

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTIMACIÓN DEL ESPESOR DE CORTEZA DESDE LA
REGIÓN INSULAR DE VENEZUELA HASTA EL ESCUDO DE
GUAYANA, A TRAVÉS DEL ANÁLISIS DE FUNCIONES
RECEPTORAS**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por las Brs. Amaiz S, Rosana A
Rojas A, Krupscaya
Para optar al Título
de Ingeniero Geofísico

Caracas, 2009.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTIMACIÓN DEL ESPESOR DE CORTEZA DESDE LA
REGIÓN INSULAR DE VENEZUELA HASTA EL ESCUDO DE
GUAYANA, A TRAVÉS DEL ANÁLISIS DE FUNCIONES
RECEPTORAS**

Tutor académico: Prof. Michael Schmitz
Tutor Industrial: Ing. Claudia Quinteros

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por las Brs. Amaiz S, Rosana A
Rojas A, Krupscaya
Para optar al Título
de Ingeniero Geofísico

Caracas, 2009.

Agradecimientos

Agradecemos a nuestros tutores, en especial a Claudia Quinteros, quien durante todo el tiempo de realización de esta investigación estuvo siempre dispuesta a ayudarnos y darnos su apoyo en cualquier momento que fuera necesario dejando de lado sus ocupaciones. Claudia te queremos!!!

A la Universidad Central de Venezuela como nuestra casa de estudio, por los buenos momentos allí vividos...buenos recuerdos quedan de esa época. Agradecidas en especial con aquellos profesores que ayudaron a nuestra formación. Hay dos seres muy queridos en el edificio de básica a quienes agradecemos su disposición y ayuda incondicional: Denis Riera y Miguel Angel Molina, siempre estuvieron presentes cuando les necesitamos y nunca los olvidaremos, gracias por el cariño que nos han demostrado.

Al profesor Gustavo Malavé quien fue consecuente y preocupado por nuestra entrada en la Fundación y nuestro buen desempeño dentro de la misma, también agradecemos a Gloria Romero, Frank Audemard, Franco Urbani, Leonardo Alvarado, Raquel Vásquez, Jenny Rodríguez, Yuli Brito, Fabián Rada y Jesús Ávila, quienes siempre brindaron apoyo de distintas formas y con la mejor disposición en los momentos en que fue necesario, formando parte de este trabajo.

A los profesores: María Inés Jácome de la USB, Laura Piñero, Inírida Rodríguez y Rafael Falcón de la UCV, quienes estuvieron prestos a brindarnos información, apoyo y soluciones en los momentos de aprietos.

A los panas que con sus risas y bromas alegraban nuestros días de tesis en la Fundación: Richard, Joha, Sirel, Dayana, Rafa, Javi, Ili, Leo, ustedes le daban un mejor tono a los días grises con su presencia. Siempre recordaremos los buenos momentos compartidos en sala de tesistas, comedor, en las tardes deportivas y en

todas aquellas celebraciones (cumpleaños, presentaciones de tesis, etc) en las que siempre estuvimos con ustedes (aunque fuera mentalmente, jeje).

A todos esos seres detestables pero queribles que nos han presionado, aconsejado, apoyado, escuchado, orientado y que hasta se han atrevido a apostar su salud por la culminación de este libro. Sin duda son ustedes parte importante de nuestra inspiración: Napo, Efra, Roi, Capo, Gaby, Neddy, Yosmi, Yeli, Valen, Aleja, Giul, Iv, Ta, Da, Luicho, Nades, Moni, Jazi, José Angel, Daniel, Herman, Oswy, Cali, Elia...y obviamente la lista se extiende hasta todos aquellos que sabemos están y han estado pendientes de este proceso. Cariños miles para todos! Esperamos sigan presentes en nuestros próximos pasos.

Y por último pero no menos importante, agradecemos de corazón a nuestras familias quienes nos han brindado incondicional apoyo, se han esforzado por nuestra educación, y ya casi pierden la paciencia con nosotras. Los amamos!!! Son ustedes muuuuuuuuy importantes en nuestras vidas y un gran motivo de inspiración. Sin ese gran regalo adelantado no hubiera sido posible culminar este tormento...son los mejores!!!

Amaiz S, Rosana A; Rojas A, Krupscaya

**ESTIMACIÓN DEL ESPESOR DE CORTEZA DESDE LA
REGIÓN INSULAR DE VENEZUELA HASTA EL ESCUDO DE
GUAYANA, A TRAVÉS DEL ANÁLISIS DE FUNCIONES
RECEPTORAS**

Tutor Académico: Prof. Michael Schmitz. Tutor Industrial: Herbert Rendón.

**Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y
Geofísica. Departamento de Geofísica. Año 2009.**

Palabras Claves: Funciones receptoras, discontinuidad de Mohorovicic, espesor cortical, placas Caribe-Suramérica.

Resumen:

La técnica de Funciones Receptoras permite describir la estructura cortical debajo de la estación sismológica, usando las ondas de cuerpo, a partir de registros telesísmicos de tres componentes. Este método se basa en calcular la diferencia de tiempo entre la llegada de la onda P directa y la onda P convertida en S (Ps), para estimar el espesor de la corteza bajo la estación.

Para lograr los objetivos propuestos se analizaron las respuestas grabadas por 39 estaciones, que comprenden 12 estaciones de la Red Sismológica Nacional operada por FUNVISIS, y 27 restantes pertenecientes a la red temporal instalada en el marco de los proyectos BOLIVAR (Broadband Ocean-Land Investigations of Venezuela and the Antilles arc Region) y GEODINOS.

Los resultados obtenidos a partir del análisis de funciones receptoras calculadas para cada estación permiten generar un mapa de topografía de Moho, en el cual se refleja una tendencia de disminución del espesor cortical hacia el norte, en dirección hacia

la Placa Caribe, los valores encontrados varían en un rango entre 18 y 56 km de profundidad. Se logra distinguir las unidades tectónicas que conforman el área de estudio (Cuenca Oriental, Escudo de Guayana, Cordillera de la Costa). En el caso de la Cuenca de Maturín el promedio de espesor cortical es de 45 km, siendo estos los mayores espesores corticales encontrados en toda la zona de estudio. La Cuenca de Guárico presenta un promedio de espesor de corteza de 35 km, el cual aumenta hacia el sur, hasta hacerse uniforme por debajo del Río Orinoco, reflejando la presencia del Escudo de Guayana, cuyo promedio de profundidad de la discontinuidad de Moho es de 41 km. Por otra parte, en la Serranía del Interior Central, se encuentra una profundidad de 31 km que se asocia a un reflector intracortical; mientras que al oeste de la franja definida como Serranía del Interior Oriental, se observa una disminución del espesor cortical (bajo la estación PCRV) que podría asociarse al límite este de la depresión de Unare. Las Islas de Sotavento reflejaron espesores propios de corteza oceánica, los cuales van desde 22 hasta 29 km.

Además del mapa de espesores corticales, se elaboró un mapa de distribución de relación de Poisson en toda la zona, valores estos que fueron obtenidos a partir de las relaciones V_p/V_s estimadas para cada estación.

En el mapa se observa que los menores valores de relación de Poisson fueron obtenidos en el área de la Cuenca Oriental, y los mayores hacia el norte del país, específicamente en la zona de las Islas de Sotavento.

ÍNDICE GENERAL

Contenido	Pág.
Resumen.....	iii
Índice general.....	v
Índice de figuras.....	vii
Índice de tablas.....	xii
CAPÍTULO I.....	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Objetivos	5
1.2.1 Objetivo General	5
1.2.2 Objetivos Específicos.....	5
1.3 Justificación.....	5
1.4 Ubicación del área de estudio	8
1.5 Estudios corticales previos en el área:	9
CAPÍTULO II	23
MARCO GEODINÁMICO	23
2.1 Origen y evolución del Caribe	23
2.2 Origen y evolución de la tectónica regional.....	25
2.3 Origen y evolución tectónica de la Cuenca de Oriente.....	27
2.3.1 Cuenca de Maturín	28
2.3.2 Cuenca de Guárico	30
2.3.3. Graben de Espino	30
2.4. Escudo de Guayana.....	31
2.5 Serranía del Interior.....	32
CAPÍTULO III.....	34
Marco Teórico.....	34
3.1. Funciones Receptoras.....	34
3.2 Procesamiento para obtener la función receptora	36
3.2.1 Rotación de las componentes	36
3.2.2 Deconvolución	37
3.2.3 Espesor cortical y estimación Vp/Vs	42
CAPÍTULO IV.....	44
MARCO METODOLÓGICO.....	44
4.1 Preparación de los datos.....	44
4.2 Cálculo de Función Receptora (metodología de Ammon).....	46
4.2.1 Rotación de las Componentes	46
4.2.2 Apilamiento de las trazas	47
4.3 Cálculo de Función Receptora (metodología de Niu).....	49
4.3.1 Rotación de las componentes	49

4.3.2 Apilamiento de las trazas	49
4.3.3 Relación V_p/V_s	50
4.3.4 Relación de Poisson	51
CAPÍTULO V	52
RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	52
5.1 Preparación de los datos.....	52
5.2. Relación V_p/V_s	54
5.3 Interpretación de los mapas.....	132
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	144
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS CITADAS	146

ÍNDICE DE FIGURAS

Contenido	Pág.
CAPÍTULO I.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 1.1. Mapa de fallas principales de Venezuela según Beltrán (1993).....	1
Figura 1.2. Mapa de sismicidad instrumental en Venezuela de los años 1910-2008, FUNVISIS.....	2
Figura 1.3. Estructuras geomorfológicas de Venezuela (WEC Venezuela 1997 Evaluación de Pozos).....	2
Figura 1.4. Mapa de ubicación de estaciones de Redes VE (Red Nacional), XT (Proyecto BOLÍVAR) y OBS en los años 2003-2005.	7
Figura 1.5 Ubicación del área de estudio, con la localización de las estaciones de la Red Sismológica Nacional VE y Red XT.	8
Figura 1.6. Mapa de ubicación de la localización de los estudios sísmicos de refracción realizados en Venezuela. Tomado de Schmitz <i>et al.</i> (2008).....	10
Figura 1.7. Perfil E-O en el margen norte del Escudo de Guayana con información estructural derivada de las líneas sísmicas 100, 300 y 900. Se indican promedios de las velocidades de onda P en la corteza. Moho se caracteriza por un límite marcado con una ligera inclinación de 42 km de profundidad al este a 46 km en el oeste. Tomado de Schmitz <i>et al.</i> (2002).....	11
Figura 1.8. Modelo de velocidades para la zona de la Cuenca Oriental y el Escudo de Guayana. Los puntos de disparo son: B=Barcelona, SM=San Mateo, C=Cantaura, ET=El Tigre, L=Limo, CP=Ciudad Piar; O=cruce del perfil por el río Orinoco. Las líneas gruesas indican el Moho comprobado por observaciones P^M ; velocidades promedios de la corteza (V_{av}) y de la corteza cristalina (V_{cc}) debajo. Tomado de Schmitz <i>et al.</i> (2003, 2005).	12
Figura 1.9. Modelo de velocidades del perfil Birongo N-S. La línea roja identifica la zona de mayor control sobre el Moho (P^M). Los códigos corresponden a las localizaciones, B: Birongo, CL: línea de costa. Tomado de Schmitz <i>et al.</i> (2003) y Guédez (2003).	13
Figura 1.10 Mapa de espesores corticales en el norte de Venezuela, derivado de observaciones de sísmica profunda. Tomado de Schmitz <i>et al.</i> (2008).....	14
Figura 1.11 Mapa de espesores corticales del norte de Venezuela (Proyectos COLM, ECOGUAY, ECCO, Mar y Tierra, BOLIVAR-GEODINOS). Tomado de Rada <i>et al.</i> (2008).....	16
Figura 1.12 Mapa de Espesores de Moho en la Cuenca de Maturín (Tomado de Goncalvez <i>et al.</i> , 2006).	17
Figura 1.13. Modelo de espesor y velocidad de capas hasta la corteza realizado a lo largo del perfil 67° Oeste (Magnani <i>et al.</i> , 2009).	18
Figura 1.14. Modelo de velocidad del perfil 64° Oeste, exageración vertical 5:1 (arriba) y 1:1 (abajo). Tomado de Clark (2007).....	19
Figura 1.15. Mapa de profundidad de Moho en Venezuela (Tomado de Niu <i>et al.</i> , 2007).	20

Figura 1.16. Profundidad de Moho en las nueve estaciones sísmicas analizadas (Quinteros <i>et al.</i> , 2008).	21
Figura 1.17. Modelo de velocidad del transecto N-S 67°Oeste, Jácome <i>et al.</i> (2008).	22
Figura 1.18. Mapa de anomalías de Bouguer. El mínimo de tendencia regional NE-SO corresponde con la cuenca de Maturín. Tomado de Jácome <i>et al.</i> (2008).	22
Figura 2.1 Unidades tectónicas simplificadas dentro del área de estudio: e) Cinturón de deformación del sur del Caribe con subducción al norte y Antillas de Leeward al sur (incluyendo la Cuenca Aruba-Curaçao), f) Napas caribeñas y cinturón de deformación de la Cordillera de la Costa, g) Cuenca Oriental de Venezuela, k) Cinturón de deformación de la Serranía del Interior, l) Escudo de Guayana. (Schmitz <i>et al.</i> , 2008).	26
Figura 2.2 Cuatro diferentes reconstrucciones Permo-Triásicas de la Pangea oeste (Di Croce, 1995).	28
Figura 2.3. Mapa tectónico del noreste de Venezuela, mostrando la interacción entre la placa oceánica del Caribe y la placa continental de Sur América (Jácome <i>et al.</i> , 2003a).	29
Figura 3.1. Pulsos de onda P y sus reverberaciones (Tomado de Ammon, 1991).	35
Figura 3.2. Diagrama de rayos de la onda P convertida a S (Tomado de Ammon, 1991).	35
Figura 3.3. Sistemas de referencia ZRT y LQT. Tomada de Mohsen (2004).	37
Figura 3.4. Ejemplo de datos para una estación, después de la rotación de los datos en el sistema de coordenadas L, Q, T y su deconvolución. La componente L muestra una onda estilo pulso. La componente Q se llama función receptora, donde los números (1) y (2) representan la onda P directa y la onda P convertida a S (Ps) respectivamente, mientras que el número (3) representa los múltiples. La componente T es la función receptora tangencial. Tomado de Mohsen (2004).	38
Figura 3.5. Componentes vertical y radial de un modelo simple, comparadas con la función receptora obtenida a partir de estas. Tomada de Cruz (2000).	41
Figura 3.6. Curvas de relación $H-k$, cada curva representa la contribución de su fase convertida para la sumatoria. Tomado de Mohsen (2004).	43
Figura 4.1. Registro grabado por la estación EDPC. De arriba abajo los sismogramas correspondientes a las componentes E, N y Z. La escala vertical indica valores de amplitud y la escala horizontal el tiempo en segundos. La llegada de la onda P se indica con las siglas IPUO.	45
Figura 4.2. Estación EDPC. Arriba sismogramas E, N y Z, abajo funciones receptoras rotadas a sistema Z, R y T utilizando un filtro gaussiano de 1,5 y el <i>water level</i> de 0,01.	47
Figura 4.3. Apilamiento global estación EDPC, a) trazas apiladas y su función receptora resultante (traza superior), b) función receptora resultante ampliada.	48
Figura 4.4. Apilamiento global en el dominio de la profundidad para la estación EDPC.	50
Figura 5.1. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación ABPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.	54
Figura 5.2. Cross-correlación entre los tres modos (Estación ABPC).	55

Figura 5.3. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación ARPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.....	56
Figura 5.4. Cross-correlación entre los tres modos (Estación ARPC).....	57
Figura 5.5. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación BAUV, usando las fases: a) Ps, PpSs y PpPs, b) Ps y PpSs y c) Ps y PpPs.....	58
Figura 5.6. Cross-correlación entre los tres modos (Estación BAUV).....	59
Figura 5.7. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación BIRV, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.....	60
Figura 5.8. Cross-correlación entre los tres modos (Estación BIRV).....	61
Figura 5.9. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación CAIV, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs y c) Ps y PpPs.....	62
Figura 5.10. Cross-correlación entre los tres modos (Estación CAIV).....	63
Figura 5.11. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación CAPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs y c) Ps y PpPs.....	64
Figura 5.12. Cross-correlación entre los tres modos (Estación CAPC).....	65
Figura 5.13. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación CMPC, usando las fases: a) Ps, PpSs y PpPs, b) Ps y PpSs y c) Ps y PpPs.....	66
Figura 5.14. Cross-correlación entre los tres modos (Estación CMPC).....	67
Figura 5.15. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación CRUV, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.....	68
Figura 5.16. Cross-correlación entre los tres modos (Estación CRUV).	69
Figura 5.17. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación CUPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.....	70
Figura 5.18. Cross-correlación entre los tres modos (Estación CUPC).....	71
Figura 5.19. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación CUPV, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.....	72
Figura 5.20. Cross-correlación entre los tres modos (Estación CUPV).....	73
Figura 5.21. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación EDPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs y c) Ps y PpPs.....	74
Figura 5.22. Cross-correlación entre los tres modos (Estación EDPC).....	75
Figura 5.23. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación FCPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.....	76
Figura 5.24. Cross-correlación entre los tres modos (Estación FCPC).....	77
Figura 5.25. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación GURV, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs y c) Ps y PpPs.....	78
Figura 5.26. Cross-correlación entre los tres modos (Estación GURV).....	79
Figura 5.27. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación IBAV, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.....	80
Figura 5.28. Cross-correlación entre los tres modos (Estación IBAV).....	81
Figura 5.29. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación IBAV, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.....	82
Figura 5.30. Cross-correlación entre los tres modos (Estación ITEV).....	83
Figura 5.31. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación JMPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.....	84
Figura 5.32. Cross-correlación entre los tres modos (Estación JMPC).....	85

Figura 5.33. . Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación LAPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.....	86
Figura 5.34. Cross-correlación entre los tres modos (Estación LAPC)	87
Figura 5.35. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación LMPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.....	88
Figura 5.36. Cross-correlación entre los tres modos (Estación LMPC)	89
Figura 5.37. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación MAPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs y b) Ps y PpSs y c) Ps y PpPs.....	90
Figura 5.38. Cross-correlación entre los tres modos (Estación MAPC)	91
Figura 5.39. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación MERV, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs y c) Ps y PpPs.....	92
Figura 5.40. Cross-correlación entre los tres modos (Estación MERV).....	93
Figura 5.41. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación MIPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.....	94
Figura 5.42. Cross-correlación entre los tres modos (Estación MIPC).....	95
Figura 5.43. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación MNPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.....	96
Figura 5.44. Cross-correlación entre los tres modos (Estación MNPC)	97
Figura 5.45. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación MOPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs y c) Ps y PpPs.....	98
Figura 5.46. Cross-correlación entre los tres modos (Estación MOPC)	99
Figura 5.47. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación MUPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.....	100
Figura 5.48. Cross-correlación entre los tres modos (Estación MUPC)	101
Figura 5.49. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación PAPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs y c) Ps y PpPs.....	102
Figura 5.50. Cross-correlación entre los tres modos (Estación PAPC)	103
Figura 5.51. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación PCRV, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.....	104
Figura 5.52. Cross-correlación entre los tres modos (Estación PCRV).....	105
Figura 5.53. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación PFPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs y c) Ps y PpPs.....	106
Figura 5.54. Cross-correlación entre los tres modos (Estación PFPC).....	107
Figura 5.55. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación PRPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.....	108
Figura 5.56. Cross-correlación entre los tres modos (Estación PRPC).....	109
Figura 5.57. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación RIOV, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs y c) Ps y PpPs.....	110
Figura 5.58. Cross-correlación entre los tres modos (Estación RIOV).....	111
Figura 5.59. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación ROPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.....	112
Figura 5.60. Cross-correlación entre los tres modos (Estación ROPC).....	113
Figura 5.61. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación RPPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs y c) Ps y PpPs.....	114
Figura 5.62. Cross-correlación entre los tres modos (Estación RPPC).....	115

Figura 5.63. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación SIPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.....	116
Figura 5.64. Cross-correlación entre los tres modos (Estación SIPC).....	117
Figura 5.65. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación SMPC, usando las fases: a) Ps, PpSs y PpPs, b) Ps y PpSs y c) Ps y PpPs.....	118
Figura 5.66. Cross-correlación entre los tres modos (Estación SMPC).....	119
Figura 5.67. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación SRPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.....	120
Figura 5.68. Cross-correlación entre los tres modos (Estación SRPC).....	121
Figura 5.69. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación STPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs y c) Ps y PpPs.....	122
Figura 5.70. Cross-correlación entre los tres modos (Estación STPC).....	123
Figura 5.71. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación TURV, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.....	124
Figura 5.72. Cross-correlación entre los tres modos (Estación TURV).	125
Figura 5.73. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación ULPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs y c) Ps y PpPs.....	126
Figura 5.74. Cross-correlación entre los tres modos (Estación ULPC)	127
Figura 5.75. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación VIPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs y c) Ps y PpPs.....	128
Figura 5.76. Cross-correlación entre los tres modos (Estación VIPC)	129
Figura 5.77. Relación Vp/Vs en función de la profundidad en la estación ZUPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs y c) Ps y PpPs.....	130
Figura 5.78. Cross-correlación entre los tres modos (Estación ZUPC)	131
Figura 5.79. Mapa de espesores calculados para cada estación a partir del análisis de Funciones Receptoras, usando el mayor valor de profundidad calculado para la estación BIRV.	134
Figura 5.80. Mapa de distribución de la relación de Poisson calculada a partir de Relaciones Vp/Vs.....	135
Figura 5.81. Mapa de espesores cortical calculado a partir del análisis de Funciones Receptoras.....	141
Figura 5.82. Mapa de espesores calculados para cada estación a partir del análisis de Funciones Receptoras, usando el menor valor de profundidad calculado para la estación BIRV.	142

ÍNDICE DE TABLAS

Contenido	Pág.
Tabla 1.1. Resultados de Trabajos Especiales de Grado realizados en la zona de estudio.....	15
Tabla 5.1: Número de eventos sísmicos registrados por estación.....	52
Tabla 5.2 Valores de relación de Poisson y profundidad para cada estación.....	133

CAPÍTULO I

MARCO INTRODUCTORIO

1.1 Planteamiento del problema

La compleja geología que caracteriza la zona norte del territorio nacional se puede relacionar con la actividad tectónica existente entre la placa Caribe y la placa Suramericana, así como lo señalan algunos autores (Bell, 1972; Jordan y Frazer, 1975; Pindell y Dewey, 1982; Sykes, *et al.*, 1982; entre otros). El principal efecto de este choque se observa en el sistema de fallas activas de tipo rumbo deslizante, que forman una especie de cinturón con dirección este-oeste situado al norte del país (Schubert, 1984). Entre las fallas más importantes de este sistema se pueden citar las de Oca-Ancón, Boconó, San Sebastián, La Victoria y El Pilar, (figura 1.1) siendo estas generadoras de alta actividad sísmica en la zona (figura 1.2).

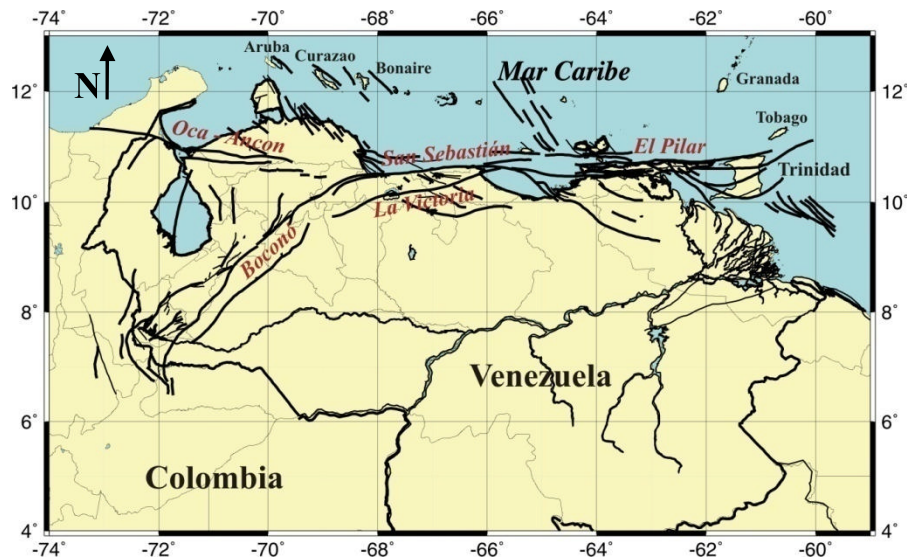


Figura 1.1. Mapa de fallas principales de Venezuela según Beltrán (1993).

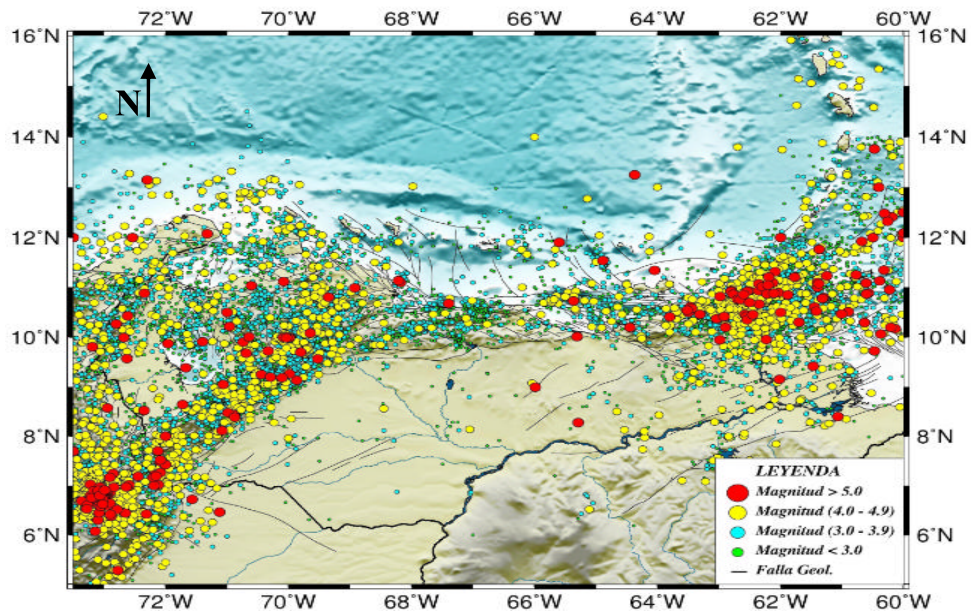


Figura 1.2. Mapa de sismicidad instrumental en Venezuela de los años 1910-2008, FUNVISIS.

Como evidencia de la existencia de la interacción del límite de placas Caribe y Suramericana, se pueden observar en el territorio nacional de oeste a este, estructuras geomorfológicas como la Cuenca de Falcón, Cordillera de la Costa, Cuenca Oriental y Serranía del Interior, entre otras (figura 1.3).

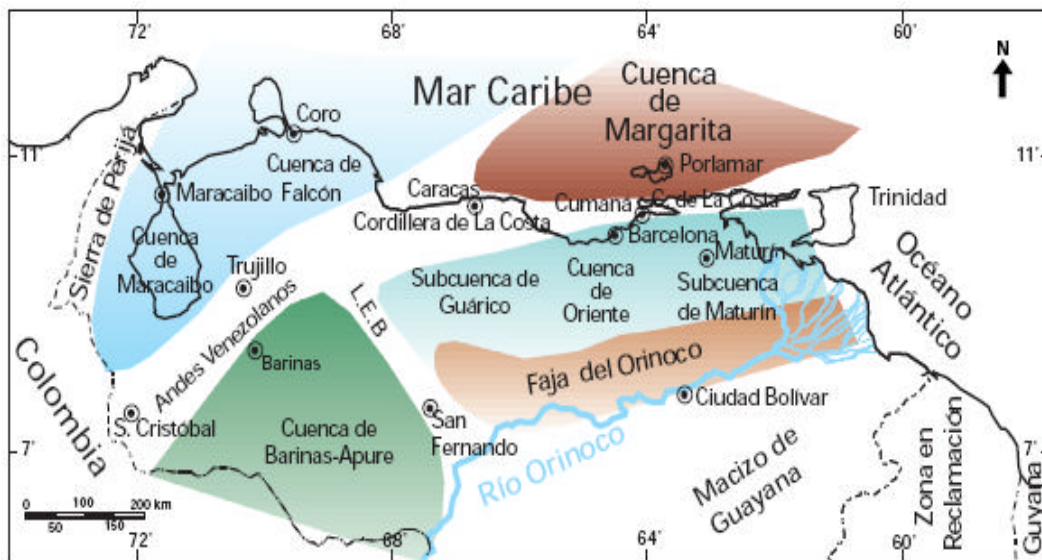


Figura 1.3. Estructuras geomorfológicas de Venezuela (WEC Venezuela 1997 Evaluación de Pozos).

En Venezuela en los últimos años se han realizado una serie de estudios dentro del marco del proyecto GEODINOS (Geodinámica Reciente del Límite Norte de la Placa Sudamericana), relacionados con la geodinámica de la corteza y el manto, a partir de la aplicación de diferentes metodologías (gravimetría, sísmica de refracción, funciones receptoras y tomografía, entre otros).

Es así como, a fin de obtener información sobre la variación de espesores corticales en las áreas de oriente y centro del país, desde las Islas Sotavento hasta el Escudo de Guayana, se busca en esta investigación mediante el análisis de funciones receptoras (Ammon, 1991 y 1997; Zhu y Kanamori, 2000; Niu *et al.*, 2007) y basándose en relaciones de velocidad V_p/V_s , encontrar un modelo de espesor cortical, el cual será comparado con modelos obtenidos mediante otros estudios en los que se utilizó la misma metodología (Niu *et al.*, 2007; Quinteros, 2007), así como con otros modelos obtenidos con la aplicación de diferentes métodos, tales como sísmica de reflexión, refracción y gravimetría (Schmitz *et al.*, 2008).

El método de análisis de funciones receptoras (propuesto por Langston, 1979), forma parte de las técnicas de sismología aplicadas a fuentes naturales (sísmica pasiva), que actualmente cobra auge en los estudios de la litósfera que se están llevando a cabo en Venezuela.

En líneas generales, el método de funciones receptoras permite extraer, de registros telesísmicos de tres componentes, el efecto de la estructura bajo la estación de observación, permitiendo conjugar la observación de muchos eventos en la determinación de la estructura. La forma de onda de las funciones receptoras es una composición de ondas de cuerpo P convertidas a S, las cuales quedan rebotando (“reverberando”) en la estructura debajo del receptor. Modelando la amplitud y el tiempo de esas ondas que “reverberan”, se pueden determinar los contrastes en la geología subyacente al receptor.

Actualmente, proyectos como GEODINOS pretenden por medio de convenios entre centros de investigación y universidades, impulsar nuevas investigaciones y estudios a lo largo del país con especial énfasis en el límite Norte de la placa Suramericana, por su compleja dinámica y estructura.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Estimar el espesor de la corteza en el centro-oriente de Venezuela (desde la Región Insular hasta el Escudo de Guayana), a partir del análisis de funciones receptoras.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Generar una base de datos con los registros telesísmicos de las estaciones sismológicas ubicadas en la zona de estudio.
- Obtener la función receptora utilizando los procedimientos propuestos por Langston (1979) y Ammon (1991 y 1997).
- Emplear los códigos elaborados por el profesor F. Niu en el período 2001- 2007 para el cálculo del espesor de la corteza, utilizando la relación V_p/V_s , basada en la metodología de Zhu y Kanamori (2000).
- Integrar los valores obtenidos con estudios previos en la zona de interés realizados con el método de sismica profunda (refracción y reflexión) entre otros.
- Interpretar los espesores de la corteza dentro del marco geodinámico de la región.

1.3 Justificación

El Proyecto GEODINOS (Geodinámica Reciente del Límite Norte de la Placa Sudamericana, FONACIT G-2002000478), actualmente desarrollado por FUNVISIS (Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas) junto con algunas universidades del país, UCV (Universidad Central de Venezuela), USB (Universidad Simón Bolívar), CPDI (Centro de Procesamiento Digital de Imágenes) y en cooperación con el proyecto BOLÍVAR (Broadband Ocean-Land Investigations of Venezuela and the Antilles arc

Region) financiado por la “National Science Foundation” (NSF) de Estados Unidos. El equipo de investigación de ambos proyectos se encuentra conformado por científicos y estudiantes de 12 instituciones de Venezuela y Estados Unidos, cuyo objetivo principal es el estudio de la estructura litosférica en el norte de Venezuela mediante la aplicación de métodos geológicos, geofísicos y geoquímicos.

Desde el año 2003 hasta el 2005, en Venezuela se encontraron instaladas 37 estaciones banda ancha pertenecientes a la Red Sismológica Nacional de Venezuela operadas por FUNVISIS (Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas), 14 estaciones de la Universidad de Rice (en el Occidente de Venezuela y en el arco de las Antillas), 27 estaciones PASSCAL operadas por Indiana University y 14 estaciones sismológicas submarinas temporales OBS del OBSIS, operadas por la UCSD (Universidad de California, San Diego), (figura 1.4).

Los estudios realizados para este trabajo se encuentran enmarcados en el proyecto denominado GEODINOS, dentro del Área B: Estudios de la estructura de la litosfera, Temática B2: Sismología pasiva, para lo cual se han utilizado las grabaciones continuas que registran y monitorean las estaciones sismológicas ubicadas en la zona de interés, para procesarlas y analizarlas por medio de las funciones receptoras, tomando como referencia la metodología de diferentes autores (Ammon, 1991 y 1997; Zhu y Kanamori 2000; Niu *et al.*, 2007) para estimar un modelo de espesor cortical que finalmente será comparado con los resultados de estudios previos enmarcados en el proyecto GEODINOS.

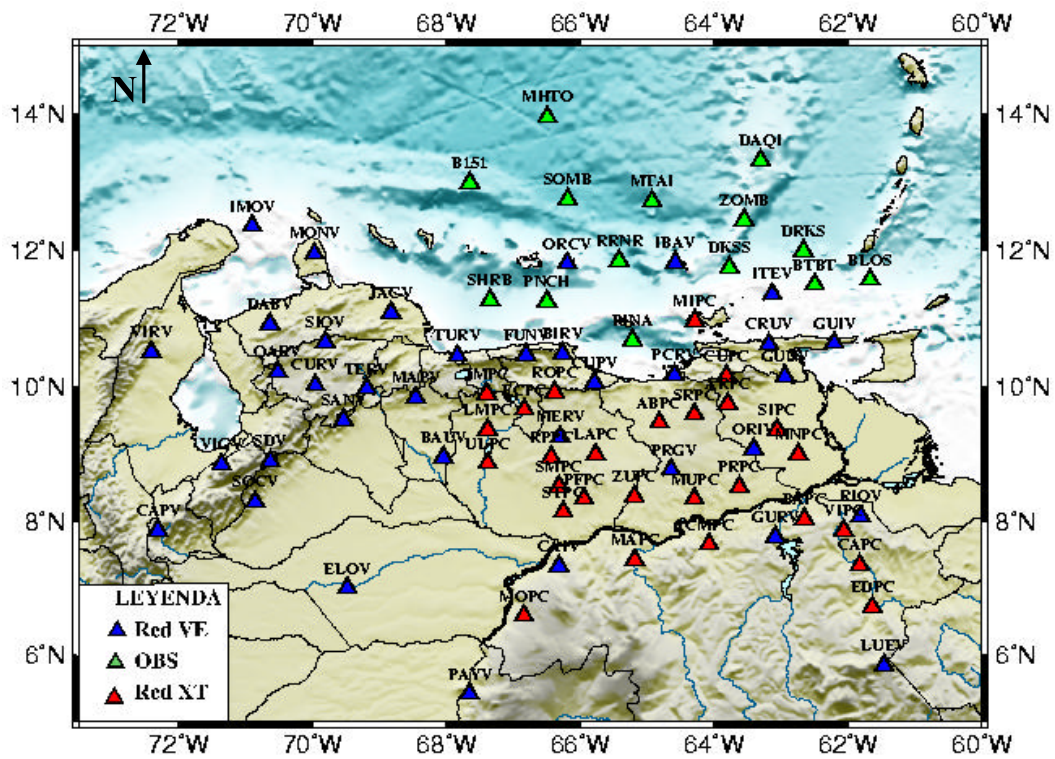


Figura 1.4. Mapa de ubicación de estaciones de Redes VE (Red Nacional), XT (Proyecto BOLÍVAR) y OBS en los años 2003-2005.

1.4 Ubicación del área de estudio

El área de estudio abarca la extensión entre las latitudes de 5°N a 12°N y longitudes de 60°W a 69°W (figura 1.5), donde se encuentran ubicadas 20 estaciones de la Red Sismológica Nacional y 27 estaciones temporales de la red XT del Proyecto BOLÍVAR.

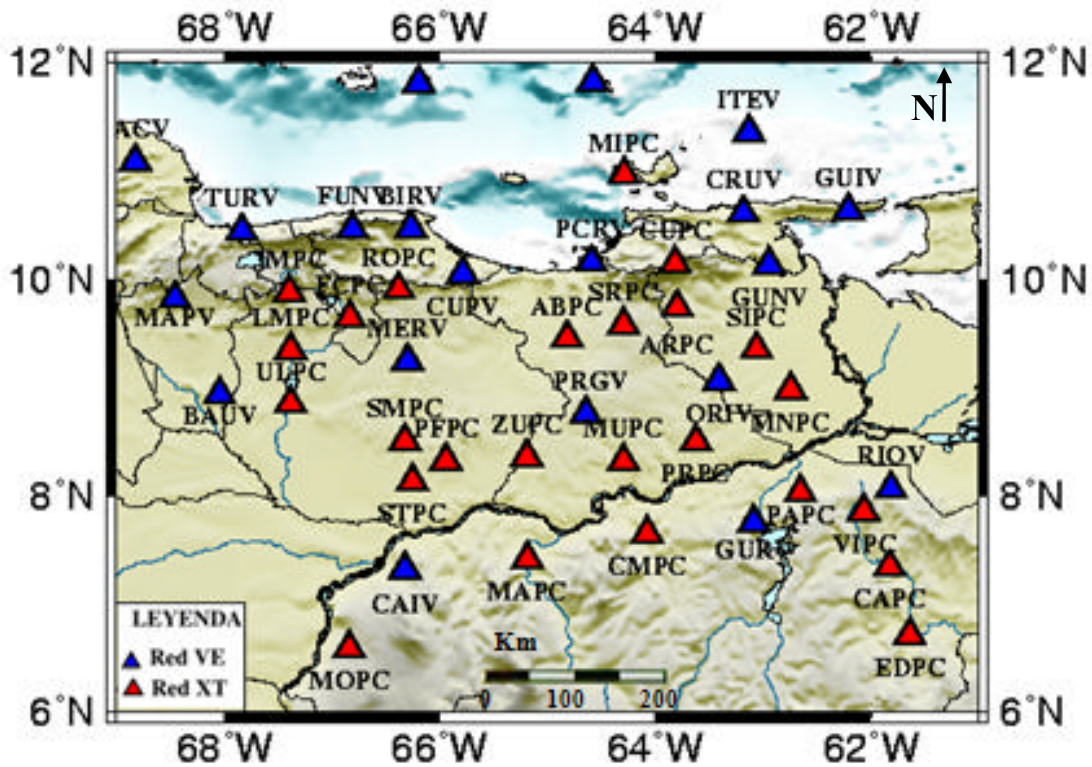


Figura 1.5 Ubicación del área de estudio, con la localización de las estaciones de la Red Sismológica Nacional VE y Red XT.

1.5 Estudios corticales previos en el área:

A continuación se refieren los principales estudios de espesor de corteza realizados dentro del área de estudio:

Russo y Speed (1992) realizan un estudio sobre la colisión oblicua y el acuñaamiento tectónico del continente Suramericano y terrenos caribeños, en el cual proponen un modelo de transición lateral de la zona de estudio, enfatizando tres conceptos: 1. La inclinación, desprendimiento y hundimiento de litósfera oceánica atlántica antes unida al límite norte del continente Suramericano. 2. El acuñaamiento en dirección al mar y engrosamiento del margen norte del continente en la región del desprendimiento del “slab” atlántico. El acuñaamiento continental sobrecorre el “slab” y es sobrecorrido a su vez por terrenos unidos a la placa Caribe. 3. Esas transiciones cinemáticas estructurales son una consecuencia de la colisión oblicua progresiva entre el continente de Sur América y los terrenos Caribe sobrecorriendo.

Los primeros estudios de investigación de la corteza profunda realizados dentro de la zona fueron los proyectos ECOGUAY (Estudio de la Estructura Cortical del Escudo de Guayana), Mar y Tierra (en la zona central del país) y proyecto ECCO (Estudio Cortical de la Cuenca Oriental) (figura 1.6).

En el proyecto ECOGUAY desarrollado en 1998, se empleó el método de sísmica de refracción profunda, usando como fuente de energía voladuras mineras a lo largo de nueve (9) líneas sísmicas de refracción de más de 320 km de longitud.

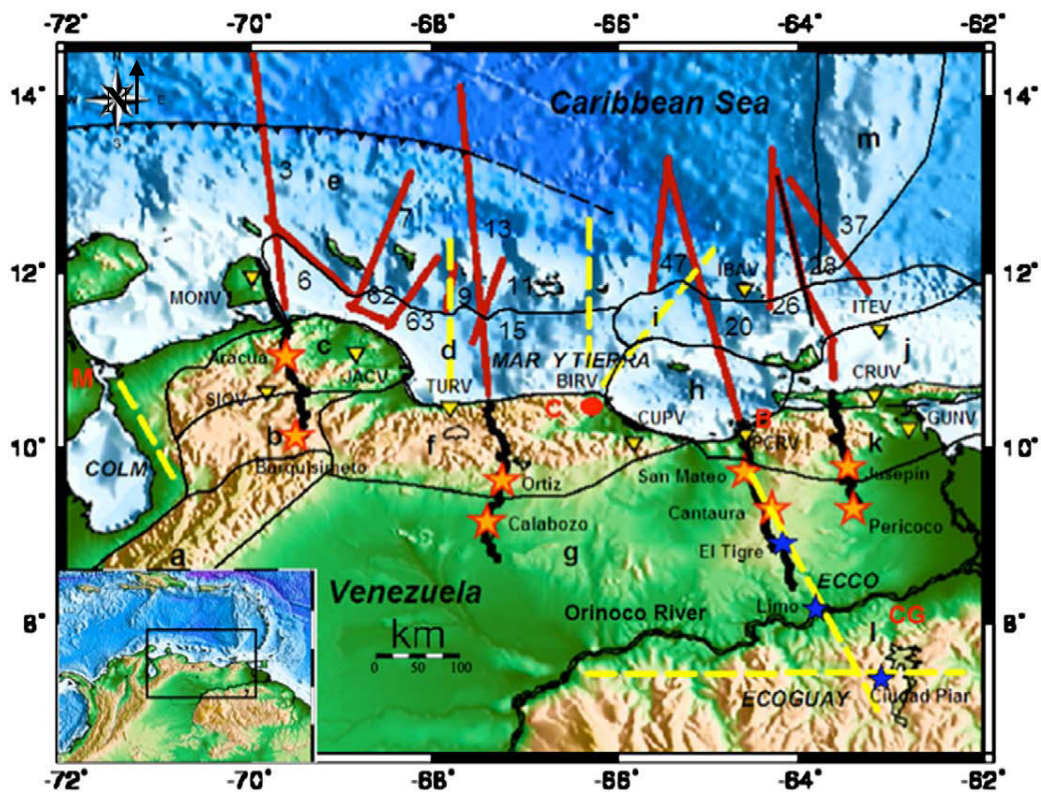


Figura 1.6. Mapa de ubicación de la localización de los estudios sísmicos de refracción realizados en Venezuela. Tomado de Schmitz *et al.* (2008).

Chalbaud (2000) y Schmitz *et al.* (2002) presentan los resultados obtenidos del experimento de sísmica de refracción en el margen norte del Escudo de Guayana, los cuales señalan una discontinuidad entre la corteza superior e inferior. En la primera, la velocidad varía entre 6 y 6.3 km/seg con una profundidad de 20 km; mientras que la corteza inferior presentó velocidades entre 6.5 y 7 km/seg, con un espesor total de corteza entre 42- 46 km ligeramente inclinado al oeste y un promedio de velocidad de 6.5 km/seg (figura 1.7).

Además se hicieron observaciones gravimétricas de alrededor de 300 puntos para completar la base de datos gravimétricos existente en la Universidad Simón Bolívar (Venezuela), de donde se interpretó que el cambio observado en la Anomalía de Bouguer, de positivo (30 mgales) en el oeste a negativo (-20 mgales) en el este, no puede ser explicado por los estudios de observación sísmica cortical solamente. Variaciones laterales

en la corteza o en el manto superior y una fase de elevada velocidad sísmica (P^1) entre 20 y 30 km de profundidad deben ser responsables de estas observaciones (Schmitz *et al.*, 2002).

