un tiempo de arribo a cada estación, los cuales son analizados, seleccionados y/o descartados, ya que se trata de construir una banda reducida de nodos como en la Figura 23 que coteje los tiempos de tránsito menores que son los que forman la interfaz, esto se propagará en todas las direcciones Este-Oeste, Norte-Sur, y profundidad.

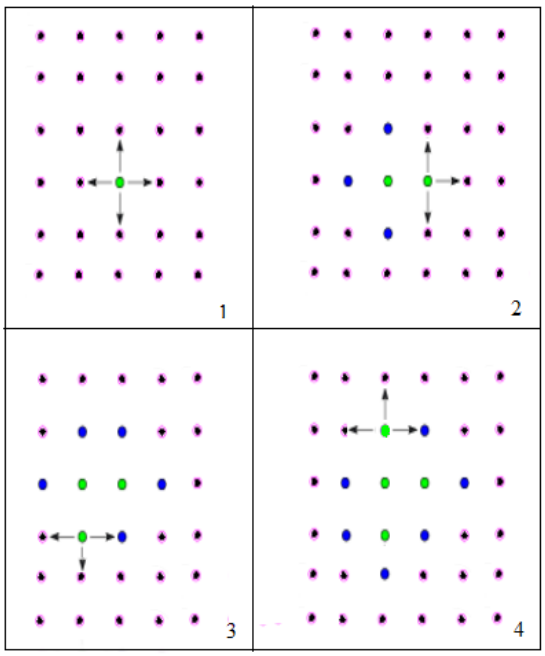


Figura 22. Propagación de frente de onda (modificado de Rawlinson and Sambridge, 2004).

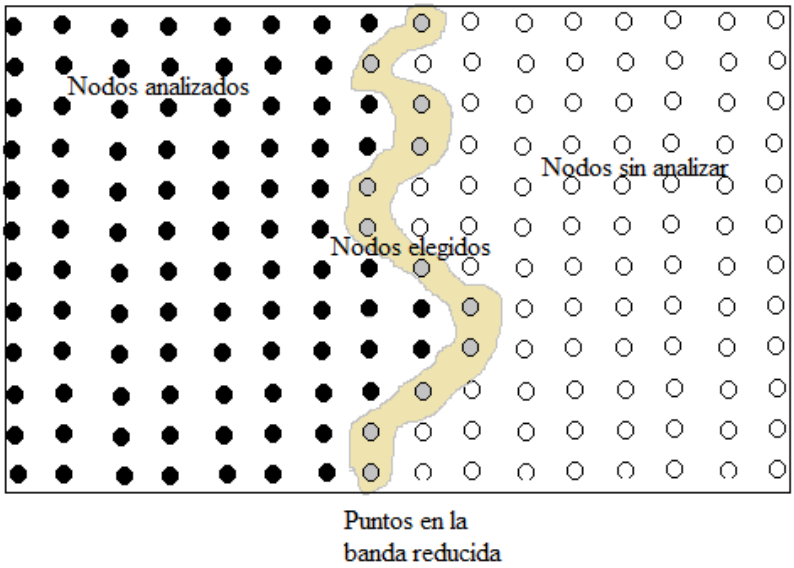


Figura 23**.** Banda reducida que forma la interfaz, (modificado de Rawlinson and Sambridge, 2003).

El método se basa en el desarrollo de una malla que utiliza la solución de la ecuación Eikonal (Malladi and Sethian, 1996; Rawlinson and Malcom, 2003; Rawlinson and Sambridge, 2004; Rawlinson et al., 2008). Se caracteriza por determinar los primeros arribos del frente de onda y se representa mediante la ecuación (11), donde el gradiente del tiempo de tránsito es inversamente proporcional a la velocidad de onda en cualquier punto dentro de un frente de onda (Malladi and Sethian, 1996). El método de FMM considera los tiempos de arribo de las fases secundarias (tiempos de Pn, Pg, P, etc) si el medio es heterogéneo.

Con base al método para un medio continuo, se han desarrollado otros métodos para medios no continuos y diversos tiempos de llegada o fases de onda conocidas como Pg, Pn, Pm definidas anteriormente en la Figura 10 (Kool et al., 2006; Rawlinson and Sambridge, 2006).

La solución de la ecuación (12) se realiza utilizando el operador de diferencias finitas (conocido por su nombre en inglés como “upwind finite differences”), lo que significa que se utilizan solamente los nodos donde el frente de onda ya ha pasado para calcular el tiempo de llegada en un nodo dado. Esto quiere decir que usa los tiempos de llegada ya conocidos para determinar los tiempos de llegada de otro nodo adyacente a él, y una banda reducida (conocida por su nombre en inglés “Narrow Band”) que almacena los nodos elegidos con el menor tiempo o “upwind” por su nombre en inglés (Sethian, 1999; Rawlinson and Sambridge, 2006), El esquema para la solución de la ecuación Eikonal en un medio 2D es:

$$\begin{bmatrix} max\left(D_a{}^{-x}T, -D_b{}^{+x}T, 0\right)^2 + \\ max\left(D_c{}^{-y}T, -D_d{}^{+y}T, 0\right)^2 + \\ max\left(D_e{}^{-z}T, -D_f{}^{+z}T, 0\right)^2 \end{bmatrix}_{ijk}^{\frac{1}{2}} = S_{i,j,k} \tag{13}$$

donde T es el tiempo de viaje, *S* es la lentitud, (i, j, k) son variables de incremento en la red en cualquier sistema de coordenadas ortogonales (x, y, z) y a, b, c, d, e, f son variables de entrada que definen el orden de exactitud para el operador de diferencias finitas o “upwind finite-difference operators”, el cual describe como calcular los nuevos tiempos de viaje usando tiempos de viaje ya conocidos (Rawlinson et al., 2008). Las ecuaciones (14) y (15) muestran la notación para los operadores de diferencias finitas en un sistema de coordenadas cartesianas, donde los primeros dos operadores para $D^{-x}\ T_i$ son:

$$D_1{}^{-x}\ T_{i,j,k} = \frac{T_{i,j,k} - T_{i-1,j,k}}{\delta_x} \tag{14}$$

$$D_2{}^{-x}\ T_{i,j,k} = \frac{3T_{i,j,k} - 4T_{i-1,j,k} + T_{i-2,j,k}}{2\delta_x} \tag{15}$$

donde δx es el espaciamiento en la red en x, y los operadores se derivan por la suma de la expansión de la serie de Taylor para T_{i-1} y T_{i-2}. Dependiendo de la disponibilidad de los tiempos de tránsito en "upwind" por su nombre en inglés (nodos donde ya ha pasado el frente de onda) y el máximo valor permitido se define que operador utilizar.

La implementación de este esquema requiere que el orden en el cual los nodos se determinen sea consistente con la dirección de la información, es decir que genere de valores pequeños a valores grandes de T; para lograr esto se utiliza la banda reducida mencionada anteriormente.

2.9.1.2 FMM para medios estratificados

La estructura interna de la Tierra está conformada de varias capas con ondulaciones y heterogeneidades, estas variaciones en las capas no se pueden describir apropiadamente con una red regular normal. Para poder describir la estructura de la Tierra de manera más real es necesario añadir una malla triangular que este sobre los nodos de velocidad cercanos a los nodos de la interface, así la intersección entre la interface y la red de velocidad serán los nodos de la interface. Aplicando la ecuación (14) para la red regular y el esquema de primer orden de exactitud para la red irregular se obtiene una solución para determinar los tiempos de viaje (Rawlinson and Sambridge, 2004).

El frente de onda se propaga a través de todas las capas de la corteza, si se supone la fuente en la superficie, se transmitirá hacia abajo llegando hasta la interface más cercana. En esta interface se obtienen los tiempos mínimos y la onda incide en esta superficie hacia atrás

retomando los puntos para recalcularlos y así toma en cuenta en este caso las reflexiones, o refracciones cuando el frente de onda se transmite.

2.9.2 Problema Inverso

Es el proceso donde se realiza un ajuste a los valores del modelo (profundidad y velocidad), tiene como objetivo disminuir el error entre los datos observados y los datos calculados. Este proceso se puede realizar mediante varios métodos, “backprojection” conocido por su nombre en inglés, métodos de gradiente y técnicas de optimización global.

El método de inversión de sub-espacio, es una técnica basada en el gradiente donde se requiere las derivadas de Fréchet. El proceso de inversión se basa en la siguiente función:

$$S(m) = \frac{1}{2}\left[\psi(\mathrm{m}) + \in \Phi(\mathrm{m}) + \eta\Omega(\mathrm{m})\right] \tag{16}$$

donde,

ϵ y η: factores de amortiguación y suavizado que dan equilibrio a la ecuación,

m: vector que representa las incógnitas que se ajustaran durante el proceso de inversión,

Ψ (m): factor que mide la diferencia entre los datos observados y los datos predichos en el modelo,

Φ (m): factor que minimiza el número de soluciones,

Ω (m): factor que determina el modelo con variaciones mínimas en la estructura, encuentra un equilibrio entre los datos observados y los datos predichos.

2.10 Modelo de velocidad 1D

Un modelo de velocidad en una dimensión (1D) de la estructura interna de la Tierra no proporciona la exactitud requerida ni todo el conocimiento de la estructura interna las capas.

2.10.1 Puerto Rico y regiones adyacentes.

En Puerto Rico existe un modelo de velocidad en 1D, pero este modelo tiene capas horizontales por lo que no representa en forma real las distintas capas de la corteza, dado que la estructura interna de la Tierra es heterogénea y anisotrópica. Por esta razón el modelaje unidimensional no toma en cuenta los cambios de velocidad, ni en profundidad que se genera al propagarse un frente de onda en todas las direcciones dentro de una determinada capa. Esta información es de vital importancia para representar mejor las diferentes capas del interior de la Tierra encontradas en la corteza terrestre, es decir su estructura interna. Lo anterior lleva a generar un modelo en 2D/3D con el cual se conocerá de manera más exacta las diferencias en velocidad bajo el área de Puerto Rico e Islas Vírgenes (Británicas y Norteamericanas).

2.10.2 Modelo de velocidad de la corteza de la Tierra en 1D

Modelo de velocidad en 1D el cual representa la velocidad de la onda P sobre la corteza de la Tierra y llega a una profundidad de 70 km en promedio, como se observa en la Figura 24. Este modelo se basó en un modelo de velocidad en 1D existente (PREM) el cual es un modelo preliminar realizado para la estructura de la Tierra.

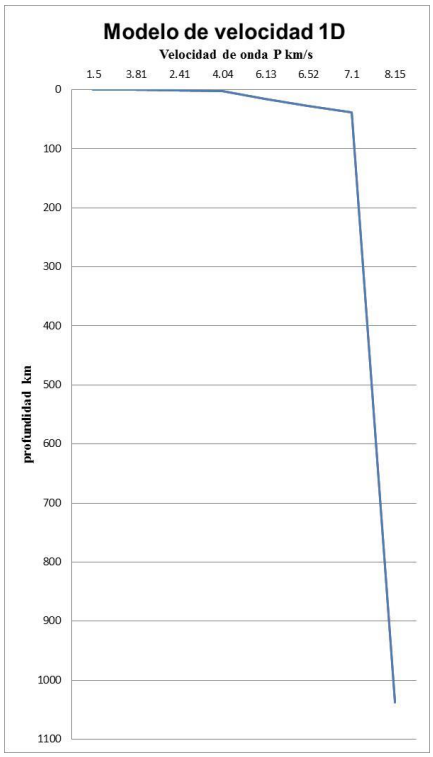


Figura 24**.** Velocidad de onda P para la región del caribe (Bassin et al, 2000).

2.10.3 Modelo de velocidad en 1D Ak135

Es un modelo de velocidad en 1D que representa las velocidades internas de la Tierra. Fue generado a partir de datos recopilados en todo el mundo, se realizó un promedio sobre las variaciones de la estructura de la Tierra en el mundo (Kennet et al., 1995; Kennet, 2006). Sus velocidades están distribuidas como se muestra en la Figura 25.

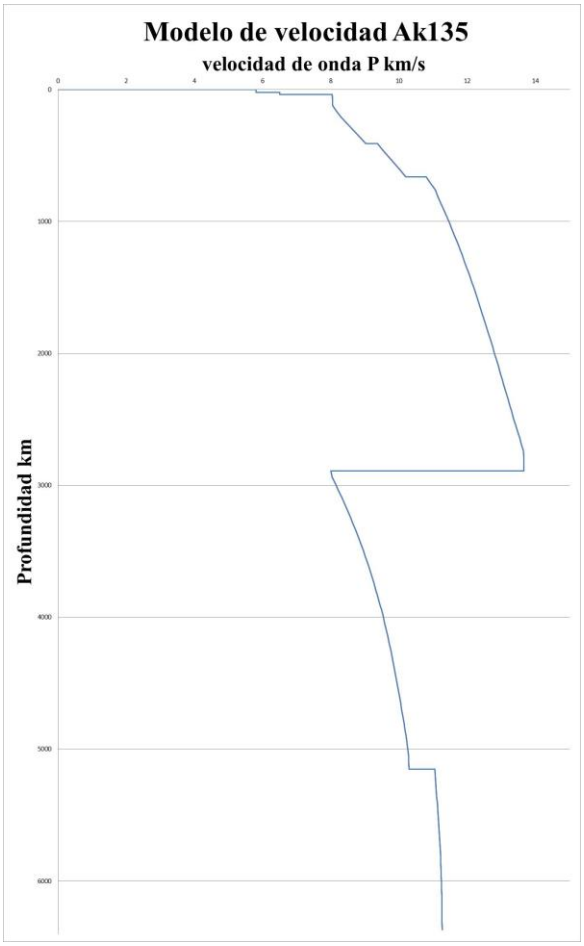


Figura 25. Modelo de velocidad ak135 de la estructura de la Tierra en 1D, (modificado Kennet et al., 1995).

3. PROGRAMA FMTOMO

3.1 Generalidades

FMTOMO trabaja en la plataforma de UNIX/Linux, es compilado en Fortran 90 y desarrollado por Rawlinson. Su procesamiento y su ejecución se basa en el manual "FMTOMO instructions", mediante tres ejemplos ayuda a comprender el funcionamiento del programa y aplicarlo para encontrar un modelo de tomografía de cualquier área (Rawlinson, 2007b).

FMTOMO está diseñado para trabajar con los tiempos de onda observados y los tiempos de onda teóricos o calculados. Realiza una comparación entre estos tiempos para determinar el resultado con el mínimo error y así obtener el modelo de velocidad más aproximado al real. Este procedimiento es posible utilizando el método del caminante FMM, el cual hace la predicción de los tiempos de viaje mediante la ecuación Eikonal, y las derivadas de Fréchet utilizadas para el proceso de inversión donde se realiza un ajuste en los datos.

El programa FMTOMO trabaja con eventos sísmicos tanto en la superficie como a profundidades mayores, también se puede incluir eventos tele-sísmicos (eventos lejanos de la región). Se representa la estructura de la Tierra mediante capas y la velocidad a través de una red de nodos que se distribuyen de acuerdo a la exactitud que se quiera obtener (Rawlinson, 2007a).

Para obtener el modelo de velocidad final, se ejecutan distintas rutinas que incluye el programa como se muestra en la Figura 26. Los tiempos de viaje se predicen utilizando una rutina llamada *fm3d* el cual calcula los tiempos de tránsito y las derivadas de Fréchet. Las derivadas de Frechet son usadas en el procedimiento de inversión el cual se encarga de ajustar los valores del modelo. Finalmente se utiliza *tomo3d*, rutina que realiza las iteraciones para ajustar los datos y con el que se obtiene el modelo de velocidad.

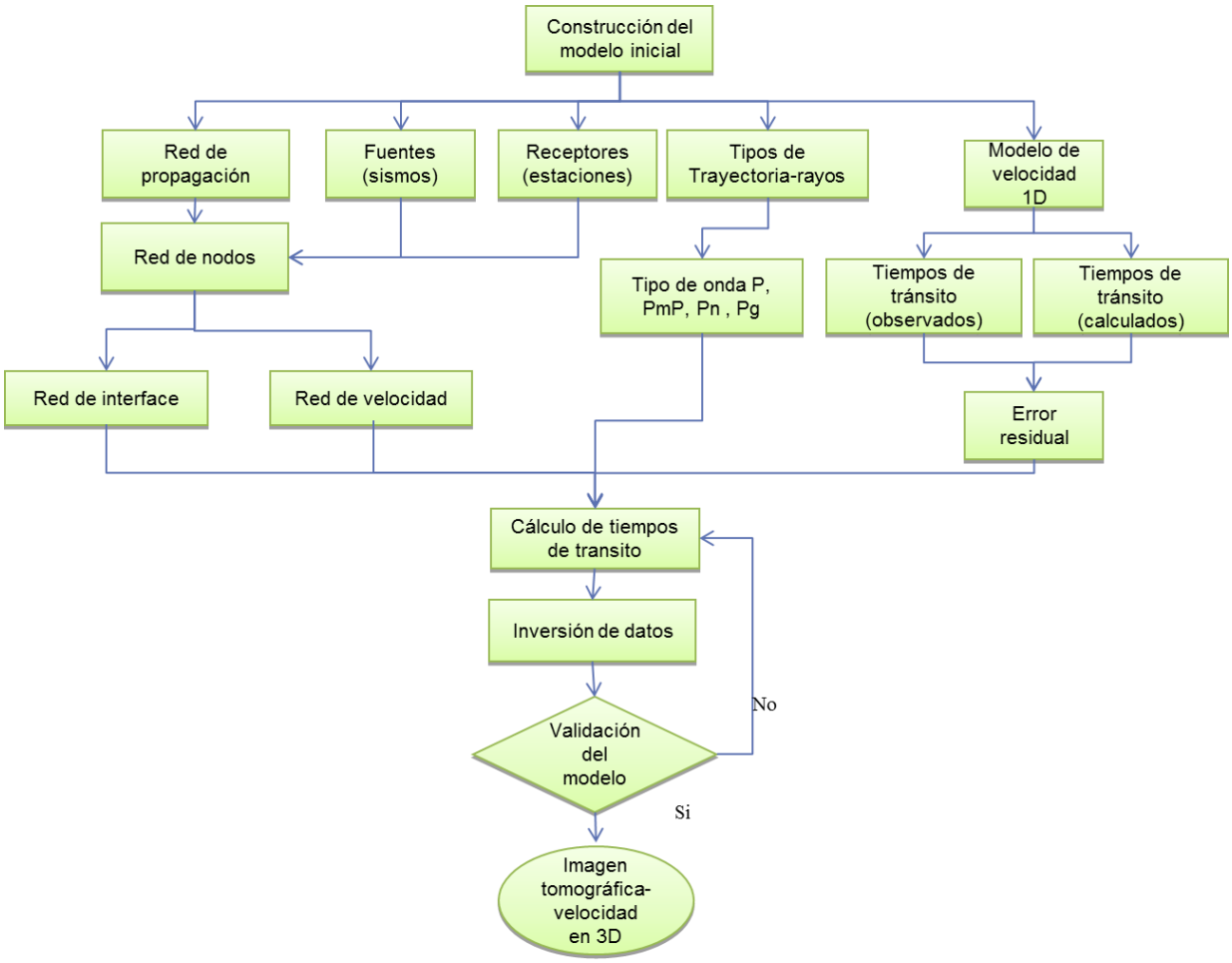


Figura 26. Resumen de ejecución de rutinas en FMTOMO para obtener el modelo de velocidad.

Para poder generar el modelo de velocidades en 3D se requiere obtener una serie de datos de entrada tales como: (1) un modelo de velocidades de una estructura de la Tierra lateralmente homogénea en 1D de la misma zona a analizar, (2) coordenadas de los eventos sísmicos y sus profundidades, (3) tiempos teóricos y observados así como el error en el picado (la resta entre los tiempos teórico y observado). Se debe definir una red de puntos o nodos en el área para la interface y la velocidad.

Con esa información se construye inicialmente el nuevo modelo donde, se define el número de capas y de interfaces, la profundidad de cada capa, el número de nodos donde se define la velocidad y la interface. Los nodos son repartidos en las tres direcciones y forman una malla de puntos que representan la latitud, longitud, y profundidad total en la que se va a construir el modelo de velocidad en 3D, esto último se conoce como un la parametrizacón del modelo y se muestra en la Figura 27.

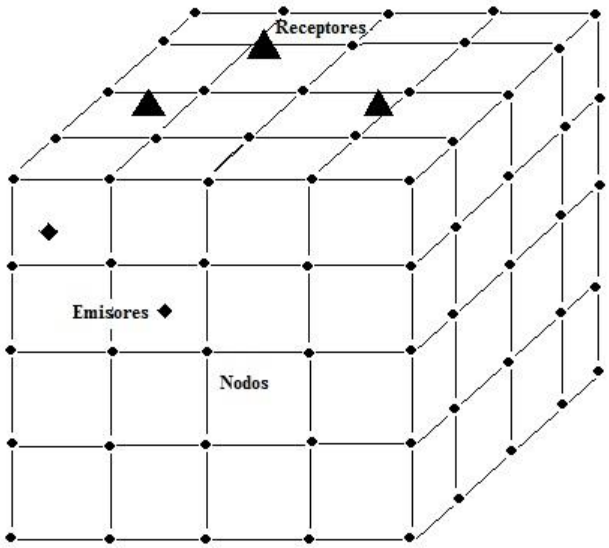


Figura 27. Parametrización del modelo en 3D.

3.2 Parametrización del modelo

La parametrización del modelo consiste en realizar una distribución de nodos de acuerdo a la Figura 28, la cual forma una malla de puntos en sus tres direcciones como la figura anterior (Figura 27), representando así la latitud, longitud y profundidad de la zona de análisis. De esta manera la estructura interna de la Tierra es representa por medio de varias capas horizontales, donde cada capa contiene una cantidad de nodos espaciados de acuerdo a la cantidad de puntos asignados.

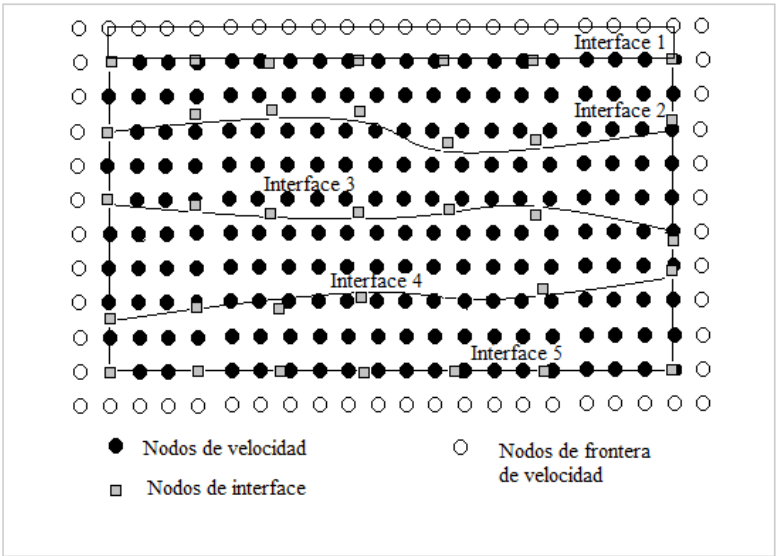


Figura 28. Representación de nodos de velocidad y de interface para varias capas, (modificado de Rawlinson, 2007a).

3.3 Subrutinas de FMTOMO

Se utiliza la subrutina con el nombre *grif3dg* el cual genera las entradas que serán utilizadas en el desarrollo del proceso de tomografía. Esta rutina genera el archivo de velocidad, fuentes y receptores en el formato requerido por el programa. Los datos de entrada

que requiere son el número de capas del modelo a generar, el tipo de onda P o S, un rango de coordenadas en latitud, longitud y profundidad del área a analizar, un modelo de velocidad en 1D, y un número de nodos en sus tres direcciones.

Es necesario otra subrutina *Obsdata* donde se establece la nomenclatura para los tipos de trayectoria de los rayos que utiliza el programa que se van a trabajar en el desarrollo del modelo, como ondas Pn, Pg, Pmp, etc. según se muestra en la Figura 29.

También se incluyen las coordenadas de las estaciones o receptores que se usan junto con el tiempo observado en cada estación, su profundidad y error en tiempo ($T_{observado}$-$T_{teórico}$) en un archivo especial para los picados.

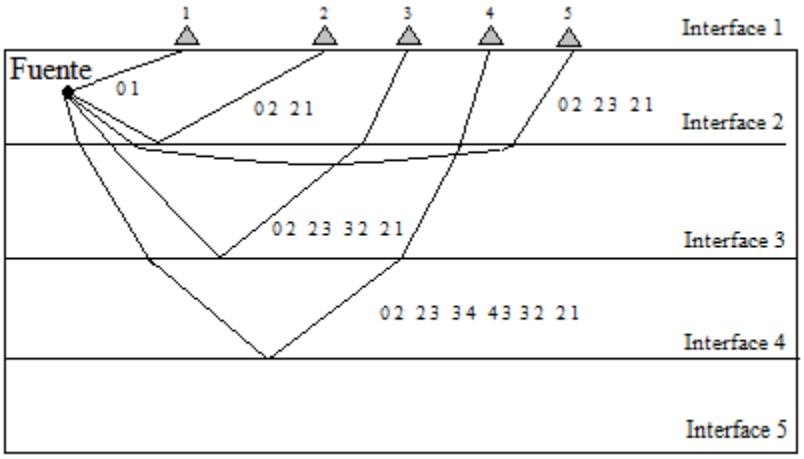


Figura 29. Configuración de trayectorias para el modelo según FMTOMO, (modificado Rawlinson, 2007a).

3.4 Solución del problema directo

Una vez se obtienen los datos especificados, se inicia con el proceso de solución. Por medio de otra subrutina llamada fm3d se resuelve el problema directo para la predicción de tiempos de viaje analizando cada nodo mediante el método del caminante FMM. Calcula el tiempo de llegada mínimo de viaje el cual va formando la interface. En esta misma rutina se calculan las derivadas de Fréchet que son usadas durante el procedimiento de inversión más adelante.

3.5 Solución del problema inverso

Para resolver el problema inverso se utiliza la subrutina *invert3d*, es donde se ajustan los valores de los parámetros del modelo con el objetivo de disminuir el error entre los datos observados y los del modelo. Se desarrolla con el método de inversión de sub-espacio, el cual requiere las derivadas de Fréchet para describir el cambio en los tiempos de transito con respecto a los parámetros del modelo.

La metodología que utiliza el programa es basado en la siguiente función:

$$S(m) = \frac{1}{2}\left[\psi(\mathrm{m}) + \in \Phi(\mathrm{m}) + \eta\Omega(\mathrm{m})\right] \tag{17}$$

La función S(m) se encarga de realizar el ajuste de datos del modelo, los parámetros ϵ, η, m, ψ(m), Φ(m) y Ω(m) fueron definidos en el capítulo 2 (Rawlinson and Urvoy, 2006; Rawlinson and Sambridge, 2003).

3.6 Tomografía

Finalmente utilizando las rutinas anteriores se construye el modelo de tomografía mediante un programa que ejecuta todas las rutinas mencionadas para el problema directo e inverso de manera iterativa haciendo así un ajuste de los datos (tomo3d). Exceptuando *grid2dg, obsdada* que deben correrse antes para obtener los parámetros iniciales.

Aquí se genera un archivo de datos en el cual se visualiza el número de iteraciones realizadas con una disminución en los errores determinados por el tiempo de viaje residual RMS (ecuación 9), la varianza la cual se determina por la ecuación (18), y un valor asociado a cada modelo X^2 como se presenta en la ecuación (19):

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n} \tag{18}$$

$$X^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{d_m^i - d_{obs}^i}{\sigma_d^i}\right)^2 \tag{19}$$

donde, en la ecuación (18) x_i representa los tiempos de viaje, $\bar{x}$ es el promedio de los tiempos de viaje, y n el número de datos. En la ecuación (19), d^i_m son los datos teóricos, d^i_{obs} son los datos observados y σ^i_d son las incertidumbres en los tiempos.

El valor de X^2 se utiliza para determinar cuándo el proceso de iteración se detiene. Sin embargo si este valor no alcanza valores menores o iguales a 1, se utilizan estimaciones estadísticas como la varianza para detener el proceso de iteración en el programa. Se verifica que la varianza en la iteración *m* sea diferente a la varianza dada en la iteración *m+1*, siendo

m el número de iteraciones esta diferencia debe ser decreciente. Así en cada iteración se debe observar una disminución del valor de la varianza junto con el RMS.

El modelo de velocidad en 3D se visualiza mediante el programa GMT (Generic Mapping Tool, por sus siglas en inglés) por medio de un script que genera las gráficas, se obtienen los cortes transversales Este-Oeste (E-W), Norte-Sur (N-S) y profundidad mostrando la tomografía en 3D para el área. Este proceso se resume en la Figura 30 donde se presentan los resultados de tomografía para la estructura interna de la Tierra bajo Tasmania.

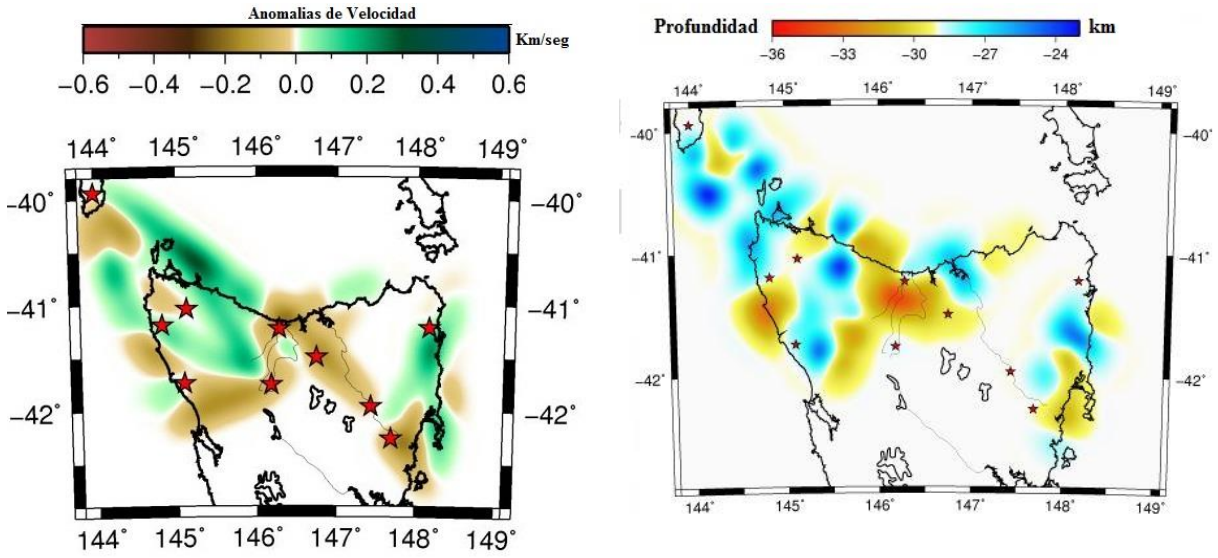


Figura 30**.** Resultados de tomografía para Tasmania, a la izquierda una vista en planta de las anomalías de velocidad, y a la derecha vista en planta de las variaciones en profundidad (Rawlinson and Urvoy, 2006).

4. METODOLOGÍA

La Red Sísmica de Puerto Rico (RSPR) obtiene la localización revisada de los eventos sísmicos, mediante EarlyBird (EB), EarthWorm (EW) y el programa PRDANIS. Este programa fue adaptado en la RSPR en el 2004, en el cual se registran los tiempo arribo o tiempos de llegada a cada estación de todas las fases de onda ocurridos en la región, su localización se obtiene a partir del modelo de velocidad en 1D que consta de cinco capas horizontales en dirección vertical Z (profundidad), con velocidades en una dimensión en cada capa como se vio en la Figura 4 (Huérfano, 1994).

Con el fin de adquirir un mejor conocimiento de la corteza y estructura geológica del área de Puerto Rico, se identifican las distintas velocidades de onda mediante el análisis de sus fases de onda sísmica. Al presente muchos investigadores han realizado distintos estudios de la estructura interna de la Tierra (Rawlinson and Sambridge, 2004; Rawlinson and Urvoy, 2006; Kool et al., 2006; Rawlinson and Sambridge, 2008), donde se puede identificar y visualizar las distintas profundidades y sus respectivas velocidades en 3D utilizando el análisis de ondas sísmicas o por Método de Tomografía.

Para obtener los datos de entrada que requiere FMTOMO es necesario utilizar distintos programas, por ejemplo se utiliza PRDANIS para obtener la localización de los eventos sísmicos, de donde se extrae el tiempo de origen del sismo y el primer tiempo de llegada de la onda a cada estación (onda P), para conocer los tiempos teóricos de las demás fases de onda reflejadas en las capas de suelo se utilizó el programa Terrasa desarrollado por

Vizrsoft (2012). De la base de datos de la RSPR se extraen los datos de cada evento sísmico como sus coordenadas, profundidad, magnitud, primer tiempo de llegada, y nombre de estaciones que detectaron el evento.

En la Figura 31 se observa una estación con la localización de la onda P y la onda S, de ahí junto con el resto de estaciones se obtiene la localización final según se muestra en la Figura 32, con esta información es posible extraer los primeros tiempos de llegada (TOBS) de la onda P a cada estación.

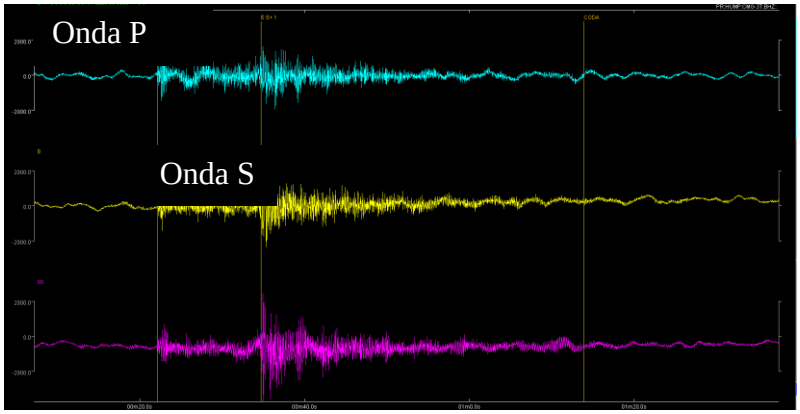


Figura 31. Evento sísmico 2013-01-21 para la estación de HUMP Humacao, (salida de programa PRDANIS, 2013).

```
YEAR MO DA  --ORIGIN--  --LAT N-  --LON W--  DEPTH   RMS   ERH   ERZ  XMAG  FMAG  PMAG  INT
2009-05-20  2149 11.73  18 51.93   64 41.95  46.56  0.20  5.05  6.68  5.62  3.36  3.36D
                                                                                   SOURCE
NSTA NPHS  DMIN MODEL GAP ITR NFM NWR NWS NVR REMRKS-AVH  N.XMG-XMMAD-T   N.FMG-FMMAD-T  L F X
  11   12  50.4  PR1  280  21   7  12   5  12     Q# PPE   1.00  0.00      5.00  0.15 D

XMAG2-N.XMG2-XMMAD-T-S  FMAG2-N.FMG2-FMMAD-T-S  PREF.MAG-N.PMAG-PRMAD-T
 5.62   1.00  0.00 L     3.36   5.00  0.15 Z        3.36   5.00  0.15 D

REGION= Virgin Islands Platform

STA NET COM CR DIST AZM  AN P/S WT   SEC (TOBS -TCAL -DLY  =RES)  WT   SR  INFO  CAL DUR-W-FMAG-T -AMP-U-PER-W-XMA
TBVI PR SHZ  A 50.4 170 127 EP- 1  21.14  9.41  9.73 0.00 -0.32 1.01     0.341 1.40  63   2.83 Z 36962C1.00   5.6
                            ES  1  29.13 17.40 17.32 0.00  0.08 1.01S    0.550
STVI PR BHZ  A 62.9 206 120 EP+ 1  22.55 10.82 11.04 0.00 -0.22 1.01     0.141 0.00  67   3.18 Z
STVI PR BHN  A 62.9 206 120 ES  1  31.26 19.53 19.65 0.00 -0.12 1.01S    0.388
MTP  PR BHZ  A123.9 227 105 EP- 1  29.95 18.22 18.21 0.00  0.01 1.01     0.258 0.73  89   3.51 Z
MTP  PR BHE  A123.9 227 105 ES  1  44.05 32.32 32.41 0.00 -0.09 1.01S    0.631
CBYP PR BHZ  A138.7 242 103 EP+ 1  31.67 19.94 20.03 0.00 -0.09 1.01     0.251 0.00  79   3.41 Z
CBYP PR BHN  A138.7 242 103 ES  1  47.08 35.35 35.65 0.00 -0.30 1.01S    0.566
HUMP PR BHZ  A145.5 237 102 EP+ 1  32.42 20.69 20.86 0.00 -0.17 1.01     0.160 0.73  74   3.36 Z
HUMP PR BHN  A145.5 237 102 ES  1  48.61 36.88 37.13 0.00 -0.25 1.01S    0.273
CPD  PR BHZ  A157.8 235 101 EP+ 1  34.43 22.70 22.39 0.00  0.31 1.01     0.212
CRPR PR BHZ  A271.9 250  96 EP+ 1  48.39 36.66 36.67 0.00 -0.01 0.88     0.223
```

Figura 32. Localización de eventos (salida del programa PRDANIS, 2011).

Es necesario obtener el tiempo de las otras fases, por esta razón se utiliza el programa Terrasa. Este programa permite trabajar con el modelo de velocidades en 1D y genera los tiempos de llegada para las diferentes capas de suelo como se aprecia en la Figura 33, Terrasa proporciona el tiempo que se demora la onda en reflejarse en cada capa tomando los eventos sísmicos en la superficie.

