

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**METODOLOGÍA PARA CALCULAR CORRECCIONES DE ESTÁTICAS DE
ONDAS CONVERTIDAS EN LA FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO EN EL
BLOQUE AYACUCHO.**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Bra. Machado B., María G
Para optar al Título
Ingeniera Geofísica

Caracas, 2014

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

METODOLOGÍA PARA CALCULAR CORRECCIONES DE ESTÁTICAS DE ONDAS CONVERTIDAS EN LA FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO EN EL BLOQUE AYACUCHO.

TUTOR ACADÉMICO: Prof. José Cavada.
TUTOR INDUSTRIAL: Lic. Pablo Ricaurte.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Bra. Machado B., María G
Para optar al Título
Ingeniera Geofísica

Caracas, 2014

DEDICATORIA

*A Dios por curarme y permitir que este sueño se hiciera realidad.
A mi madre por amarme, quererme, cuidarme, aconsejarme, apoyarme y
comprenderme en todos los aspectos de mi vida.*

AGRADECIMIENTOS

A Dios por guiarme y cuidarme en todos caminos de mi vida y por ser mi fuerza de inspiración en la vida.

A San Judas Tadeo y San Marco de León, por toda esa Fe que sus oraciones me dieron que cada momento de dificultad.

A mi mama, porque todo lo que soy es gracias a ti, esta gran meta es tuya por estar pendiente en todos los aspectos estos años de estudios.

A mi familia en especial a mi papa gracias por apoyarme, mi hermana y Jaime gracias por apoyarme y ayudarme, y a mi sobrina Valeria que es lo más hermoso que Dios me ha dado, a mi abuela y mis tías por siempre estar pendiente.

A mi tutor industrial Pablo muchas gracias por todas las enseñanzas y el apoyo brindado más que un tutor eres un amigo.

A mi tutor académico y profesor José Cavada, por todas las enseñanzas brindadas durante mi estadía en la escuela y su apoyo para este proyecto se hicieran realidad.

A INTEVEP al Dr. José Centeno, y todo el equipo que permitió que este proyecto se realizaran en especial Jhonny Calderón y Orlando Contreras, por el apoyo y enseñanzas brindadas en todo momento que fueron necesario. Al Msc. Asdrúbal Ovalles gracias a tu experiencia fuiste fundamental para poder cumplir este proyecto. Gracias a los demás profesionales de CPDG, Juan Roomer, Yennifer Herrera.

A los doctores gracias por ayudarme a sanar en un momento tan crucial.

A mi novio por entender, apoyarme y darme animo en los momentos más difícil.

A mis brujitas por Yuly, Ari, Denise y Sasha, en especial a mi Yuly gracias por todo eso momentos bonitos y no que hemos compartidos, más que una amiga eres mi hermana de la vida.

A mis compañeros de geofísica gracias por todos esos momentos de estudios que al lado de ustedes fue muchos más agradables Jesús, Lisfer, Diane, Elizabeth, Loveida, Fiorela, katheryn.

A los chicos tesista Hugo, Wai, Vanesa, Leydi y Zury y a mi querida Verónica que fuiste como mi compañera de tesis y mi amiga gracias por hacer este momento más agradable.

ACTA DE APROBACIÓN

RESUMEN

Machado B. María G

METODOLOGÍA PARA CALCULAR CORRECCIONES DE ESTÁTICAS DE ONDAS CONVERTIDAS EN LA FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO EN EL BLOQUE AYACUCHO

Tutor académico: Prof. José Cavada. Tutor industrial: Lic. Pablo Ricaurte

Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 2014, pp.

Palabras claves: Faja Petrolífera, correcciones estáticas, ondas convertidas, sísmica multicomponente.

- **Resumen:** La presente investigación tiene como objetivo fundamental validar una metodología para la aplicación y determinación de las correcciones estáticas de onda convertida en el procesamiento sísmico multicomponente. Con el fin de dar una posible solución a la determinación de las correcciones estáticas en el caso de onda sísmica convertida. Para tal fin, se ejecutó un flujo de trabajo para procesar datos sísmicos de un área del bloque Ayacucho de la faja petrolífera del Orinoco, que consistió en el procesamiento de la onda P y de la onda S, en el análisis de ondas superficiales y determinación de la diferencias de tiempos de PPP y PPS, permitiendo así el cálculo de las estáticas de elevación y de capa meteorizada. Lo cual dio como resultado que el promedio de estática de receptor para la onda PP es 17 ms, y la estática de la onda convertida en la capa meteorizada, varía en un rango de 9 a 35 ms y para la estática de elevación un valor de 31 a 21 ms, que ambas varía de acuerdo a la velocidad de onda S utilizada. Las estáticas totales PS en el receptor son de 2,34 – 3,22 veces las estáticas en el receptor PP, lo cual se encuentra en el rango establecido por muchos autores que afirma que estas debe encontrarse entre 2 y 10. Finalmente en los apilados obtenidos de PS, se observan mejoran sustanciales tras la aplicación de las estáticas con la metodología propuesta en comparación con el apilado de elevación PS

ÍNDICE DE CONTENIDO

página

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ACTA DE APROBACIÓN	iii
RESUMEN	iv
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema.	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo general	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
1.4 Ubicación del área de estudio.....	3
CAPÍTULO II.....	5
MARCO GEOLÓGICO.....	5
2.1. Cuenca Oriental de Venezuela	5
2.2. Estratigrafía local	7
2.2.1. Formación Las Piedras	8
2.2.2. Formación Mesa	9
CAPÍTULO III	10
MARCO TEÓRICO.....	10
3.1. Onda	10
3.1.1. Tipos de ondas.....	10
3.1.1.1. Las ondas de cuerpo	10
3.1.1.2. Las ondas superficiales.....	11
3.2. Sísmica de refracción	12
3.2.1. Ley de Snell.....	13

3.2.2. Principio de Fermat	14
3.2.3. Principio de Huygens	15
3.3. Sísmica de reflexión	15
3.5. Sísmica multicomponente	16
3.5.1. Ondas convertidas	17
3.6. Secuencia de procesamiento.....	19
3.6.1 Lectura de los datos.....	19
3.6.2 Asignación de geometría.....	20
3.6.3. Separación de las 3 componentes.....	21
3.6.4. Rotación de las componentes	21
3.6.4. Recuperación de ganancias o amplitudes.....	22
3.6.5. Pruebas de filtros de ground roll.	23
3.6.6. Análisis de velocidades	25
3.6.7. Apilamiento.....	26
3.6.8. Correcciones estáticas	27
3.6.9. Estáticas de elevación.....	28
3.6.9. Estáticas de refracción.....	28
3.7. Metodología propuesta para las correcciones estáticas por elevación y capa meteorizada para ondas convertidas.....	34
3.8. Análisis multicanal de ondas superficiales.....	37
CAPÍTULO IV	39
MARCO METODOLÓGICO.....	39
4.1. Recopilación de información.	39
4.2. Carga de los datos sísmicos al programa ECHOS, con los parámetros de adquisición del proyecto Huyapari 11M3D3C.....	40
4.3. Separación de los datos en tres componentes.....	43
4.4. Procesamiento de la onda PP.	45

4.5. Procesamiento de PS	51
4.6. Procesamiento de ondas superficiales	56
4.7. Análisis de factibilidad basada las refracciones PPP y PPS.....	61
4.8. Determinación de la diferencia de tiempo de las refracciones PPP-PPS experimentalmente.	62
CAPÍTULO V.....	67
ANÁLISIS DE RESULTADOS	67
5.1. Apilado de estática de elevación de P en la línea 378 en la dirección <i>inline</i> ...	67
5.2. Apilado de estáticas de refracción de P en la línea 378 en la dirección <i>inline</i> .	68
5.4. Análisis de ondas superficiales	70
5.4. Análisis de factibilidad basada en las diferencias de las refracciones PPP y PPS.	72
5.5. Determinación de la diferencia de tiempo de las refracciones PPP-PPS.	73
5.6. Mapas de refracciones y correcciones estáticas mediante el programa Echos.	75
5.7. Apilados de estáticas de elevación PS y comparación de los apilados de ondas convertidas en la capa meteorizada.	77
CAPÍTULO VI	87
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	87
BIBLIOGRAFÍA	90
APENDICES.....	92

ÍNDICE DE FIGURAS

página

Figura 1. Ubicación del área en estudio dentro de la faja petrolífera del Orinoco	4
Figura 2. Mapa de la faja petrolífera del Orinoco.	5
Figura 3. Sector de la cuenca Oriental que muestra el corte pertenece a la subcuenca de Guárico..	6
Figura 4. Columna estratigráfica de los bloques de la faja petrolífera del Orinoco.	8
Figura 5. Movimiento de las ondas de cuerpo. (a) onda P y (b) onda S.....	11
Figura 6. Movimiento de la onda Rayleigh.	12
Figura 7. Movimiento de onda Love.	12
Figura 8. Ondas directa, refractada y frontal en el subsuelo	13
Figura 9. Tetra partición de la energía de una onda P incidente en una discontinuidad horizontal.....	14
Figura 10. Trayectoria de tiempo mínimo.	15
Figura 11. Principio de Fermat	15
Figura 12. Proceso de adquisición de datos de sísmica de reflexión.....	16
Figura 13. Grabación de un registro multicomponente.	17
Figura 14. Propagación de una onda convertida en un medio isotrópico.....	18
Figura 15. Geometría de los datos, (a) geometría correcta y (b) geometría no correcta.	20
Figura 16. Rotación de las componentes	22
Figura 17. Curva de ganancia mediante una curva logarítmica creciente y una curva exponencial decreciente.....	23
Figura 18. Divergencia esférica para datos P-SV.....	23
Figura 19. Tipos de filtros lineales	25
Figura 20. Corrección de NMO.....	26
Figura 21. Punto asintótico de conversión.....	26
Figura 22. Corrección estática por elevación	28
Figura 23. Representación de los rayos cerca de superficie.	29
Figura 24. Efecto de las estáticas sobre las hipérbolas de reflexión	32
Figura 25. Efecto de las estáticas un apilado sintético.	33
Figura 26. Esquema general del problema de las estáticas.....	33

Figura 27. Esquema de estado del arte actual en correcciones estáticas PS.....	34
Figura 28. Modos de conversión refractados más energéticos.....	36
Figura 29. Recorrido de viaje de PPP Y PPS.	36
Figura 30. (a) Identificación de refracción PPP sobre la componente vertical, (b) identificación de refracción PPS sobre la componente radial y (c) identificación de refracción PPS sobre el dato filtrado componente radial 4-8-35-60 Hz.....	36
Figura 31. Procesamiento de las ondas superficiales	38
Figura 32. Esquema de flujo de la metodología de procesamiento.	39
Figura 33. Datos en la componente vertical con los primeros quiebres.	40
Figura 34. Ubicación de fuentes, receptores y refracciones.	42
Figura 35. Mapa de cobertura (a) Onda PP y (b) Onda PS.	42
Figura 36. Datos crudos en el formato interno del programa Echos.	43
Figura 37. Datos en dirección <i>inline</i>	44
Figura 38. Datos en la dirección <i>crossline</i>	44
Figura 39. Datos en la componente vertical con la presencia del <i>ground roll</i>	46
Figura 40. Selección de las velocidades P con la semblanza.	47
Figura 41. Modelo de velocidades de onda P en la <i>inline</i> 378.....	47
Figura 42. Enmudecimientos de los datos en la componente vertical.....	48
Figura 43. Mapa de elevación.....	49
Figura 44. Selección de las primeras llegadas con el módulo FBNET.	50
Figura 45. Primeras llegadas en la ventada <i>offset</i> y tiempo.....	50
Figura 46. Datos de formato RR.....	52
Figura 47. Filtrado del <i>ground roll</i>	53
Figura 48. Selección de tiempo y gamma con las semblanzas.....	54
Figura 49. Mapa de relación Vp/Vs, en la <i>inline</i> 400.....	54
Figura 50. Esquema para corrección estática total.	55
Figura 51. Esquema de procesamiento de las ondas superficiales.	56
Figura 52. Disparos seleccionados para el análisis espectral de ondas superficiales y para el análisis de refracciones PPP-PPS.	56
Figura 53. Asignación del intervalo de receptores en 12,5 metros.....	58
Figura 54. Ventana de “ <i>pick phase velocity</i> ”.....	58
Figura 55. Curva de velocidad de fase versus frecuencia con una selección de puntos de buena calidad.	60

Figura 56. Perfil de velocidades de ondas de corte V_s , finalizada la inversión.	61
Figura 57. Esquema para obtener la diferencia de tiempo de las refracciones PPP-PPS.	62
Figura 58. Filtro pasa banda para los datos de la componente vertical.	63
Figura 59. Selección de las primeras llegadas para la componente vertical.....	64
Figura 60. Filtro pasa banda para los datos de la componente radial.	64
Figura 61. Segundas llegadas de los datos en la componente radial.	65
Figura 62. Valores de los tiempos de viaje de refracciones PPP y PPS en <i>block</i> de notas.	66
Figura 63. Apilado de estática de elevación en P en el inline 378.	67
Figura 64. Apilado de estática de refracción para la onda P.	68
Figura 65. Apilado de estáticas de elevación PS <i>inline</i> 400.	69
Figura 66. Mapa de velocidad de la onda S para la capa superior.	71
Figura 67. Mapa de las velocidades de la onda S para la capa inferior.	71
Figura 68. Mapa de las velocidades de la onda P promediada por espesores obtenidas del MASW.	72
Figura 69. Gráfico de la diferencia de tiempos PPP –PPS.	73
Figura 70. Gráfico de la diferencia de tiempos PPP –PPS.	73
Figura 71. Mapa de diferencias de las refracciones PPP-PPS con filtro pasa bajos.....	74
Figura 72. Mapa de diferencia de tiempos de las refracciones PPP-PPS.	75
Figura 73. Mapa de velocidad de la onda P en la capa superior.	76
Figura 74. Mapa de velocidad de la onda P en la capa inferior.	76
Figura 75. Mapa de corrección estática, mediante la ecuación 10 y para datos filtrados.	77
Figura 76. Apilado de estáticas de elevación PS, con V_{s1} de 600 m/s en la <i>inline</i> 350 ..	78
Figura 77. Apilado de estáticas de elevación PS, con V_{s1} de 410 m/s en la <i>inline</i> 350. 79	79
Figura 78. Comparación entre los apilados PS <i>inline</i> 400, estática de elevación (superior) y estáticas propuestas (inferior, caso diferencias de tiempos sin filtrar y $V_{s1}=410\text{m/s}$)	80
Figura 79. Comparación entre los apilados PS <i>inline</i> 400, estática de elevación (superior) y estáticas propuestas (inferior, caso diferencias de tiempos sin filtrar y V_{s1} Variable).	81

Figura 80. Comparación para apilados en la <i>inline</i> 350, para diferencias de tiempo de refracciones PPS-PPP obtenidas para datos filtrados.	82
Figura 81. Visión cercana de apilado <i>inline</i> 350, comparación entre el apilado por estáticas de elevación (superior) y las estáticas del análisis de refracciones PPS-PPP, realizado con los datos sin filtrar (inferior).	83
Figura 82. <i>Gather</i> , a la izquierda sin estática y a la derecha con estática.	84

ÍNDICE DE TABLAS página

Tabla 1. Parámetros de adquisición del levantamiento en la zona de estudio.	41
Tabla 2. Apilados obtenidos por elevación por PS.	78
Tabla 3. Apilados obtenidos por las ecuaciones 10 y 14.	78
Tabla 4. Valores de correcciones estáticas para la onda convertida.	85
Tabla A.1. Valores de velocidades de corte, compresionales y promedio de P obtenidos del análisis multiespectral de ondas superficiales.	92
Tabla A.2. Valores generados mediante la determinación de diferencias de tiempo de refracciones PPS-PPP, para dos capas horizontales	93

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema.

Los métodos geofísicos de prospección se utilizan para localizar en el subsuelo recursos útiles tales como hidrocarburos, minerales y aguas subterráneas.

La sísmica de reflexión es un método geofísico de prospección que permite obtener información detallada del subsuelo mediante imágenes, con las cuales es posible estudiar y reconstruir las estructuras geológicas presentes a profundidades de interés económico.

La faja petrolífera del Orinoco es la fuente de reservas de hidrocarburos líquidos más grande en el mundo, la cual abarca una extensión 55.314 km² y una área de explotación actual de 11.593 km² y está ubicada al sur de los estados Guárico, Anzoátegui, Monagas y Delta Amacuro, paralela al curso del río Orinoco. Está dividida en cuatro grandes áreas de oeste a este: Boyacá, Junín, Ayacucho y Carabobo, a su vez está segmentada en 29 bloques de 500 km² cada uno aproximadamente (PDVSA, 2013). Es evidente que la exploración de hidrocarburos cada día tiene más importancia, para el país.

En la zona de la faja del Orinoco se dificulta la obtención de buenas imágenes mediante el procesamiento de datos sísmicos, debido a la variabilidad de las distribuciones de las velocidades cerca de la superficie; éstas afectan la calidad de las imágenes sísmicas, por lo que la industria petrolera requiere de modelos más precisos de velocidad de ondas sísmicas cerca de la superficie, para permitir un adecuado diseño de adquisición y procesamiento de datos sísmico.

A pesar de los avances tecnológicos, se sigue teniendo la necesidad de datos de mayor resolución que exigen mejora en las correcciones estáticas, debido a que los errores en éstas conducen a una pérdida de la resolución sísmica, tanto temporal como espacial y una interpretación no adecuada. De lo anterior, derivan una serie de inconvenientes al intérprete como anomalías estructurales falsas, líneas de referencia variables de eventos sísmicos y la calidad de los datos sísmicos no son óptimos.

En particular, debido al auge de levantamientos de sísmica multicomponente en el país, es necesario establecer flujos de procesamiento óptimos para la obtención de imágenes sísmicas tanto de onda compresional (PP) como de onda convertida (PS), siendo de interés ahondar sobre la obtención de la imagen PS, la cual es obtenida mediante el tratamiento de las señales correspondientes a las componentes horizontales (ondas de cizalla S). Un problema identificado dentro de la secuencia de procesamiento de la onda convertida, es el que concierne al cálculo de las estáticas, más específicamente las del receptor, pues en la práctica convencionalmente, se emplean al apilado en receptor común para determinar dicha estática, lo cual representa un método matemático y sin basamento físico; también es usual el escalar las soluciones del receptor obtenida en el procesamiento de datos de onda P, dicho escalar es el cociente entre las velocidades de onda P y S, de tal modo que se realizan pruebas hasta la obtención de la mejor imagen PS. Debido a todo lo expuesto, en esta investigación se plantea la validación de una propuesta de metodología para la determinación de las correcciones estáticas para la obtención de la imagen de onda convertida, mediante el procesamiento sísmico multicomponente de datos de reflexión provenientes de un área de la faja petrolífera del Orinoco en el bloque Ayacucho.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Validar una metodología para la aplicación y determinación de las correcciones estáticas de onda convertida en el procesamiento sísmico multicomponente.

1.2.2 Objetivos específicos

- Diseñar una metodología para cálculos de estáticas receptoras de ondas convertidas PS.
- Construir un modelo de capa meteorizada mediante el método de refracción (2 capas planas).
- Contrastar las diferencias de tiempos de viaje de refracciones PPP y PPS.
- Realizar un análisis de factibilidad para la aplicación de la metodología para determinar las estáticas de onda convertida basada en las diferencias de las refracciones PPP y PPS.

- Obtener un modelo de velocidades de ondas de corte que servirá de información previa para la metodología propuesta.
- Comparar la calidad de la imagen obtenida con este método con respecto a la obtenida por el método normal.

.3 Justificación

La finalidad de esta investigación es dar una posible solución a la determinación de las correcciones estáticas en el procesamiento de datos sísmicos multicomponente en el caso de onda sísmica convertida. Para tal fin, se ejecutará un flujo de trabajo para procesar datos sísmicos multicomponente de un área del bloque Ayacucho de la faja petrolífera del Orinoco, que incluya la metodología propuesta.

Como se mencionó anteriormente, el cálculo de las correcciones estáticas en el procesamiento de datos sísmicos multicomponente representa un tema abierto (no posee una solución única), además representa una etapa crucial en el tratamiento de los datos de tierra, debido a que su correcta aplicación se traduce en una mejor calidad de las secciones de imágenes sísmicas.