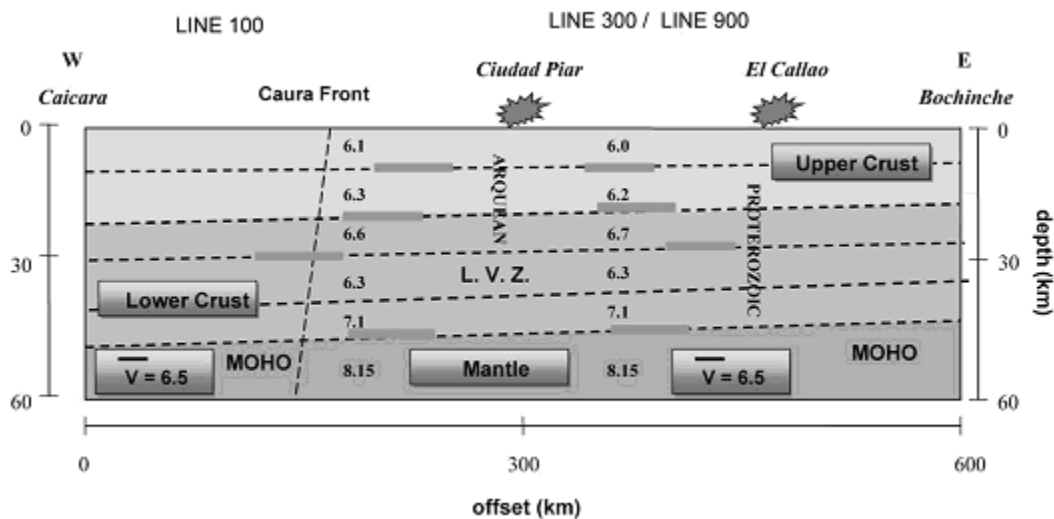


Figura 1.7. Perfil E-O en el margen norte del Escudo de Guayana con información estructural derivada de las líneas sísmicas 100, 300 y 900. Se indican promedios de las velocidades de onda P en la corteza. Moho se caracteriza por un límite marcado con una ligera inclinación de 42 km de profundidad al este a 46 km en el oeste. Tomado de Schmitz *et al.* (2002).

La campaña de campo desarrollada en el año 2001 conocida como proyecto ECCO, fue diseñada para investigar el espesor de sedimentos y la estructura cortical de la Cuenca Oriental, para lo cual se desplegó una línea de 300 km de longitud entre Barcelona en el norte y el río Orinoco en el sur. Ejecutando 5 disparos con explosivos como fuente de energía y un total de 190 equipos de registro se pudieron determinar los principales rasgos de la corteza. A continuación se presentan las interpretaciones realizadas a partir de los datos del proyecto ECCO:

Schmitz *et al.* (2003; 2005) concluyeron que la profundidad máxima de la cuenca es de 13 km en la parte central del perfil y el espesor de la corteza varía entre 35 km en el norte y 39 km al norte del río Orinoco, con una disminución de la velocidad promedio de la

corteza de 6.4 a 6.5 km/s en el Escudo de Guayana, 6.25 km/s al sur de la Cuenca Oriental y 5.95 a 6.0 km/s en la parte central. (Figura 1.8)

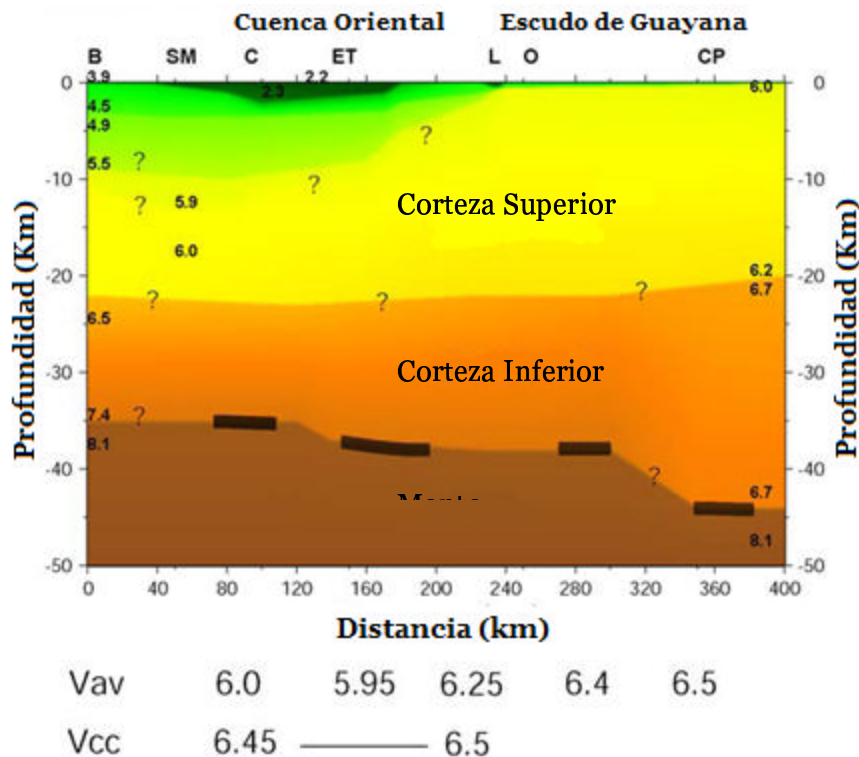


Figura 1.8. Modelo de velocidades para la zona de la Cuenca Oriental y el Escudo de Guayana. Los puntos de disparo son: B=Barcelona, SM=San Mateo, C=Cantaura, ET=El Tigre, L=Limo, CP=Ciudad Piar; O=cruce del perfil por el río Orinoco. Las líneas gruesas indican el Moho comprobado por observaciones P^M ; velocidades promedio de la corteza (V_{av}) y de la corteza cristalina (V_{cc}) debajo. Tomado de Schmitz *et al.* (2003, 2005).

Para el estudio de la corteza terrestre, en el centro-occidente de Venezuela, se desarrolló en el año 2002 el proyecto “Mar y Tierra” para lo cual se instalaron un total de 15 estaciones sismológicas portátiles con el fin de registrar los disparos de los cañones de aire comprimido utilizados en un levantamiento sísmico 2-D en el mar Caribe, además fueron utilizados los registros de la estación Birongo de la Red Sismológica Nacional.

Schmitz *et al.* (2003) estiman que el espesor de la corteza en la zona centro-norte es de 36-39 km cercano a la costa, disminuyendo rápidamente hacia la parte oceánica en la placa del Caribe. La velocidad promedio de la corteza oscila entre 5.9 y 6.3 km/s sin que se pueda observar una zona de elevada velocidad en la corteza inferior (figura 1.9).

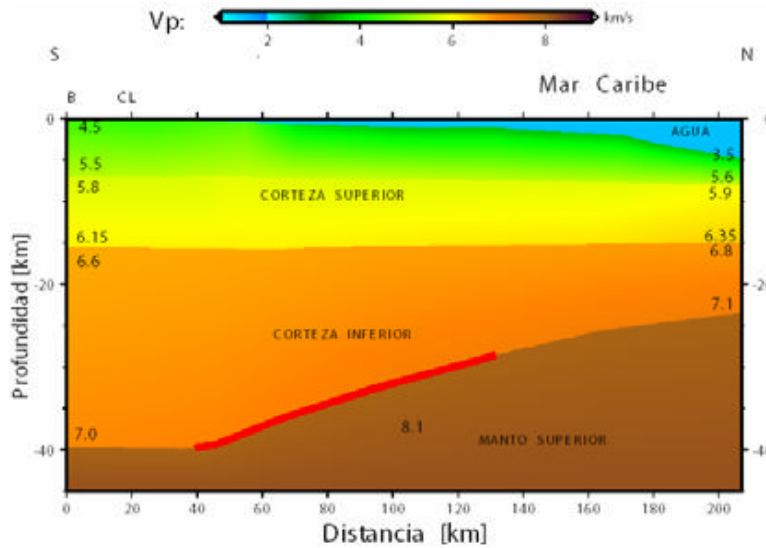


Figura 1.9. Modelo de velocidades del perfil Birongo N-S. La línea roja identifica la zona de mayor control sobre el Moho (P^M). Los códigos corresponden a las localizaciones, B: Birongo, CL: línea de costa. Tomado de Schmitz *et al.* (2003) y Guédez (2003).

En el marco de los proyectos BOLIVAR y GEODINOS fueron obtenidos resultados de mediciones combinadas de sísmica de reflexión y refracción de gran ángulo (abril- mayo de 2004) (Levander *et al.*, 2006; Clark *et al.*, 2007; Schmitz *et al.*, 2008; Magnani *et al.*, 2009). La fuente de energía que se empleó en la adquisición fueron disparos de cañones de aire en el mar y en tierra cargas explosivas en pozos. Las grabaciones fueron realizadas por las estaciones de la Red Sismológica Venezolana, así como también por las estaciones temporales.

Después de haber analizado e interpretado los datos, se concluyó que en general el espesor cortical en el norte de Venezuela se reduce aproximadamente 40 km al sur del sistema montañoso del Caribe, a menos de 35 km en la línea de costa y a más de 35 km en la Cordillera de la Costa (figura 1.10). Además se observan evidencias fuertes de una raíz

cortical profunda (50 km) al este de la cuenca oriental. Esta raíz cortical profunda puede ser interpretada como material de la corteza inferior anexado durante procesos de subducción de la placa Atlántica (Schmitz *et al.*, 2008).

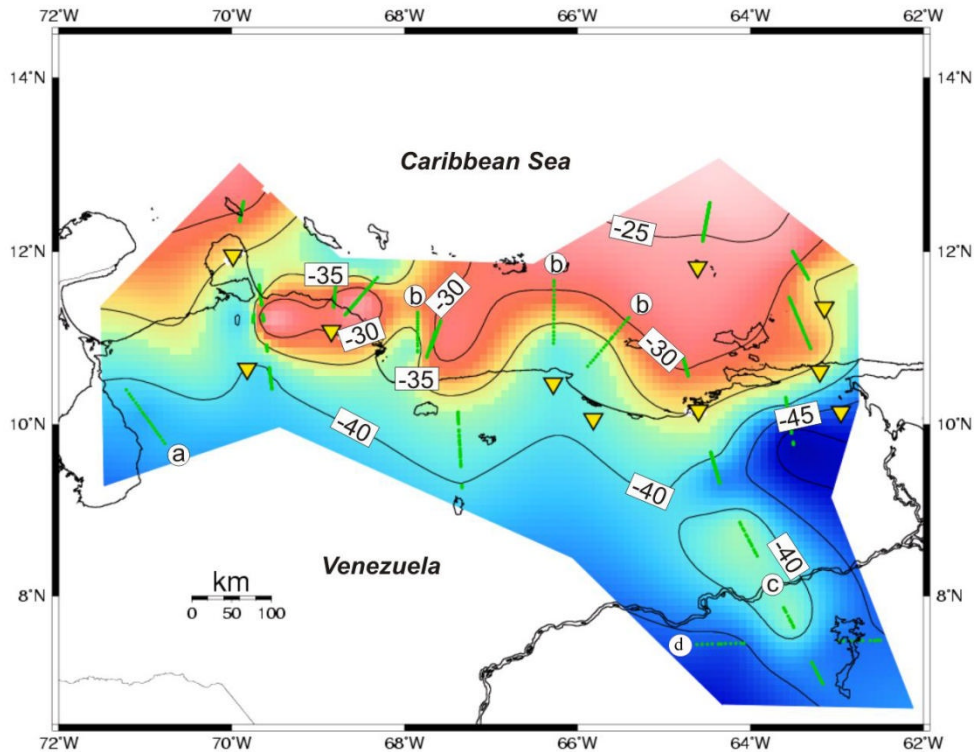


Figura 1.10 Mapa de espesores corticales en el norte de Venezuela, derivado de observaciones de sismica profunda. Tomado de Schmitz *et al.* (2008).

Dentro del alcance del proyecto GEODINOS se realizaron una serie de trabajos especiales de grado en diferentes zonas del país que comprenden el área interés de esta investigación. A continuación se muestra una síntesis de los resultados obtenidos por los diferentes investigadores:

Tabla 1.1. Resultados de los Trabajos Especiales de Grado realizadas en la zona de estudio.

Autor	Zona de estudio	Profundidad de Moho (Km)	Velocidad de Corteza Superior (Km/s)	Velocidad de Corteza Inferior (Km/s)
Vieira (2005)	Región central (Estados Aragua y Guárico)	30 en mar 37- 39 en tierra de norte a sur	6,2	6,9
Ávila (2005)	Centro- oriente	25- 32 en mar 32-38 en tierra de norte a sur	-	-
Yánez (2005)	Oriente	26- 34,8 costa afuera hasta 50 en la Cuenca Oriental	-	-
Masy (2007)	Antillas de Sotavento	23- 28 en mar 34 en tierra	-	6,1- 6,3
Rada (2007)	Zona nororiental	25- 29 costa afuera de norte a sur	5,5	7,4
Ruiz (2007)	Nororiental de Venezuela y noroccidental de Trinidad	30	-	6,4

El mapa de espesores corticales construido a partir de la integración de los resultados de los Trabajos Especiales de Grado previamente mencionados con los datos de estudios previos realizados en toda Venezuela (ECCO, ECOGUAY, Mar y Tierra, COLM) se presenta en la figura 1.11.

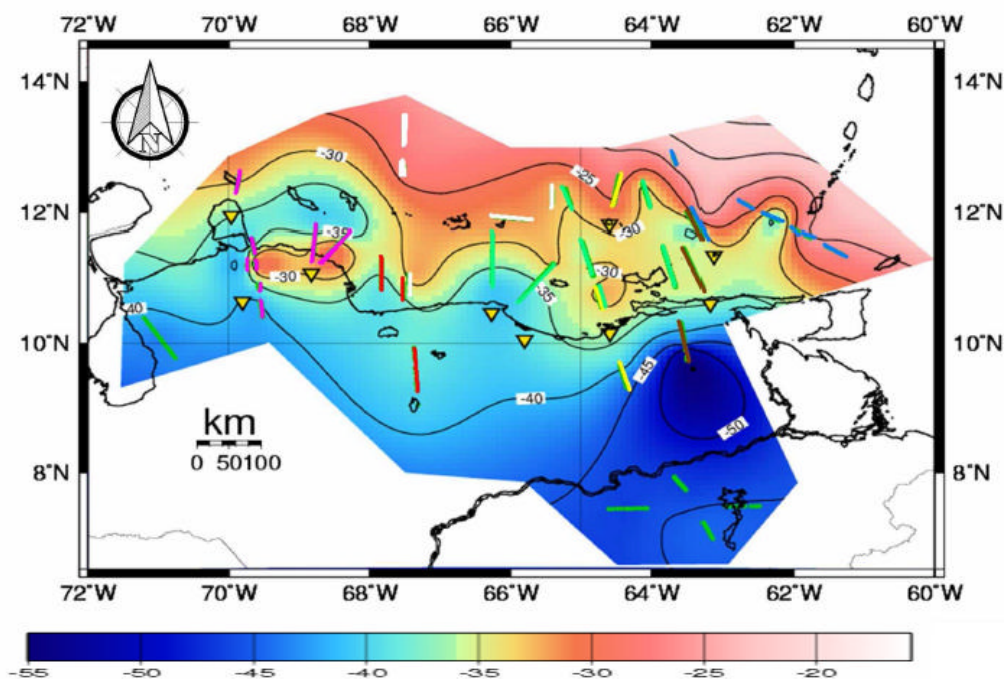


Figura 1.11 Mapa de espesores corticales del norte de Venezuela (Proyectos COLM, ECOGUAY, ECCO, Mar y Tierra, BOLIVAR-GEODINOS). Tomado de Rada *et al.* (2008).

Goncalves *et al.* (2006) realizaron la inversión gravimétrica de la Cuenca de Maturín para obtener un modelo cortical que refleje la variación regional de la profundidad de Mohorovicic (Moho) y de los sedimentos de la cuenca. Para esto se procedió a realizar un mapa gravimétrico y topográfico del área, los datos gravimétricos se procesaron con el fin de obtener el mejor mapa regional y residual que se adecuara a las fuentes anómalas propias de la cuenca, para luego ser invertidos. Fueron utilizados para esta inversión datos de los estudios previos de sismica de refracción profunda realizados por Avila (2005) y Schmitz *et al.* (2005).

De la inversión de la profundidad de Moho se reflejaron los máximos espesores corticales que se encuentran bajo el Escudo de Guayana (48 a 54 km). En el área costa afuera del Mar Caribe se presentan los menores espesores corticales que van disminuyendo en dirección norte (de 38 a 12 km). En la Serranía del Interior se muestra una

profundización de Moho con respecto a las zonas adyacentes y en la Cuenca de Maturín varían en promedio de 40 a 45 km. (figura 1.12).

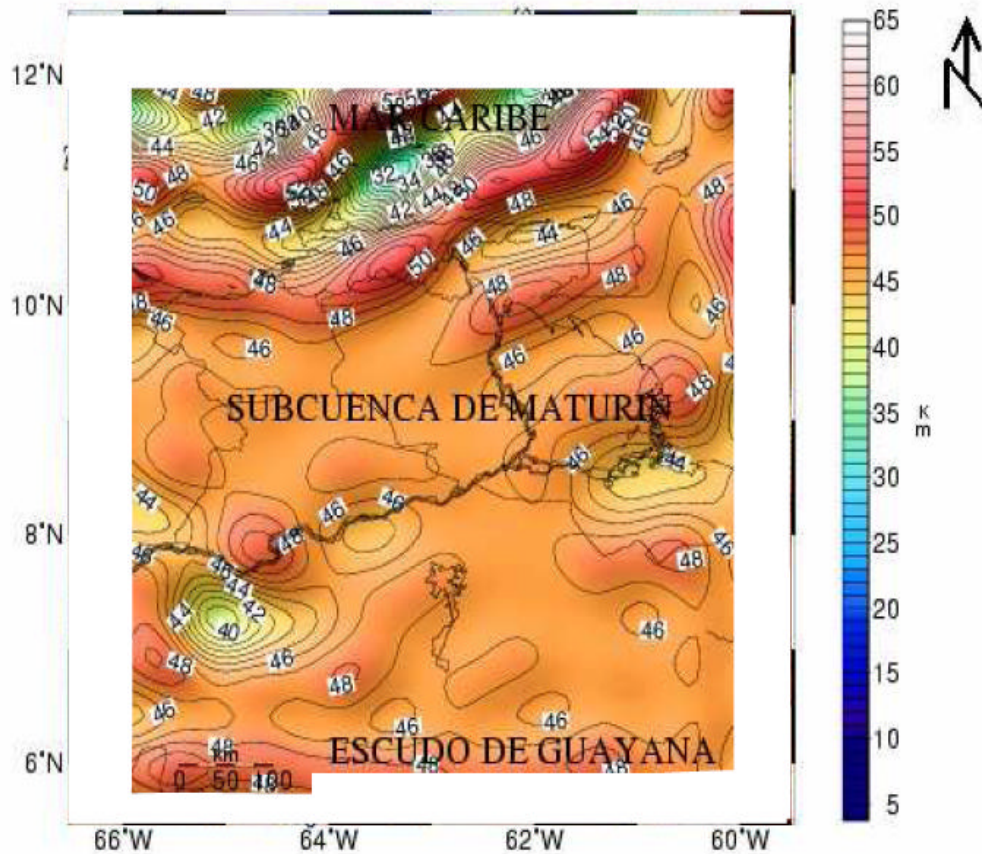


Figura 1.12 Mapa de Espesores de Moho en la Cuenca de Maturín (Tomado de Goncalvez *et al.*, 2006).

Magnani *et al.* (2009) realizaron un estudio de sismica marina de reflexión y refracción profunda costa afuera y en tierra, en el sureste del límite de la placa Caribe, específicamente a lo largo del perfil 67° Oeste, abarcando una longitud total de 550 km en sentido NNO. De este estudio se obtuvo un modelo de velocidad en el perfil 67° Oeste que muestra un límite de placa bastante heterogéneo, caracterizado por cambios abruptos en la velocidad de la estructura a medida que se aumenta la profundidad. Basado en geología de superficie y espesores y velocidades de corteza, el perfil puede ser dividido en cuatro

sectores principales: 1) Placa Caribe (CAR), incluyendo la Cuenca de Venezuela y el Cinturón de deformación del Sur del Caribe; 2) Arco de Islas ABC (Aruba, Bonaire y Curacao); 3) Cuenca de Bonaire y 4) Continente Suramericano (SA), ver figura 1.13.

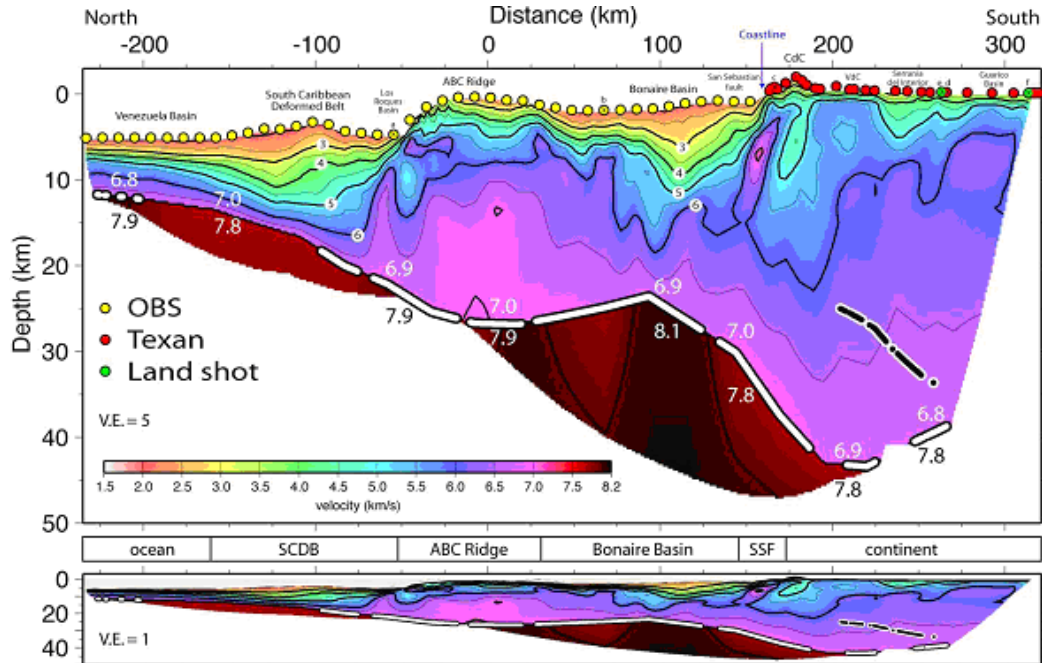


Figura 1.13. Modelo de espesor y velocidad de capas hasta la corteza realizado a lo largo del perfil 67° Oeste (Magnani *et al.*, 2009).

Clark (2007) realiza una caracterización del límite de placas Caribe - Sur América a lo largo del perfil 64° Oeste usando datos obtenidos mediante sismica de refracción y reflexión profunda tanto costa afuera como en tierra, adquiridos durante el Proyecto BOLÍVAR. Dichos datos fueron procesados con el objetivo de obtener un modelo de inversión de velocidades a lo largo del perfil y fueron integrados con datos de sismica de reflexión y otros modelos previos para generar el perfil que se presenta en la figura 1.14.

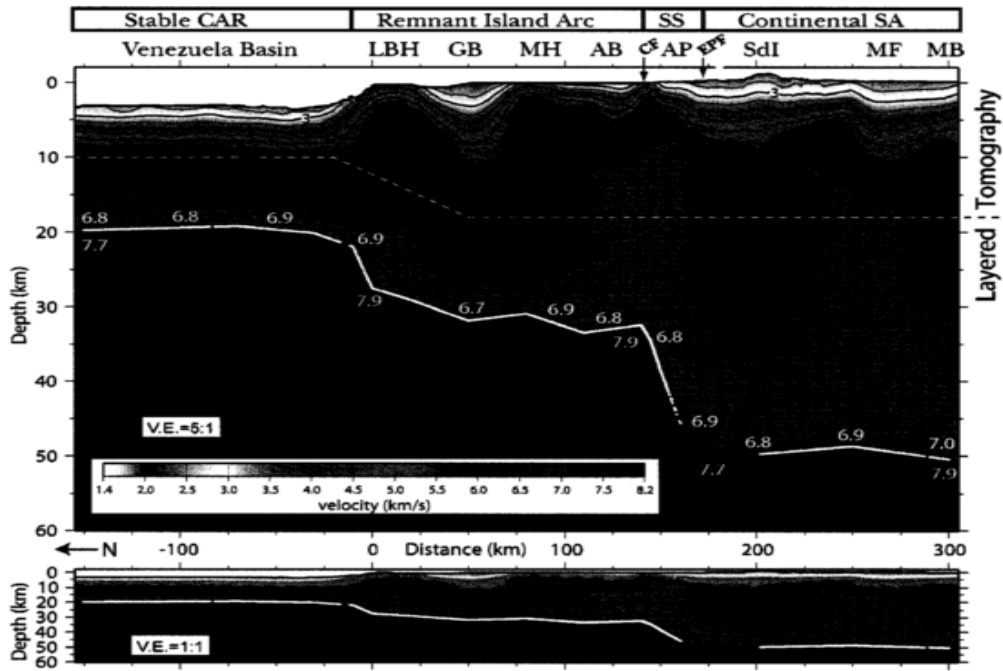


Figura 1.14. Modelo de velocidad del perfil 64° Oeste, exageración vertical 5:1 (arriba) y 1:1 (abajo). Tomado de Clark (2007).

Niu *et al.* (2007) investigaron el espesor y composición de la corteza a lo largo del límite sureste de la Placa Caribe, aplicando la técnica de funciones receptoras a datos telesísmicos grabados por un despliegue de sensores temporales de banda ancha instalados en el marco del Proyecto BOLÍVAR, además de los pertenecientes a la Red Sismológica Nacional de Venezuela.

Ellos utilizaron la conversión de ondas primarias P a S y las reverberaciones de la corteza para estimar el espesor y el promedio de radio V_p/V_s en la corteza sobre la región de estudio. Esta técnica les permitió estimar profundidades de Moho de ~16 km bajo el sureste del Mar Caribe a ~52 km bajo el noreste venezolano y Andes venezolanos (figura 1.15).

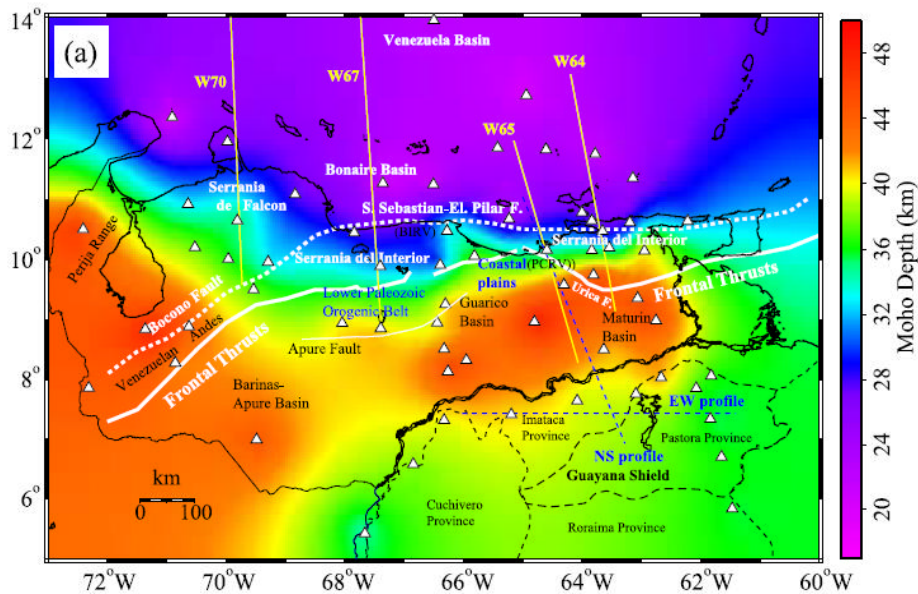


Figura 1.15. Mapa de profundidad de Moho en Venezuela (Tomado de Niu *et al.*, 2007).

Quinteros (2007) realiza un estudio de espesor de la corteza en la región Noroccidental de Venezuela a partir del análisis de funciones receptoras, aplicando la metodología descrita por Niu *et al.* (2007). Para este estudio se seleccionaron nueve estaciones sismológicas de banda ancha pertenecientes a la Red Sismológica Nacional de Venezuela operadas por FUNVISIS, obteniendo valores entre 20 y 45 km, con tendencia a la disminución cortical en dirección N-NE.

Quinteros *et al.* (2008) hacen un reprocesamiento de los datos utilizados para el estudio previo (Quinteros, 2007) obteniendo resultados similares y concordantes con los estudios previos realizados en la zona, los valores estimados de espesor de corteza se encuentran entre 18 y 48 km, con tendencia a disminuir en dirección hacia la placa Caribe (Figura 1.16).

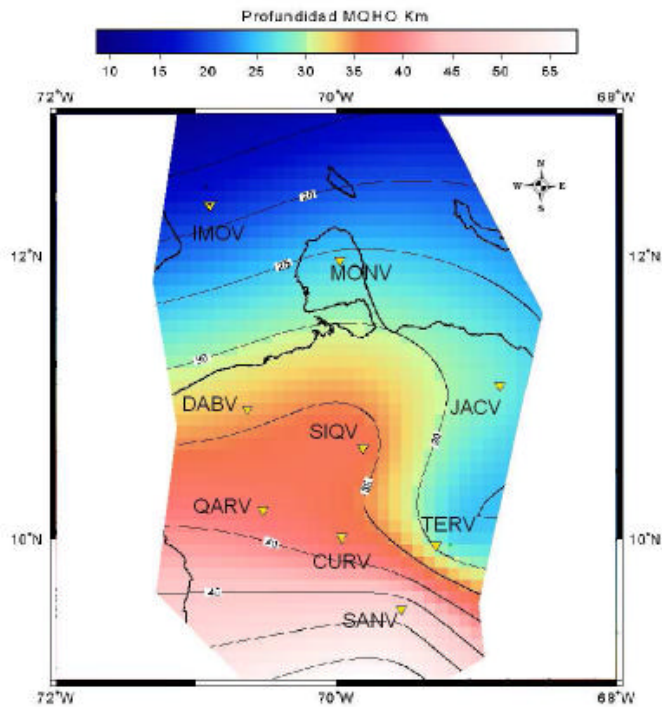


Figura 1.16. Profundidad de Moho en las nueve estaciones sísmicas analizadas (Quinteros *et al.*, 2008).

Jácome *et al.* (2008), a través de una integración sísmica, flexural y gravimétrica del cinturón de deformación de la Cordillera de la Costa y de la Cuenca de Guárico, caracterizaron la estructura cortical y la profundidad de Moho en la región centro- norte de Venezuela. Los resultados obtenidos a través de la sísmica reflejaron una profundización máxima de Moho de 45 km bajo el Escudo de Guayana disminuyendo hacia el norte hasta 35 km bajo la Cuenca de Guárico (figura 1.17). Mientras que a través de los modelos gravimétricos (figura 1.18) se observó que la profundidad de Moho en el cinturón de deformación de la Cordillera de la Costa es mucho mayor que la esperada de los modelos flexurales, apuntando la existencia de una raíz cortical de más de 35 km de profundidad. La discontinuidad de Moho disminuye su profundidad (30 km) hacia el Mar Caribe.

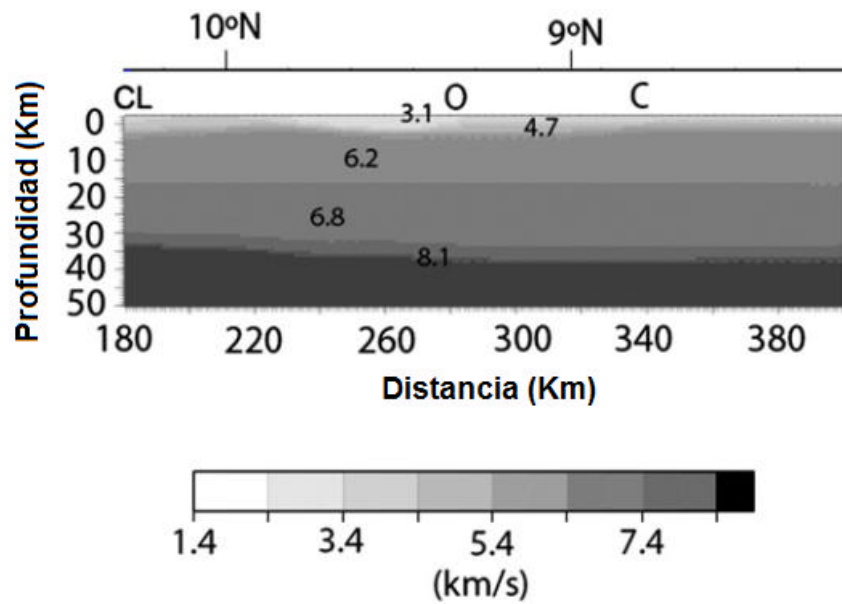


Figura 1.17. Modelo de velocidad del transecto N-S 67°Oeste, Jácome *et al.* (2008).

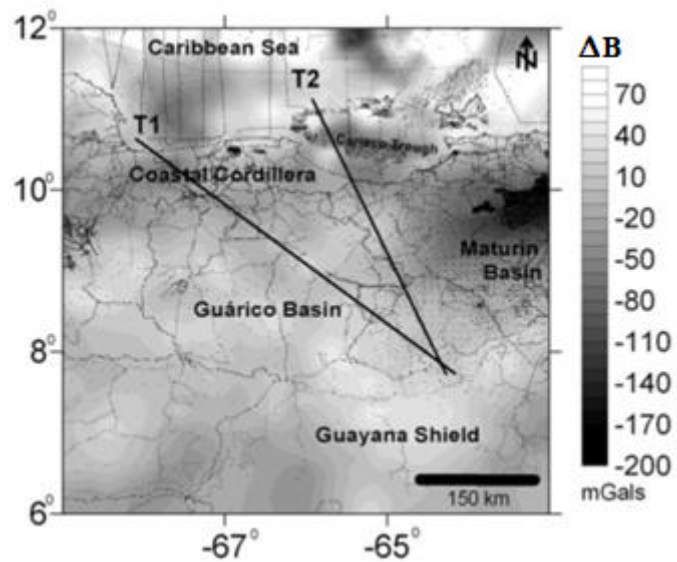


Figura 1.18. Mapa de anomalías de Bouguer. El mínimo de tendencia regional NE-SO corresponde con la cuenca de Maturín. Tomado de Jácome *et al.* (2008).

CAPÍTULO II

MARCO GEODINÁMICO

2.1 Origen y evolución del Caribe

Durante décadas se han mantenido discusiones respecto al origen y evolución de la placa Caribe, intentando la explicación del mismo mediante dos teorías distintas, una que propone la formación de la corteza Caribe al oeste de su ubicación actual, pero sin embargo, entre las dos Américas (Meschede y Frisch, 1998; James, 2003, 2004) la cual es conocida como modelo *in situ*; mientras que la otra teoría, conocida como modelo Pacífico propone en el Mesozoico tardío el origen de la corteza oceánica del Caribe y su deriva a su posición actual entre las Américas (Pindell, 1994; Pindell y Kennan, 2001).

A continuación se explican brevemente los dos modelos propuestos sobre el origen del Caribe:

El primer modelo propone el origen y evolución *in situ* de la Placa Caribe, entre las placas Norte y Suramérica al oeste de su posición actual, la cual fue planteada por varios autores, tales como Meschede y Frisch (1998), Donnelly (1994), James (2003), entre otros.

Durante el Calloviense/Oxfordiense empieza el proceso de ruptura de la Pangea, los bloques continentales de Norteamérica, Suramérica y África están aún en cercana proximidad. El inicio del proceso de separación entre Norte y Suramérica es indicado por un eje de tendencia expansiva NE-SO que continúa hacia los océanos Centro Atlántico y Sur Pennínico de Los Alpes (Frisch, 1981) al este y dentro del eje de expansión entre las placas Phoenix y Farallón al oeste.

Ghosh *et al.* (1984) determinan un número de anomalías magnéticas de la expansión del piso oceánico en la Cuenca de Venezuela, las cuales fueron interpretadas por Donnelly

(1994) como el resultado de la deformación debido al movimiento hacia el este de la corteza Caribe, la cual ocurrió subsecuentemente a la formación del *plateau* basáltico.

El engrosamiento del Caribe junto con el inicio de la expansión en el Sur Atlántico es considerado como responsable de la terminación en la extensión del piso oceánico en el Caribe.

A partir del Terciario las placas de Norte y Suramérica comienzan a moverse en sentido oeste con respecto a la placa Caribe, la cual se convierte en una placa independiente en este tiempo.

El segundo modelo, propuesto por Pindell y Barret (1990) y Pindell (1994) entre otros, plantea una formación alóctona de la placa Caribe; este modelo empieza con el bloque Maya (Yucatán) tendido a lo largo de la costa norte de Suramérica, entre Norte y Suramérica, y el bloque Chortis tendido en el lado oeste de México.

Durante el Triásico se inicia la separación de los bloques en el occidente de la Pangea, a medida que el Atlántico se abría, la apertura en el Golfo de México progresaba, con la rotación del bloque Yucatán en sentido antihorario en el Jurásico Medio.

A principios del Oxfordiense, Suramérica se ha movido lo suficientemente lejos de Norteamérica para que Yucatán pudiera rotar sin inconvenientes. Para este mismo tiempo, el estiramiento de la corteza ha alcanzado el punto donde la corteza oceánica empieza a formarse (Cuenca Proto-Caribe y Golfo de México). Un cambio fundamental en el patrón de cinemática ocurre en este tiempo, moviendo a Yucatán de su posición en el Oxfordiense a su posición final relativa a Norteamérica. Un margen pasivo formado a lo largo del Golfo de México y la región proto-Caribe está asociado a la divergencia entre las dos Américas.

La rápida y continua separación de las Américas resultó en una subducción frontal en el NE del Caribe. Casi toda la convergencia entre las placas Caribe y Suramericana puede ser contada por el inicio del acortamiento y la cercanía del retro-arco andino.

El desarrollo de un sistema de arco intra-oceánico extendiéndose desde Costa Rica hasta el Ecuador indica que la placa Caribe se separó de la placa Farallón y desde entonces probablemente se movió más lentamente en dirección NE o E relativa a Norteamérica.

En el Paleoceno comienza la subducción de la corteza Proto-Caribeña bajo el antiguo margen pasivo del norte de Suramérica. La subducción en este transecto acomodó la lenta convergencia entre Norte y Suramérica.

En el Mioceno Inferior el desarrollo general del Oligoceno continúa, manteniéndose la transpresión oblicua entre Caribe y Suramérica, ocurriendo el levantamiento de la Sierra de Perijá, los Andes venezolanos y la Serranía del Interior oriental; la colisión en Venezuela se sitúa hacia el este en la cuenca de Maturín.

En el Mioceno Superior la placa Caribe presenta un cambio en el azimut de movimiento con relación a las Américas, pasando de colisión oblicua a una tectónica rumbo-deslizante EO con un mínimo acortamiento NS, lo que ha dominado los estilos tectónicos al norte y sur de la región caribeña, manteniendo a la zona sureste del Caribe bajo un régimen transtensional.

2.2 Origen y evolución de la tectónica regional

En Venezuela existen tres grandes morfoestructuras que dominan el subcontinente suramericano: los escudos antiguos, las cadenas montañosas y las depresiones sedimentarias. De estas formaciones se derivan ocho grandes provincias fisiográficas:

- 1) Cordillera de los Andes y Sierra de Perijá.
- 2) Cuenca del Lago de Maracaibo.

- 3) Delta del Orinoco- San Juan.
- 4) Los Llanos.
- 5) Escudo Guayanés.
- 6) Plataforma continental, islas y llanos costeros.
- 7) Sistema montañoso del Caribe.
- 8) Valles y serranías de Falcón, Lara y Yaracuy.

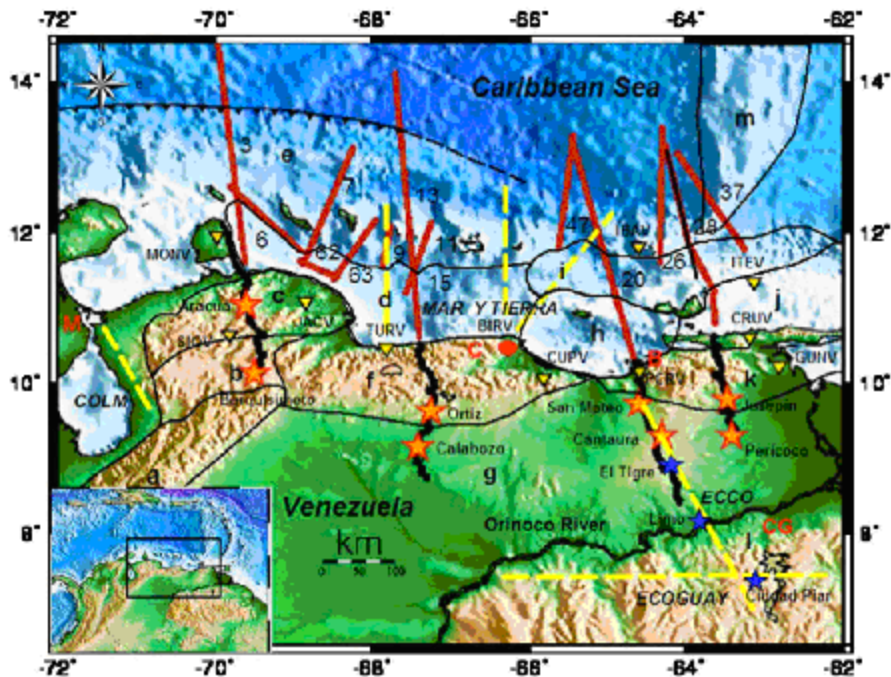


Figura 2.1 Unidades tectónicas simplificadas dentro del área de estudio: e) Cinturón de deformación del sur del Caribe con subducción al norte y Antillas de Leeward al sur (incluyendo la Cuenca Aruba-Curaçao), f) Napas caribeñas y cinturón de deformación de la Cordillera de la Costa, g) Cuenca Oriental de Venezuela, k) Cinturón de deformación de la Serranía del Interior, l) Escudo de Guayana. (Schmitz *et al.*, 2008).

La historia de la formación de la fisiografía de las cadenas montañosas de los Andes y la Costa se encuentra estrechamente relacionada con la evolución del margen norte de la Placa Suramericana. Por otra parte las regiones piemontinas se desarrollaron en diversas etapas de glaciación/ deglaciación, quedando cubiertas por sedimentos molásicos neógenos. La zona central del territorio nacional está definida por los Llanos (260.000 km²), que constituye el rasgo fisiográfico del final del relleno de las cuencas de Venezuela Oriental y

de Barinas-Apure. Finalizando al sur con la provincia de Guayana o Macizo Guayanés, la cual está formada por terrenos Precámbricos incluyendo algunas planicies de origen Pleistoceno del Río Orinoco (WEC 1997- Evaluación de Pozos).

Para esta investigación las provincias fisiográficas de interés a discutir son las contenidas en la región centro-oriental del país, específicamente los Llanos (Cuenca de Maturín y Guárico), el Escudo Guayanés, parte de las Islas de Sotavento y el sistema montañoso del Caribe (Cordillera de la Costa y Serranía del Interior).

2.3 Origen y evolución tectónica de la Cuenca Oriental

Según Di Croce (1995), la Cuenca Oriental de Venezuela se formó como resultado de la compleja interacción entre las placas litosféricas Suramérica, Norteamérica y Caribe. Tres mayores eventos tectónicos controlan la evolución de la cuenca. Estos eventos están relacionados al movimiento relativo post-Jurásico de Suramérica con respecto a Norteamérica. El primer evento, desde el Jurásico medio al Cretácico superior (165 Ma – 80 Ma) muestra la divergencia NO-SE. El segundo evento desde el Campaniense al Eoceno (80 Ma – 49 Ma) tuvo movimientos relativos poco significativos. Finalmente durante el intervalo desde el Eoceno hasta el presente (49 Ma – 0 Ma) el movimiento relativo ascendido a una lenta convergencia N-NO.

Basado en este patrón de movimiento, puede ser diferenciada la siguiente secuencia tectónica:

1. Fase de apertura (rompimiento de la Pangea) del Triásico al Jurásico Superior.
2. Fase de margen pasivo ((?) Jurásico Superior – Cretácico Inferior – Eoceno Inferior).
3. Fase de margen activo (Paleógeno Inferior – Presente).