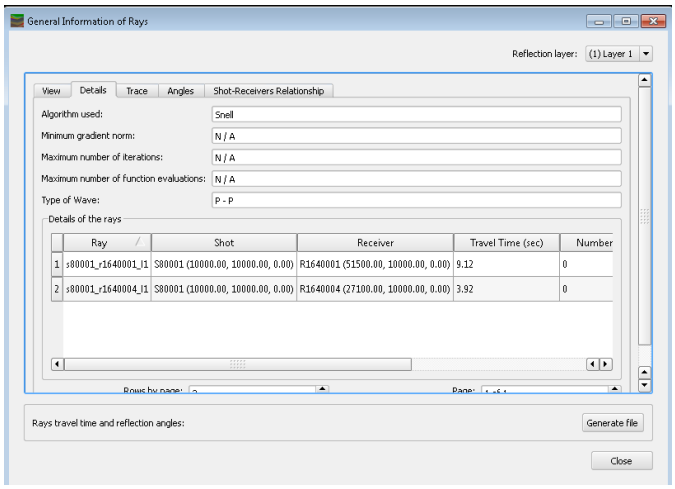


Figura 33. Arribos en una estación (salida del programa Terrasa, 2013).

Dado que se trabaja con eventos sísmicos a diferentes profundidades se requiere hacer una corrección del tiempo por profundidad.

Esta corrección se realiza por simplicidad en el cálculo del tiempo a través de las capas así:

$$d = vt \tag{20}$$

$$t = \frac{\mathrm{d}}{v} \tag{21}$$

donde la *d* es la distancia vertical de cada capa, y *v* es la velocidad en cada capa del modelo de velocidad en 1D. De esta manera según la profundidad del evento sísmico se va ajustando el tiempo por profundidad.

El desarrollo de la metodolgia que que se llevó a cabo desde el inicio de la investigacion se puede ver en la Figura 34. En el cual inicialmente se realizó una revisión de literatura, seguido de esto se buscó en la base de datos de sismos de la RSPR eventos con características similares basados en algunos criterios, del cual se extrajo la información de los tiempos teóricos de las primeras llegadas de la onda P, seguido de esto se ajustó el modelo de velocidad de Puerto Rico en las últimas capas de acuerdo al modelo de velocidad ak135, se utilizó un programa para determinar los tiempos teóricos basados en el modelo ajustado incluyendo únicamente reflexiones en cada capa, se realizó un alineamiento de las estaciones que detectaron el evento de acuerdo a la distancia epicentral con el fin de poder ubicar los tiempos teóricos y detectar los tiempos observados, con lo que se obtiene el error residual.

Finalmente se especifica el tipo de trayectoria a tener en cuenta, se define la malla en donde se trabaja y se ejecuta el programa para obtener el modelo de velocidad en 3D.

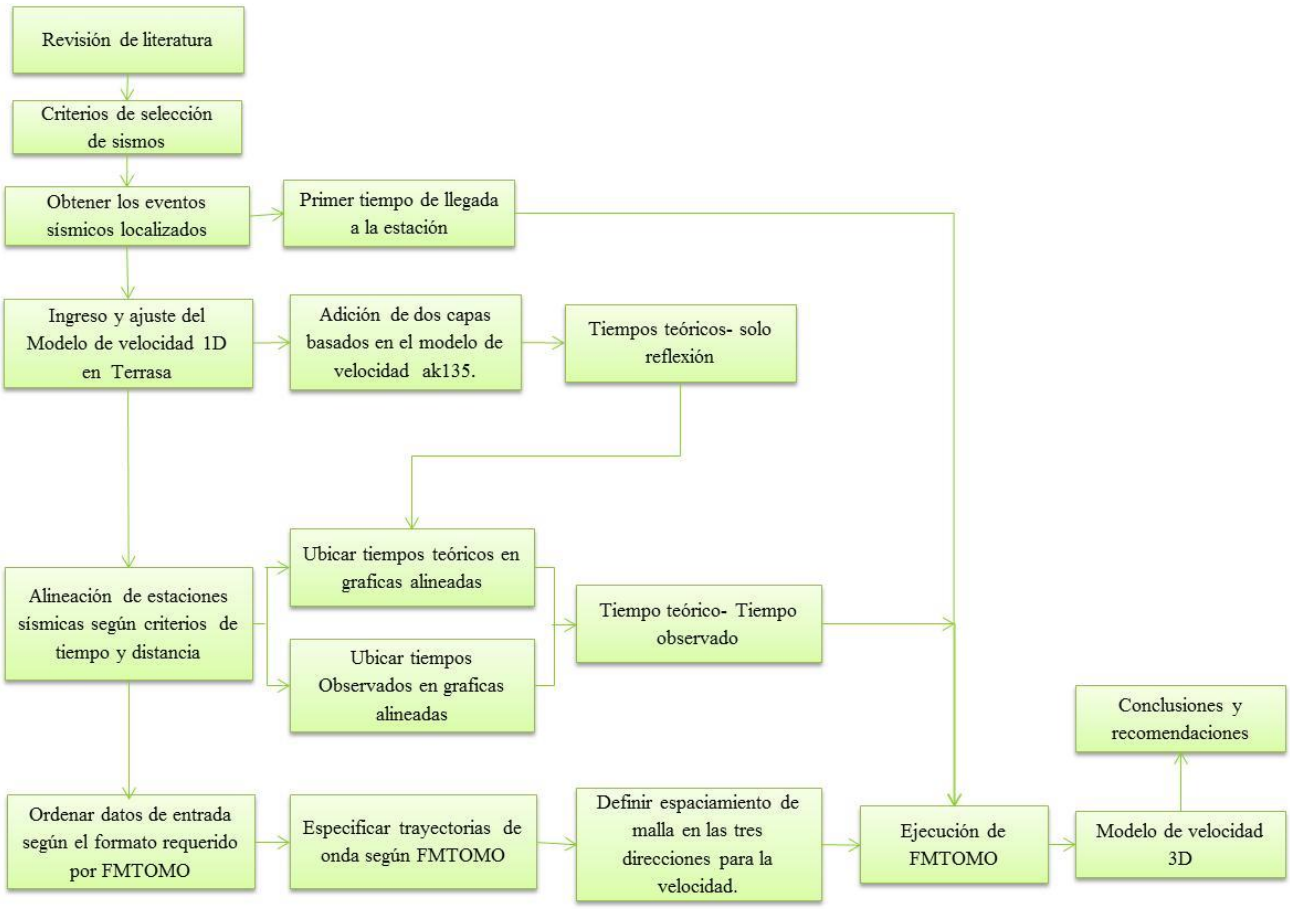


Figura 34. Metodología de investigación.

4.1 Selección de datos

Se realiza una selección de los eventos sísmicos del área mediante el programa "extractor" (Huérfano and Torres, 2012) el cual realiza un filtro en la base de datos según sus características en la localización. Se escogieron 35 eventos sísmicos según los siguientes criterios:

- Eventos sísmicos locales entre las coordenadas, latitud: 17.0 a 19.0 y longitud: -63.5 a -69.0 por debajo de Puerto Rico.

- Fases sísmicas de fácil identificación de las ondas en cada evento.

- Magnitud entre 2.5 y 3.5.

- Profundidad del sismo. Profundidades no mayores a 40 km.

- Número de estaciones en la localización. Mínimo tres estaciones.

Se divide en 7 regiones para obtener un análisis por áreas, donde cada región consta de 5 eventos sísmicos como en la Figura 35.

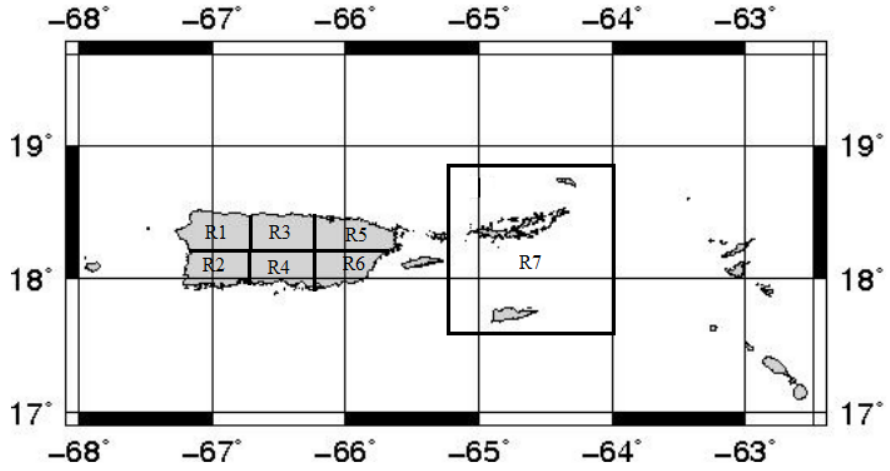


Figura 35. División de Puerto Rico entre 7 regiones.

4.2 Ajuste del modelo de velocidad en 1D

Se realiza un ajuste al modelo de velocidad en 1D de Puerto Rico incrementando la profundidad. Se adicionan dos capas a este modelo según el modelo de velocidad ak135

hasta llegar a 77.5 km en profundidad. En la Figura 36 se observa el modelo de velocidad adicionado en Terrasa con 6 capas, al cual se le realizo un ajuste en las dos últimas capas, y en la Figura 37 se observan las capas en Terrasa con sus respectivas velocidades y profundidades en cada capa desde la superficie.

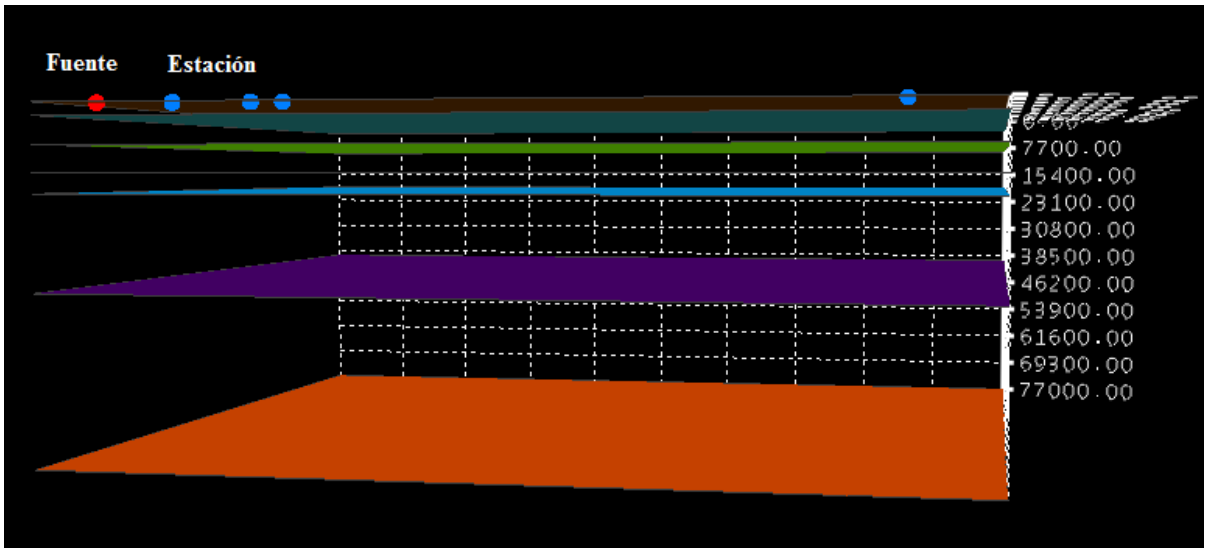


Figura 36. Modelo de velocidad en 1D (salida del programa Terrasa, 2013).

	Color	Depth Z Interval (mts)	Velocity
(1) Layer 1		[2600.00, 2600.00]	Vp (m/s) = 4500.00 Vs (m/s) = 3460.00
(2) Layer 2		[8000.00, 8000.00]	Vp (m/s) = 5500.00 Vs (m/s) = 3460.00
(3) Layer 3		[14000.00, 14000.00]	Vp (m/s) = 6500.00 Vs (m/s) = 3460.00
(4) Layer 4		[20000.00, 20000.00]	Vp (m/s) = 7100.00 Vs (m/s) = 3460.00
(5) Layer 5		[35000.00, 35000.00]	Vp (m/s) = 7900.00 Vs (m/s) = 3850.00
(6) layer 6		[77500.00, 77500.00]	Vp (m/s) = 8040.00 Vs (m/s) = 4480.00

Figura 37. Velocidades del modelo de velocidad de 1D, ajustado con ak135 (salida del programa Terrasa, 2013).

4.3 Tiempos teóricos

Una vez se obtiene el modelo de velocidad en Terrasa se procede a encontrar los tiempos de llegada teóricos de la onda. Inicialmente se extrae de la Figura 32 los tiempos teóricos a cada estación generados por PRDANIS, que son los primeros arribos, seguido de esto se ubica el evento y las estaciones en Terrasa en el modelo de velocidad 1D. Se corre el programa y se extraen los tiempos teóricos de reflexión generados en cada capa hacia cada estación, este proceso se aprecia en la Figura 38 y Figura 39.

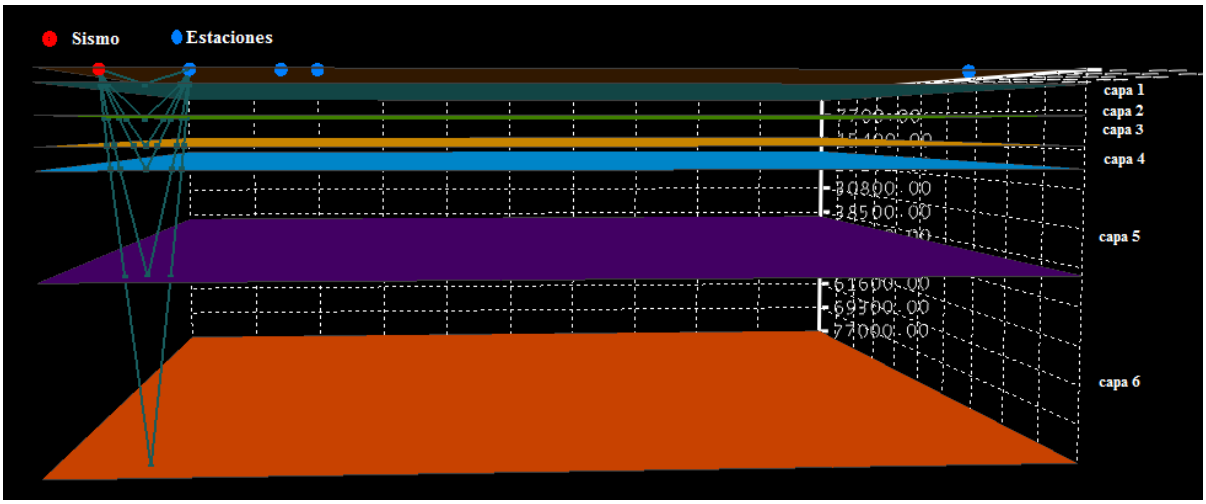


Figura 38. Reflexiones para una fuente y un receptor (salida del programa Terrasa, 2013).

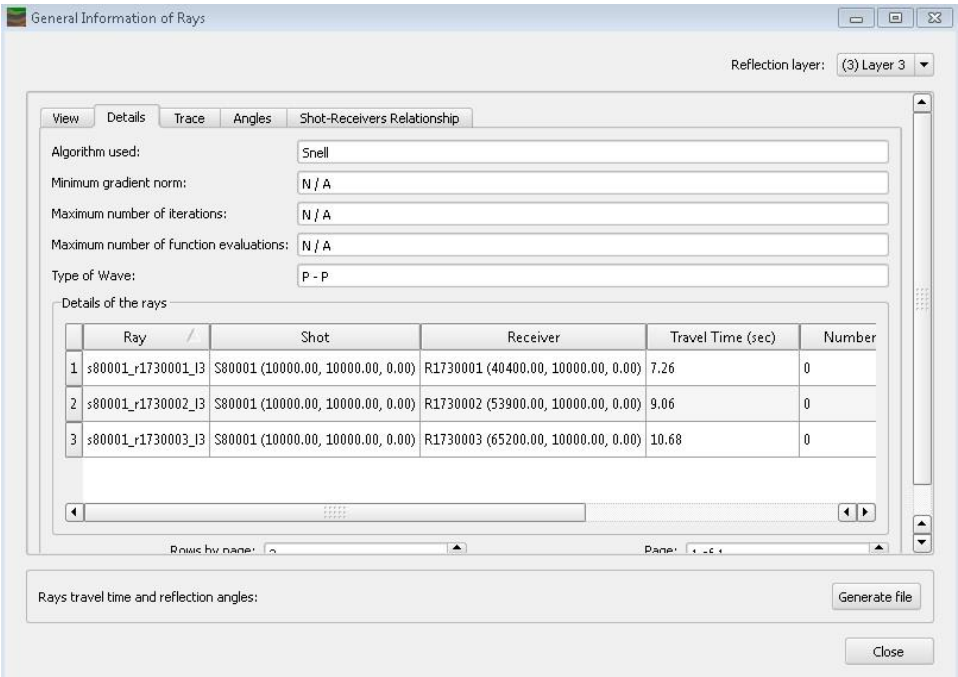


Figura 39. Tiempos de viaje de la onda P para la capa 3 (salida del programa Terrasa, 2013)

4.4 Alineamiento de estaciones

Para lograr identificar mejor la llegada de las fases de onda en cada estación, se necesita ordenar las estaciones. Se ordenan según su distancia epicentral en el eje vertical y según el tiempo de origen en el eje horizontal, esto es posible mediante el programa Lineator (Huérfano and Torres, 2013) se grafica con el programa Gnuplot como se observa en la Figura 40**.**

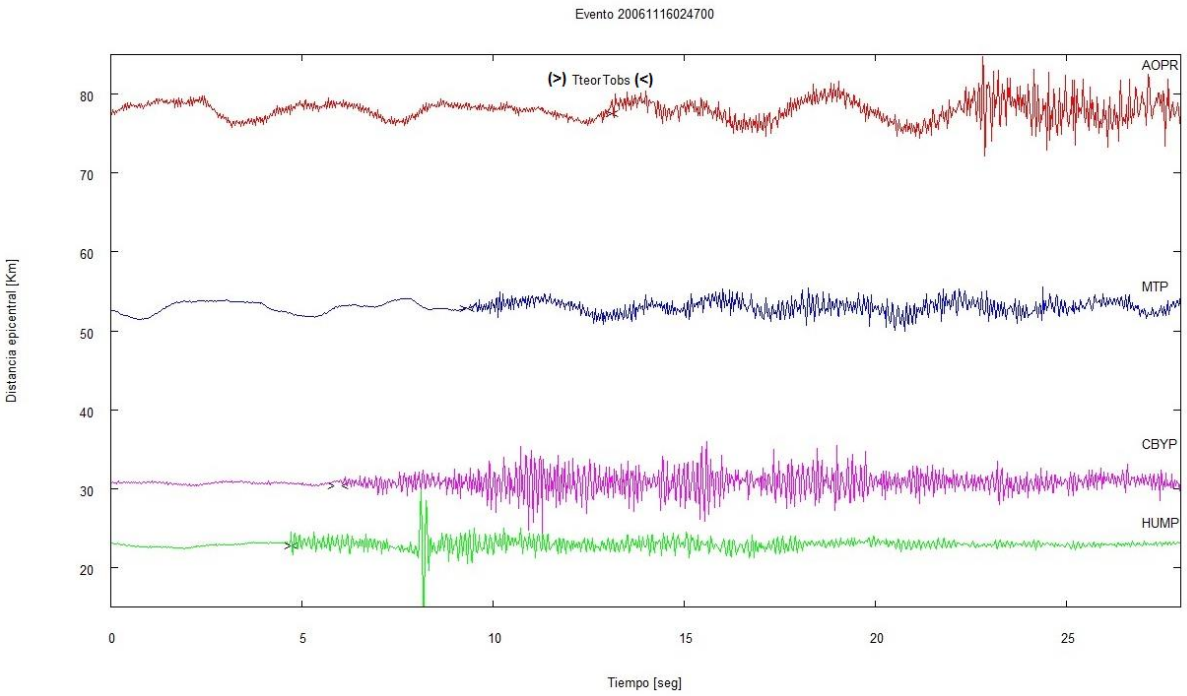


Figura 40. Alineación de eventos sísmicos, evento de 16 de noviembre de 2006 (salida del programa Gnuplot, 2013).

4.5 Tiempos observados

Después de obtener los tiempos teóricos es necesario identificar visualmente los tiempos de las otras fases. Se localiza el tiempo de la fase de onda para compararlo con el tiempo teórico calculado con PRDANIS, de manera que se obtenga la diferencia entre el tiempo observado y el tiempo teórico, T_{teo}-$T_{obs.}$

Los tiempos de viaje de onda se ordenan en formatos especiales que requiere el programa FMTOMO, esto se realiza mediante otro programa llamado extractor (Huérfano, and Torres, 2012) obteniendo así los datos de entrada.

Una vez finalizado el proceso de adquisición de datos se crea las trayectorias de onda que se van a utilizar en el modelo. La asignación de las trayectorias depende de la profundidad del evento, dependiendo de su profundidad e interfaz que se encuentre el evento se asignan números de acuerdo al formato establecido previamente por FMTOMO, así es posible reconocer los tipos de ondas viajando a través de la corteza terrestre, según se muestra en la Figura 41.

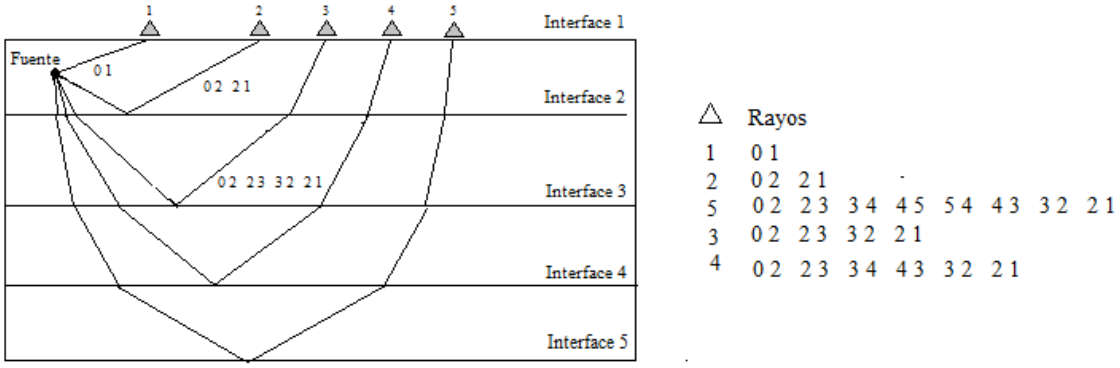


Figura 41. Reflexiones en cada capa a través de la estructura de la Tierra (modificado de Rawlinson, 2007a).

Finalmente se construye una malla de puntos en 3D para la velocidad y la interface para FMTOMO, donde se van a ubicar todos los eventos junto con las estaciones sísmicas como se muestra en la Figura 42. Con esta información se construye el modelo de velocidades en 3D, en el cual se va a observar las variaciones de las velocidades bajo el área elegida, esta variación es representada mediante múltiples colores en todas las direcciones (Norte-Sur, Este-Oeste, y profundidad).

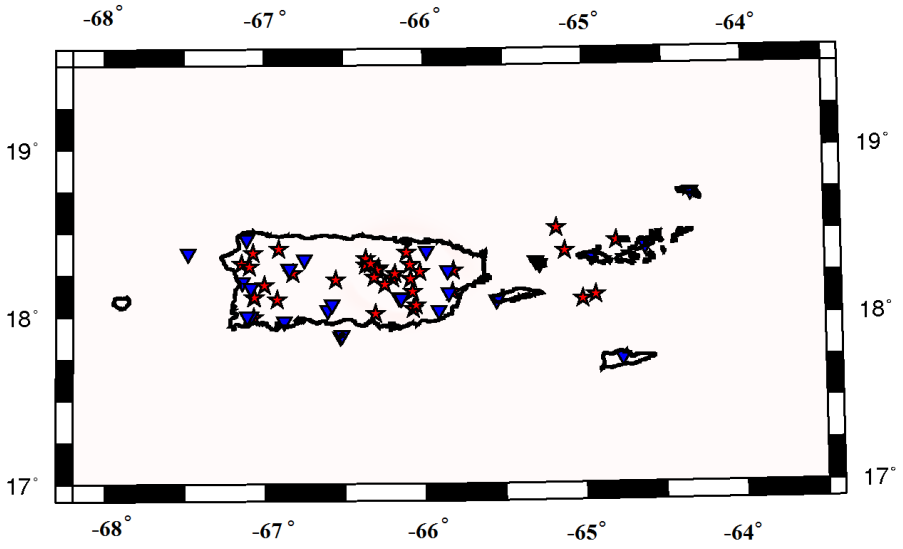


Figura 42. Mapa de eventos y estaciones incluidas en el estudio de tomografía para Puerto Rico e Islas Vírgenes (Británicas y Norteamericanas).

5. SELECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

5.1 Selección de datos

Según lo especificado en el capítulo de metodología, la selección de los eventos sísmicos para la región 7 según las características especificadas y localizaciones de la RSPR se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Eventos sísmicos seleccionados para la Región 7.

REGIÓN 7								
LATITUD	**LONGITUD**	**PROF**	**MAG**	**RMS**	**ERH**	**ERZ**	**GAP**	**N.ESTA**
18.448	-64.802	4.2	2.8	0.08	1.86	1.9	162	9
18.389	-65.125	21.7	3	0.09	1.8	1.06	185	7
18.523	-65.175	7.1	2.85	0.13	0.72	1.02	185	12
18.125	-64.931	19.5	2.96	0.23	0.61	1.16	113	13
18.099	-65.014	3.8	2.92	0.23	0.69	1.15	129	8

5.2 Determinación de tiempos de transito teóricos

Después de realizar el filtro en la base de datos de la RSPR para obtener todos los eventos sísmicos en las regiones, se determina para cada evento la distancia desde la estación hasta el evento. Luego, se ubica las distancias desde el evento a la estación en el programa Terrasa para generar los tiempos de transito de reflexión de acuerdo a la Figura 41 con el modelo de velocidad de 1D previamente establecido. Un evento procesado se muestra en las Tabla 2,Tabla **3**, yTabla **4**.

Tabla 2. Características del evento.

EVENTO	19/04/2010
PROFUNDIDAD EVENTO	7.1
LATITUD	18.523
LONGITUD	-65.175
MAGNITUD	2.85
HORA DE ORIGEN (h:m:s)	08:25:54.33

Tabla 3. Tiempos de tránsito de la onda P en el modelo (salida del programa Terrasa).

Tiempos de Terrasa (desde la superficie) [seg]				
ESTACION[km]	**STVI-30.1**	**MTP-61.8**	**CBYP-77.2**	**HUMP-82.9**
C2	6.57	12.09	14.85	15.88
C3	7.22	11.65	13.95	14.81
C4	8.28	11.98	14.02	14.79
C5	11.35	13.8	15.33	15.93
C6	21.41	22.6	23.43	23.78

Tabla 4. Tiempos de tránsito de la onda P corregidos.

Tiempos seleccionados corregidos en profundidad (Onda P) [seg]				
ESTACION[km]	**STVI-30.1**	**MTP-61.8**	**CBYP-77.2**	**HUMP-82.9**
C2				
C3	5.82			
C4	6.88	10.58		
C5	9.95	12.40	13.93	14.53
C6			22.03	22.38

Estos tiempos teóricos se localizan en una gráfica tiempo vs distancia epicentral en cada estación que detectó el evento. Posteriormente de ubicar los tiempos teóricos, se ubican los tiempos observados en todas las estaciones del evento.

5.3 Identificación de tiempos de llegada observados

Los tiempos de Terrasa se ubican posteriormente en las gráficas generadas con Gnuplot (Williams, T. and Kelley, C., 2004), donde se ubican las primeras llegadas de la onda P y los tiempos generados por Terrasa de cada evento. Visualmente se determinan los tiempos de transito observados (pickobs) como se muestra en la Figura 43.

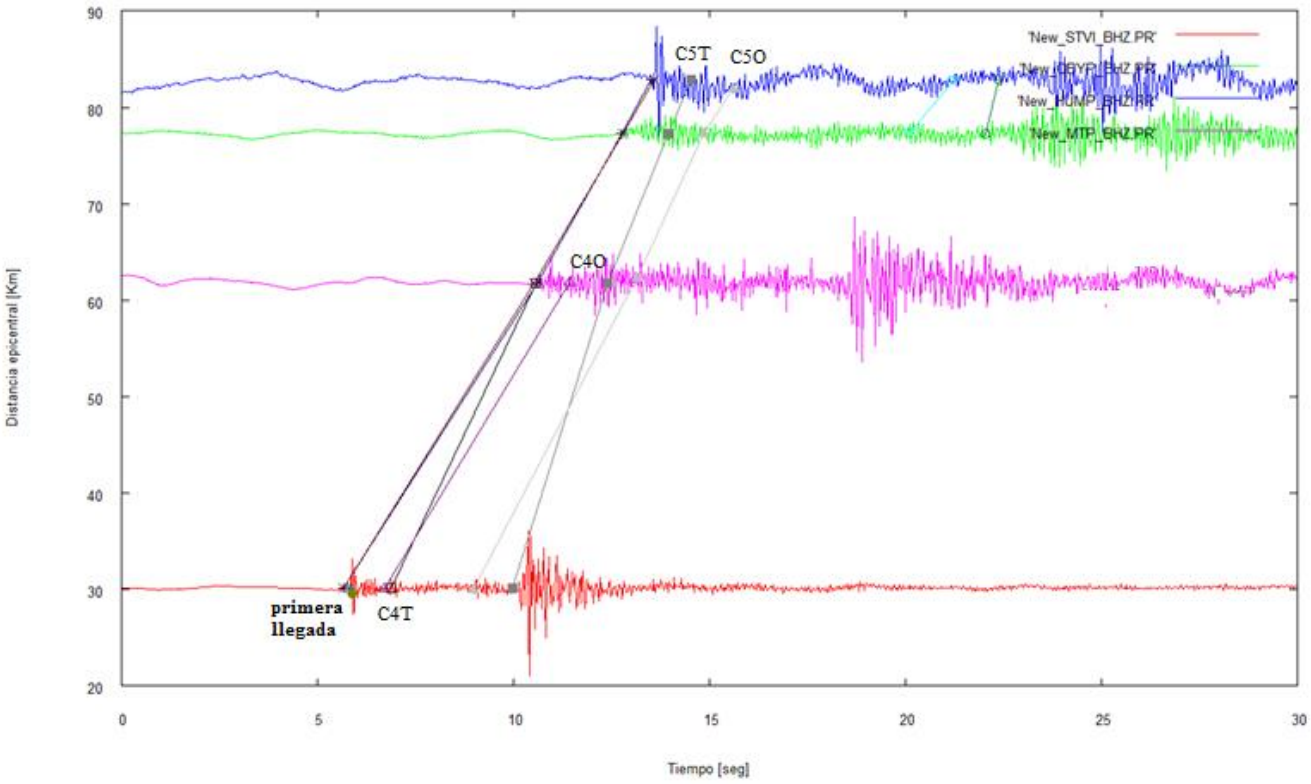


Figura 43. Tiempos teóricos y observados en un evento con cuatro estaciones (salida del programa Gnuplot, 2013).

Luego de establecer el tiempo observado, se obtiene la diferencia entre ambos tiempos $T_{observado}$-$T_{calculado}$.

5.4 Datos de entrada

El valor de $T_{observado}$-$T_{calculado}$ obtenido es el error de la fase observada y teórica en la estación. Este es un dato de entrada para FMTOMO el cual va a ser reducido mediante el proceso de inversión de datos.

Se establece los datos de entrada en FMTOMO de la siguiente manera:

- Rango de latitud (N-S) de red en grados: 17 a 19.5 equivale a 277.75 km si tomamos 1 grado como 111.11km.
- Rango longitudinal (E-W) de red en grados: -68.2 a -63.5 equivale a 522.217 km si tomamos 1 grado como 111.11km.
- Profundidad de todas las capas: 80 km.
- Número de capas 6
- Número de interfaces 7
- Modelo de velocidad 1D de Puerto Rico para las primeras 5 capas.
- Modelo de velocidad ak135 para las dos capas finales.
- Número de nodos 11x31x58 = 19778

- Distancie entre nodos (profundidad, latitud y longitud): 7.31 km, 8.96 km, 9.0 km Una representación del cubo en donde se analizan los datos se muestra en la Figura 44 y Figura 45.

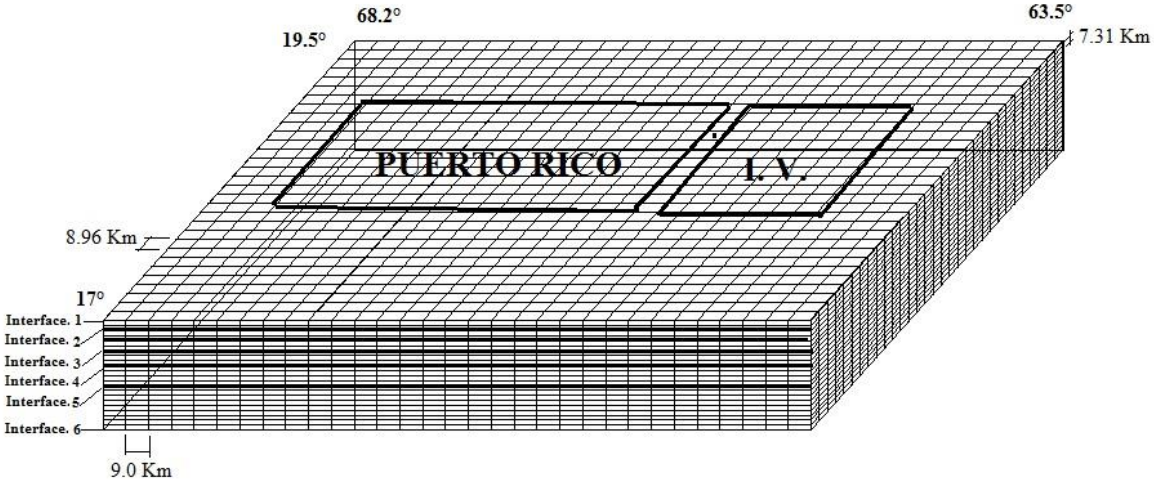


Figura 44. Red de nodos en 3D, 7 interfaces para 6 capas.

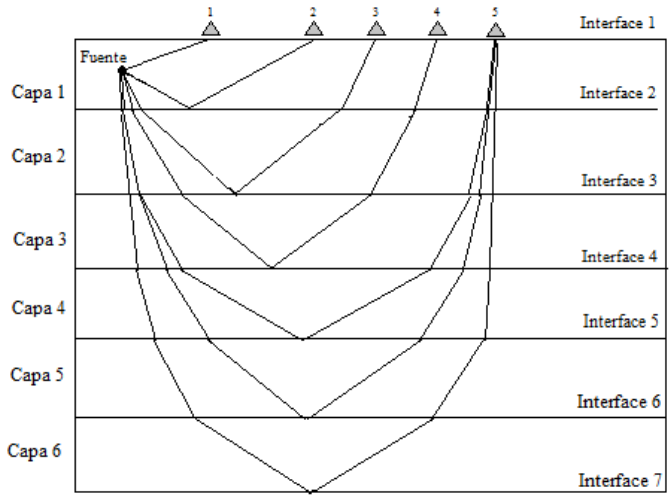


Figura 45. Número de interfaces, trayectorias y capas utilizadas.

En la Tabla 5 se observa los picados en las estaciones, estos corresponden a los tiempos de la primera llegada de la onda P, de izquierda a derecha se muestra la latitud,

longitud, profundidad de cada estación donde se observa la fase, tiempo de la primera llegada de la onda P en la estación y Tobservado-Tteórico o error entre los tiempos, y son presentados en el formato requerido por FMTOMO:

Tabla 5. Picados de onda P primer arribo para evento en la región 7

9 números de picados

Latitud	Longitud -	Profundidad -	Tiempo -	Error
18.35200	295.04401	1.25	3.830	-0.02
18.41500	295.38101	0.00	4.010	0.05
18.73000	295.66699	0.00	10.260	0.01
17.75200	295.23401	0.15	14.510	1.40
18.14200	294.15100	0.91	18.380	0.26
18.11160	293.85001	3.00	22.430	0.31
18.34700	293.24600	0.30	28.990	-0.61
18.46700	292.88901	0.91	34.840	0.50
18.00600	292.89001	0.91	34.530	-0.44

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 Región 1- región Nor-Oeste de Puerto Rico

Red de propagación en profundidad, latitud y longitud 11x31x58 respectivamente.

Número de nodos 11 x 31 x 58 = 19778

Distancia entre nodos (profundidad, latitud y longitud): 7.31 km, 8.96 km, 9.0 km.

Según el análisis de errores de la Figura 18, coincide con los resultados obtenidos ya que en el lado Nor-Oeste aparecen zonas con anomalías negativas, tanto en el gráfico de resultados como en el gráfico de análisis de errores mencionado anteriormente.