Una buena solución de corrección estática es deseable por varias razones, siendo la principal y la más relevante, la obtención de una imagen sísmica de calidad, la cual permite y facilita una interpretación estructural correcta, así como también lograr una alta resolución en la sección que se pueda utilizar para la interpretación estratigráfica.

1.4 Ubicación del área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en el oriente de Venezuela, en la cuenca Oriental de Venezuela, específicamente en el bloque Ayacucho de la faja petrolífera del Orinoco, al sur del estado Anzoátegui. La zona cubre un área aproximada de 500 km² (Figura 1).

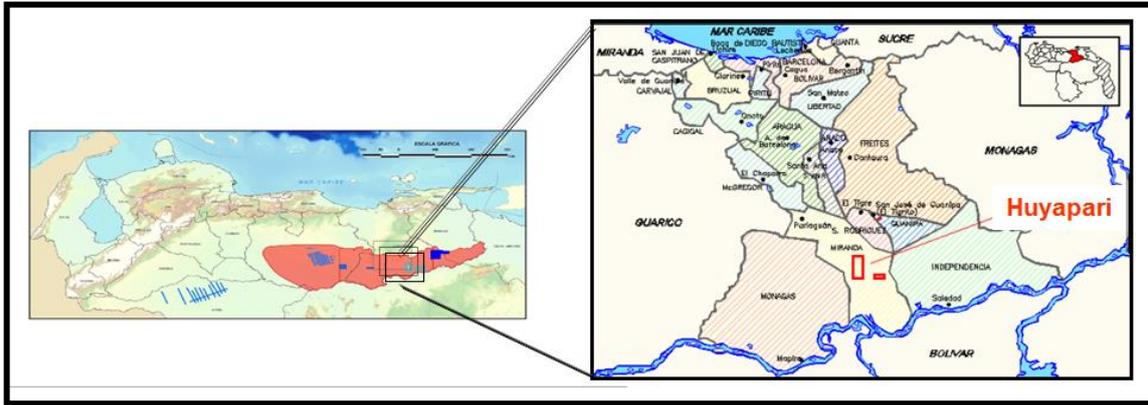


Figura 1. Ubicación del área en estudio dentro de la faja petrolífera del Orinoco (Ricaurte, 2014).

CAPÍTULO II

MARCO GEOLÓGICO

2.1. Cuenca Oriental de Venezuela

La cuenca Oriental de Venezuela es una depresión estructural ubicada en la región centro-este del país, entre las coordenadas 8° y 11° de latitud norte y 61° y 66° de longitud oeste. Comprende los estados Guárico, Anzoátegui, Monagas, así como la extensión meridional de los estados Sucre y Delta Amacuro, prolongándose mar adentro hacia la plataforma deltana y el sur de Trinidad (González de Juana *et al.*, 1980)

(Parnaud, 1999) plantea que la cuenca Oriental es una cuenca antepaís flexurada, que se desarrolló durante el Neógeno sobre un antiguo margen pasivo Mesozoico del cratón suramericano. (Di Croce *et al.*, 1999) estiman que el área total, se aproxima a los 200.000 km², es elongada y asimétrica, contiene alrededor de 8 km de espesor de sedimentos terciarios, por encima del basamento ígneo-metamórfico del cratón guayanés localizado al sur de río Orinoco.

Se encuentra limitada estructuralmente al norte por la falla de El Pilar, al sur por el lineamiento de El Baúl, que la separa de la cuenca Barinas-Apure.

En la parte meridional de la cuenca Oriental de Venezuela se encuentra la faja petrolífera del Orinoco es la fuente de reservas de hidrocarburos líquidos más grande en el mundo, la cual comprende una extensión 55.314 km² y una área de explotación actual de 11.593 km². Está ubicada al sur de los estados Guárico, Anzoátegui, Monagas y Delta Amacuro, paralela al curso del río Orinoco (Figura 2). Está dividida en cuatro grandes aéreas de oeste a este en Boyacá, Junín, Ayacucho y Carabobo, a su vez está segmentada en 29 bloques de 500 km² cada uno aproximadamente (PDVSA, 2013).



Figura 2. Mapa de la faja petrolífera del Orinoco. (PDVSA, 2013).

La cuenca Oriental de Venezuela costa-adentro está subdividida en dos subcuencas: la subcuenca de Guárico al oeste (Figura 3) y la de Maturín al este. Estas cuencas están separadas por estructuras complejas asociadas al sistema de fallas de Anaco y sus estructuras de inversión asociadas (Di Croce *et al.*, 1999).

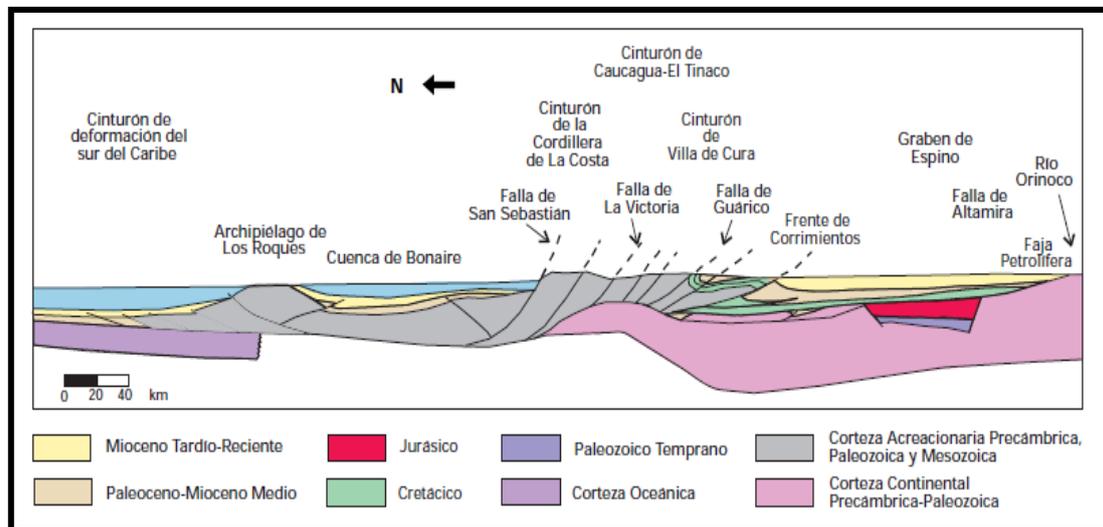


Figura 3. Sector de la cuenca Oriental que muestra el corte pertenece a la subcuenca de Guárico. (Yoris & Ostos, 1997).

La estratigrafía de la serranía del interior oriental representa en buena parte la sedimentación del flanco norte de la subcuenca de Maturín, una espesa y compleja secuencia sedimentaria que abarca desde el Cretácico Inferior hasta el Pleistoceno. El flanco sur, en cambio, presenta una estratigrafía más sencilla, semejante a la estratigrafía de la subcuenca de Guárico en el subsuelo, con el grupo Temblador en su parte inferior, como representante del Cretácico, y un Terciario suprayacente de edad fundamentalmente Oligoceno-Pleistoceno, en el que se alternan ambientes fluvio-deltaicos y marinos someros, hasta su relleno final de ambientes continentales.

En la serranía del Interior la roca madre principal se encuentra representada por el grupo Guayuta, particularmente la formación Querecual, la cual llega a tener más del doble de espesor que su equivalente (formación La Luna) en Venezuela occidental, con similares características de roca madre. Debido al espesor considerable de la secuencia neógena en el flanco norte de la subcuenca, no se puede establecer con claridad, debido a que se produce el cambio lateral de las unidades cretácicas hacia el grupo Temblador del sur; sin embargo, se estima que para los equivalentes laterales del área mayor de Oficina, el

caso pudo haber sido muy semejante, con generación por una roca madre cretácica cercana.

Para los campos del norte de Monagas, la roca madre por excelencia debe haber sido cretácica (grupo Guayuta), aunque no se descarta el aporte de secuencias más jóvenes, con materia orgánica de afinidad continental (la superficie de la formación Naricual es muy carbonosa, por ejemplo). Los yacimientos más importantes son de edad terciaria; en los campos del norte de Monagas están constituidos por las formaciones Carapita, Naricual, Los Jabillos y Caratas. También se han encontrado buenos yacimientos en las areniscas de la formación San Juan (Cretácico Tardío), y en unidades tan jóvenes como las formaciones La Pica (Mioceno) y Las Piedras-Quiriquire (molasa mio-pliocena).

Revisten particular importancia las estructuras de tipo compresivo, como las del campo El Furrial para el entrapamiento de los hidrocarburos. Las unidades sello regionales, importantes para la secuencia cretácico-terciaria en el flanco norte de la subcuenca, son las formaciones Vidoño, Areo y Carapita.

Hacia el sur de la subcuenca de Maturín, en los campos de Oficina en Anzoátegui y sus equivalentes orientales en Monagas, los yacimientos importantes se encuentran en las formaciones Merecure y Oficina, con sellos de lutitas extensas dentro de estas mismas unidades; la formación Freites suprayacente también constituye un sello regional de gran importancia, (Yoris & Ostos, 199).

2.2. Estratigrafía local

La columna estratigráfica del área de estudio comprende desde la formación Hato Viejo del Paleozoico, hasta la formación más suprayacente llamada Mesa, del Pleistoceno, donde todas las secuencias sedimentarias descansan sobre el basamento ígneo-metamórfico del complejo basal de Guayana del Precámbrico caracterizado por presentar rocas ígneas y metamórficas como granito gnéísico, diorita cuarcífera gnéísica, entre otros, que se encuentran intensamente plegadas y erosionadas (Figura 4).

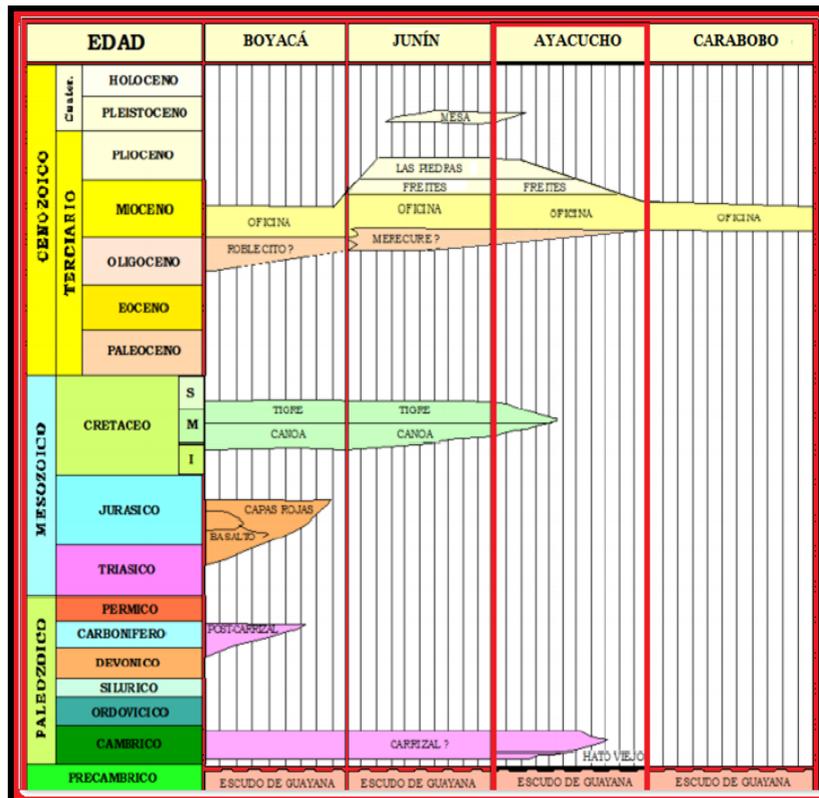


Figura 4. Columna estratigráfica de los bloques de la faja petrolífera del Orinoco, (Cabeza, 2012).

Las principales formaciones geológicas que comprenden el bloque Ayacucho se observan en la Figura 4, sin embargo las formaciones que tiene más relevancia para esta investigación: son Mesa y Las Piedras debido que son las formaciones que afloran en el bloque Ayacucho.

2.2.1. Formación Las Piedras

La formación aflora en la porción septentrional de los estados Anzoátegui y Monagas. En el subsuelo se extiende al este hasta Pedernales, territorio Delta Amacuro y golfo de Paria. Hacia el sur, llega a las cercanías del río Orinoco; en la faja petrolífera en la sección tipo, la formación tiene 1005 m de espesor.

En la localidad tipo, la formación Las Piedras consiste en areniscas micáceas, friables, de grano fino y colores gris claro a gris verdoso, interlaminada con lutitas gris a verdoso, arcillitas sideríticas, grises, lutitas ligníticas y lignitos (Hedberg, 1950). También se encuentran algunas calizas arenosas duras y de color verde. En la parte superior predominan arcillas pardo-rojizas yesíferas, con ocasionales capas de arenisca

en capas delgadas. González de Juana *et al.*, (1980) la colocaron en el Plioceno, basado en su posición estratigráfica discordante encima de la formación Freites de edad decididamente Mioceno Tardío. Los pocos fósiles y sus relaciones estratigráficas indican la edad de Mioceno Tardío a Plioceno.

2.2.2. Formación Mesa

La formación Mesa se extiende por los llanos centro-orientales y orientales (estados Guárico, Anzoátegui, Monagas). Se encuentran algunos afloramientos en los estados Sucre y Bolívar, inmediatamente al sur del río Orinoco. El espesor de la formación Mesa es muy variable, pero en términos generales disminuye de norte a sur, como consecuencia del cambio en la sedimentación fluvio-deltaica y aumenta de oeste a este, por el avance de los sedimentos deltaicos (González de Juana *et al.*, 1980).

En los límites norte y sur de la mesa de Guanipa (González de Juana *et al.*, 1946), la formación Mesa presenta una litología de arenas de grano grueso y gravas con cemento ferruginoso cementado y muy duro; conglomerado rojo a casi negro, arenas blanco-amarillentas, rojo y púrpura, con estratificación cruzada; además contiene lentes discontinuos de arcilla fina arenosa y lentes de limolita.

Al suroeste de Maturín, la formación Mesa está compuesta por arcillas moteadas y abigarradas, con nódulos sin arena. En los llanos centro-orientales, la formación, está constituida por arenas no compactadas. Los sedimentos de la formación Mesa, gradan de norte a sur, de más gruesos a más finos al alejarse de las cadenas montañosas del norte; desde la parte central de Monagas al macizo de Guayana, gradan de más finos a más gruesos.

Con base en la relación transicional con la formación Las Piedras (Plioceno), se ha postulado una edad Pleistoceno para la formación Mesa. (Zinck y Urriola, 1970) y (Coplanarh, 1974) intentaron establecer una cronología de la formación, con base en la evolución de los suelos y usando el esquema estratigráfico originalmente de terrazas (T) y luego cronológico del Cuaternario (Q). De esta forma, sugirieron que los suelos desarrollados sobre la formación Mesa, pertenecen al Pleistoceno Temprano.

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

3.1. Onda

Es una perturbación que se propaga a través del cuerpo o en la superficie de un medio sin que ocurra movimiento de material. Las ondas se caracterizan usualmente por la periodicidad. El movimiento ondulatorio es descrito por la siguiente ecuación 1:

$$\nabla^2 \psi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = \left(\frac{1}{V^2} \right) \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad [\text{Ec. 1}]$$

Donde ψ es el desplazamiento de la onda (presión, rotación, dilatación, etc) y V la velocidad de la onda (Sheriff, 2002)

3.1.1. Tipos de ondas

3.1.1.1. Las ondas de cuerpo

Se propagan a través de todo el volumen de material elástico. Cuando el material del subsuelo es isótropo solo pueden propagarse dos tipos de ondas de cuerpo: las ondas P y las ondas S (Sheriff, 2002).

Las ondas elásticas que se propagan por el aire y el agua son más conocidas como “ondas acústicas u ondas sónicas” (sean o no audibles por el ser humano) y las que se propagan por el subsuelo se conocen como “ondas sísmicas”; sin embargo, desde el punto de vista físico no se diferencian.

La energía de deformación elástica liberada por una fuente sísmica se propaga por el subsuelo mediante ondas. Pero estas ondas adoptan diversas características. Según el espacio en que se propagan existen ondas superficiales y ondas de cuerpo. Las ondas superficiales sólo se originan y propagan cerca de la superficie entre dos medios con propiedades elásticas distintas. Las más importantes son las que se propagan cerca de la superficie del suelo y entre las que se cuentan las ondas Rayleigh y las ondas Love (Figura 5). Estas son las ondas que más daño causan durante los terremotos y también las que mayores problemas causan en los registros de prospección sísmica por reflexión, porque debido a su gran amplitud ocultan las débiles reflexiones en las capas a mayor profundidad.

Las ondas P, también se conocen como ondas primarias, ondas irrotacionales u ondas compresionales. Como ellas presentan siempre mayor velocidad que las ondas S y que las ondas superficiales, son siempre las primeras en llegar a cualquier distancia de la fuente. En materiales isótropos las ondas P se caracterizan porque el movimiento de las partículas del suelo al paso de la onda sigue la misma dirección en que ésta se propaga.

Las ondas S, también se conocen como ondas secundarias, ondas de corte u ondas equivolumentales. Siempre tienen menor velocidad que las ondas P y las partículas del suelo se mueven en una dirección ortogonal a la dirección en que se propaga la onda.

Las ondas S se pueden descomponer en dos componentes vectoriales: ondas SV en las que el movimiento ocurre enteramente en un plano vertical, y ondas SH en las que el movimiento ocurre en un plano horizontal (Cavada, 2000)

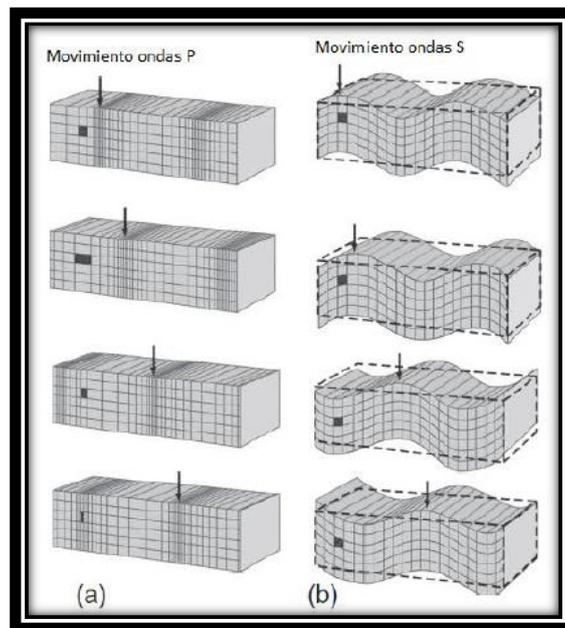


Figura 5. Movimiento de las ondas de cuerpo. (a) onda P y (b) onda S, (Everett, 2013)

3.1.1.2. Las ondas superficiales

Estas ondas se llaman ondas superficiales porque que están "atadas" a la superficie, solo se propagan en dos medios con propiedades elásticas diferentes y disminuyen a medida que se encuentra más alejadas de la superficie y se atenúan con la profundidad. Entre ellas se encuentra las ondas Rayleigh y Love.

Las ondas Rayleigh causan un movimiento rodante parecido a las ondas del mar y sus partículas se mueven en forma elipsoidal en el plano vertical. El movimiento de las

partículas es retrógrado con respecto al avance de las ondas, como se observa en la Figura 6, (Pineda, 2011)

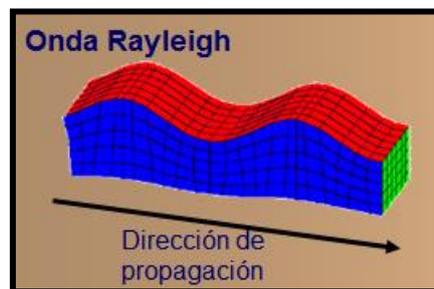


Figura 6. Movimiento de la onda Rayleigh (Pineda, 2011).

Las ondas de Love se generan sólo cuando un medio elástico se encuentra estratificado y se propagan con un movimiento de las partículas, perpendicular a la dirección de propagación, como las ondas S, sólo que polarizadas en el plano de la superficie de la Tierra, es decir sólo poseen las componentes horizontales a la superficie, Figura 7.



Figura 7. Movimiento de onda Love, (Pineda, 2011).