La Cuenca Oriental de Venezuela posee dos discordancias regionales que separan diferentes regímenes tectónicos: la primera relacionada con el tope del basamento

crystalino, que se encuentra bajo la mega-unidad de margen pasivo cretácico-paleógeno y la segunda que separa dicho margen pasivo de los sedimentos neógenos, constituyendo una discordancia basal del “foredeep” (Di Croce, 1995), ver figura 2.2.

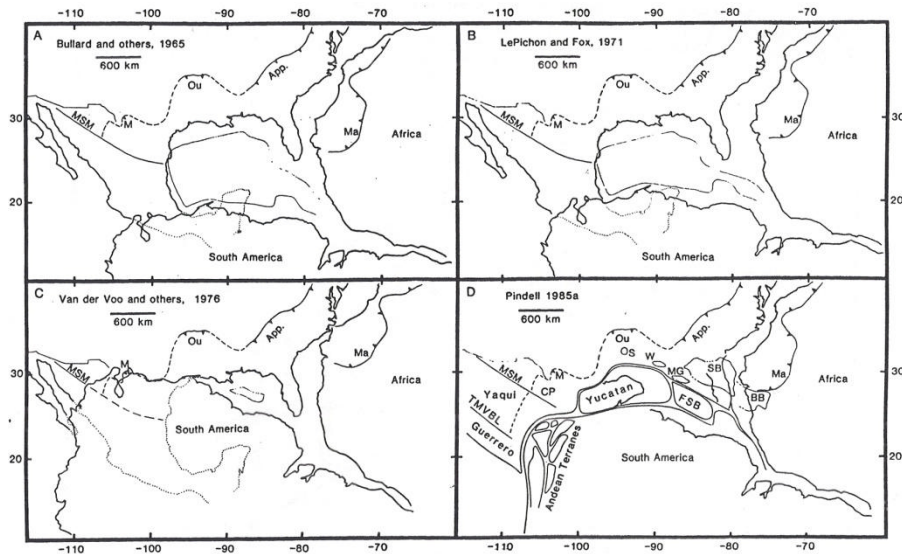


Figura 2.2 Cuatro diferentes reconstrucciones Permo-Triásicas de la Pangea oeste (Di Croce, 1995).

2.3.1 Cuenca de Maturín

Según Jácome *et al.* (2003a) la Cuenca de Maturín en Venezuela Oriental (figura 2.3), está localizada en un escenario tectónico compresivo que involucra una subducción oblicua de la placa Suramericana bajo la placa Caribe. Desde el Mioceno Inferior, Venezuela Oriental ha experimentado un gran cambio en su régimen de subsidencia. El frente transpresional de la placa Caribe colindaba oblicuamente con el margen pasivo del norte de Suramérica del Cretácico al Paleógeno. La Cuenca de Maturín se formó debido a la carga tectónica asociada al “thrust sheet” de la Serranía del Interior y el hundimiento de la placa Suramericana debido a la subducción continental. Cuatro eventos geodinámicos importantes contribuyeron a la formación de la Venezuela Oriental: la orogénesis del Paleozoico, la apertura asociada con el rompimiento de la Pangea en el Jurásico y Cretácico

Inferior, el desarrollo del margen pasivo en el Cretácico a Paleógeno y la colisión oblicua entre las placas Caribe y Sur América en el Neógeno, generando la Cuenca de Maturín.

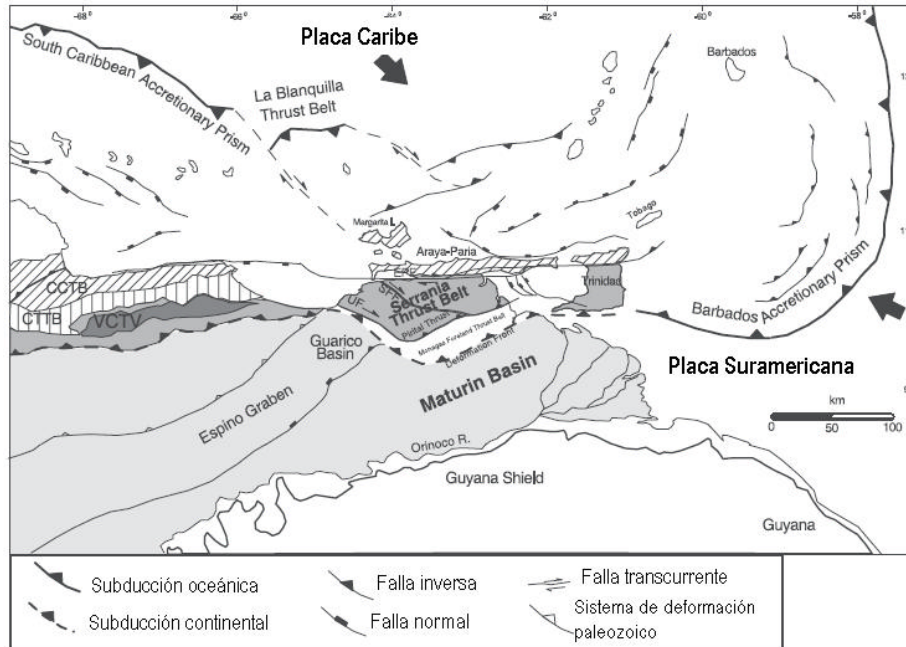


Figura 2.3. Mapa tectónico del noreste de Venezuela, mostrando la interacción entre la placa oceánica del Caribe y la placa continental de Sur América (Jácome *et al.*, 2003a).

La evolución cinemática de la cuenca antepaís de Maturín desde el margen pasivo cretácico hasta el presente, ha sido estudiada usando cortes de secciones balanceadas. Sin embargo, dos aspectos importantes de la evolución y carácter de la deformación compresiva llevaron a la formación de la Cuenca de Maturín. Los mismos son: 1) La flexura y compensación isostática de la litósfera debido a la carga de “thrust sheet” y 2) a la topografía de subducción dinámica (Jácome *et al.*, 2003b).

Venezuela oriental está localizada en un escenario tectónico compresional que envuelve la convergencia oblicua de las placas Caribe y Suramérica, la cual es acomodada por dos componentes: corte dextral en una falla transcurrente E-O y acortamiento en dirección NO- SE observado en el cinturón de deformación de la Serranía y en el cinturón de deformación antepaís de Monagas (Jácome *et al.*, 2003b).

2.3.2 Cuenca de Guárico

De acuerdo con Jácome *et al.* (2008) la cuenca antepaís de Guárico está localizada en la región nor-central de Venezuela. Esta cuenca está limitada al norte por el cinturón de deformación de la Cordillera de la Costa, al sur por el Escudo de Guayana, al este por el sistema de fallas de Anaco y al oeste por el Alto de El Baúl. La Cuenca de Guárico ha sido tradicionalmente considerada como un buen ejemplo de una cuenca antepaís, formada por la flexura de la litósfera de Suramérica bajo la carga del cinturón de deformación de la Cordillera de la Costa.

El desarrollo geodinámico de la Cuenca de Guárico puede ser dividido en cuatro episodios tectónicos: 1) basamento Precámbrico y Paleozoico formado por rocas ígneas y sedimentarias respectivamente, 2) ruptura Jurásica, asociada con el rompimiento de Gondwana, la cual produce una serie de medio grabens orientados en dirección NE-SW como lo indica el Graben de Espino localizado al sur de la cuenca 3) desarrollo de un margen pasivo y subsidencia termal del Cretácico al Eoceno Temprano, evidenciado por la secuencia sedimentaria marina transgresiva de 3 a 4 km de espesor depositado sobre el basamento paleozoico y 4) desarrollo de un margen pasivo compresional del Mioceno al Presente, relacionado con la colisión oblicua entre las placas Caribe y Suramericana. La colisión entre estas dos placas comenzó en Venezuela occidental durante el Paleoceno-Eoceno Temprano con el emplazamiento de las Napas de Lara y la misma está aún activa al oriente de Venezuela (Jácome *et al.*, 2008).

2.3.3. Graben de Espino

El Graben de Espino es una estructura de más de 300 km de largo por 50 de ancho considerado una depresión en el basamento asociado a la apertura continental del Jurásico y

cuya orientación está determinada por el margen pasivo Cretácico-Paleógeno y el relleno antepaís de la Cuenca Oriental de Venezuela; el mismo se extiende en sentido SO-NE.

Ríos *et al.* (2002), a partir de la interpretación de datos gravimétricos empleados en su estudio, concluyen que la mayor influencia en la curva de gravedad observada para el modelaje del Graben de Espino, está asociada a la discontinuidad de Moho, la cual refleja una significativa elevación por debajo de la zona central del graben que se manifiesta en un adelgazamiento del mismo y calentamiento de la corteza.

2.4. Escudo de Guayana

Di Croce (1995) plantea que el Escudo de Guayana es una simple elevación ubicada al sur de la Cuenca Oriental de Venezuela y consiste principalmente en rocas precámbricas superiores a 6,3 billones de años (Ga) que forma parte del Cratón Amazónico al este de Suramérica. Se presume que dicho escudo debió ser levantado como consecuencia de un punto caliente o una anomalía termal durante el Terciario Medio.

El Escudo Guayanés también comprende corteza continental precámbrica con una cobertura no continua de sedimentos probablemente paleozoicos. Del cratón hacia el norte comienza el engrosamiento de la cuña de sedimentos de la Cuenca Oriental de Venezuela.

El escudo está compuesto principalmente de rocas arqueanas y proterozoicas y su desarrollo puede ser separado en eventos temporales, siendo los más importantes los que se mencionan a continuación:

Eventos Arqueanos

Con la importante excepción de la provincia de Imataca, hay pocas evidencias de que el resto del escudo sea de edad Arqueana; aunque se ha demostrado que la mayor parte

del escudo al norte de Guayana, Venezuela, Suriname y la Guayana Francesa emergió como corteza síalica en el post- Arqueano.

La indudable geología arqueana dentro del Escudo de Guayana está completamente incluida dentro del Complejo de Imataca.

Etapa de arco Proterozoico Inferior

Se piensa que todos los constituyentes autóctonos del norte del Escudo de Guayana han emergido del manto durante el Proterozoico Inferior.

Episodio Tectonotermal Trans-Amazoniano

El episodio marca el ensamblaje de diversos fragmentos de corteza en el continente, su deformación común, y para mucho, pero no para todo el cratón, marca el primer desarrollo de ambientes continentales. Los diques y estructuras del Trans-Amazoniano Superior y episodios sucesivos son extensos, y demuestran que la corteza se comporta en un modo continental.

2.5 Serranía del Interior

En Venezuela oriental, la compresión generada por la subducción oblicua entre las placas Caribe y Suramericana han generado un levantamiento orogénico, en el que la deformación está balanceada por un sistema de desprendimiento basal que puede ser localizado en niveles de corteza media e inferior (Ysaccis y Audemard, 2000). Este levantamiento orogénico está ligado al norte por el cinturón de plegamiento de La Blanquilla (donde la corteza oceánica del Caribe es deformada) y al sur por el cinturón de deformación de la Serranía del Interior, la cual deforma secuencias de margen pasivo de la placa continental Suramericana (Jácome, 2003b), ver figura 2.3.

Este cinturón se encuentra delimitado al norte por la falla rumbo deslizando dextral de El Pilar, al sur por el frente de deformación, al este por el sistema de fallas transcurrentes de Los Bajos y al oeste por las fallas transcurrentes de San Francisco, presentando una tendencia estructural E-NE.

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

3.1. Funciones Receptoras

El modelado de la función receptora en el dominio del tiempo (Burdick y Langston 1977; Langston 1977, 1979, 1981) fue desarrollado para modelar la fase convertida de la onda de corte y sus múltiples grabaciones en la componente horizontal de la onda P. Las primeras investigaciones utilizaban datos de largo período de las estaciones de la red WWSSN (World Wide Standard Seismograph Network) para construir modelos simples de capas planas o con modelos que contienen una pequeña o moderada inclinación planar entre fases. La extensión a frecuencias mayores introdujo la necesidad de modelos más detallados (capas más delgadas) y técnicas de inversión linealizadas (Owens *et al.*, 1984) en el dominio del tiempo (Ammon, 1991).

Actualmente los estudios geofísicos se enfocan en hacer caracterizaciones mucho más detalladas de las estructuras presentes en la corteza y en el manto superior. En este respecto, las funciones receptoras cobran auge como una técnica nueva y eficiente para obtener información acerca de discontinuidades en la corteza y manto superior bajo las estaciones sísmicas de tres componentes.

A partir de la técnica de funciones receptoras se puede describir la estructura cortical bajo la estación sísmica aislada, usando para esto las ondas de cuerpo, las cuales contienen información de la función de tiempo de la fuente, el efecto de propagación a través del manto y las estructuras locales bajo el sitio de grabación, siendo necesario remover el efecto de los dos primeros para así obtener la función receptora resultante.

Específicamente, las funciones receptoras son series de tiempo, computadas de sismogramas de tres componentes que muestran la respuesta relativa de la estructura de la

tierra cerca del receptor. La ondícula es una composición de ondas P convertidas a S (figura 3.1) que reverberan en la estructura bajo el sismómetro.

Básicamente este método se basa en calcular la diferencia de tiempo entre la llegada de la onda P directa y la onda P convertida en S (Ps), para estimar el espesor de la corteza bajo la estación.

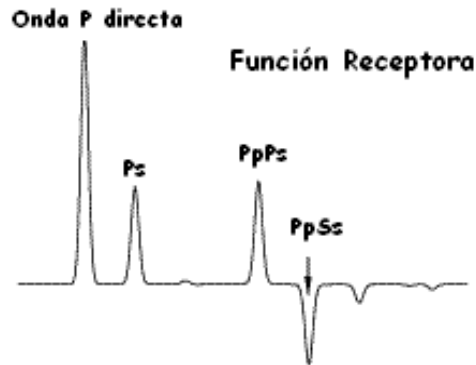


Figura 3.1. Pulsos de onda P y sus reverberaciones (Tomado de Ammon, 1991).

En la siguiente figura se muestra un patrón de rayos donde se observa la llegada de la onda P directa y sus fases convertidas, Ps, PpPs y PpSs, a la estación de tres componentes.

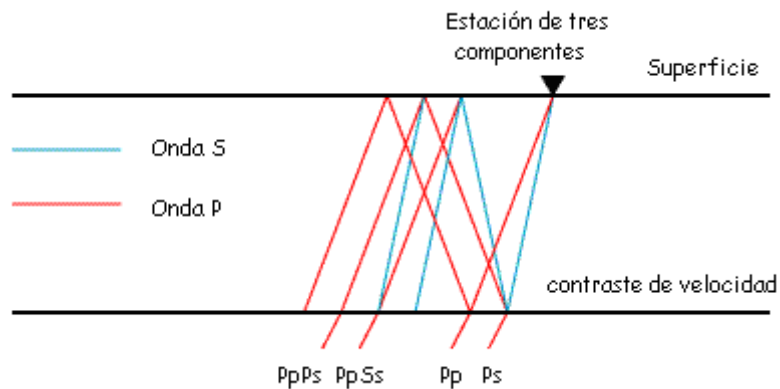


Figura 3.2. Diagrama de rayos de la onda P convertida a S (Tomado de Ammon, 1991).

3.2 Procesamiento para obtener la función receptora

3.2.1 Rotación de las componentes

Primero son rotadas las componentes horizontales N-S y E-O de los registros telesísmicos a las direcciones radial (R) y tangencial (T) respectivamente, obteniendo un nuevo sistema de coordenadas ZRT (figura 3.3). La componente radial está orientada en la proyección horizontal de la dirección de la onda incidente, y las componentes Z y T son perpendiculares entre sí y a su vez perpendiculares a R.

La mayor parte de la energía de las ondas P directa y Ps está dominada por las componentes Z (vertical) y R respectivamente, por lo que para aislar la onda Ps convertida de la onda P directa, las componentes ZRT son rotadas al sistema de coordenadas LQT (P-SV- SH) como se muestra en la figura 3.3, en el que la componente L señala la dirección de la onda P directa, la componente Q es perpendicular a L y es positiva respecto a la fuente, y la componente T es perpendicular a ambas componentes L y Q. La energía de la onda P está contenida principalmente en la componente L, la energía de la onda S convertida se refleja principalmente en las componentes Q y T (Sodoudi, 2005).

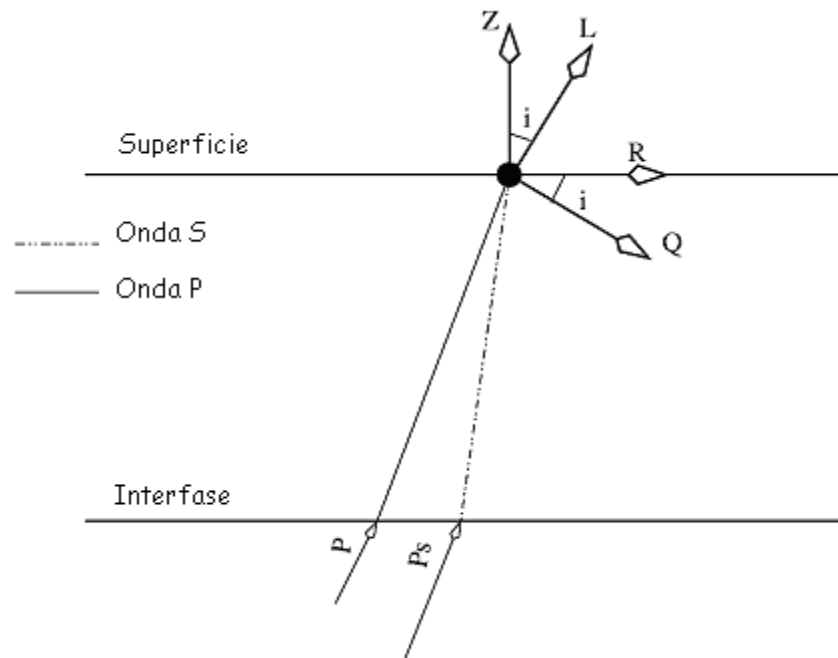


Figura 3.3. Sistemas de referencia ZRT y LQT. Tomada de Mohsen (2004).

3.2.2 Deconvolución

Para eliminar la influencia de la fuente y la trayectoria del rayo en la función receptora, se utiliza el proceso de deconvolución. La función receptora resultante (componente Q) contendrá en el caso ideal sólo la conversión directa y los múltiplos de discontinuidades bajo la estación receptora grabada, como se observa en la figura 3.4 (Mohsen, 2004).

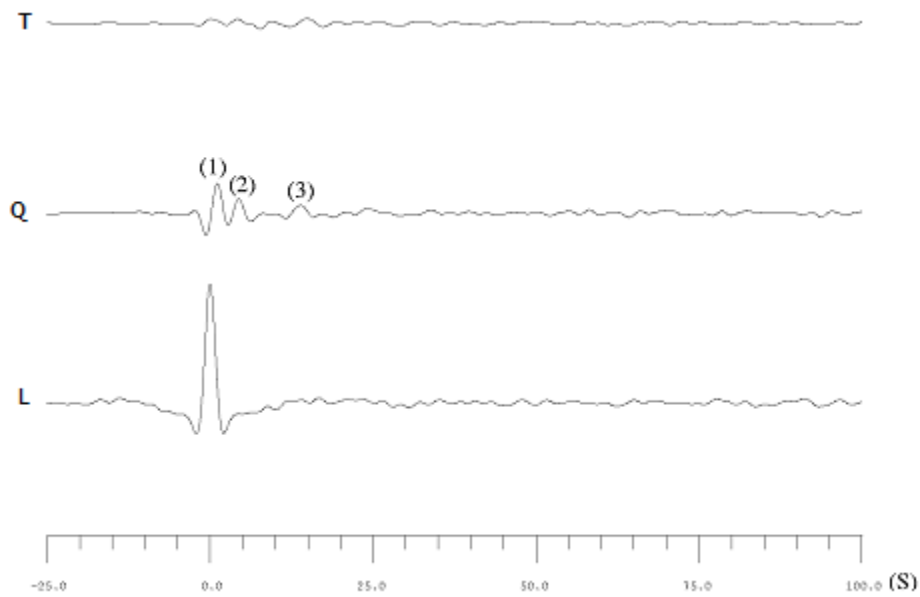


Figura 3.4. Ejemplo de datos para una estación, después de la rotación de los datos en el sistema de coordenadas L, Q, T y su deconvolución. La componente L muestra una onda estilo pulso. La componente Q se llama función receptora, donde los números (1) y (2) representan la onda P directa y la onda P convertida a S (Ps) respectivamente, mientras que el número (3) representa los múltiples. La componente T es la función receptora tangencial. Tomado de Mohsen (2004).

El tiempo de llegada de la fase Ps convertida en la componente Q de la función receptora depende de la profundidad de la discontinuidad, mientras que la amplitud de la fase convertida depende del contraste de velocidad de la onda S a lo largo de la discontinuidad (Sodoudi, 2005).

Langston (1979) desarrolló el procedimiento de ecualización de la fuente para remover el efecto de estructuras cercanas a la fuente y funciones de tiempo de la fuente. Los primeros estudios de funciones receptoras realizados como los de Phinney (1964) trabajaban en el dominio de la frecuencia usando el radio de amplitud espectral para estimar las características de la estructura a grosso modo. Langston (1979) extendió el método para incluir la información de fase, a través del uso de un radio complejo de dominio de frecuencia y una transformada inversa devuelta al dominio del tiempo. Para esta

deconvolución Langston utilizó un método de estabilización de “water-level” y un filtro pasa bajo Gaussiano para remover el ruido no filtrado por el “water-level”.

En el dominio del tiempo, la forma de la respuesta del desplazamiento teórico para una onda plana P, que incide bajo un paquete de interfases horizontales o inclinadas puede ser dado por:

$$\begin{aligned} D_v(t) &= I(t) * S(t) * E_v(t) \\ D_R(t) &= I(t) * S(t) * E_R(t) \\ D_T(t) &= I(t) * S(t) * E_T(t), \end{aligned} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

donde $S(t)$ es la función de fuente en el dominio del tiempo de la onda incidente, $I(t)$ es la respuesta al impulso del instrumento y $E_V(t)$, $E_R(t)$ y $E_T(t)$ son las respuestas vertical, radial y tangencial de la estructura al impulso, respectivamente.

Las funciones $E(t)$ son de la siguiente forma:

$$E(t) = \sum_{i=1}^n \{ \alpha_i \delta(t - \tau_i) + \beta_i H[\delta(t - \tau_i)] \}, \quad \text{Ecuación 3.2}$$

donde α_i y β_i son constantes relacionadas al producto de los coeficientes de reflexión y transmisión, $\delta(t)$ es la función Delta de Dirac, τ_i es el tiempo de viaje del i -ésimo rayo, y H representa el operador de transformación de Hilbert. La sumatoria es hecha sobre n rayos.

Una observación común hecha sobre datos telesísmicos de eventos de poca profundidad es que la componente vertical de terrenos en movimientos se comporta como una función de tiempo estilo pulso convolucionada con la respuesta del instrumento con llegadas sólo un poco tardías (Burdick y Helmberger, 1974). Cálculos teóricos de estructuras típicas de la corteza muestran que las reverberaciones corticales y las fases convertidas de la componente vertical de ondas P incidiendo abruptamente son incluso menores si el alto contraste entre fases es permitido. Sin embargo esto no sucede para

contrastes de velocidad extremadamente altos (> 2 km/s). Por lo que podemos aproximar $S(t)$ a:

$$I(t) * S(t) \approx D_v(t), \quad \text{Ecuación 3.3}$$

La hipótesis implícita es que $D_v(t)$ se comporta principalmente como una función Delta de Dirac. Asumiendo que las respuestas de instrumento son ajustadas en tres componentes, $E_R(t)$ y $E_T(t)$ pueden ser obtenidas por la deconvolución de $I(t) * S(t)$ de $D_R(t)$ y $D_T(t)$. En el dominio de la frecuencia este proceso está dado por:

$$E_R(\omega) = \frac{D_R(\omega)}{I(\omega)S(\omega)} \cong \frac{D_R(\omega)}{D_V(\omega)}$$

Ecuación 3.4

$$E_T(\omega) = \frac{D_T(\omega)}{I(\omega)S(\omega)} \cong \frac{D_T(\omega)}{D_V(\omega)},$$

$E_R(\omega)$ y $E_T(\omega)$ son entonces retransformadas al dominio del tiempo.

Empleando entonces un filtro pasa bajo Gaussiano se logra controlar el contenido de frecuencias en las funciones receptoras. En el dominio de la frecuencia está dado por:

$$E_R' = \frac{D_R(\omega)\overline{D_V}(\omega)}{\phi_{SS}(\omega)} \cdot G(\omega), \quad \text{Ecuación 3.5}$$

donde

$$\phi_{SS} = \max \{D_V(\omega)\overline{D_V}(\omega), c \max[D_V(\omega)\overline{D_V}(\omega)]\},$$

y

$$G(\omega) = e^{-\omega^2 / 4a^2},$$

$E_R'(\omega)$ es la “respuesta radial de la Tierra” deconvolucionada y la barra sobre $D_V(\omega)$ denota la conjugada compleja. La función $\Phi_{SS}(\omega)$ puede ser asumida como una simple autocorrelación de $D_V(\omega)$ junto con un vacío espectral, el cual es llenado dependiendo del parámetro c . La constante c determina el valor del “water-level”.

El valor del “water-level” es empleado en este caso para disminuir la inestabilidad numérica que ofrece el cociente de la ecuación 3.5, ya que el mismo puede asumir valores muy pequeños. Por ende, la función del “water-level” es fijar el valor mínimo que puede tomar dicho denominador.

Así se observan, después del filtrado y deconvolución, las componentes vertical y radial y la resultante función receptora (figura 3.5):

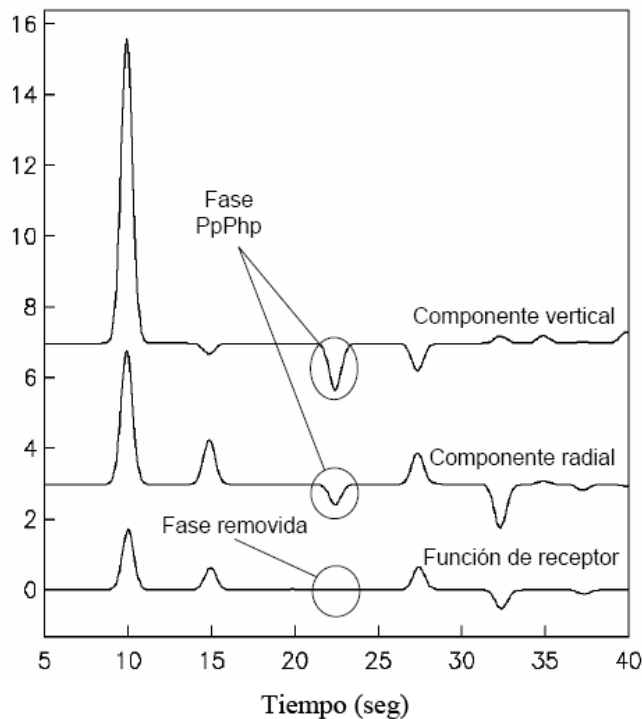


Figura 3.5. Componentes vertical y radial de un modelo simple, comparadas con la función receptora obtenida a partir de estas. Tomada de Cruz (2000).

3.2.3 Espesor cortical y estimación Vp/Vs

La diferencia de tiempo entre la llegada de las ondas P y Ps puede ser usada para estimar el espesor cortical, dadas las velocidades promedio de la corteza:

$$H = \frac{t_{Ps}}{\sqrt{\frac{1}{V_s^2} - p^2} - \sqrt{\frac{1}{V_p^2} - p^2}}, \quad \text{Ecuación 3.6}$$

donde p es el parámetro de rayo de la onda incidente.

Una ventaja de este método es que debido a que la conversión P a S se genera cercana a la estación, la estimación es poco afectada por la variación lateral de la velocidad, por lo que provee una buena medición. Un problema es lograr el ajuste entre los valores de espesor y velocidad de la corteza. Sin embargo, ya que t_{Ps} representa la diferencia en el tiempo de viaje de la onda S respecto a la onda P en la corteza, la dependencia de H en V_p no es tan fuerte como en V_s (o más precisamente, en la relación Vp/Vs), tanto así, que una variación de 0.1 en la relación Vp/Vs (k) acarrea un cambio en el espesor cortical de hasta 4 km. Esta ambigüedad puede ser reducida usando fases posteriores PpPs y PpSs+PsPs, las cuales suministran un contraste adicional por lo que ambos, k y H pueden ser estimados (Zhu y Kanamori, 2000).

$$H = \frac{t_{PpPs}}{\sqrt{\frac{1}{V_s^2} - p^2} + \sqrt{\frac{1}{V_p^2} - p^2}}, \quad \text{Ecuación 3.7}$$

$$H = \frac{t_{PpSs+PsPs}}{2\sqrt{\frac{1}{V_s^2} - p^2}}, \quad \text{Ecuación 3.8}$$

Para lograr una mejor relación señal/ruido se puede recurrir a la sumatoria de múltiples eventos. Tal sumatoria es usualmente hecha en el dominio del tiempo (Owens *et al.*, 1984). Debido a que el principal interés es estimar el espesor cortical, se propone una ecuación lineal en el dominio de $H-k$ definido como:

$$S(H - k) = \omega_1 r(t_1) + \omega_2 r(t_2) - \omega_3 r(t_3), \quad \text{Ecuación 3.9}$$

donde $r(t)$ es la función receptora radial, t_1 , t_2 y t_3 son los tiempos de llegada predichos Ps, PpPs, PpSs+PsPs correspondientes a los espesores corticales H y el radio V_p/V_s , como se expresan en las ecuaciones 3.6, 3.7 y 3.8, los ω_i son factores de peso y $\sum \omega_i = 1$. El $S(H, k)$ alcanza un máximo cuando las tres fases son sumadas coherentemente, con los valores de H y k correctos (figura 3.6).

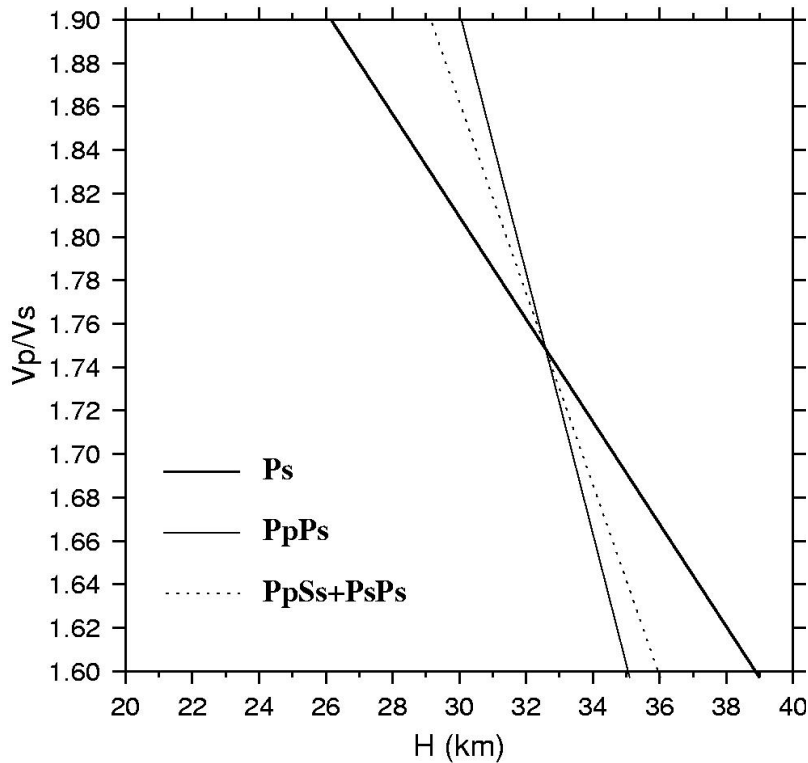


Figura 3.6. Curvas de relación $H-k$, cada curva representa la contribución de su fase convertida para la sumatoria. Tomado de Mohsen (2004).

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO

Para el presente estudio fueron utilizados registros de un total de 39 estaciones sismológicas de tres componentes (figura 1.4, Capítulo I; tablas A-1 y A-2) que se distribuyen de la siguiente manera: 12 estaciones pertenecientes a la Red Sismológica Nacional de Venezuela operada por FUNVISIS y 27 estaciones de la red XT (sismógrafos banda ancha PASSCAL instalados por la Universidad de Indiana). Los sensores de la red XT fueron instalados temporalmente para fines del proyecto BOLIVAR (Broadband Ocean- Land Investigation of Venezuela and the Antilles arc Region) y GEODINOS (Geodinámica reciente del Límite Norte de la Placa Sudamericana).

Se realizó la búsqueda de los datos a utilizar consiguiendo un total de 167 eventos con magnitud mayor o igual a 5.5, con distancias epicentrales comprendidas entre 30° y 90°. De todos los eventos encontrados por el catálogo sismológico, finalmente se utilizaron 75 que fueron los que presentaron mejor relación señal – ruido (ver tabla 5.1).

4.1 Preparación de los datos

Los datos fueron obtenidos de la página web de *IRIS Consortium*, y posteriormente fueron decodificados y cambiados de formato SEED (The Standard for the Exchange of Earthquake Data) a formato SAC (Seismic Analysis Code), a través del programa SAC (Goldstein), utilizando el sistema operativo UNIX.

Ya obtenidos los registros en el formato de procesamiento (SAC), es necesario etiquetarlos, llenando en el “Header” de cada evento datos relevantes como la latitud, longitud y profundidad de los mismos.

Posteriormente, se procede a la identificación de la onda P en los registros, para lo cual, en virtud de mejorar la relación señal/ruido se aplicó un filtro pasa banda de frecuencias entre 0.02 y 2 Hz, descartando aquellos eventos cuya relación señal/ruido aún seguía siendo deficiente, trabajando finalmente con un total de 75 eventos. Después de esto, fue marcada la primera llegada en las tres componentes de cada evento, para lo cual fue necesario evaluar visualmente los registros gráficos (figura 4.1).

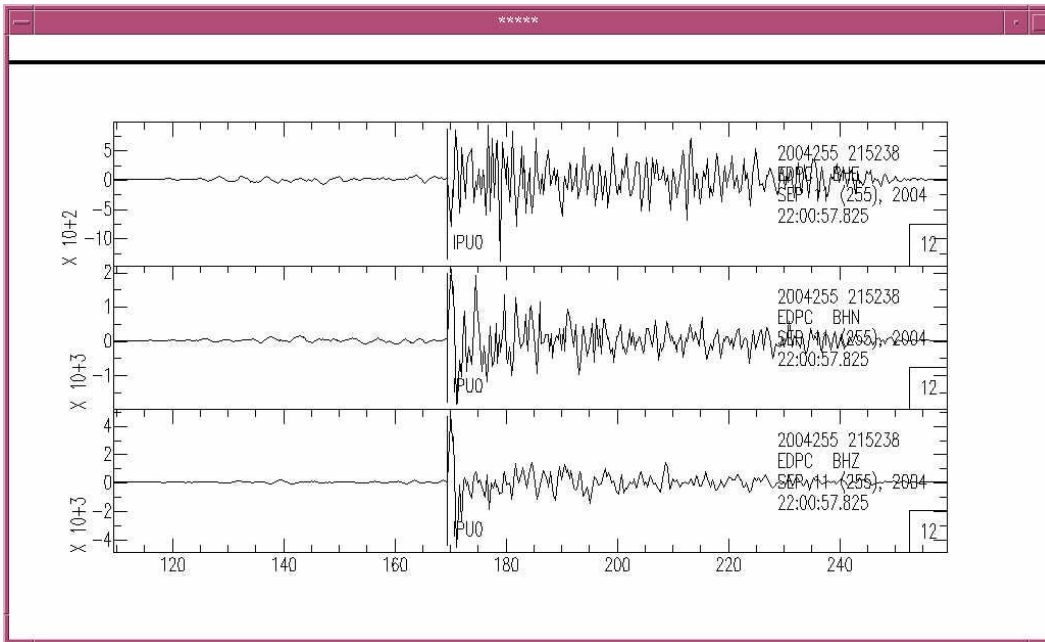


Figura 4.1. Registro grabado por la estación EDPC. De arriba abajo los sismogramas correspondientes a las componentes E, N y Z. La escala vertical indica valores de amplitud y la escala horizontal el tiempo en segundos. La llegada de la onda P se indica con las siglas IPUO.

4.2 Cálculo de Función Receptora (metodología de Ammon)

4.2.1 Rotación de las Componentes

Para la rotación de las componentes se empleó el programa *pwaveqn* elaborado por Owens *et al.* (1984) y modificado por Randall y Ammon, (<http://eqseis.geosc.psu.edu/~cammon/HTML/RftnDocs/seq01.html>, 1997), el cual se encarga de rotar las componentes norte y este a radial y tangencial respectivamente, obteniendo finalmente el sistema de coordenadas ZRT. Este programa incluye la aplicación de la deconvolución “*water-level*” y el filtro Gaussiano, para lo cual se realizaron pruebas de ensayo y error variando el filtro Gaussiano entre 1, 1,5 y 2 y el “*water-level*” entre los valores 0,001, 0,01 y 0,1. Finalmente, mediante la observación de las gráficas generadas a partir de la combinación de los distintos valores tanto de filtro Gaussiano como de “*water level*” se escogió la combinación de filtros que mostró las mejores relaciones señal/ruido, siendo los mismos de 1,5 para el filtro Gaussiano y 0,01 para el “*water-level*” (figura 4.2).

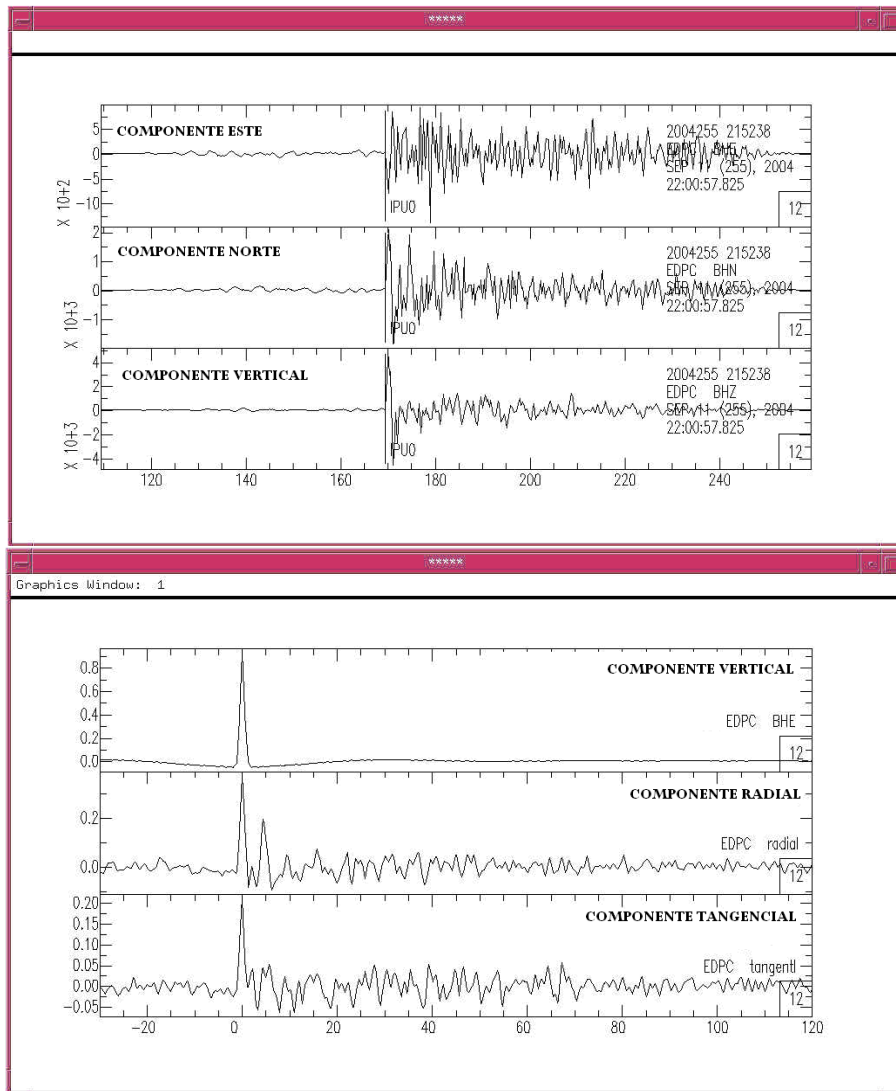


Figura 4.2. Estación EDCP. Arriba sismogramas E, N y Z, abajo funciones receptoras rotadas a sistema Z, R y T utilizando un filtro gaussiano de 1,5 y el *water level* de 0,01.

4.2.2 Apilamiento de las trazas

Para el apilamiento simple de señales se utilizó el subproceso de SAC llamado SSS (Signal Stacking Subprocess) el cual realiza un apilamiento lineal en función del tiempo utilizando la componente radial de los registros.

Se realizó el apilamiento de los datos para cada una de las estaciones con todos los eventos grabados por estación (apilamiento global), obteniendo así como resultado la

función receptora apilada más nítida y con menor nivel de ruido para cada una de ellas como se puede observar en la figura 4.3 b.

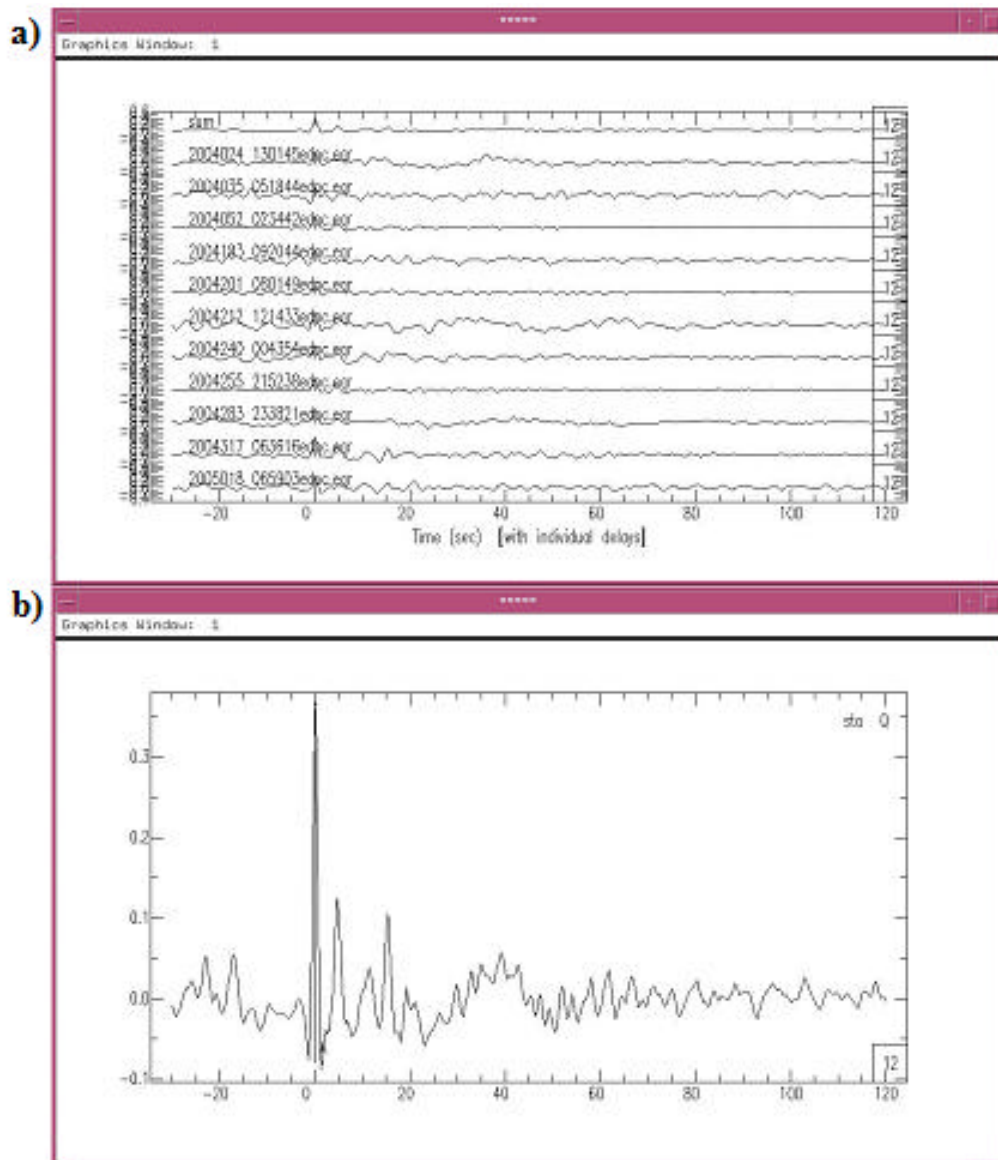


Figura 4.3. Apilamiento global estación EDPC, a) trazas apiladas y su función receptora resultante (traza superior), b) función receptora resultante ampliada.