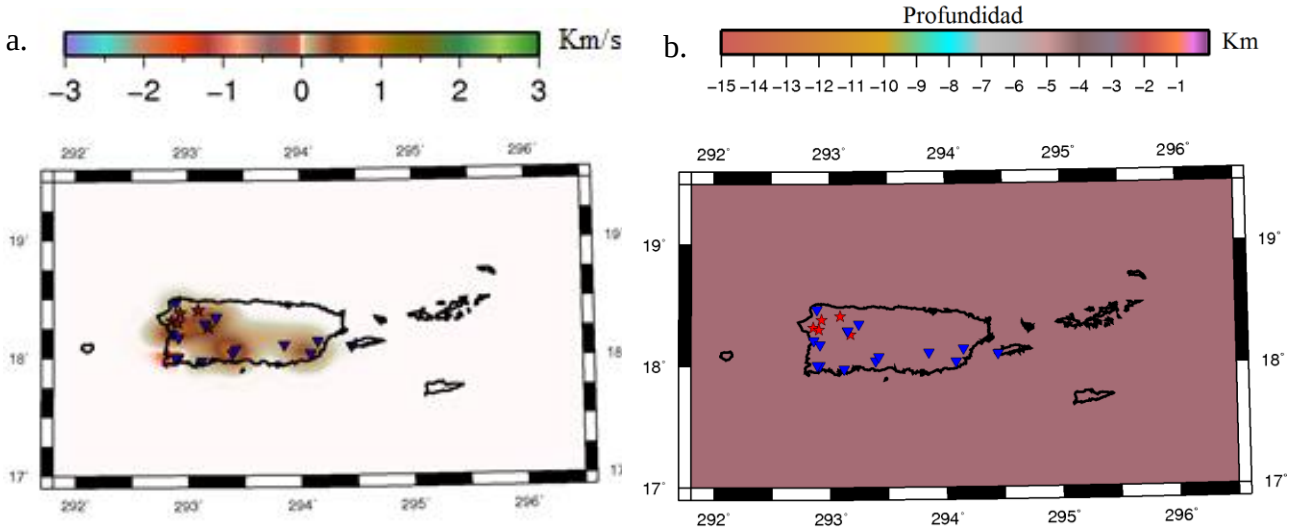


Figura 46. Vista en planta para Región 1: (a) presenta anomalías de velocidad a 5km de profundidad, (b).variaciones en profundidad.

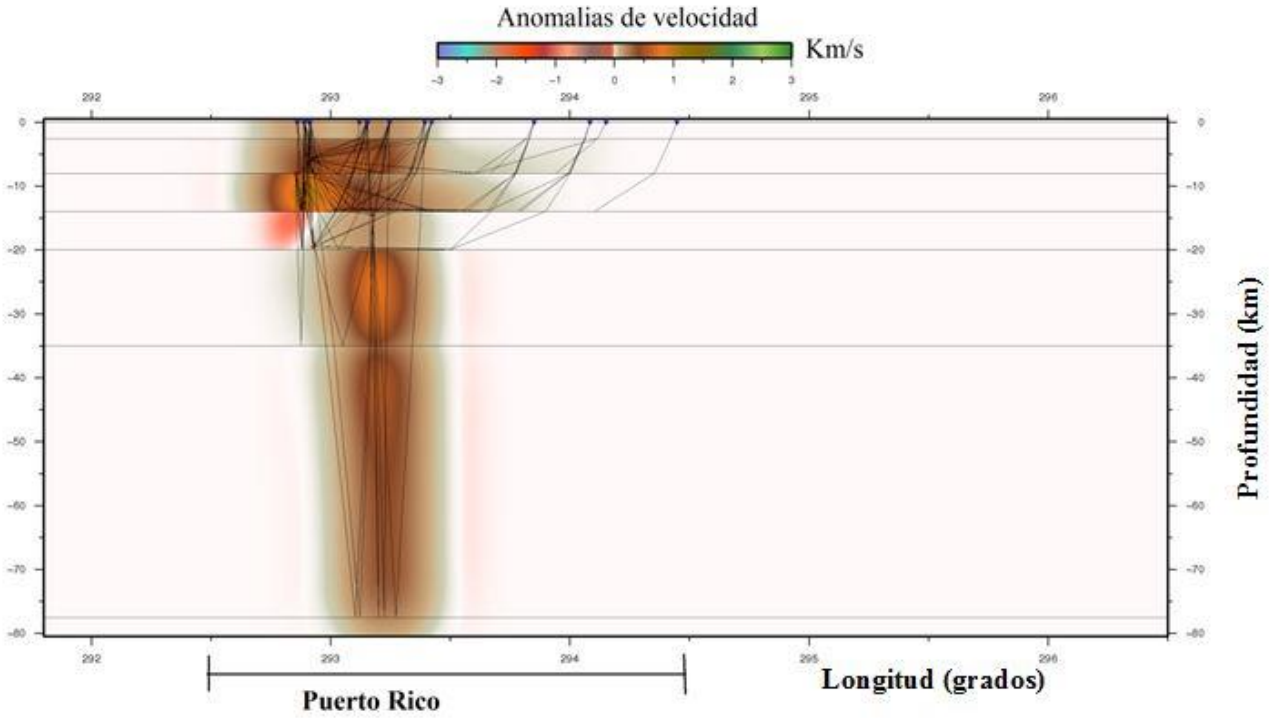


Figura 47. Corte longitudinal para la Región 1, Este-Oeste (EW) en la latitud 18.3.

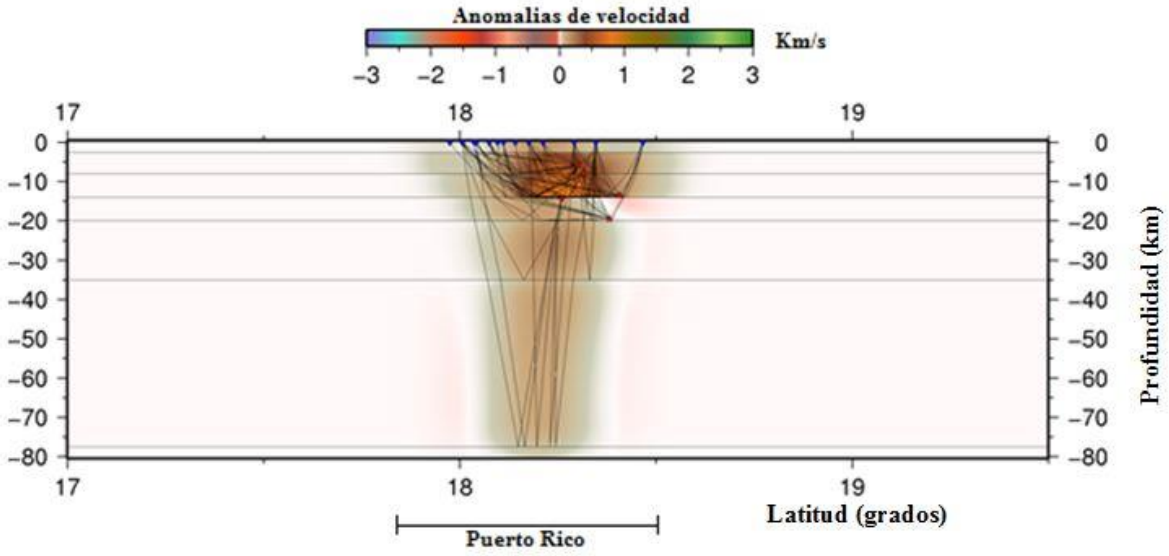


Figura 48. Corte longitudinal para la Región 1, Norte-Sur (NS).

Tabla 6. Resultados obtenidos región 1.

RMS [ms]	**Varianza [seg^2]**	X^2
3409.73	11.70813	481.64177
3150.07	9.99285	351.55321
3145.86	9.96615	349.57180
3139.45	9.92558	347.88986
3139.14	9.92357	347.89111
3136.72	9.90833	347.54896
3137.66	9.91421	347.77294

En la Tabla 6 el error RMS dado en milisegundos (ms) fue disminuido de 3409ms a 3137ms, esto representa una disminución en la varianza de 15 por ciento, esto indica que los datos se ajustan mejor en cada iteración.

6.2 Región 2- región Sur-Oeste de Puerto Rico

Red de propagación en profundidad, latitud y longitud 11x31x58

Número de nodos 11 x 31 x 58 = 19778

Distancia entre nodos (profundidad, latitud y longitud): 7.31 km, 8.96 km, 9.0 km.

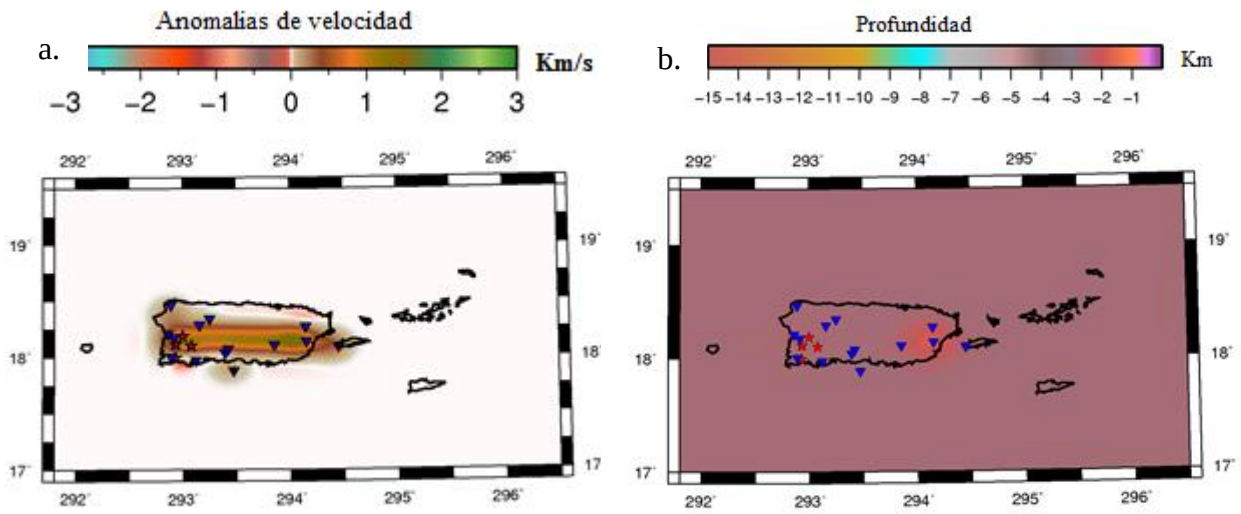


Figura 49. Vista en planta para la Región 2: (a) presenta anomalías de velocidad a 5km de profundidad, (b).variaciones en profundidad.

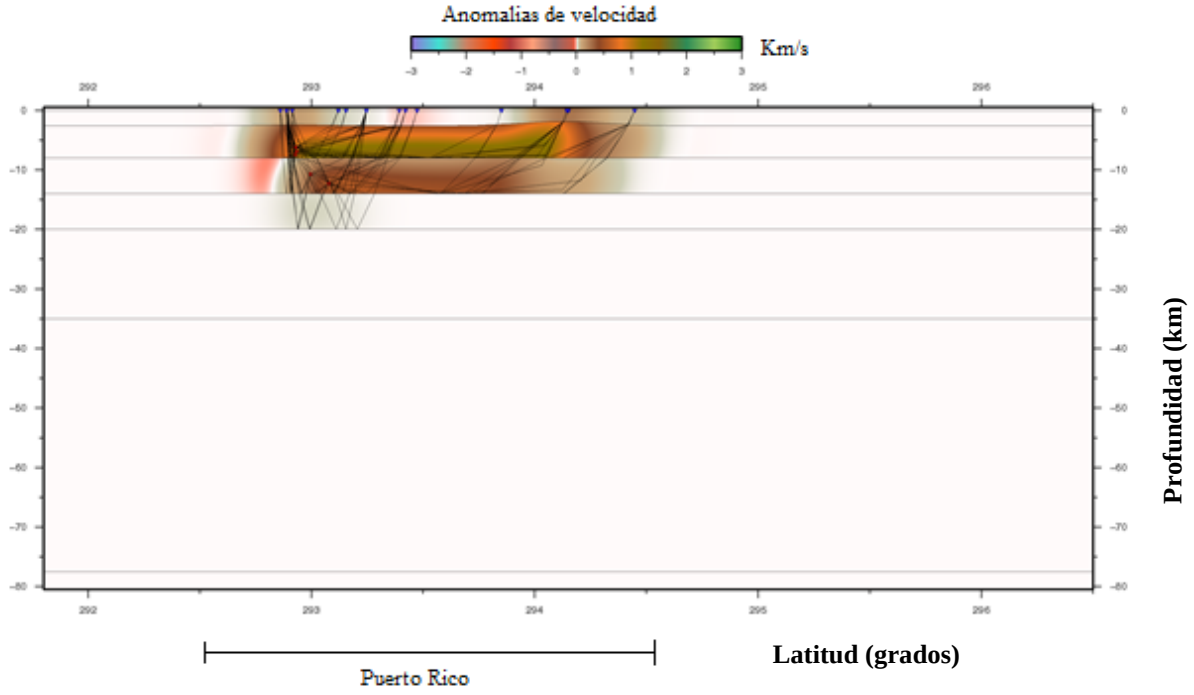


Figura 50. Corte longitudinal para la Región 2, Este-Oeste (EW) en la latitud 18.3

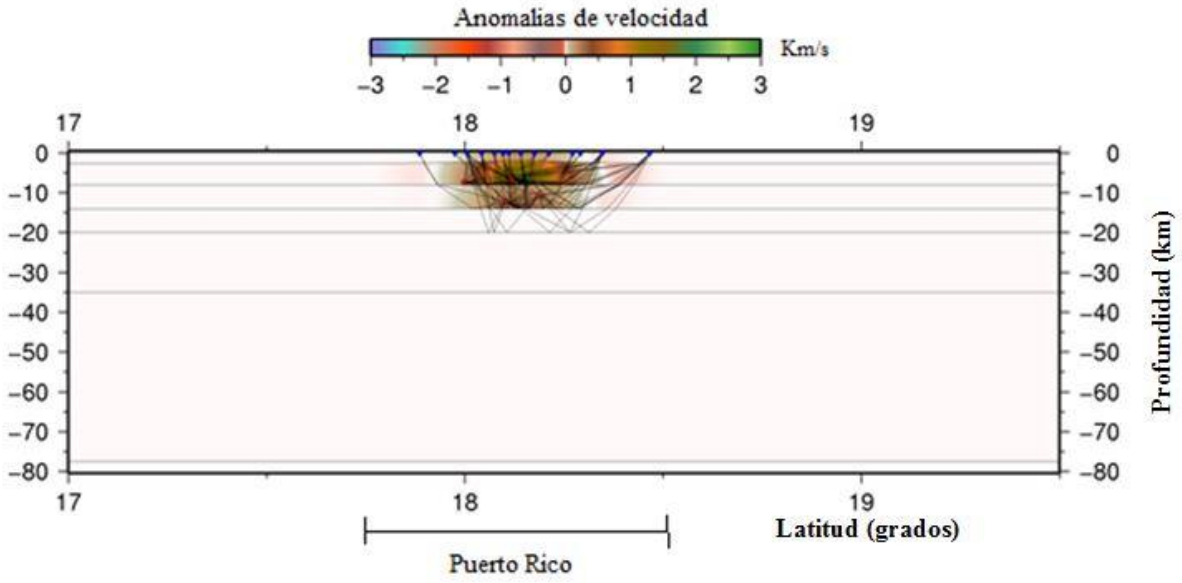


Figura 51. Corte longitudinal para la Región 2, Norte-Sur (NS).

Tabla 7. Resultados obtenidos región 2.

RMS [ms]	**Varianza [seg^2]**	X^2
2384.29	5.71399	728.54262
2225.19	4.97794	103.40419
2301.02	5.32333	63.21558
2281.74	5.23401	63.62213
2278.86	5.22084	64.11005
2275.36	5.20481	64.97742
2281.40	5.23249	64.80933

En la Tabla 7 el error RMS dado en milisegundos (ms) fue disminuido de 2384 a 2281, esto representa una disminución en la varianza de 8.5 por ciento. Esto indica que los datos se ajustan mejor en cada iteración.

6.3 Región 3- región Norte de Puerto Rico

Red de propagación en profundidad, latitud y longitud 11x31x58

Número de nodos 11 x 31 x 58 = 19778

Distancia entre nodos (profundidad, latitud y longitud): 7.31 km, 8.96 km, 9.0 km

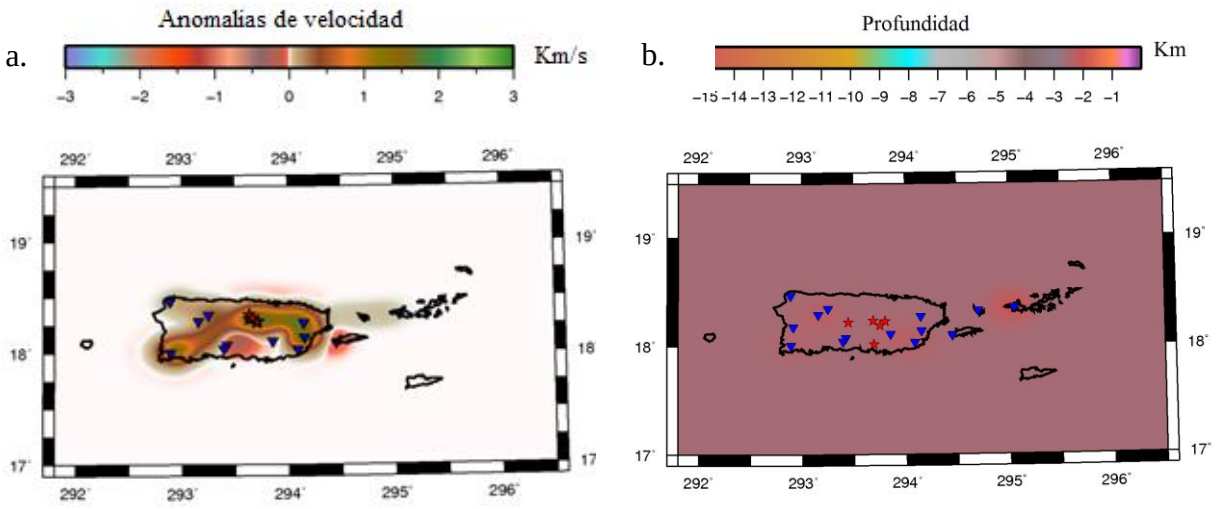


Figura 52. Vista en planta para la Región 3: (a) presenta anomalías de velocidad a 5km de profundidad, (b) variaciones en profundidad.

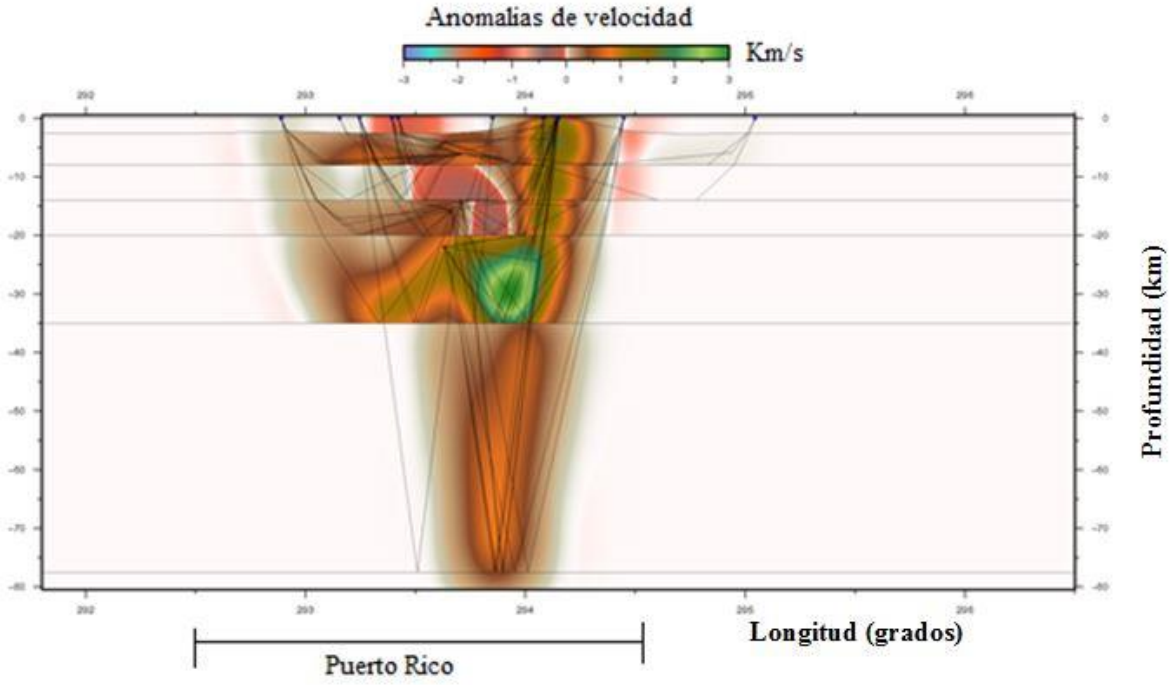


Figura 53. Corte longitudinal para la Región 3, Este-Oeste (EW) en la latitud 18.3.

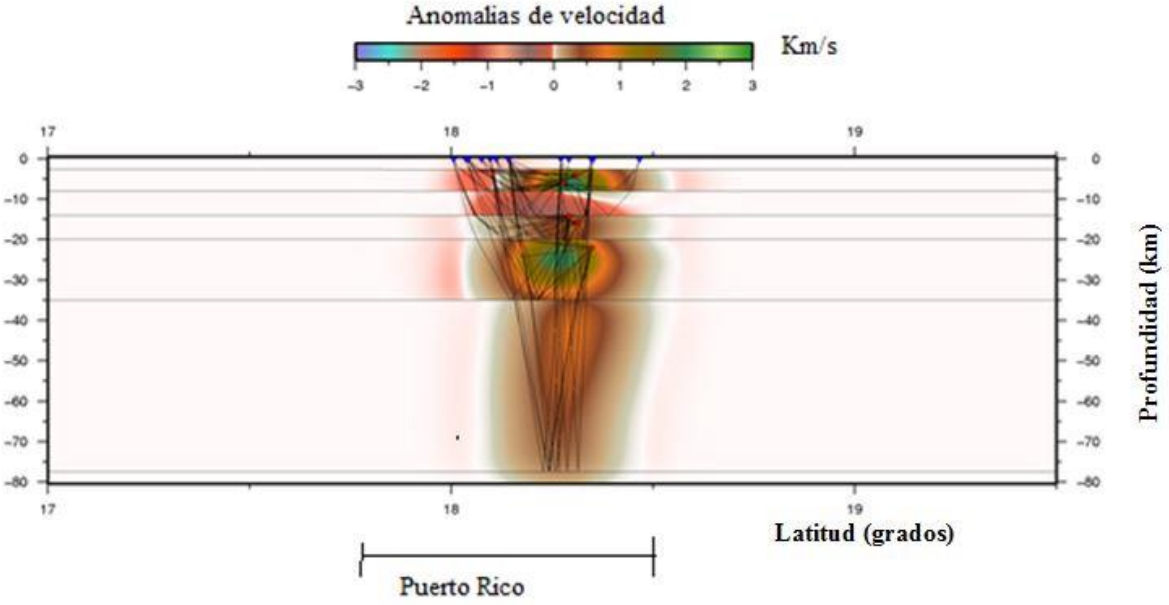


Figura 54. Corte longitudinal para la Región 3, Norte-Sur (NS).

Tabla 8. Resultados obtenidos región 3

RMS [ms]	Varianza [seg^2]	X^2
4649.54	21.76529	1964.79533
4089.93	16.84206	744.82928
4056.48	16.57090	666.96632
3994.99	16.06927	651.29847
3943.50	15.66230	596.72907
4057.06	16.57402	660.62870
3944.33	15.66888	605.77771

En la Tabla 8 el error RMS dado en milisegundos (ms) fue disminuido de 4649.54 a 3944.33, esto representa una disminución en la varianza de 28 por ciento, esto indica que los datos se ajustan mejor en cada iteración.

6.4 Región 4- región Sur de Puerto Rico

Red de propagación en profundidad, latitud y longitud 11x31x58

Numero de nodos 11 x 31 x 58 = 19778

Distancia entre nodos (profundidad, latitud y longitud): 7.31 km, 8.96 km, 9.0 km

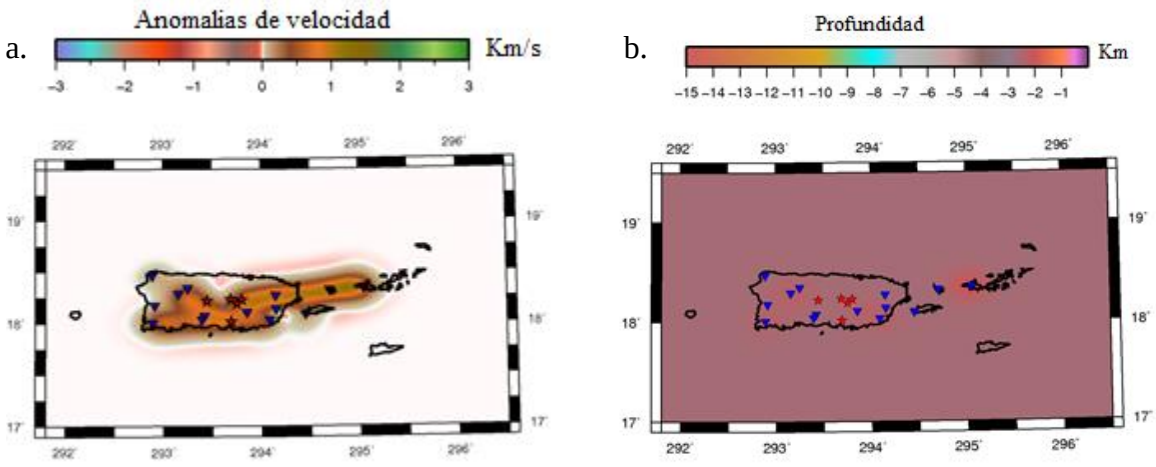


Figura 55. Vista en planta para la Región 4: (a) presenta anomalías de velocidad a 5km de profundidad, (b) variaciones en profundidad

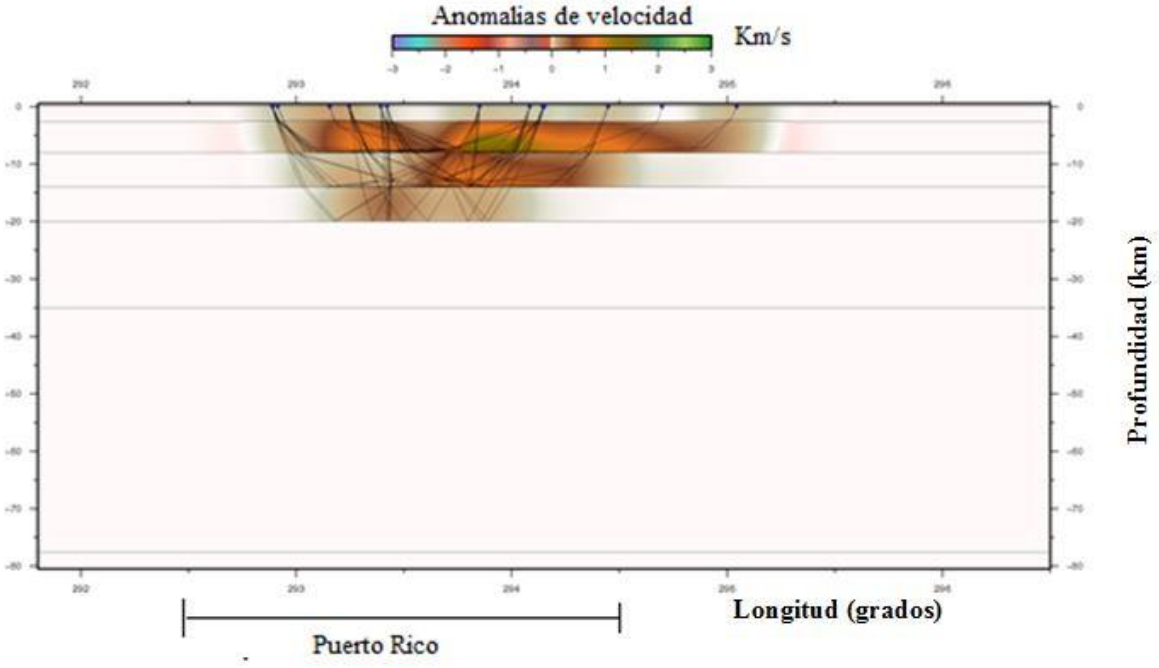


Figura 56. Corte longitudinal para la Región 4, Este-Oeste (EW) en la latitud 18.3.

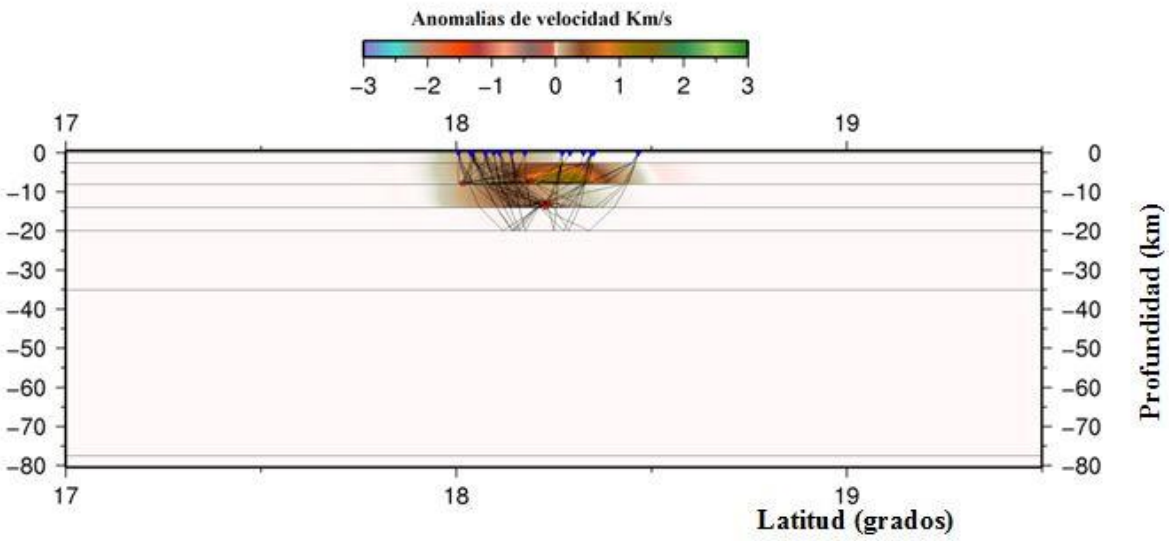


Figura 57. Corte longitudinal para la Región 4, Norte-Sur (NS).

Tabla 9. Resultados obtenidos región 4

RMS [ms]	**Varianza [seg^2]**	X^2
2257.25	5.12446	
2218.23	4.95001	505.18417
2291.59	5.28283	862.59499
2277.92	5.21998	64.43415
2288.77	5.26985	159.63437
2286.14	5.25773	42.75899
2286.98	5.26160	38.44663

En la Tabla 9 el error residual RMS dado en milisegundos (ms) no tuvo una reducción al final de las iteraciones, se desea llegar a un ajuste que reduzca este error lo que significa que los datos serán más homogéneos.

6.5 Región 5- región Nor-Este de Puerto Rico

Red de propagación en profundidad, latitud y longitud 11x31x58

Numero de nodos 11 x 31 x 58 = 19778

Distancia entre nodos (profundidad, latitud y longitud): 7.31 km, 8.96 km, 9.0 km

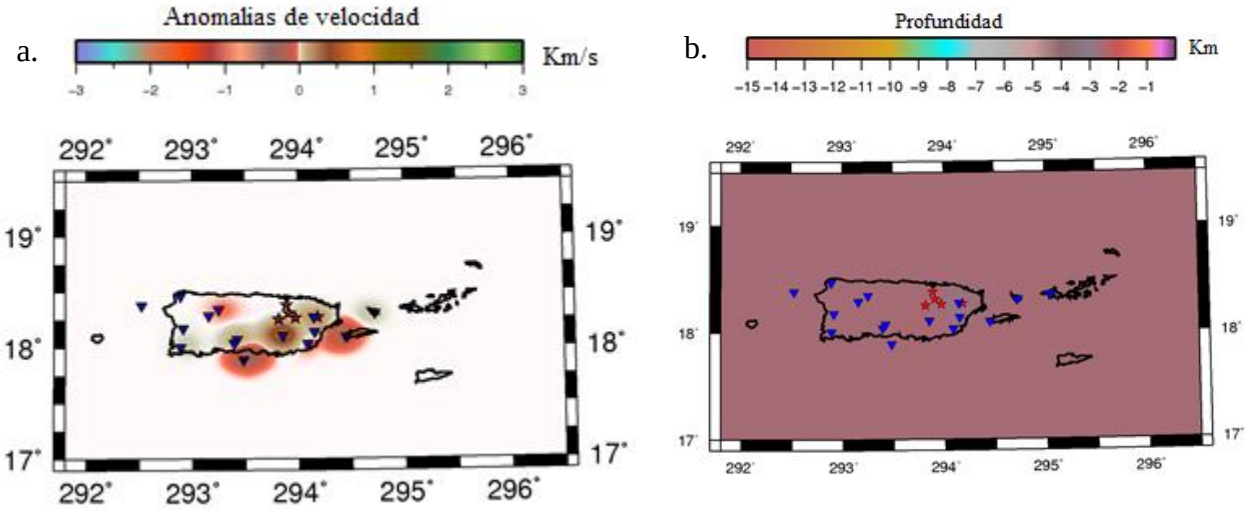


Figura 58. Vista en planta para la Región 5 (a) presenta anomalías de velocidad a 5km de profundidad, (b) variaciones en profundidad.

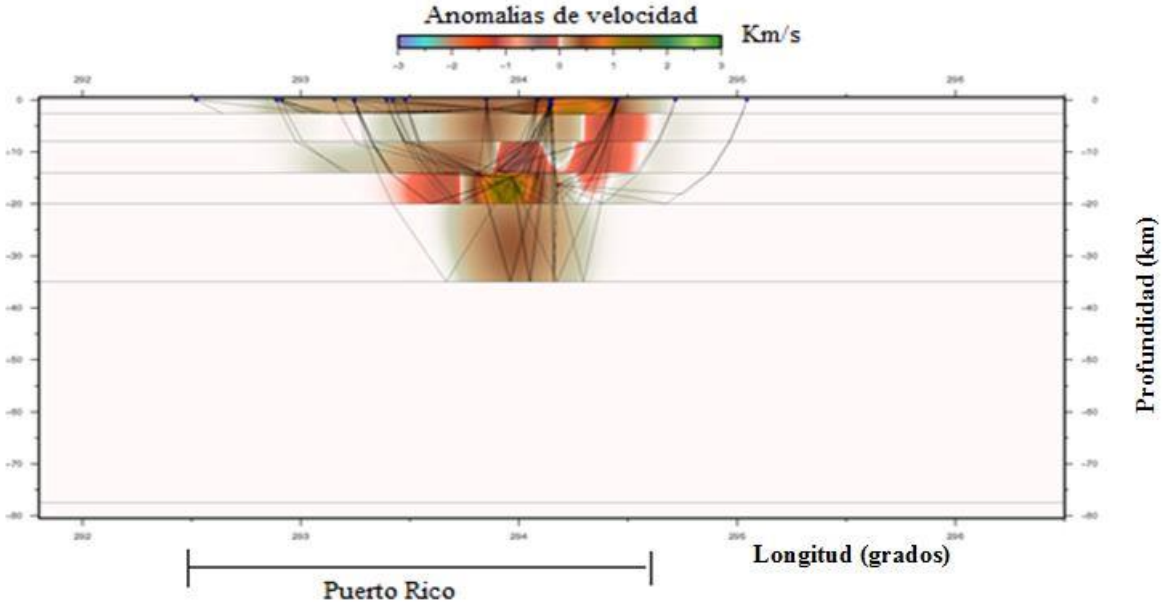


Figura 59. Corte longitudinal para la Región 5, Este-Oeste (EW) en la latitud 18.20°.

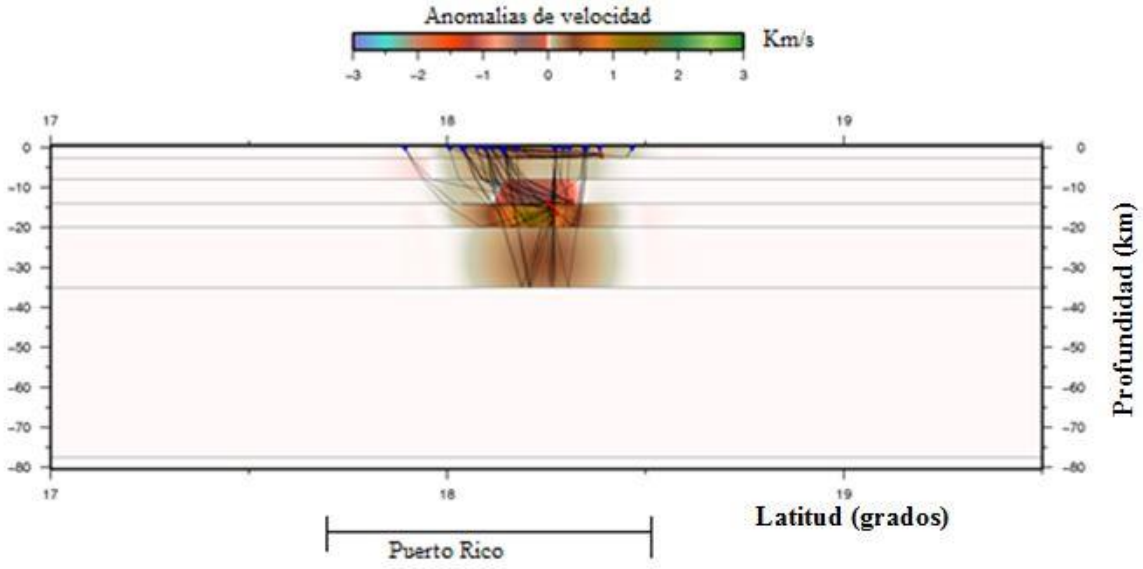


Figura 60. Corte longitudinal para la Región 5, Norte-Sur (NS) longitud -66.0° (294°).

Tabla 10. Resultados obtenidos región 5.

RMS [ms]	Varianza [seg^2]	X^2
2387.50	5.74031	227.42407
2175.22	4.76492	122.71414
2167.52	4.73124	116.67781
2162.84	4.71084	116.53773
2162.74	4.71039	116.19608
2162.58	4.70970	116.35512
2162.19	4.70798	116.08293

En la Tabla 10 el residual RMS dado en milisegundos (ms) ha reducido de 2387 ms a 2162 ms lo cual representa una reducción mínima de la varianza del 17%.