3.2. Sísmica de refracción

El método se basa en el registro de los frentes de onda, generados por una fuente artificial de energía, leyendo en los registros los tiempos de los primeros arribos. Éstos pueden deberse a la onda directa o bien a aquellas ondas que se refractan en el subsuelo con el ángulo crítico, viajan por la interfaz con la velocidad del medio infrayacente y retornan hacia la superficie como ondas frontales, cuya velocidad es entonces la del medio suprayacente, dado que las ondas siempre se mueven con la velocidad propia de la capa que están atravesando, como se muestra en la Figura 8. Obviamente depende de si se trata de ondas P, que son las que casi siempre se registran, o bien S o superficiales.

El método de sismica de refracción se aplica siempre que se encuentren medios con impedancias acústicas ($Z = \rho \cdot V$) contrastantes, con la condición esencial dada por la ley de Snell, Figura 9.

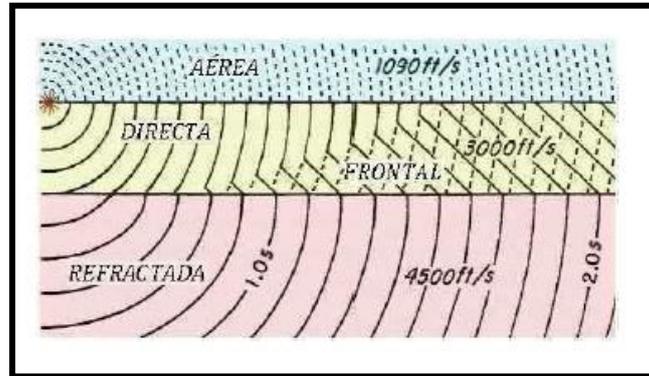


Figura 8. Ondas directa, refractada y frontal en el subsuelo (Chelotti, 2010)

3.2.1. Ley de Snell

Una onda sísmica que incide sobre una discontinuidad del subsuelo sufrirá una partición de su energía. Parte de su energía se reflejará y parte se transmitirá a través de la discontinuidad. A su vez, la energía reflejada tendría dos componentes: una onda reflejada compresiva (onda P reflejada) y una onda reflejada de corte o cizalla (onda S reflejada).

Lo mismo ocurre para la energía transmitida. Esto se puede apreciar en la ecuación 2, donde se muestra una onda P que incide con un ángulo θ_i sobre una discontinuidad (siempre medido con respecto a la normal) que separa dos medios con propiedades elásticas propias (lo mismo ocurre cuando la onda incidente es una onda S). Obviamente, la suma de todas las energías reflejadas y transmitidas será igual a la energía total de la onda incidente. Ahora bien, la propiedades físicas del medio y del fenómeno de propagación de ondas hacen que la dirección con que se reflejan o transmiten las ondas varíe de acuerdo a determinadas leyes. Por eso, una onda P que incide con un ángulo θ_i , se refleja como onda P con un ángulo θ_r , que resulta ser igual a θ_i , pero se transmite con un ángulo θ_t , que es en general diferente al ángulo de incidencia, Figura 9. La fórmula matemática que expresa esta relación está dada por la Ley de Snell:

$$\frac{\sin \theta_i}{v_{p1}} = \frac{\sin \theta_r}{v_{p1}} = \frac{\sin \theta_t}{v_{p2}} \quad [\text{Ec. 2}]$$

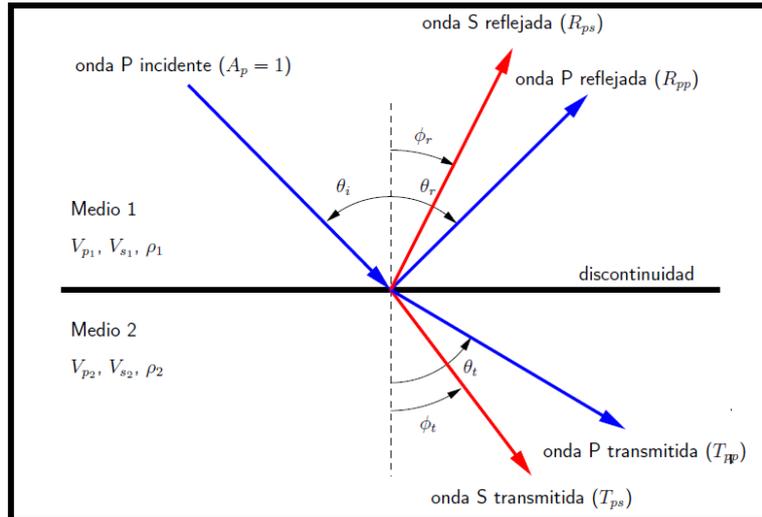


Figura 9. Tetra partición de la energía de una onda P incidente en una discontinuidad horizontal (Velis, 2007).

Claramente la primera igualdad implica que $\theta_i = \theta_r$. Por otro lado, así como $\theta_i = \theta_t$, también resultan diferentes los ángulos de la onda S reflejada y de la onda S transmitida, como se ve en la ecuación 3, y tal como lo expresa la ley de Snell cuando se tienen en cuenta ondas de corte. Así

$$\frac{\sin \theta_i}{v_{p1}} = \frac{\sin \theta_r}{v_{s1}} = \frac{\sin \theta_t}{v_{s2}} \quad [\text{Ec. 3}]$$

Poniendo todo junto, podemos escribir la ley de Snell, que ahora llamamos ley de Snell generalizada, de la siguiente manera:

$$\frac{\sin \theta_i}{v_{p1}} = \frac{\sin \theta_r}{v_{p1}} = \frac{\sin \theta_t}{v_{p2}} = \frac{\sin \theta_r}{v_{s1}} = \frac{\sin \theta_t}{v_{s2}} = p \quad [\text{Ec. 4}]$$

Donde p es conocido como el parámetro sísmico del rayo y es constante para toda discontinuidad encontrada por el rayo sísmico en su viaje desde la fuente hasta el receptor. Cada onda P, o cada onda S, tendrían su propio parámetro sísmico, constante a lo largo de toda su trayectoria, (Velis, 2007)

3.2.2. Principio de Fermat

El principio de Fermat afirma que, de los muchos caminos posibles entre dos puntos A y B, el rayo sísmico sigue el camino que le da el tiempo de viaje más corto entre los puntos, (Lowrie, 1997). Dicho principio sirvió como partida para las leyes de refracción y reflexión de ondas en medios isotrópicos, Figura 10.

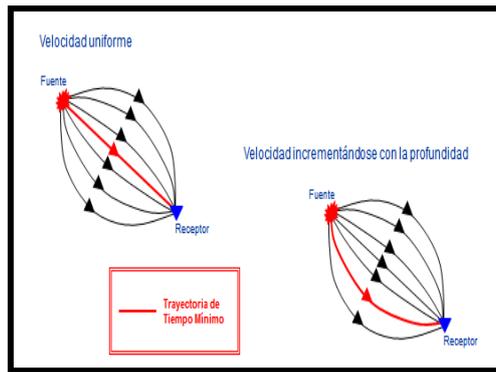


Figura 10. Trayectoria de tiempo mínimo (Pineda, 2011).

3.2.3. Principio de Huygens

La teoría se basa en construcciones geométricas simples de un frente de onda que se calcula si su posición actual es conocida. El principio de Huygens puede afirmar: *"Todos los puntos en un frente de onda puede considerarse como fuentes puntuales para la producción de nuevas ondas esféricas; el nuevo frente de onda es la superficie tangencial (o sobre) de las ondas secundarias"* (Lowrie, 1997). Es por ello que todos los puntos que forman un frente de onda tienen la misma fase, es decir, están en la misma situación instantánea en el ciclo periódico de la onda, Figura 11.

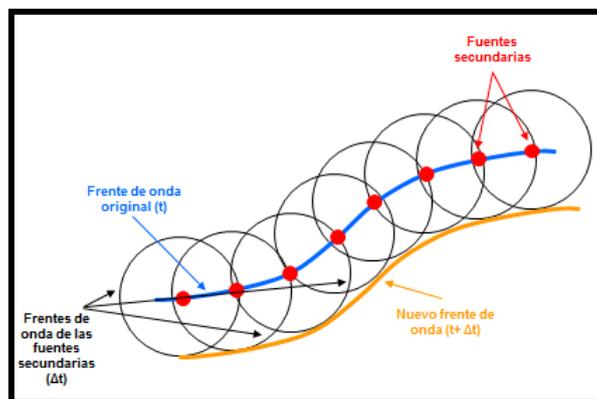


Figura 11. Principio de Fermat (Pineda, 2011).

3.3. Sísmica de reflexión

En un medio homogéneo las ondas se propagan esféricamente desde una fuente puntual. El principio de Huygens sostiene que cada punto de un frente de onda se origina un nuevo frente de onda que también se propaga en forma esférica. Si el radio de esas ondas esféricas es suficientemente grande; tal que las mismas pueden ser consideradas planas; las líneas perpendiculares (rayos) a esos frentes de ondas planas, pueden

representar a las ondas de un modo más convenientes que los mismos frentes (Dobrin, 1988)

La sísmica de reflexión es utilizada como método geofísico en la exploración y producción de hidrocarburos debido a su gran poder de resolución y penetración. La técnica; en forma general consiste en generar ondas sísmicas utilizando fuentes de energía tales como explosivos, vibraciones, etc.; y en medir con equipos de grabación muy sofisticados el tiempo transcurrido desde la generación de la onda hasta que ésta es recibida por los sensores colocados en la superficie. Tomando los tiempos de llegadas y conociendo las velocidades de propagación, se puede reconstruir las trayectorias de las ondas sísmicas. El tiempo de recorrido depende de las propiedades físicas de las rocas, y de las disposiciones de éstas en el subsuelo. En la Figura 12 se ilustra el proceso de adquisición de sísmica de reflexión.

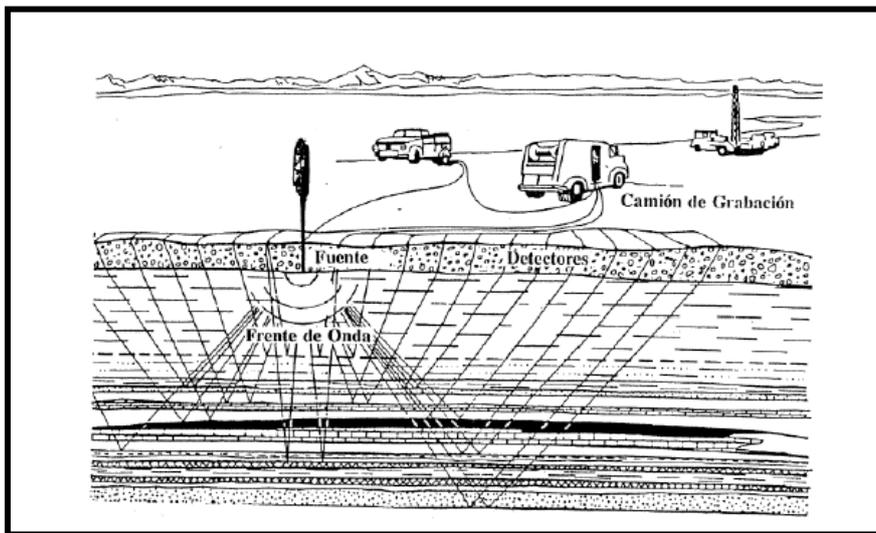


Figura 12. Proceso de adquisición de datos de sísmica de reflexión, (Regueiro, 2007)

3.5. Sísmica multicomponente

La tecnología de la sísmica multicomponente consiste en grabar, procesar y analizar todo el campo de onda elásticas que se propagan en el subsuelo, en dos o tres dimensiones. Dicho campo contiene ondas compresionales (P) y de cizalla (S), mediante el análisis simultáneo de ambos tipos de onda, es posible obtener información sobre propiedades del medio que no es posible obtener con los datos sísmicos de onda P utilizados convencionalmente (CIED, 1999)

La vibración de las partículas en las ondas P, es aproximadamente paralela a la dirección de propagación de la energía, mientras que las ondas S vibran en dirección casi perpendicular a la dirección de propagación.

Las ondas P y las ondas S no sólo se diferencian por la dirección de vibración, sino también por su velocidad de propagación. Las ondas S requieren de fuentes de energía y geófonos especiales, que generen y detecten, respectivamente, movimientos del terreno en tres direcciones, una vertical y dos horizontales (geófonos 3 componentes). El procesamiento y análisis de los datos debe tomar en cuenta la naturaleza vectorial de la información. La figura 13 muestra esquemáticamente la adquisición de un geófono multicomponente.

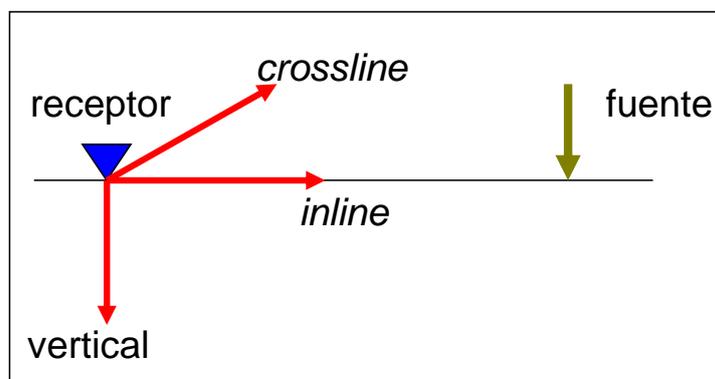


Figura 13. Grabación de un registro multicomponente.

3.5.1. Ondas convertidas

Las ondas P generadas por una fuente, se propagan a través de la tierra, al encontrar dos estratos con contrastes de impedancias acústicas son reflejadas y se convierten parcialmente en ondas S (Figura 14), por lo que se denominan ondas convertidas (CIED, 1999).

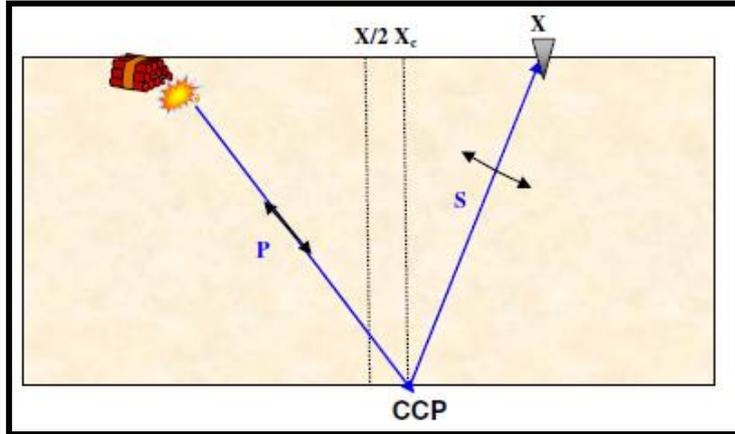


Figura 14. Propagación de una onda convertida en un medio isotrópico (Cabello, 2007)

La sísmica multicomponente captura el campo de onda de una manera más completa en comparación con el método sísmico convencional, en el que se registran solamente las ondas P. Las ondas compresionales se usan más en la industria de adquisición sísmica, ya que son las primeras que llegan a los geófonos, tienen relaciones S/R altas y son generadas por la mayoría de fuentes de energía disponibles. Sin embargo, existe el potencial de obtener más información del subsuelo usando ondas convertidas que con solamente datos P. El diseño de programas para procesar sísmica multicomponente es similar al de las ondas P, sin embargo hay que tener en cuenta la reflectividad y las trayectorias de rayos asimétricas, (Stewart, 2002)

Con respecto a la reflectividad de las ondas convertidas P-S, las amplitudes varían sinusoidalmente según la ecuación de Zoeppritz, (ecuación 5).

$$R_{ps} = -\frac{v_p \tan \theta}{2v_s} \left[\left(1 + \left(\frac{2 \sin^2 \theta}{\left(\frac{v_p^2}{v_s}\right)} + \frac{2 \cos \theta \cos \theta}{\frac{v_p}{v_s}} \right) \right) \frac{\Delta \rho}{\rho} + 2 \left(\frac{2 \sin^2 \theta}{\frac{v_p^2}{v_s}} + \frac{2 \cos \theta \cos \theta}{\frac{v_p}{v_s}} \right) \frac{\Delta v_s}{v_s} \right] \text{ [Ec. 5]}$$

Donde:

Θ = ángulo de incidencia de la onda P.

θ = ángulo de reflexión de la onda S.

v_p = promedio de la velocidad de onda compresional de la interfaz.

v_s = promedio de la velocidad de onda de cizalla de la interfaz.

ρ = promedio de las densidades de la interfaz.

$\Delta\rho$ = diferencia entre las densidades de la capa superior e inferior.

Las ondas convertidas presentan problemas en la ruta de reflexión, que es asimétrica y en la proyección superior de la onda S que tiene un ángulo de reflexión diferente que el ángulo incidente descendente de la onda P. Para el momento de los registros de los eventos P-SV en la superficie, sus frecuencias han disminuido en relación con las ondas P.

Los levantamientos de onda convertida presentan diversas ventajas sobre las ondas S pura:

- ✓ Utilizan fuentes convencionales de ondas P.
- ✓ Puede realizarse un levantamiento de ondas P, simultáneamente.
- ✓ Requiere un menor tiempo de registro de datos.
- ✓ Tiene una propagación de una sola vía, a través de la superficie cercana (menor atenuación, mayor frecuencia, menor estática total).

Las ondas P-SV son registradas exclusivamente en el canal radial (el elemento del geófono horizontal que apunta en la dirección de línea de tiro) y se puede obtener una sección de ondas convertidas.

Se requiere poco esfuerzo extra para analizar y procesar los datos de la onda P-SV, en comparación con el procesamiento de los datos de la onda P-P.

3.6. Secuencia de procesamiento

Consiste en una serie de etapas o pasos en el tratamiento de las señales sísmicas registradas, con el objetivo de eliminar ruidos, mejorar la señal y reposicionar los eventos sísmicos en su posición correcta en el espacio. A continuación se presenta una secuencia de procesamiento de acuerdo a los requerimientos de esta investigación, tanto para la onda P y seguidamente de los pasos adicionales para el procesamiento de onda S, de acuerdo al esquema de trabajo de esta investigación.

3.6.1 Lectura de los datos

Ya determinado el formato en que se encuentran grabados los datos se procede a la lectura y conversión de los mismos al formato interno de procesamiento. Originalmente

los datos son grabados de forma multiplexada, esto es, las trazas no son registradas de forma continua sino todas las primeras muestras de cada una, luego la siguiente muestra de cada traza y así sucesivamente; por lo que simultáneamente con el proceso de lectura, o inmediatamente después, cuando es requerido, se realiza el proceso de demultiplexado. En la actualidad la información es recibida para su procesamiento ya de forma demultiplexada, (Pineda, 2011).

3.6.2 Asignación de geometría

Una vez leídos los datos, y transcritos al formato interno, o simultáneamente con estos procesos, se realiza la construcción de la geometría. A partir de la información de coordenadas y elevación de fuentes y receptores se crea una base de datos y se relaciona toda esta información con los detalles de la configuración usada en campo, generándose, a partir de allí, los archivos y mapas que contienen información como posición y elevación de disparos y receptores, acimut y distancias tiro-receptor, posición de CMPs y trazas que contribuyen a cada CMP, entre otros, información esta que es requerida para el procesamiento de los datos. Luego esta información es “escrita” en los “headers” de cada traza, Figura 15.

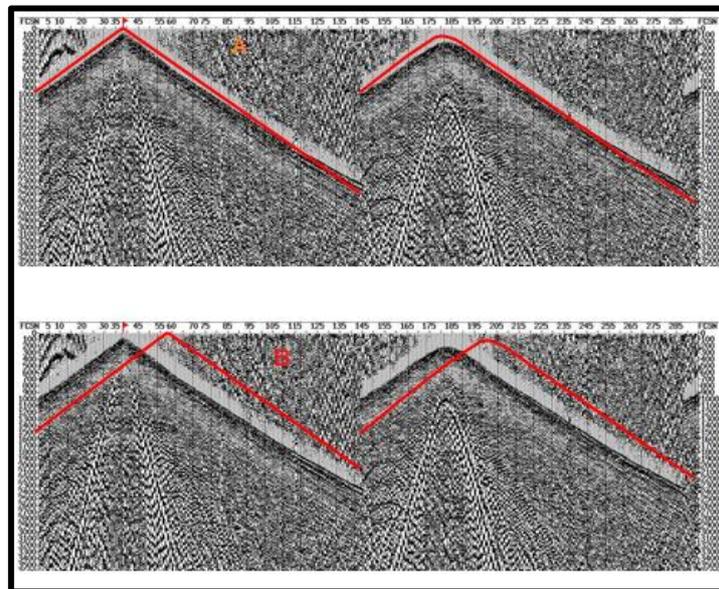


Figura 15. Geometría de los datos, (a) geometría correcta y (b) geometría no correcta (Pineda, 2011).