4.3 Cálculo de Función Receptora (metodología de Niu)

4.3.1 Rotación de las componentes

Por medio de la elaboración de “*scripts*” se automatizó el procedimiento para el uso de los siguientes programas:

Primera rotación: a través del uso del programa *rotseis* (ver apéndice A) se llevan las componentes norte y este de la ondícula a tangencial y radial respectivamente, manteniendo la componente Z en su posición.

Segunda rotación: haciendo uso del programa *rotate* (ver apéndice A) se llevan las componentes tangencial y radial a un sistema final denominado LQT.

A través del programa *fddeconv* (ver apéndice A) se calcula la función receptora.

4.3.2 Apilamiento de las trazas

Mediante un apilamiento de base enésima (Muirhead, 1968; Niu y James, 2002), se agrupan los eventos globalmente, haciendo uso de las siguientes ecuaciones:

$$y_i(p) = R_i(p) |R_i(p)|^{N-1}$$

Ecuación 4.1

$$R_i(p) = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \text{sign}(x_{i+\tau_{i,j}}) |x_{i+\tau_{i,j}}|^{1/N},$$

donde p es el parámetro de rayo y N es raíz enésima.

Este apilamiento se realiza en el dominio de la profundidad, por lo cual la función receptora apilada que se obtiene para cada estación indica directamente el valor de profundidad de Moho por debajo de la misma.

Para tal fin se emplearon los programas *pslin91* y *dep_stk*, cuyos scripts fueron realizados por Niu (1993-1998, 2000). Dichos programas utilizan el modelo de velocidades

del IASP91 (Kennett y Engdahl, 1991) para el cálculo del parámetro de rayo de la fase Ps y su tiempo de llegada con respecto a P.

En la figura 4.4 se observa un ejemplo de la función receptora apilada resultante de los procesos explicados anteriormente, donde los lóbulos indican la profundidad de fuertes cambios de impedancia encontrados en el subsuelo.

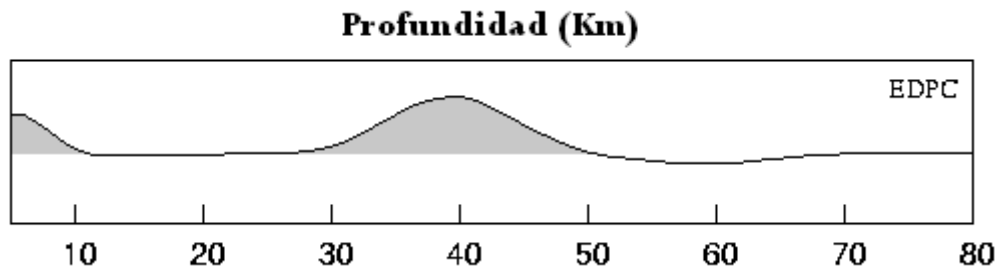


Figura 4.4. Apilamiento global en el dominio de la profundidad para la estación EDPC.

4.3.3 Relación Vp/Vs

Haciendo uso del “script *ratio_sh*”, el cual contiene el programa *RFMohoM* elaborado por Niu (2001-2006), se generan gráficas de relación Vp/Vs en función de la profundidad, así como gráficas de cross-correlación, asumiendo para la corteza valores de velocidad Vp entre 6 y 6.5 km/s según cada región, tomados de los resultados de los estudios sísmicos de Schmitz *et al.* (2008) y un rango de Vp/Vs entre 1.5 y 2 con un incremento de 0.001, para así obtener diferentes valores de velocidad de onda S (Vs). Dichos valores de Vs deben ser convertidos a profundidad tomando en cuenta las tres fases, Ps, PpSs y PpPs de las ondas y un rango de profundidad de 0 a 80 km, variando de 1 en 1 km.

En las gráficas de cross-correlación se puede observar el aporte de los tres modos de fase en función del factor de peso (w) (Ecuación 3.9); asumiendo que en la primera combinación la distribución del aporte es de 50% para la Ps, 25% de la PpSs y el 25%

restante proveniente de la fase PpPs. La segunda combinación refleja 50% de la fase Ps y 50% de la fase PpSs; y finalmente se combinan las fases Ps y PpPs aportando 50% cada una.

4.3.4 Relación de Poisson

Para el cálculo de los valores de relación de Poisson se empleó la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{(V_p / V_s)^2 - 2}{2 * ((V_p / V_s)^2 - 1)}, \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Según estudios realizados por Zandt y Ammon (1995) se puede relacionar la relación de Poisson con la composición de las rocas de la corteza inferior, como lo indican los siguientes valores:

- $\sigma < 0,26$: composición félsica.
- σ entre 0,26- 0,28: composición intermedia.
- $\sigma > 0,28$: composición máfica.

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Preparación de los datos

Como se dijo en el capítulo anterior, se encontraron 167 eventos sísmicos que cumplían las condiciones establecidas, pero posterior a la aplicación del filtro pasa banda, el número se redujo a 75 con una buena relación señal/ruido. En la tabla que se presenta a continuación se puede observar el número de los eventos seleccionados por cada estación.

Tabla 5.1: Número de eventos sísmicos registrados por estación.

ESTACIÓN	NÚMERO DE EVENTOS REGISTRADOS
ABPC	11
ARPC	38
CAPC	42
CMPC	45
CUPC	26
EDPC	42
FCPC	18
JMPC	36
LAPC	25
LMPC	10
MAPC	20
MIPC	6
MNPC	33
MOPC	21
MUPC	44
PAPC	22
PFPC	13
PRPC	42
ROPC	11

ESTACIÓN	NÚMERO DE EVENTOS REGISTRADOS
RPPC	24
SIPC	23
SMPC	47
SRPC	26
STPC	43
ULPC	24
VIPC	15
ZUPC	35
BAUV	9
BIRV	10
CAIV	7
CRUV	18
CUPV	13
GURV	25
IBAV	12
ITEV	23
MERV	37
PCRV	22
RIOV	19
TURV	26

5.2. Relación V_p/V_s

Estación ABPC

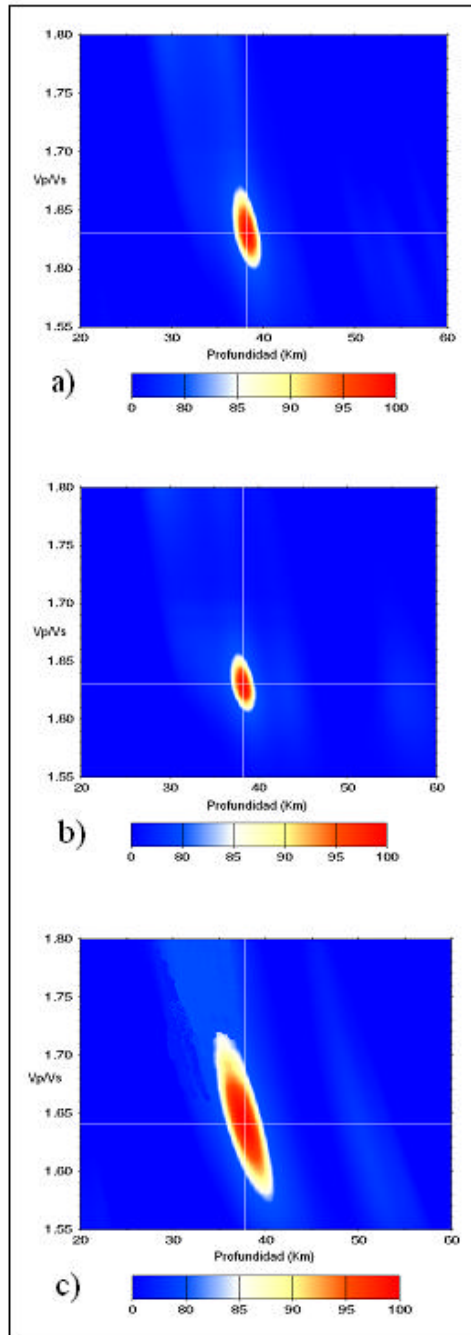


Figura 5.1. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación ABPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.

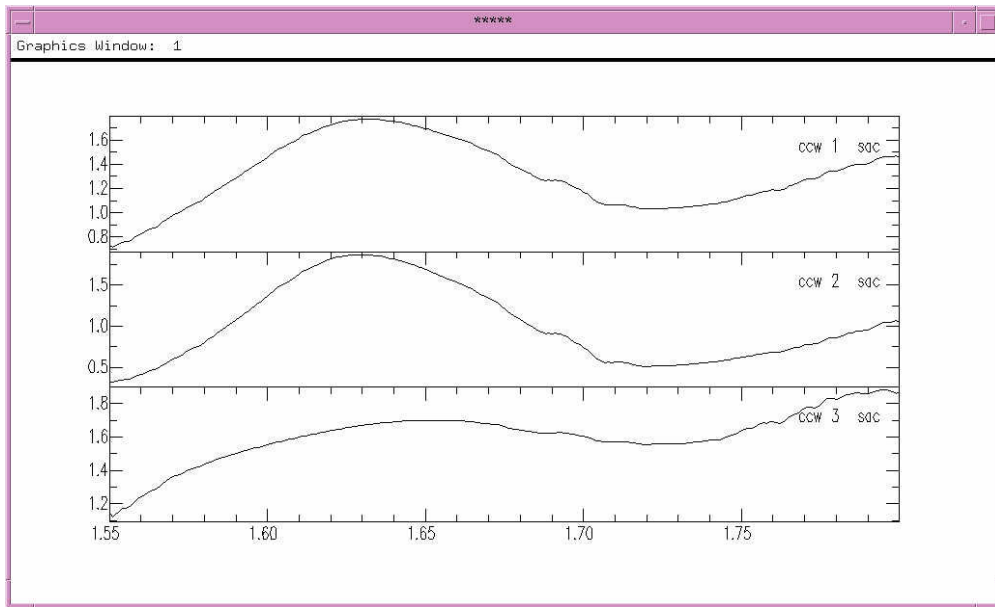


Figura 5.2. Cross-correlación entre los tres modos (Estación ABPC)

Al observar la figura 5.2 de cross-correlación entre los 3 modos, se distinguen tendencias similares entre el primer y segundo modo, por lo cual de las gráficas de relación V_p/V_s en función de la profundidad, se tomó como respuesta los valores que corresponden con la figura 5.1b, relacionada a las fases Ps y PpSs, la cual indica como valor de profundidad 38,5 km y relación $V_p/V_s=1,64$. Para esta estación se obtuvo una relación de Poisson de 0,20, valor asociado según Zandt y Ammon (1995) con rocas de composición félsica.

Estación ARPC

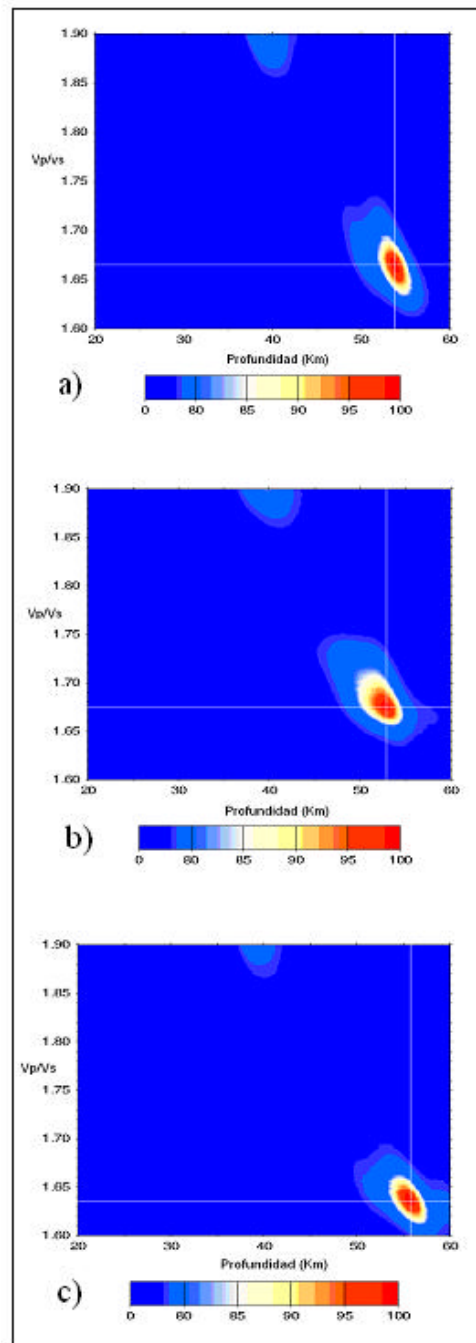


Figura 5.3. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación ARPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.

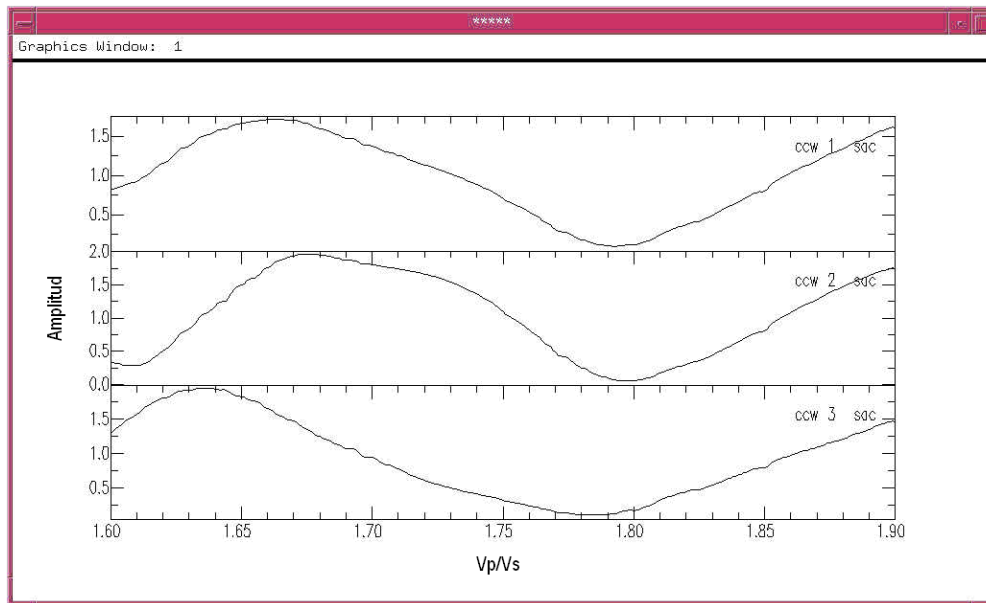


Figura 5.4. Cross-correlación entre los tres modos (Estación ARPC)

Las gráficas de cross correlación (figura 5.4) muestran el comportamiento de los tres modos de ondas, observándose la mayor similitud entre los dos primeros.

De acuerdo a las gráficas de profundidad en función de la relación V_p/V_s obtenidas para esta estación, se toma como respuesta de acuerdo a lo observado en las gráficas de cross-correlación, el valor de profundidad señalado por la figura 5.3b, el cual es de 53 km, e indican un valor de relación V_p/V_s de 1,675. Para esta estación se logró calcular un valor de relación de Poisson de 0,23, asociado a rocas de composición félsica (Zandt y Ammon, 1995).

Estación BAUV

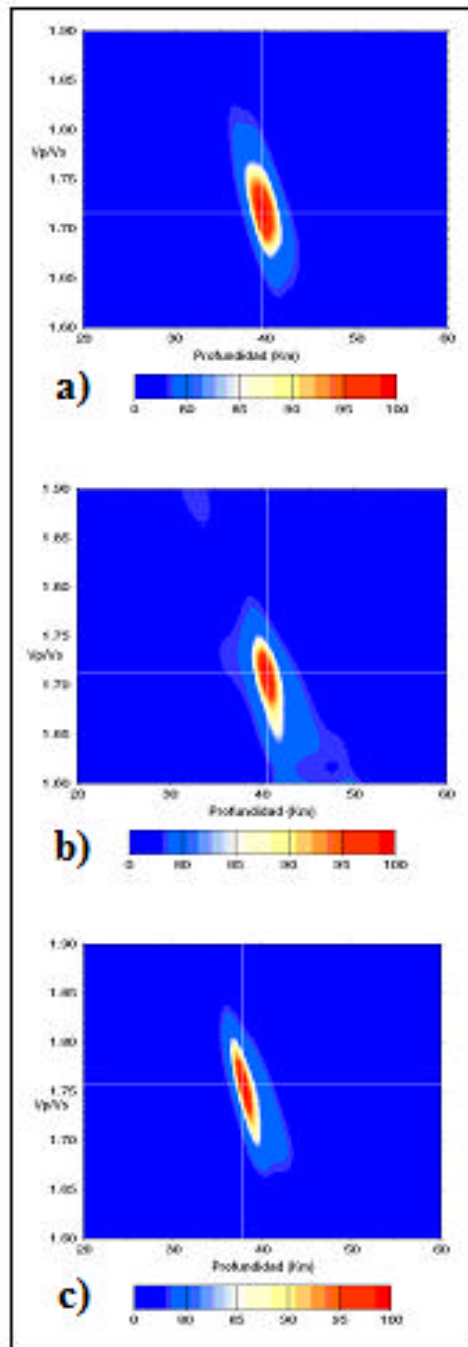


Figura 5.5. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación BAUV, usando las fases: a) Ps, PpSs y PpPs, b) Ps y PpSs y c) Ps y PpPs.

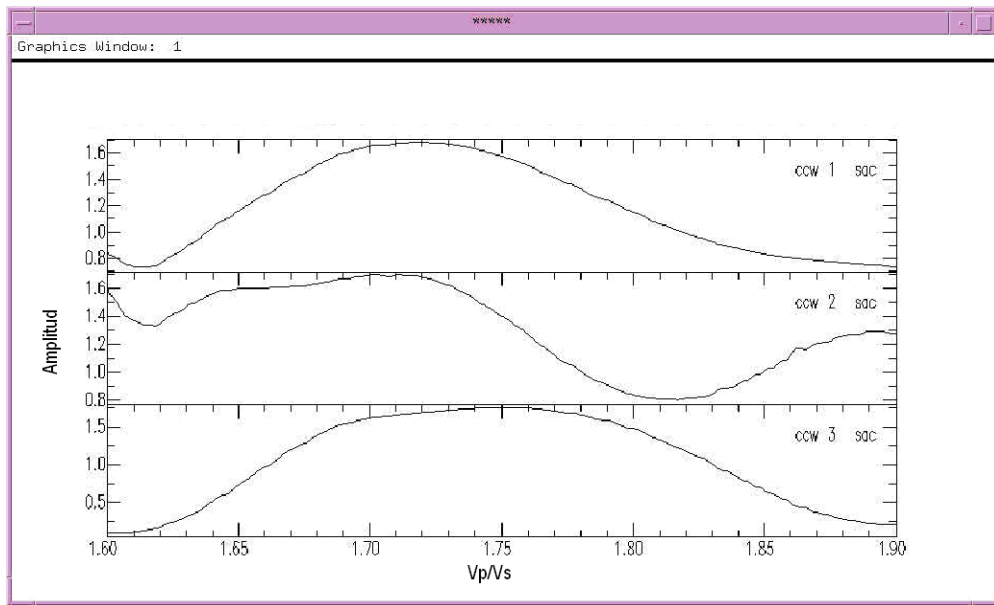


Figura 5.6. Cross-correlación entre los tres modos (Estación BAUV)

Según la gráfica de cross-correlación (figura 5.6), el modo con mayor correlación con el primer modo es el correspondiente a las fases Ps y la PpSs, por lo que se toma como valor de profundidad para esta estación 40,5 km, como se observa en la figura 5.5b, la cual también presenta una relación $V_p/V_s=1.71$. Para la estación se calculó un valor de relación de Poisson de 0,24, asociado a rocas de composición félsica (Zandt y Ammon, 1995).

Estación BIRV

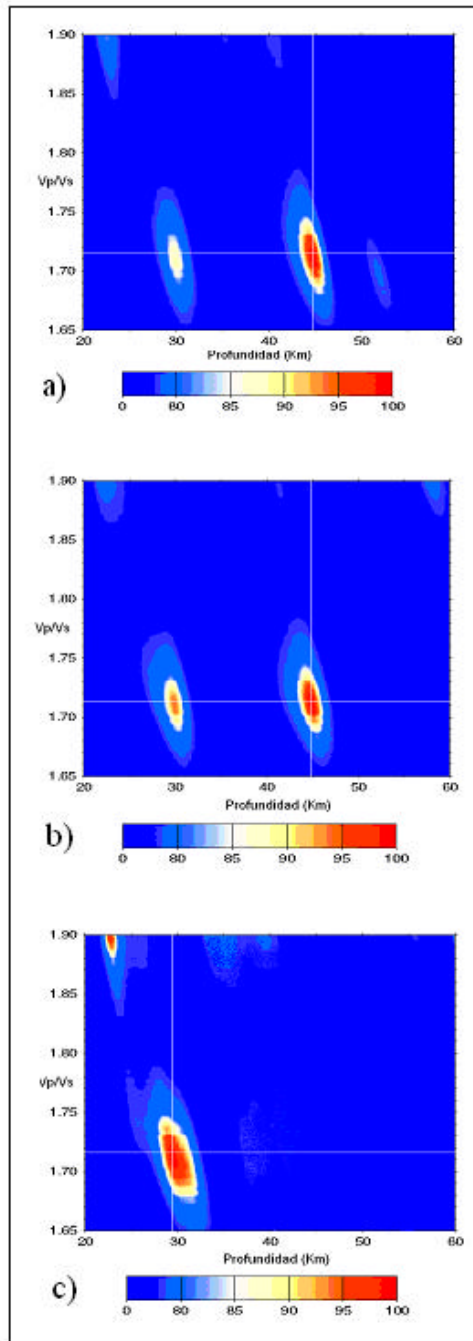


Figura 5.7. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación BIRV, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.

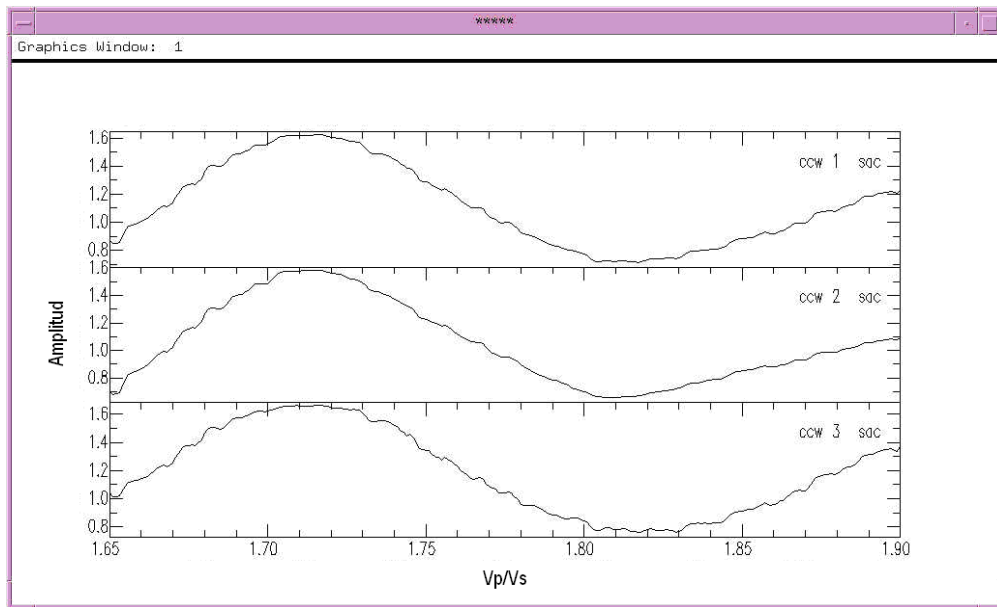


Figura 5.8. Cross-correlación entre los tres modos (Estación BIRV)

En esta estación la respuesta de la gráfica de cross-correlación de los tres modos presentan una gran correlación (figura 5.8); sin embargo al comparar las gráficas de profundidad en función de la relación V_p/V_s se aprecia que la respuesta más acorde según las condiciones geotectónicas de la zona es la que indica 45 km de profundidad y relación $V_p/V_s = 1,715$ (figura 5.7b), siendo esta respuesta la que involucra mayor aporte de las fases Ps y PpSs. Se determinó un $\sigma = 0,24$, indicativo de rocas félsicas (Zandt y Ammon, 1995).

Estación CAIV

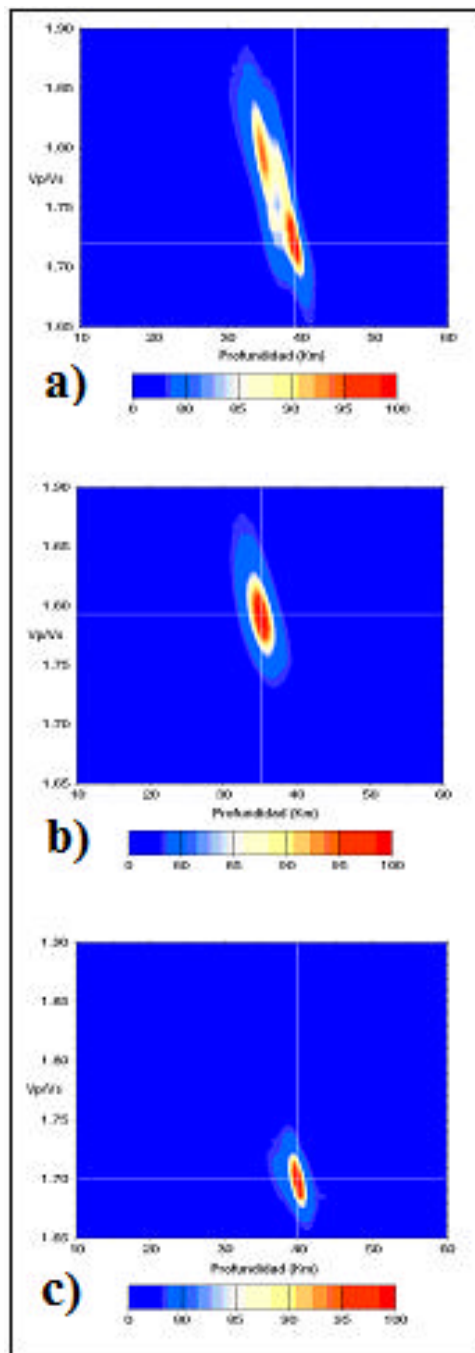


Figura 5.9. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación CAIV, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs y c) Ps y PpPs.

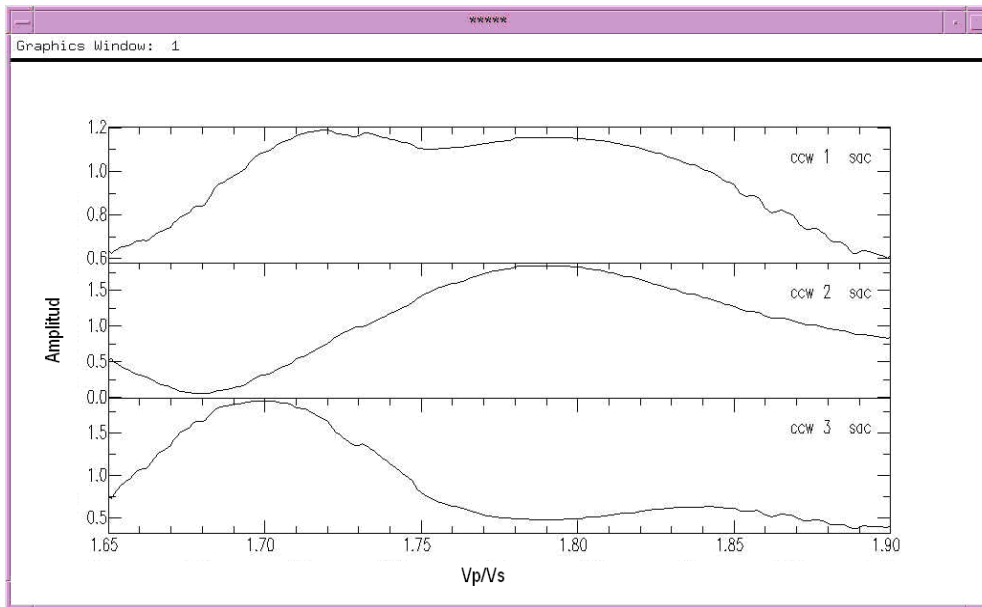


Figura 5.10. Cross-correlación entre los tres modos (Estación CAIV)

Para esta estación se utilizó el tercer modo de las curvas de cross-correlación que refleja las fases Ps y PpPs, obteniéndose para este caso un valor de relación V_p/V_s de 1,7 (figura 5.10); observando ahora la figura 5.9c se encuentra un valor de profundidad asociadas a las fases ya mencionadas de 40 km. Para esta estación se obtuvo un valor de relación de Poisson de 0,24 asociado a rocas de composición félsica (Zandt y Ammon, 1995).

Estación CAPC

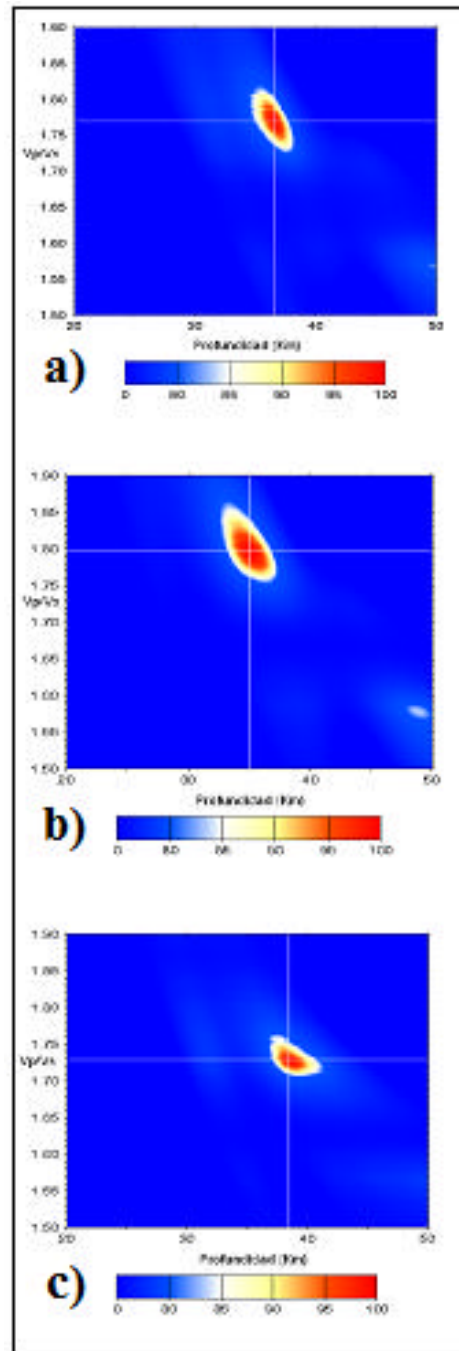


Figura 5.11. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación CAPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs y c) Ps y PpPs.

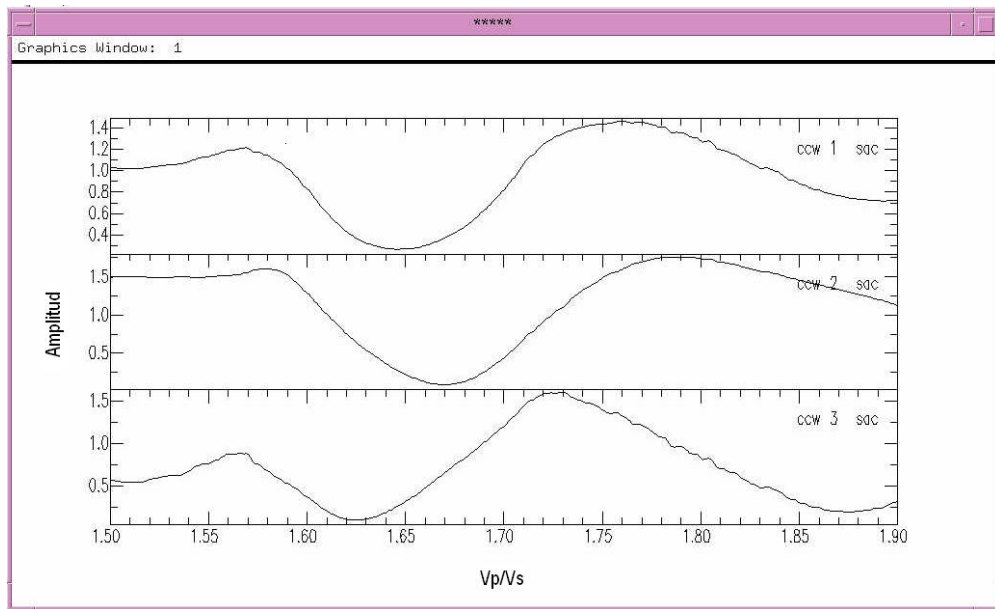


Figura 5.12. Cross-correlación entre los tres modos (Estación CAPC)

En el cálculo de profundidades y V_p/V_s , se observa que para la figura 5.12, hay una mayor correlación entre el primer y tercer modo, tomando por este motivo la cross-correlación entre las fases Ps y PpPs, y de esta manera obteniendo valores de relación V_p/V_s de 1,73 y de profundidad de 39 km (figura 5.11c). Para la estación se calculó una relación de Poisson de 0,25, valor asociado a rocas de composición félsica (Zandt y Ammon, 1995).

Estación CMPC

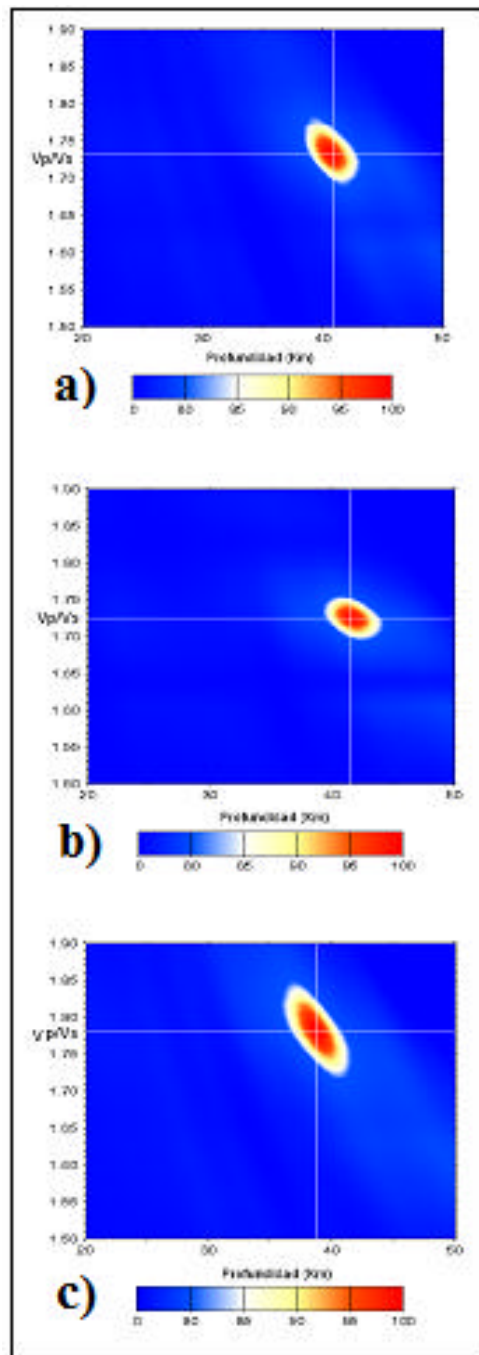


Figura 5.13. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación CMPC, usando las fases: a) Ps, PpSs y PpPs, b) Ps y PpSs y c) Ps y PpPs.

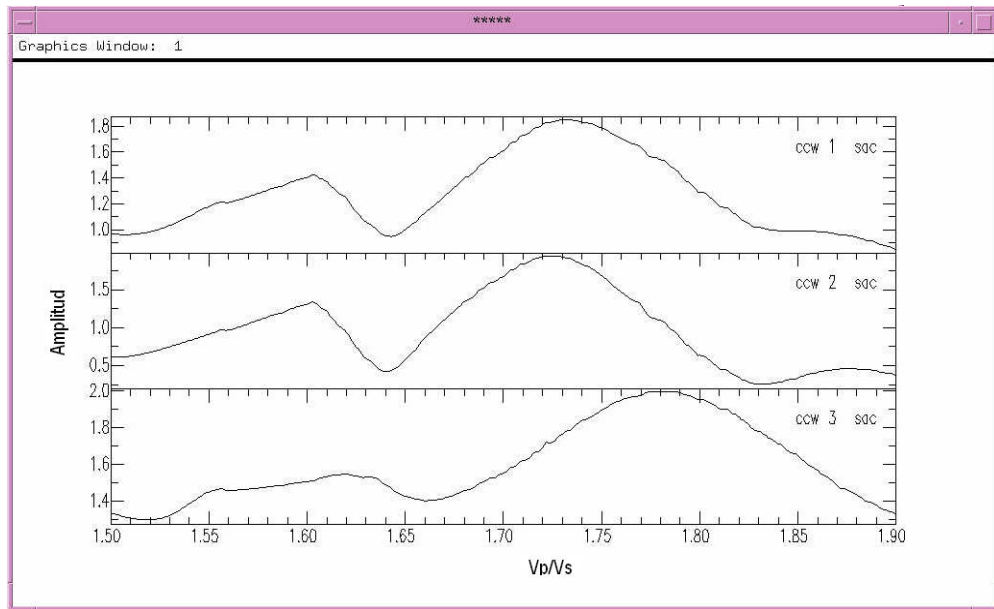


Figura 5.14. Cross-correlación entre los tres modos (Estación CMPC)

En cuanto a la gráfica de cross-correlación se obtuvo una mejor respuesta utilizando los dos primeros modos, tomando así el modo que contiene las fases Ps y PpSs como se puede apreciar en la figura 5.14 que produce valores de relación V_p/V_s de 1,73 y valores asociados de profundidad de 42 km (figura 5.13b). En la estación se obtuvo un valor de relación de Poisson de 0,25, el mismo asociado a rocas de composición félsica (Zandt y Ammon, 1995).

Estación CRUV

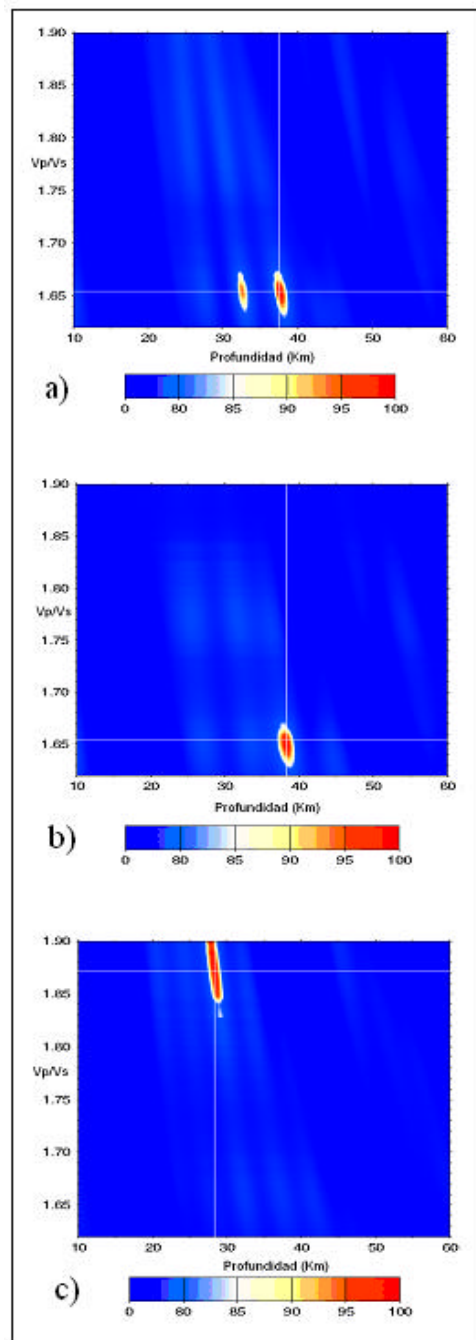


Figura 5.15. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación CRUV, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.

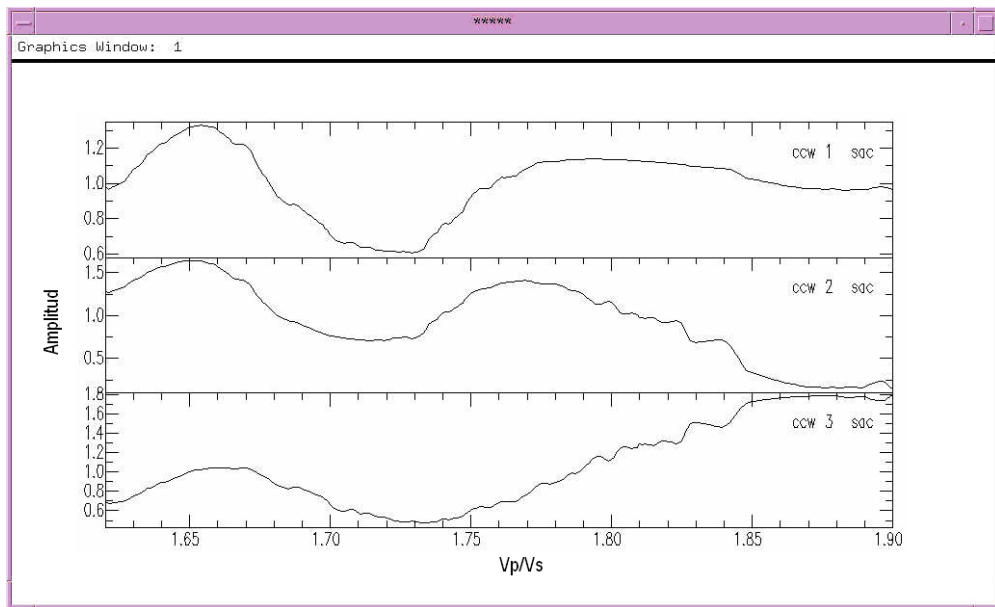


Figura 5.16. Cross-correlación entre los tres modos (Estación CRUV).

A partir de la gráfica de cross-correlación 5.16 se observa la gran similitud entre los dos primeros modos de onda, tomando así la respuesta del segundo modo que comprende las fases Ps y PpSs, el cual refleja un valor de profundidad de 38,5 km y una relación Vp/Vs de 1,655 (figura 5.15b). En cuanto a la relación de Poisson hallada la misma es de 0,22, siendo representativa de rocas de composición félsica.

Estación CUPC

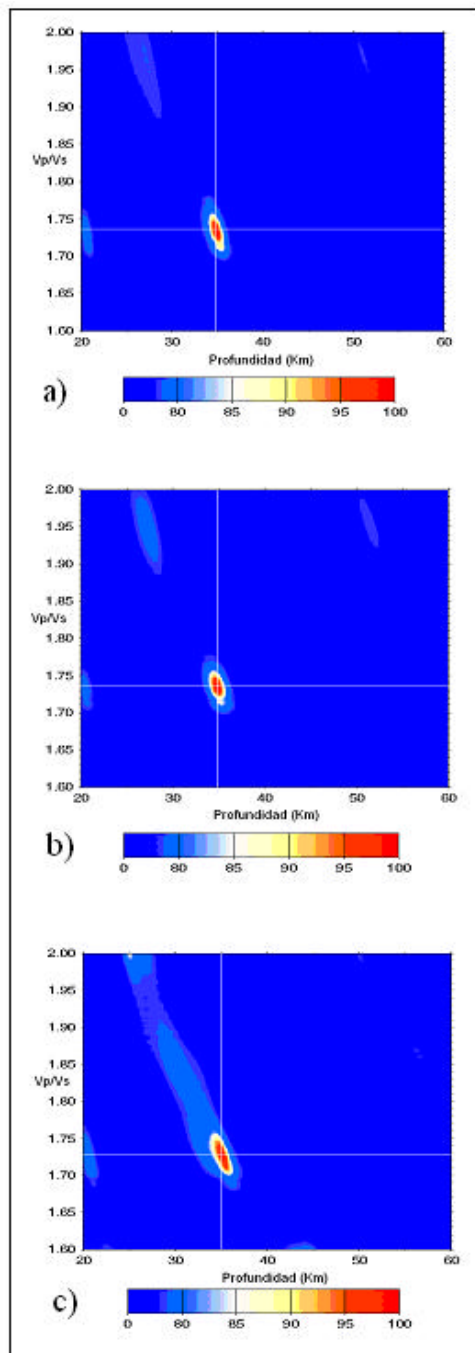


Figura 5.17. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación CUPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.