6.6 Región 6- región Sur-Este de Puerto Rico

Red de propagación en profundidad, latitud y longitud 11x31x58

Número de nodos 11 x 31 x 58 = 19778

Distancia entre nodos (profundidad, latitud y longitud): 7.31 km, 8.96 km, 9.0 km

En la Figura 61 se aprecia una zona de alta velocidad, Mendoza y McCann (2006), también encontraron en sus estudios de tomografía en esa área una zona de alta velocidad lo que corroboraría este resultado. Sin embargo, los datos con los que se realizó el estudio son para una sola zona, el Sur-Este de Puerto Rico para esta región, más adelante se presenta los resultados de tomografía para todo Puerto Rico.

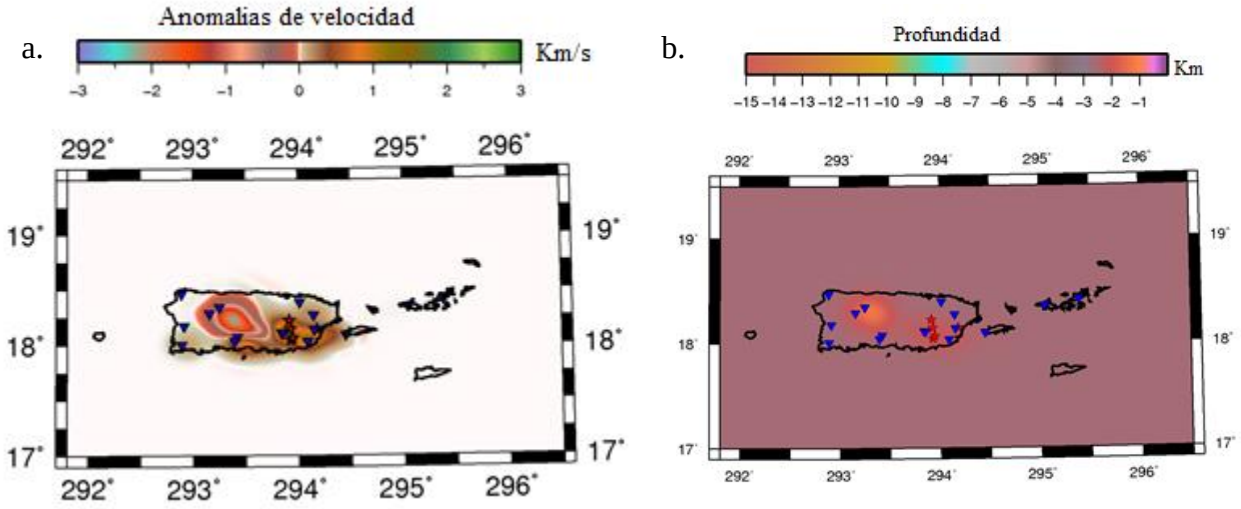


Figura 61. Vista en planta para la Región 6 (a) presenta anomalías de velocidad a 5km de profundidad, (b) variaciones en profundidad

.

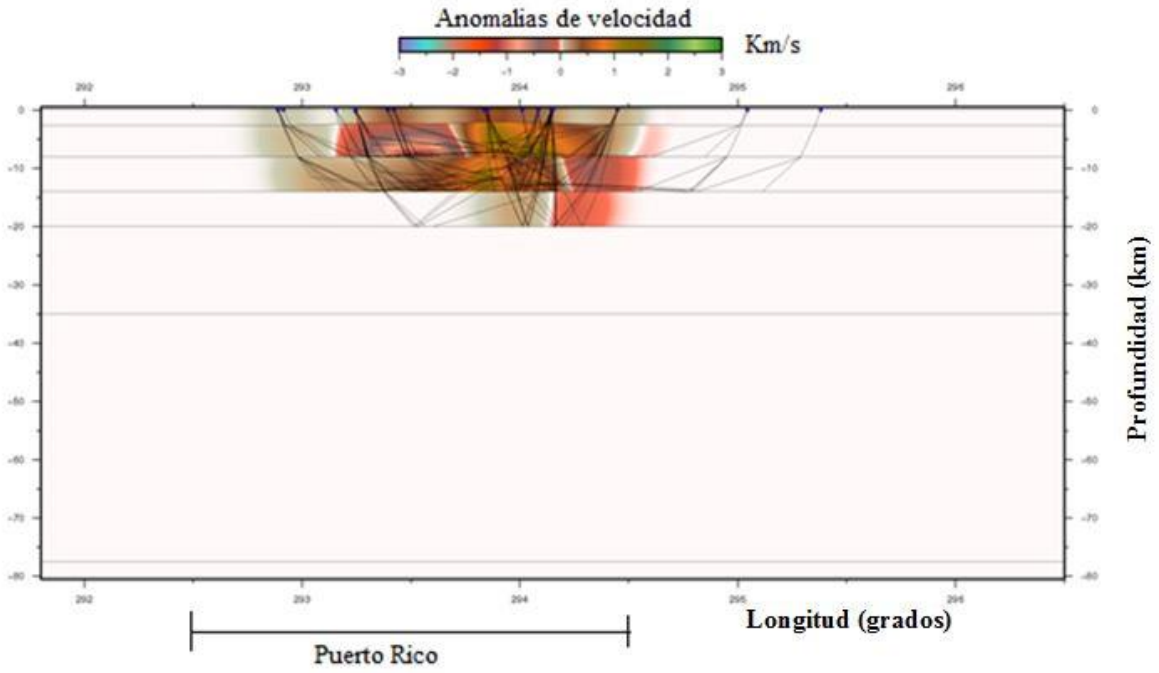


Figura 62. Corte longitudinal para la Región 6, Este-Oeste (EW) en la latitud 18.10°.

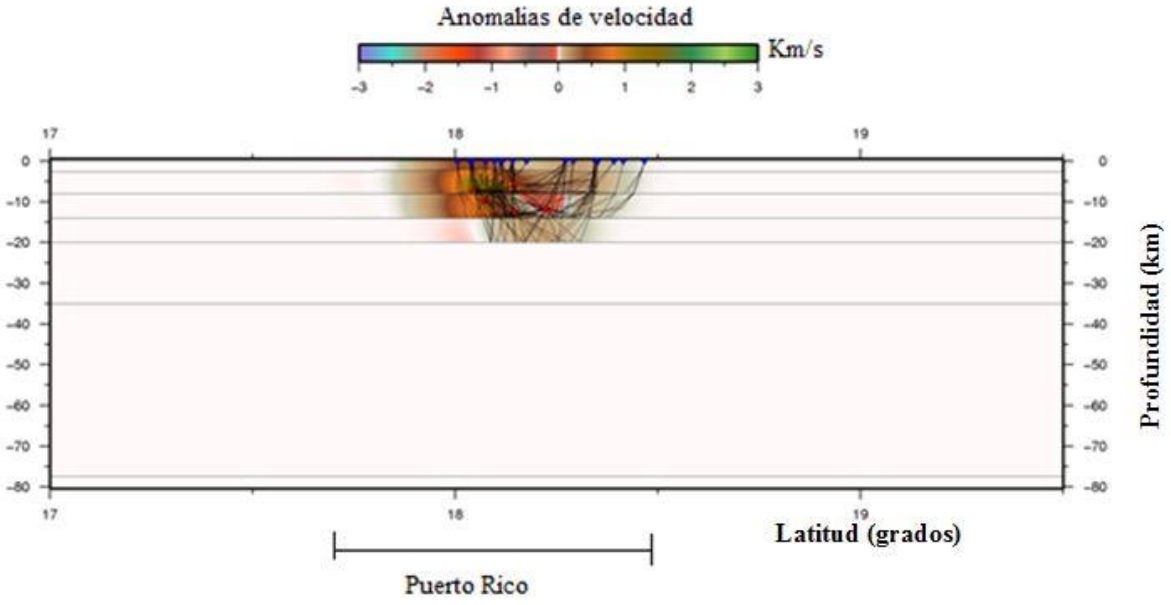


Figura 63. Corte longitudinal para la Región 6, Norte-sur (NS) longitud -65.9° (294.10°).

Tabla 11. Resultados obtenidos región 6.

RMS [ms]	Varianza [seg^2]	X^2
2328.83	5.45201	480.89702
2339.03	5.49983	155.66135
2228.02	4.99049	145.55809
2331.79	5.46585	150.24444
2331.23	5.46340	155.63759
2226.91	4.98549	147.75976
2332.64	5.47001	148.01720

En la Tabla 11 el residual RMS dado en milisegundos (ms) no presentó una reducción de igual forma sucedió con la varianza, lo que significa que los datos en cada iteración son más heterogéneos.

6.7 Región 7- islas Vírgenes (Británicas y Norteamericanas)

Red de propagación en profundidad, latitud y longitud 11x31x58

Numero de nodos 11 x 31 x 58 = 19778

Distancia entre nodos (profundidad, latitud y longitud): 7.31 km, 8.96 km, 9.0 km

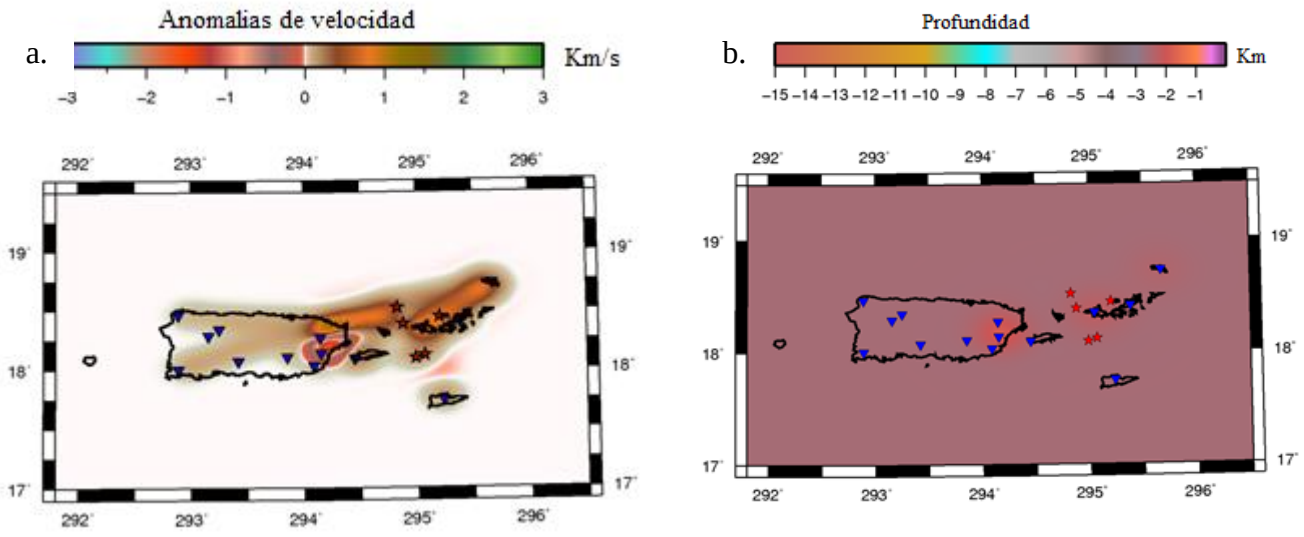


Figura 64. Vista en planta para la Región 7 (a) presenta anomalías de velocidad a 5km de profundidad, (b) variaciones en profundidad

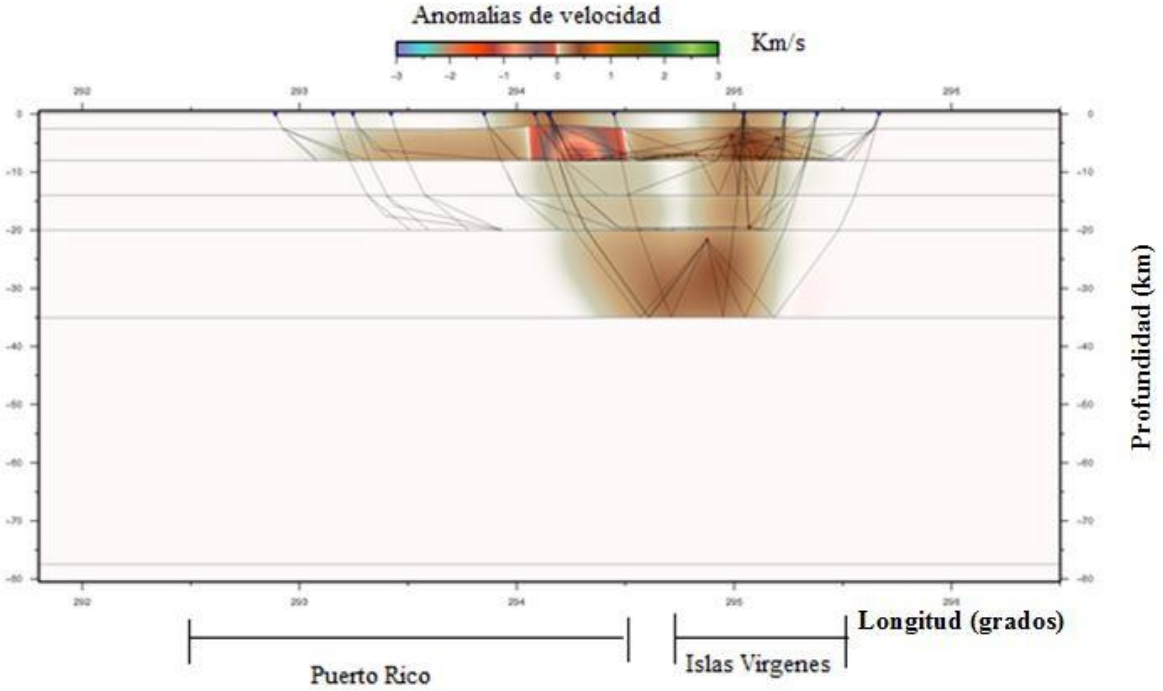


Figura 65. Corte longitudinal para la Región 7, Este-Oeste (EW) en la latitud 17.8°.

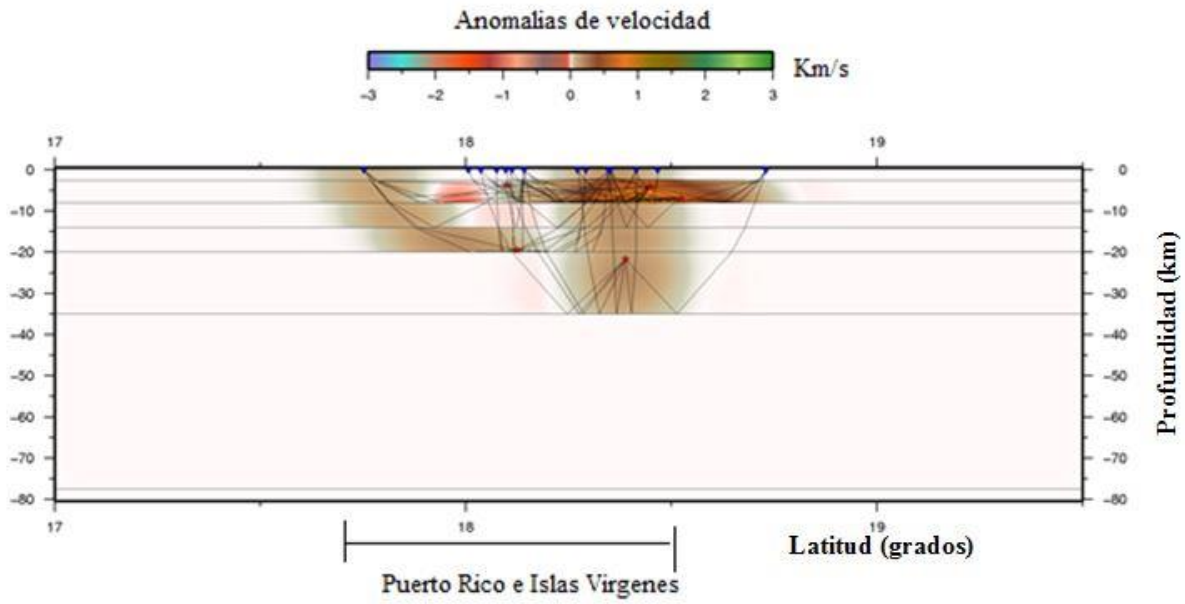


Figura 66. Corte longitudinal para la Región 7, Norte-Sur (NS) en la longitud -64.8° (295.20°).

Tabla 12. Resultados obtenidos región 7

`

RMS [ms]	Varianza [seg^2]	X^2
3315.71	11.08710	973.76456
2963.51	8.85876	290.26428
2904.67	8.51048	263.21813
2877.67	8.35239	259.92999
2870.85	8.31286	259.46152
2868.35	8.29836	258.75171
2876.13	8.34404	260.90902

En la Tabla 12 el RMS dado en milisegundos (ms) se redujo de 3315 ms a 2876 ms, esto representa una reducción de la varianza de 25 por ciento.

6.8 Imagen tomográfica de las 7 regiones combinadas

Red de propagación en profundidad, latitud y longitud 11x31x58

Número de nodos 11 x 31 x 58 = 19778

Distancia entre nodos (profundidad, latitud y longitud): 7.31 km, 8.96 km, 9.0 km.

En la Figura 67 se puede observar todas las anomalías de velocidad a diferentes profundidades en el interior de la Tierra.

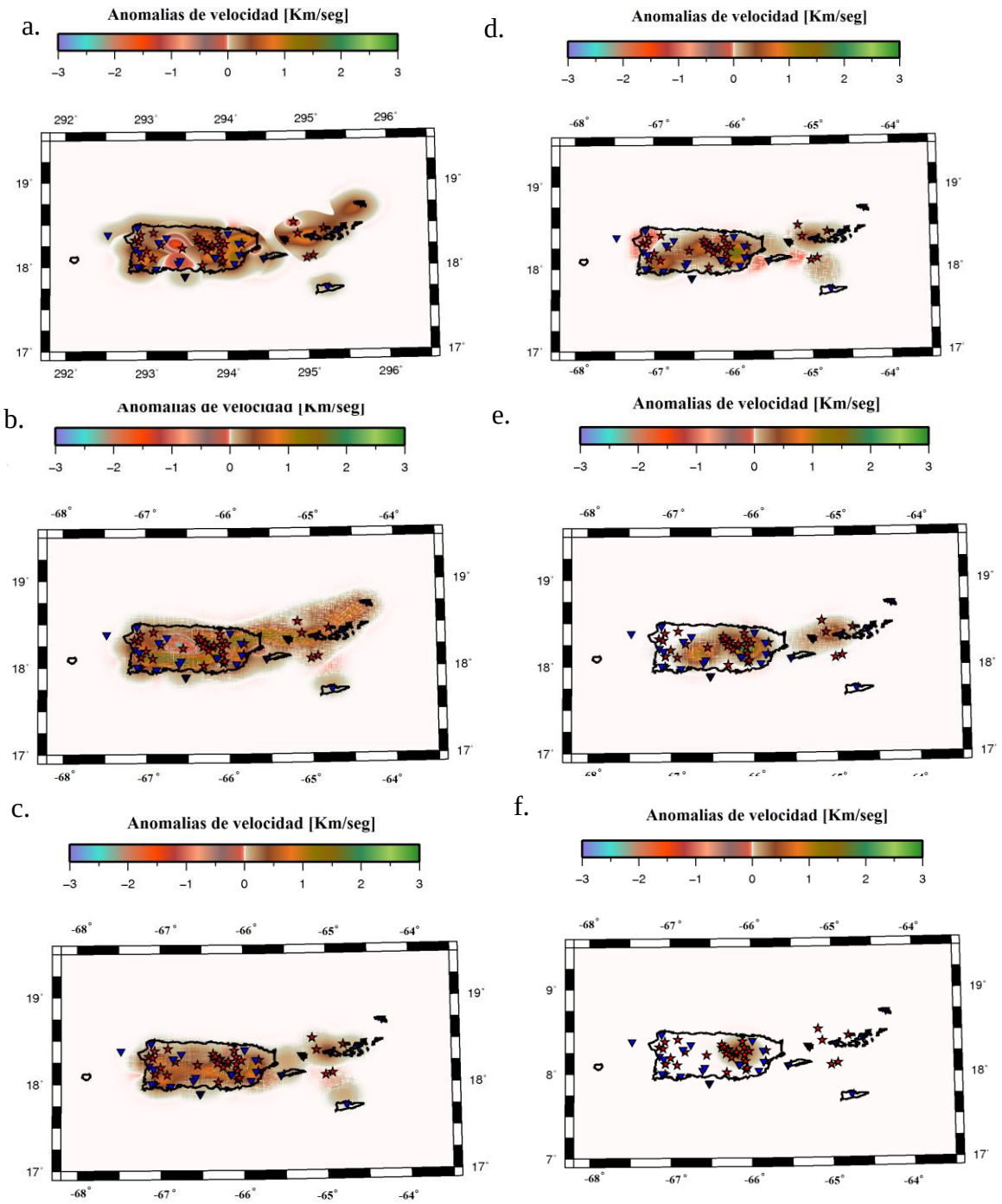


Figura 67. Vista en planta presenta anomalías de velocidad para la Región combinada. a). 2.6km, b) 8.0 km, c) 14km, d) 20 km, e) 35 km, f) 75km de profundidad que corresponde a cada capa del modelo.

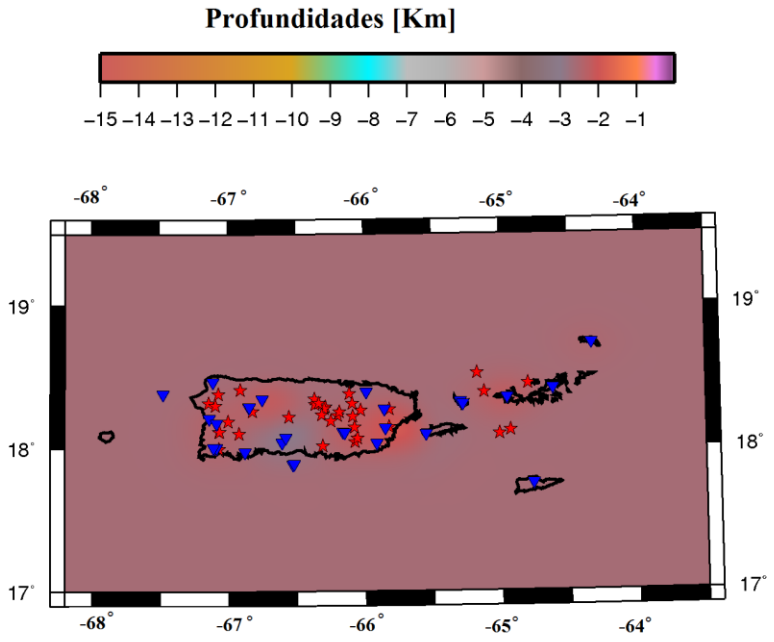


Figura 68. Vista en planta con las variaciones en profundidad para la primera interfaz.

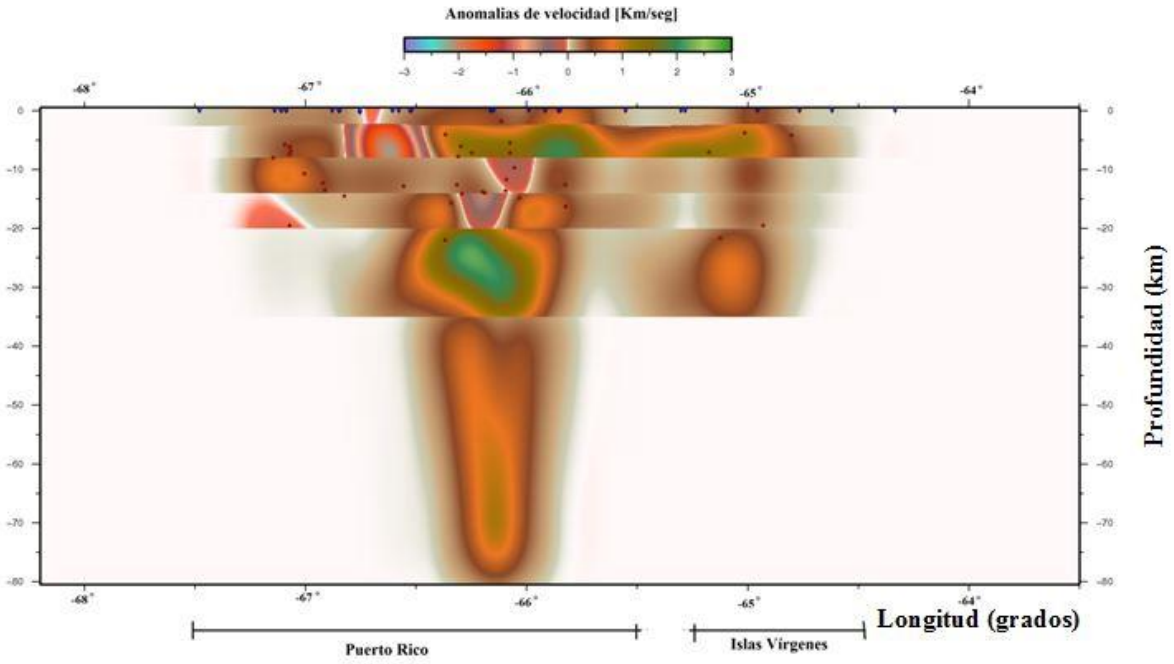


Figura 69. Corte longitudinal de Este-Oeste (EW) en la latitud 17.8°.

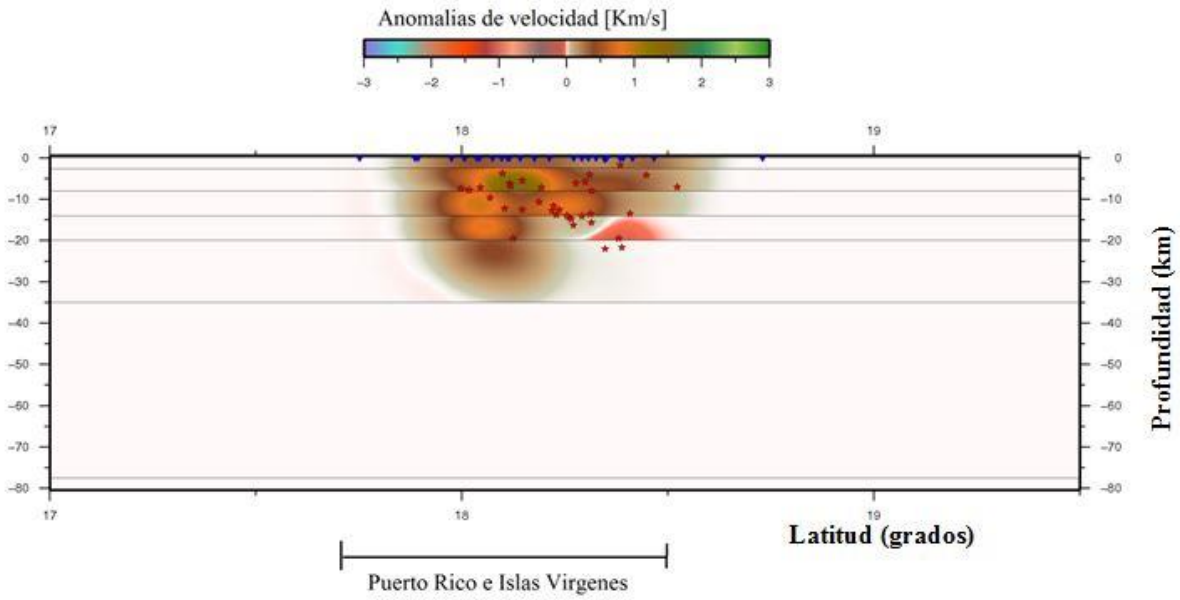


Figura 70. Corte longitudinal Norte-Sur (NS) en la longitud -64.8° (295.20°).

Los residuales se presentan a continuación:

Tabla 13. Resultados obtenidos para Puerto Rico.

RMS[ms]	**Varianza [seg^2]**	X^2
2779.07	7.73	4501.61
2589.06	6.71	276.93
2582.69	6.68	373.60
2515.72	6.33	217.12
2484.27	6.18	185.31
2488.76	6.20	181.96
2486.33	6.19	185.88

En la Tabla 13 hubo una reducción del RMS de 2779 ms a 2486 ms en el error residual RMS, lo cual representa una reducción en la varianza del 20 por ciento en los datos.

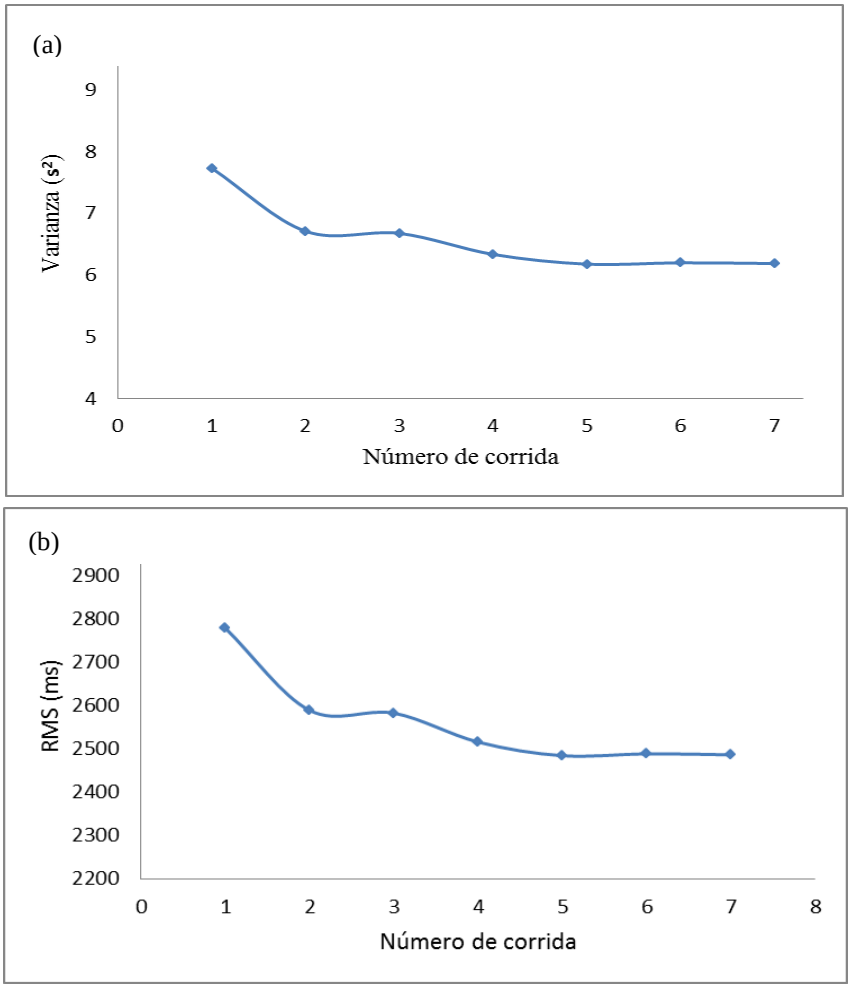


Figura 71. Criterio para finalizar el proceso de iteraciones: (a) Varianza, (b) RMS.

Se usó la varianza para finalizar el proceso de iteraciones, en la Figura 71 en la parte (a) se observa el valor de la varianza para cada iteración, en el cual se presenta una disminución a medida que aumenta el número de corridas del programa. De la misma manera en la parte (b) se observa una disminución en el RMS. El menor valor de los datos (Varianza)

se obtiene como valor final para terminar el proceso de iteraciones, ya que de ahí en adelante los valores inician a incrementar.

Determinación del Moho:

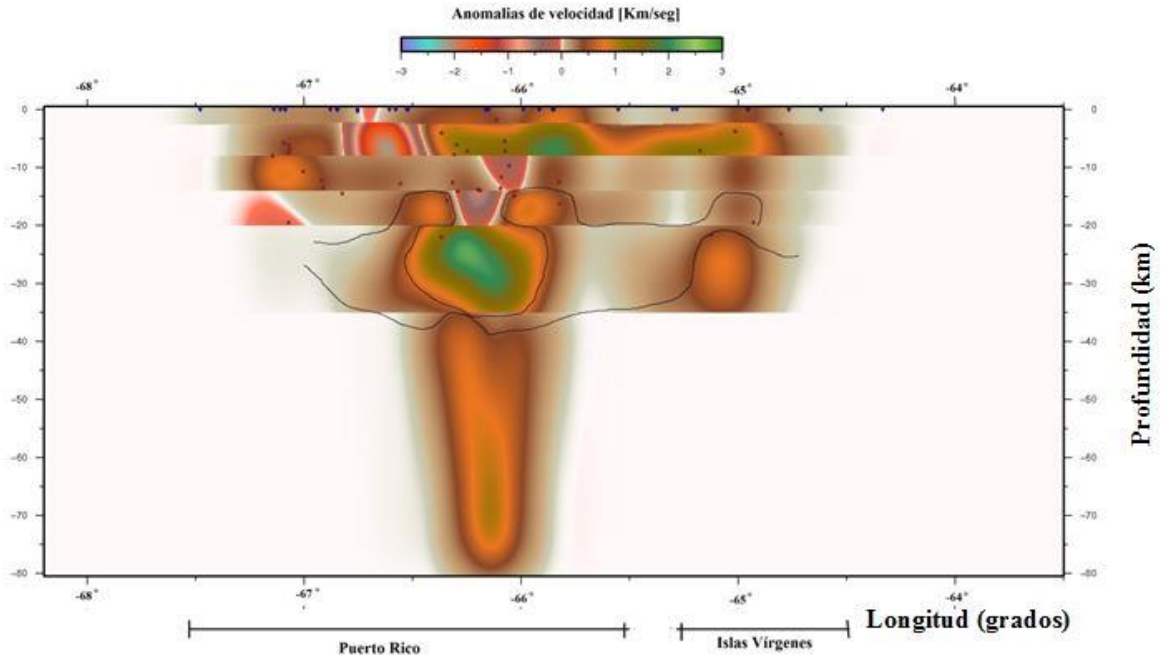


Figura 72**.** Determinación del Moho bajo Puerto Rico e Islas Vírgenes, la línea marcada representa el rango de velocidades asociadas al Moho entre (7.6-8.0) km/seg.

El moho se encuentra a profundidades entre 25 km a.30 km en algunas zonas, como es el caso del Moho bajo las islas aleutianas. Este se encuentra aproximadamente entre 25 km a.30 km de profundidad y la velocidades en que se encontró son de 7.6 km/seg y 8 km/seg (Holbrook et al., 1999; Fliedner, M.M., and S.L. Klemperer, 2000; Setein and Wysession, 2003), igualmente que en el caso para Puerto Rico, el cual tiene un rango entre 20-38 km en profundidad y de 20 a 35 km para Islas Vírgenes según la Figura 72.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Resumen

En este trabajo se realizó un modelo de velocidad en 3D para la región de Puerto Rico e Islas Vírgenes, para esto se seleccionaron eventos sísmicos de Puerto Rico e Islas Vírgenes distribuidos dentro de la región. Estos eventos sísmicos fueron escogidos según algunos criterios como cantidad de estaciones, calidad en la fase de onda, magnitud y profundidad del evento, esto junto con los tiempos de llegada, los tiempos observados de las localizaciones de los eventos y los tiempos teóricos para reflexiones en cada capa, los cuales se obtuvieron por medio del programa de Terrasa. Realizando algunos ajustes se logró obtener el error residual de las fases secundarias que indicaron las diferentes variaciones en capas y anomalías de velocidad bajo la estructura interna. Se seleccionó un total de 35 eventos sísmicos con características similares y con sus fases de onda. En el modelo obtenido de velocidad en 3D se identificó el Moho, este presentó una profundidad aproximada entre 18km-38km, y velocidades entre 7.5 km/s a 8.1 km/s, de la misma manera se evidenció las anomalías de velocidad positivas que se encuentran al Este y negativas al Oeste de Puerto Rico.

7.2 Conclusiones

Se obtuvo un modelo de velocidades en 3D junto con las variaciones en profundidad bajo el área analizada. Según la geología de la región esta zona contiene variedad de

materiales distribuidos por toda la isla, por lo que se obtuvieron resultados con velocidades muy variables, lo que indica que existen diferentes tipos de rocas. Así se pudo evidenciar que el modelo de velocidad en 1D que existe actualmente para Puerto Rico no es representativo de esta región. Sus velocidades varían a lo largo, ancho y profundidad en toda la región.

Según la gráfica del modelo general de tomografía para Puerto Rico en la Figura 67, la estructura interna de la Tierra se representa mediante un esquema en el cual predominan las anomalías positivas hasta de 3km/s en el área Norte al lado Este de Puerto Rico, y secciones donde alcanza anomalías negativas hasta de 2.5 km/s como en el área central de Puerto Rico.

De acuerdo a la Figura 18 donde se muestra un gráfico de errores de la corteza para Puerto Rico, el área de Puerto Rico se divide en dos zonas, una zona al Nor-Este en el cual predominan los errores negativos y otra zona al Sur-Oeste en donde predominan los errores positivos. Esto es acorde a las imágenes tomográficas generadas, debido a que en la imagen de tomografía encontrada predominan las anomalías positivas en el área Nor-Este de Puerto rico, por lo que se puede decir que las rocas tienen una velocidad mayor a la que se consideró inicialmente.

La estructura de la Tierra bajo Puerto Rico está dividida en varias capas a diferentes profundidades, por cada capa se puede establecer a distintas propiedades como densidades y variaciones de velocidad en la estructura de la Tierra. En la imagen tomográfica se observa

este comportamiento, lo cual es acorde a la geología de Puerto Rico ya que tiene una gran diversidad de materiales debido a su formación tectónica.

Terrasa genera los valores de los tiempos de transito teóricos en cada capa. El programa es de fácil manipulación, se puede visualizar la fuente y los receptores si solo se proporcionan las distancias. Este programa puede generar reflexiones en cada capa.