3.6.3. Separación de las 3 componentes

Usualmente se considera que toda la información relacionada con las ondas P está contenida en el canal vertical y la correspondiente a las ondas P-SV en el canal horizontal. Debido a las características de recepción del geófono, las ondas P-P y P-SV se observan en ambos geófonos horizontal y vertical. Por lo tanto, el reconocimiento y separación de las ondas individuales P y SV es un problema importante.

Los “eventos perturbadores” presentes en ambos canales están en la mayoría de los casos tan mezclados, que no pueden ser separados visualmente y por lo tanto son usualmente considerados como “ruido”.

Este “ruido” puede ser convertido en señales si se encuentra la forma de discriminar los componentes individuales del “ruido” y describirlos mediante las leyes de propagación de las ondas.

El proceso de separación del campo de onda adquiere una gran importancia, ya que nos brinda registros reales de ondas P y SV, mejorando así nuestra descripción y definición del subsuelo, (CIED, 2009).

3.6.4. Rotación de las componentes

En las adquisiciones multicomponentes, los canales H1 (*inline*) y H2 (*crossline*) del geófono se colocan generalmente en paralelo (la componente radial) y perpendicular (la componente transversal) a la dirección de adquisición. En geometrías 3D, las componentes radial y transversal no están en la misma orientación H1 y H2 de los canales del geófono. Para separar los datos en componentes radial y transversal, se lleva a cabo una transformación de coordenadas en forma de rotación. La transformación de coordenadas se realiza para los datos registrados en el sistema de coordenadas H1 y H2 de los canales del geófono al sistema de coordenadas radial y transversal para cada par fuente-receptor del levantamiento 3D (Larson, 1996), lo cual se traduce en una corrección de polaridad, obteniéndose así la componente P-SV en la radial y es la imagen PS a obtener.

En los casos que exista evidencia de anisotropía en profundidad, es posible que la orientación de la polarización de corte varíe con la profundidad y en consecuencia, los

datos de cizalla se deben girar en las polarizaciones de las ondas de corte S1 (rápida) y S2 (lenta), Figura 16.

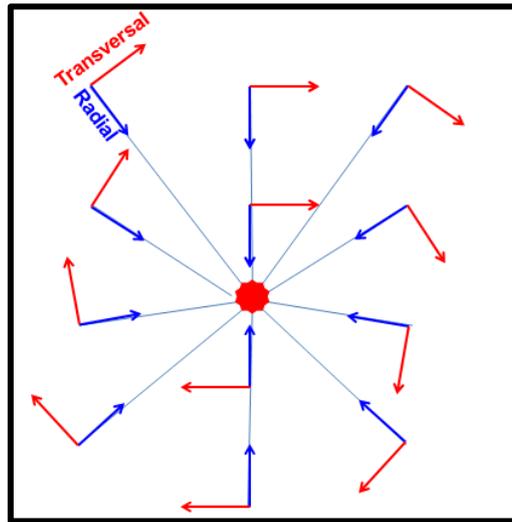


Figura 16. Rotación de las componentes (Cova, 2011)

3.6.4. Recuperación de ganancias o amplitudes

Es el proceso de corrección por el defecto de la pérdida de amplitudes debido a la divergencia cuasiesférica del frente de ondas y las pérdidas por el comportamiento parcialmente inelástico del subsuelo (atenuación), el desperdigamiento (*scattering*) y la partición de la energía. Se hace un análisis iterativo para obtener la curva de ganancia óptima que mediante una curva logarítmica creciente recupere la pérdida total expresada con una curva exponencial decreciente, como se muestra en la Figura 17. Una alternativa más lenta, y por lo tanto costosa, es hacer un proceso de recuperación de verdadera amplitud, que en rigor no lo es, ya que verdadera amplitud es la que se ha registrado de campo, con primeros arribos de gran amplitud y arribos posteriores decreciendo exponencialmente. Se denomina verdadera amplitud a la que se hubiese obtenido si la divergencia esférica y demás fenómenos de pérdida de energía no hubieran sucedido; y esto se hace mediante cálculos de áreas relativas involucradas en el viaje del frente de onda según sea la profundidad y distancia fuente-receptor de los eventos registrados.

Sólo se realiza cuando otros procesos o análisis posteriores lo ameritan: inversión de trazas, método AVO, estudios sismoestratigráficos u otros.

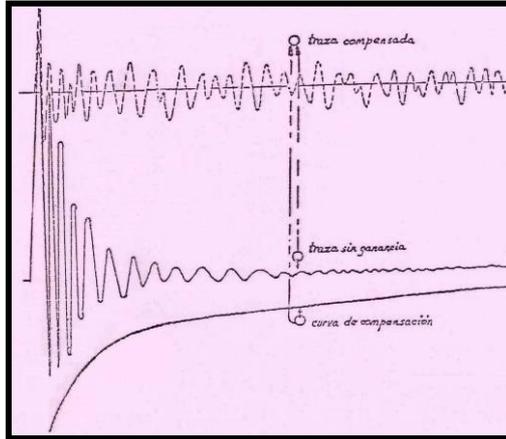


Figura 17. Curva de ganancia mediante una curva logarítmica creciente y una curva exponencial decreciente, (Chelotti, 2010).

Para el procesamiento en las ondas convertida la recuperación de divergencia esférica es de la siguiente manera, se tiene una fuente en S generando ondas P con un ángulo vertical θ , algunas de las cuales se reflejan como ondas convertidas, a una profundidad Z, y regresan a la superficie en el punto R (Figura 18). Se concluye que la divergencia esférica P-SV puede ser compensada aproximadamente usando solo la función de velocidad de apilamiento P-SV, el tiempo doble de viaje total y la velocidad de la onda P cercana a la superficie.

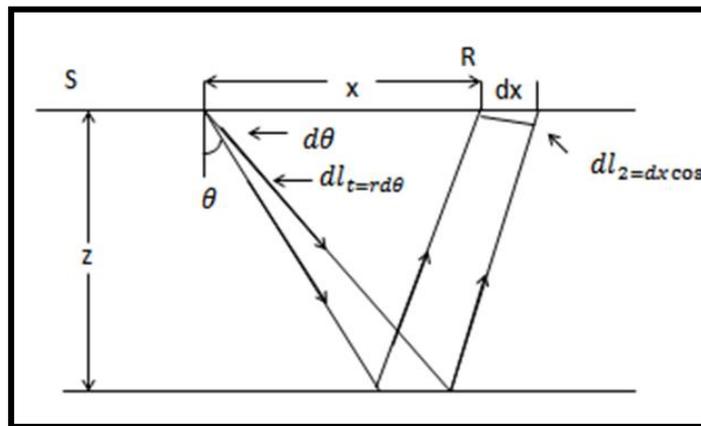


Figura 18. Divergencia esférica para datos P-SV.

3.6.5. Pruebas de filtros de ground roll.

El *ground roll* o ruido de ondas superficiales, es generado por el entrampamiento de las ondas P y SV en la capa meteorizada (actúa como una guía de ondas), es un ruido de alta frecuencia y amplitud, representando señales que perjudican y limitan la adquisición de la sísmica de refracción/reflexión y representan la fuente de la señal útil en las técnicas de ondas superficiales.

Por lo tanto, para la atenuación de *ground roll* se emplean distintas secuencias de filtrados tanto para los datos en la componente vertical y radial.

Edición de trazas

Es la supresión de trazas ruidosas (por mal acople de los receptores, ruidos de motores, etc.) o muertas (generalmente por problemas de cables), cuya participación en las siguientes etapas del proceso sería nula o incluso negativa (en el apilamiento).

Filtrados

Los ruidos se pueden separar de la señal haciendo uso de filtros de frecuencias, de velocidades, de coherencia u otros. Siempre debe evitarse perder parte de la señal (o al menos minimizar la pérdida) en el afán de suprimir ruidos que, en caso de no ser eliminados, podrían dar imágenes sísmicas procesadas de confusa interpretación, Figura 19.

Filtrado de frecuencias: este tipo de filtro permite eliminar aquellos ruidos cuyas frecuencias difieren de las que contiene la señal sísmica. Se aplica en forma de trapecio con dos rampas como corta-bajos y corta-altos para suprimir bajas y altas frecuencias temporales respectivamente. En los extremos izquierdo y derecho del espectro (en el dominio transformado de Fourier) las frecuencias son suprimidas totalmente, mientras que en la zona central son preservadas totalmente y en las rampas se las va cortando gradualmente desde cero a cien por ciento, lo cual se hace así para evitar la aparición del fenómeno de Gibbs.

Filtrado de velocidades: se basan en representar la información sísmica en gráficas F/K (frecuencia / número de onda), lo que se realiza a través de la aplicación de una doble transformada de Fourier: primero de la traza (amplitud/tiempo) al espectro de frecuencias (amplitud/frecuencia) y luego a la gráfica F/K. Entonces pueden eliminarse ruidos que aparecen como eventos lineales de velocidades distintas a la de la señal. Hecho lo cual, se realiza el camino matemático inverso para volver a la traza sísmica.

Filtrado de coherencia: la supresión de ruido se realiza en función de algoritmos de coherencia o semblanza que se aplican a partir de la comparación de trazas sucesivas, de donde se deducen tendencias de alineamientos de eventos, considerados como ruidos

presuntos que han de suprimirse. Sin embargo, la aplicación de este tipo de filtrado ha de ser cuidadosa, ya que se corre el riesgo de eliminar también parte de la señal.

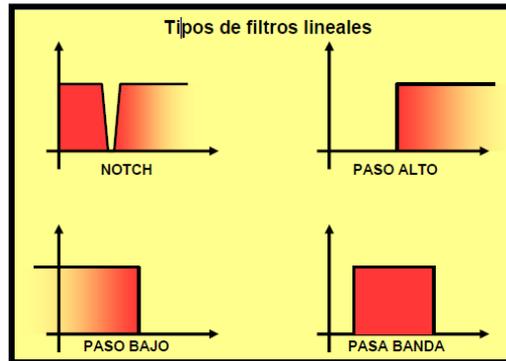


Figura 19. Tipos de filtros lineales, (Pineda, 2011)

Filtros de polarización: este tipo de filtro se basa en el análisis de las polarizaciones de los tipos de ondas. Pues como es conocido, las ondas de cuerpo presentan polarizaciones de tipo lineal, mientras que las ondas superficiales presentan polarizaciones elípticas. De tal modo, que al seleccionar el tipo de polarización lineal, evidentemente se atenúa el ruido de ondas superficiales.

3.6.6. Análisis de velocidades

Se denomina *normal moveout* o NMO a la diferencia en el tiempo de llegada de una reflexión causada por la variación de la distancia entre la fuente y el receptor (Sheriff, 2002). El análisis de velocidad se lleva a cabo para obtener el valor de velocidades de apilamiento a partir de la corrección del efecto del *normal moveout*, que involucra encontrar la velocidad asociada a la hipérbola de mejor ajuste para datos en el dominio del CMP, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** La mayoría de los análisis miden la coherencia de las trazas para esa corrección en función de maximizar dicho valor. Sin embargo, los análisis de velocidad de onda convertida difieren sutilmente, pero de manera significativa en relación a las características en el “*moveout*” de los datos P, porque sobrestima el “*moveout*” de las ondas convertidas a medida que aumenta el offset, afectando los datos provenientes de capas poco profundas. En el caso que se utilicen rangos de offset moderados, la aproximación hiperbólica es precisa y la velocidad utilizada en la aproximación anterior, es equivalente a la velocidad utilizada en los datos PS, (CIED, 1999).

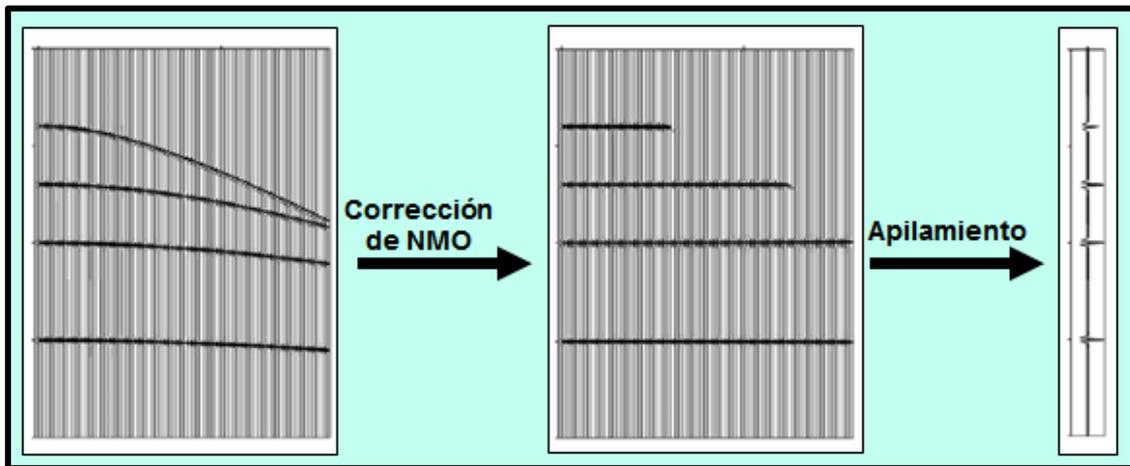


Figura 20. Corrección de NMO, (Pineda, 2011).

En el caso de la obtención de la imagen PS, el análisis de velocidad es el concerniente a la variación de la relación V_p/V_s con la profundidad, pues debido a la asimetría de la trayectoria del rayo sísmico PS, éste en profundidad presenta un comportamiento asintótico controlado por la mencionada relación (remítase a la Figura 21).

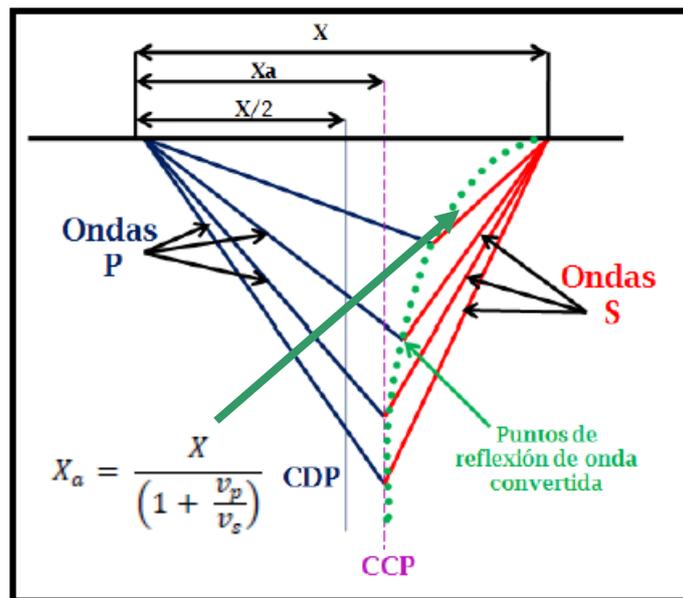


Figura 21. Punto asintótico de conversión, (Paradigm, 2011)

3.6.7. Apilamiento

Es la culminación de la corrección dinámica, al haber conseguido dejar en fase las reflexiones simples o primarias y desfasados los ruidos superficiales que hubieran sobrevivido a las estrategias de adquisición y también desfasados los ruidos profundos (esencialmente ondas múltiples varias). Al sumar o apilar lo que se está haciendo es

atenuar ruidos y resaltar la señal, es decir, obtener una traza suma que consigue mejorar la relación señal/ruido, la esencia del método de *stacking* o apilamiento.

Las reflexiones múltiples se suelen atenuar a $1/3$ ó $1/4$ de la amplitud de la reflexión simple, aunque en ciertos casos en que las velocidades de eventos simples y múltiples se asemejan, estos últimos pueden llegar a sobrevivir al apilamiento y podría entonces propender a confusiones en la interpretación. De ser así, existe una alternativa posterior en la secuencia de procesamiento sísmico para lograr su eliminación: la deconvolución predictiva. Existe una operación complementaria previa al apilamiento, llamada enmudecimiento frontal (*mute*), empleado para eliminar la porción más somera de las trazas con mayor apartamiento de una familia, con una función de corte gradual en rampa. En esos tiempos superficiales de trazas lejanas a la fuente, se multiplican sus amplitudes por cero, evitando así apilar porciones de trazas con baja frecuencia que contribuirían negativamente a la suma.

3.6.8. Correcciones estáticas

Son correcciones en tiempo debido a la topografía (existencia de diferencia de cota entre fuente de energía y receptores) y a las variaciones de velocidad y espesor de la capa meteorizada (de baja velocidad o *weathering*). Se establece un plano horizontal de referencia (*datum*) por debajo o por encima de ésta, que es el nuevo cero de los tiempos. Al tiempo total se le restan los tiempos que tarda el frente de onda en recorrer la capa meteorizada hacia abajo y hacia arriba. Se hace una corrección por emergencia y otra por incidencia, única para cada estaca o estación, de modo tal que se aplica la estática calculada a cada una de las trazas de un registro individual.

Otras veces se emplea un plano en el aire, por encima de la topografía, y matemáticamente se rellena ese espacio con una velocidad semejante a la que se estimó para la primera capa de alta velocidad (la que infrayace a la meteorizada: submeteorizada o *subweathering*). La velocidad de la capa meteorizada (del orden de 400 a 1200 m/s) suele variar lateralmente, mientras que la capa infrayacente (de unos 1700 a 2000 m/s) generalmente varía menos.

El espesor de la capa meteorizada se calcula por sísmica de refracción, con dromocronas horizontales. Si los registros de sísmica de reflexión son lo suficientemente detallados

para niveles someros, pueden usarse para el cálculo de dromocronas horizontales, evitándose la adquisición de sísmica de refracción, aunque esto raramente sucede debido a su muy distinta profundidad de interés y consecuentemente su escasa confiabilidad, sin embargo en levantamientos sísmicos en Venezuela, la campaña de refracción representa un proceso estándar.

3.6.9. Estáticas de elevación

Las estáticas de elevación se aplican para referir las fuentes y receptores a un “*datum*” plano (plano de referencia) o “*datum*” flotante. El *datum* flotante se escoge de manera que la estática de campo sea pequeña, para ello se selecciona un *datum* para cada *gather*, resultando en un *datum* flotante que es el promedio de la elevación de los receptores sobre el tendido. El *datum* flotante es una forma suavizada de la topografía, ideal para topografías abruptas y estudios 3D (Marsden, 1993)

Al llevar las fuentes y receptores a un plano de referencia, se logra eliminar el efecto de las irregularidades del relieve o de la superficie topográfica, refleja el efecto sobre las trazas sísmicas producto al retraso de tiempo en las trazas más lejanas y se observa el efecto de la corrección de estáticas por elevación, Figura 22.

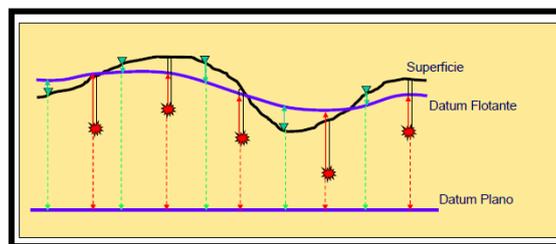


Figura 22. Corrección estática por elevación, (Pineda, 2011)

3.6.9. Estáticas de refracción

Cerca de la superficie, la trayectoria de las ondas PP y PS son casi idénticas. A lo largo de este segmento, ambos rayos representan la energía de la onda P y ambos encuentran las mismas estáticas y condiciones de superficie.

Debido a esto, se espera que la aplicación de la solución final de la estática P-P a los datos P-SV, pueda subsanar las estáticas de fuente.

El tiempo de retardo cercano a la superficie de los datos SV puede considerarse mayor que el de los datos PP, por un factor similar al valor promedio de V_p/V_s cerca de la

superficie (suponiendo que ambas señales P y SV atraviesen el mismo espesor del material cercano a la superficie).

Puede presentarse estática residual de receptor de hasta 100 m. Los programas tradicionales de cálculo de estática no presentan una buena ejecución para estos casos.

La solución final de la estática de receptor PP no brinda mucha ayuda en los problemas de estática PS. En el caso PS se requiere solo una solución para el componente del receptor.