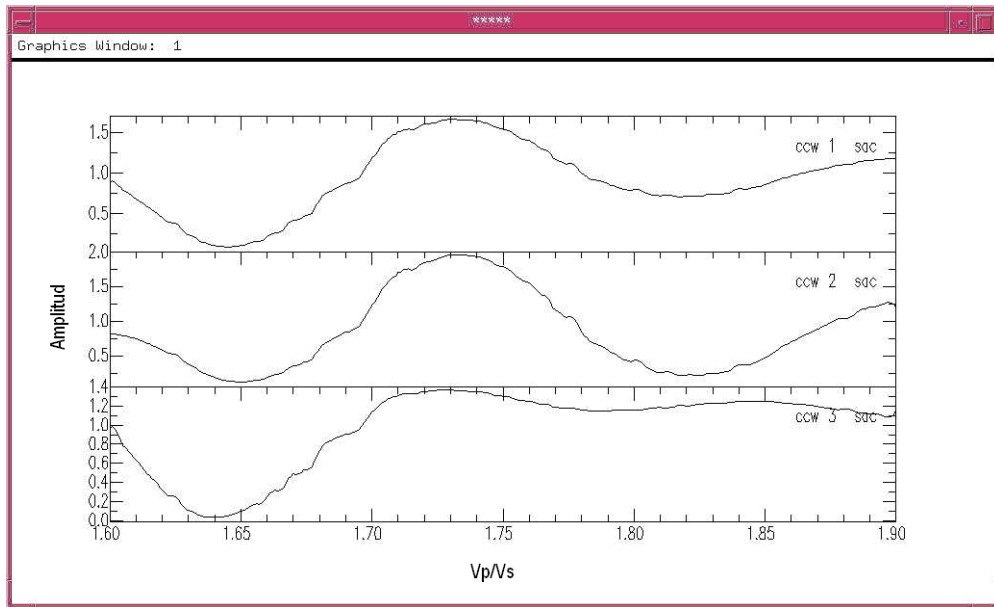


Figura 5.18. Cross-correlación entre los tres modos (Estación CUPC)

De acuerdo a la gráfica de cross-correlación de los 3 modos de onda, la que presentan mejor correlación es el modo correspondiente a las fases Ps y PpSs, cuyos comportamientos se reflejan en el primer y segundo modo (figura 5.18), de ahí que los valores numéricos correspondientes a la profundidad y V_p/V_s del punto bajo esta estación hayan sido tomados de la figura 5.17b, siendo específicamente 35 km y $V_p/V_s = 1,74$. Para la estación se obtuvo un valor de relación de Poisson de 0,25, asociado a rocas de composición félsica (Zandt y Ammon, 1995).

Estación CUPV

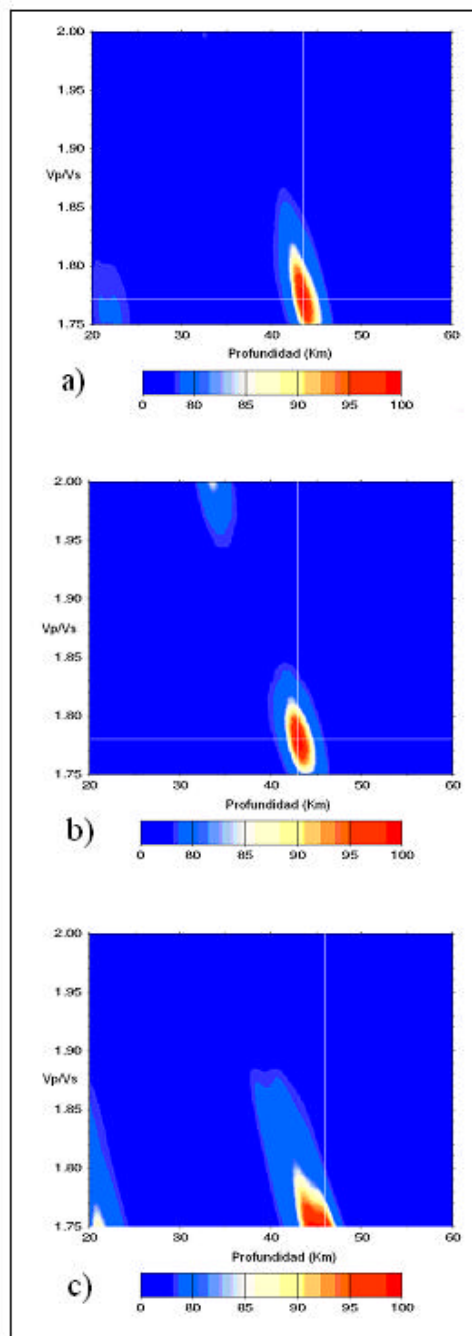


Figura 5.19. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación CUPV, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.

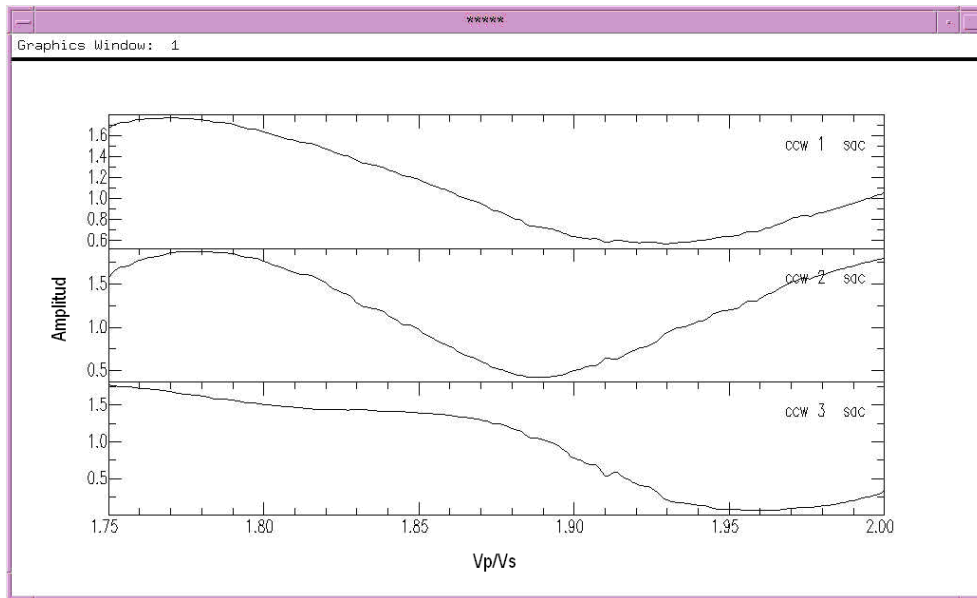


Figura 5.20. Cross-correlación entre los tres modos (Estación CUPV)

La figura 5.19b indica para esta estación una profundidad de 43 km, así como una relación V_p/V_s de 1,77, las cuales fueron obtenidas según el segundo modo de la gráfica de cross-correlación perteneciente a las fases Ps y PpSs (figura 5.20). Se calculó un valor de Poisson de 0,26, característico de rocas de composición intermedia (Zandt y Ammon, 1995).

Estación EDPC

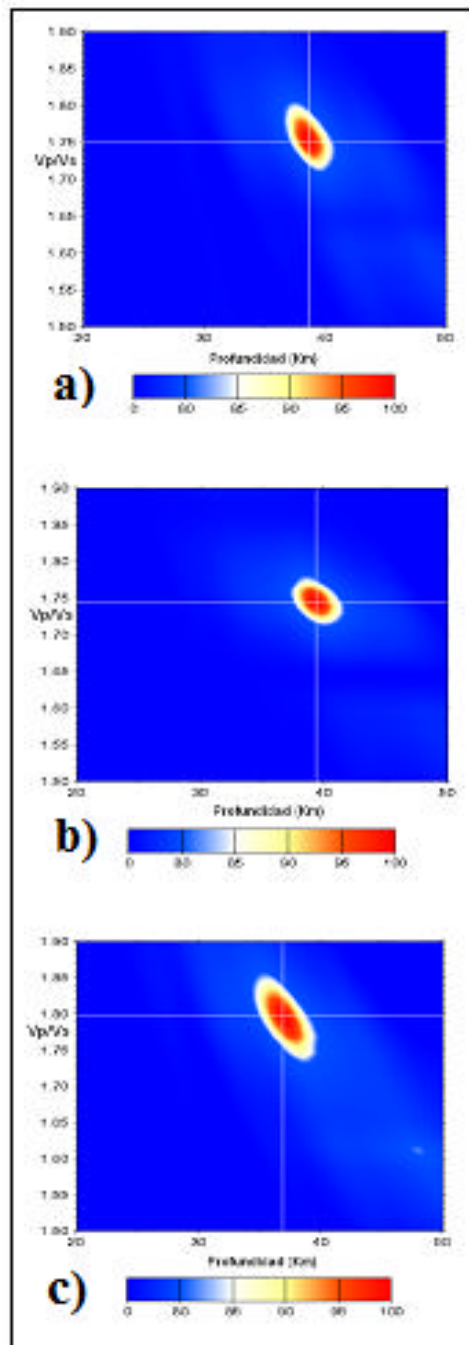


Figura 5.21. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación EDPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs y c) Ps y PpPs.

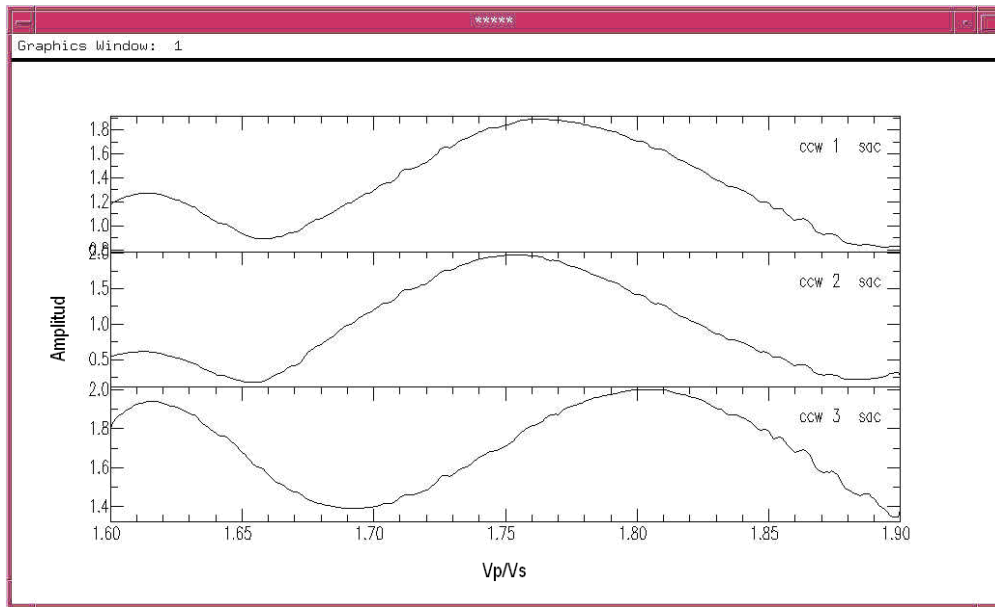


Figura 5.22. Cross-correlación entre los tres modos (Estación EDPC)

En relación a la gráfica de cross-correlación, se observa una buena correlación entre los dos primeros modos, tomando de esta forma la respuesta correspondiente a las fases Ps y PpSs (figura 5.22) que da valores de relación V_p/V_s de 1,745 y profundidad de 39,5 km (5.21b). Para esta estación se obtuvo un valor de relación de Poisson de 0,26, asociado el mismo a rocas de composición félsica (Zandt y Ammon, 1995).

Estación FCPC

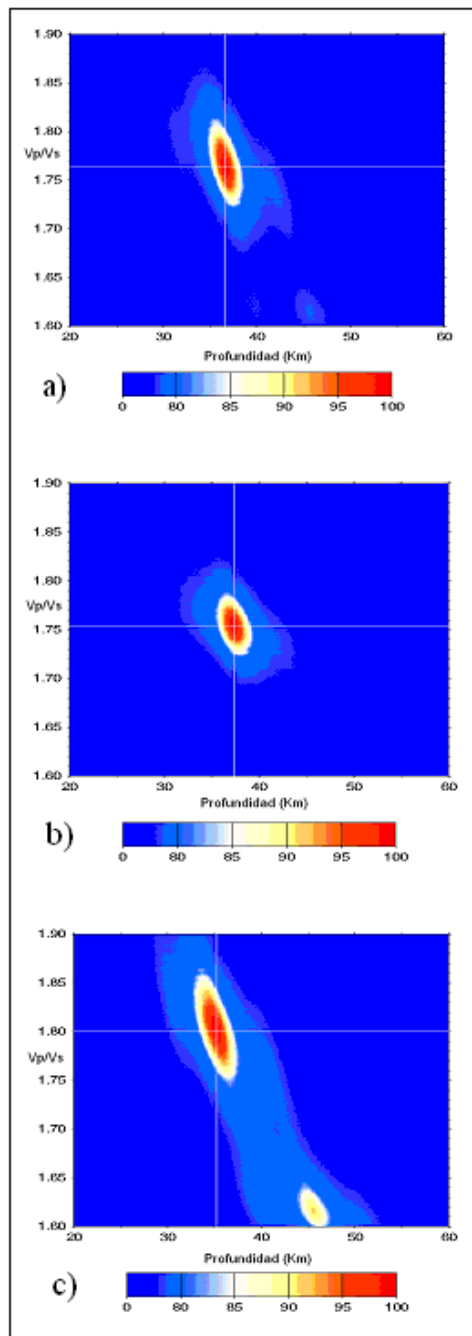


Figura 5.23. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación FCPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.

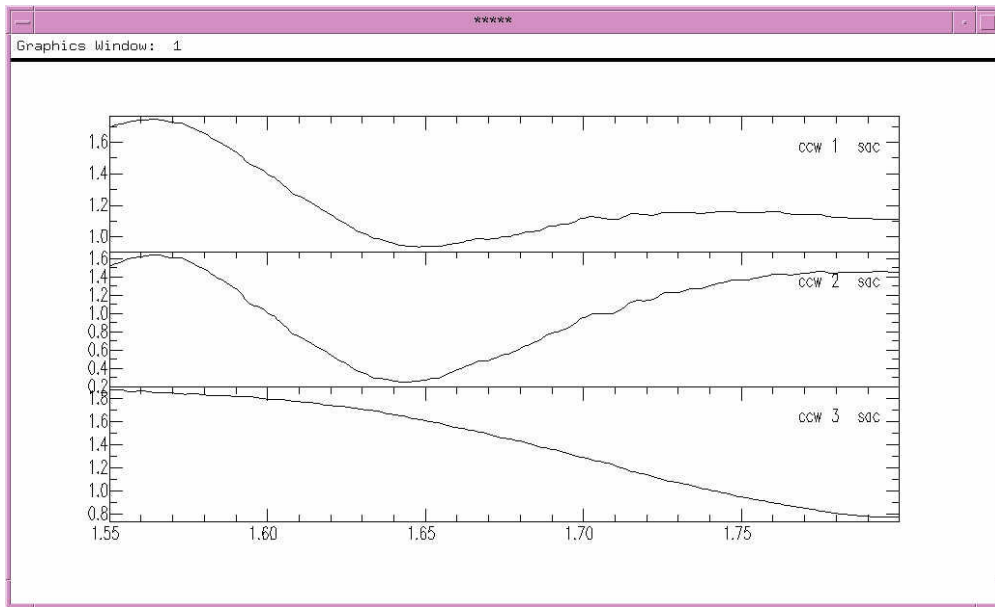


Figura 5.24. Cross-correlación entre los tres modos (Estación FCPC)

La respuesta de la gráfica de cross-correlación de esta estación refleja gran similitud entre el primer y segundo modo (figura 5.24) demostrando buena correlación entre las fases Ps y PpSs, de manera tal que la profundidad asociada a este punto será la mostrada en la figura 5.23b, que es de 37 km, también con una relación $V_p/V_s = 1,75$. Para dicha estación se obtuvo un valor de relación de Poisson de 0,26, asociado a rocas de composición félsica (Zandt y Ammon, 1995).

Estación GURV

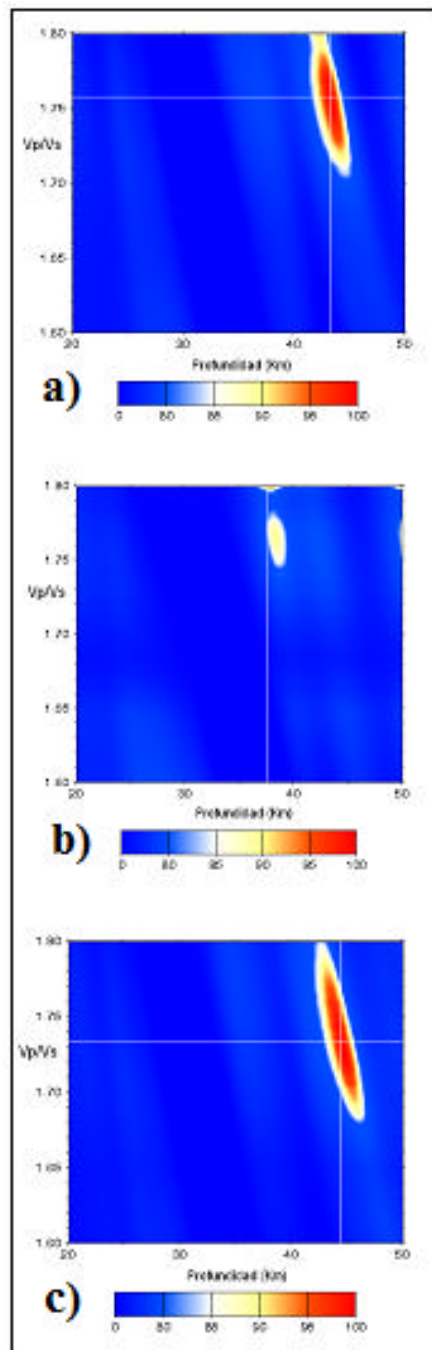


Figura 5.25. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación GURV, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs y c) Ps y PpPs.

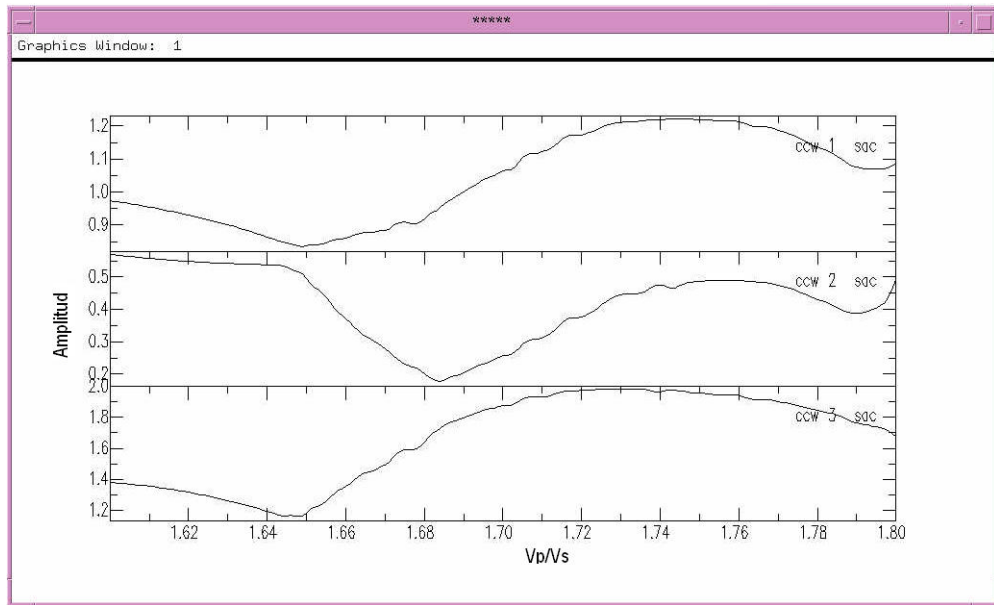


Figura 5.26. Cross-correlación entre los tres modos (Estación GURV)

En las gráficas correspondientes a la relación V_p/V_s con la profundidad se observa que los valores son de 1,735 y 44.5 km respectivamente (figura 5.25c) asociados a las fases Ps y PpPs, estando los mismos asociados a la mejor respuesta de correlación entre los tres modos en el gráfico de cross correlación (figura 5.26). Para la estación se calculó un valor de relación de Poisson de 0,25, asociado a rocas de composición félsica (Zandt y Ammon, 1995).

Estación IBAV

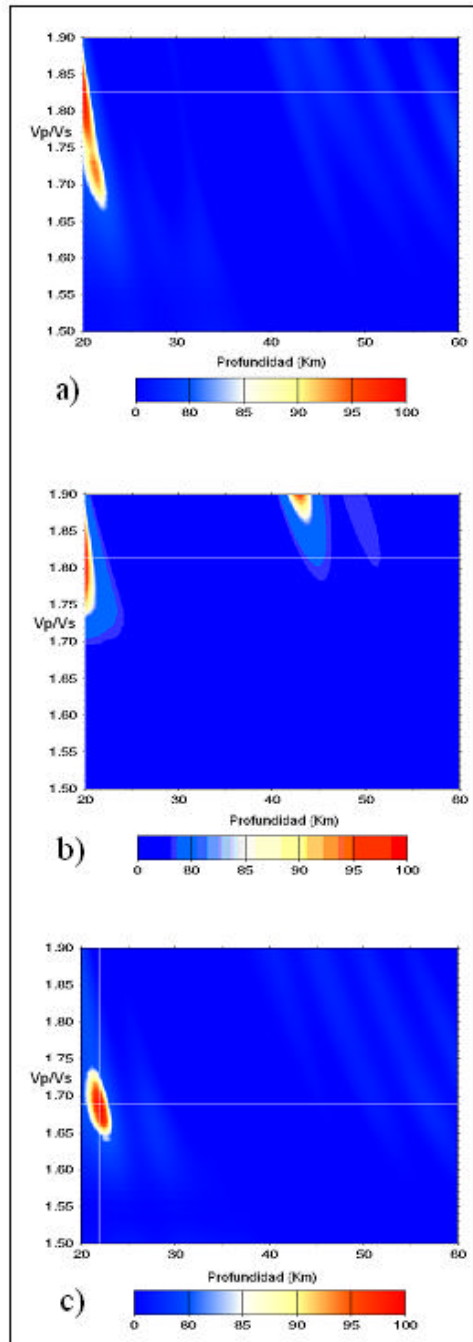


Figura 5.27. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación IBAV, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.

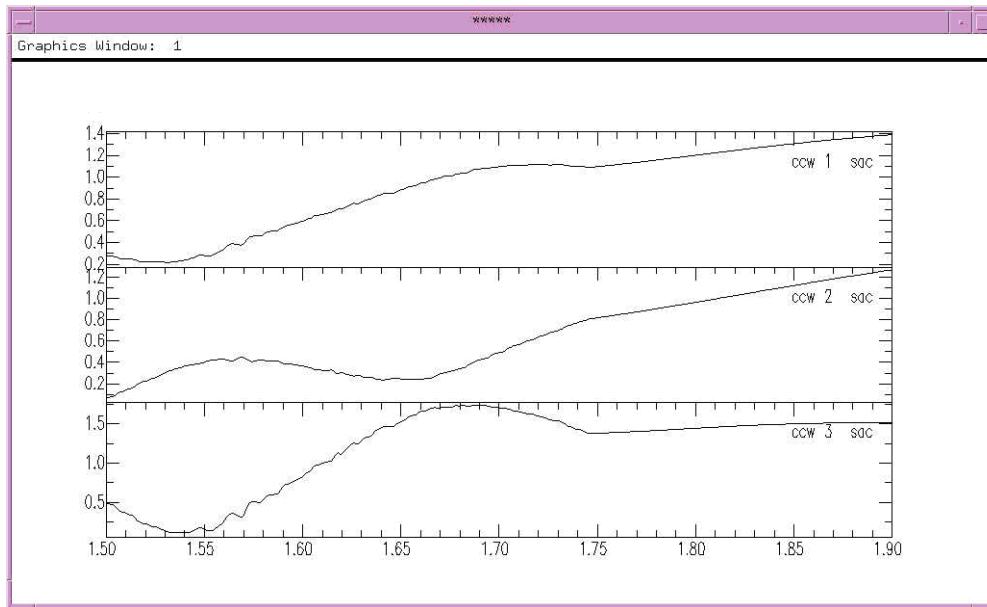


Figura 5.28. Cross-correlación entre los tres modos (Estación IBAV)

La profundidad de Moho bajo esta estación alcanza un valor de 22 km y un $V_p/V_s = 1,69$ (figura 5.27c), de acuerdo a la correlación entre el primer y tercer modo que se observa en la gráfica de cross-correlación asociada (figura 5.28). El valor de Poisson calculado a partir de la relación V_p/V_s en este caso fue de 0,26, lo cual indica según Zandt y Ammon (1995) presencia de rocas de composición intermedia.

Estación ITEV

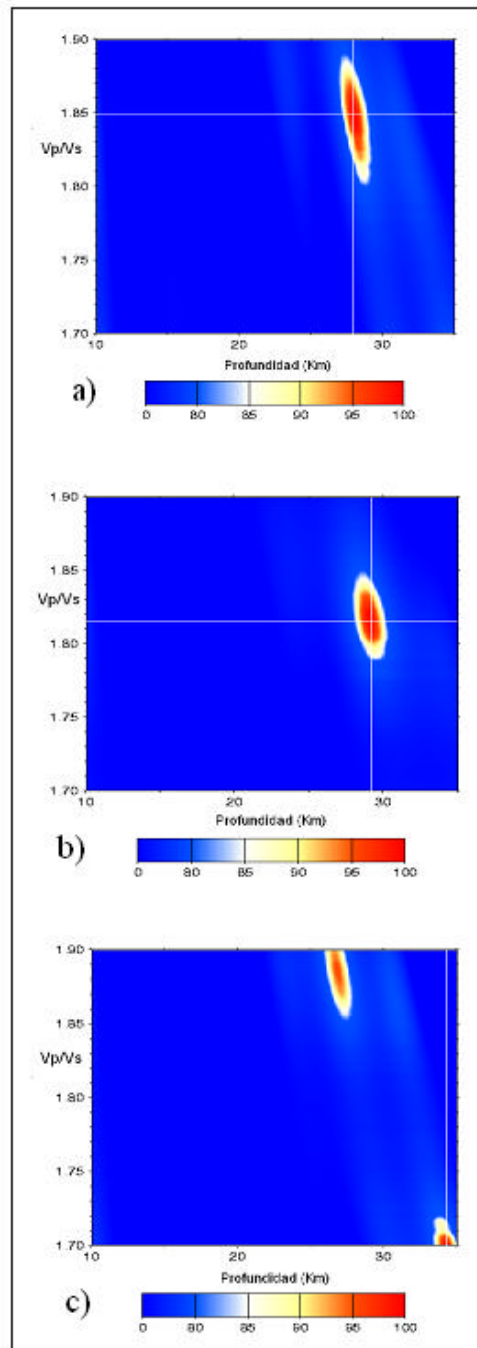


Figura 5.29. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación IBAV, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.

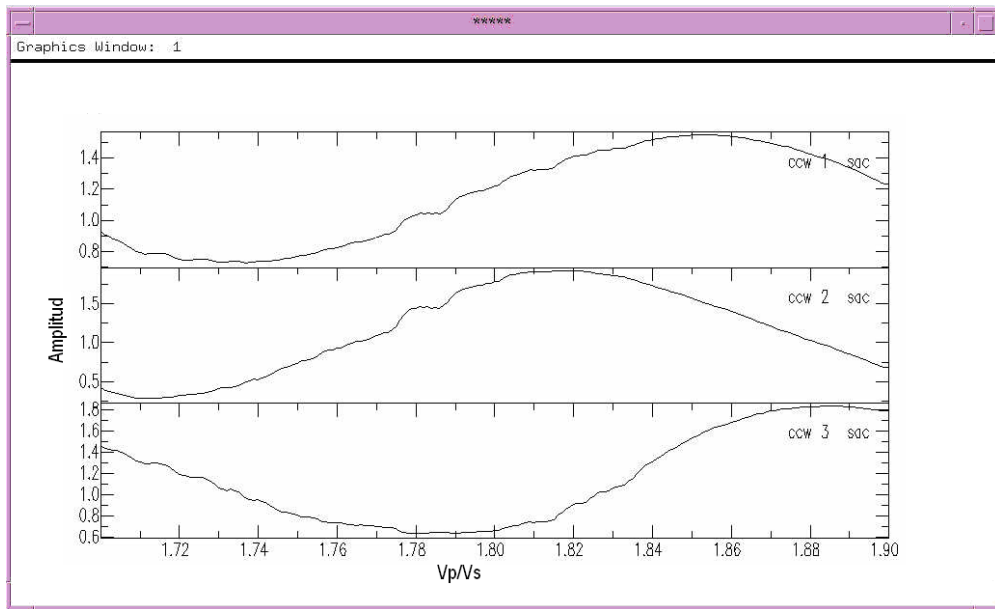


Figura 5.30. Cross-correlación entre los tres modos (Estación ITEV)

De la gráfica de cross-correlación (figura 5.30) se deduce que las fases más correlacionadas son la Ps con la PpSs, según la similitud de tendencia que muestran el primer y segundo modo, por lo tanto la profundidad de la discontinuidad de Moho bajo esta estación es de 29 km, con una relación $V_p/V_s = 1,815$ como se observa en la figura 5.29b. La relación de Poisson calculada fue de 0,28, valor que se relaciona con rocas de composición máfica (Zandt y Ammon, 1995).

Estación JMPC

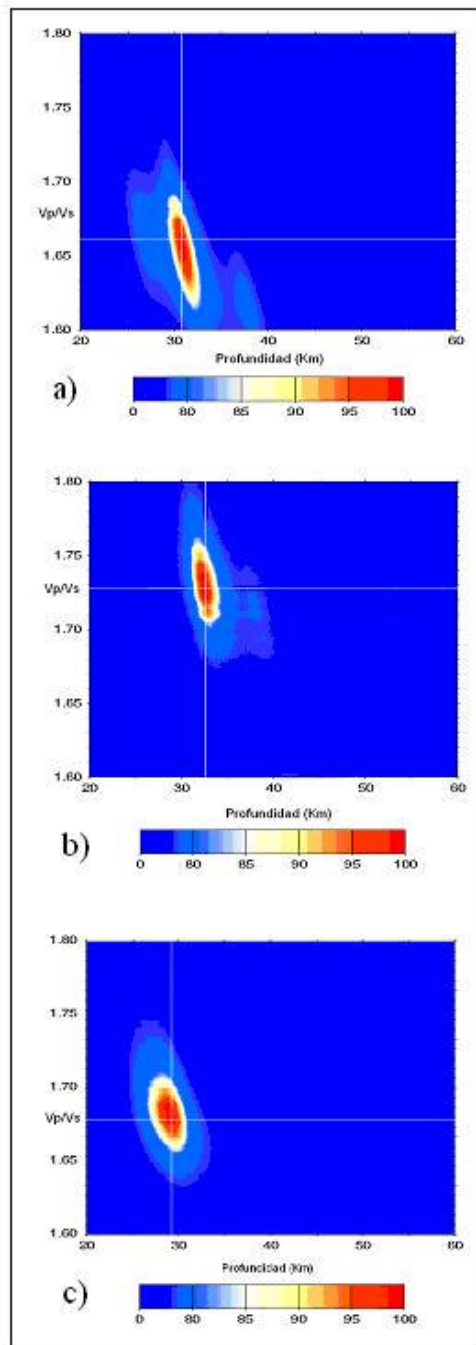


Figura 5.31. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación JMPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.

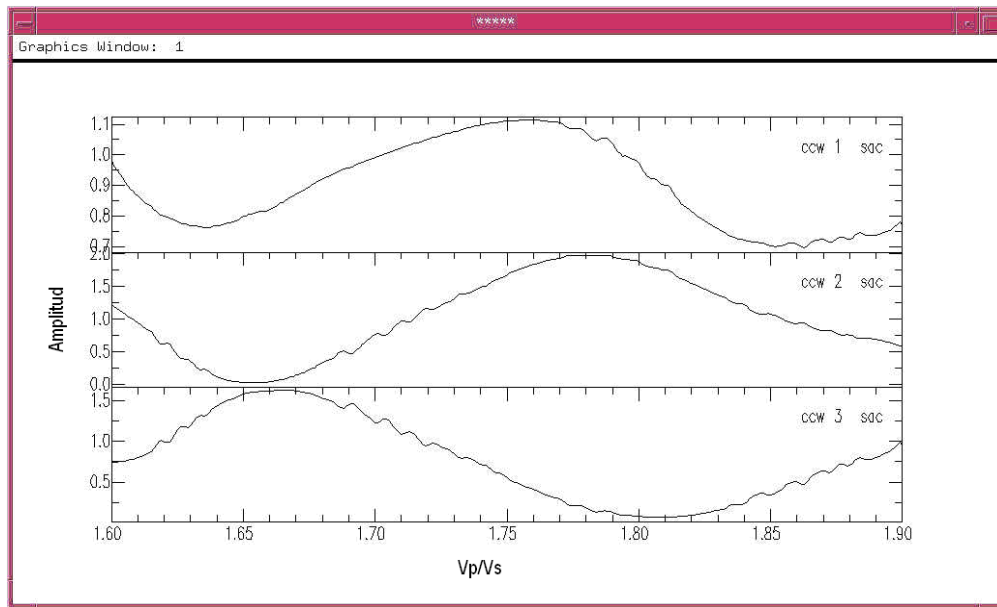


Figura 5.32. Cross-correlación entre los tres modos (Estación JMPC)

Presenta una profundidad de 32,5 km con una relación V_p/V_s de 1,73 (figura 5.31b) asociada a las fases Ps y PpPs. Estos valores fueron tomados a partir de la observación de la gráfica de cross-correlación (figura 5.32) de la cual se deduce que los modos con mayor correlación son el primero y el segundo. Para la estación se calculó un valor de relación de Poisson de 0,25, asociado a rocas de composición félsica (Zandt y Ammon, 1995).

Estación LAPC

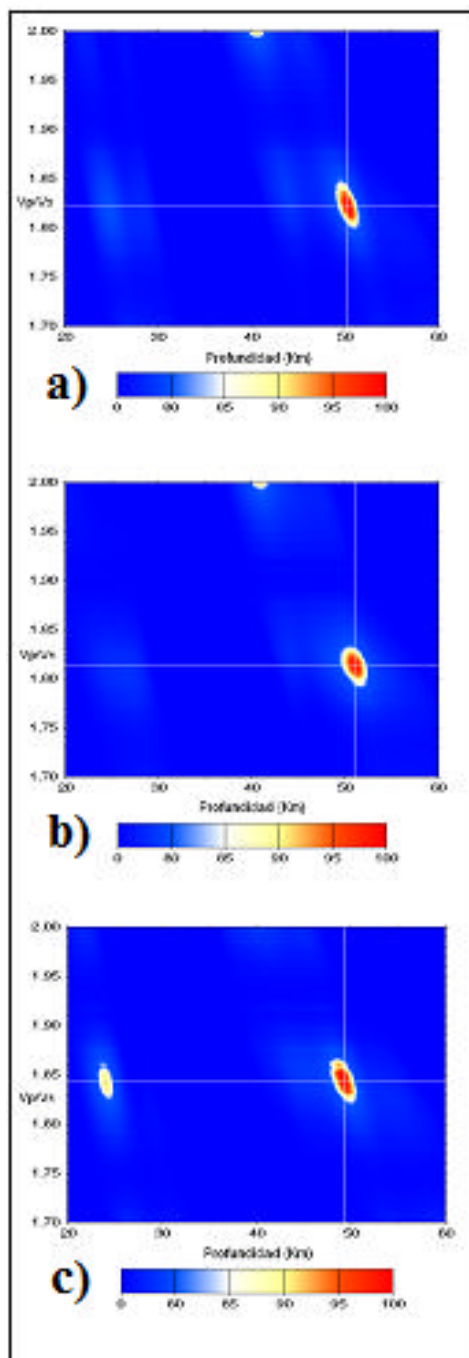


Figura 5.33. . Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación LAPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.

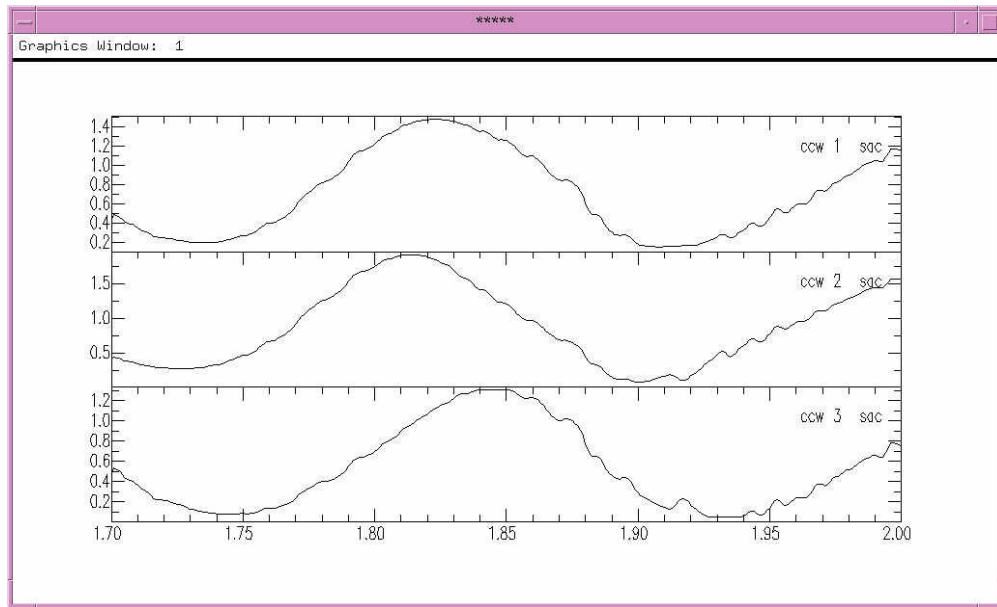


Figura 5.34. Cross-correlación entre los tres modos (Estación LAPC)

Se observa una gran similitud en el comportamiento presentado por las 3 fases de onda (figura 5.34), pero una mayor correlación se puede apreciar entre las fases Ps y PpSs, de allí que los valores de profundidad y relación V_p/V_s asumidos para esta estación sean los mostrados por la figura 5.33b, iguales a 51 km y 1,81 respectivamente. Para esta estación se obtuvo una relación de Poisson de 0,28 asociada a rocas de composición máfica (Zandt y Ammon, 1995).

Estación LMPC

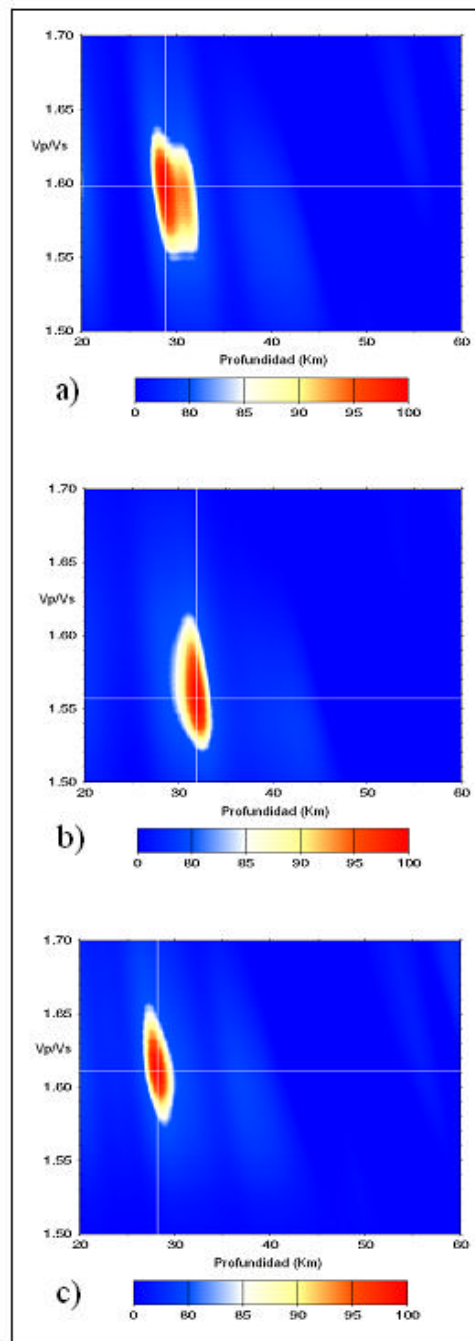


Figura 5.35. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación LMPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.

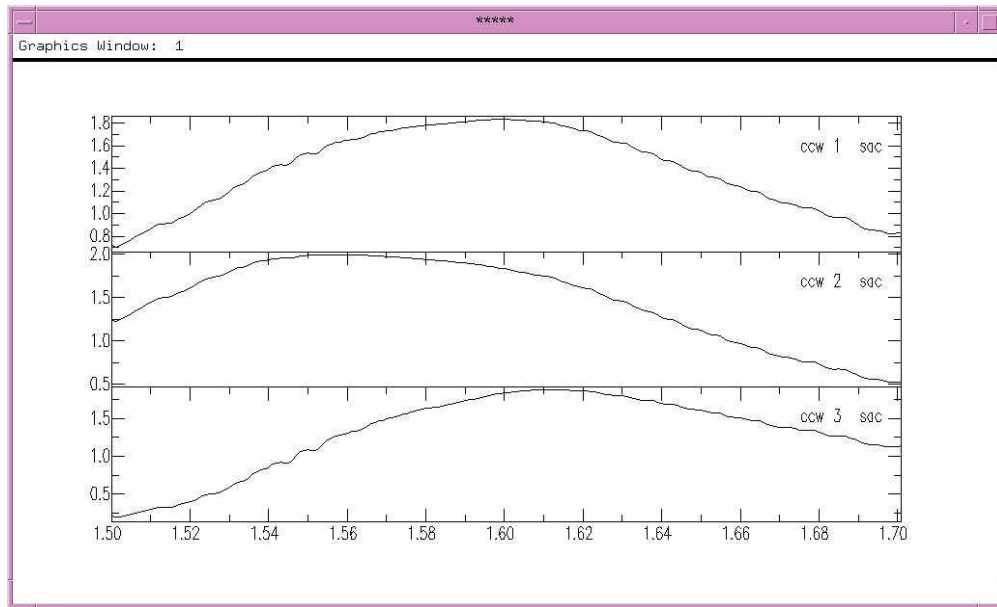


Figura 5.36. Cross-correlación entre los tres modos (Estación LMPC)

La figura 5.36 muestra que las fases Ps y PpPs son las que tiene mayor correlación, como se puede corroborar en la similitud de tendencia entre el primer y tercer modo. Siendo así, la gráfica de Vp/Vs en función de la profundidad que muestra la respuesta indicada es la figura 5.35c, reflejando que la discontinuidad de Moho se halla a 29 km, con un Vp/Vs de 1,61 para esta estación. A partir de este último valor, se calculó una relación de Poisson de $\sigma = 0,24$ indicativa de rocas de composición félsica (Zandt y Ammon, 1995).

Estación MAPC

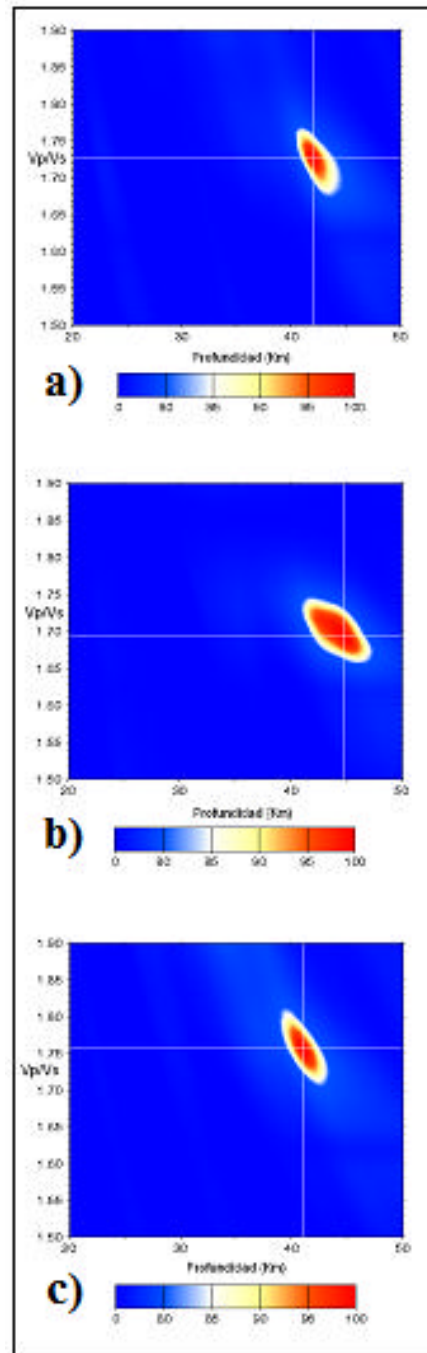


Figura 5.37. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación MAPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs y b) Ps y PpSs y c) Ps y PpPs.