Las anomalías presentadas en toda la región describen la variedad de heterogeneidad que existe bajo la Isla, debido a su composición tectónica y geológica se esperó los resultados bien variables. Esto demuestra que las localizaciones para el área de Puerto Rico realizadas bajo el modelo en 1D tiene un margen de error, esto es debido a las anomalías de velocidad mostradas en este estudio, dado que se reflejan zonas en donde la velocidad disminuye y zonas donde aumenta evidenciando anisotropía en la estructura interna de la Tierra bajo la isla.

Si se incrementa el número de datos y trayectorias el modelo de tomografía tendrá un mejor ajuste en el error RMS, debido que este parámetro proporciona una medida del ajuste de los tiempos, donde los números más pequeños reflejan un mejor ajuste de los datos.

7.3 Recomendaciones

El programa utilizado es muy susceptible a la entrada de datos, de manera que es necesario incorporar los eventos poco a poco para detectar los errores que arroja el programa, ya que este trabajo es el primero en desarrollarse en esta área.

Se recomienda realizar este proceso con una mayor cantidad de eventos sísmicos incluyendo más tipos de trayectorias, tomarlos en distintos lugares como eventos regionales y tele-sísmicos y eventos más profundos distribuidos para una mayor área.

La cantidad de datos y tamaño de la red de nodos del modelo afecta el tiempo de CPU, este incrementa considerablemente según la cantidad de datos. El tiempo necesario para procesar los resultados puede ser entre 20 minutos o más de 3 horas, después de correr el programa puede dar resultados que no son satisfactorios.

Terrasa ayuda a obtener los tiempos teóricos de reflexión, no se puede utilizar directamente debido a que el tiempo se calcula tomando la fuente en la superficie.

Con los resultados es posible determinar el tipo de estructura en el interior de la corteza de la Tierra comparando las velocidades obtenidas con las velocidades de las rocas establecidas por medio de ensayos de laboratorios.

Las variaciones en profundidad fueron de 0.1 km (100 metros o menos). Se recomienda ampliar la zona de investigación y número de eventos sísmicos, de manera que se obtenga una definición más amplia de las capas en la imagen donde se observa las variaciones en profundidad.

8. REFERENCIAS

Asencio, E., 1980, Western Puerto Rico Seismicity, U.S. Geological Survey Open File Report 80-192, 135p.

Bassin, C., Laske, G. and Masters, G., 2000. The Current Limits of Resolution for Surface Wave Tomography in North America, EOS Trans AGU, 81, F897, 2000.

Brink, U., 2003. The Puerto Rico Trench: Implications for Plate Tectonics and Earthquake and Tsunami Hazards. U.S. Geological Survey.

Bormann, P., Engdahl, E. R. and Kind, R., 2012. Seismic Wave Propagation and Earth models, in: New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2), IASPEI, GFZ German Research Centre for Geosciences. pp. 7–14.

Fliedner, M.M., and Klemperer S.L., 2000. Crustal structure transition from oceanic arc to continental arc, eastern Aleutian Islands and Alaska Peninsula, Earth and Planetary Science Letters, 179 (3-4), 567-579.

Holbrook, W.S., Lizarralde, D., McGeary, S., Bangs, N. and Diebold, J., 1999. Structure and composition of the Aleutian island arc and implications for continental crustal growth. Geology 27, 31–34.

Huérfano, V., 1994. *Modelo de Corteza y mecanica del bloque de Puerto Rico*. Mayagüez, Puerto Rico: Universidad de Puerto Rico Mayagüez.

Huérfano, V., 2004. *Puerto Rico Data Análisis and Information System*, PRDANIS.

Huérfano V. and Torres D., 2012. *Extract software.*

Huérfano V. and Torres D., 2013. *Lineator software.*

Husen, S. and Hardebeck J.L., 2010, Earthquake location accuracy, Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis, doi: 10.5078/corssa-55815573.

IRIS EMC, 2013. Reference Earth Models - ak135-f velocity model (spherical average), URL http://www.iris.edu/dms/products/emc/models/AK135F.htm (Ultimo acceso Abril 26 de 2013).

Jansma, P.E., Mattioli, G.S., Lopez, A., DeMets, C., Dixon, T.H., Mann, P. and Calais, E., 2000. Neotectonics of Puerto Rico and the Virgin Islands, northeastern Caribbean, from GPS geodesy. Tectonics 19, 1021–1037.

Kennett, B.L.N., Engdahl E.R. and Buland R., 1995. Constraints of Seismic Velocities in the Earth From Travel Times. Geophys. J Int, 122, 108-124. Physics of the Earth and Planetary Interiors 159, 129–139, URL http:// http://rses.anu.edu.au/seismology/ak135/ak135t.html (Ultimo acceso Febrero 1 de 2013).

Kennett, B.L.N., 2006. On seismological reference models and the perceived nature of heterogeneity. Physics of the Earth and Planetary Interiors 159, 129–139.

Klein, F., 2002. User's Guide to HIPOINVERSE-2000, a Fortran Program to Solve for Earthquake Locations and Magnitudes.

Kool, M., Rawlinson, N. and Sambridge, M., 2006. A practical grid-based method for tracking multiple refraction and reflection phases in three-dimensional heterogeneous media. *Geophysical Journal International*, 167(1), pp.253-270.

Lara, M., 2001. Localización de sismos utilizando registros digitales de una estación sísmica de 3 componentes. *Revista de trabajos de investigación, CNDG*, vol 2, pp.p. 83-93.

Lin, G. and Huérfano, V., 2011. Improving three dimensional Seismic Velocity Models and Earthqueake; Locations for Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands: Collaboative (No. G10AP00020 y G10AP00021). Naciotal and Regional Earthquake Hazard Assessments.

Malladi, R. and Sethian, J.A., 1996. An O (N log N) algorithm for shape modeling. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 93(18), pp.9389 -9392.

Map of Central America and the Caribbean Plate, URL http://mapas.owje.com/maps/10804_central-america-and-the-caribbean-plate.html (Ultimo acceso, Julio 22 de 2013).

McGillivray P.R. and Oldenburg D.W., 1990. Methods for Calculating Fréchet Derivatives and Sensitivities for the Non-Linear Inverse Problem: A Comparative Study. Geophysical Prospecting 38, 499-524.

Mendoza, C., and MacCann, W., 2006. Improving the Seismic Hazard Model for Puerto Rico through Seismic Tomography and Reliable Microearthquake Catalog With Recalculated Magnitudes and Calibrated Hypocentral Error Estimates Collaboative (No. 05HQGR0012). Naciotal and Regional Earthquake Hazard Assessments.

Morrison, F., Becker, A., and Gasperikova, E., 2004. Seismic Methods. The Berkeley Course in Applied Geophysics, URL http://appliedgeophysics.lbl.gov/seismic/index.html

(Ultimo acceso Mayo 6 de 2013).

Rawlinson, N., 2007a. *Fast Marching Tomography Package: Instruction Manual*, Australia: Research School of Earth Sciences.

Rawlinson, N., 2007b. Seismic tomography code, Fast Marching Tomography. Research School of Earth Sciences.

Rawlinson, N., Hauser, J. and Sambridge, M., 2008. Seismic ray tracing and wavefront tracking in laterally heterogeneous media. *Advances in Geophysics*, vol 49, pp.p, 203-273.

Rawlinson, N. and Malcolm, S., 2003. The FMM in complex media, URL http://rses.anu.edu.au/~nick/waves/method.html (Ultimo acceso Mayo 6 de 2013).

Rawlinson, N. and Sambridge, M., 2003. Seismic Traveltime Tomography Of The Crust And Lithosphere. *Advances in Geophysics*, vol 46, pp.p, 81-198.

Rawlinson, N. and Sambridge, M., 2004. Multiple reflection and transmission phases in complex layered media using a multistage fast marching method. *Geophysics*, 69(5), pp.1338 -1350.

Rawlinson, N. and Sambridge, M., 2005. The fast marching method: an effective tool for tomographic imaging and tracking multiple phases in complex layered media. *Explor. Geophys.*, 36(4), pp.341-350.

Rawlinson, N. and Urvoy, M., 2006. Simultaneous inversion of active and passive source datasets for 3-D seismic structure with application to Tasmania. *Geophysical Research Letters*, 33, p.5 PP.

RSPR, 2013. Red Sísmica de Puerto Rico, URL http://redsismica.uprm.edu/Spanish/. (Ultimo acceso Febrero 20 de 2013).

Sethian, J.A., 1996. A fast marching level set method for monotonically advancing fronts. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 93(4), pp.1591 -1595.

Sethian, J.A., 1999, Level set methods and fast marching methods: Cambridge University Press.

Subiza, G., 1986. Introducción al análisis de sismogramas. Instituto Geográfico Nacional de Madrid.

Stein, S. and Wysession, M., 2003. *An introduction to seismology, earthquakes, and earth*

structure.

United States Geological Survey, 2013. Inside the Earth, USGS. URL http://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/inside.html (Ultimo acceso Marzo 24 de 2013).

Vernaez, G. and Surós, R., 2009. Optimización de un trazador de rayos sísmicos con técnicas de globalización en medios anisótropos 3D. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia 32, 22–31.

Vidale, J.E., 1988. Finite-difference calculations of travel-times, Bull. Seism. Soc. Am. 78, 2062–2076.

Vizrsoft, 2012. Terrasa-Vizrsoft 1121.

Williams, T. and Kelley, C., 2004. Gnuplot.

9. APÉNDICE A

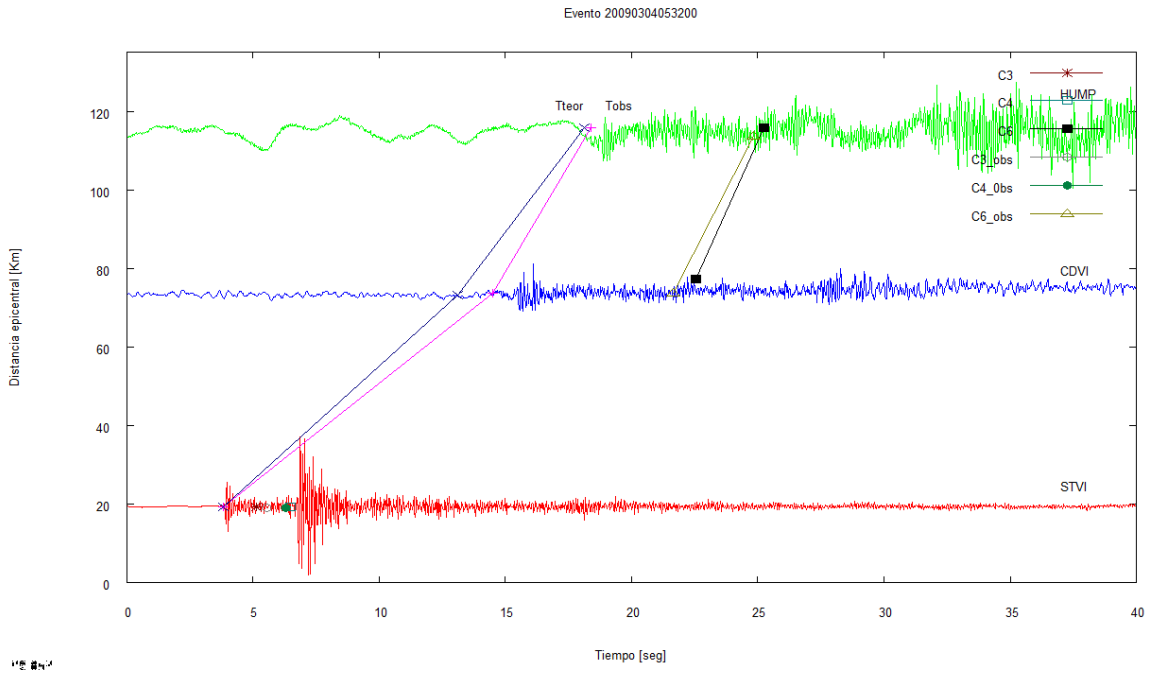
9.1 Datos analizados para la región de Puerto Rico e Islas Vírgenes (Británicas y Noteamericanas).

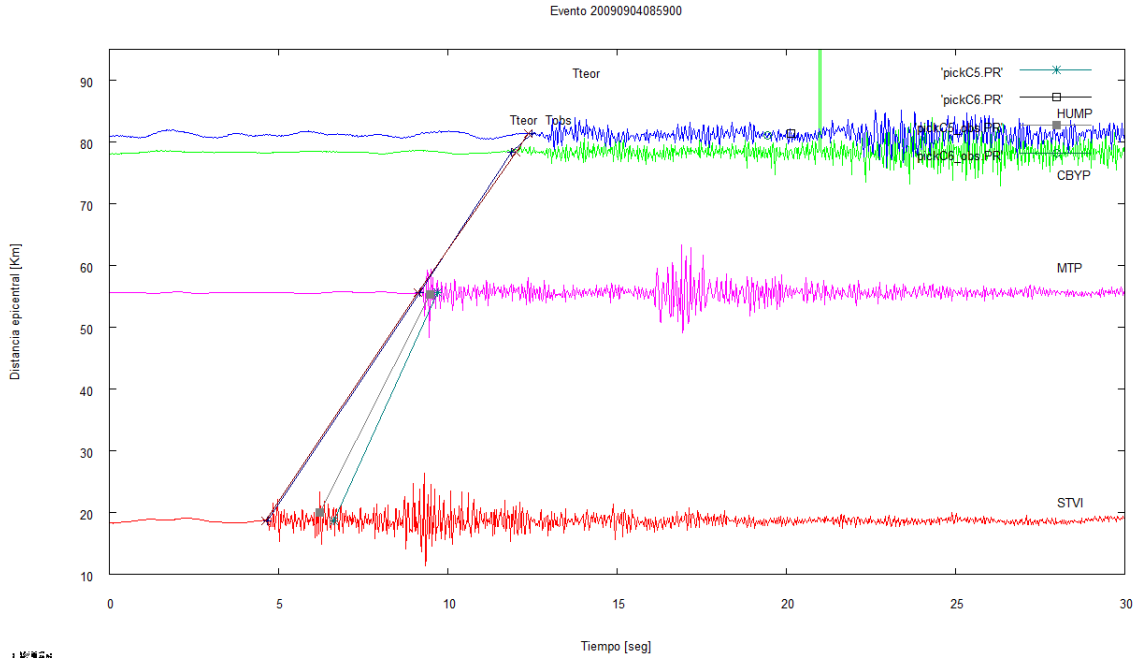
REGIÓN	1												
UTC	Time	Lat	Long	Depth	Mag		RMS	ERH	ERZ	gap	Q	Int	nStat
1.2005-11-23	52:32.2	18.316	-67.145	8	2.7	md	0.55	2.49	31.61	199	D		6
2.2008-12-31	06:02.6	18.408	-66.912	13.5	2.5	md	0.31	1.17	0.88	169	C		9
3.2011-05-03	30:57.9	18.26	-66.825	14.5	2.09	md	0.18	0.66	1.09	97	C	I	10
4.2009-04-02	44:03.0	18.3	-67.094	5.8	2.6	md	0.13	0.92	0.50	234	B		10
5.2009-04-30	39:13.5	18.381	-67.072	19.5	2.6	md	0.13	0.56	0.45	136	B		13
REGIÓN	2												
1.2006-06-03	56:07.6	17.998	-67.072	7.4	2.8	md	0.12	0.85	0.53	183	B		15
2.2007-06-02	20:32.6	18.117	-67.07	6.2	2.7	md	0.07	0.52	0.57	146	B		8
3.2007-11-04	45:23.6	18.119	-67.066	6.9	2.5	md	0.08	0.48	0.50	141	B	III	9
4.2008-05-16	39:23.6	18.104	-66.922	12.3	2.5	md	0.28	0.59	0.88	124	B		
5.2009-05-10	03:29.9	18.188	-67.005	10.7	2.7	md	0.26	0.52	1.86	132	B		8
REGIÓN	3												
1.2006-09-30	16:41.3	18.292	-66.291	14.1	2.6	md	0.18	2.47	1.45	174	B		5
2.2007-05-02	31:38.3	18.277	-66.297	6.1	2.4	md	0.27	0.68	1.07	162	B		8
3.2010-02-09	07:55.8	18.31	-66.367	4.1	2.4	md	0.26	1.16	1.50	178	B		7
4.2007-03-23	01:53.0	18.348	-66.368	22	2.5	md	0.28	3.33	19.96	333	C		4
5.2009-03-08	48:59.2	18.315	-66.34	15.7	2.4	md	0.22	1.26	1.89	195	C		6

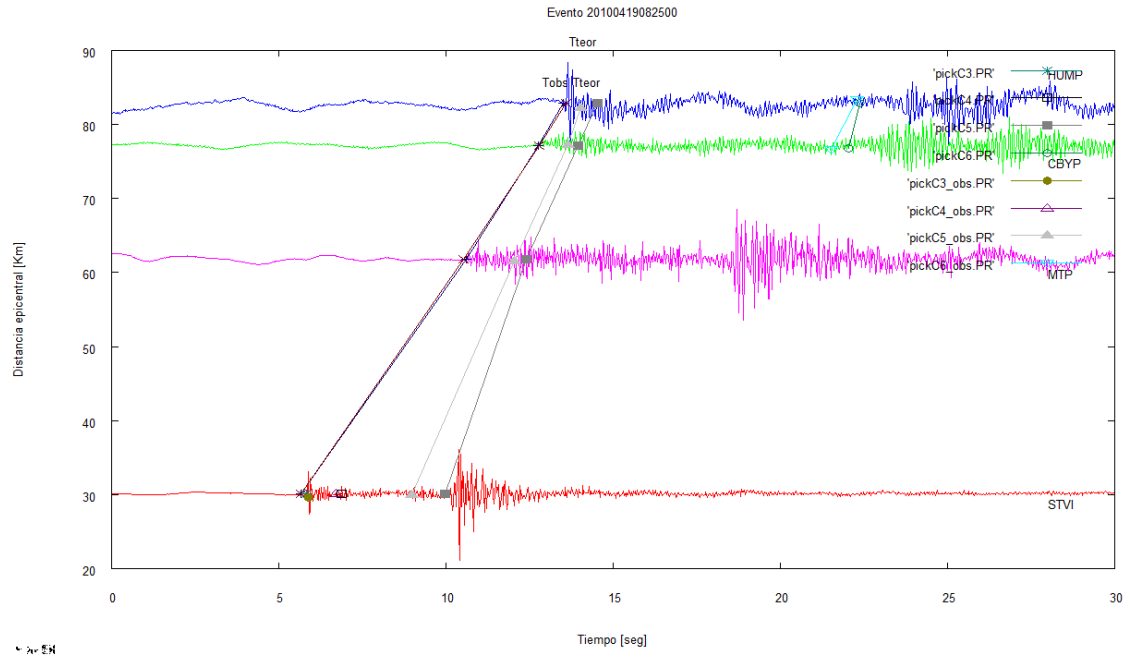
REGIÓN	**4**												
1.2006-08-26	05:57.1	18.018	-66.309	7.8	2.5	md	0.43	1.29	1.78	152	C		13
2.2006-12-12	42:14.7	18.229	-66.2	13.8	2.6	md	0.34	1.47	1.17	156	C		9
3.2008-05-17	10:24.9	18.236	-66.315	12.6	2.7	md	0.25	2.99	3.50	168	B		5
4.2009-03-27	08:27.6	18.193	-66.248	7.2	2.9	md	0.21	0.97	0.81	153	B		7
5.2010-08-02	14:57.0	18.219	-66.556	12.8	2.69	md	0.23	0.80	0.92	160	C	I	11
REGIÓN	**5**												
1.2006-09-12	08:53.2	18.255	-66.188	14	2.2	md	0.25	0.68	2.23	166	B		12
2.2007-03-28	38:26.4	18.266	-66.032	14.9	2.2	md	0.21	0.72	1.35	171	B		9
3.2009-10-23	23:17.7	18.384	-66.113	1.8	2.8	md	0.34	1.37	0.91	198	C		1
4.2009-11-19	49:20.6	18.312	-66.094	13.6	2.7	md	0.17	0.63	0.52	185	C		7
5.2012-01-22	29:45.4	18.271	-65.823	16	25.9	md	0.04	0.59	0.74	174	A	I	12
REGIÓN	**6**												
1.2006-10-30	13:56.9	18.045	-66.074	7.2	2.6	md	0.22	0.99	0.54	177	B		13
2.2006-11-16	47:59.6	18.069	-66.055	9.7	2.7	md	0.28	1.37	3.77	190	C		6
3.2011-05-22	14:28.1	18.147	-66.076	5.5	2.8	md	0.18	1.79	0.68	163	C	I	8
4.2009-10-12	33:34.9	18.147	-65.825	12.6	3.0	md	0.11	0.44	0.32	118	B		17
5.2009-06-10	38:16.1	18.223	-66.091	11.7	2.9	md	0.22	0.90	0.82	155	B	III	13
REGIÓN	**7**												
1.2009-03-04	32:07.2	18.448	-64.802	4.2	2.8	md	0.08	1.86	1.9	162	B		9
2.2009-09-04	59:07.5	18.389	-65.125	21.7	3	md	0.09	1.8	1.06	185	B		7
3.2010-04-19	25:54.3	18.523	-65.175	7.1	2.85	md	0.13	0.72	1.02	185	B	I	12
4.2010-05-18	57:38.6	18.125	-64.931	19.5	2.96	md	0.23	0.61	1.16	113	C	I	13
5.2010-05-19	04:53.1	18.099	-65.014	3.8	2.92	md	0.23	0.69	1.15	129	C	I	8

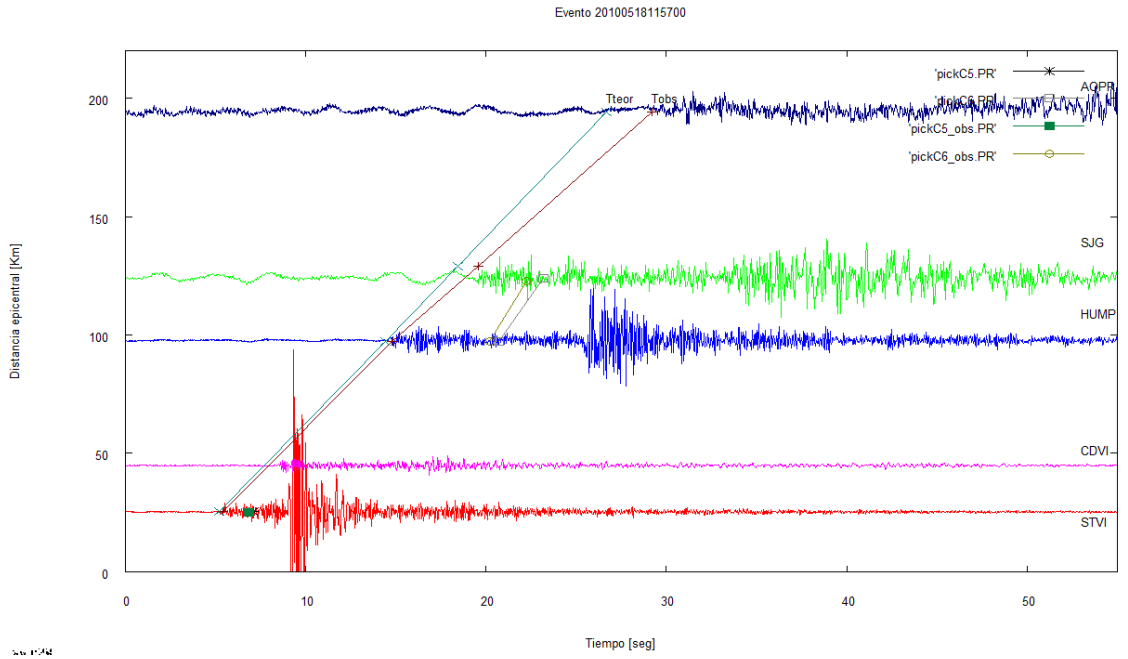
9.2 Fases picadas para los eventos por región

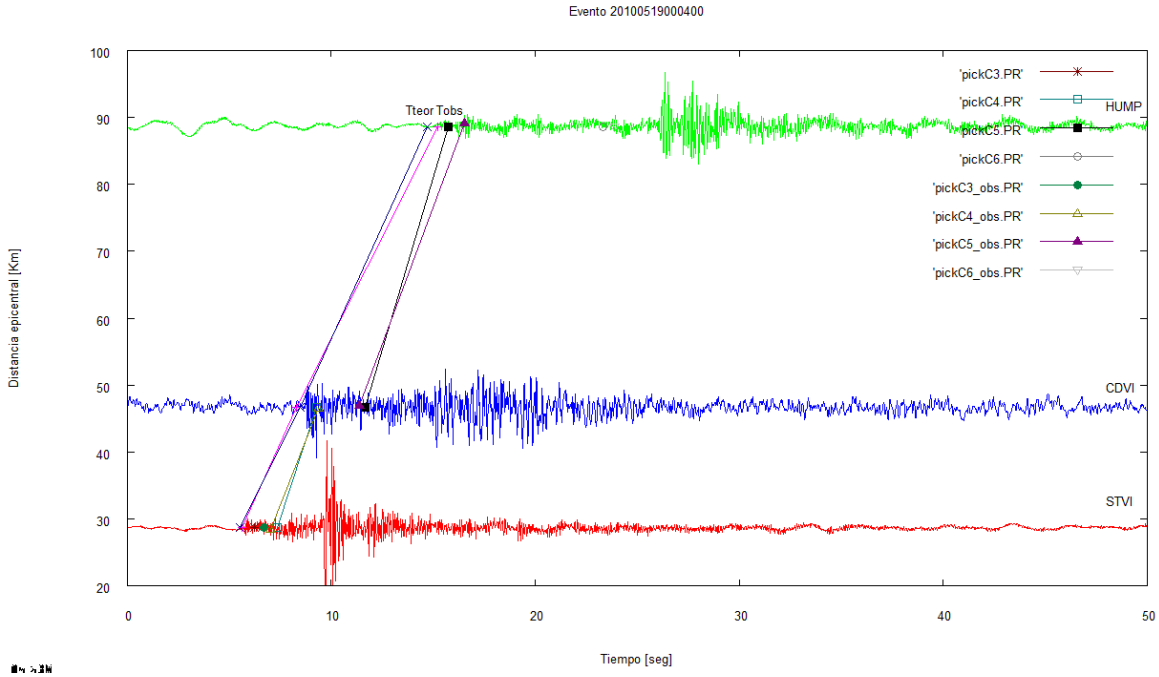
Región 7



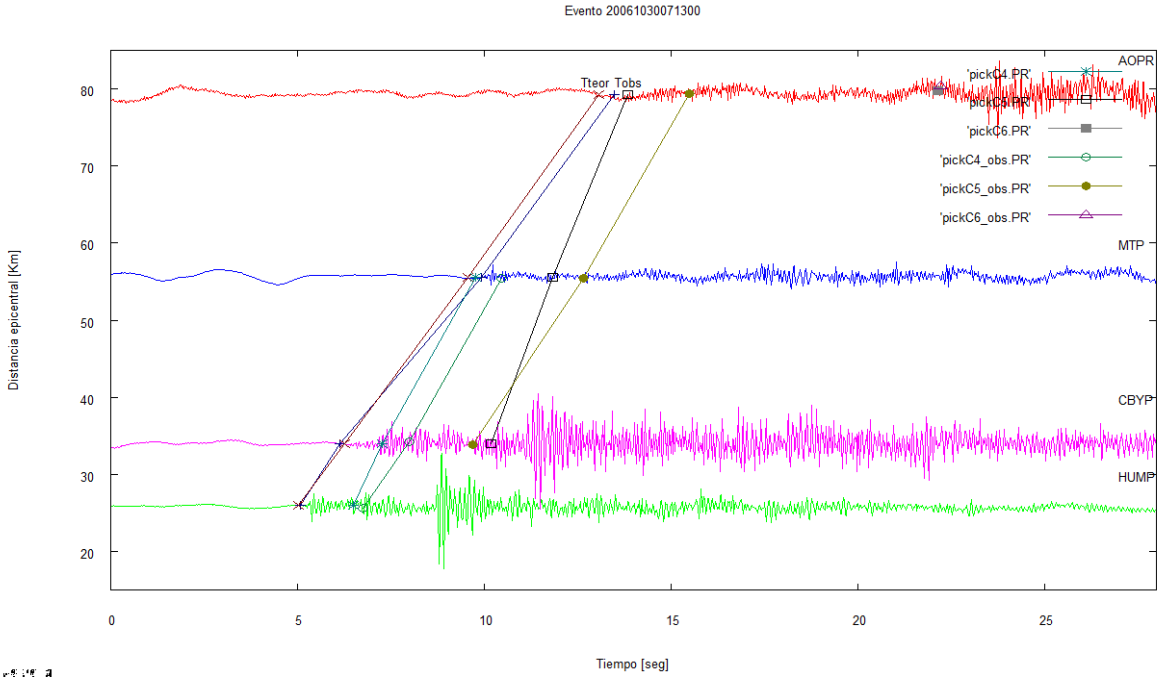


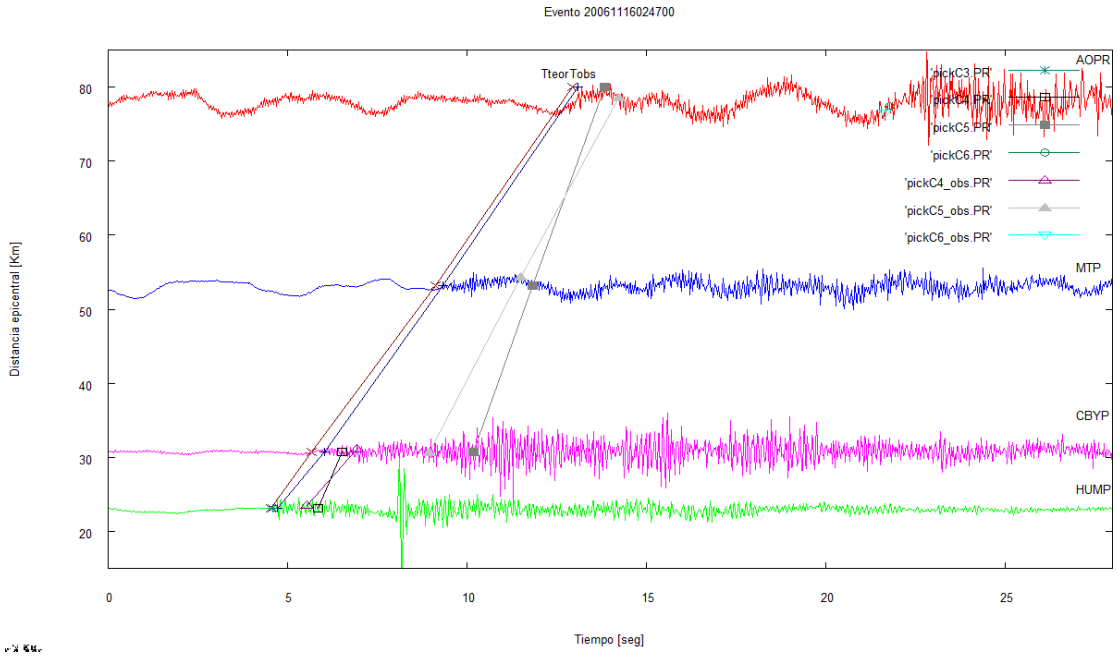

Evento 20100419082500
Tteor
Tobs
Tteor
'pickC3.PR'
HUMP
'pickC4.PR'
'pickC5.PR'
'pickC6.PR'
CBYP
'pickC3_obs.PR'
'pickC4_obs.PR'
'pickC5_obs.PR'
'pickC6_obs.PR'
MTP
STVI
Distancia epicentral [Km]
Tiempo [seg]

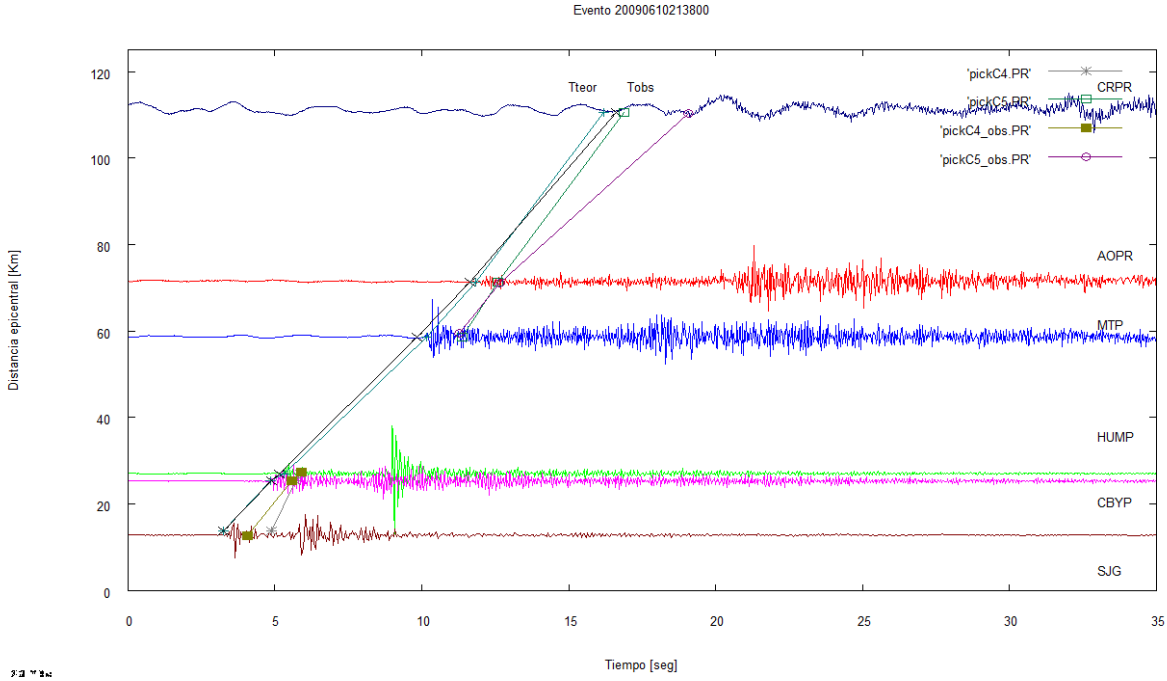

Evento 20100518115700
Tteor
Tobs
'pickC5.PR'
'pickC6.PR'
'pickC5_obs.PR'
'pickC6_obs.PR'
SJG
HUMP
CDVI
STVI
Distancia epicentral [Km]
Tiempo [seg]

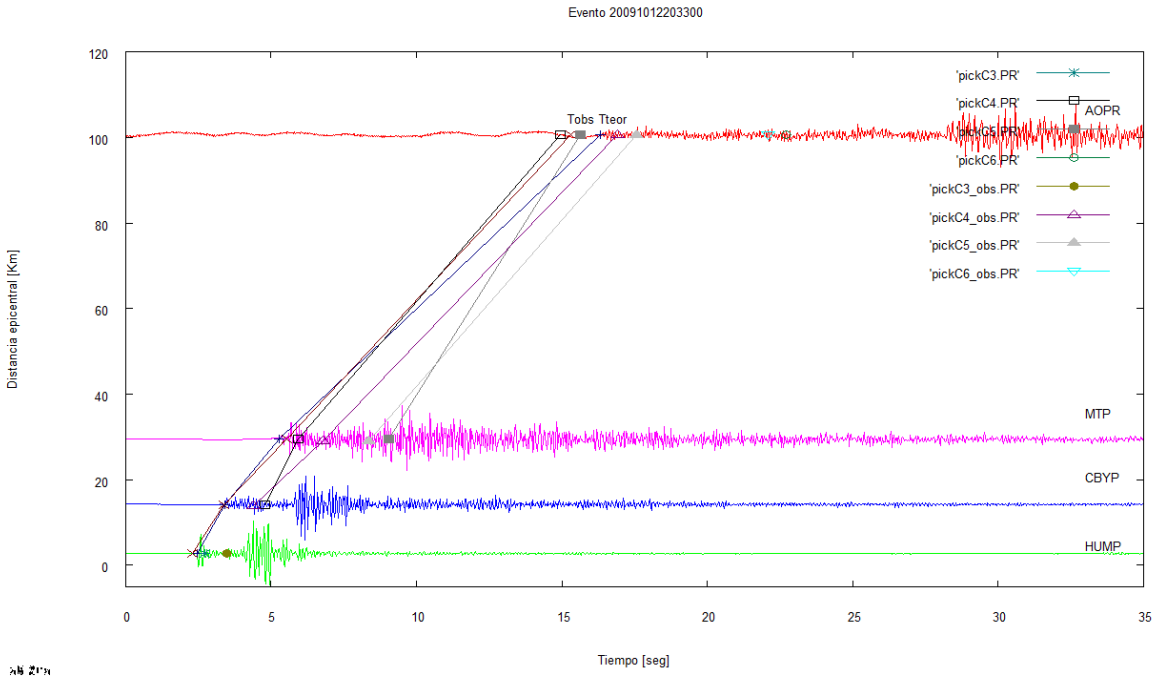

Evento 20100519000400
Tteor Tobs
'pickC3.PR'
'pickC4.PR'
'pickC5.PR'
'pickC6.PR'
'pickC3_obs.PR'
'pickC4_obs.PR'
'pickC5_obs.PR'
'pickC6_obs.PR'
HUMP
CDVI
STVI
Distancia epicentral [Km]
Tiempo [seg]