Los sedimentos saturados con fluidos tienen un mayor módulo de compresibilidad y mayor V_p que los sedimentos secos, pero el módulo de cizallamiento no es afectado por la saturación de agua (poco cambio en V_s).

La onda P encuentra un espesor que termina en el tope de la tabla de agua, mientras que la onda S es afectada por toda la capa de baja velocidad Figura 23.

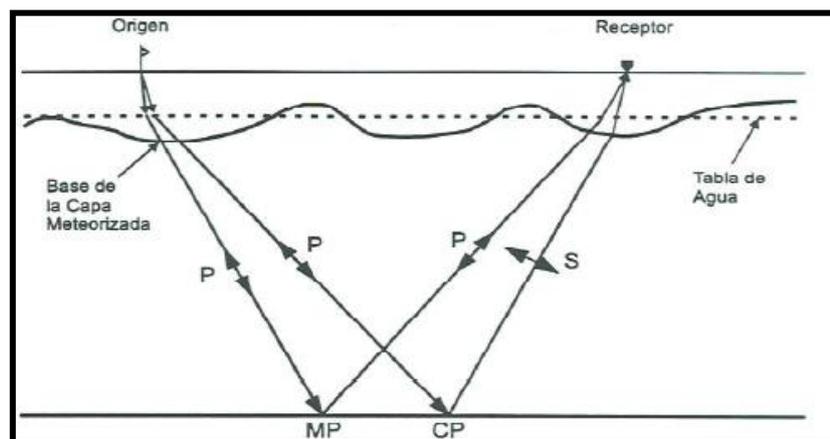


Figura 23. Representación de los rayos cerca de superficie.

Estática de refracción P-SV.

El método implica la utilización de los términos de fuente, de la solución de estática de refracción para onda-P, con los términos de receptor de la solución de estática de refracción para onda S. Para remover el retardo en la fuente, es necesario establecer un modelo somero de onda-P, mientras que para remover el retardo en el receptor hay que establecer un modelo somero de onda S.

Observaciones de la onda S refractadas:

La existencia de refracciones de onda S en datos sísmicos de fuente onda P puede parecer cuestionable, debido a que teóricamente, una explosión perfectamente esférica genera muy poca energía de cizallamiento. Sin embargo, es posible que las ondas compresionales se convierten en ondas de cizalla cerca de su punto de generación, viajando como ondas de cizalla hasta el receptor. De esta manera, se generan ondas refractadas que son casi complemente refracciones de onda S.

Para obtener la corrección de la estática onda S, se supone que las refracciones observadas son realmente verdaderas refracciones de onda S, y que puede ignorarse el tiempo de viaje como ondas compresionales. La justificación para no considerar la parte de ondas P de las refracciones es que, el tiempo de viaje como onda P es mínimo comparado con el tiempo de viaje como onda S, debido a que la componente de la onda P presenta una menor distancia de viaje y una mayor velocidad.

Corrección de estática para datos de ondas convertidas

Los tiempos asociados a la refracción de onda S es removido y utilizado para obtener una corrección de estática de refracción de onda S, en la misma forma en que se utilizan las refracciones de onda P para obtener la corrección de estática de refracción de onda P. Una solución completa de estática de refracción para datos P-SV involucra usar los términos de fuente, de la solución de estática de refracción de onda P, combinada con los términos de receptor de la solución de estática de refracción onda P.

La solución de estática de refracción de onda P se ha determinado durante el procesamiento del canal vertical. Se separan los términos de fuente de los términos receptores y se aplican los términos de fuente de onda P al canal radial y los términos de receptor de la corrección de estática de refracción de onda S son añadidas a la componente radial, para completar la solución de estática de refracción onda P-SV.

El método de estáticas de refracción P-SV presenta dos problemas importantes:

Las refracciones de onda S son enmascaradas por reflexiones onda P-SV.

El proceso consume tiempo.

Para obtener una solución de estática a partir de las refracciones, debe utilizarse un programa de corrección de estáticas de refracción, tales como los siguientes:

1. El método de pendiente/intercepción.
2. Método del tiempo de retardo.
3. Método de la diferencia de tiempo.
4. Método recíproco generalizado, corrección de estática de refracción.
5. Rutina de inversión.

Optimización de la sección apilada por receptor común.

El método de optimización de la sección apilada por receptor común, para estáticas de refracción, presenta las siguientes características:

Está basado en la maximización de la coherencia del apilamiento por CRP (punto común de receptor) y se toma que la estructura del subsuelo no es compleja.

Computacionalmente es muy rápida, ya que trabaja solo con la correlación cruzada CRP apiladas.

Es robusto en presencia de grandes estáticas de receptor onda S.

El método provee solo una estimación inicial de las estáticas de receptor, y por tanto, debe servirse con un procedimiento convencional de estáticas residuales.

En relación con el método de optimización de la sección apilada por receptor común, para estáticas de refracción, se presentan las siguientes observaciones:

Un paso difícil es la determinación de la estática residual onda S, la cual es generalmente de 2 a 10 veces mayor que la estática onda P, para la misma ubicación.

Los algoritmos convencionales de estática residual suelen producir numerosos saltos de ciclo, al intentar resolver estáticas muy grandes.

La velocidad de la onda S, virtualmente no es afectada por fluctuaciones en el agua a nivel somero. Por lo tanto, las correcciones de estática de onda P y de la onda S no se relacionan entre sí, por lo que no es adecuado aproximar la estática de onda S, simplemente multiplicando por un factor constante los valores de estática de onda P.

Es un método robusto para obtener un estimado inicial de grandes estáticas de receptor de longitud de onda corta, optimizando la coherencia traza a traza del apilamiento por punto común de receptor (CRP).

El apilamiento por CRP (punto común de receptor) y el apilamiento por CSP (punto común de tiro) se usan frecuentemente como herramientas de diagnósticos, para estimar las soluciones de estática, en el procesamiento de datos convencionales PP.

Para los datos de onda convertida, el apilamiento por CRP tiene un rol importante en la solución de la estática de receptor.

La obtención de estática inicial de receptor a partir del análisis del apilamiento por CRP, en lugar del apilamiento por punto común de conversión, permite que el reordenamiento de los datos CCP se retarde, hasta que se haya resuelto y aplicado las estáticas de receptor de gran magnitud. Esto es deseable ya que el agrupamiento por CCP (punto común de conversión) requiere la estimación de las razones V_p/V_s , pero a partir de las correlaciones son difíciles de obtener con precisión cuando la sección de onda P-SV está degradada por unas estáticas no resueltas de gran magnitud.

En el caso de datos reales y en particular los datos de la faja petrolífera del Orinoco, los problemas de saltos estáticos en el procesamiento de datos sísmicos son notorios y representa un desafío para la obtención de las mejores imágenes del subsuelo, estos se presentan tanto en el procesamiento de onda P, donde la secuencia es estándar y más aún en la secuencia de procesamiento PS.

Una buena determinación de estáticas se traduce en:

- ✓ Una mejor definición de las hipérbolas de reflexión, (Figura 24).
- ✓ Una mejor continuidad y coherencia en los reflectores en la sección apilada (Figura 25).

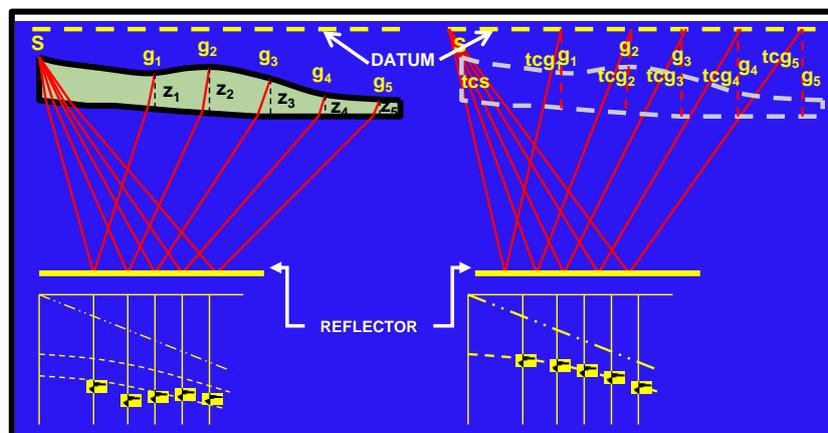


Figura 24. Efecto de las estáticas sobre las hipérbolas de reflexión (Pineda, 2011).

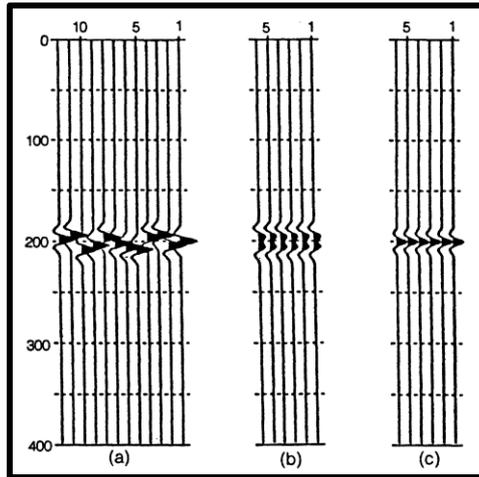


Figura 25. Efecto de las estáticas un apilado sintético, (Marsden, 1993).

El problema de las estáticas en general puede visualizarse en la Figura 24. Se sintetiza en llevar fuentes y receptores, desde su posición real de grabación a un *datum* plano (imaginario), dados las distancias y los tiempos mostrados en la Figura 26, la manera de desplazar fuentes y receptores al *datum* es mediante la fórmula $t = \frac{d}{v}$, $t \equiv$ tiempo, $d \equiv$ distancia y $v \equiv$ velocidad. Para el caso de onda convertida, se debe establecer o determinar la velocidad de corte para desplazar al *datum* plano el receptor, siendo uno de los principales objetivos al abordar el problema de las estáticas.

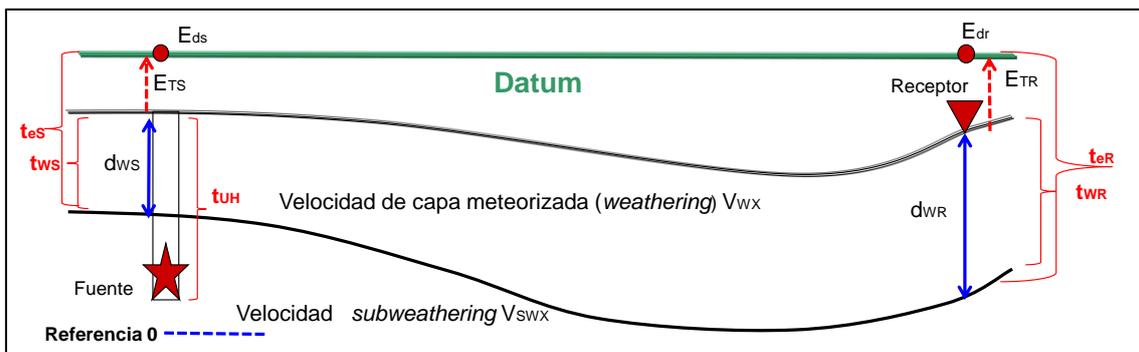


Figura 26. Esquema general del problema de las estáticas

Hasta donde se tiene conocimiento el estado del arte en correcciones estáticas en ondas convertidas pudiera sintetizarse en la

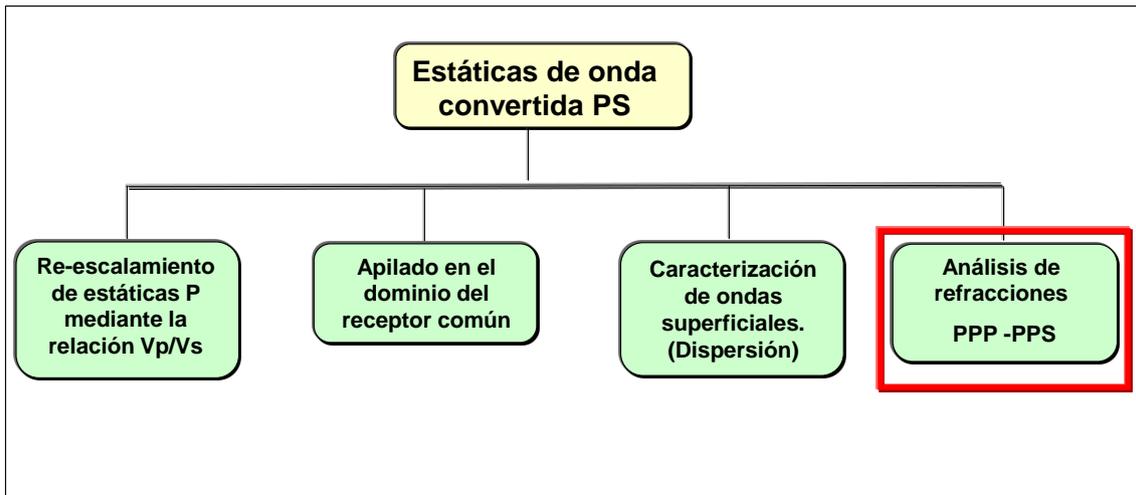


Figura 27.

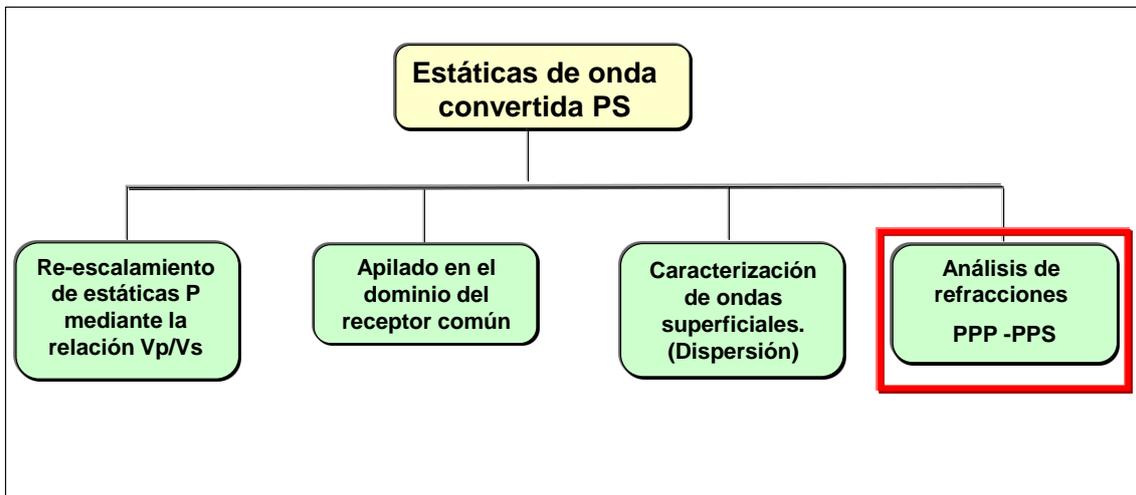


Figura 27. Esquema de estado del arte actual en correcciones estáticas PS, (Ricaute, 2014).

Observándose en la figura anterior, que las dos primeras técnicas obedecen a empirismos y técnicas estadísticas, mientras las dos últimas a mediciones sobre el dato sísmico.

Debido a esto, se propone en este trabajo una metodología para la determinación de estáticas de onda convertida, la cual se basa en la determinación de la diferencia de tiempos de las refracciones PPP y PPS, suponiendo la hipótesis de trabajo la existencia de las últimas.

3.7. Metodología propuesta para las correcciones estáticas por elevación y capa meteorizada para ondas convertidas.

Para el cálculo de las correcciones estáticas de larga longitud de onda, es necesario calcular las diferencias de tiempo de tránsito de las ondas asociadas al espesor de la capa meteorizada y los efectos de los cambios de topografía del área de estudio. Para esto es necesario realizar las correcciones estáticas para fuente y receptor, asociadas al tiempo de tránsito de ondas P y S, respectivamente. A través del método propuesto por (Li, 2012), que describe la diferencia de tiempo para corrección de estática total, mediante la siguiente ecuación 6:

$$\Delta t = \Delta tw + \Delta te \quad [\text{Ec. 6}]$$

Donde:

Δt = Corrección estática total, Δtw = corrección de la capa meteorizada y Δte = corrección por elevación.

La corrección por elevación mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta te = \frac{e_D - e_S}{V_{S1}} \quad [\text{Ec. 7}]$$

Donde:

e_D = Elevación del datum, e_S = elevación topográfica y V_{S1} = velocidad de capa inferior, la cual se obtuvo del análisis de ondas superficiales.

La corrección de la capa meteorizada con la siguiente ecuación:

$$\Delta tw = \frac{(1 - \gamma_{s1})}{(1 - \gamma_{p0})} dt \quad [\text{Ec. 8}]$$

dt es la diferencia de tiempo entre las refracciones PPP –PPS, suponiendo la emergencia de los rayos con ángulos muy pequeños (o nulo), Figura 29.

$$\gamma_{S1} = \frac{V_{S0}}{V_{S1}} \quad [\text{Ec. 9}]$$

$$\gamma_{P0} = \frac{V_{S0}}{V_{P0}} \quad [\text{Ec. 10}]$$

Si no se supone la emergencia de los rayos a ángulos pequeños, la forma exacta de obtener la corrección de la capa meteorizada es la siguiente:

$$\gamma_{P1} = \frac{V_{S0}}{V_{P1}} \quad [\text{Ec. 11}]$$

$$\Delta tw = \frac{(1 - \gamma_{s1})}{(1 - \gamma_{p1}^2)^{1/2} + (\gamma_{p0}^2 - \gamma_{p1}^2)^{1/2}} dt \quad [\text{Ec. 14}]$$

Donde es fácil demostrar que para cocientes pequeños $\frac{V_{S0}}{V_{P0}}$, la [Ec. 14] se torna en la [Ec. 12]. Este análisis se basa en las diferencias de tiempo de las refracciones PPP y PPS, en modelo de dos capas, (Figura 28 y 29) según Li Yan-Peng et al. (2012) y Alan Meulenbroek (2011) el modo refractado, más energético después del PPP es el PPS.

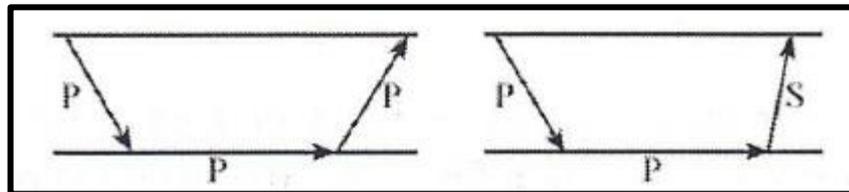


Figura 28. Modos de conversión refractados más energéticos. (Meulenbroek, 2011).

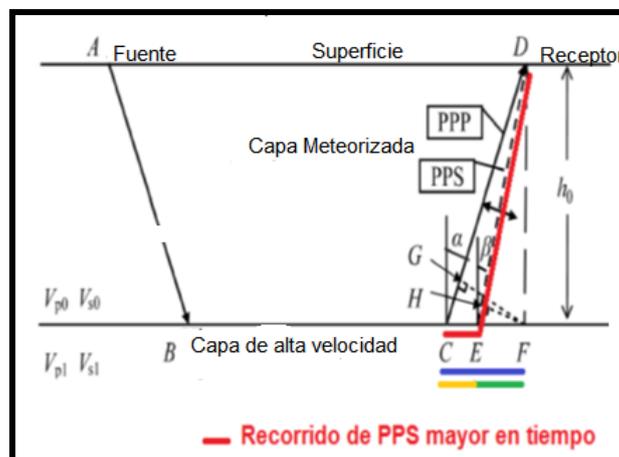


Figura 29. Recorrido de viaje de PPP Y PPS. (Ricaurte, 2014)

Como se observa, las estáticas determinadas mediante esta metodología requiere la existencia de la refracción PPS. Esta refracción no es evidente en los datos sísmicos, ni es identificada sobre los mismos como un primer arribo, por tanto en adelante en este documento se denominará segundas llegadas. En la práctica la refracción PPS, es identificada según Meulenbroek, 2011, como se muestra en Figura 30.