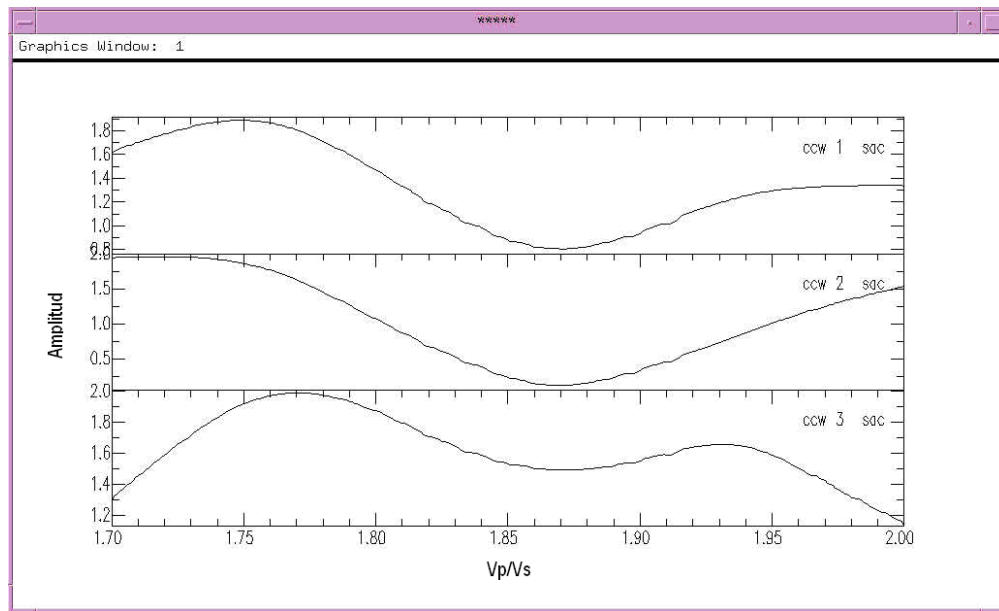


Figura 5.38. Cross-correlación entre los tres modos (Estación MAPC)

Para esta estación el valor de profundidad tomado de las gráficas de V_p/V_s en función de la profundidad es el observado en la figura 5.37b que es de 45 km y 1,695 de relación V_p/V_s , lo cual es congruente con lo que refleja la figura 5.38 donde la mayor correlación la presentan los dos primeros modos. En esta estación se obtuvo una relación de Poisson de 0,24, asociada a rocas de composición félsica (Zandt y Ammon, 1995).

Estación MERV

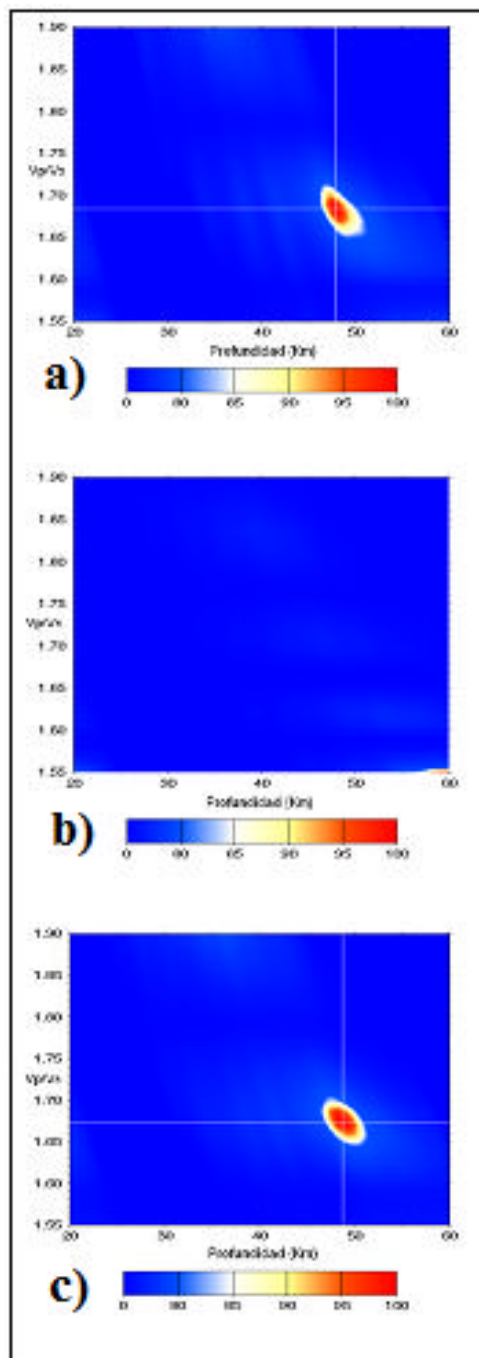


Figura 5.39. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación MERV, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs y c) Ps y PpPs.

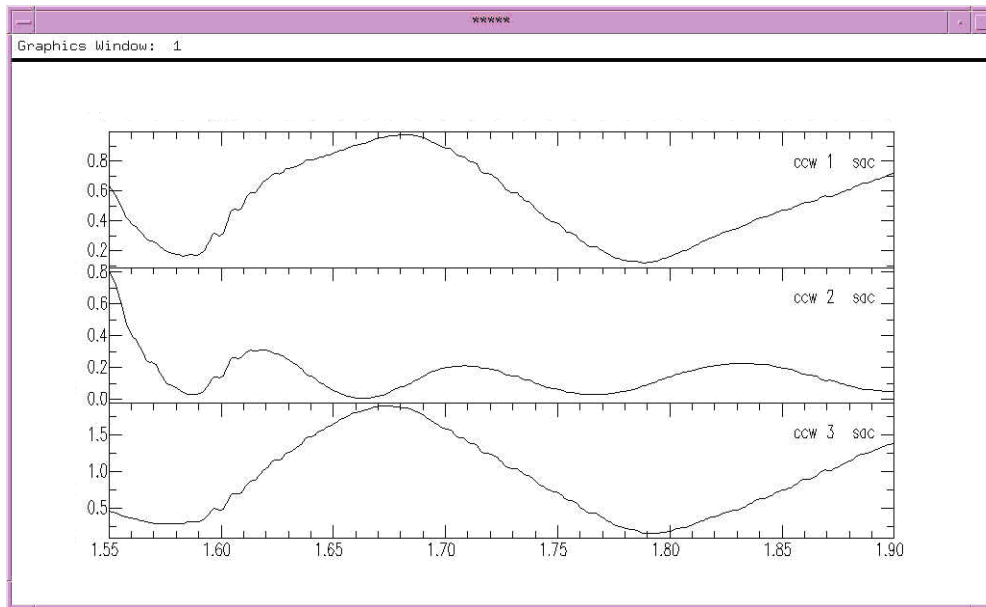


Figura 5.40. Cross-correlación entre los tres modos (Estación MERV)

La figura 5.39c muestra los resultados para esta estación, de donde se puede observar una profundidad de 49 km y una relación $V_p/V_s = 1,67$. Estos valores fueron asumidos a partir de la correlación existente entre las fases Ps y PpPs (figura 5.40). Para esta estación se obtuvo un valor de relación de Poisson de 0,22, asociado a rocas de composición félsica (Zandt y Ammon, 1995).

Estación MIPC

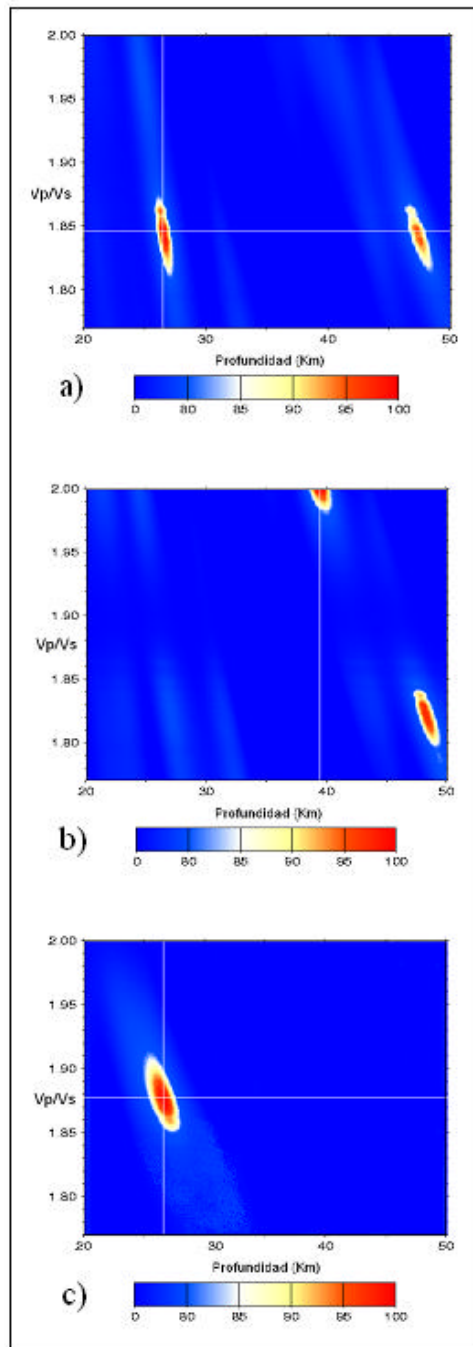


Figura 5.41. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación MIPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.

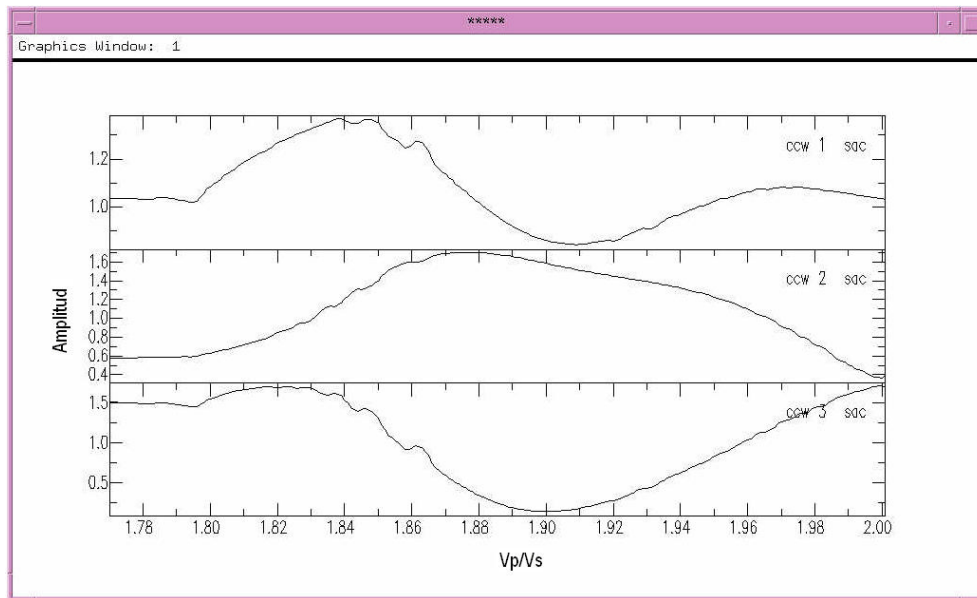


Figura 5.42. Cross-correlación entre los tres modos (Estación MIPC)

De acuerdo a los valores de la gráfica de V_p/V_s en función de la profundidad (figura 5.41), la profundidad de Moho para esta estación es de 27 km, con un $V_p/V_s = 1,84$, usando en este caso el aporte de las fases P_s y P_pPs para la construcción de la misma (figura 5.42). La relación de Poisson asociada es de 0,29, asociado con rocas de composición máfica (Zandt y Ammon, 1995).

Estación MNPC

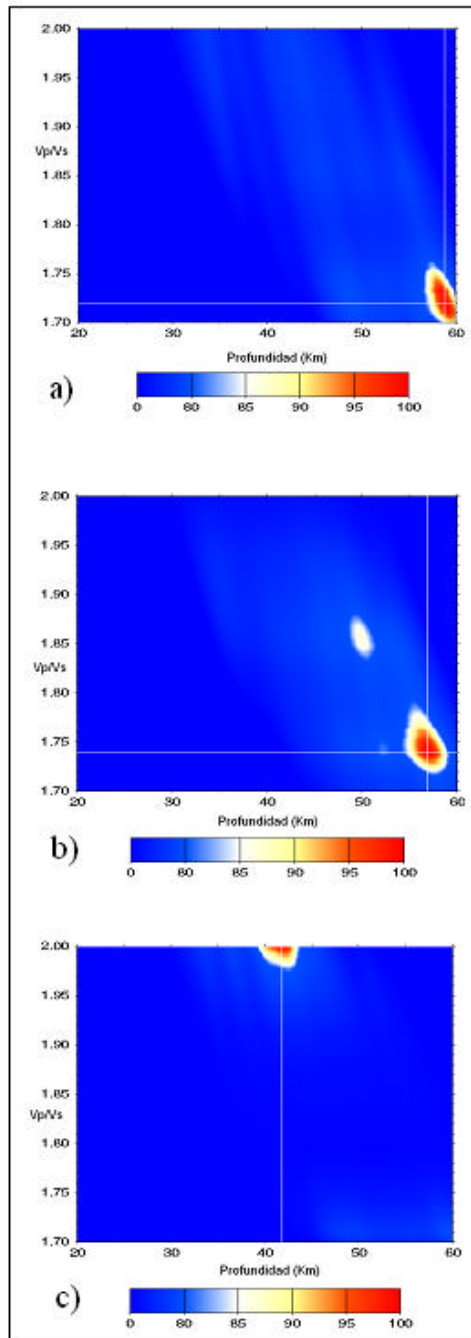


Figura 5.43. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación MNPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.

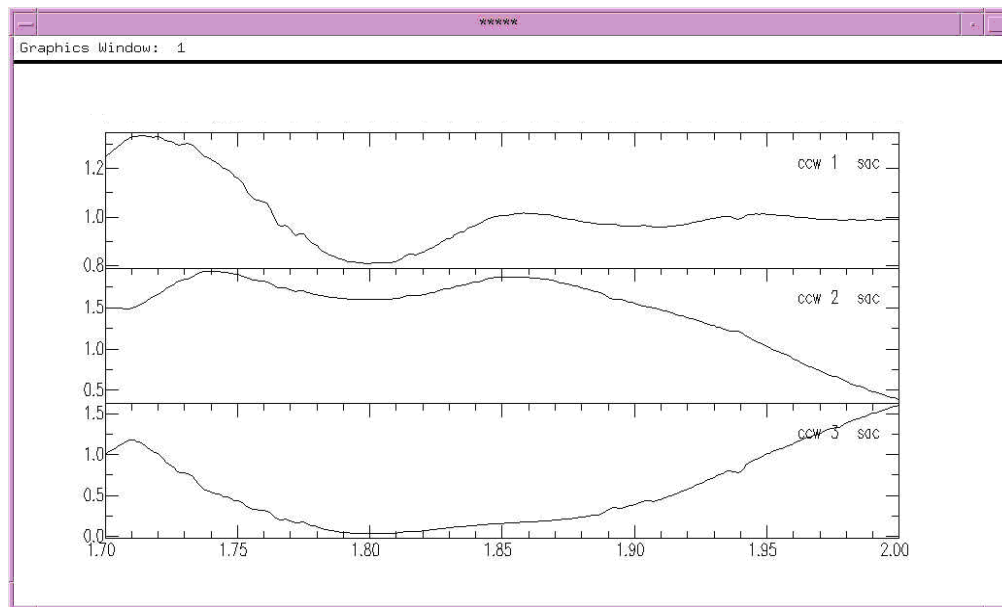


Figura 5.44. Cross-correlación entre los tres modos (Estación MNPC)

Se tomó como respuesta para esta estación la cross-correlación entre las fases Ps y PpSs (figura 5.44), la cual está vinculada a un valor de $V_p/V_s = 1,74$ sugiriendo una profundidad de 56 km (figura 5.43b) debajo de la estación. Para esta estación se obtuvo un valor de relación de Poisson de 0,25, también asociado a rocas de composición félsica (Zandt y Ammon, 1995).

D.3.3 Estación MOPC

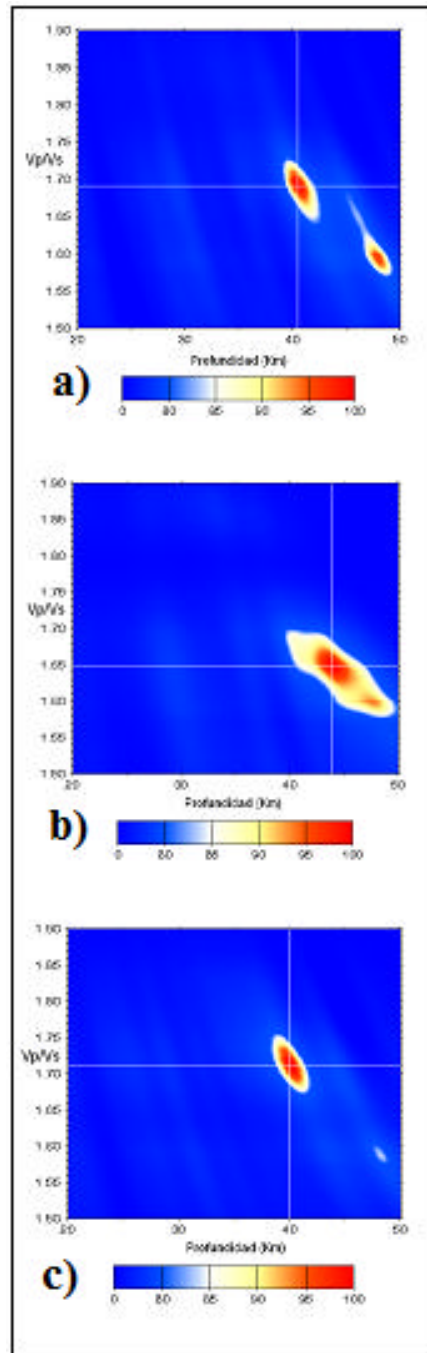


Figura 5.45. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación MOPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs y c) Ps y PpPs.

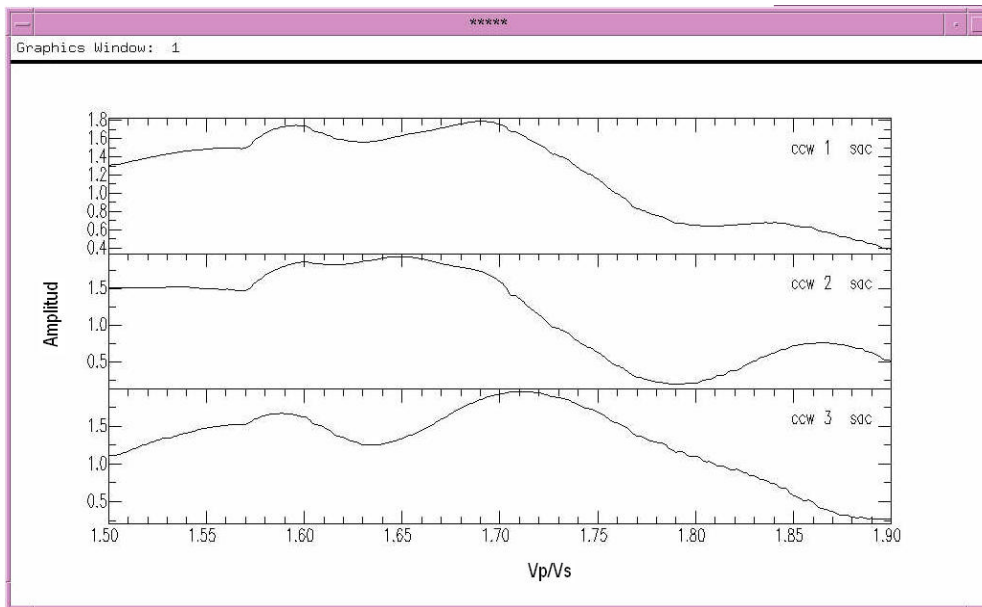


Figura 5.46. Cross-correlación entre los tres modos (Estación MOPC)

En cuanto al gráfico de cross-correlación se aprecia una mejor respuesta utilizando el tercer modos correspondiente a las fases Ps y PpPs (figura 5.46), donde el valor de la relación V_p/V_s es de 1,71 y la profundidad asociada es de 40 km observado en la gráfica de la profundidad con la relación V_p/V_s (figura 5.45c).

Para la estación se obtuvo un valor de relación de Poisson de 0,24, asociado a rocas de composición félsica (Zandt y Ammon, 1995).

Estación MUPC

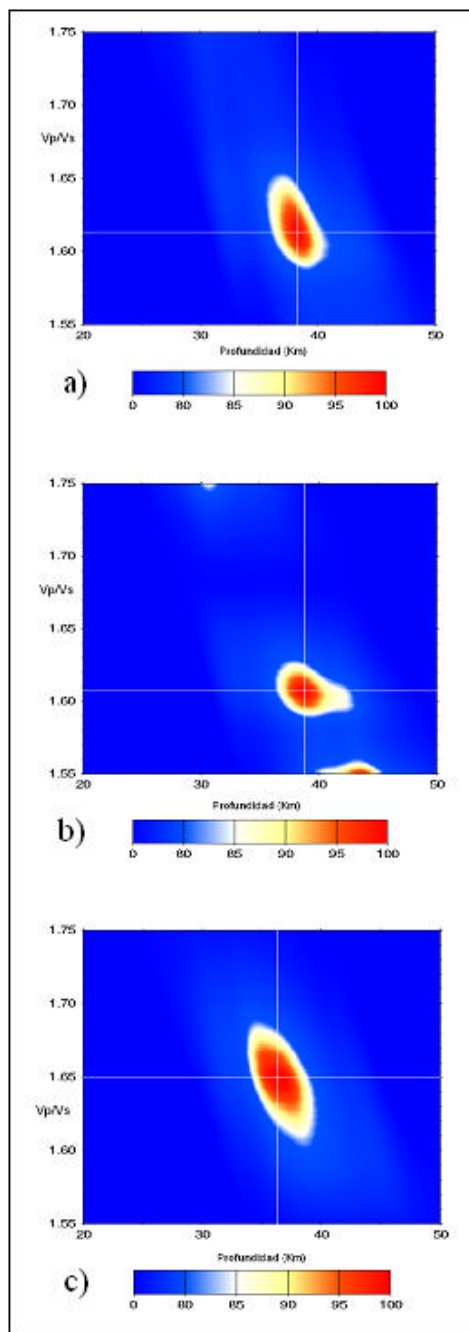


Figura 5.47. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación MUPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.

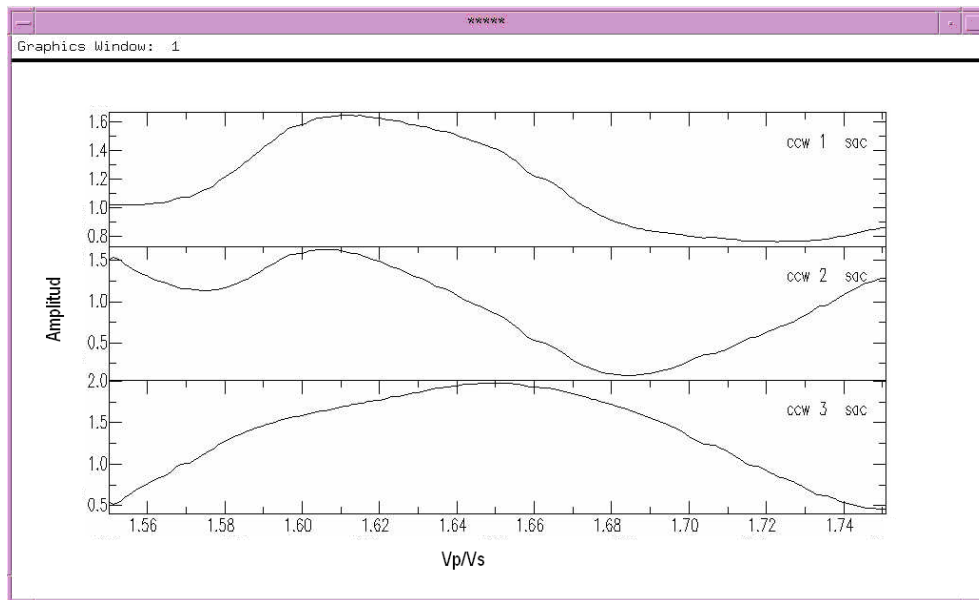


Figura 5.48. Cross-correlación entre los tres modos (Estación MUPC)

Se hallaron valores de profundidad de 39 km y la relación $V_p/V_s = 1,61$, tal como se observa en la figura 5.47b, los cuales están asociados al segundo modo en la gráfica de cross-correlación (Ps y PpSs), según se aprecia en la figura 5.47. Para la estación se calculó un valor de relación de Poisson de 0,21, asociado el mismo, a rocas de composición félsica (Zandt y Ammon, 1995).

Estación PAPC

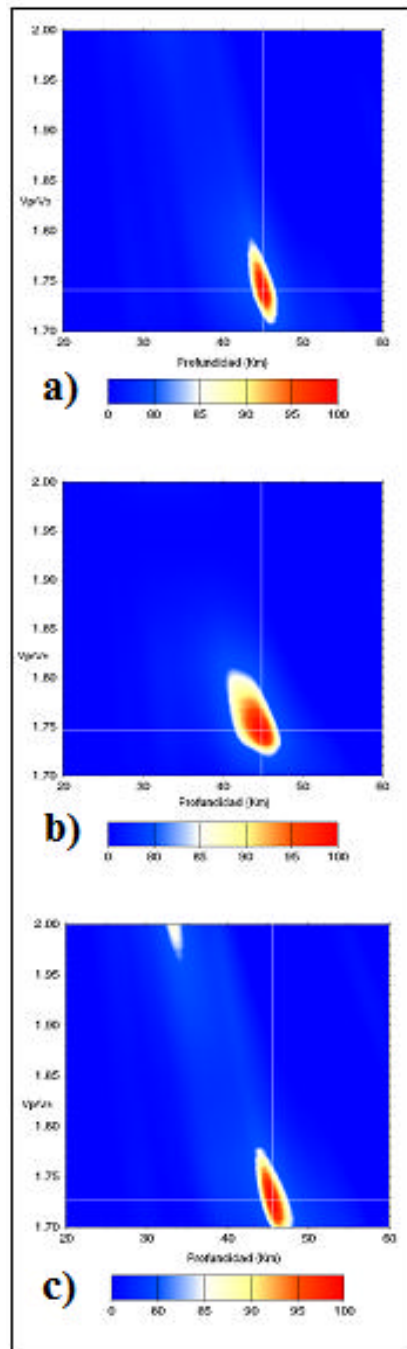


Figura 5.49. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación PAPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs y c) Ps y PpPs.

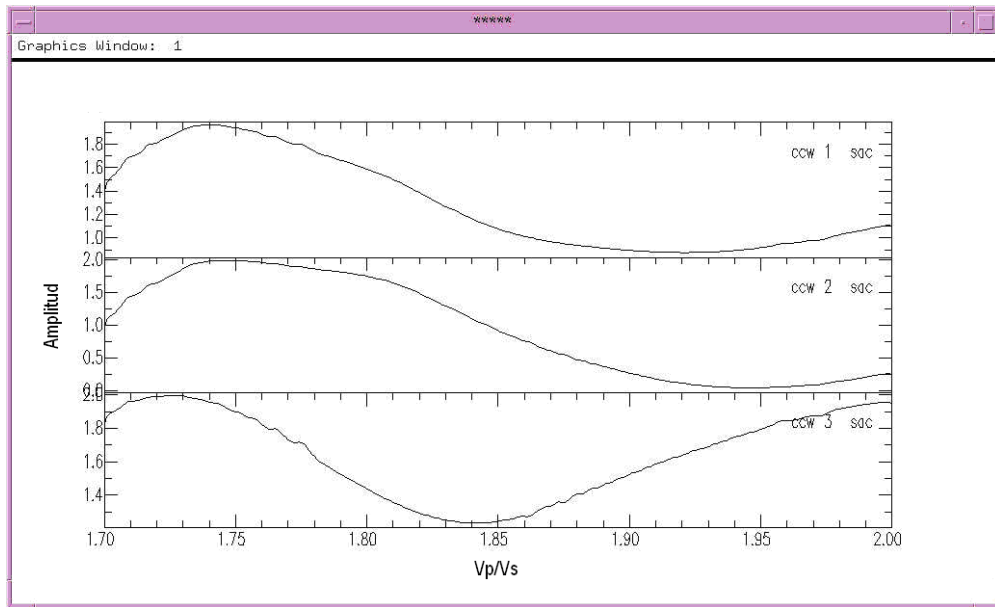


Figura 5.50. Cross-correlación entre los tres modos (Estación PAPC)

En cuanto a la gráfica de cross-correlación se obtuvo una mejor respuesta utilizando el segundo modo correspondiente a las fases Ps y PpSs como se puede apreciar en la figura 5.50, siendo los valores asociados de relación V_p/V_s de 1,745 y profundidad de 45 km (figura 5.49b). Para dicha estación se obtuvo un valor de relación de Poisson de 0,26, asociado a rocas de composición félsica (Zandt y Ammon, 1995).

Estación PCRV

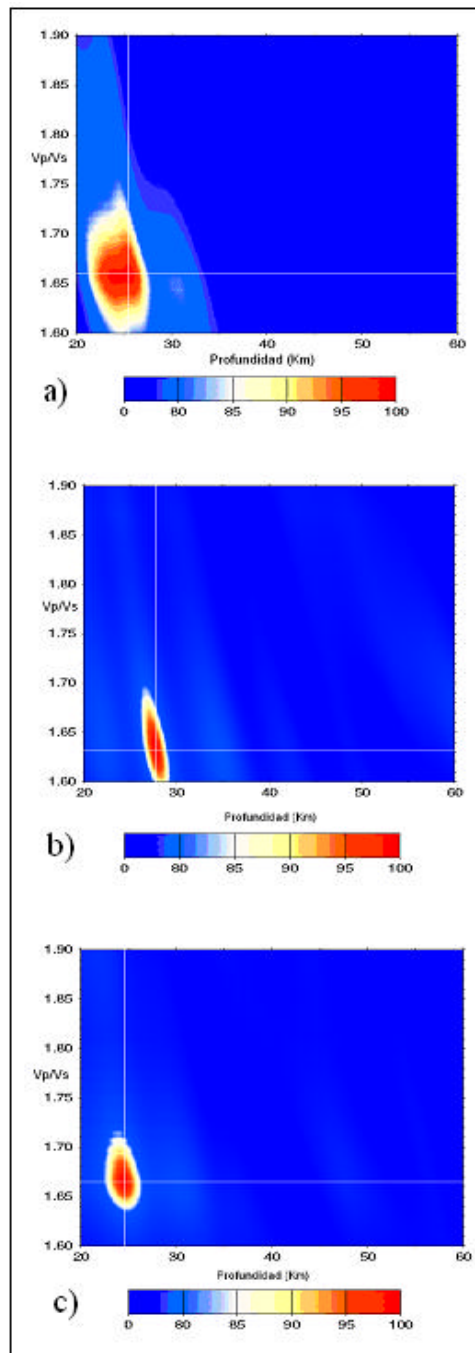


Figura 5.51. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación PCRV, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.

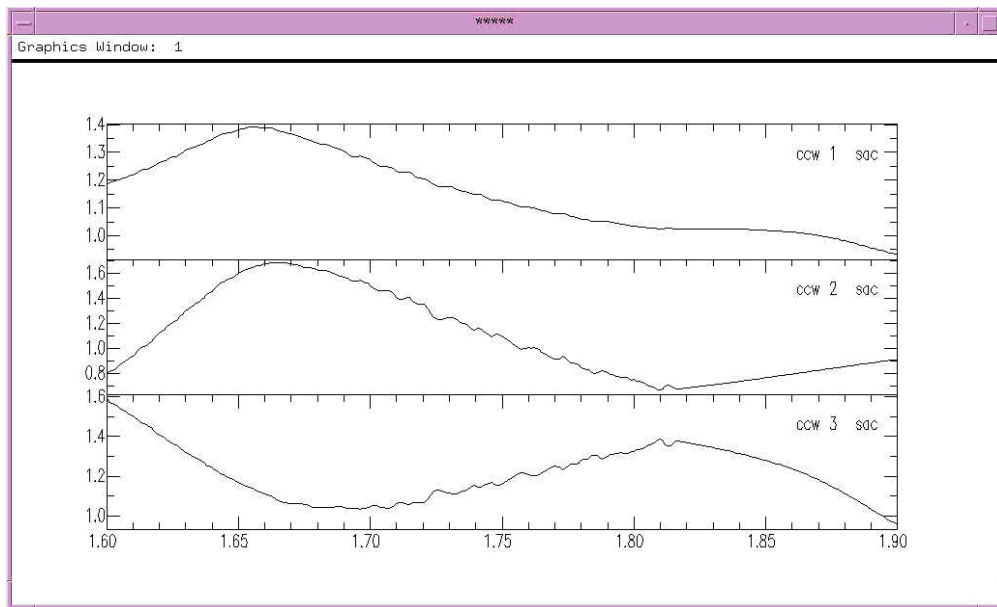


Figura 5.52. Cross-correlación entre los tres modos (Estación PCRV)

La gráfica de cross-correlación (figura 5.52) deja saber que la mayor correlación ocurre entre el primer y segundo modo que incluyen las fases Ps y PpSs, por ende, de las gráficas de V_p/V_s en función de la profundidad se utilizó la figura 5.51b que fue construida a partir del aporte de dichas fases. La profundidad bajo la estación PCRV es de 27 km y la relación V_p/V_s asociada es de 1,63. La relación de Poisson calculada es de 0,20, indicando existencia de rocas de composición félsica bajo este punto (Zandt y Ammon, 1995).

Estación PFPC

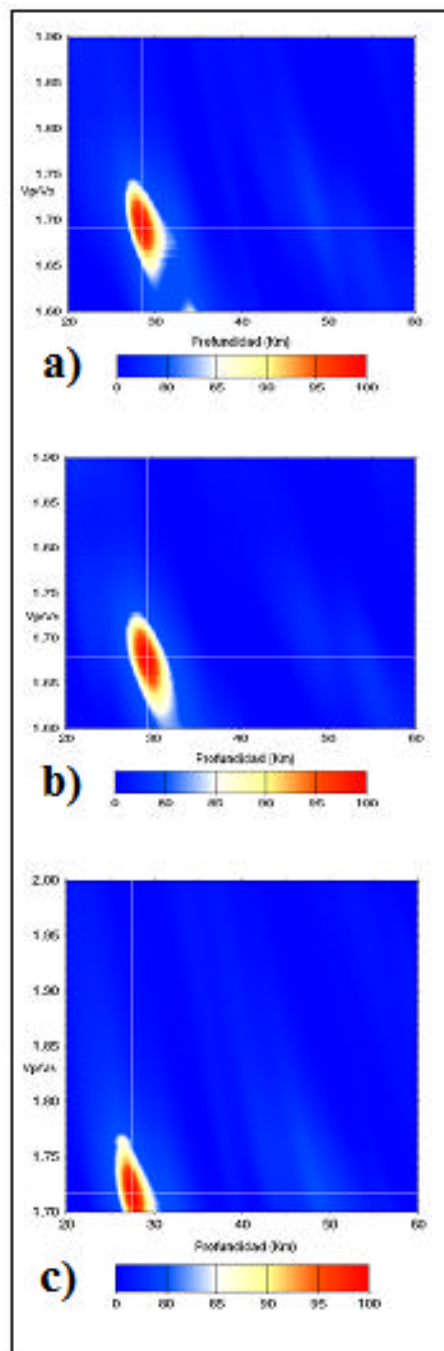


Figura 5.53. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación PFPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs y c) Ps y PpPs.

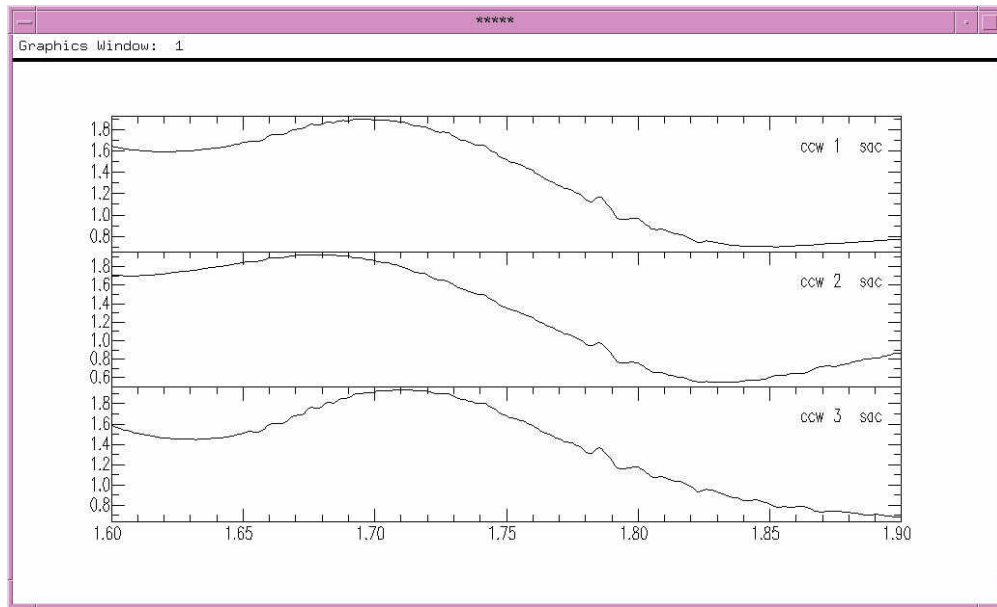


Figura 5.54. Cross-correlación entre los tres modos (Estación PFPC)

A través de las curvas de cross-correlación (figura 5.54) se logra distinguir fácilmente la similitud entre las curvas representativas de las fases Ps y PpSs, por lo que en las gráficas de relación V_p/V_s en función de la profundidad se tomó como respuesta la figura 5.53b, donde se refleja un valor de profundidad para la estación PFPC de 29,5 km y la relación V_p/V_s es de 1,68. Para esta estación se obtuvo un valor de relación de Poisson de 0,23, asociado a rocas de composición félsica (Zandt y Ammon, 1995).

Estación PRPC

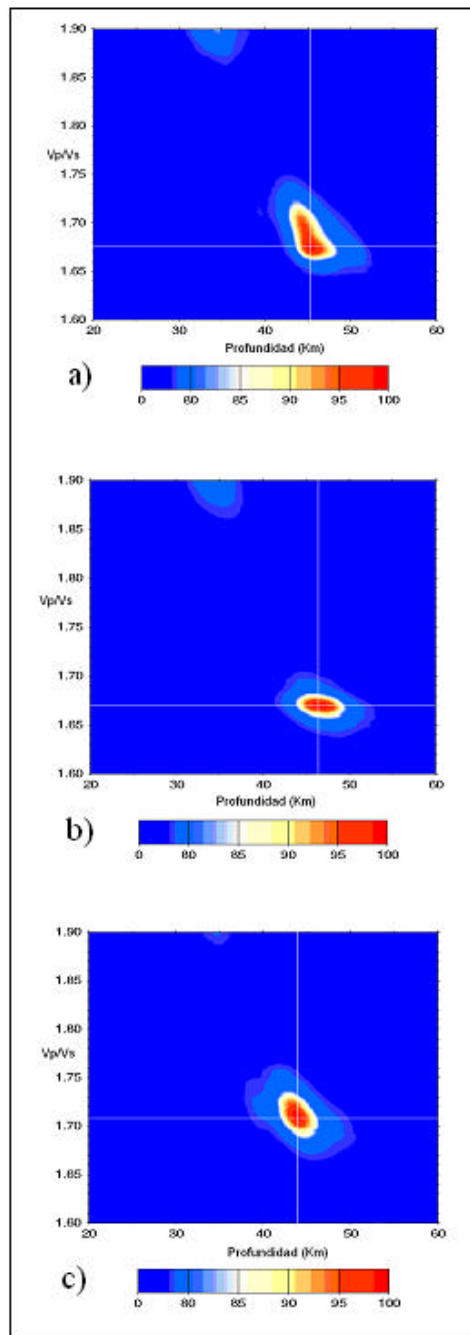


Figura 5.55. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación PRPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.

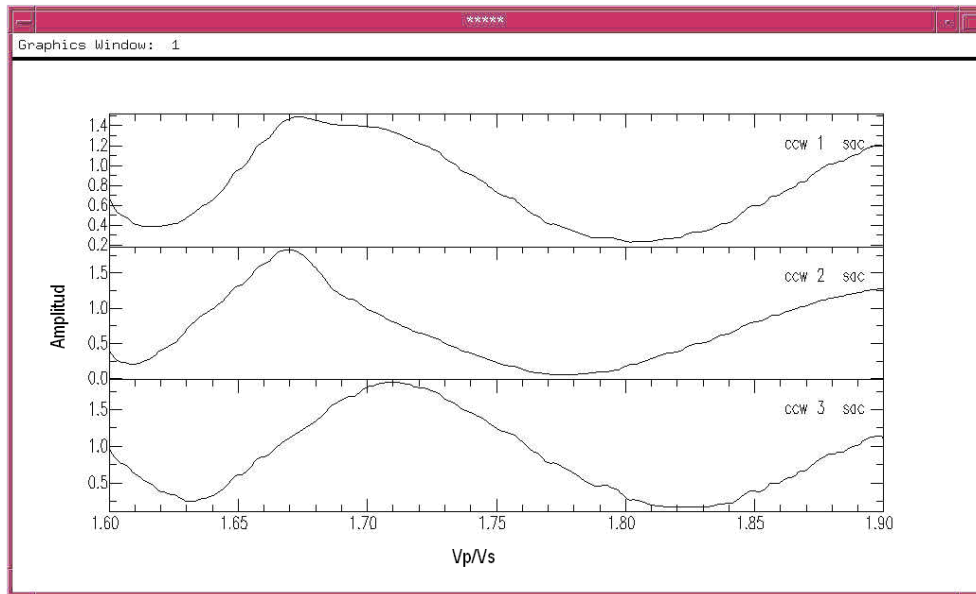


Figura 5.56. Cross-correlación entre los tres modos (Estación PRPC)

Las gráficas de la figura 5.56 muestran la mayor correlación entre los dos primeros modos de onda, tomando así la respuesta de las fases Ps y PpSs, por lo que se le atribuye a esta estación un valor de profundidad de 46 km según la gráfica de Vp/Vs en función de la profundidad (figura 5.55b), la cual está relacionada con dichas fases, mostrando además una relación $Vp/Vs = 1,67$. Para esta estación se calculó un valor de relación de Poisson de 0,22, asociado a rocas de composición félsica (Zandt y Ammon, 1995).

Estación RIOV

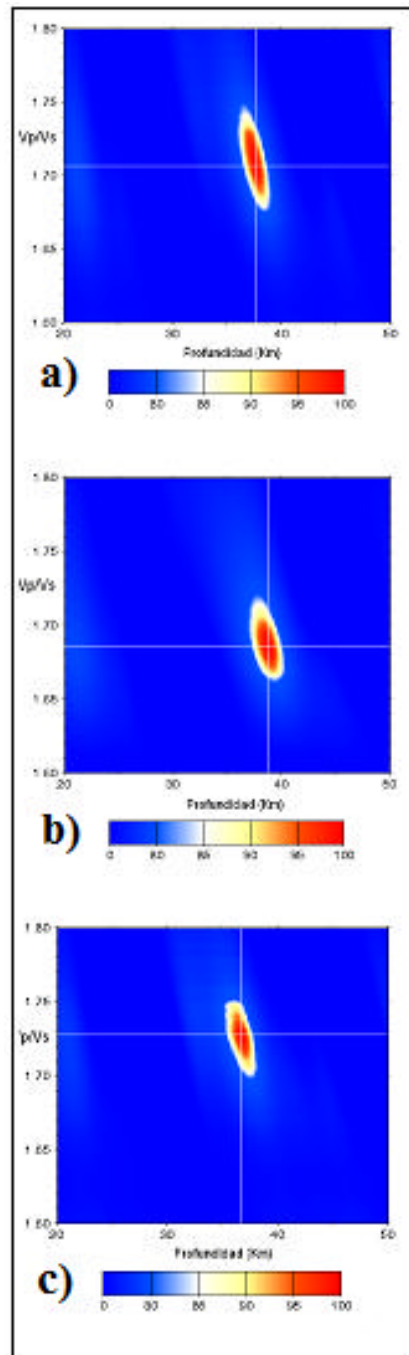


Figura 5.57. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación RIOV, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs y c) Ps y PpPs.