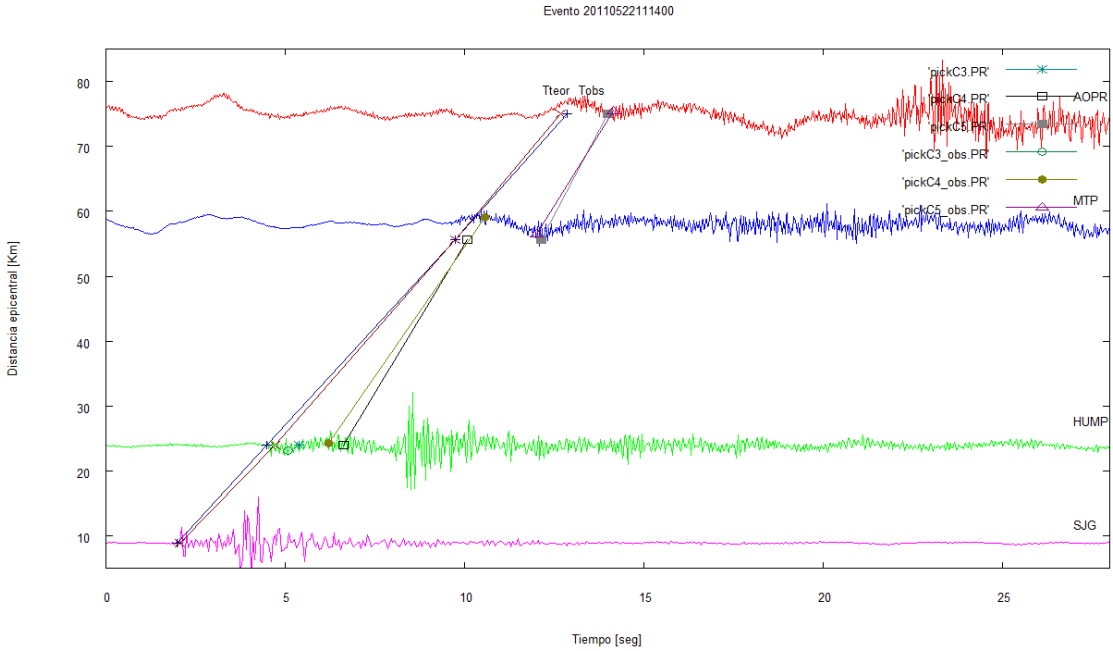
Región 6


Evento 20061030071300
Tteor Tobs
'pickC4.PR'
'pickC5.PR'
'pickC6.PR'
'pickC4_obs.PR'
'pickC5_obs.PR'
'pickC6_obs.PR'
AOPR
MTP
CBYP
HUMP
Distancia epicentral [Km]
Tiempo [seg]

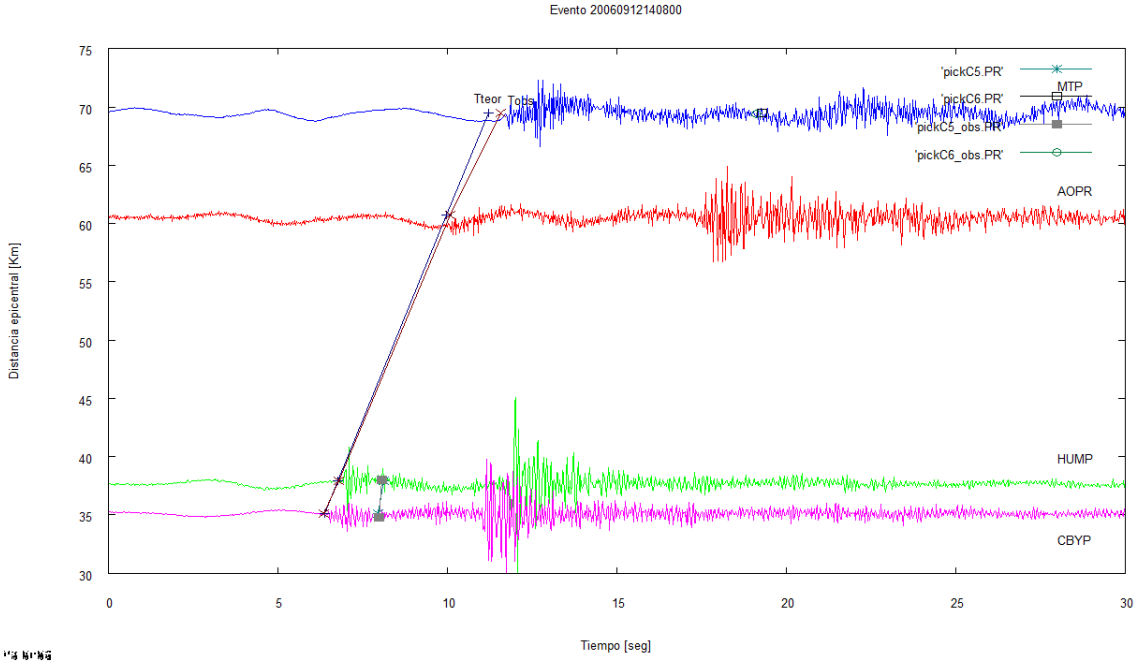

Evento 20061116024700
Tteor Tobs
AOPR
'pickC3.PR'
'pickC4.PR'
'pickC5.PR'
'pickC6.PR'
'pickC4_obs.PR'
'pickC5_obs.PR'
'pickC6_obs.PR'
MTP
CBYP
HUMP
Distancia epicentral [Km]
Tiempo [seg]

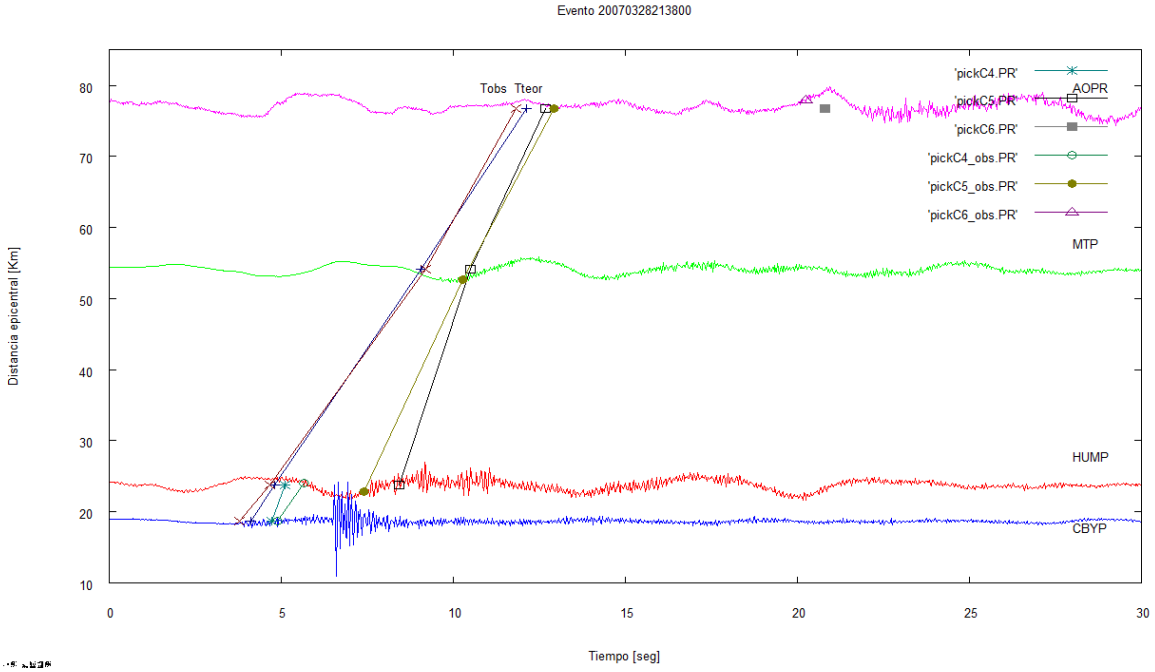

Evento 20090610213800
Tteor
Tobs
'pickC4.PR'
'pickC5.PR'
CRPR
'pickC4_obs.PR'
'pickC5_obs.PR'
AOPR
MTP
HUMP
CBYP
SJG
Distancia epicentral [Km]
Tiempo [seg]

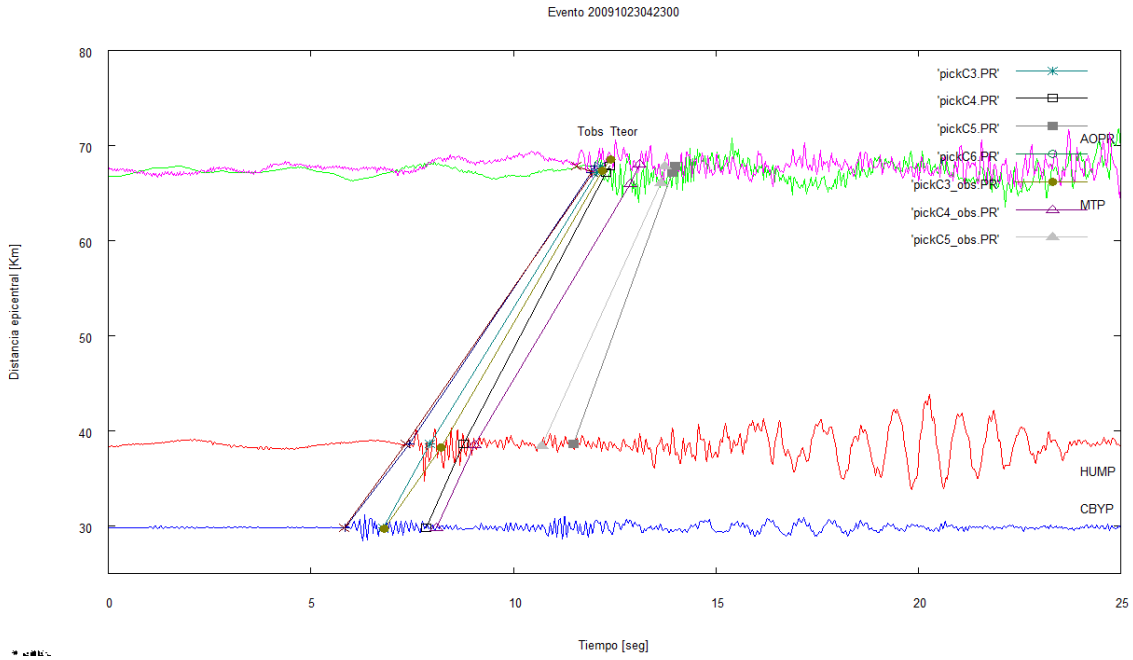

Evento 20091012203300
Distancia epicentral [Km]
Tiempo [seg]
Tobs Tteor
'pickC3.PR'
'pickC4.PR'
'pickC5.PR'
'pickC6.PR'
'pickC3_obs.PR'
'pickC4_obs.PR'
'pickC5_obs.PR'
'pickC6_obs.PR'
AOPR
MTP
CBYP
HUMP

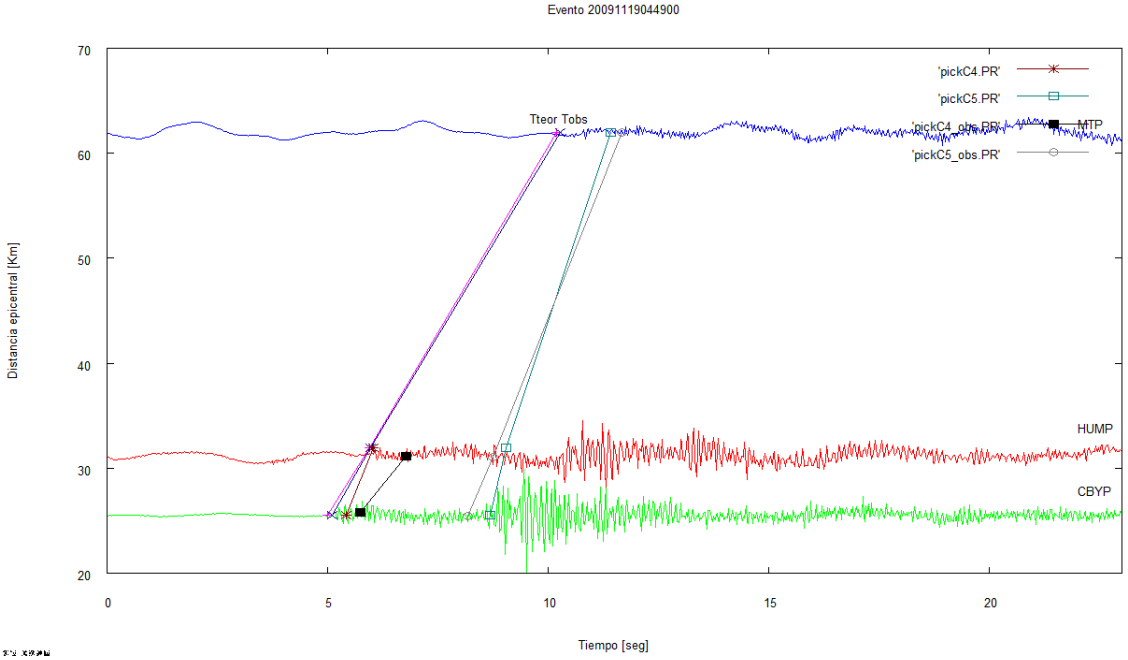

Evento 20110522111400
Distancia epicentral [Km]
Tiempo [seg]
Tteor Tobs
'pickC3.PR'
'pickC4.PR'
'pickC5.PR'
'pickC3_obs.PR'
'pickC4_obs.PR'
'pickC5_obs.PR'
AOPR
MTP
HUMP
SJG

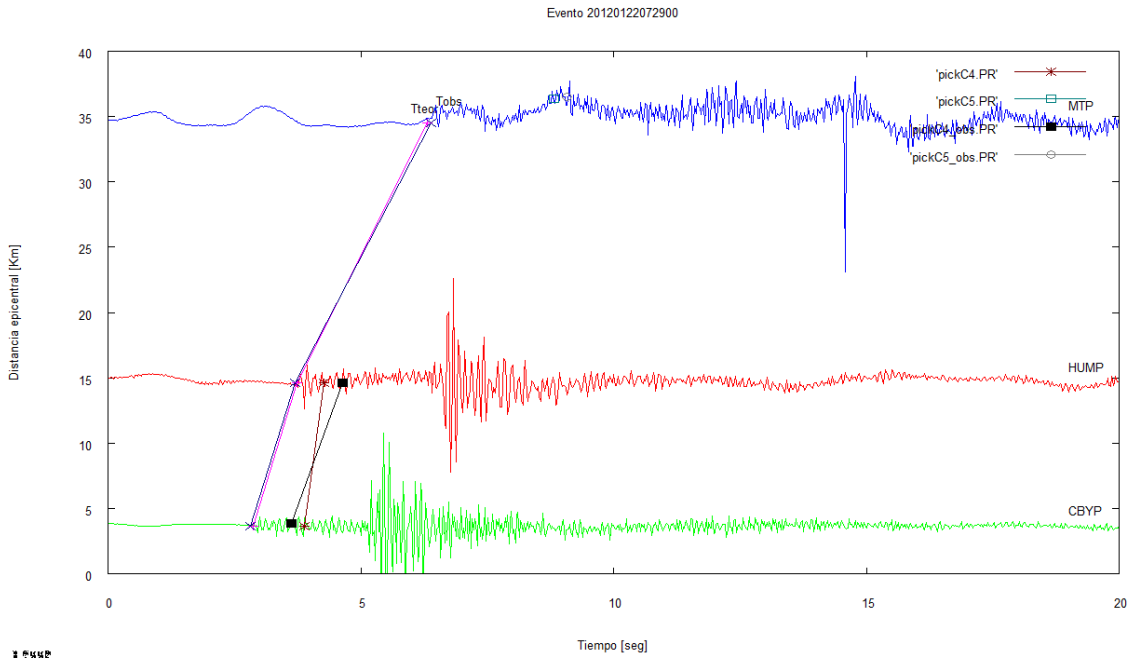
Región 5


Evento 20060912140800
Tteor Tobs
'pickC5.PR'
'pickC6.PR'
'pickC5_obs.PR'
'pickC6_obs.PR'
MTP
AOPR
HUMP
CBYP
Distancia epicentral [Km]
Tiempo [seg]

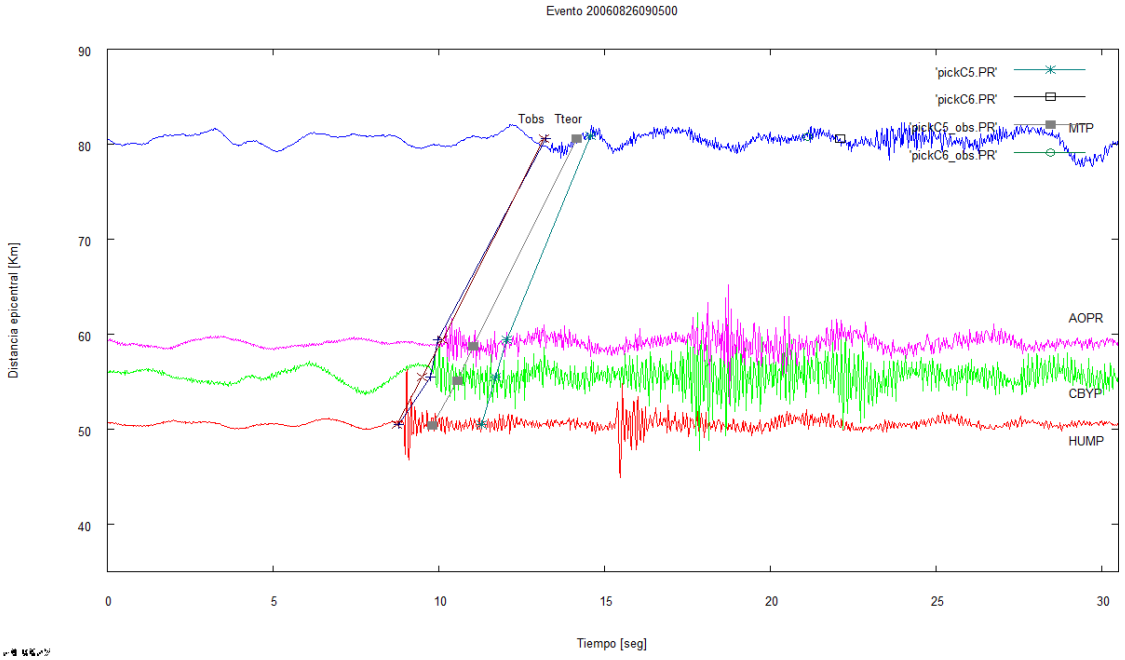

Evento 20070328213800
Tobs Tteor
'pickC4.PR'
'pickC5.PR'
'pickC6.PR'
'pickC4_obs.PR'
'pickC5_obs.PR'
'pickC6_obs.PR'
AOPR
MTP
HUMP
CBYP
Distancia epicentral [Km]
Tiempo [seg]

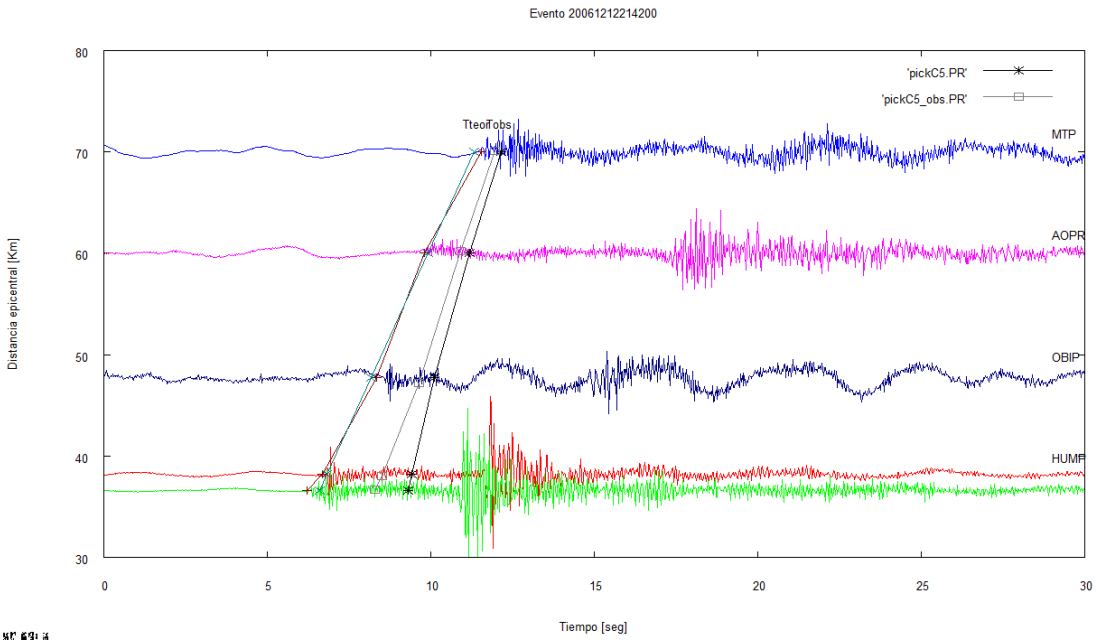

Evento 20091023042300
Distancia epicentral [Km]
Tiempo [seg]
Tobs Tteor
'pickC3.PR'
'pickC4.PR'
'pickC5.PR'
'pickC6.PR'
'pickC3_obs.PR'
'pickC4_obs.PR'
'pickC5_obs.PR'
AOPR
MTP
HUMP
CBYP

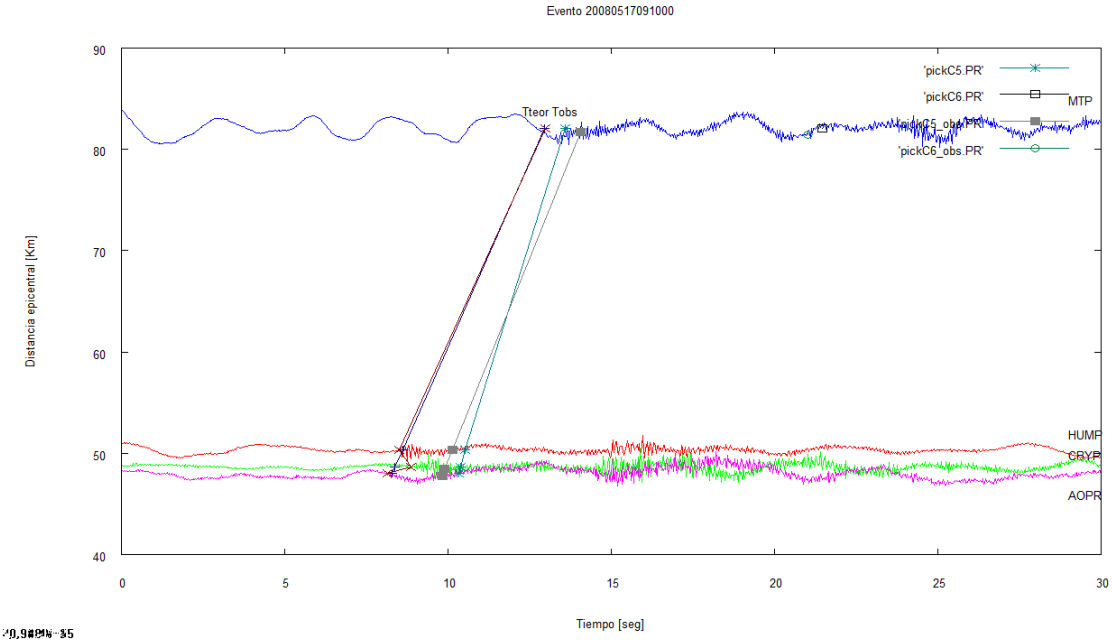

Evento 20091119044900
Distancia epicentral [Km]
Tiempo [seg]
Tteor Tobs
'pickC4.PR'
'pickC5.PR'
'pickC4_obs.PR'
'pickC5_obs.PR'
MTP
HUMP
CBYP

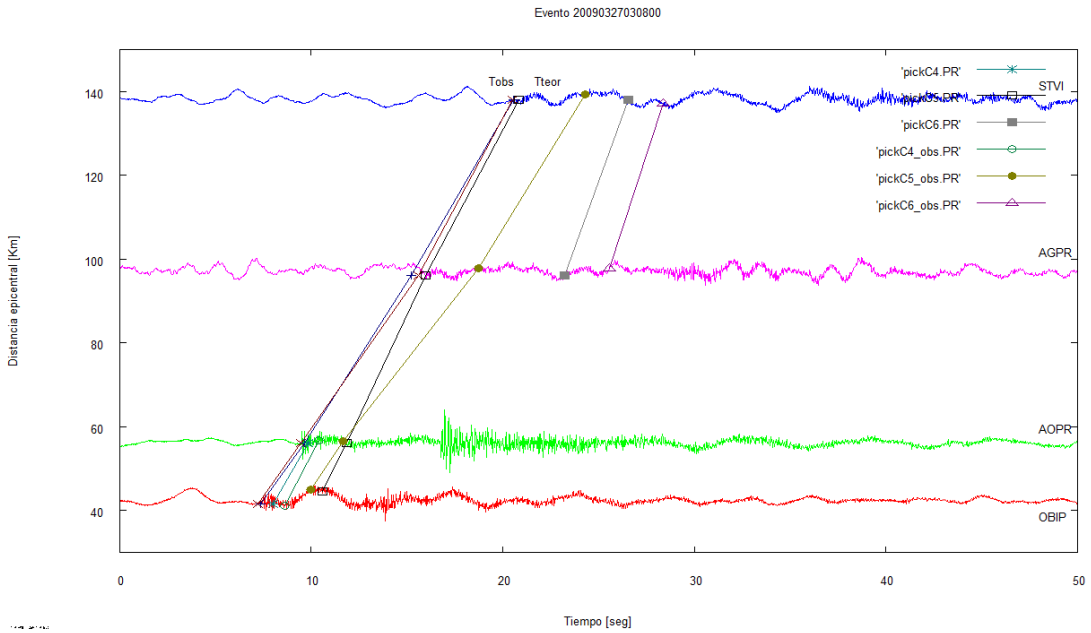

Evento 20120122072900
Distancia epicentral [Km]
Tiempo [seg]
Tteor
Tobs
'pickC4.PR'
'pickC5.PR'
'pickC4_obs.PR'
'pickC5_obs.PR'
MTP
HUMP
CBYP

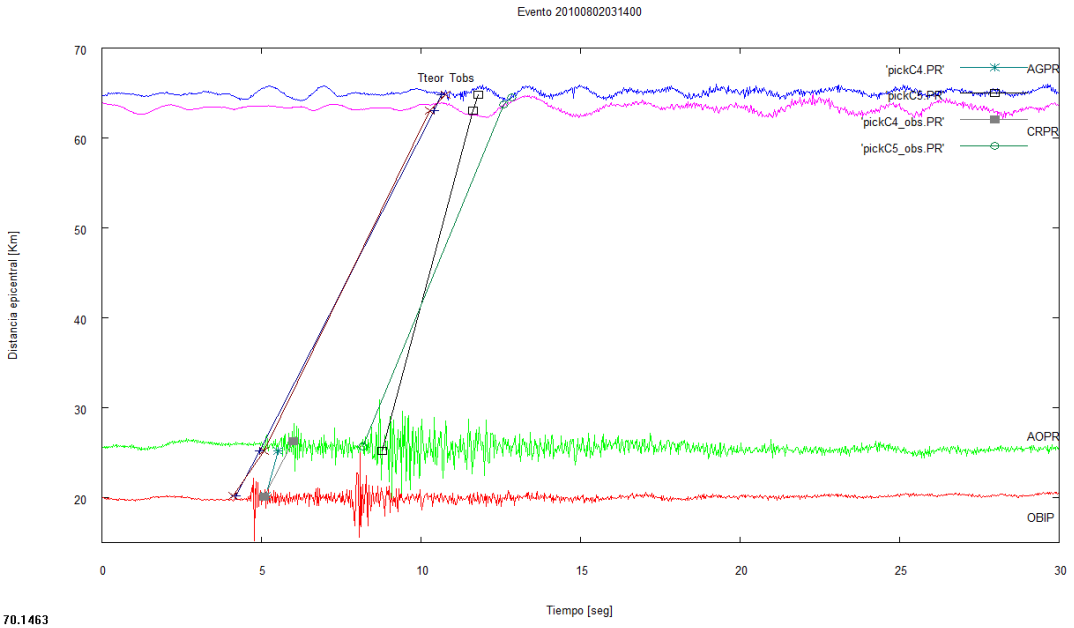
Región 4


Evento 20060826090500
Distancia epicentral [Km]
Tiempo [seg]
Tobs
Tteor
'pickC5.PR'
'pickC6.PR'
'pickC5_obs.PR'
'pickC6_obs.PR'
MTP
AOPR
CBYP
HUMP


Evento 20061212214200
'pickC5.PR'
'pickC5_obs.PR'
TteoiTobs
MTP
AOPR
OBIP
HUMP
Distancia epicentral [Km]
Tiempo [seg]

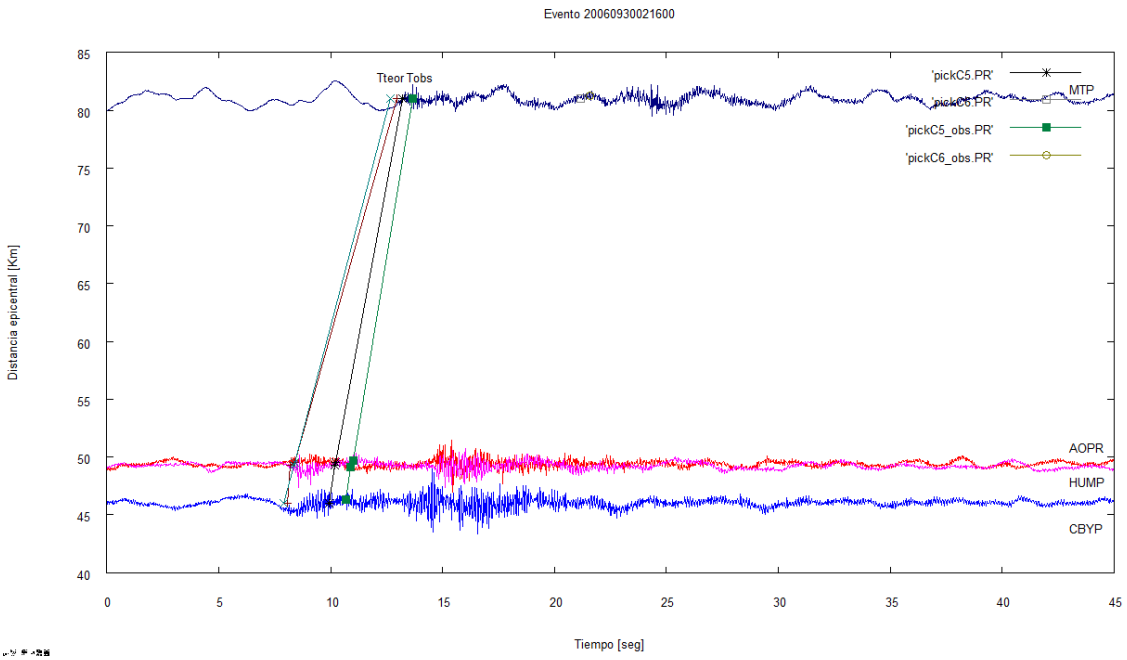

Evento 20080517091000
'pickC5.PR'
'pickC6.PR'
'pickC5_obs.PR'
'pickC6_obs.PR'
Tteor Tobs
MTP
HUMP
CRYP
AOPR
Distancia epicentral [Km]
Tiempo [seg]

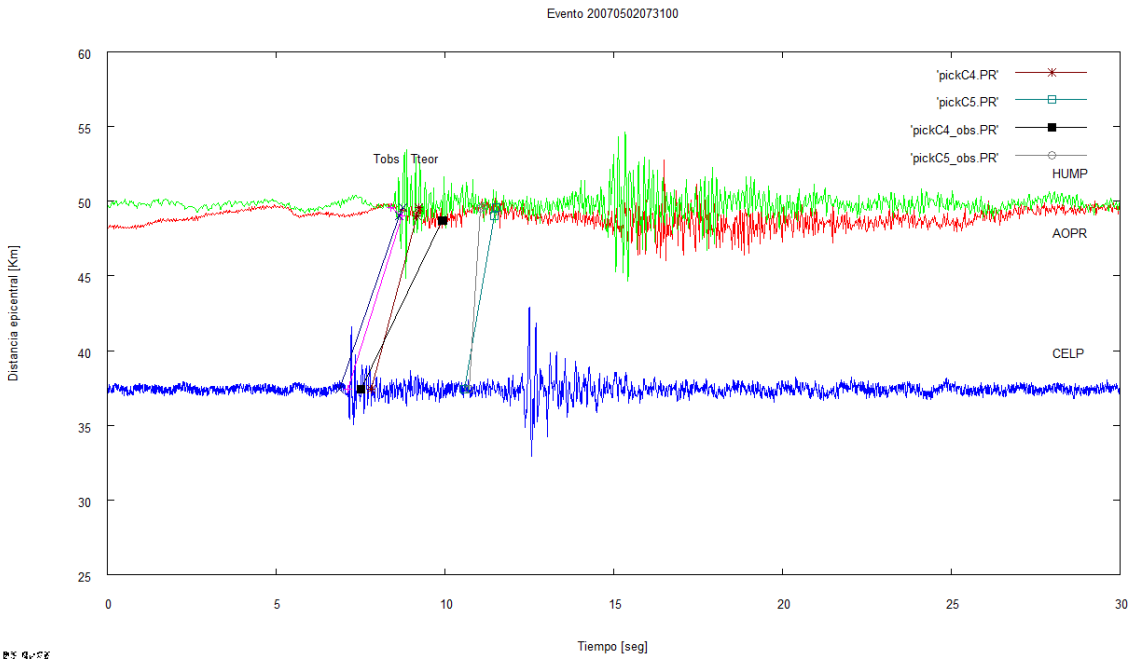

Evento 20090327030800
Tobs
Tteor
'pickC4.PR'
'pickC5.PR'
'pickC6.PR'
'pickC4_obs.PR'
'pickC5_obs.PR'
'pickC6_obs.PR'
STVI
AGPR
AOPR
OBIP
Distancia epicentral [Km]
Tiempo [seg]

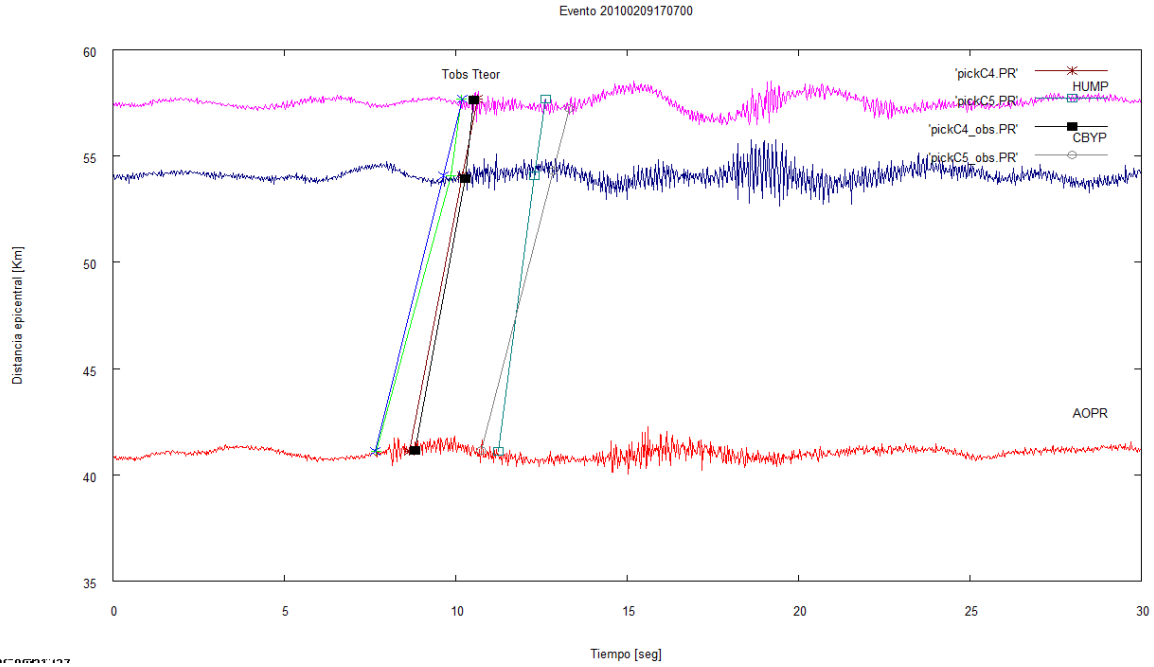

Evento 20100802031400
Tteor
Tobs
'pickC4.PR'
'pickC5.PR'
'pickC4_obs.PR'
'pickC5_obs.PR'
AGPR
CRPR
AOPR
OBIP
Distancia epicentral [Km]
Tiempo [seg]