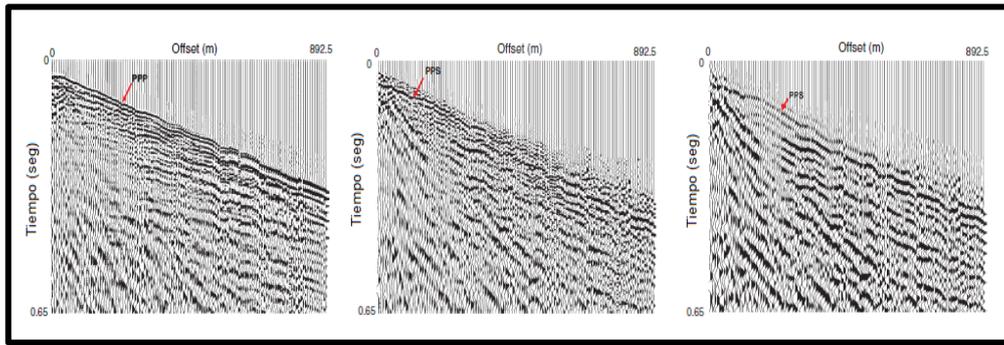


Figura 30. (a) Identificación de refracción PPP sobre la componente vertical, (b) identificación de refracción PPS sobre la componente radial y (c) identificación de refracción PPS sobre el dato filtrado componente radial 4-8-35-60 Hz, (Meulenbroek, 2011).

En ésta se observa, la identificación de la refracción PPP (a) como la primera llegada convencional, la refracción PPS (b) como la segunda pendiente paralela a la primera llegada en la componente radial. Para identificarlo más fácilmente (Meulenbroek, 2011), sugieren la aplicación de un filtro pasabandas 4-8-35-60 Hz.

Esta será la metodología propuesta para el cálculo de estáticas esta investigación, y como se observó anteriormente, es necesario conocer el valor de las velocidades de las ondas de corte, en la capa superior e inferior. Es por ello, la necesidad de describir el análisis de ondas superficiales.

3.8. Análisis multicanal de ondas superficiales.

Dentro de los métodos geofísicos indirectos se encuentran aquellos basados en el análisis de ondas superficiales, entre los más conocidos en esta categoría se encuentran los métodos de análisis espectral de ondas superficiales (SASW) y el análisis multicanal de ondas superficiales, también conocido por sus siglas en inglés “*Multichannel Analysis of Surface Waves*”. La técnica multicanal MASW fue introducida y publicada por primera vez en *Geophysics* (Park, 1999), surgió como un método para optimizar el concepto del método SASW, el cuál fue publicado a mediados de 1980 y consistía en el

análisis espectral del *ground roll*, generado por una fuente impulsiva y registrado por un par de geófonos de frecuencia (1-4.5Hz) (Park *et al.*, 1999).

La adquisición del método MASW es básicamente muy similar a la usada en estudios convencionales de sismica de refracción, con reflexiones de ondas de cuerpo. Se utilizan por lo general, registros simultáneos de 12 o más receptores, colocados a distancias cortas de 1-2 metros y distancias largas de 50-100 metros, la fuente utilizada puede ser impulsiva o vibratoria, básicamente el método consiste en analizar espectralmente el registro sísmico, en la banda de frecuencias de las ondas superficiales, luego se construye la curva de dispersión velocidad aparente en función de la frecuencias, para finalmente invertir y generar un modelo de velocidades de ondas de corte, como es mostrado en la Figura 31.

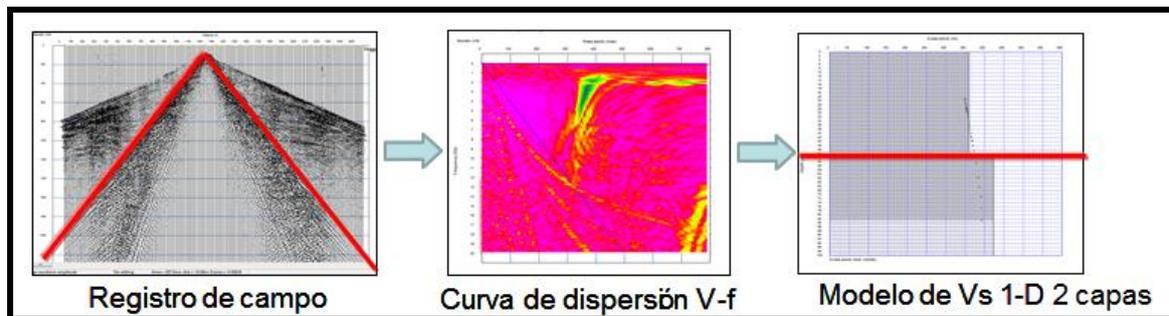


Figura 31. Procesamiento de las ondas superficiales (Ricaurte, 2014).

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO

En el presente capítulo se muestra una visión general de la metodología de cada una de las etapas desarrolladas en esta investigación específicamente en los procedimientos y métodos realizados para realizar la determinación de las estáticas mediante el análisis de las refracciones de las ondas PPP y PPS. Básicamente, todo se reduce al emplear un flujo de procesamiento de datos sísmicos para la obtención de imágenes PP y PS, como es mostrado en el siguiente flujo de trabajo, (Figura 32).

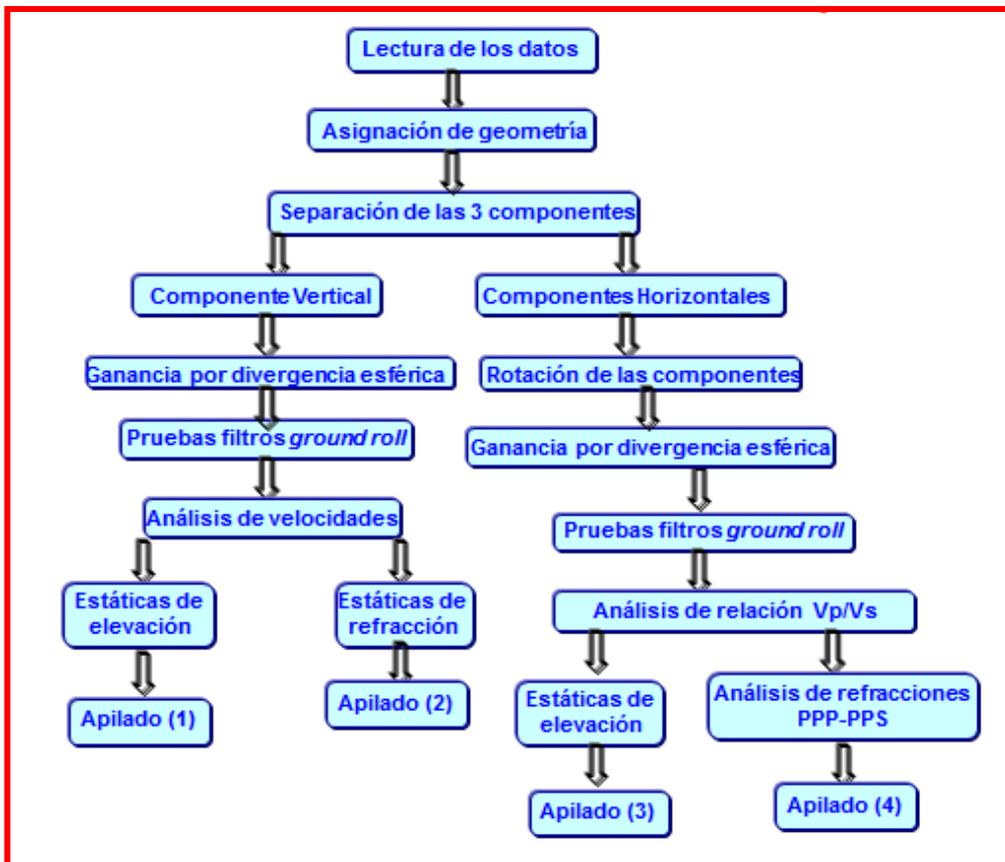


Figura 32. Esquema de metodología de procesamiento.

4.1. Recopilación de información.

Esta etapa consistió en la recopilación de material bibliográfico: información geofísica publicada en congresos nacionales e internacionales, trabajos especiales de grado y publicaciones periódicas principalmente basándose en información sobre el procesamiento de datos de sísmica multicomponente, haciendo énfasis en las

correcciones estáticas de ondas convertidas, destacándose en los estudios de Li Yan-Peng *et al.* (2012) y Alan Meulenbroek (2011).

4.2. Carga de los datos sísmicos al programa ECHOS, con los parámetros de adquisición del proyecto Huyapari 11M3D3C.

Se creó el proyecto llamado Huyapari_Geotec en el programa Paradigm ® Echos ®, el cual es el programa de procesamiento sísmico disponible en el Centro de Procesamiento de Datos Geofísicos (CPDG) de PDVSA INTEVEP, para la generación de imágenes en 2D y 3D del subsuelo.

Se procedió a la lectura de los datos en formato SEG D, para ser transcritos en el formato interno de la herramienta del programa de procesamiento. Luego mediante la información contenida en los archivos SPS contentivos de la información de posición de fuentes y receptores se asignó la geometría de los datos. Para verificar si la geometría era correcta se colocaron los primeros quiebres encima de los *shots*, (Figura 33).

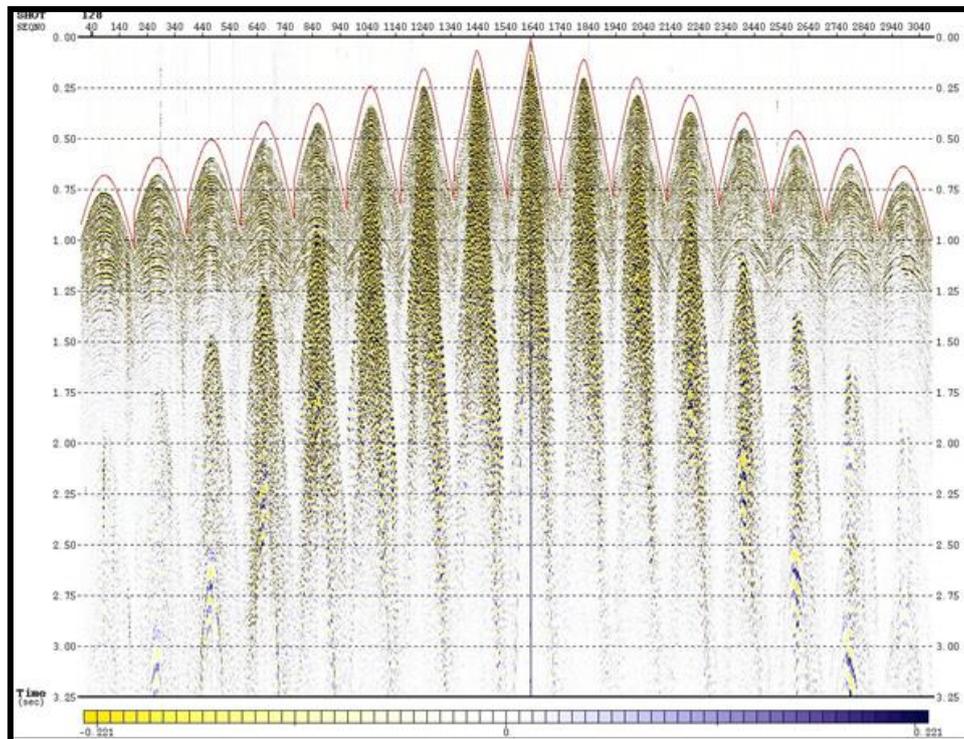


Figura 33. Datos en la componente vertical con los primeros quiebres.

Los datos de reflexión sísmica que se procesaron en esta investigación corresponden a un área piloto seleccionada dentro del proyecto, ubicada en el bloque denominado

Desarrollo, la cual específicamente va desde la línea receptora 3150 hasta la 3222 y desde la línea de tiro 1084 hasta la 1228, comprendiendo un total de 12,5 km² aproximadamente de área de estudio, teniendo en cuenta que se utilizaron los mismos parámetros de proyecto que se observan en la Tabla 1.

Así mismo se disponen de datos de refracción provenientes de un estudio previo realizado por INTEVEP (marzo 2013), (16 perfiles de 240 m c/u, distancia entre receptores 5 m y fuentes disparadas a los extremos y entre receptores) adquiridos en un área de 3,24 km² inmersa dentro del área anteriormente mencionada. En la figura 34, se muestra la ubicación de las fuentes y receptores del área piloto y la ubicación de las refracciones. A partir de estas posiciones de fuentes y receptores se obtienen mapas de cobertura (teóricos) para la onda PP y PS (Figura 35), en este último caso se asumió una relación $\gamma = V_p/V_s = 3,1$. La selección de éste área piloto, obedeció a los estudios previos realizados por el equipo de INTEVEP.

Tabla 1. Parámetros de adquisición del levantamiento en la zona de estudio.

Parámetros de adquisición	
Número de líneas receptoras	30
Número de líneas fuentes	5
Distancia entre líneas receptoras	150 m
Distancia entre líneas fuentes	150 m
Distancia entre receptores	12,5 m
Distancia entre fuentes	25 m
Intervalo de muestreo	2 ms
Longitud de registro	6 s
Número de disparos	425

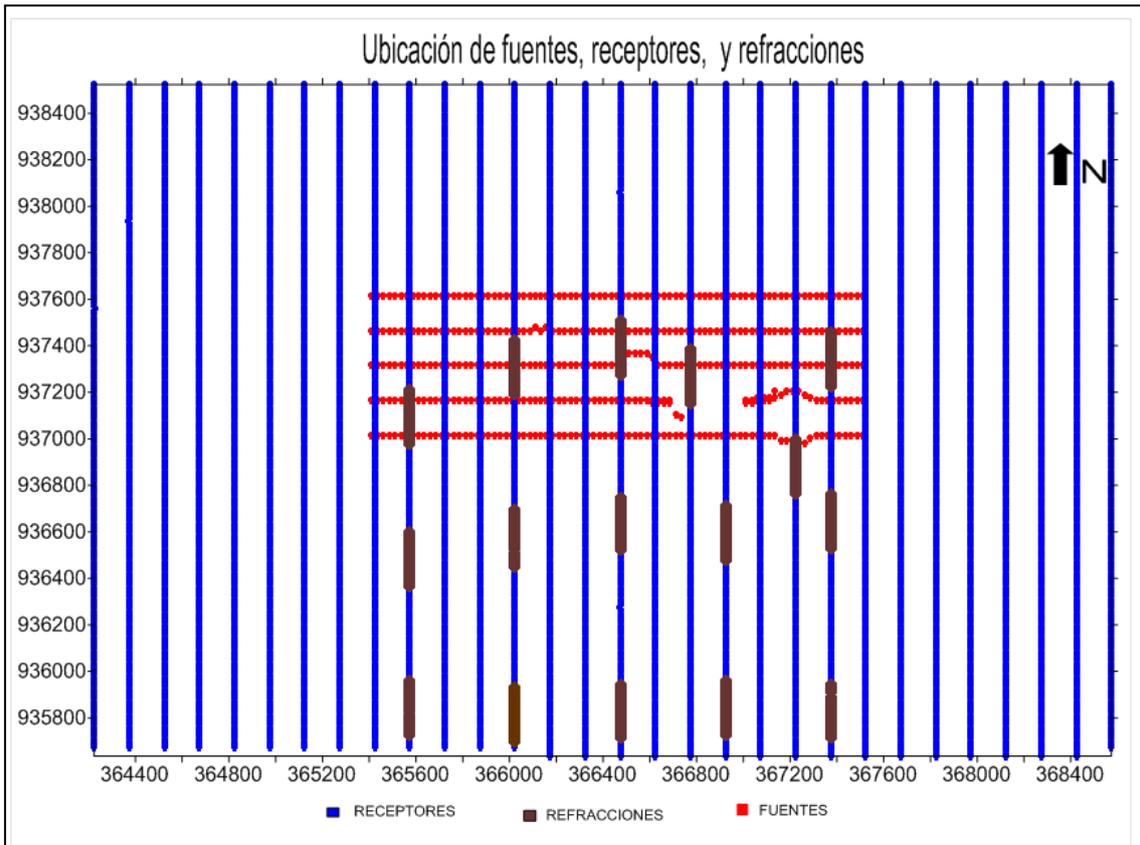
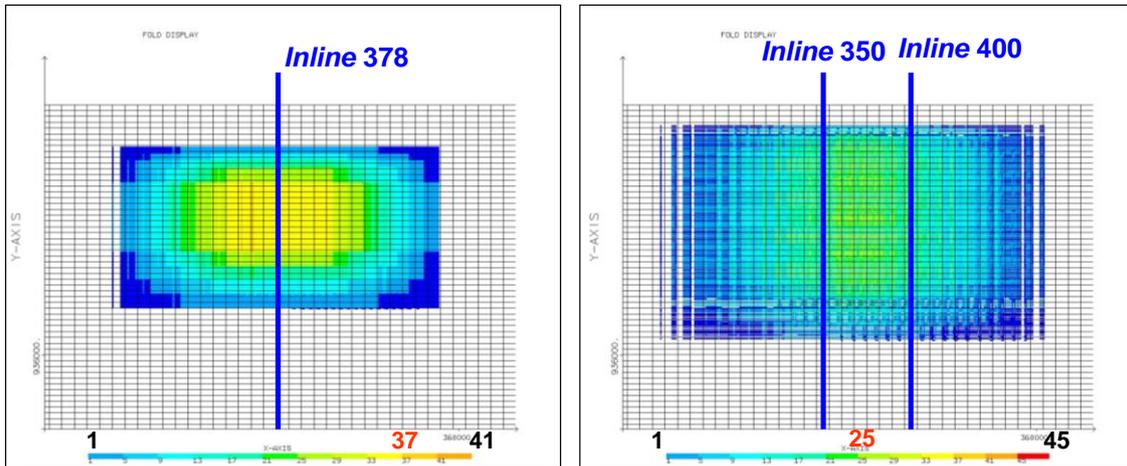


Figura 34. Ubicación de fuentes, receptores y refracciones.



(a) Cobertura PP

(b) Cobertura PS ($V_p/V_s=3,1$)

Figura 35. Mapa de cobertura (a) Onda PP y (b) Onda PS.

En los mapas de coberturas, puede observarse que la cobertura o *fold* nominal en el caso PP es 37 y en el PS 25. Asimismo, se señalan las *inlines* de control que serán empleadas para generar los apilados, 378 en el caso PP y en el caso PS 350 y 400.

4.3. Separación de los datos en tres componentes.

Esta etapa consistió en observar los datos en el formato interno del programa Echos, (Figura 36), de forma detallada, tomando en cuenta las amplitudes de las trazas. Las trazas con mayor amplitudes se les asignó un canal denominado canal vertical; luego las trazas que tenían un valor medio y bajo de amplitudes se les asignó un canal horizontal.

Las trazas del canal vertical son los datos en la componente vertical para el procesamiento de la onda P y el canal horizontal corresponde a las dos componentes horizontales para el procesamiento de la onda S, que se divide primero en la componente en *inline*, (Figura 37) y luego la componente *crossline*, (Figura 38).

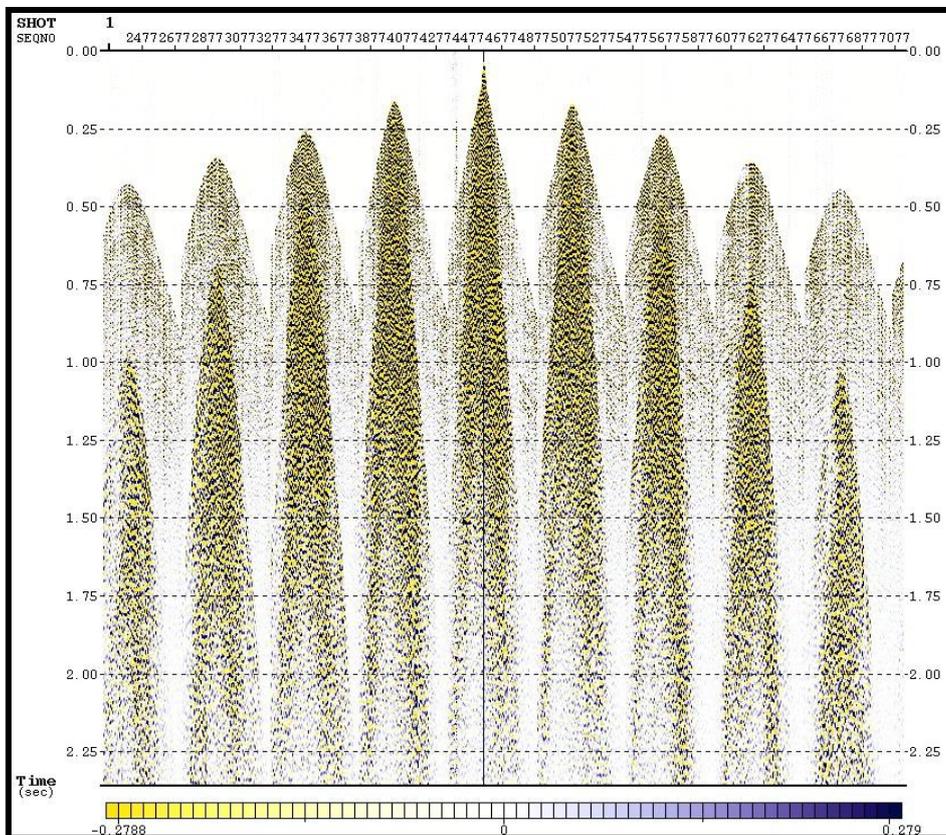


Figura 36. Datos crudos en el formato interno del programa Echos.