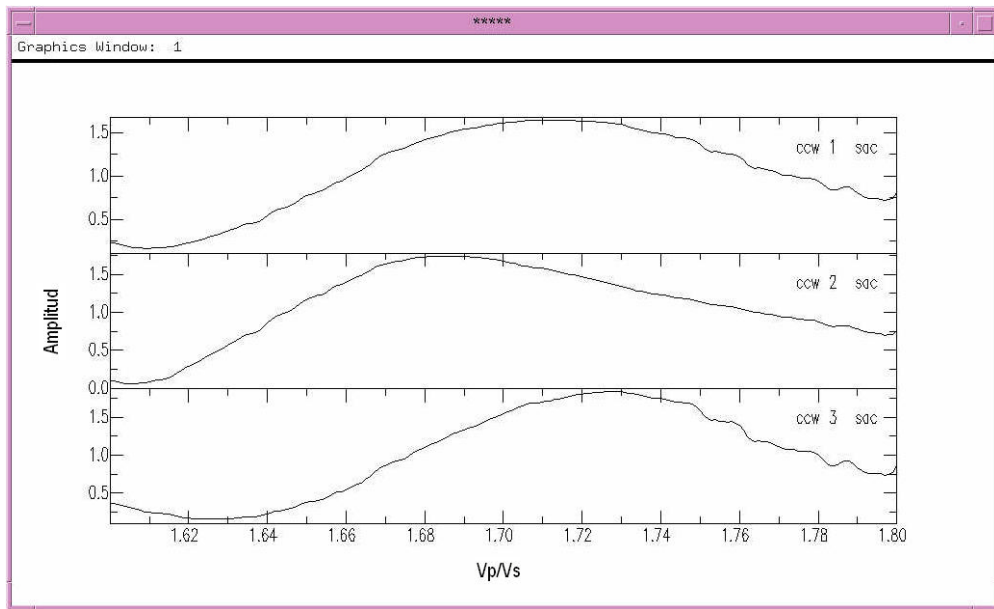


Figura 5.58. Cross-correlación entre los tres modos (Estación RIOV)

Los valores de profundidad y relación V_p/V_s determinados para esta estación son 36,5 km y 1,73 respectivamente (figura 5.57c). Según la gráfica de cross-correlación (figura 5.58) se observa una tendencia relativamente similar entre los tres modos, sin embargo, la primera y tercera curva fueron consideradas las de mayor correlación. En esta estación se obtuvo una relación de Poisson de 0,25, valor asociado a rocas de composición félsica (Zandt y Ammon, 1995).

Estación ROPC

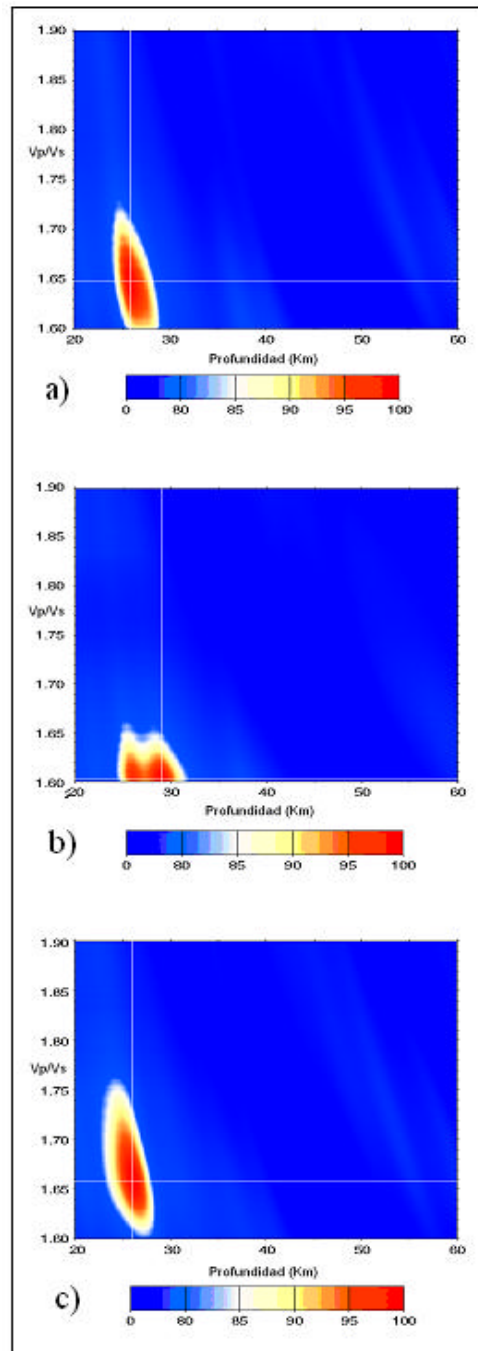


Figura 5.59. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación ROPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.

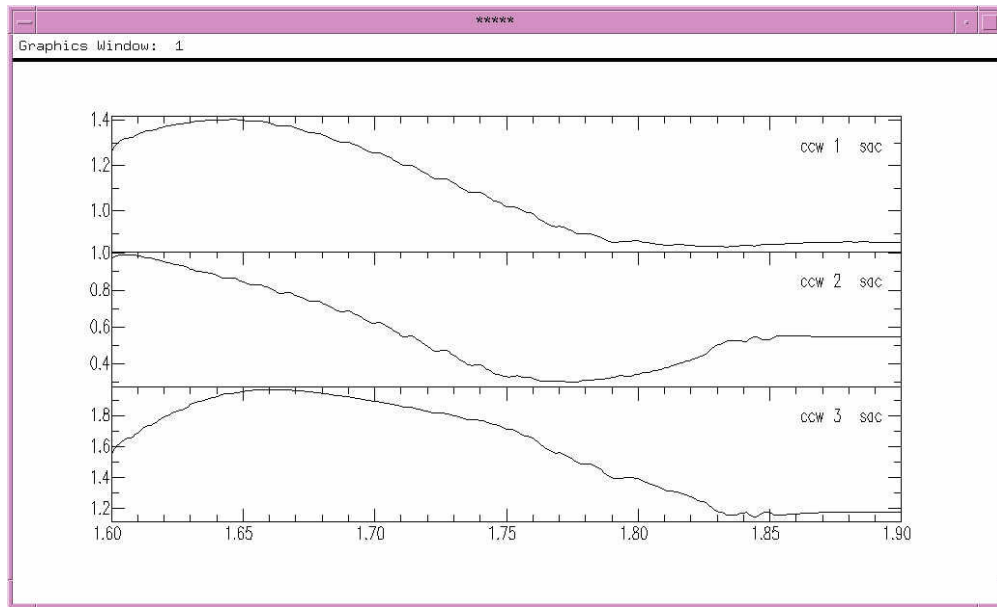


Figura 5.60. Cross-correlación entre los tres modos (Estación ROPC)

Los modos que mejor se correlacionan según se puede observar en la figura 5.60 son el primero y el tercero, que incluyen el aporte de las fases Ps y PpPs. A esta correlación de fases se asocia la respuesta numérica que se observa en la figura 5.59c, la cual es de 26 km de profundidad y 1,66 de relación V_p/V_s para esta estación. A partir de dicha relación V_p/V_s se calculó una relación de Poisson de 0,22 que indica presencia de rocas félsicas en la zona (Zandt y Ammon, 1995).

Estación RPPC

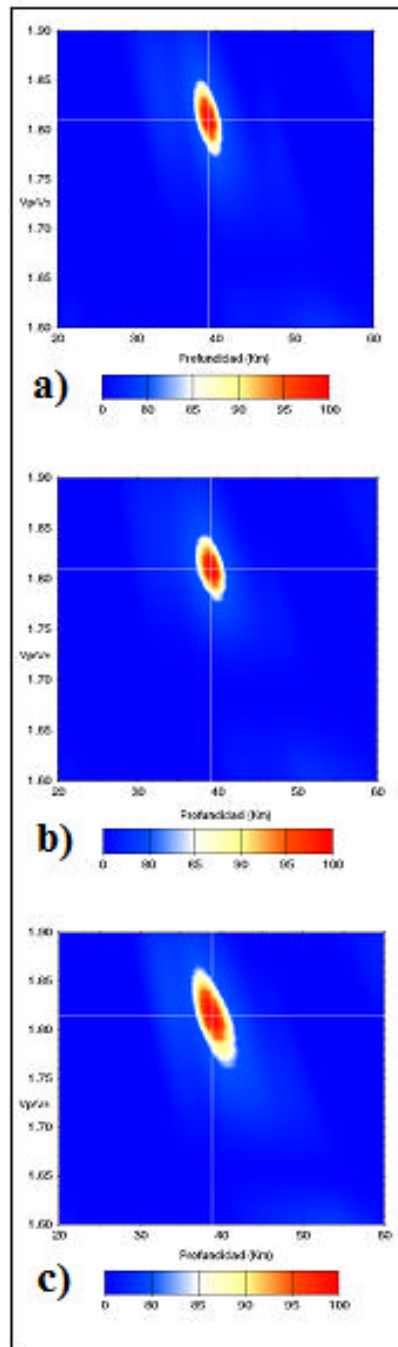


Figura 5.61. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación RPPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs y c) Ps y PpPs.

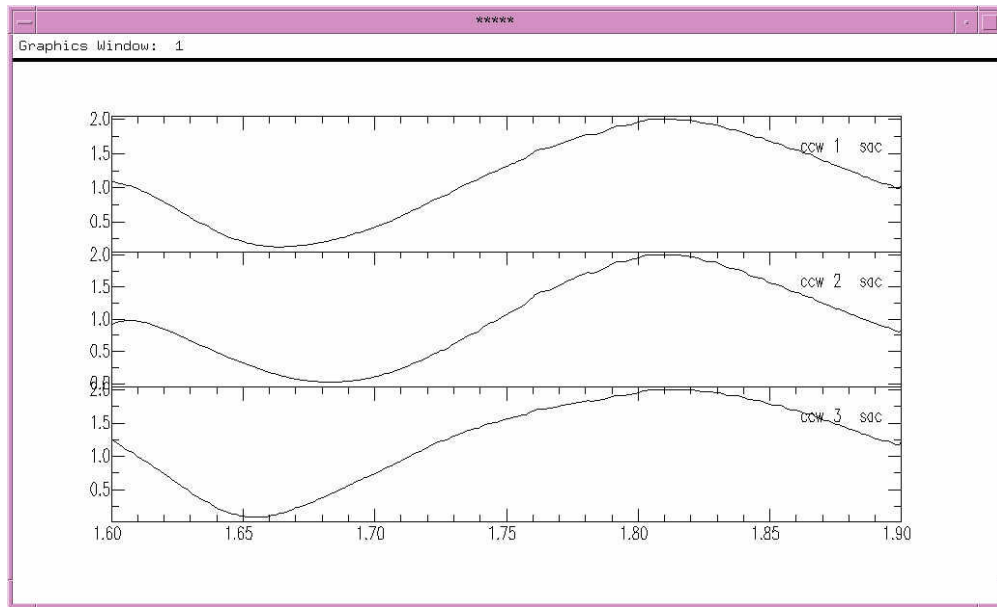


Figura 5.62. Cross-correlación entre los tres modos (Estación RPPC)

La respuesta de profundidad de Moho para esta estación se sitúa a 39 km según se observa en la figura 5.61b, que además indica para tal profundidad un valor asociado de $V_p/V_s = 1,81$. Esta gráfica fue construida usando el aporte de las fases de onda Ps y PpSs, los cuales están altamente correlacionados como se puede apreciar en la figura 5.62, correlación expresada por la gran similitud entre la primera y segunda curva de dicha gráfica. Para dicha estación se obtuvo un valor de relación de Poisson de 0,28, asociado a rocas de composición máfica (Zandt y Ammon, 1995).

Estación SIPC

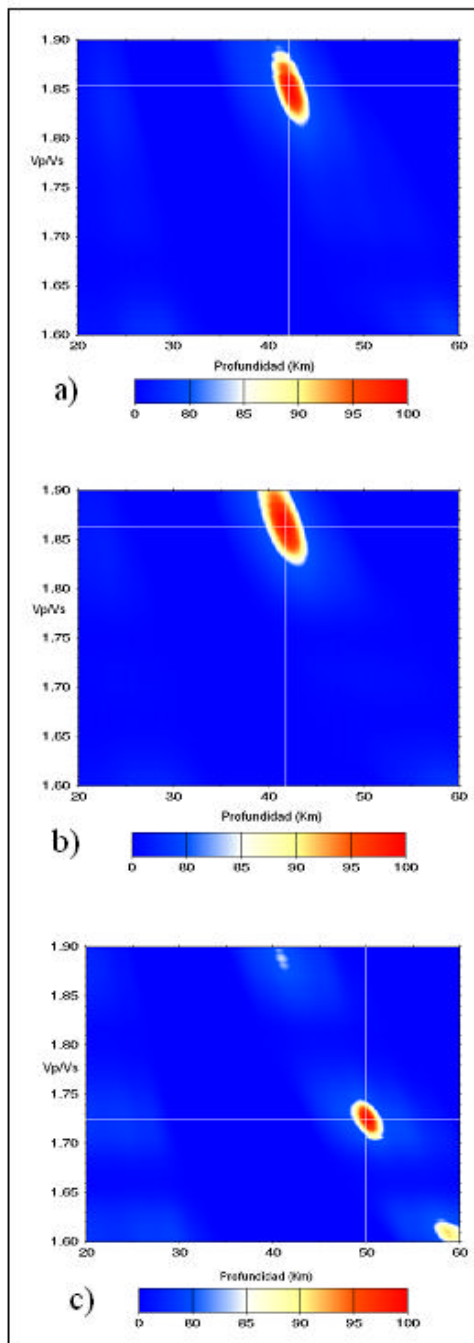


Figura 5.63. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación SIPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.

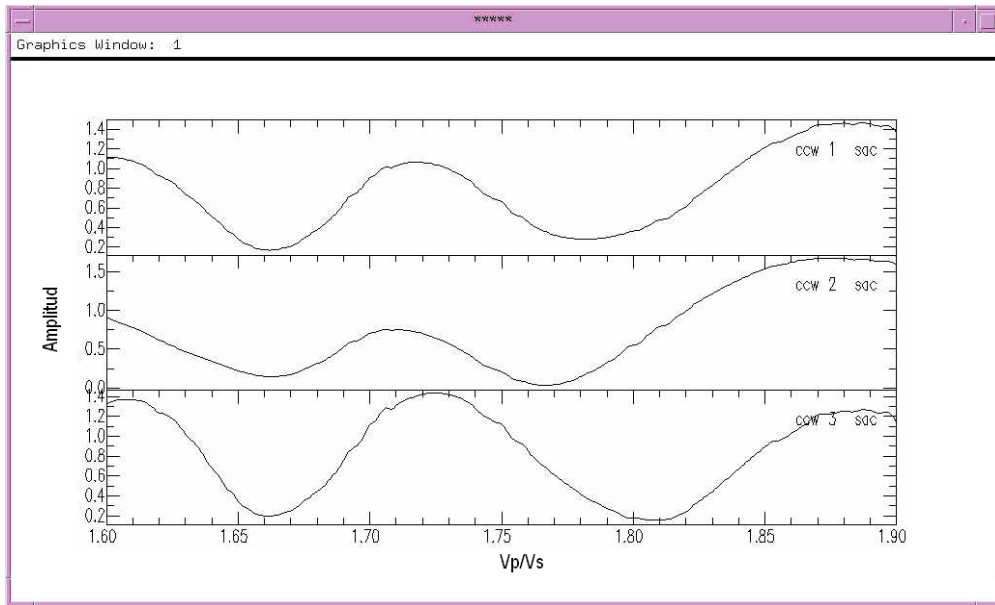


Figura 5.64. Cross-correlación entre los tres modos (Estación SIPC)

Según la figura 5.64 de cross-correlación, se aprecia buena correlación entre el primer y tercer modo de onda, alcanzando un valor de relación V_p/V_s de 1,725 del cual se desprende en la figura 5.63c un valor de profundidad asociado de 50 km correspondiente con las fases Ps y PpPs. Para la estación se calculó una relación de Poisson de 0,24, valor asociado a rocas de composición félsica (Zandt y Ammon, 1995).

Estación SMPC

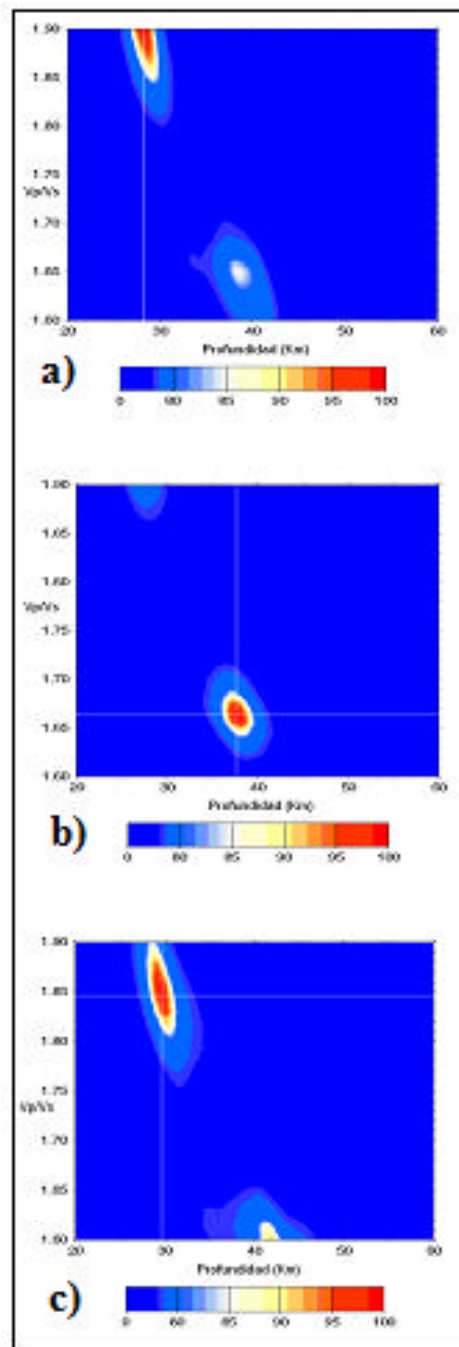


Figura 5.65. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación SMPC, usando las fases: a) Ps, PpSs y PpPs, b) Ps y PpSs y c) Ps y PpPs.

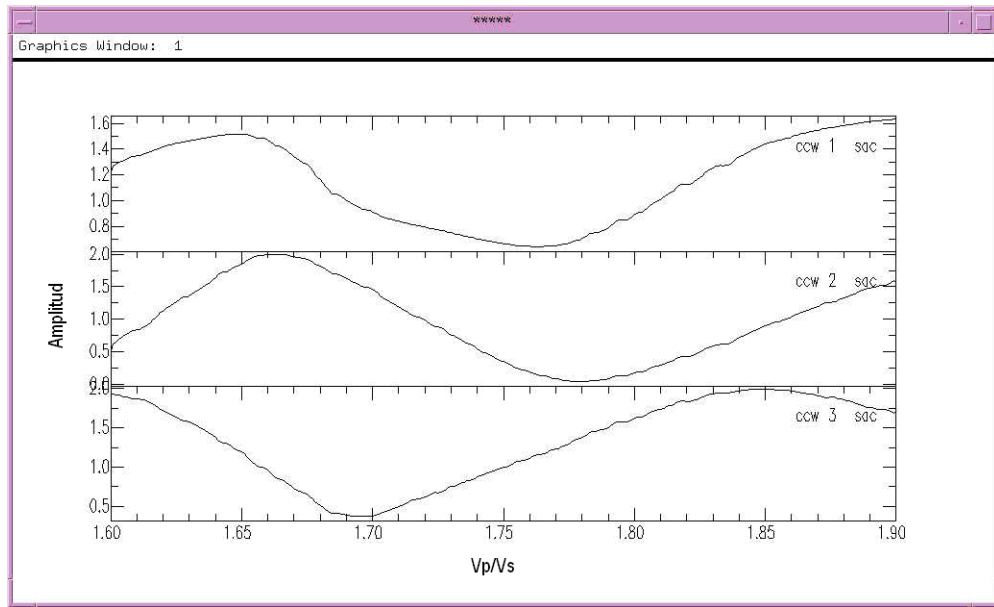


Figura 5.66. Cross-correlación entre los tres modos (Estación SMPC)

Esta estación presentó una profundidad de 37,5 km y un valor de relación V_p/V_s de 1,66 (figura 5.65b), de acuerdo con las curvas de cross-correlación observadas previamente en la figura 5.66, donde se aprecia que la mayor correlación está dada entre las fases Ps y PpSs. En esta estación se obtuvo un valor de relación de Poisson de 0,21, asociado a rocas de composición félsica (Zandt y Ammon, 1995).

Estación SRPC

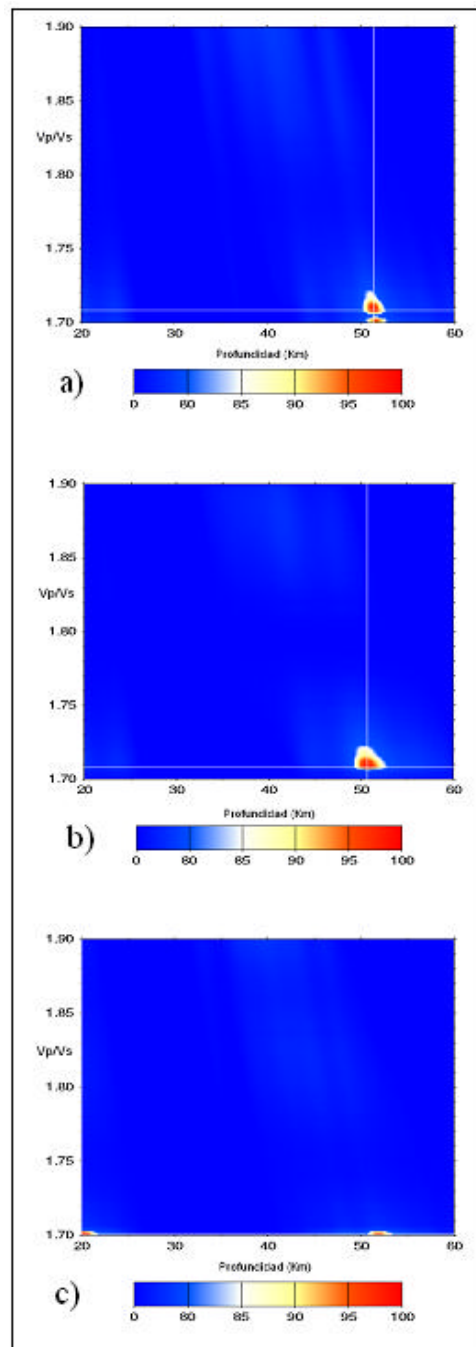


Figura 5.67. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación SRPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.

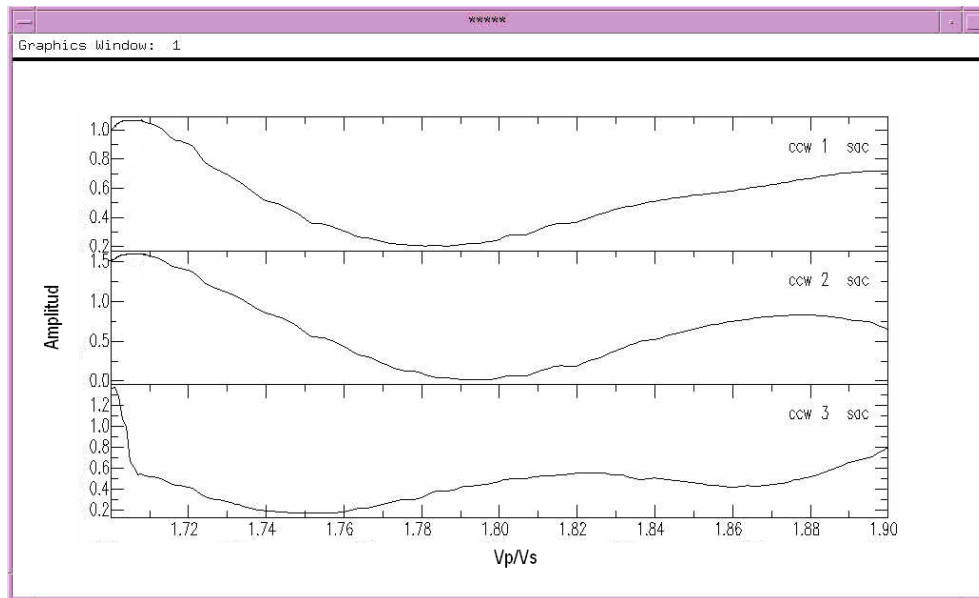


Figura 5.68. Cross-correlación entre los tres modos (Estación SRPC)

En el gráfico de cross-correlación para la estación SRPC se observa gran similitud entre los dos primeros modos (figura 5.68), tomando de esta manera el valor de relación V_p/V_s asociado a las fases P_s y P_pS_s el cual es de 1,71, así de la gráfica de relación V_p/V_s contra la profundidad (5.67b) se obtiene una profundidad de 50 km. Para esta estación se obtuvo un valor de relación de Poisson de 0,24, valor asociado a rocas de composición félsica, (Zandt y Ammon, 1995).

Estación STPC

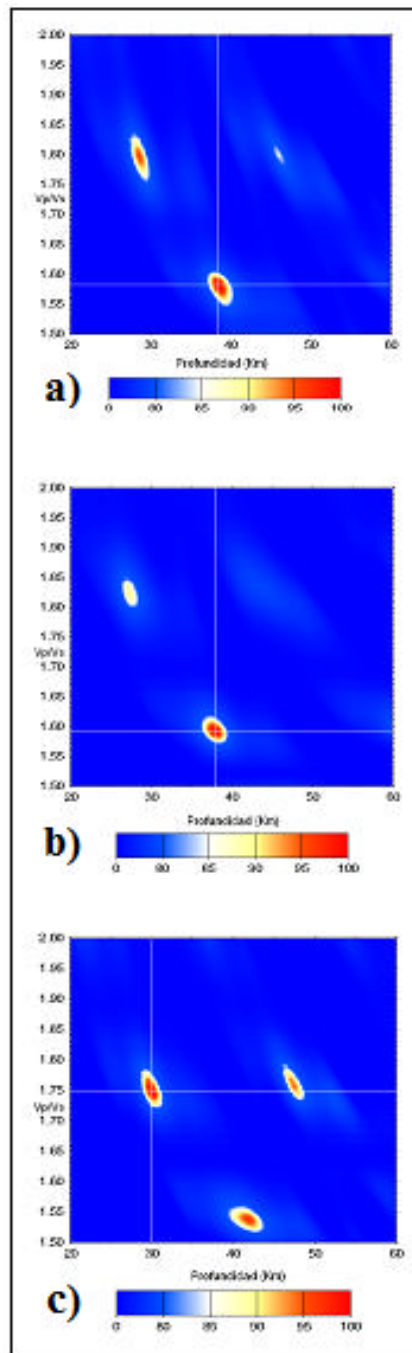


Figura 5.69. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación STPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs y c) Ps y PpPs.

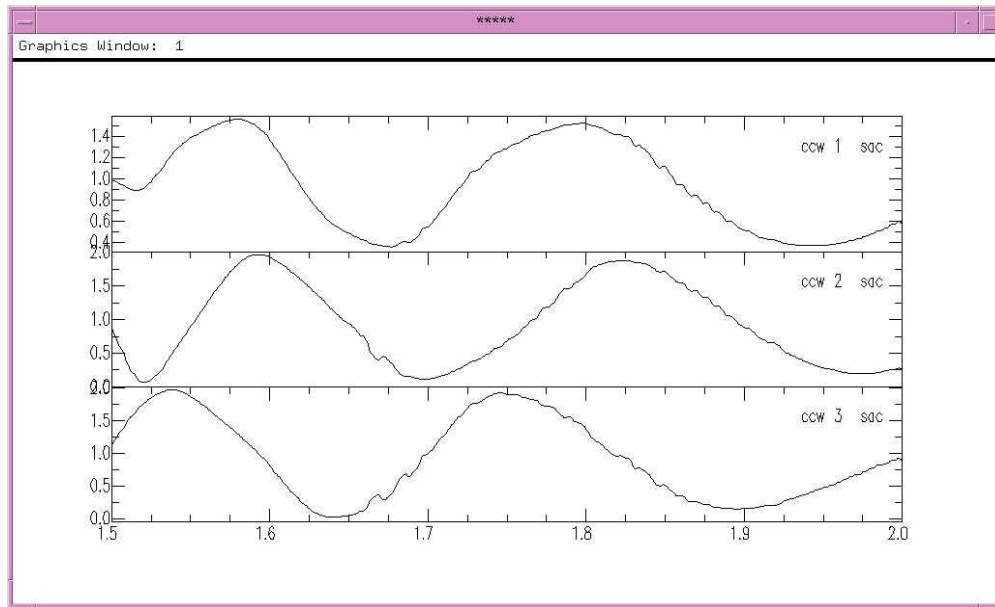


Figura 5.70. Cross-correlación entre los tres modos (Estación STPC)

Al distinguir la gran correlación en las fases Ps y PpSs en la figura de cross-correlación 5.70, el resultado numérico de profundidad y relación V_p/V_s será el expresado por la figura 5.69b (que involucra las fases mencionadas), los cuales son 37,5 km y 1,615 respectivamente. Para esta estación se calculó un valor de relación de Poisson de 0,19, asociado a rocas de composición félsica (Zandt y Ammon, 1995).

Estación TURV

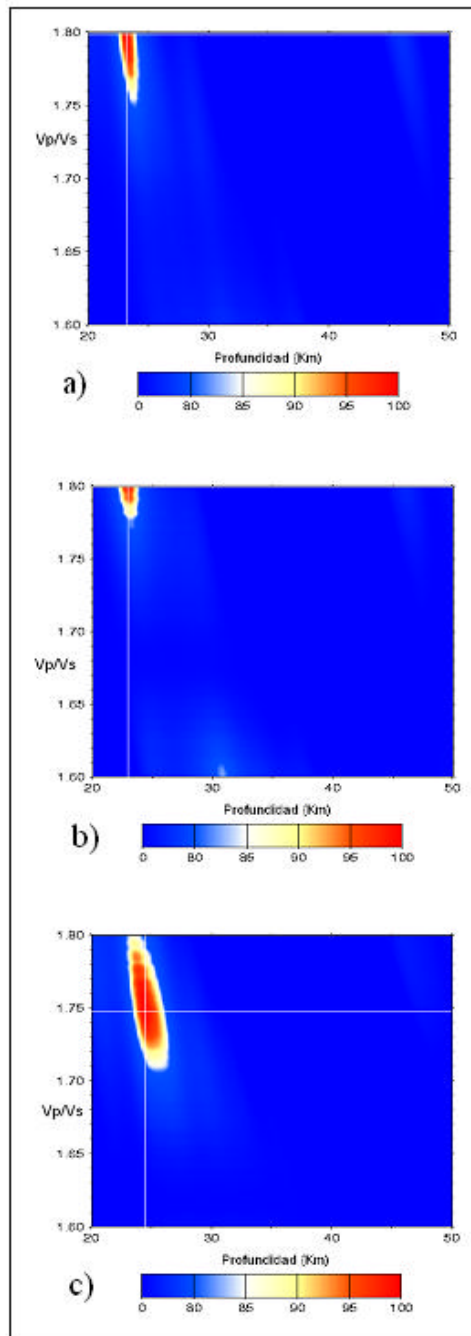


Figura 5.71. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación TURV, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs c) Ps y PpPs.

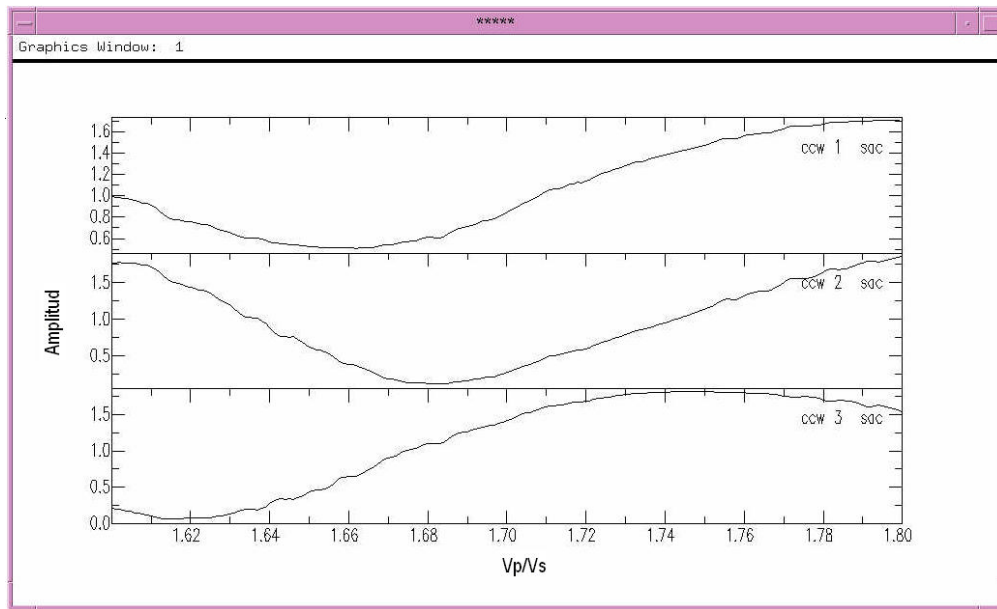


Figura 5.72. Cross-correlación entre los tres modos (Estación TURV).

Las curvas de cross-correlación obtenidas (figura 5.72) muestran tendencias similares para el primer y tercer modo, teniendo en consecuencia como valor de profundidad asociado 24,5 km y 1,75 de relación V_p/V_s según se observa en la figura 5.71c. En esta estación se obtuvo un valor de relación de Poisson de 0,26, asociado a rocas de composición félsica (Zandt y Ammon, 1995).

Estación ULPC

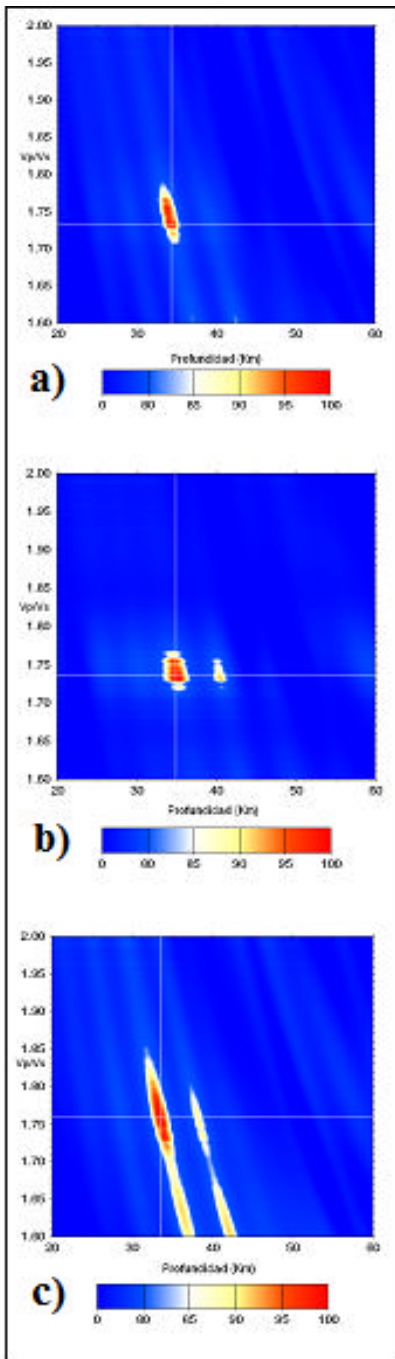


Figura 5.73. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación ULPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs y c) Ps y PpPs.

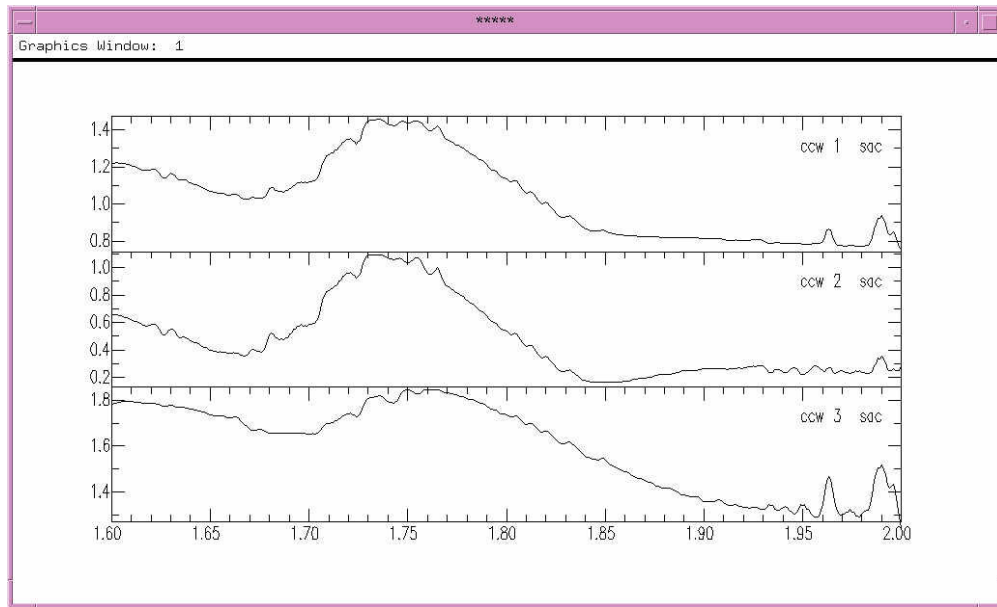


Figura 5.74. Cross-correlación entre los tres modos (Estación ULPC)

Según la figura 5,74 se deduce claramente la similitud en cuanto a comportamiento de las fases de onda Ps y PpSs, por lo que se utilizaron los valores que refleja la gráfica de V_p/V_s en función de la profundidad que relaciona dichas fases (figura 5.73b), donde se observa que la profundidad de este punto es de 35 km y presenta una relación $V_p/V_s = 1,74$. Para la estación se obtuvo un valor de relación de Poisson de 0,25, asociado a rocas de composición félsica (Zandt y Ammon, 1995).

Estación VIPC

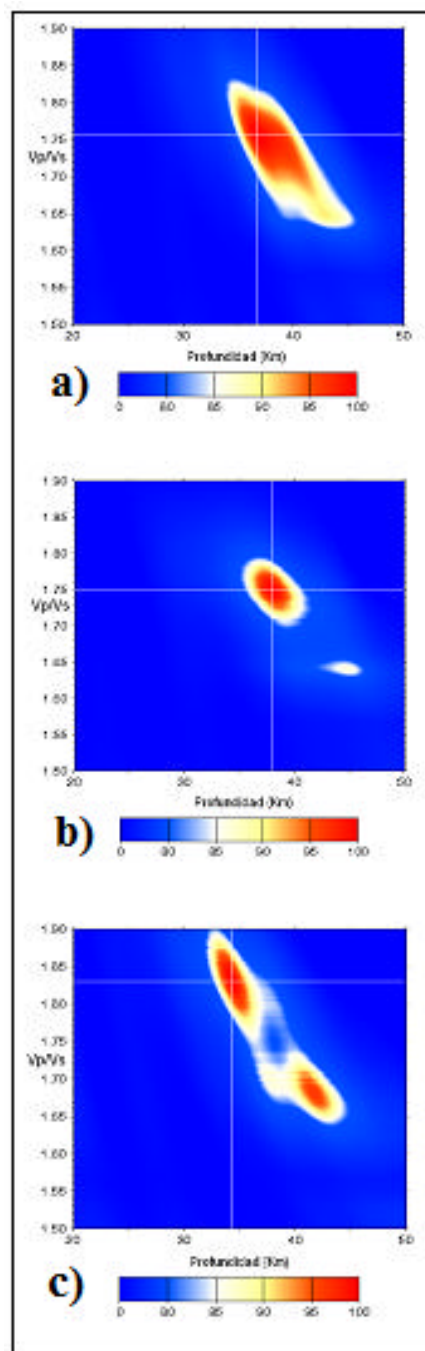


Figura 5.75. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación VIPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs y c) Ps y PpPs.

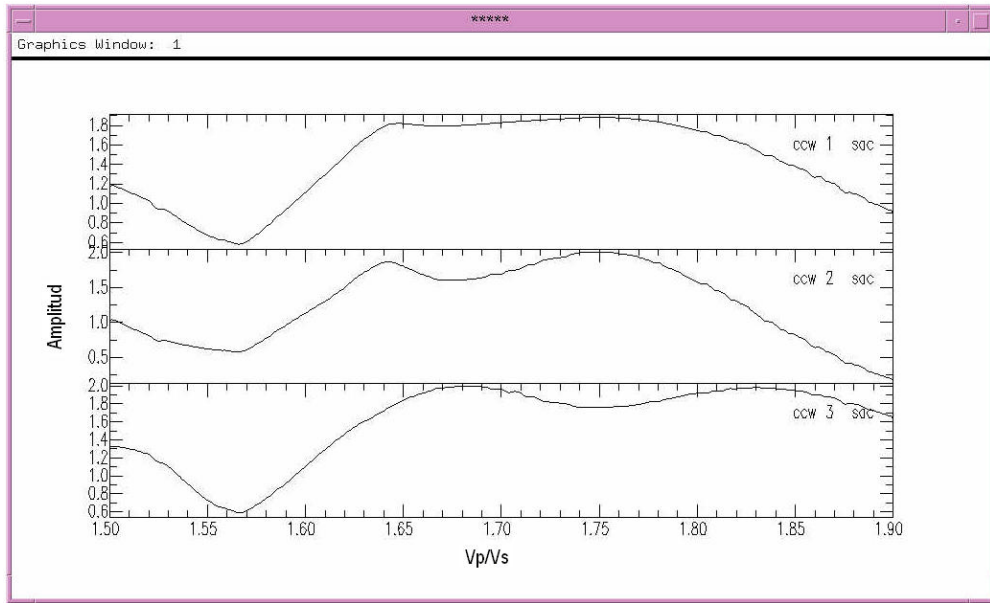


Figura 5.76. Cross-correlación entre los tres modos (Estación VIPC)

En la estación, a través del cálculo de la profundidad con la relación V_p/V_s , se obtuvo un valor de 38 km asociado a una relación V_p/V_s de 1,75 (figura 5.75b) tomando para esto la correlación entre el primer y segundo modo de las gráficas de cross correlación (figura 5.76). Para la estación se obtuvo un valor de relación de Poisson de 0,26, asociado a rocas de composición félsica (Zandt y Ammon, 1995).

Estación ZUPC

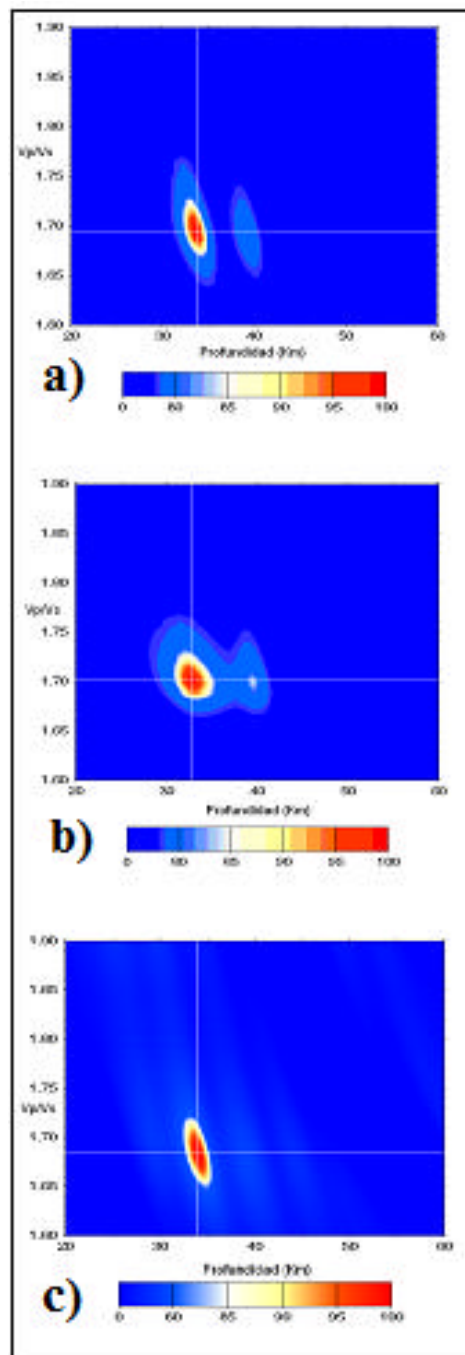


Figura 5.77. Relación V_p/V_s en función de la profundidad en la estación ZUPC, usando las fases: a) Ps, PpPs y PpSs, b) Ps y PpSs y c) Ps y PpPs.