355, 70.1463

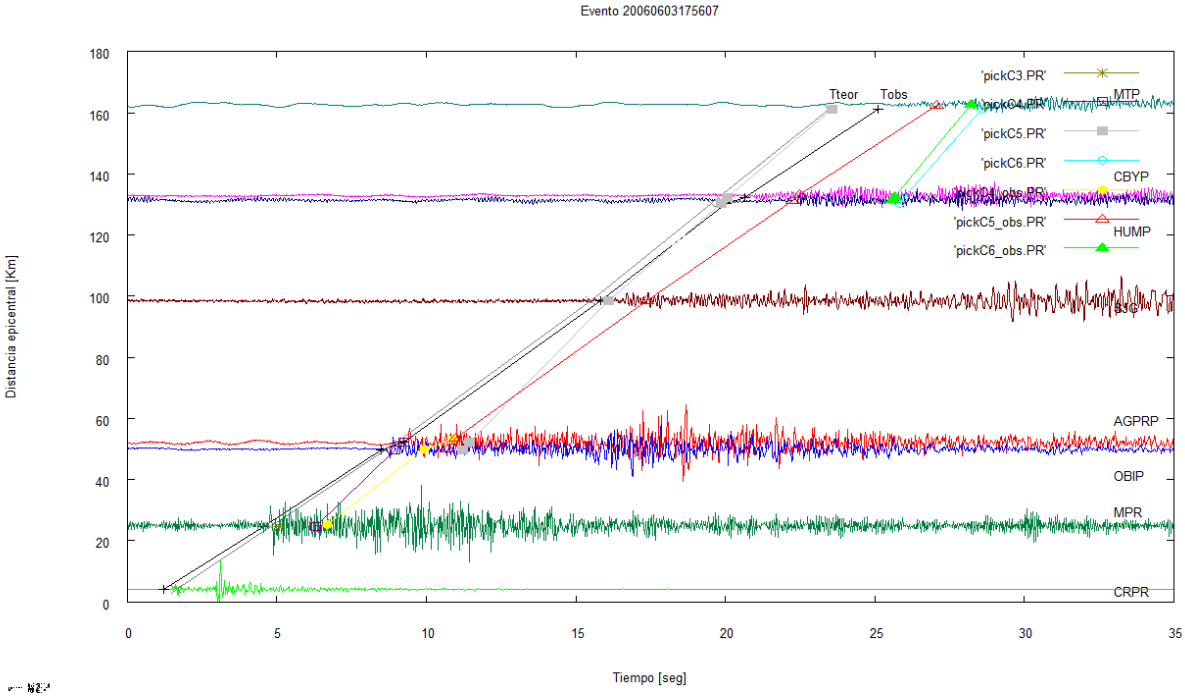
Región 3

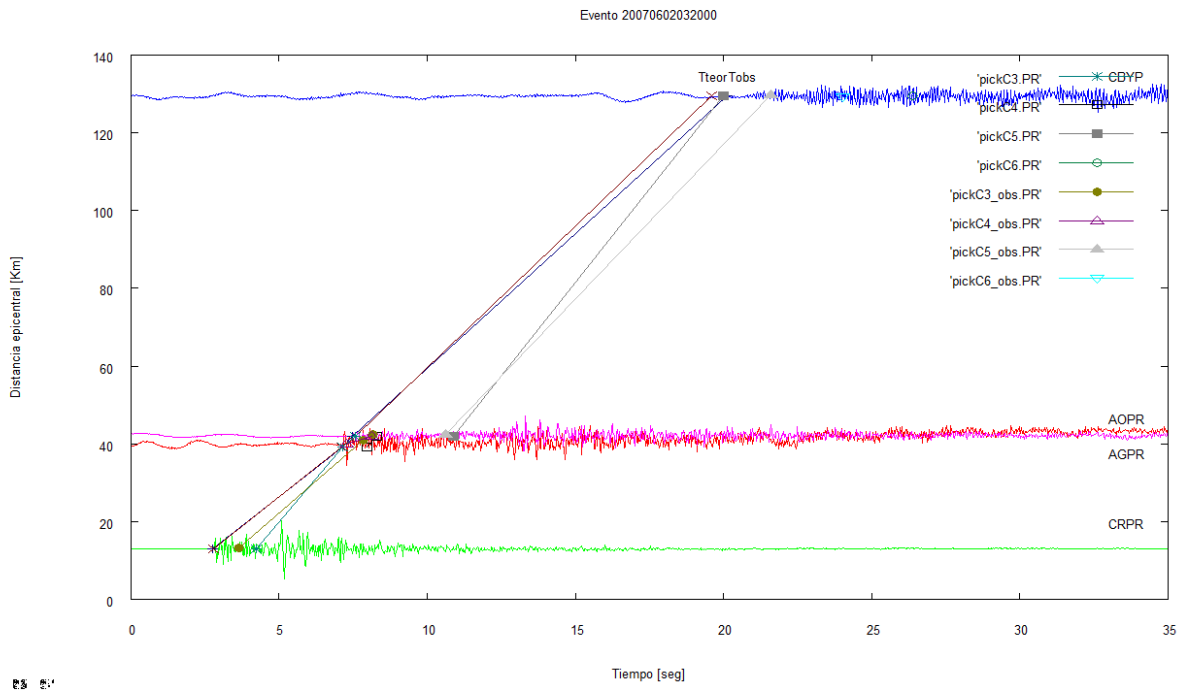

Evento 20060930021600
Tteor Tobs
'pickC5.PR'
'pickC6.PR'
'pickC5_obs.PR'
'pickC6_obs.PR'
MTP
AOPR
HUMP
CBYP
Distancia epicentral [Km]
Tiempo [seg]

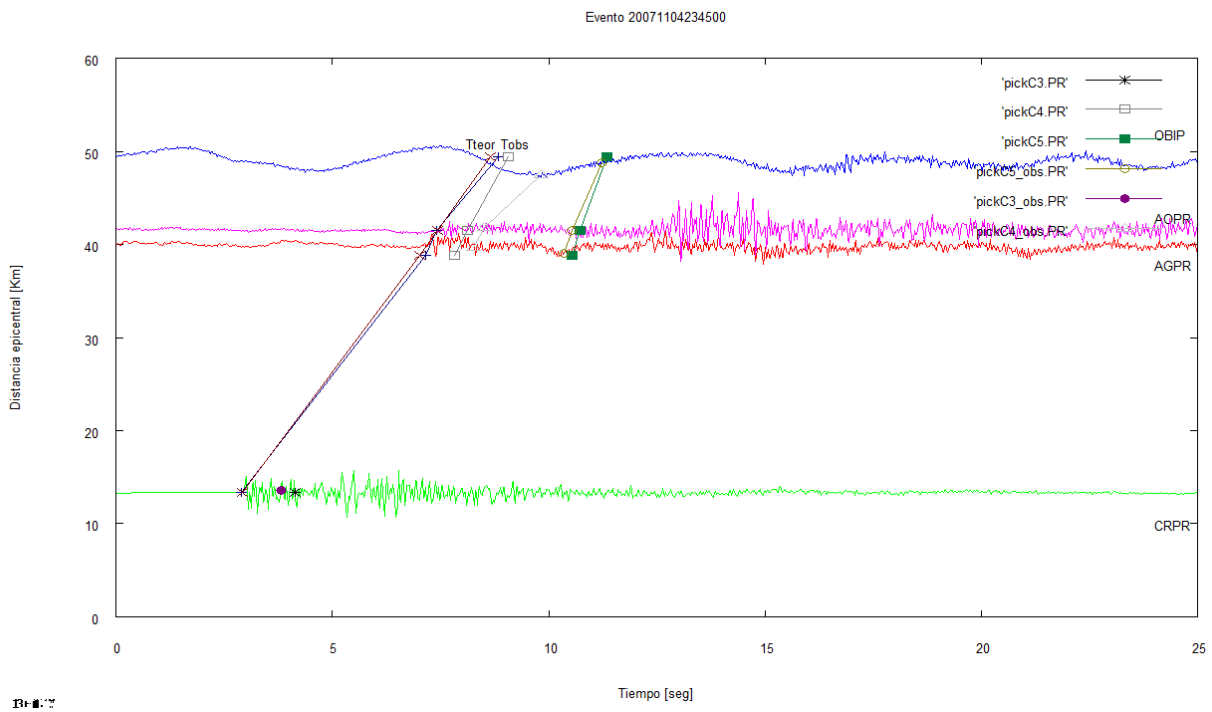

Evento 20070502073100
Tobs Tteor
'pickC4.PR'
'pickC5.PR'
'pickC4_obs.PR'
'pickC5_obs.PR'
HUMP
AOPR
CELP
Distancia epicentral [Km]
Tiempo [seg]

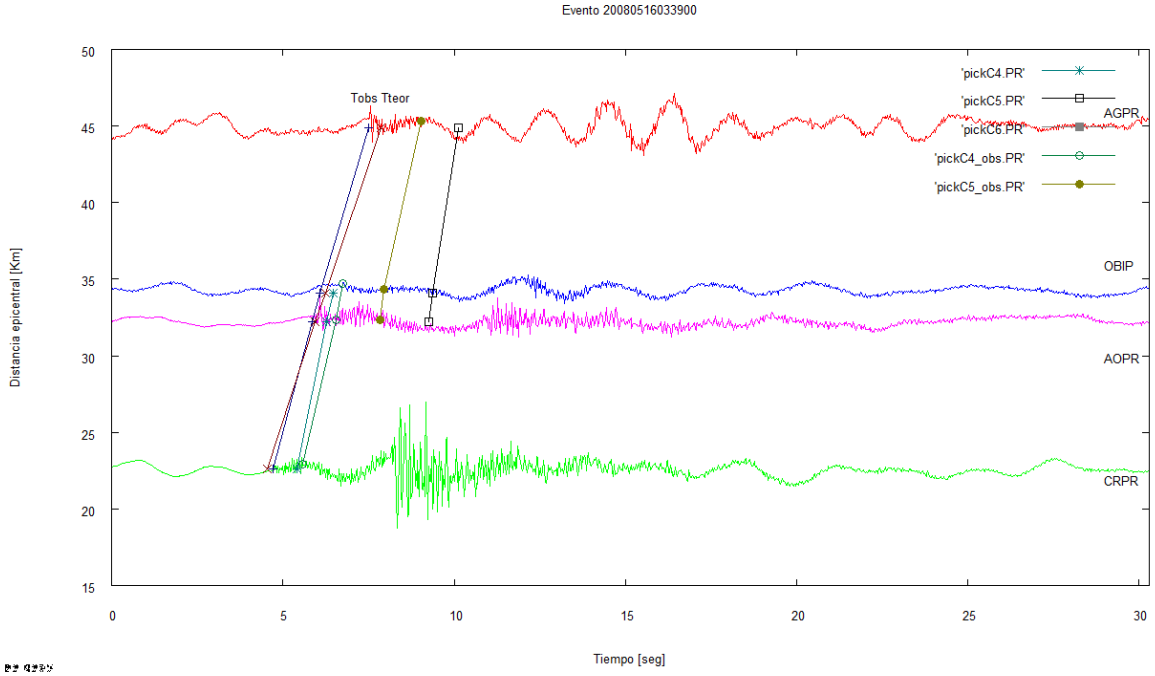

Evento 20100209170700
Tobs Tteor
'pickC4.PR'
'pickC5.PR'
'pickC4_obs.PR'
'pickC5_obs.PR'
HUMP
CBYP
AOPR
Distancia epicentral [Km]
Tiempo [seg]

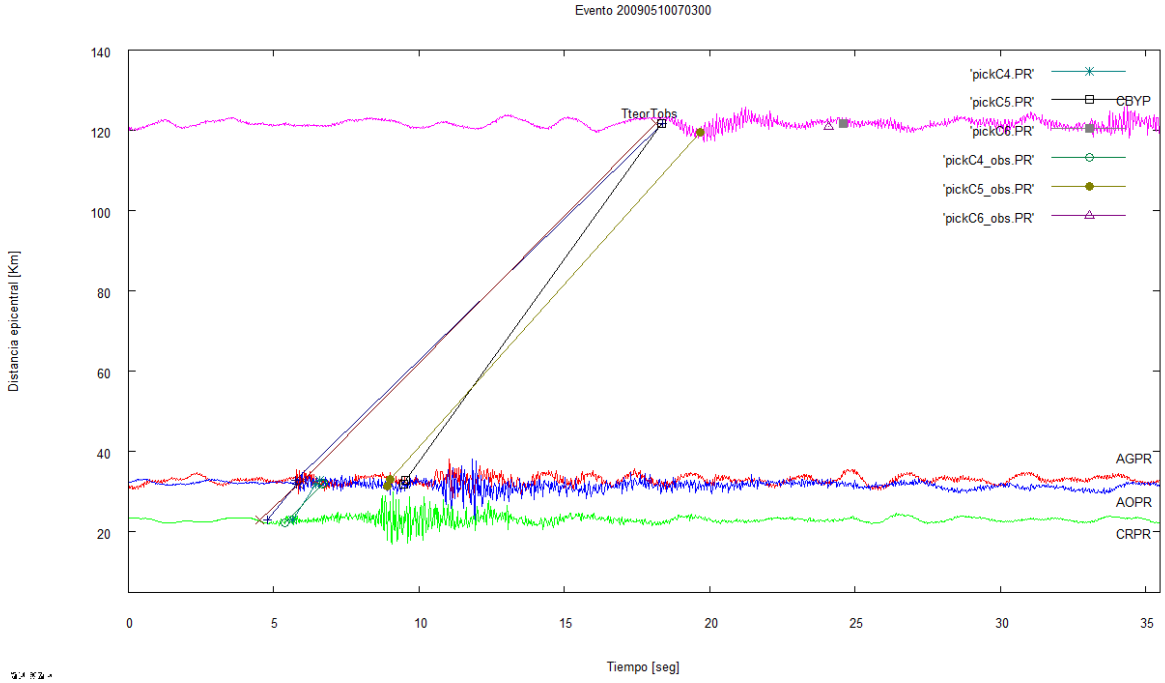
Región 2


Evento 20060603175607
Tteor
Tobs
'pickC3.PR'
'pickC4.PR'
'pickC5.PR'
'pickC6.PR'
'pickC4_obs.PR'
'pickC5_obs.PR'
'pickC6_obs.PR'
MTP
CBYP
HUMP
AGPRP
OBIP
MPR
CRPR
Distancia epicentral [Km]
Tiempo [seg]

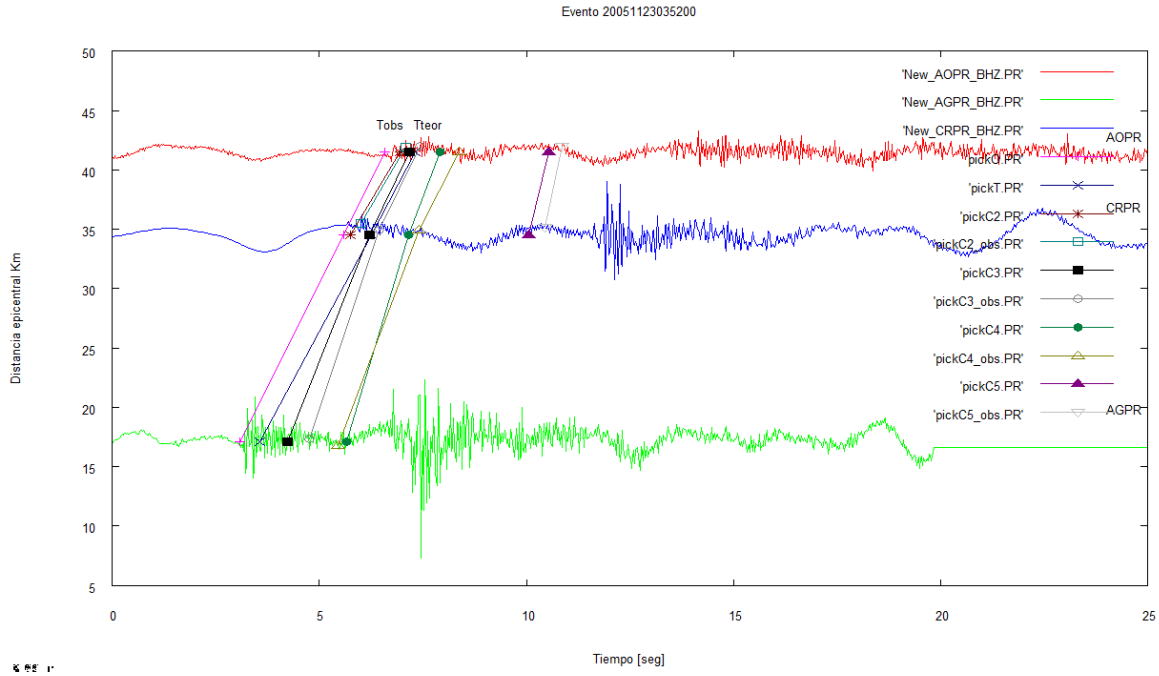

Evento 20070602032000
Distancia epicentral [Km]
Tiempo [seg]
TteorTobs
'pickC3.PR'
'pickC4.PR'
'pickC5.PR'
'pickC6.PR'
'pickC3_obs.PR'
'pickC4_obs.PR'
'pickC5_obs.PR'
'pickC6_obs.PR'
CDYP
AOPR
AGPR
CRPR

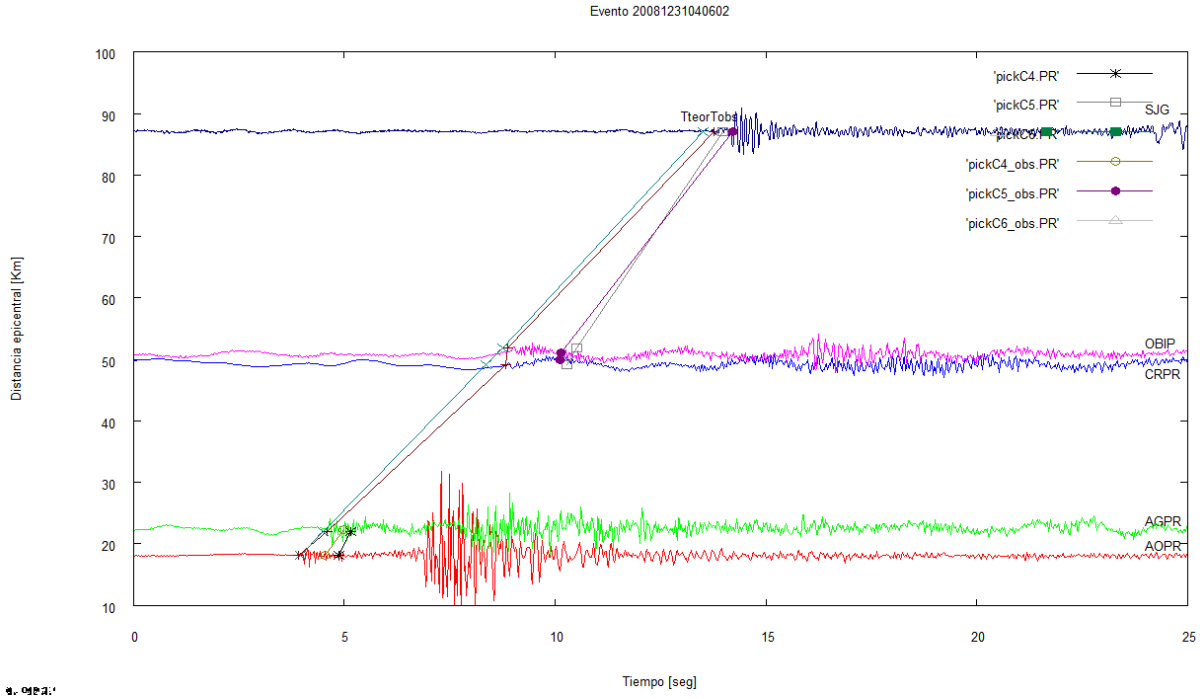

Evento 20071104234500
Distancia epicentral [Km]
Tiempo [seg]
Tteor Tobs
'pickC3.PR'
'pickC4.PR'
'pickC5.PR'
'pickC5_obs.PR'
'pickC3_obs.PR'
'pickC4_obs.PR'
OBIP
AOPR
AGPR
CRPR

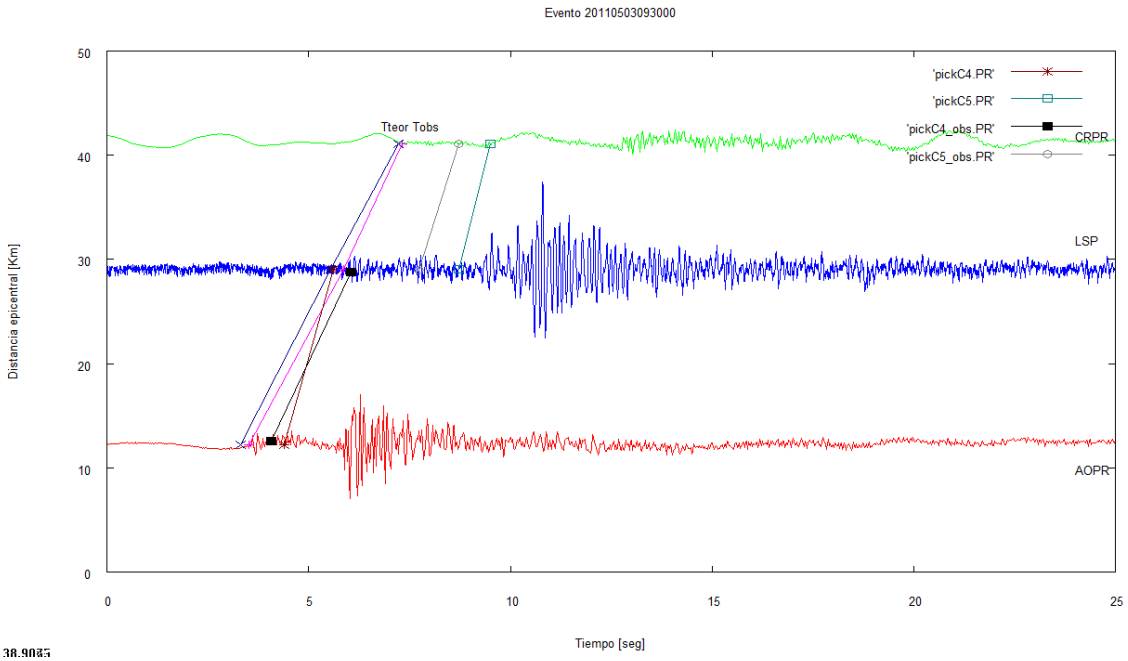

Evento 20080516033900
Tobs Tteor
'pickC4.PR'
'pickC5.PR'
'pickC6.PR'
'pickC4_obs.PR'
'pickC5_obs.PR'
AGPR
OBIP
AOPR
CRPR
Distancia epicentral [Km]
Tiempo [seg]

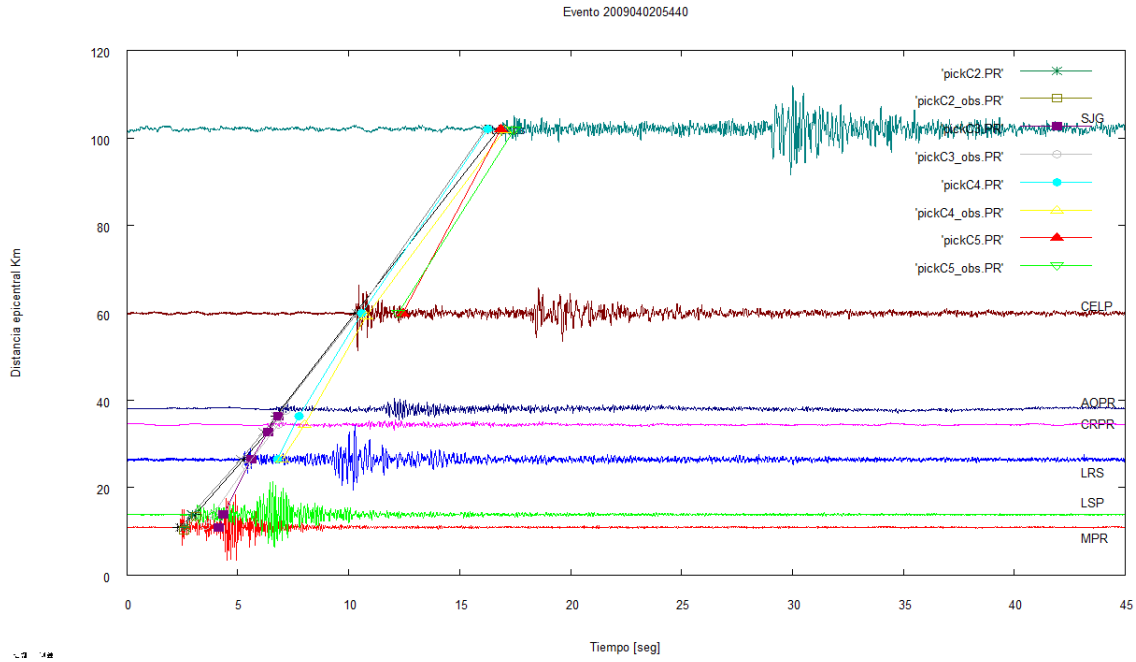

Evento 20090510070300
TteorTobs
'pickC4.PR'
'pickC5.PR'
'pickC6.PR'
'pickC4_obs.PR'
'pickC5_obs.PR'
'pickC6_obs.PR'
CBYP
AGPR
AOPR
CRPR
Distancia epicentral [Km]
Tiempo [seg]

Región 1


Evento 20051123035200
Distancia epicentral Km
Tiempo [seg]
Tobs
Tteor
'New_AOPR_BHZ.PR'
'New_AGPR_BHZ.PR'
'New_CRPR_BHZ.PR'
'pickO.PR'
'pickT.PR'
'pickC2.PR'
'pickC2_obs.PR'
'pickC3.PR'
'pickC3_obs.PR'
'pickC4.PR'
'pickC4_obs.PR'
'pickC5.PR'
'pickC5_obs.PR'
AOPR
CRPR
AGPR


Evento 20081231040602
Distancia epicentral [Km]
Tiempo [seg]
TteorTobs
'pickC4.PR'
'pickC5.PR'
'pickC6.PR'
'pickC4_obs.PR'
'pickC5_obs.PR'
'pickC6_obs.PR'
SJG
OBIP
CRPR
AGPR
AOPR


Evento 20110503093000
'pickC4.PR'
'pickC5.PR'
'pickC4_obs.PR'
'pickC5_obs.PR'
Tteor Tobs
CRPR
LSP
AOPR
Distancia epicentral [Km]
Tiempo [seg]


Evento 2009040205440
'pickC2.PR'
'pickC2_obs.PR'
'pickC3.PR'
'pickC3_obs.PR'
'pickC4.PR'
'pickC4_obs.PR'
'pickC5.PR'
'pickC5_obs.PR'
SJG
CELP
AOPR
CRPR
LRS
LSP
MPR
Distancia epicentral Km
Tiempo [seg]