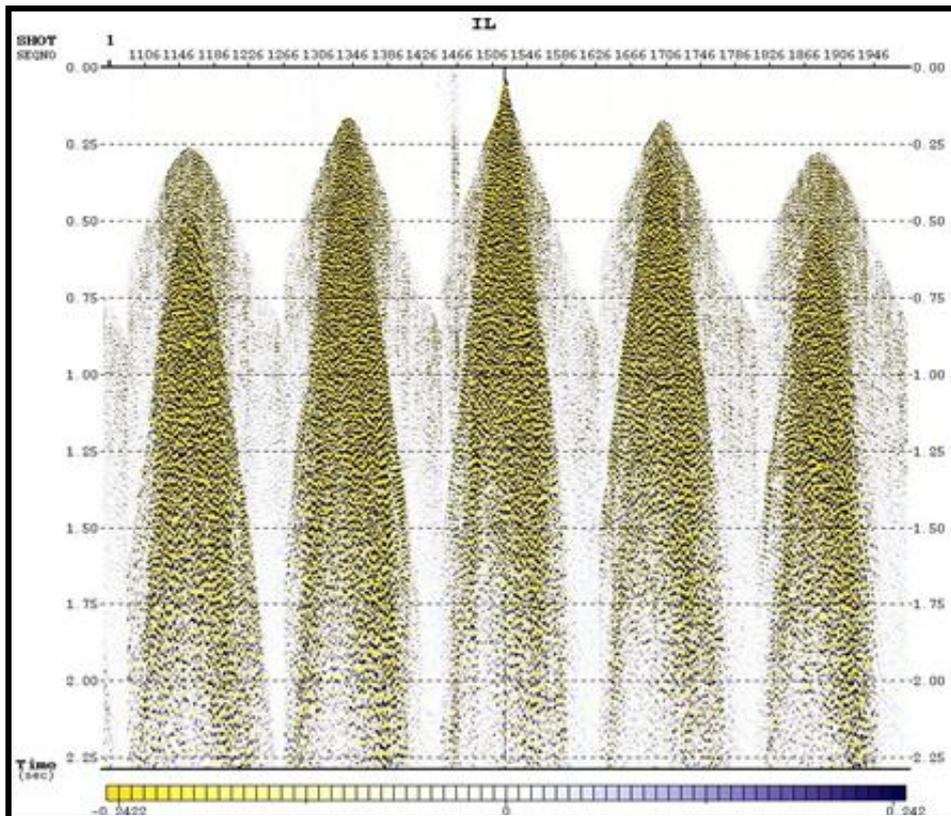


Figura 37. Datos en dirección *inline*.

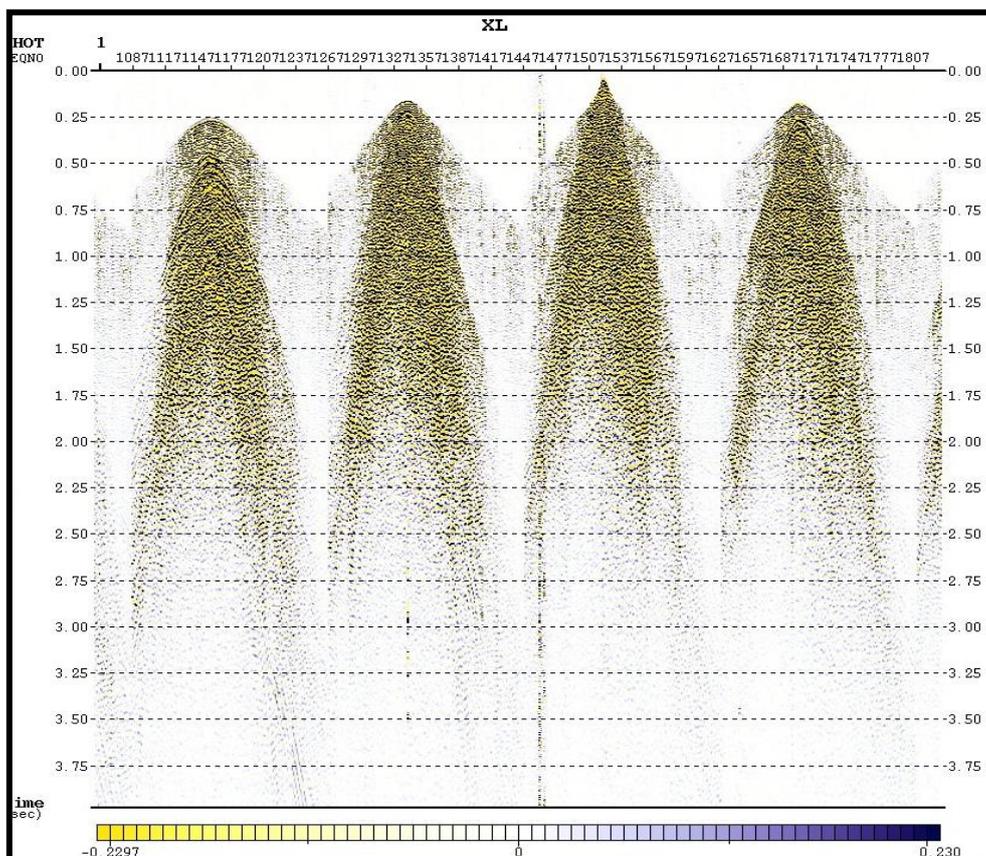


Figura 38. Datos en la dirección *crossline*.

4.4. Procesamiento de la onda PP.

En esta etapa se explicará cada uno de los pasos utilizados en el procesamiento de la onda PP, como se muestra en la parte izquierda de la Figura 32, haciendo relevancia a la ganancia por divergencia esférica, pruebas de filtros para *ground roll* y análisis de velocidades para así obtener los apilados por elevación y refracción.

- Ganancia por divergencia esférica.

En esta etapa se procedió a realizar la corrección de amplitudes por efecto de divergencia esférica. La definición de los parámetros para esta corrección se realizó en base al estudio de las curvas de decaimiento de amplitudes calculada en distintos disparos de cada levantamiento. Al estudiar estas curvas se pudo observar que los disparos realizados presentaban un decaimiento más pronunciado en algunos disparos realizados en tierra. Por tal motivo se aplicaron parámetros de recuperación.

El tipo de corrección aplicada fue la tradicional ganancia por divergencia esférica $G(t)$ cuya expresión general es:

$$G = \frac{V(t)^m t^n}{K} \quad [\text{Ec. 15}]$$

Donde K es una constante de normalización y está definida como la máxima velocidad presente en el modelo de velocidades $V(t)$. Este modelo de velocidades de referencia fue calculado a partir de las velocidades de apilamiento de un CDP *gather* ubicado en la zona los levantamientos en tierra, a fin de conservar los mismos niveles de referencia para la aplicación de la función de ganancia.

Los parámetros m y n fueron seleccionados luego de múltiples pruebas hasta obtener una curva de decaimiento constante, donde el valor de m fue de 1 y el n 0,5.

- Pruebas de filtros para *ground roll*

El filtrado del ruido de ondas superficiales o *ground roll*, consistió en la aplicación de un filtro de polarización aplicado sobre las componentes verticales y las componentes *inline-crossline*, con lo cual son removidas todas las ondas con polarizaciones elípticas. Una vez separadas las componentes, los datos fueron filtrados en el dominio *shot-offset* mediante filtros pasa bandas, cuyas ventanas de aplicación son variables en espacio y

tiempo en el caso de la componente vertical el filtro pasa banda empleado fue 2-15-130-150 Hz para la preservación del dato sísmico y 18-30-130-150 en la zona del ruido de ondas superficiales Figura 39.

Los filtros se basaron principalmente en un algoritmo que transforma el dato del dominio T-X al dominio F-X, llevándose a cabo una mezcla de trazas adyacentes. Las frecuencias más altas que una frecuencia de corte definida menor a 25 Hz (donde se supone que el ruido *ground roll* no existe) no son alteradas. Las pendientes se calcularon mediante los *headers/amplitud* y se observaron los tiempos y los *offsets*, de esta manera se obtuvieron los valores de las pendientes.

Para cada prueba se realizaba análisis espectral que sirve para calcular las características del espectro del dato sísmico.

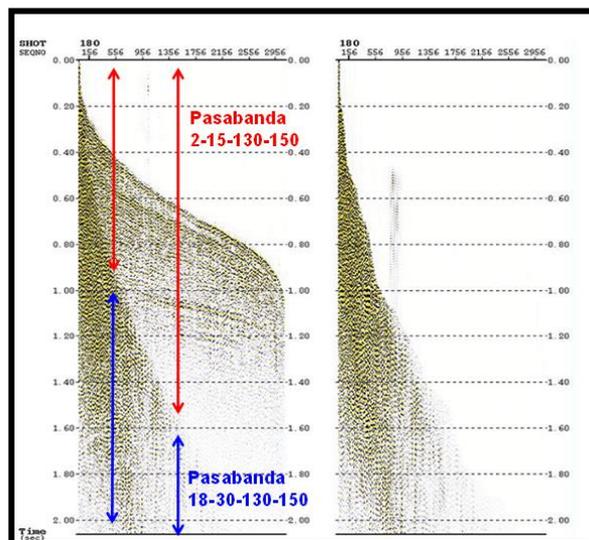


Figura 39. Datos en la componente vertical con la presencia del *ground roll*.

- Selección de las velocidades

Para la selección de las velocidades se calculó el valor medio o promedio absoluto de la amplitud dentro de una ventana específica de tiempo, luego se obtuvo la relación entre el valor RMS deseado y el promedio antes calculado. Este escalar es asignado a la función de ganancia la cual se aplica a cada muestra o traza dentro de la ventana temporal elegida, luego se almacenó una función velocidad en la base de datos del proyecto. La función velocidad almacenada en forma de pares tiempo/velocidad se puede utilizar en modo interactivo, presentando al lado izquierdo el disparo y al lado

derecho el mapa de semblanza correspondiente al disparo, de manera de poder realizar el picking o selección de los pares tiempo/velocidad que mejor horizontalicen las reflexiones registradas. Para selección de velocidades el programa permite visualizar el *gather*, los paneles de apilado con velocidad constante (CVS *constant velocity stacks*) y la semblanza, Figura 40. Los análisis de velocidades se realizaron cada 50 *inlines* (cada 300 m aproximadamente). La figura 41 muestra el modelo de velocidades obtenido en la *inline* de control 378.

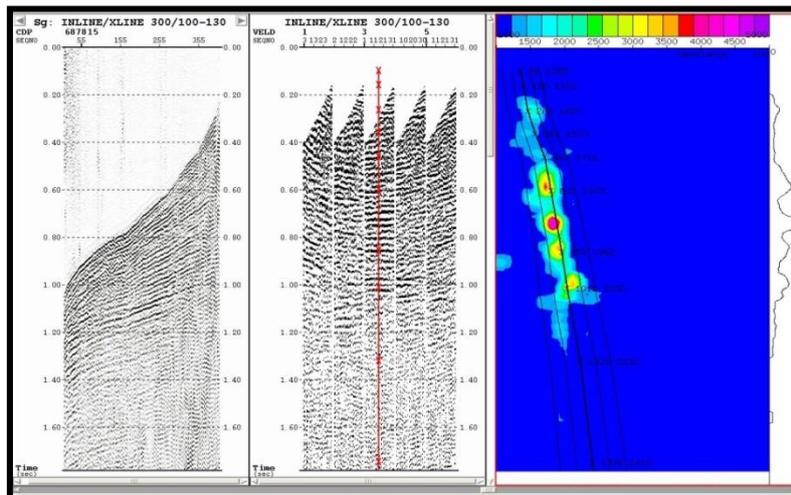


Figura 40. Selección de las velocidades P con la semblanza.

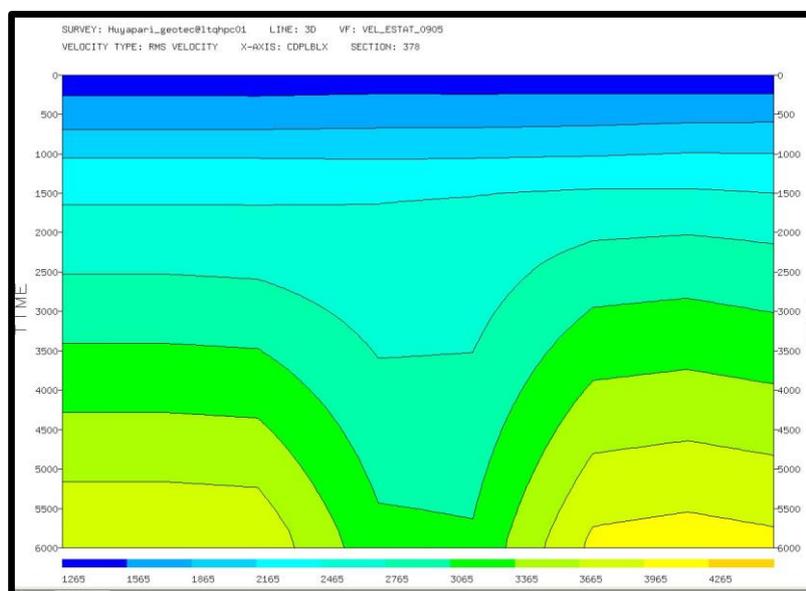


Figura 41. Modelo de velocidades de onda P en la *inline* 378.

- Enmudecimiento

Consistió en generar una entrada con los datos y se utilizó la función ganancia; luego se utilizó en modo interactivo, la selección de los pares *offset*-tiempo directamente sobre el disparo, para así silenciar las trazas, desde cero milisegundos hasta un tiempo específico, preservando el resto de las amplitudes sin ninguna modificación, Figura 42.

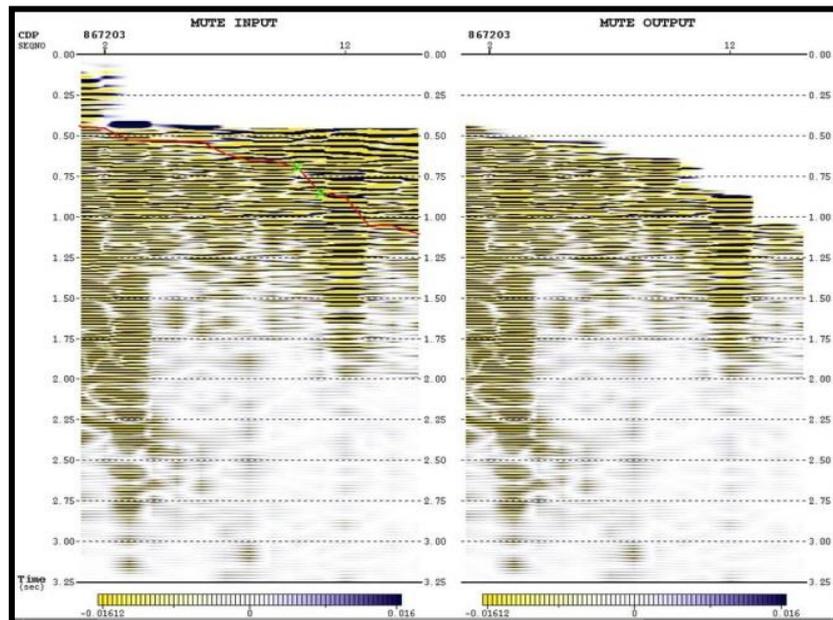


Figura 42. Enmudecimientos de los datos en la componente vertical.

Estáticas por elevación

Se determina el *datum* final con un valor 200 m, este valor es seleccionado considerando el máximo de elevaciones, (Figura 43) y la velocidad de reemplazo de 1800 m/s y luego se calculan las estáticas por elevación de la siguiente manera:

$$\text{Static} = (D_r - D_f) * 2 * 1000 / V_r$$

Dónde:

D_r = datum sísmico de referencia

D_f = datum flotante de elevación

V_r = velocidad de reemplazo

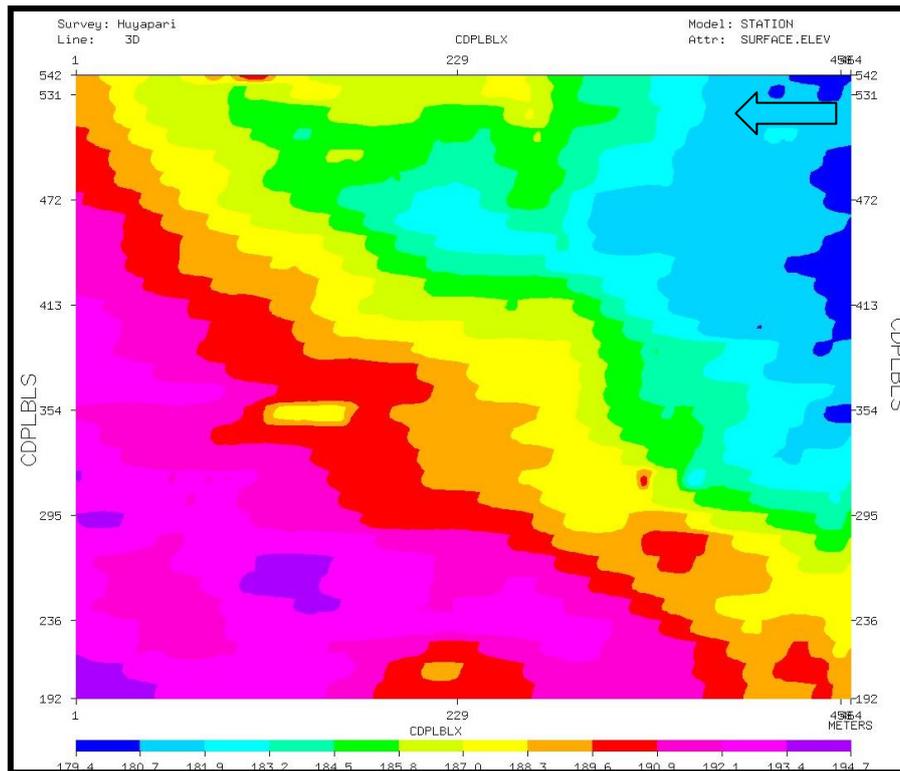


Figura 43. Mapa de elevación.

Una vez realizado el primer análisis de velocidades y aplicada la corrección NMO y de enmudecimiento se procede a efectuar un apilado con el propósito de generar un modelo preliminar que permita determinar la presencia de ruidos y algunas características particulares que pueda presentar la información. Esta sección obtenida no es definitiva, sino que aún deben realizarse determinados tratamientos para obtener un mejor apilado.

- Selección de las primeras llegadas

Para la selección automática de primeros quiebres se seleccionaron manualmente diez disparos de cada 425, a fin de construir un conjunto de datos de referencia. Este conjunto de datos le permiten al algoritmo centrar una ventana de búsqueda dentro de la cual se detecta el primer quiebre, en base al comportamiento de la envolvente de la traza dentro de esa ventana.

Una vez seleccionados los primeros quiebres, los datos fueron agrupados y su información vaciada dentro del proyecto, a fin de calcular una solución de estáticas de refracción para la onda P y la onda convertida.

El primer aspecto importante a señalar es el comportamiento de los primeros quiebres (Figura 44), al graficar los tiempos de los primeros quiebres *versus* el *offset*, se obtuvo solo una capa con una velocidad de 1750 m/s, (Figura 45 Figura 44).