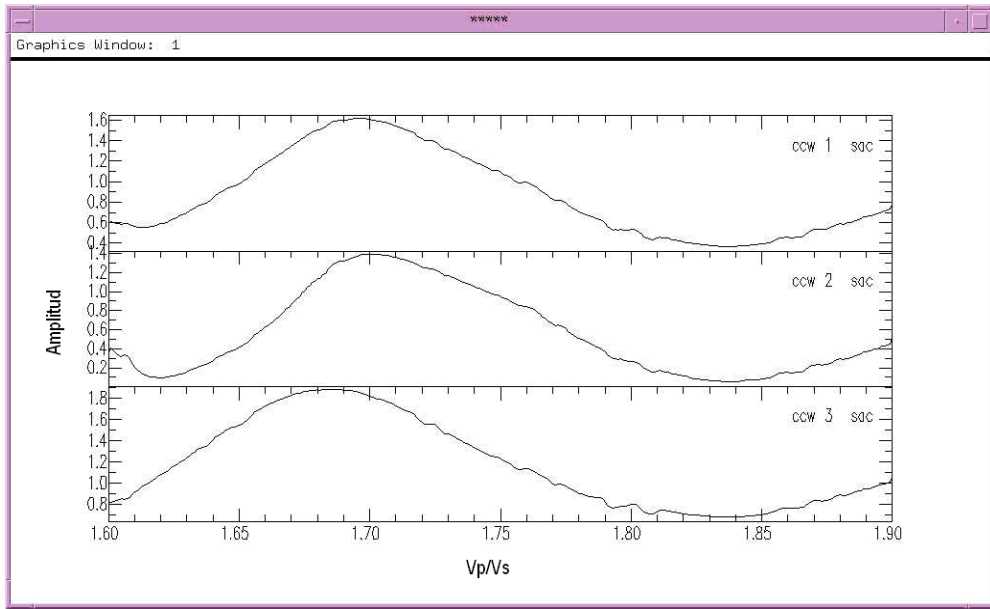


Figura 5.78. Cross-correlación entre los tres modos (Estación ZUPC)

De acuerdo con la figura 5.78 que muestra el comportamiento de las tres fases de onda, se observa que las 3 curvas son similares, sin embargo la mayor correlación ocurre entre la primera y la segunda. Siendo así, de las gráficas de V_p/V_s en función de la profundidad se tomaron como valores definitivos los mostrados por la figura 5.77b, que son 34 km de profundidad y 1,69 de relación V_p/V_s . Para dicha estación se obtuvo un valor de relación de Poisson de 0,23, asociado a rocas de composición félsica (Zandt y Ammon, 1995).

Estaciones con resultados anómalos:

Durante el análisis de los eventos por estación se observó que las estaciones LAPC, MERV y RPPC presentaron una baja calidad de datos, en cuanto a que los eventos apilados en estas, además de ser pocos, presentaban una baja relación señal/ruido, por lo que se considera que los valores obtenidos de profundidad y de V_p/V_s son poco confiables. En particular, los valores de relación de Poisson encontrados para estas estaciones no son justificables con la litología presente en la región; aunado a esto, los valores de profundidad calculados sobrepasan en gran medida los valores obtenidos en estudios previos y que podrían ser esperados según la conformación geológica de la cuenca (Jácome *et al.*, 2008). Debido a estas razones se decide eliminar los resultados obtenidos para dichas estaciones de los mapas finales de relación de Poisson y profundidad de Moho, a fin de dar una interpretación confiable y acorde con la información previa existente en la zona y los conocimientos geológicos de la misma.

5.3 Interpretación de los mapas

En la figura 5.79 se observa que la discontinuidad de Moho tiende a disminuir hacia el norte, en sentido hacia la Placa Caribe, donde son encontrados los menores espesores de corteza; mientras que los mayores espesores de corteza son alcanzados bajo la Cuenca de Maturín. Hacia el sur del mapa los valores de profundidad de la discontinuidad Moho se hacen uniformes en la zona del escudo de Guayana.

Tabla 5.2 Valores de relación de Poisson y profundidad para cada estación

ESTACIÓN	LONGITUD (grados)	LATITUD (grados)	RELACIÓN DE POISSON	PROFUNDIDAD (Km)
ABPC	-64,8207	9,4608	0,204	38,5
ARPC	-63,7972	9,7438	0,226	53
MNPC	-62,7444	8,9876	0,253	56
MUPC	-64,2946	8,3274	0,186	39
PRPC	-63,625	8,5019	0,220	46
SIPC	-63,0575	9,3596	0,249	50
SRPC	-64,2942	9,5825	0,240	49,8
BAUV	-68,0415	8,9433	0,240	40,5
PFPC	-65,9443	8,3277	0,226	29,5
SMPC	-66,3219	8,5127	0,215	37,5
STPC	-66,2544	8,1365	0,192	37,5
ULPC	-67,3866	8,8571	0,253	35
ZUPC	-65,1951	8,3597	0,231	34
CAIV	-66,3216	7,3262	0,235	40
CAPC	-61,8249	7,3429	0,249	39
CMPC	-64,0732	7,6508	0,249	42
EDPC	-61,6392	6,7127	0,258	39,5
GURV	-63,0854	7,7598	0,253	44,5
MAPC	-65,1881	7,4168	0,235	45
MOPC	-66,8426	6,5861	0,240	40
PAPC	-62,655	8,0344	0,258	45
RIOV	-61,8145	8,069	0,249	36,5
VIPC	-62,0655	7,8605	0,258	38
FCPC	-66,8342	9,6502	0,258	37
JMPC	-67,3968	9,8872	0,249	32,5
LMPC	-67,3843	9,3553	0,186	29
ROPC	-66,3847	9,9092	0,215	26
CRUV	-63,1842	10,6165	0,212	38
CUPC	-63,8168	10,1501	0,253	35
PCRV	-64,6000	10,2000	0,198	27
BIRV	-66,2692	10,4757	0,242	45
CUPV	-65,8056	10,0639	0,266	43
TURV	-67,8382	10,4474	0,257	24,5
IBAV	-64,5977	11,8216	0,231	22
ITEV	-63,1320	11,3552	0,284	29
MIPC	-64,2905	10,9653	0,290	27

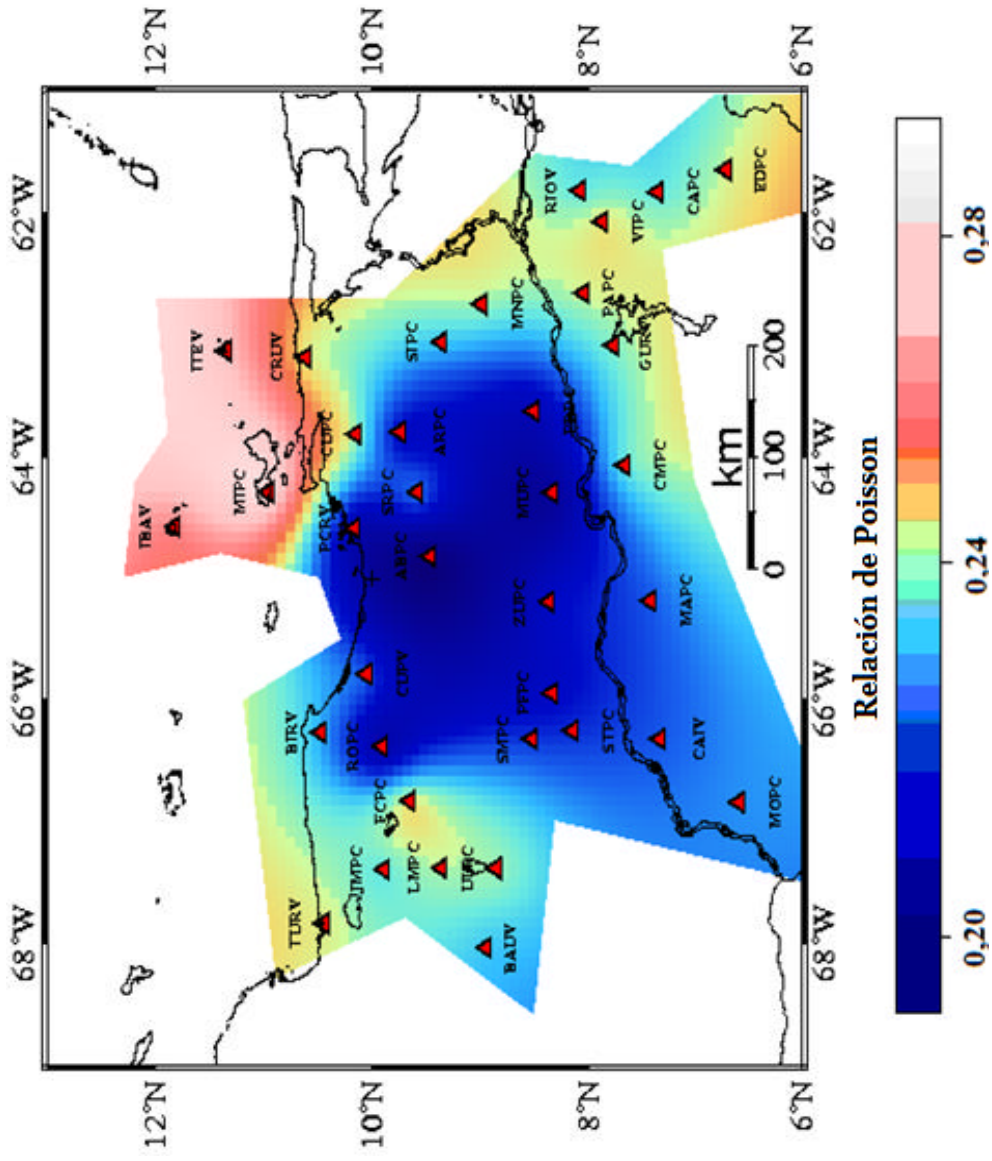


Figura 5.80. Mapa de distribución de la relación de Poisson calculada a partir de Relaciones V_p/V_s .

A continuación se presentan los aspectos más relevantes de cada zona del mapa:

Cuenca de Maturín (ABPC, ARPC, MNPC, MUPC, PRPC, SIPC, SRPC): el menor valor de profundidad encontrado fue de 38,5 km bajo la estación ABPC y el mayor de 56 km bajo la estación MNPC, obteniéndose un promedio de profundidad cortical en la zona de 47 km, valor similar a los encontrados previamente por Yánez (2005), Goncalves *et al.* (2006), Niu *et al.* (2007) y Schmitz *et al.* (2008).

En el mapa de la figura 5.79 se distinguen 4 estaciones que presentan los mayores valores de profundidad alcanzados en la cuenca, MNPC con 56 km, ARPC con 53 km, SIPC con 50 km y SRPC con 49,8 km. A pesar de que estos grandes espesores podrían ser considerados anómalos para una cuenca, los mismos son justificables debido a la gran cantidad de sedimentos depositados en ella durante el Neógeno, alcanzando una columna sedimentaria con valores de hasta 12 km en la parte más profunda de la cuenca, ocasionado por la carga tectónica asociada al cinturón de deformación de la Cordillera de la Costa (Schmitz *et al.*, 2008). Sin embargo, diversos autores han planteado que no solamente el peso causado por la carga sedimentaria es suficiente para justificar el gran espesor cortical, sino que es necesario un proceso tectónico adicional, ya sea un “slab” de subducción o una carga sublitosférica que haya producido subsidencia extra (Jácome *et al.*, 2003a) o por duplicación de corteza según plantean Schmitz *et al.* (2008).

En cuanto a los valores de relación de Poisson (figura 5.80) se obtuvo un promedio de 0,23 el cual es indicativo de rocas de composición félsica según Zandt y Ammon (1995).

Cuenca de Guárico (BAUV, PFPC, SMPC, STPC, ULPC, ZUPC): esta cuenca presenta menores valores de espesor cortical que la Cuenca de Maturín, los cuales son apropiados para esta zona, debido a que los procesos tectónicos que formaron la misma son diferentes y más recientes a los involucrados en la formación de la cuenca de Maturín, permitiendo que, en su parte más profunda sólo alcance 5 km de espesor sedimentario (Jácome *et al.*, 2008). En cuanto al espesor cortical calculado para esta zona, el mismo es

de 36 km, valor que coincide con el calculado por Jácome *et al.* (2008) y se mantiene en el rango estimado por Schmitz *et al.* (2008).

Al observar la figura 5.79 se aprecia que hay 4 estaciones cercanas que son coincidentes con lo que sería la representación en superficie de la Cuenca de Guárico, las cuales son PFPC, SMPC, STPC y ZUPC, donde se presenta el menor espesor cortical de esta zona lo cual podría deberse, tanto a la influencia de la cuenca, como a la presencia del Graben de Espino (Feo-Codecido *et al.*, 1984; Ríos *et al.*, 2002). Están limitadas por una topografía de Moho uniforme que se encuentra alrededor de los 37 km, siendo esto coherente con las estructuras geológicas que la rodean, las cuales tienen tendencia a una profundización de la corteza, como es el caso de la Cuenca de Maturín por el este y el Escudo de Guayana por el sur.

En cuanto a la relación de Poisson obtenida en la cuenca (figura 5.80), se promedió en 0,23 siendo también característico de rocas de composición félsica (Zandt y Ammon 1995).

Escudo de Guayana (CAIV, CAPC, CMPC, EDPC, GURV, MAPC, MOPC, PAPC, VIPC, RIOV): en esta corteza continental de edad Precámbrica, debido a su antigüedad geológica, es de considerar que posea una topografía de Moho bastante estable, hecho que ha sido corroborado por lo indicado en estudios corticales previos y lo obtenido en la presente investigación donde se determinó un promedio de corteza en el escudo de 41 km, presentando los menores valores hacia la parte norte y noreste del escudo, haciéndose más estable y profundo hacia la parte sur del mismo. Se considera de gran confiabilidad los valores de espesor cortical calculados en esta zona, puesto que el conjunto de datos analizados presentó una alta relación señal ruido, a pesar de tener una ligera diferencia con los resultados encontrados por Schmitz *et al.* (2002) quienes indican un espesor cortical promedio de 45 km. Los valores encontrados con la metodología empleada en esta investigación se mantienen bastante cercanos a este promedio.

En cuanto a los valores de Poisson obtenidos el promedio para la zona es de 0,25, considerado un valor bajo según Zandt y Ammon (1995). Quienes indican que el valor promedio para cortezas cratónicas es de 0,29 debido a la presencia de material máfico en la corteza inferior. A pesar de que el valor de Poisson obtenido en este estudio es congruente con valores encontrados para otras cortezas cratónicas (Niu *et al.*, 2007), los mismos no concuerdan con el resultado esperado a partir de la utilización de los valores de velocidad tomados del trabajo de Schmitz *et al.* (2002), quienes indican la presencia de una corteza inferior con una alta velocidad bien definida en la sísmica, por lo que se esperaría un valor de Poisson superior para esta zona.

Serranía del Interior Central (FCPC, JMPC, LMPC, ROPC): esta zona se encuentra enmarcada en un escenario tectónico bastante complejo, destacando la deformación orogénica causada por el evento de compresión que la generó, razón por la cual se espera que los espesores corticales encontrados alcancen un valor que permita el balance isostático necesario como lo indican Ysaccis y Audemard (2000) y Schmitz *et al.* (2008). Al observar la figura 5.79 se aprecia que los valores de profundidad de Moho promedio de la Serranía se encuentran alrededor de 31 km, valor que está incluso por debajo del promedio de espesor cortical continental. Aunado a esto destaca el hecho de que la zona de interacción Caribe- Suramérica abarca todo el norte de Venezuela, por lo que también se esperaría ver un espesor adicional de corteza que refleje el adosamiento de ambas placas y además, debería verse reflejado el hundimiento o raíz cortical que compense la existencia de la Serranía, traduciéndose todo lo anterior en un espesor cortical mayor al obtenido.

Magnani *et al.* (2009) reportan en esta zona una interfase cortical de profundidad promedio 30 km, la cual se extiende a lo largo de toda la serranía comenzando cerca de Villa de Cura al norte con 24 km y profundizando hacia el sur alcanzando 34 km; siendo así y debido a que el cambio de impedancia asociado a esta interfase puede haber sido el asumido al calcular la función receptora, se considera que el valor encontrado se relaciona con esta interfase intra-cortical y no con la profundidad de Moho, encontrándose la misma a mayor profundidad, pero debido a que en la función receptora sólo se observó el primer

cambio de impedancia no se tiene información sobre la profundidad a la que se encuentra la discontinuidad de Moho.

El valor promedio de relación de Poisson encontrado fue de 0.23 que hace referencia a la presencia de rocas de composición félsica.

Serranía del Interior Oriental (CRUV, CUPC, PCRV): el promedio de espesor cortical de la zona es de 33 km, presenta los mayores valores hacia la parte este de la serranía (estaciones CUPC y CRUV), los cuales son acordes con los hallados previamente por Ávila (2005), Yáñez (2005) y Schmitz *et al.* (2008) en la zona. También se aprecia una disminución de dicho espesor en dirección oeste, alcanzando el menor valor bajo la estación PCRV que presenta una profundidad de 24,5 km, la cual podría estar relacionada con el límite este de la depresión de Unare.

El promedio de la relación de Poisson obtenido para la Serranía Oriental es de 0,22, que se asocia a la presencia de rocas de composición félsica.

Islas de Sotavento (IBAV, ITEV, MIPC): en esta zona las estaciones presentan un espesor cortical bastante bajo comparado con las estaciones ubicadas en continente pero acorde a su ubicación en corteza oceánica. Los espesores corticales encontrados son de 22 km para la estación IBAV, 27 km debajo de MIPC y 29 km calculados en ITEV, coincidentes con los espesores encontrados previamente por Schmitz *et al.* (2008) y Niu *et al.* (2007).

En cuanto al promedio de relación de Poisson el mismo es de 0,27 lo cual es indicativo de rocas de composición intermedias.

Cordillera de la Costa (BIRV, CUPV, TURV): en las estaciones encontradas en la zona, se observa una marcada diferencia en cuanto a los espesores corticales obtenidos, en el caso de BIRV y CUPV el promedio de profundidad es de 44 km, dicho valor se puede interpretar como correspondiente al peso de la raíz cortical que logra compensar la

topografía presente en la zona. Mientras que TURV refleja un espesor cortical de 24,5 km, valor considerado anómalo y poco confiable debido a la baja densidad de muestreo en esa área (aproximadamente 200 km sin estaciones sismológicas), por lo que se considera que la tendencia este-oeste presentada en esta zona del mapa podría ser no representativa con respecto a la estructura presente en la zona (Cordillera de la Costa) ya que la misma sólo está controlada por la interpolación.

Referente a la relación de Poisson calculada para esta zona, el valor encontrado fue de 0,25 que se asocia a rocas félsicas.

Sin embargo el valor de espesor de 24,5 km para la estación TURV, así como los bajos valores de espesor cortical encontrados para las estaciones de la Serranía del Interior Central (LMPC, JMPC, FCPC, ROPC y ULPC) podrían asociarse con el tope de la corteza inferior como es presentado en el perfil propuesto por Magnani *et al.* (2009), no correspondiéndose con la profundidad de Moho (figura 5.81).

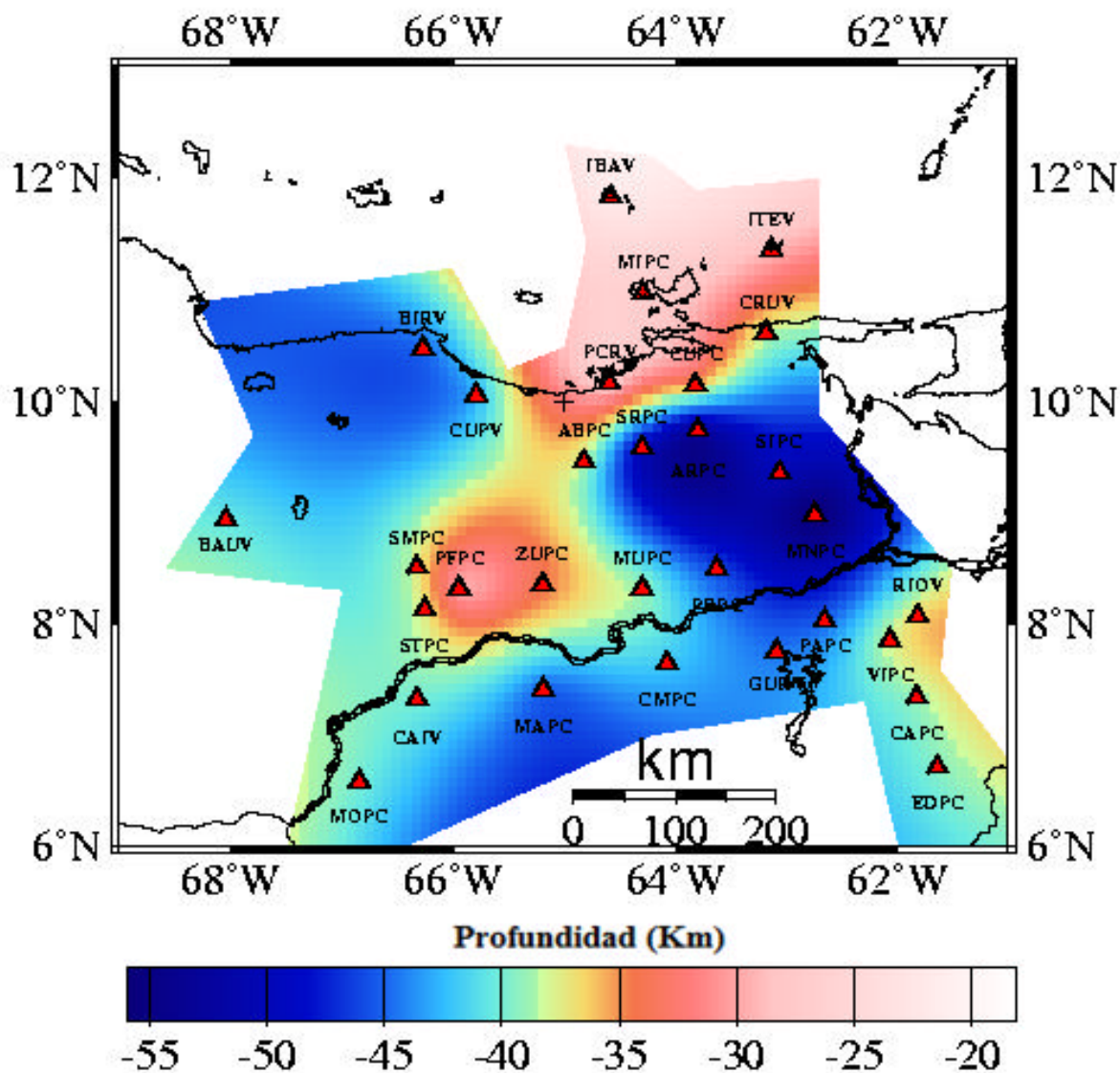


Figura 5.81. Mapa de espesores corticales calculado a partir del análisis de Funciones Receptoras.

Ahora bien, al observar la figura 5.81 se aprecia que los nuevos espesores corticales obtenidos por interpolación para la zona noroccidental del mapa son muy altos.

Otra alternativa de interpretación podría ser que los valores obtenidos en TURV y en las estaciones de la Serranía del Interior Central (LMPC, JMPC, FCPC, ROPC y ULPC) e interpretados por Magnani *et al.* (2009) como tope de la corteza inferior representan en

realidad la discontinuidad de Moho. Además, por la dualidad existente en la respuesta encontrada para la estación BIRV (figura 5.7b) se decide presentar un nuevo mapa (figura 5.82) donde se toma en cuenta el menor valor de profundidad para esta estación, siendo el mismo de 30 km.

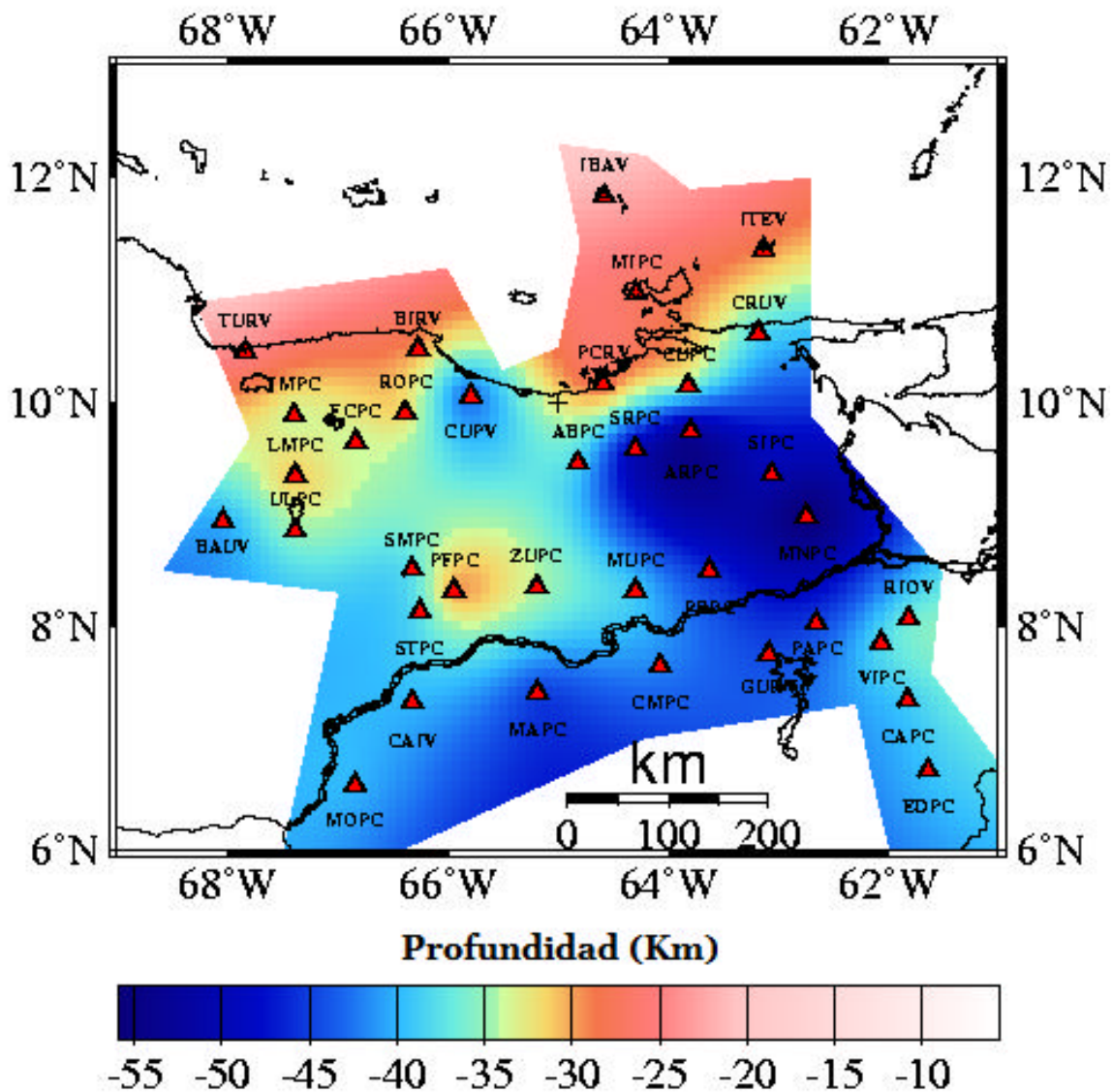


Figura 5.82. Mapa de espesores calculados para cada estación a partir del análisis de Funciones Receptoras, usando el menor valor de profundidad calculado para la estación BIRV.

Al observar la figura 5.82 se aprecia una buena definición de las cuencas de Maturín y Guárico, así como un Moho estable bajo la zona del Escudo de Guayana. Los menores espesores de corteza son alcanzados en la región donde se ubican las Islas de Sotavento y hacia la Serranía del Interior Central así como bajo la Cordillera de la Costa se obtuvo un espesor cortical bajo que en el caso específico de la cordillera implican un soporte dinámico de la topografía allí presente.

En cuanto a la estación CUPV a pesar de presentar un valor de espesor cortical alto para esta interpretación (figura 5.82), el mismo se mantiene, ya que se considera que la calidad y cantidad de eventos analizados para esta estación le confieren gran confiabilidad al resultado obtenido.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Después de aplicar la metodología señalada por Niu (apéndice A) y Quinteros (2007) se logró obtener las funciones receptoras para 39 estaciones comprendidas entre la Red Sismológica Nacional y la red temporal instaladas para los Proyectos BOLIVAR y GEODINOS. Los resultados obtenidos se consideran acordes con las condiciones geológicas de la zona de estudio, exceptuando aquellas estaciones que debido a la baja densidad de datos no arrojaron resultados plenamente confiables.

Se logró determinar el espesor cortical para cada estación a partir de las relaciones V_p/V_s estimadas para cada una de las mismas, obteniendo así el mapa de topografía de Moho, el cual muestra una profundización de la corteza hacia el sur, alcanzando su mayor profundidad bajo la Cuenca de Maturín y haciéndose más somera hacia el Escudo de Guayana bajo el cual se mantiene estable.

En general los espesores promedios encontrados se pueden resumir de la siguiente manera: Cuenca de Maturín con 47 km, Cuenca de Guárico con 36 km, Escudo de Guayana con 41 km, Serranía del Interior con 32 km, Islas de Sotavento con 26 km y 38 km para la Cordillera de la Costa, que al ser comparados con los valores hallados previamente utilizando otras metodologías (Jácome *et al.*, 2008; Schmitz *et al.*, 2008) se encuentran en concordancia con los mismos. En la zona de la Serranía del Interior Central los espesores encontrados pueden ser interpretados de dos diferentes formas, la primera como correspondientes a la profundidad de la discontinuidad de Moho y la segunda asociándolos a una interfase intra-cortical.

Considerando la interacción de las placas Caribe y Suramérica como el mayor evento geodinámico que afecta la zona norte del país se puede asociar esta interacción como una influencia en la disposición de los espesores corticales encontrados, así como a otros eventos tectónicos de menor escala, pero que también contribuyeron en la formación de las diferentes estructuras.

En cuanto al mapa de relación de Poisson obtenido para la zona de estudio, se determinó una tendencia de disminución de los valores de Poisson hasta 0,22 coincidente con la ubicación de las cuencas sedimentarias del país. Los valores de Poisson aumentan en las estructuras que bordean las cuencas sedimentarias: en la Cordillera de la Costa la relación de Poisson alcanza un valor de 0,25, en la Serranía del Interior es de 0,22 y Escudo de Guayana el valor de Poisson es de 0,25, manteniendo valores esperados para una corteza continental que se constituye principalmente de rocas de composición félsica. Mientras que al norte del mapa, bajo las Islas de Sotavento, el promedio de relación de Poisson fue de 0,27, valor que es característica de una composición intermedia a pesar de encontrarse en corteza oceánica, anómalamente gruesa.

En relación a la Cuenca de Guárico, se sugiere la realización de nuevos estudios locales (líneas sísmicas, tomografía, onda superficiales) así como la instalación de nuevas estaciones que permitan un mejor cubrimiento y definición de la zona a fin de obtener mayor información sobre la estructura cortical presente.

Para la zona de la Cordillera de la Costa, entre las estaciones BIRV y TURV se recomienda la realización de perfiles que permitan verificar el espesor cortical en esta área para tener así un mejor seguimiento de la continuidad este-oeste de dicha cordillera, ya que el valor obtenido en esta investigación para la estación TURV a pesar de ser coincidente con el calculado por Niu *et al.* (2007) se puede asociar al tope de la corteza inferior y no a la discontinuidad de Moho.

Para estudios de este tipo es recomendable que la zona de estudio posea un buen mallado de estaciones y analizar una gran densidad de datos para disminuir el error y obtener resultados de alta confiabilidad.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS CITADAS

- Ammon, C.J. (1991). **The isolation of receiver effects from teleseismic P waveforms.** Bull. Seismol. Soc. Am., 81, 2504-2510.
- Ammon, C.J. (1997). **Receiver function analysis. Publicado por Penn State, Earthquake Seismology.** [en línea]:
<<http://eqseis.geosc.psu.edu/~cammon/HTLM/RftnDocs/rftn01.html>>.
[Consulta: 2008].
- Ávila, J. (2005). **Modelado bidimensional de la corteza en la zona de colisión Caribe-Sur América, región oriental de Venezuela (estado Anzoátegui).** Trabajo Especial de Grado, Inédito. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas. 155 p.
- Bartok, P. (1993). **Pre breakup geology of the Gulf of Mexico-Caribbean: its relation to Triassic and Jurassic rift system of the region.** Tectonics, 12: 441-459.
- Bell J. (1972). **Geotectonic evolution of the southern Caribbean area.** Memoria de la Geol. Soc. Am. 132: 369-386.
- Beltrán, C. (1994). **Trazas activas y síntesis geotectónica de Venezuela. Escala 1: 2,000,000.** Memorias del VII Congreso Venezolano de Geofísica, pp. 541-547.
- Burdick, L.J y Langston C.A. (1977). **Modeling crystal structure through the use of converted phases in teleseismic body-waveforms.** Bull. Seism. Soc. Am. 67: 677-691.
- Burdick L.J y Helmberger, D.V. (1974). **Time functions appropriate for deep earthquakes.** Bull. Seis. Soc. Am, v. 64 (5): 1419-1427.
- Burke K., Fox, P.J. y Sengor, A.M.C. (1978). **Buoyant ocean floor and the evolution of the Caribbean.** Journal Geophys Research. N° 83: 3949-3954.
- Chalbaud, D. (2000). **Determinación del espesor cortical del Escudo de Guayana a partir del análisis de información sísmica de refracción.** Trabajo Especial de Grado, Inédito. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas. 117 p.
- Clark, S. (2007). **Characterizing the Southeast Caribbean- South American Plate Boundary at 64° W.** PhD Thesis. Rice University, Houston, TX, 87 p.
- Cruz, V. (2000). **Análisis global con algoritmos genéticos y cristalización simulada, aplicada a funciones de receptor: Modelos estructurales de velocidades para la corteza de la República mexicana.** Tesis de Grado, Inédito. Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F. 215 p.

- Di Croce, J. (1995). **Eastern Venezuelan Basin: Sequence Stratigraphy and Structural Evolution**. PhD Thesis, Rice University, Houston, TX, 225 p.
- Donnelly, T. (1994). **The Caribbean Sea Floor. Caribbean Geology and introduction: U.W.I. Publishers Association Kingston, p 41-64.**
- Durrheim, R y Mooney, W.(1994). **Evolution of the Precambrian lithosphere: Seismological and geochemical constraints**. Journal Geophysical Research, 99: 15359– 15374.
- Feo-Codecido, G., Smith, F., Aboud, N y Di Giacomo, E. (1984). **Basement and Paleozoic rocks of the Venezuelan Llanos basins**. Geological Society of America. Memoir 162: 175-187.
- Frisch, W. (1981). **Plate motions in the Alpine region and the correlation to the opening of the Atlantic ocean**. Geol. Rundsch. 70: 402-411.
- Ghosh N., Hall, S.A y Casey, J.F. (1984). **Seafloor spreading magnetic anomalies un the Venezuela Basin**. Geological Society of America. Memoria 162. Houston, Texas.
- Goldstein P. (1999). **SAC Home Page. Seismic Analysis Code**. [En línea]: <http://www.llnl.gov/sac/> [Consulta: enero-julio 2008].
- Goncalves, W. J. (2006). **Inversión gravimétrica 3D de la Subcuenca de Maturín**. Trabajo Especial de Grado, Inédito. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas.
- Guédez, R. (2003). **Estudio cortical en el área centro-norte y noroccidental de Venezuela a partir de datos de sísmica de refracción**. Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas. 123 p.
- Jácome, M.I., Kuszniir, N., Audemard, F., Flint, S. (2003a). **Tectono-stratigraphic Evolution of the Maturin Foreland Basin: Eastern Venezuela. in The Gulf of Mexico and Caribbean Region: Plate Tectonics, Basin Formation and Hydrocarbon Habitats**. edited by C. Bartolini et al., AAPG Mem., 2003.
- Jácome, M.I., Kuszniir, N., Audemard, F., Flint, S. (2003b). **Formation of the Maturin Foreland Basin, Eastern Venezuela: Thrust sheet loading subduction dynamic topography**. Tectonics, 22 (5): 1-17.
- Jácome, M., Rondon, K., Schmitz, M., Izarra, C y Vieira, E. (2008). **Integrated seismic, flexural and gravimetric modeling of the Coastal Cordillera Thrust Belt and the Guárico Basin, North-Central Region, Venezuela**. Tectonophysics, doi:10.1016/j.tecto.2008.03.008.

- James K. (2003). **Caribbean Plate Origin: Discussion of Arguments Claiming to Support a Pacific Origin; Arguments for an In-Situ Origin.** AAPG International Conference. Barcelona, España, Sept 21-24.
- James K. (2004). **A Simple Synthesis of Caribbean Geology.** Search and Discovery Article #30026.
- Jordan, T. H. y Frazer, L. N. (1975). **Crustal and upper mantle structure from Sp phases.** J. Geophys. Res., 80: 1504-1518.
- Kennett, B.L y Engdahl, E.R. (1991). **Travel times for global earthquake location and phase identification,** Geophys. J. Int. 122: 429-465.
- Langston, C. A. (1977). **The effect of planar dipping structure on source and receiver responses for constant ray parameter.** Bull. Seism. Soc. Am., 67: 1029-1050.
- Langston C. (1979). **Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves.** Journal of Geophysical Research., 84: 4749-4762.
- Langston, C. A. (1981). **Evidence for the subducting lithosphere under southern Vancouver Island and western Oregon from teleseismic P waves conversions.** J. Geophys. Res., 86: 3857-3866.
- Magnani, B., Zelt, C., Levander, A. y Schmitz, M. (2009). **Crustal Structure of the South America- Caribbean Plate Boundary at 67° W from controlled-source seismic data,** Journal of Geophysical Research, 114: B02312, doi:10.1029/2008JB005817.
- Masy, J. (2007). **Modelado bidimensional de la corteza en la zona de colisión Caribe Sur América en las Antillas de Sotavento.** Trabajo Especial de Grado, Inédito. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas. 160 p.
- Meschede M. y Frisch, W. (1998). **A plate-tectonic model for the Mesozoic and Early Cenozoic history of the Caribbean plate.** Tectonophysics 296: 296-291.
- Muirhead K.J. (1968). **Eliminating false alarms when detecting seismic events automatically.** Nature, 217: 533-534.
- Mohsen, A. (2004). **A receiver function study of the crust and upper mantle across the Dead Sea transform.** Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades im Fachbereich Geowissenschaften der Freien Universität Berlin.
- Niu, F. y Hawakatsu, H. (1998). **Determination of the absolute depths of the mantle transition zone discontinuities beneath China: Effect of stagnant “slabs” on transition zone discontinuities.** Earth Planets Space, 50: 965-975.

- Niu F., Inoue, H., Suetsugu, D y Kanjo, K. (2000). **Seismic evidence for a thinner mantle transition zone beneath the South Pacific Superwell.** Journal Geophysical Research., 27 (13): 1981-1984.
- Niu, F y James, D.E. (2002). **Fine structure of the lowermost crust beneath the Kaapval craton and its implications for crustal formation and evolution.** Earth Planet Sci. let., 200: 121-130.
- Niu, F., Bravo, T., Pavlis, G., Vernon, F., Rendon, H., Bezada, M and Levander, A. (2007), **Receiver function study of the crustal structure of the southeastern Caribbean plate boundary and Venezuela,** J. Geophys. Res., 112, B11308, doi:10.1029/2006JB004802.
- Owens, T.J., Zandt, G y Taylor, S.R. (1984). **Seismic evidence for an ancient rift beneath the Cumberland Plateau.** Tennessee: A detailed analysis of broadband teleseismic P-waveforms. Journal Geophysical research, 89: 7783-7795.
- Phinney R.A (1964). **Structure of the Earth's crust from spectral behavior of long-period body waves.** Journal Geophysical Research, 89: 2997-3017.
- Pindell J. y Barret, S. (1990). **Geological evolution of the Caribbean region: A plate tectonic perspective.** The geology of North America, Vol H, The Caribbean region, p. 405-431.
- Pindell, J. (1994). **Evolution of the Gulf of Mexico and the Caribbean.** Caribbean Geology an introduction: U.W.I. Publishers Association Kingston, p 13-19.
- Pindell, J y Dewey, J.F. (1982). **Permo-Triassic reconstruction of western Pangea and the evolution of the Gulf of Mexico- Caribbean region..** Tectonics, 1: 179-212.
- Pindell J. y Kennan, L. (2001). **Kinematic Evolution of the Gulf of México and Caribbean.** Gulf Coast Association of Geological Societies Conference.
- Quinteros, C. (2007). **Estudio del espesor de la corteza y caracterización de sus posibles discontinuidades en la región noroccidental de Venezuela, a partir del análisis de funciones receptoras.** Trabajo Especial de Grado, Inédito. Universidad Central de Venezuela. Caracas.195 p.
- Quinteros, C., Piñero, L., Rendón, H., (2008). **Estimación del espesor de corteza en el noroccidente de Venezuela, a partir del análisis de funciones receptoras.** XIV Congreso Venezolano de Geofísica. Caracas: Sociedad Venezolana de Ingenieros Geofísicos.

- Rada, F. (2007). **Modelado bidimensional de la corteza en la zona de colisión Caribe-Suramérica, perfiles 64° O y 65° O**. Trabajo Especial de Grado, Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas. 161 p.
- Rada, F., Schmitz, M., Ávila, J. (2008). **Modelado bidimensional de la corteza en la zona de colisión Caribe- Suramérica, perfiles 64° O y 65° O**. IX Congreso Geológico Venezolano. Caracas.
- Ríos, K., Rodríguez, I y Arminio, J.F. (2002). **Modelaje gravimétrico para estimar espesores sedimentarios del pre- Cretácico en el Graben de Espino, Cuenca Oriental de Venezuela**. XI Congreso Venezolano de Geofísica. Caracas: Sociedad Venezolana de Ingenieros geofísicos.
- Ruiz, S. (2007). **Modelado bidimensional de la corteza en la zona de colisión Caribe-Suramericana, región nororiental de Venezuela y noroccidental de Trinidad (Transecto TRIN)**. Trabajo Especial de Grado, Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas. 129 p.
- Russo, M.R y Speed, R.C. (1992). **Oblique collision and tectonic wedging of the South American continent and Caribbean terranes**, *Geology*, 20: P 447-450.
- Schmitz, M., Chalbaud, D., Castillo, J y Izarra, C. (2002). **The Crustal Structure of the Guyana Shield, Venezuela, from seismic refraction and gravity data**. *Tectonophysics*, 345 (1-4): 103-118.
- Schmitz, M., Martins, A., Chalbaud, D., Guédez, R y Contreras, R. (2003). **Estudios recientes de sismica de refracción profunda en Venezuela**. VII Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica, Barquisimeto.
- Schmitz, M., Martins, A., Izarra, C., Jácome, M.I., Sánchez, J. y Rocabado, V. (2005). **The major features of the crustal structure in north-eastern Venezuela from deep wide-angle seismic observations and gravity modeling**. *Tectonophysics*, doi.10.1016/j.tecto.2004.12.018.
- Schmitz, M., Bezada, M., Avila, J., Vieira, E., Yáñez, M., Levander, A., Zelt, C.A., Magnani, M.B., Jácome, M.I. and the BOLIVAR active seismic working group, (2008). **Crustal thickness variations in Venezuela from deep seismic observations**. *Tectonophysics*, 459 (14-26) doi: 10.1016/j.tecto.2007.11.072.
- Schubert, C. (1984). **Basin formation along the Bocono-Moron- El Pilar fault system, Venezuela**. *Journal of Geophysical research*, 89: 5711-5718.
- Sodoudi, F. (2005). **Lithospheric structure of the Aegean obtained from P and S receiver functions**. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades am Fachbereich Geowissenschaften der Freien. Universität Berlin.

- Sykes L.R., McCann W.R., Kafka A.L. (1982). **Motion of Caribbean plate during last 7 million years and implications for earlier cenozoic movements.** J. Geophys. Res. 87: 10656-10676.
- Vieira, E. (2005). **Modelado bidimensional de la corteza en la zona de colisión Caribe-Sur Americana, región central de Venezuela (Estados Aragua y Guárico).** Trabajo Especial de Grado, Inédito. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas. 154 p.
- WEC Venezuela 1997- Evaluación de Pozos.** (1997). Publicado por Schlumberger.
- Yáñez, M. (2005). **Modelado bidimensional de la corteza en la zona de colisión Caribe-Suramérica, región oriental de Venezuela (Estados Sucre y Monagas).** Trabajo Especial de Grado, Inédito. Universidad Central de Venezuela. 132 p.
- Ysaccis, R., Audemard, F.E. (2000). **A Neogene Orogenic Float in Northern South America: Eastern Venezuelan Basin vs. Caribbean Plate.** American Association of Petroleum Geologist. Annual Meeting, New Orleans, USA.
- Zandt, G y Ammon, C. (1995). **Continental crust composition constrained by measurements of crystal Poisson's ratio.** Nature, 374: 152-154.
- Zhu, L y H. Kanamori. (2000). **Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions.** J. Geophys. Res., 105 (B2): 2969-2980.