10.APÉNDICE B

10.1 Programas realizados en Fortran 90:

Código de Extractor y datos de entrada

```
#- In and put data paths
#
rootPath:    C:\prsn\data\catalogue\prsn\solution
outPath:     C:\prsn\data\tmp
#
#- Catalogue summary file
#            ->
summaryFile: C:\prsn\data\catalogue\prsn\2012-04-12-working_cat.dat
outFile:     catOut.dat
errorFile:   C:\prsn\data\tmp\catalogue.err
#
#- Station and network files
#
StatFile:    C:\prsn\data\stations\seismic\PRSN_stations.dat
#
#- Search engine
#
mags:    1.0  7.0
depths: 10.0  200.0
dates:  1980-01-01 2012-12-31
lats:   17.0  20.0
lons:  -69.0 -63.5
gaps:    0   360
rms:     0.0  10.5
erh:     0.0  50.0
erz:     0.0  50.0
nstas:   0    200
#
#- FMtomo outputs.
#            ->
FMsources:   C:\prsn\data\tmp\FMTomo\sources.in
FMpath:      C:\prsn\data\tmp\FMTomo\
```

```
!--- Programa extractor stand alone
!--- Retrieve data  from the PRSN catalogues and creates a dup to FMTomo
!--- Coded By:
!---        Victor Huerfano y Denny Torres (May/07/2012)
!---
!---        (1) Asociacion con las formas de Onda...  si existe
!---        (2) Create the FMtomo related files..

            program extractor

            character path*39, tmpFile*100, cata(100000)*100, linea*100, paramFile*80, catLine(100000)*100, myError*100
            character FMsources*100, rootPath*80, outPath*80, summaryFile*80, a*20, aa*10, b*12, c*8, d*10, e*6, f*4
            character  dateIni*10, dateEnd*10, g*4, h*6, ii*6, jj*6, k*6, l*6, m*6, n*6, p*6, fmTmp*15
```

```
            character StatFile*100, FMpath*80, TMPcata(100000)*100, statList(1000)*100
   integer   dig, unit, err, mvals, nvals, year, month, day, hour, min, seg, mseg, gapMin, gapMax, gap
   integer   yearI,mesI,diaI,yearF,mesF,diaF,nts,ntsMin,ntsMax
   real      magIni,magEnd,mag,sec,ZDown,ZUp,depth,latS,latN,lat,lonW,lonE,lon,rms,rmsMin,rmsMax,erh,erhMin,erhMax
   real      erz,erzMin,erzMax
   real*8    timeIni, timeEnd, quakeTime

!- Configuration parameters
!
   paramFile = 'extractor.def'
   open(1, file=paramFile, status='old' )
10      read(1,'(a)', end=11) linea
       read(linea,*) a
          if (a .eq. 'rootPath:')     rootPath     = linea(10:len_trim(linea))
          if (a .eq. 'outPath:')      outPath      = linea(10:len_trim(linea))
          if (a .eq. 'summaryFile:')  summaryFile  = linea(14:len_trim(linea))
          if (a .eq. 'errorFile:')    myError      = linea(14:len_trim(linea))
          if (a .eq. 'FMsources:')    FMsources    = linea(14:len_trim(linea))
                                        if (a .eq. 'FMpath:')       FMpath       = linea(14:len_trim(linea))
          if (a .eq. 'StatFile:')     StatFile     = linea(14:len_trim(linea))
          if (a .eq. 'mags:')         read(linea,*) a, magIni, magEnd
          if (a .eq. 'dates:')        read(linea,*) a, dateIni, dateEnd
          if (a .eq. 'depths:')       read(linea,*) a, ZUp, ZDown
          if (a .eq. 'lats:')         read(linea,*) a, latS, latN
          if (a .eq. 'lons:')         read(linea,*) a, lonW, lonE
          if (a .eq. 'gaps:')         read(linea,*) a, gapMin, gapMax
          if (a .eq. 'rms:')          read(linea,*) a, rmsMin, rmsMax
          if (a .eq. 'erh:')          read(linea,*) a, erhMin, erhMax
          if (a .eq. 'erz:')          read(linea,*) a, erzMin, erzMax
          if (a .eq. 'nstas:')        read(linea,*) a, ntsMin, ntsMax

       go to 10
11  close(1)

!- Stations arrays
  iStat = 0
  open(5, file=StatFile, status='old')
52      read(5,'(a)',end=51) linea
                                iStat = iStat + 1
                                statList(iStat) = linea
                            go to 52
51  close(5)

!- Decoding user requested dates
!
  read (dateIni,'(i4,1x,i2,1x,i2)') yearI,mesI,diaI
  read (dateEnd,'(i4,1x,i2,1x,i2)') yearF,mesF,diaF
  call dtu(yearI,mesI,diaI,0,0,0.,timeIni,ifail)
  call dtu(yearF,mesF,diaF,0,0,0.,timeEnd,ifail)

!- read the summaryfile
!
  print *, 'Opening summary file:', summaryFile
!
  iCat = 0
  open(2, file=summaryFile, status='old')
20      read(2, '(a)', end=21 ) linea
          iCat = iCat + 1
          catLine(iCat) = linea
       go to 20
21 close(2)

!- Searching engine
!
```

```
   do 30 i = 1, iCat
!     print *, catLine(i)
      read(catLine(i),*,err=31, end=31) aa, b, c, d, e, f, g, h, ii, jj, k, l, m, n, p

!- Date and Time
!
      read(aa,'(i4,1x,i2,1x,i2)') year, month, day
      read(b,'(i2,1x,i2,1x,i2,1x,i2)') hour, min, seg, mseg
      sec = seg + mseg/100
      call dtu(year,month,day,hour,min,seg,quakeTime,ifail)
      if ( quakeTime .lt. timeIni .or. quakeTime .gt. timeEnd ) catLine(i) = ' '

!- Magnitude
      if ( g(1:1) .eq.'m' .or. g(1:1) .eq.'P' .or. g(1:1) .eq.'S' .or. g(1:1) .eq.'N' ) then
          read(f,*) mag
      else
          read(g,*) mag
      endif
      if ( mag .lt. magIni .or.  mag .gt. magEnd ) catLine(i) = ' '

!- Depth
      read(e,*) depth
      if ( depth .lt. ZUp .or. depth .gt. ZDown ) catLine(i) = ' '

!- Latitude
      read(c,*) lat
      if ( lat .lt. latS .or. lat .gt. latN ) catLine(i) = ' '

!- Longitude
     read(d,*) lon
     if ( lon .lt. lonW .or. lon .gt. lonE ) catLine(i) = ' '

!- Gaps
!    print *, l
     read(l,*,err=31) gap
     if ( gap .lt. gapMin .or. gap .gt. gapMax ) catLine(i) = ' '

!- RMS
     read(ii,*,err=31) rms
     if ( rms .lt. rmsMin .or. rms .gt. rmsMax ) catLine(i) = ' '

!- ERH
    read(jj,*,err=31) erh
    if ( erh .lt. erhMin .or. erh .gt. erhMax ) catLine(i) = ' '

!- ERZ
    read(k,*,err=31) erz
    if ( erz .lt. erzMin .or. erz .gt. erzMax ) catLine(i) = ' '

!- Number of stations
    read(p,*,err=31) nts
    if ( nts .lt. ntsMin .or. nts .gt. ntsMax ) catLine(i) = ' '

!- Generic cleaner
    iCl = 0
    if (iCl .eq. 1 ) then
31      catLine(i) = ' '
    endif

30  continue

!- Cleaner...  move ok events to a new array!
   iCatOk = 0
   do i = 1, iCat
```

```
        if ( catLine(i) .ne. ' ' ) then
           iCatOk = iCatOk + 1
           cata(iCatOk) = catLine(i)
!           print *, catb(iCatOk)
        endif
    enddo

!- Extractor
    print *, 'decompresing catalogue...'

    open(3, file=myError, status='unknown')
       do i = 1, iCatOk
         read(cata(i),*) aa, b
         read(aa,'(i4,1x,i2,1x,i2)') year, month, day
         read(b,'(i2,1x,i2,1x,i2,1x,i2)') hour, min, seg, mseg
         write(tmpFile,'(i4.4,"\",i2.2,"\",i2.2,i2.2,i2.2,i2.2,".",i2.2)') year,month,day,hour,min,seg,mseg
         tmpFile = rootPath(1:len_trim(rootPath))//'\'//tmpFile(1:len_trim(tmpFile))
         tmpFile = adjustl(tmpFile)

!          print *, 'Working on file: ', tmpFile(1:len_trim(tmpFile))
          TMPcata(i) = tmpFile

         open(2, file=tmpFile, status='old', err=42 )
41             read(2,'(a)', end=40) linea
!              print *, linea
               go to 41
40         close(2)

!- Error detector and removal from array
         iCl = 0
         if (iCl .eq. 1 ) then
42             write(3,('"file do not exist: ",a75)') tmpFile
            cata(i) =  " "
         endif

!         write(tmpFile,'()') rootPath(1:len_trim(rootPath)),year,month,day,hour,min,seg,mseg
       enddo
    close(3)

!- FMtomo output
    iFT = 0
    do i =1, iCatOk
      if (len_trim(cata(i)) .ne. 0 ) iFT = iFT + 1
    enddo

    fmtmp = 'pick'

    open(4, file=FMsources, status='unknown')
        write(4,'(8x,i5)') iFT
        iFT = 0
        do i =1, iCatOk
          if (len_trim(cata(i)) .ne. 0 ) then
               iFT = iFT + 1
               read(cata(i),*) aa, b, c, d, e
               read(c,*) lat
               read(d,*) lon
                   lon = 360 - abs(lon)
               read(e,*) depth
               write(4,'(2x,f8.5,3x,f9.5,3x,f7.3)') lat, lon, depth
               write(4,('"1")')
                                                    write(fmTmp,('"pick",i5.5,".1pm")') iFT
               write(4,('"1 1 ",a15)') fmTmp

                                                    call danis2fmtomo(fmTmp,FMpath,TMPcata(i),statList,iStat)
```

```
!                                                   pause
!               print *, fmTmp
          endif
        enddo
    close(4)

    print *, 'Results: Catalogue, local entrys and events with solution... ', iCat, iCatOk, iFT

    stop

    end

!- Subroutine to resamble FMTomo data files..
   subroutine danis2fmtomo(fmNew,fmPath,inFile,statList,iStat)

   character fmNew*15, fmPath*80, tmpFM*100, inFile*100, statList(1000)*100, linea*100, stat*4, lsStat*4
   character hypofmlines(100)*80
   real      pTime, residual, staLat, staLon, staElev

   tmpFM = fmPath(1:len_trim(fmPath))//fmNew

!- Phase readings and output formating..
!
!  print *, inFile

   iFMLine = 0
   open(6, file=inFile(1:len_trim(inFile)), status='old')
61      read(6,'(a)', end=60) linea
          iOk = 0
          if ( (linea(3:5).ne.'sta' .and. linea(20:21).ne.'PR') .and. (linea(20:20) .eq. 'p' .or. linea(20:20) .eq. 'P') ) then
                                        iOk = 1
                                        read(linea,'(a4,30x,f6.2,11x,f6.2)') Stat, pTime, residual
                                    endif
                                    if (linea(21:21) .eq. 'p' .or. linea(21:21) .eq. 'P') then
                                        iOk = 1
                                        read(linea,'(1x,a4,30x,f6.2,11x,f6.2)') Stat, pTime, residual
                                    endif
                                    if ( (linea(3:5).ne.'sta' .and. linea(2:4) .ne. 'STA') .and. (linea(25:25) .eq. 'p' .or. linea(25:25) .eq. 'P') ) then
                                       iOk = 1
                                       read(linea,'(a4,35x,f6.2,11x,f6.2)') Stat, pTime, residual
                                    endif
                                    if (linea(3:5) .ne. 'STA' .and. (linea(26:26) .eq. 'p' .or. linea(26:26) .eq. 'P' .and. linea(1:7) .ne. 'Comment')
) then
                                       iOk = 1
                                       read(linea,'(1x,a4,35x,f6.2,11x,f6.2)') Stat, pTime, residual
                                    endif
                                    if ( (linea(3:5).ne.'STA' .and. linea(2:4).ne.'STA') .and. (linea(30:30) .eq. 'p' .or. linea(30:30) .eq. 'P')) then
                                        iOk = 1
                                        read(linea,'(a4,36x,f6.2,11x,f6.2)') Stat, pTime, residual
                                    endif
                                    if (linea(31:31) .eq. 'p' .or. linea(31:31) .eq. 'P' .and. linea(1:7) .ne. 'Comment' ) then
                                       iOk = 1
                                       read(linea,'(1x,a4,36x,f6.2,11x,f6.2)') Stat, pTime, residual
                                    endif

                                    if ( iOK .eq. 1 ) then
                                        iStatOk = 0
                                        do j= 1, iStat
                                                read(statList(j),*) lsStat, staLat, staLon, staElev
                                                if (lsStat .eq. Stat ) then
                                                   iStatOk = 1
                                                        iFMLine = iFMLine + 1
                                                        write(hypofmlines(iFMLine),'(f10.5,2x,f10.5,2x,f7.2,2x,f7.3,2x,f5.2)')         staLat,
staLon, staElev, pTime, residual
```

```
                                                    endif
            enddo
          endif

          if ( iStatOk .eq. 0 .and. iOK .eq. 1 ) print *, 'Station not found.. ', Stat

       go to 61
60 close(6)

    open(7, file=tmpFM, status='unknown')
                write(7,*) iFMLine
                do k = 1, iFMLine
                        write(7,*) hypofmlines(k)
                      enddo
             close(7)

   end

!       nvals = 0
!       mvals = 0
!       err   = 0
!       path  = '/data/home/SISMO/DATA/PRSN/ASCII/BOLOS/'
!
!c---    err = 0 => not solution
!c---    err = 1 => entry and solution found
!
!!       open(1,file='victor.tmp',status='old')
!!1          read(1,'(a)',end=11) linea
!!           if ( linea(55:58) .eq. 'PRSN' ) then
!!             nvals = nvals + 1
!!             cata(nvals) = linea
!!           endif
!!           go to 1
!!11           close(1)
!
!       open(2,file='sin.Solucion', status='unknown')
!          do i = 1, nvals
!             err = 0
!             call withSolution(cata(i),path,err)
!             if ( err .eq. 1 ) then
!                mvals = mvals + 1
!                cata(mvals) = cata(i)
!             else
!                write(2,*) cata(i)
!             endif
!          enddo
!       close(2)
!!---
!!---    Catalogo de formas de Onda....
!!---
!       iasp = 0
!               open(4, file='IASPEI_OUT.CAT', status='old')
!42         read(4,'(a)',end=41 ) linea
!              iasp = iasp + 1
!              iaspei(iasp) = linea
!          go to 42
!41      close(4)
!
!       unit = 3
!       open(unit,file='catalogue.sql', status='unknown')
!          do i = 1, mvals
!             dig = 0
!             do ii  = 1, iasp
!                      if ( iaspei(ii)(1:19) .eq. cata(i)(1:19) ) dig = 1
```

```
!             enddo
!             call extractor(unit,cata(i),dig)
!             write(unit,*)
!           enddo
!       close(unit)
!
!       end
!
!c--- Yes/No
!               subroutine withSolution(line,path,err)
!
!       character dirOUT*60, aseg*5, catfile*20, path*39, line*100
!       integer   yr, mm, dia, hr, min, err
!       real      seg
!
!               logical   ex
!
!       read(line,20) yr, mm, dia, hr, min, seg
!20     format(i4,1x,i2,1x,i2,1x,i2,1x,i2,1x,f5.3)
!
!       write(aseg,'(f5.2)') seg
!       if(aseg(1:1) .eq. " ") aseg(1:1) = '0'
!       if(aseg(2:2) .eq. " ") aseg(2:2) = '0'
!
!               write(catfile,'(i4,"/",i2.2,"/",i2.2,i2.2,i2.2,a5)') yr,mm,dia,hr,min,aseg
!       dirOUT = path//catfile
!
!               INQUIRE( FILE=dirOUT, EXIST=ex )
!       if ( ex ) err = 1
!
!       return
!       end
!
!c--- Esta rutina es la encargada de extraer las soluciones del catalogo PRSN
!c--- Seek for the IASPEI catalogue
!c--- Review for upper/lower case codes
!c---
!
!       subroutine extractor(unit,linea,dig)
!
!               character Upcode*4,Parrv*1,net*2,ph*1,aseg*5,root*39,catfile*20
!               character phase*6, channel*3, dirOUT*60, linea*100, argv*150
!               character Pweight*1, Pmotion*1, ID*15, statTMP*4, keyVal*3, axe*1
!               integer   version, unit, err, yr, mm, dia, hr, min, ifail
!               integer   dig, nstat, year, mes, dia, hora, min
!       integer   yesno, pYr, pMes, pDia, pHora, pMin
!       real      vcoGain, sec, xmg, fmg, dist, tsec, seg, pSeg
!               real*8    DasGain, utim, cTime, pTime, coda, amplMM, amplCOUNT
!
!       parameter ( nstat = 30 )
!               character xstat*4, sensorTMP*6, sensores(nstat)*6, stations(nstat)*4
!               real      codaFactor,ampFactor,Afp,Bfp,Aam,Bam,Cam(nstat),Cfp(nstat)
!               real      sensGAIN(nstat)
!
!               data          stations/'apr ','mgp ','sjg ','mcp ','cpd ','csb ','cdp ','csj ','mtp ','cgp ','lsp ','imo ','ide ','lpr ','sjv ','pnp ','cllp','porp','lrs
','tcgo','mep ','cerp','celp','sjgn','cbyp','mop','agp ','rum ','moca','corn'/
!               data            sensores/'S-13','S-13','MP-L4','S-13','S-13','S-13','S-13','S-13','S-13','S-13','S-13','S-13','S-13','S-13','S-13','MP-L4','S-13','S-
13','S-13','S-13','S-13','S-13','S-13','S-13','MP-L4','S-13','S-13','S-13','S-13','S-13','CMG-40'/
!               data                                sensGAIN/     630,     630,     170,     630,     630,     630,     630,     630,     630,     630,     630,
630,630,630,170,630,630,630,630,630,630,630,630,170,630,630,630,630,630,800/
!               data                                        Cfp/-0.453,-0.448,-0.274,0.0,-0.422,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,-0.266,0.0,0.0,0.0,-0.678,-0.762,-
0.512,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0/
!               data                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                Cam/
1.729,1.627,1.676,0.0,1.596,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,1.676,0.0,0.0,0.0,1.202,1.105,1.531,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0/
```

```
!
!       Afp     = 1.874
!       Bfp     = 0.238
!       Aam     = 0.819
!       Bam     = 0.639
!
!c---    Counts/Volt (DAS sensitivity)
!       DasGain = 3560
!               vcoGain = 60
!
!               root    = '/data/home/SISMO/DATA/PRSN/ASCII/BOLOS/'
!               ID      = 'temblor-XXX'
!               axe     = 'Z'
!
!       channel = 'SHZ'
!       net     = 'PR'
!               phase   = 'P-P_mm'
!               keyVal  = 'GAU'
!
!               version = 1
!
!       read(linea,20) yr, mm, dia, hr, min, seg
!20      format(i4,1x,i2,1x,i2,1x,i2,1x,i2,1x,f5.3)
!
!       write(aseg,'(f5.2)') seg
!       if(aseg(1:1) .eq. " ") aseg(1:1) = '0'
!       if(aseg(2:2) .eq. " ") aseg(2:2) = '0'
!
!               write(catfile,'(i4,"/",i2.2,"/",i2.2,i2.2,i2.2,a5)') yr,mm,dia,hr,min,aseg
!       dirOUT = root//catfile
!       print *, 'Working on file: ', dirOUT
!
!       open(20,file=dirOUT,status='old',err=18)
!1          read(20,'(a)',end=15) linea
!           if ( linea(1:4) .eq. 'Year' ) then
!                   read(20,'(i4,1x,i2,1x,i2,1x,i2,i2,1x,f5.3)') year,mes,dia,hora,min,sec
!
!             call dtu(year,mes,dia,hora,min,sec,utim,ifail)
!
!2             read(20,'(a)', end=15 ) linea
!
!             if ( linea(6:8) .eq. 'chn' ) version = 2
!
!             if ( version.eq.1 ) read(linea, 200, end=15 ) xstat
!             if ( version.eq.2 ) read(linea, 201, end=15 ) xstat
!
!205           continue
!
!                   yesno = 0
!
!             do j = 1, nstat
!               call convu(stations(j),UpCode)
!               if ( stations(j).eq.xstat .or. UpCode.eq.xstat ) then
!                 yesno     = 1
!                 statTMP   = xstat
!                 sensorTMP = sensores(j)
!                       if (version.eq.1 ) read(linea,'(5x,f5.2,10x,a1,15x,f5.3,23x,f3.2,1x,f3.2)', err=18) dist,ph,tsec,xmg,fmg
!                       if (version.eq.2 ) read(linea,'(9x,f5.2,10x,a1,15x,f5.3,23x,f3.2,1x,f3.2)', err=18) dist,ph,tsec,xmg,fmg
!                 pTime = utim + tsec
!                 call utd(pYr,pMes,pDia,pHora,pMin,pSeg,pTime,ifail)
!
!                       if ( ph.eq.'P' .or. ph.eq.'p' .or.  ph.eq.'S' .or. ph.eq.'s' .or. linea(20:20).eq.'S' .or. linea(20:20).eq.'s' ) then
!
!c--- PWAVE Case
```

```
!                    if ( ph.eq.'P' .or. ph.eq.'p' ) then
!                            Parrv   = linea(20:20)
!                            Pmotion = linea(22:22)
!                            Pweight = linea(24:24)
!                            write(unit,51)
ID,xstat,channel,net,sensores(j),axe,Parrv,ph,Pmotion,Pweight,pYr,pMes,pDia,pHora,pMin,pSeg,keyVal
!                          endif
!
!c--- Coda Magnitude Case
!                    if (fmg .gt. 0 ) then
!                            codaFactor = (fmg - Bfp*log10(dist) - Cfp(j))/Afp
!                            coda       = 10**codaFactor
!                      Parrv      = '?'
!                            Pweight    = '?'
!                            phase      = 'CODA'
!                      cTIME      = pTime + coda
!                            call utd(pYr,pMes,pDia,pHora,pMin,pSeg,cTime,ifail)
!                            write(unit,52) ID,xstat,channel,net,sensores(j),axe,Parrv,phase,Pweight,pYr,pMes,pDia,pHora,pMin,pSeg,keyVal
!                    endif
!
!c--- Amplitud Magnitud Case
!                    if (xmg .gt. 0 ) then
!                            ampFactor = (xmg - Bam*log10(dist) - Cam(j))/Aam
!                      amplMM    = 10**ampFactor
!
!                            if ( dig .eq. 0 ) then
!                        amplCOUNT = 0.
!                      else
!                              amplCOUNT = DasGain*sensGAIN(j)*(amplMM)/vcoGain
!                            endif
!
!                      Parrv     = '?'
!                            Pweight   = '?'
!                            phase     = 'P-P_mm'
!                            write(unit,53)
ID,xstat,channel,net,sensores(j),axe,Parrv,phase,Pweight,pYr,pMes,pDia,pHora,pMin,pSeg,keyVal,amplCOUNT,amplMM
!                    endif
!
!c--- S WAVE Case (No P WAVE)
!                  elseif ( ph.eq.'s' .or. ph.eq.'S' ) then
!                        stop 'Not already programed'
!                  else
!                        print *, 'Error reading the phase field.....'
!                  endif
!
!                endif
!              enddo
!
!                    if ( yesno.eq.0 .and. lnblnk(xstat).ne.0 .and. xstat.ne.' sta' .and. xstat.ne.'stat') then
!                  print *, xstat
!                  stop 'station not found'
!              endif
!
!c--- S WAVE Case (P WAVE already retrieved)
!                    if ( linea(20:20) .eq. 'S' .or. linea(20:20).eq. 's' .or. linea(25:25) .eq. 'S' .or. linea(25:25).eq. 's' ) then
!
!                      if ( version.eq.1 ) read(linea,'(19x,a1,16x,f5.3)', err=18) ph,tsec
!                      if ( version.eq.2 ) read(linea,'(24x,a1,15x,f5.3)', err=18) ph,tsec
!
!                pTime = utim + tsec
!                call utd(pYr,pMes,pDia,pHora,pMin,pSeg,pTime,ifail)
!                            Parrv   = '?'
!                Pmotion = linea(22:22)
!                Pweight = linea(24:24)
```

```
!                    write(unit,51)
ID,statTMP,channel,net,sensorTMP,axe,Parrv,ph,Pmotion,Pweight,pYr,pMes,pDia,pHora,pMin,pSeg,keyVal
!            endif
!
!            go to 2
!
!          endif
!
!          write(unit,'(a80)') linea
!          go to 1
!15      close(2)
!
!c---
!200     format(1x,a4)
!201     format(a4)
!
!c---
!51            format(a15,2x,a4,2x,a3,2x,a2,2x,a6,2x,a1,2x,a1,2x,2a1,2x,a1,2x,i4.2,2i2.2,2x,2i2.2,2x,f7.4,2x,a3," .00  .00  1.00  0.00  0.00 0.00
")
!52            format(a15,2x,a4,2x,a3,2x,a2,2x,a6,2x,a1,2x,a1,2x,a6,2x,a1,2x,i4.2,2i2.2,2x,2i2.2,2x,f7.4,2x,a3," .00  .00  1.00  0.00  0.00 0.00
")
!53            format(a15,2x,a4,2x,a3,2x,a2,2x,a6,2x,a1,2x,a1,2x,a6,2x,a1,2x,i4.2,2i2.2,2x,2i2.2,2x,f7.4,2x,a3,"                                .00
.00",2x,f15.5,2x,"0.00",2x,f15.5,2x," 0.00 ")
!
!18      continue
!
!       return
!
!       end
```

Lineator

```
!--- Programa extractor stand alone
!--- Retrieve data  from the PRSN catalogues and creates a dup to FMTomo
!--- Coded By:
!---          Victor Huerfano y Denny Torres (May/07/2012)
!---
!---          (1) Asociacion con las formas de Onda...  si existe
!---          (2) Create the FMtomo related files..

            program extractor

            character path*39, tmpFile*100, cata(100000)*100, linea*100, paramFile*80, catLine(100000)*100,
myError*100
            character FMsources*100, rootPath*80, outPath*80, summaryFile*80, a*20, aa*10, b*12, c*8, d*10,
e*6, f*4
            character  dateIni*10, dateEnd*10, g*4, h*6, ii*6, jj*6, k*6, l*6, m*6, n*6, p*6, fmTmp*15
            character StatFile*100, FMpath*80, TMPcata(100000)*100, statList(1000)*100
   integer   dig, unit, err, mvals, nvals, year, month, day, hour, min, seg, mseg, gapMin, gapMax, gap
   integer   yearI,mesI,diaI,yearF,mesF,diaF,nts,ntsMin,ntsMax
   real
magIni,magEnd,mag,sec,ZDown,ZUp,depth,latS,latN,lat,lonW,lonE,lon,rms,rmsMin,rmsMax,erh,erhMin,erhM
ax
   real      erz,erzMin,erzMax
   real*8    timeIni, timeEnd, quakeTime

!- Configuration parameters
!
   paramFile = 'extractor.def'
   open(1, file=paramFile, status='old' )
10       read(1,'(a)', end=11) linea
        read(linea,*) a
           if (a .eq. 'rootPath:')     rootPath     = linea(10:len_trim(linea))
           if (a .eq. 'outPath:')      outPath      = linea(10:len_trim(linea))
           if (a .eq. 'summaryFile:')  summaryFile  = linea(14:len_trim(linea))
           if (a .eq. 'errorFile:')    myError      = linea(14:len_trim(linea))
           if (a .eq. 'FMsources:')    FMsources    = linea(14:len_trim(linea))
                                  if (a .eq. 'FMpath:')       FMpath       = linea(14:len_trim(linea))
           if (a .eq. 'StatFile:')     StatFile     = linea(14:len_trim(linea))
           if (a .eq. 'mags:')         read(linea,*) a, magIni, magEnd
           if (a .eq. 'dates:')        read(linea,*) a, dateIni, dateEnd
           if (a .eq. 'depths:')       read(linea,*) a, ZUp, ZDown
           if (a .eq. 'lats:')         read(linea,*) a, latS, latN
           if (a .eq. 'lons:')         read(linea,*) a, lonW, lonE
           if (a .eq. 'gaps:')         read(linea,*) a, gapMin, gapMax
           if (a .eq. 'rms:')          read(linea,*) a, rmsMin, rmsMax
           if (a .eq. 'erh:')          read(linea,*) a, erhMin, erhMax
           if (a .eq. 'erz:')          read(linea,*) a, erzMin, erzMax
           if (a .eq. 'nstas:')        read(linea,*) a, ntsMin, ntsMax

        go to 10
```

```
11  close(1)

!- Stations arrays
   iStat = 0
   open(5, file=StatFile, status='old')
52      read(5,'(a)',end=51) linea
                              iStat = iStat + 1
                              statList(iStat) = linea
                           go to 52
51  close(5)

!- Decoding user requested dates
!
   read (dateIni,'(i4,1x,i2,1x,i2)') yearI,mesI,diaI
   read (dateEnd,'(i4,1x,i2,1x,i2)') yearF,mesF,diaF
   call dtu(yearI,mesI,diaI,0,0,0.,timeIni,ifail)
   call dtu(yearF,mesF,diaF,0,0,0.,timeEnd,ifail)

!- read the summaryfile
!
   print *, 'Opening summary file:', summaryFile
!
   iCat = 0
   open(2, file=summaryFile, status='old')
20      read(2, '(a)', end=21 ) linea
           iCat = iCat + 1
           catLine(iCat) = linea
       go to 20
21 close(2)

!- Searching engine
!
    do 30 i = 1, iCat
!      print *, catLine(i)
       read(catLine(i),*,err=31, end=31) aa, b, c, d, e, f, g, h, ii, jj, k, l, m, n, p

!- Date and Time
!
       read(aa,'(i4,1x,i2,1x,i2)') year, month, day
       read(b,'(i2,1x,i2,1x,i2,1x,i2)') hour, min, seg, mseg
       sec = seg + mseg/100
       call dtu(year,month,day,hour,min,seg,quakeTime,ifail)
       if ( quakeTime .lt. timeIni .or. quakeTime .gt. timeEnd ) catLine(i) = ' '

!- Magnitude
       if ( g(1:1) .eq.'m' .or. g(1:1) .eq.'P' .or. g(1:1) .eq.'S' .or. g(1:1) .eq.'N' ) then
           read(f,*) mag
       else
           read(g,*) mag
       endif
       if ( mag .lt. magIni .or.  mag .gt. magEnd ) catLine(i) = ' '
```

```
!- Depth
      read(e,*) depth
      if ( depth .lt. ZUp .or. depth .gt. ZDown ) catLine(i) = ' '

!- Latitude
      read(c,*) lat
      if ( lat .lt. latS .or. lat .gt. latN ) catLine(i) = ' '

!- Longitude
     read(d,*) lon
     if ( lon .lt. lonW .or. lon .gt. lonE ) catLine(i) = ' '

!- Gaps
!     print *, l
     read(l,*,err=31) gap
     if ( gap .lt. gapMin .or. gap .gt. gapMax ) catLine(i) = ' '

!- RMS
     read(ii,*,err=31) rms
     if ( rms .lt. rmsMin .or. rms .gt. rmsMax ) catLine(i) = ' '

!- ERH
    read(jj,*,err=31) erh
    if ( erh .lt. erhMin .or. erh .gt. erhMax ) catLine(i) = ' '

!- ERZ
    read(k,*,err=31) erz
    if ( erz .lt. erzMin .or. erz .gt. erzMax ) catLine(i) = ' '

!- Number of stations
    read(p,*,err=31) nts
    if ( nts .lt. ntsMin .or. nts .gt. ntsMax ) catLine(i) = ' '

!- Generic cleaner
    iCl = 0
    if (iCl .eq. 1 ) then
31      catLine(i) = ' '
    endif

30  continue

!- Cleaner...  move ok events to a new array!
   iCatOk = 0
   do i = 1, iCat
        if ( catLine(i) .ne. ' ' ) then
            iCatOk = iCatOk + 1
            cata(iCatOk) = catLine(i)
!           print *, catb(iCatOk)
        endif
   enddo
```

```
!- Extractor
   print *, 'decompresing catalogue...'

   open(3, file=myError, status='unknown')
      do i = 1, iCatOk
         read(cata(i),*) aa, b
         read(aa,'(i4,1x,i2,1x,i2)') year, month, day
         read(b,'(i2,1x,i2,1x,i2,1x,i2)') hour, min, seg, mseg
         write(tmpFile,'(i4.4,"\",i2.2,"\",i2.2,i2.2,i2.2,i2.2,".",i2.2)') year,month,day,hour,min,seg,mseg
         tmpFile = rootPath(1:len_trim(rootPath))//'\'//tmpFile(1:len_trim(tmpFile))
         tmpFile = adjustl(tmpFile)

!          print *, 'Working on file: ', tmpFile(1:len_trim(tmpFile))
          TMPcata(i) = tmpFile

         open(2, file=tmpFile, status='old', err=42 )
41             read(2,'(a)', end=40) linea
!              print *, linea
               go to 41
40         close(2)

!- Error detector and removal from array
         iCl = 0
         if (iCl .eq. 1 ) then
42            write(3,'("file do not exist: ",a75)') tmpFile
              cata(i) =  " "
         endif

!        write(tmpFile,'()') rootPath(1:len_trim(rootPath)),year,month,day,hour,min,seg,mseg
      enddo
   close(3)

!- FMtomo output
   iFT = 0
   do i =1, iCatOk
     if (len_trim(cata(i)) .ne. 0 ) iFT = iFT + 1
   enddo

   fmtmp = 'pick'

   open(4, file=FMsources, status='unknown')
      write(4,'(8x,i5)') iFT
      iFT = 0
      do i =1, iCatOk
         if (len_trim(cata(i)) .ne. 0 ) then
            iFT = iFT + 1
            read(cata(i),*) aa, b, c, d, e
            read(c,*) lat
            read(d,*) lon
               lon = 360 - abs(lon)
```

```
            read(e,*) depth
            write(4,'(2x,f8.5,3x,f9.5,3x,f7.3)') lat, lon, depth
            write(4,('"1")')
                                    write(fmTmp,('"pick",i5.5,".1pm")') iFT
            write(4,('"1 1 ",a15)') fmTmp

                                    call danis2fmtomo(fmTmp,FMpath,TMPcata(i),statList,iStat)
!                                   pause
!           print *, fmTmp
         endif
       enddo
   close(4)

   print *, 'Results: Catalogue, local entrys and events with solution... ', iCat, iCatOk, iFT

   stop

   end

!- Subroutine to resamble FMTomo data files..
  subroutine danis2fmtomo(fmNew,fmPath,inFile,statList,iStat)

  character fmNew*15, fmPath*80, tmpFM*100, inFile*100, statList(1000)*100, linea*100, stat*4, lsStat*4
  character hypofmlines(100)*80
  real      pTime, residual, staLat, staLon, staElev

  tmpFM = fmPath(1:len_trim(fmPath))//fmNew

!- Phase readings and output formating..
!
!  print *, inFile

  iFMLine = 0
  open(6, file=inFile(1:len_trim(inFile)), status='old')
61      read(6,'(a)', end=60) linea
          iOk = 0
          if ( (linea(3:5).ne.'sta' .and. linea(20:21).ne.'PR') .and. (linea(20:20) .eq. 'p' .or. linea(20:20) .eq. 'P') )
then
                                  iOk = 1
                                  read(linea,'(a4,30x,f6.2,11x,f6.2)') Stat, pTime, residual
                                endif
                                if (linea(21:21) .eq. 'p' .or. linea(21:21) .eq. 'P') then
                                  iOk = 1
                                  read(linea,'(1x,a4,30x,f6.2,11x,f6.2)') Stat, pTime, residual
                                endif
                                if ( (linea(3:5).ne.'sta' .and. linea(2:4) .ne. 'STA') .and. (linea(25:25) .eq. 'p' .or.
linea(25:25) .eq. 'P') ) then
                                 iOk = 1
                                 read(linea,'(a4,35x,f6.2,11x,f6.2)') Stat, pTime, residual
                                endif
```

```
                                if (linea(3:5) .ne. 'STA' .and. (linea(26:26) .eq. 'p' .or. linea(26:26) .eq. 'P' .and.
linea(1:7) .ne. 'Comment') ) then
                                  iOk = 1
                                  read(linea,'(1x,a4,35x,f6.2,11x,f6.2)') Stat, pTime, residual
                                endif
                                if ( (linea(3:5).ne.'STA' .and. linea(2:4).ne.'STA') .and. (linea(30:30) .eq. 'p' .or.
linea(30:30) .eq. 'P')) then
                                   iOk = 1
                                   read(linea,'(a4,36x,f6.2,11x,f6.2)') Stat, pTime, residual
                                endif
                                if (linea(31:31) .eq. 'p' .or. linea(31:31) .eq. 'P' .and. linea(1:7) .ne. 'Comment' ) then
                                  iOk = 1
                                  read(linea,'(1x,a4,36x,f6.2,11x,f6.2)') Stat, pTime, residual
                                endif

                                if ( iOK .eq. 1 ) then
                                   iStatOk = 0
                                   do j= 1, iStat
                                            read(statList(j),*) lsStat, staLat, staLon, staElev
                                            if (lsStat .eq. Stat ) then
                                              iStatOk = 1
                                                     iFMLine = iFMLine + 1

write(hypofmlines(iFMLine),'(f10.5,2x,f10.5,2x,f7.2,2x,f7.3,2x,f5.2)') staLat, staLon, staElev, pTime, residual
                                            endif
            enddo
          endif

          if ( iStatOk .eq. 0 .and. iOK .eq. 1 ) print *, 'Station not found.. ', Stat

       go to 61
60 close(6)

   open(7, file=tmpFM, status='unknown')
              write(7,*) iFMLine
              do k = 1, iFMLine
                      write(7,*) hypofmlines(k)
                    enddo
            close(7)

  end

!       nvals = 0
!       mvals = 0
!       err   = 0
!       path  = '/data/home/SISMO/DATA/PRSN/ASCII/BOLOS/'
!
!c---    err = 0 => not solution
!c---    err = 1 => entry and solution found
!
!!       open(1,file='victor.tmp',status='old')
```

```
!!1          read(1,'(a)',end=11) linea
!!          if ( linea(55:58) .eq. 'PRSN' ) then
!!             nvals = nvals + 1
!!             cata(nvals) = linea
!!          endif
!!          go to 1
!!11       close(1)
!
!       open(2,file='sin.Solucion', status='unknown')
!          do i = 1, nvals
!            err = 0
!            call withSolution(cata(i),path,err)
!            if ( err .eq. 1 ) then
!               mvals = mvals + 1
!               cata(mvals) = cata(i)
!            else
!               write(2,*) cata(i)
!            endif
!          enddo
!       close(2)
!!---
!!---    Catalogo de formas de Onda....
!!---
!       iasp = 0
!           open(4, file='IASPEI_OUT.CAT', status='old')
!42         read(4,'(a)',end=41 ) linea
!             iasp = iasp + 1
!             iaspei(iasp) = linea
!          go to 42
!41      close(4)
!
!       unit = 3
!       open(unit,file='catalogue.sql', status='unknown')
!          do i = 1, mvals
!            dig = 0
!            do ii  = 1, iasp
!                  if ( iaspei(ii)(1:19) .eq. cata(i)(1:19) ) dig = 1
!            enddo
!            call extractor(unit,cata(i),dig)
!            write(unit,*)
!          enddo
!       close(unit)
!
!       end
!
!c--- Yes/No
!           subroutine withSolution(line,path,err)
!
!       character dirOUT*60, aseg*5, catfile*20, path*39, line*100
!       integer   yr, mm, dia, hr, min, err
!       real      seg
```

```
!
!           logical   ex
!
!       read(line,20) yr, mm, dia, hr, min, seg
!20      format(i4,1x,i2,1x,i2,1x,i2,1x,i2,1x,f5.3)
!
!       write(aseg,'(f5.2)') seg
!       if(aseg(1:1) .eq. " ") aseg(1:1) = '0'
!       if(aseg(2:2) .eq. " ") aseg(2:2) = '0'
!
!           write(catfile,'(i4,"/",i2.2,"/",i2.2,i2.2,i2.2,a5)') yr,mm,dia,hr,min,aseg
!       dirOUT = path//catfile
!
!           INQUIRE( FILE=dirOUT, EXIST=ex )
!       if ( ex ) err = 1
!
!       return
!       end
!
!c--- Esta rutina es la encargada de extraer las soluciones del catalogo PRSN
!c--- Seek for the IASPEI catalogue
!c--- Review for upper/lower case codes
!c---
!
!       subroutine extractor(unit,linea,dig)
!
!           character Upcode*4,Parrv*1,net*2,ph*1,aseg*5,root*39,catfile*20
!           character phase*6, channel*3, dirOUT*60, linea*100, argv*150
!           character Pweight*1, Pmotion*1, ID*15, statTMP*4, keyVal*3, axe*1
!           integer   version, unit, err, yr, mm, dia, hr, min, ifail
!           integer   dig, nstat, year, mes, dia, hora, min
!       integer   yesno, pYr, pMes, pDia, pHora, pMin
!       real      vcoGain, sec, xmg, fmg, dist, tsec, seg, pSeg
!           real*8    DasGain, utim, cTime, pTime, coda, amplMM, amplCOUNT
!
!       parameter ( nstat = 30 )
!           character xstat*4, sensorTMP*6, sensores(nstat)*6, stations(nstat)*4
!           real      codaFactor,ampFactor,Afp,Bfp,Aam,Bam,Cam(nstat),Cfp(nstat)
!           real      sensGAIN(nstat)
!
!           data        stations/'apr ','mgp ','sjg ','mcp ','cpd ','csb ','cdp ','csj ','mtp ','cgp ','lsp ','imo ','ide ','lpr ','sjv
','pnp ','cllp','porp','lrs ','tcgo','mep ','cerp','celp','sjgn','cbyp','mop','agp ','rum ','moca','corn'/
!           data      sensores/'S-13','S-13','MP-L4','S-13','S-13','S-13','S-13','S-13','S-13','S-13','S-13','S-13','S-13','S-
13','MP-L4','S-13','S-13','S-13','S-13','S-13','S-13','S-13','S-13','MP-L4','S-13','S-13','S-13','S-13','S-13','CMG-
40'/
!           data                sensGAIN/ 630, 630, 170, 630, 630, 630, 630, 630, 630, 630, 630,
630,630,630,170,630,630,630,630,630,630,630,630,170,630,630,630,630,630,800/
!           data              Cfp/-0.453,-0.448,-0.274,0.0,-0.422,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,-0.266,0.0,0.0,-0.678,-
0.762,-0.512,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0/
```

```
!           data                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                Cam/
1.729,1.627,1.676,0.0,1.596,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,1.676,0.0,0.0,0.0,1.202,1.105,1.531,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.
0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0/
!
!       Afp     = 1.874
!       Bfp     = 0.238
!       Aam     = 0.819
!       Bam     = 0.639
!
!c---    Counts/Volt (DAS sensitivity)
!       DasGain = 3560
!           vcoGain = 60
!
!           root    = '/data/home/SISMO/DATA/PRSN/ASCII/BOLOS/'
!           ID      = 'temblor-XXX'
!           axe     = 'Z'
!
!       channel = 'SHZ'
!       net     = 'PR'
!           phase   = 'P-P_mm'
!           keyVal  = 'GAU'
!
!           version = 1
!
!       read(linea,20) yr, mm, dia, hr, min, seg
!20      format(i4,1x,i2,1x,i2,1x,i2,1x,i2,1x,f5.3)
!
!       write(aseg,'(f5.2)') seg
!       if(aseg(1:1) .eq. " ") aseg(1:1) = '0'
!       if(aseg(2:2) .eq. " ") aseg(2:2) = '0'
!
!           write(catfile,'(i4,"/",i2.2,"/",i2.2,i2.2,i2.2,a5)') yr,mm,dia,hr,min,aseg
!       dirOUT = root//catfile
!       print *, 'Working on file: ', dirOUT
!
!       open(20,file=dirOUT,status='old',err=18)
!1          read(20,'(a)',end=15) linea
!          if ( linea(1:4) .eq. 'Year' ) then
!                read(20,'(i4,1x,i2,1x,i2,1x,i2,i2,1x,f5.3)') year,mes,dia,hora,min,sec
!
!             call dtu(year,mes,dia,hora,min,sec,utim,ifail)
!
!2             read(20,'(a)', end=15 ) linea
!
!             if ( linea(6:8) .eq. 'chn' ) version = 2
!
!             if ( version.eq.1 ) read(linea, 200, end=15 ) xstat
!             if ( version.eq.2 ) read(linea, 201, end=15 ) xstat
!
!205            continue
!
```

```
!                yesno = 0
!
!            do j = 1, nstat
!              call convu(stations(j),UpCode)
!              if ( stations(j).eq.xstat .or. UpCode.eq.xstat ) then
!                yesno     = 1
!                statTMP   = xstat
!                sensorTMP = sensores(j)
!                    if      (version.eq.1       )       read(linea,'(5x,f5.2,10x,a1,15x,f5.3,23x,f3.2,1x,f3.2)',       err=18)
dist,ph,tsec,xmg,fmg
!                    if      (version.eq.2       )       read(linea,'(9x,f5.2,10x,a1,15x,f5.3,23x,f3.2,1x,f3.2)',       err=18)
dist,ph,tsec,xmg,fmg
!                pTime = utim + tsec
!                call utd(pYr,pMes,pDia,pHora,pMin,pSeg,pTime,ifail)
!
!                    if   (   ph.eq.'P'   .or.   ph.eq.'p'   .or.      ph.eq.'S'   .or.   ph.eq.'s'   .or.   linea(20:20).eq.'S'   .or.
linea(20:20).eq.'s' ) then
!
!c--- PWAVE Case
!                  if ( ph.eq.'P' .or. ph.eq.'p' ) then
!                        Parrv   = linea(20:20)
!                        Pmotion = linea(22:22)
!                        Pweight = linea(24:24)
!                        write(unit,51)
ID,xstat,channel,net,sensores(j),axe,Parrv,ph,Pmotion,Pweight,pYr,pMes,pDia,pHora,pMin,pSeg,keyVal
!                      endif
!
!c--- Coda Magnitude Case
!                  if (fmg .gt. 0 ) then
!                        codaFactor = (fmg - Bfp*log10(dist) - Cfp(j))/Afp
!                        coda       = 10**codaFactor
!                    Parrv      = '?'
!                        Pweight    = '?'
!                        phase      = 'CODA'
!                    cTIME      = pTime + coda
!                        call utd(pYr,pMes,pDia,pHora,pMin,pSeg,cTime,ifail)
!                        write(unit,52)
ID,xstat,channel,net,sensores(j),axe,Parrv,phase,Pweight,pYr,pMes,pDia,pHora,pMin,pSeg,keyVal
!                  endif
!
!c--- Amplitud Magnitud Case
!                  if (xmg .gt. 0 ) then
!                        ampFactor = (xmg - Bam*log10(dist) - Cam(j))/Aam
!                    amplMM    = 10**ampFactor
!
!                        if ( dig .eq. 0 ) then
!                      amplCOUNT = 0.
!                    else
!                          amplCOUNT = DasGain*sensGAIN(j)*(amplMM)/vcoGain
!                        endif
!
```

```
!                       Parrv     = '?'
!                           Pweight   = '?'
!                           phase     = 'P-P_mm'
!                           write(unit,53)
ID,xstat,channel,net,sensores(j),axe,Parrv,phase,Pweight,pYr,pMes,pDia,pHora,pMin,pSeg,keyVal,amplCOUN
T,amplMM
!                     endif
!
!c--- S WAVE Case (No P WAVE)
!                  elseif ( ph.eq.'s' .or. ph.eq.'S' ) then
!                       stop 'Not already programed'
!                  else
!                       print *, 'Error reading the phase field.....'
!                  endif
!
!                endif
!              enddo
!
!                  if ( yesno.eq.0 .and. lnblnk(xstat).ne.0 .and. xstat.ne.' sta' .and. xstat.ne.'stat') then
!                  print *, xstat
!                  stop 'station not found'
!              endif
!
!c--- S WAVE Case (P WAVE already retrieved)
!                  if ( linea(20:20) .eq. 'S' .or. linea(20:20).eq. 's' .or. linea(25:25) .eq. 'S' .or. linea(25:25).eq. 's' ) then
!
!                    if ( version.eq.1 ) read(linea,'(19x,a1,16x,f5.3)', err=18) ph,tsec
!                    if ( version.eq.2 ) read(linea,'(24x,a1,15x,f5.3)', err=18) ph,tsec
!
!                pTime = utim + tsec
!                call utd(pYr,pMes,pDia,pHora,pMin,pSeg,pTime,ifail)
!                         Parrv   = '?'
!                Pmotion = linea(22:22)
!                Pweight = linea(24:24)
!                    write(unit,51)
ID,statTMP,channel,net,sensorTMP,axe,Parrv,ph,Pmotion,Pweight,pYr,pMes,pDia,pHora,pMin,pSeg,keyVal
!              endif
!
!              go to 2
!
!            endif
!
!            write(unit,'(a80)') linea
!            go to 1
!15      close(2)
!
!c---
!200     format(1x,a4)
!201     format(a4)
!
!c---
```

```
!51         format(a15,2x,a4,2x,a3,2x,a2,2x,a6,2x,a1,2x,a1,2x,2a1,2x,a1,2x,i4.2,2i2.2,2x,2i2.2,2x,f7.4,2x,a3,"   .00
.00  1.00  0.00  0.00 0.00 ")
!52         format(a15,2x,a4,2x,a3,2x,a2,2x,a6,2x,a1,2x,a1,2x,a6,2x,a1,2x,i4.2,2i2.2,2x,2i2.2,2x,f7.4,2x,a3,"    .00
.00  1.00  0.00  0.00 0.00 ")
!53         format(a15,2x,a4,2x,a3,2x,a2,2x,a6,2x,a1,2x,a1,2x,a6,2x,a1,2x,i4.2,2i2.2,2x,2i2.2,2x,f7.4,2x,a3,"    .00
.00",2x,f15.5,2x,"0.00",2x,f15.5,2x," 0.00 ")
!
!18      continue
!
!       return
!
!       end
```