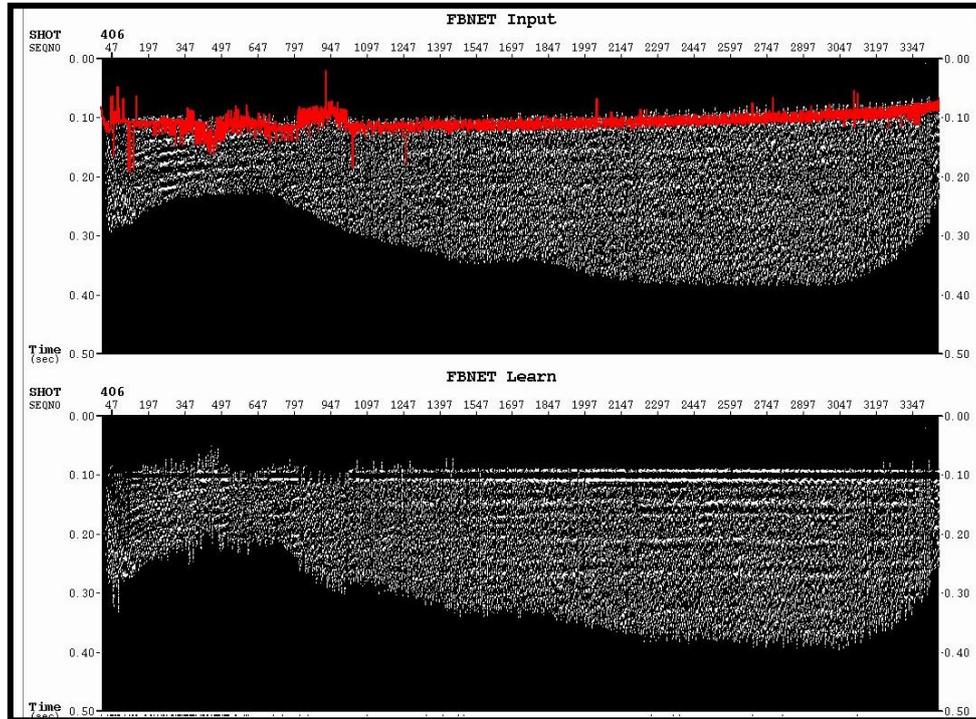


Figura 44. Selección de las primeras llegadas con el módulo FBNET.

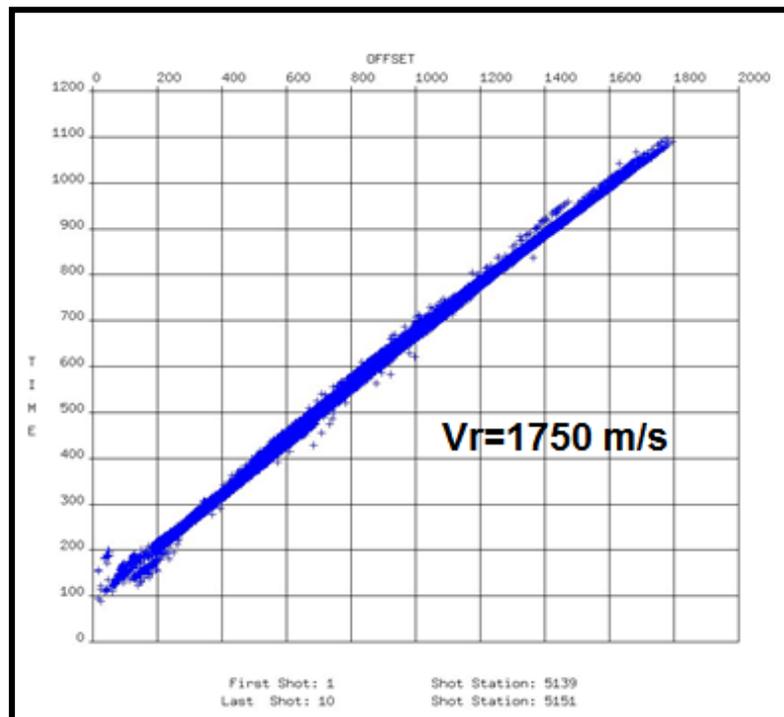


Figura 45. Primeras llegadas en la ventana *offset* y tiempo.

- Estáticas de refracción

Para poder tener una solución completa del método de refracciones es necesario conocer dos variables: la velocidad de *weathering* y la *subweathering*, por lo tanto se utilizó las siguientes ecuaciones.

Ecuación del modelo

$$T(n,m)=S(n)+R(m)+ S[\text{slow}(k)*\text{dist}(k)]+s(n)+r(m)$$

$T(n,m)$ = selección de los primeros quiebres para el shot n y la estación m.

$S(n)$ = tiempo de viaje para el *shot* n correspondiente a la estática de *shot* de largo periodo.

$R(m)$ = tiempo de viaje para la estación m correspondiente a la estática de estación de largo periodo.

$\text{Slow}(k)$ = inversa de la velocidad en una celda K'esima en la dirección de la estación m y el shot n.

$\text{Dist}(k)$ = longitud de celda K'esima.

$s(n)$ = estática de corto periodo en la zona 1 del *shot* n.

$r(m)$ = estática de corto periodo en la zona 1 de la estación m.

Como la fuente fue dinamita enterrada a 15 m, a la ecuación anterior es necesario sumarle el tiempo de pozo.

$$T(n,m)= t(n,m)+up(n)$$

Luego se determina una superficie suavizada $zs(n)$ y se definen correcciones de elevaciones entre la elevación suavizada y la elevación verdadera.

4.5. Procesamiento de PS

Luego de obtener los apilados por elevación y refracción de P, comenzamos a procesar las ondas convertidas siguiendo el esquema de procesamiento, haciendo énfasis en rotación de las componentes, pruebas de filtros *ground roll*, análisis de relación V_p/V_s , estáticas de elevación y por último análisis de refracciones PPP-PPS.

- Rotación de las componentes

Esta etapa se basó en utilizar los datos en la componente *inline* y *crossline*, rotarlos debido a que en la adquisición multicomponentes, los canales H1 y H2 del geófono se colocan generalmente en paralelo (la componente radial) y perpendicular (la componente transversal) a la dirección de adquisición. Las componentes radial y transversal no están en la misma orientación H1 y H2 de los canales del geófono.

Para separar los datos en componentes radial y transversal, se lleva a cabo una transformación de coordenadas en forma de rotación. La transformación de las coordenadas necesarias para los datos registrados en el sistema de coordenadas H1 y H2 de los canales del geófono al sistema de coordenadas radial y transversal para cada par fuente-receptor del levantamiento 3D.

Los datos rotados son los que se van a utilizar en el procesamiento de la onda S, por lo tanto se les denominó RR, (Figura 46).

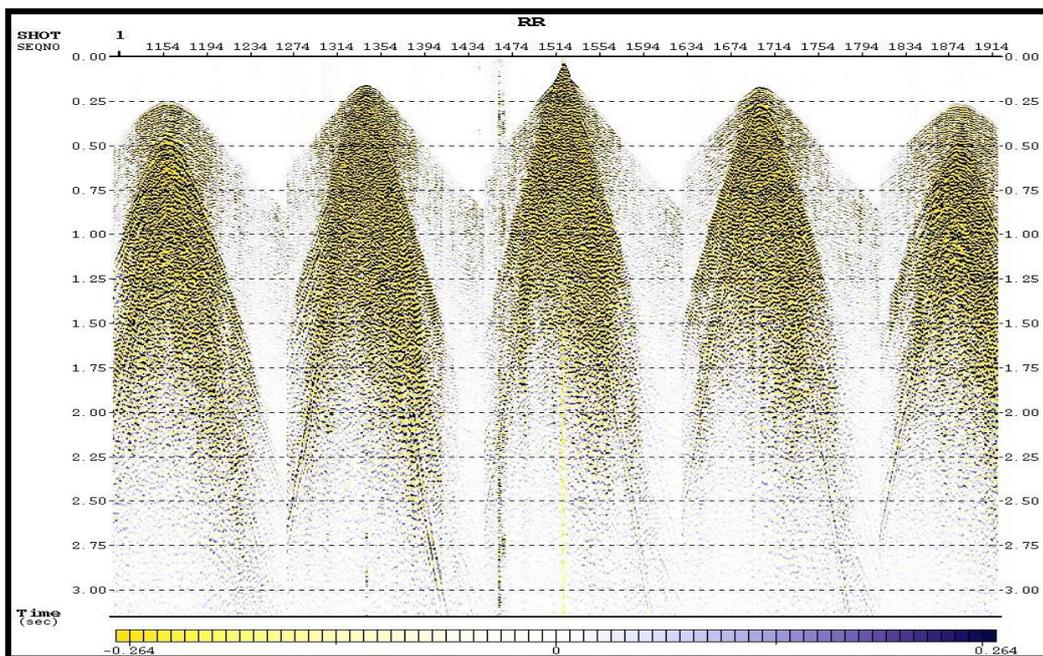


Figura 46. Datos de formato RR.

- Pruebas de filtros *ground roll*

Para poder eliminar o atenuar el ruido del *ground roll* para el procesamiento PS, se utilizaron varios módulos del programa, basados en diversos filtros que se utilizaron

también en procesamiento de P, solo que este caso se trabaja con los datos en formato rotado, Figura 47.

Se basó en una técnica utilizada para el filtrado adaptativo para atenuar el ruido de superficie (*ground roll*), preservando así la energía de baja frecuencia típicamente presentes en los datos sísmicos.

Seguidamente se trabajó con un módulo que suprime el ruido generado en el dominio T-F, donde se realizó los mismos pasos que se utilizaron en el procesamiento de P.

Para cada prueba realizada se utilizó el análisis espectral que sirve para calcular las características del espectro del dato sísmico, en el cual se selecciona el dato lo transforma al dominio de la frecuencia y diagrama la amplitud versus la frecuencia y la fase versus la frecuencia.

En el caso de la componente radial debido a que el contenido en frecuencia es menor se ajustaron los parámetros del filtro, para la preservación del dato sísmico en la banda 2-18-50-60 Hz y para la zona del *ground roll* en la banda 18-30-40-55.

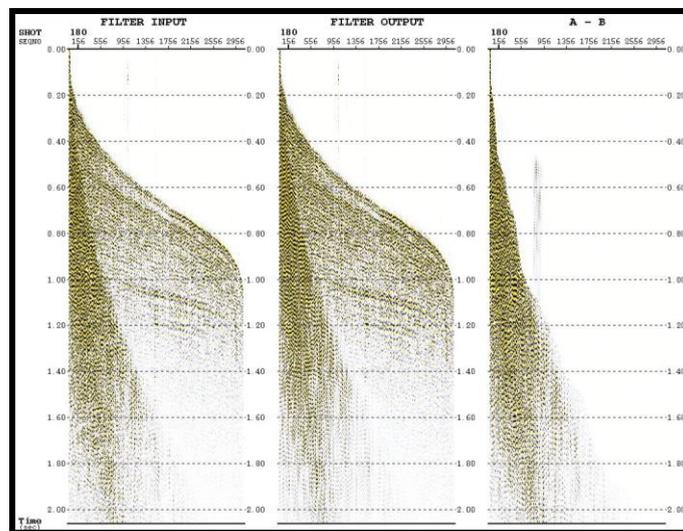


Figura 47. Filtrado del *ground roll*.

- Análisis de relación V_p/V_s

Se seleccionaron los tiempos y los gamma (el cociente entre la velocidad de P y S, teniendo en cuenta la forma dictada por el punto asintótico de conversión común), de acuerdo al espectro de semblanza y observando también la corrección de normal *move out*, tratando que las capas queden horizontales, obteniendo así los valores del cociente

de las velocidades P y S. La selección de las velocidades es importante ya que el apilado depende en gran medida de la cantidad de trazas incluidas en el análisis, Figura 48 y Figura 49. Los análisis se realizaron cada 300m.

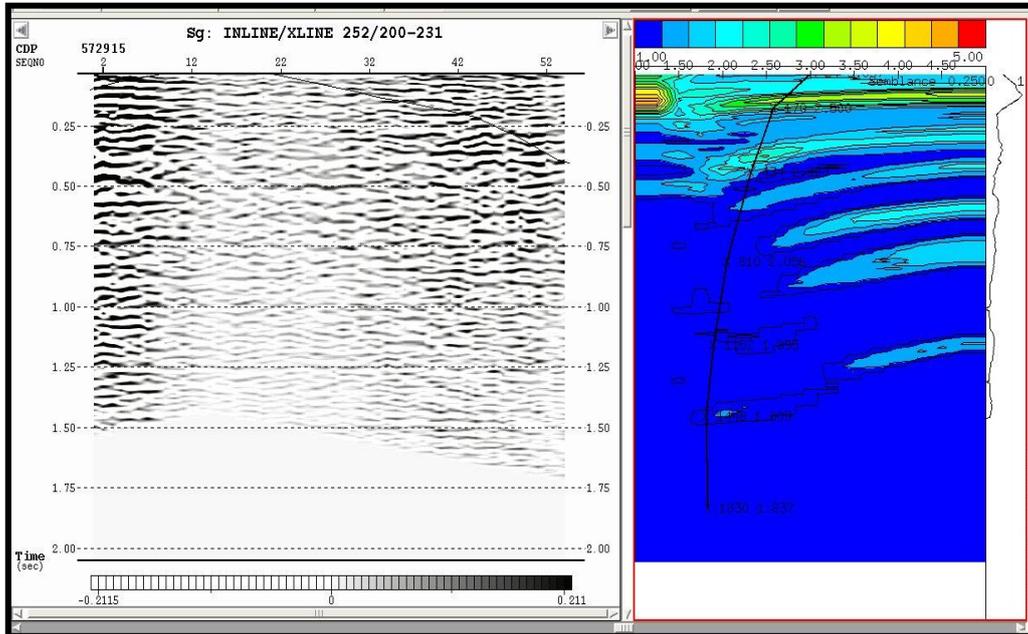


Figura 48. Selección de tiempo y gamma con las semblanzas.

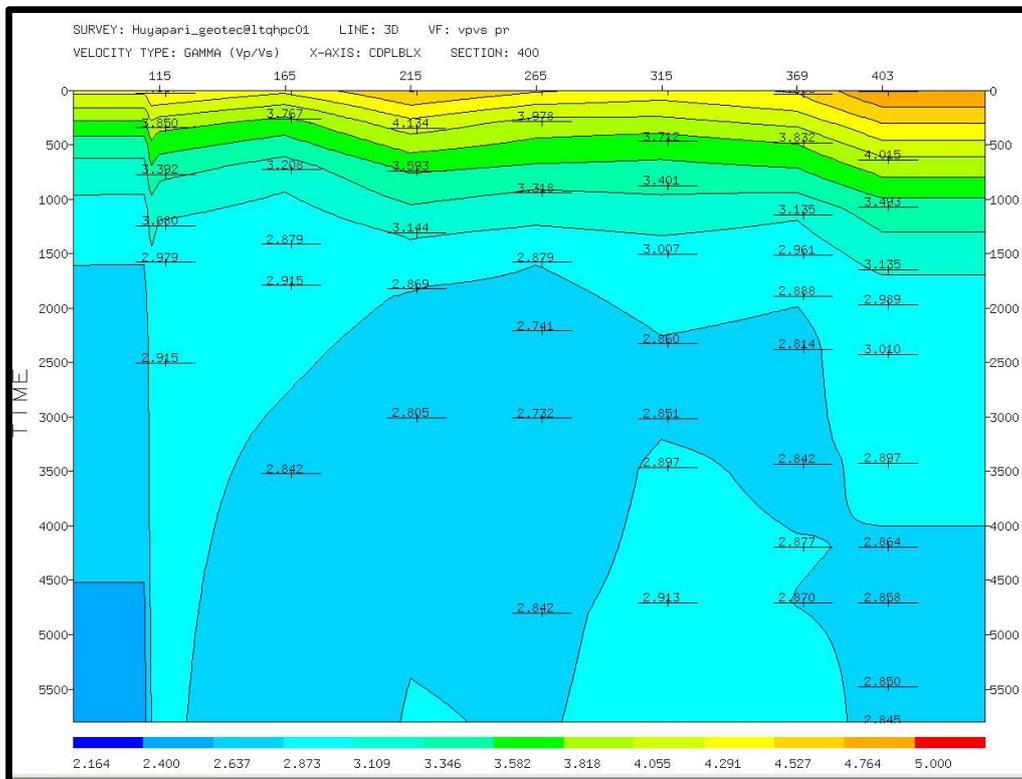


Figura 49. Mapa de relación V_p/V_s , en la *inline* 400.

- Apilado por elevación PS.

El apilado por elevación PS, fue obtenido empleando las velocidades de reemplazo para la fuente de 1750 m/s, dada por el modelo de refractor P y una velocidad a priori dada por los analistas de procesamiento del CPDG de INTEVEP de $V_s=600$ m/s para los receptores. De acuerdo con esto, para las fuentes la estática de elevación vendrá dada por:

$$\text{estáticas de elevación PS fuentes} = \left(\frac{e_d - e_s}{1750 \text{ m/s}} \right) * 1000 \quad [\text{Ec. 16}]$$

$$\text{estáticas de elevación PS receptores} = \left(\frac{e_d - e_s}{600 \text{ m/s}} \right) * 1000 \quad [\text{Ec. 17}]$$

Donde e_d es la elevación del *datum* (200 m) y e_s la topografía.

Con estas estáticas se generaron los apilados de referencia PS, contra los cuales se compararon los apilados generados con la aplicación de las estáticas en el dominio del receptor según la metodología propuesta en este trabajo.

A continuación se explica el procesamiento realizado, en esta investigación para poder obtener cada uno de los valores necesarios para cumplir con las ecuaciones 9 y 10, que es el determinar las estáticas de onda convertida por la metodología basada en el análisis de refracciones PPP-PPS (ver figura 50).

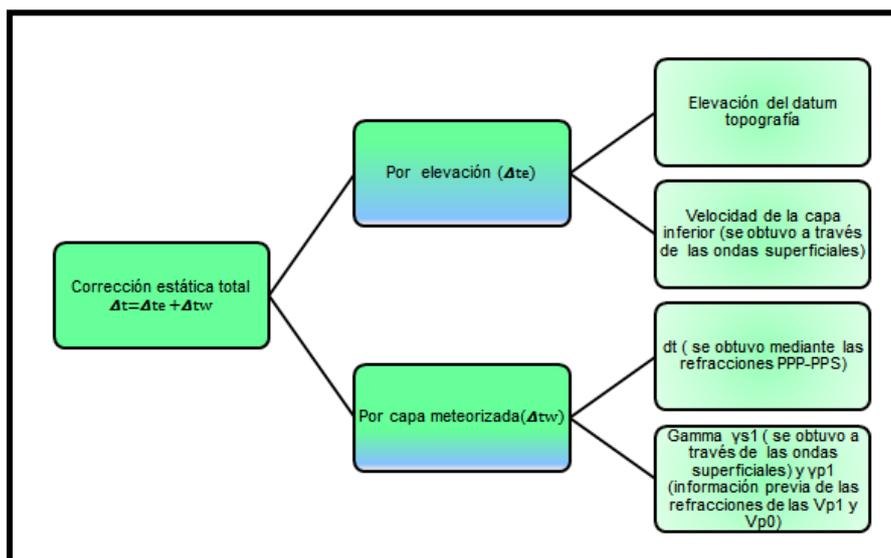


Figura 50. Esquema para corrección estática total.

4.6. Procesamiento de ondas superficiales

El análisis de ondas superficiales, fue la técnica empleada para determinar a partir de los datos sísmicos de onda P, un modelo de velocidades de ondas de corte de dos capas. El esquema de trabajo empleado es el mostrado en la Figura 51.

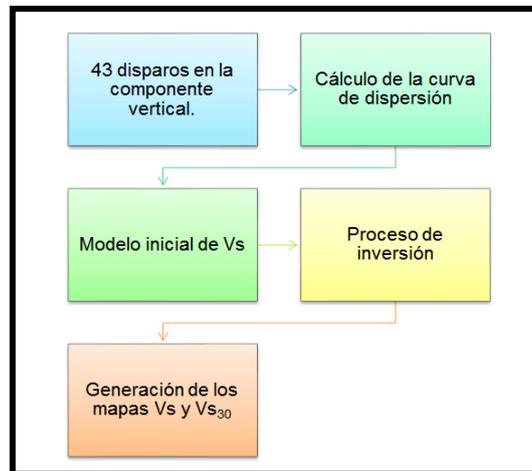


Figura 51. Esquema de procesamiento de las ondas superficiales.

Para ello se seleccionaron 43 disparos de la componente vertical, cuyas posiciones se extrajeron de la base de datos del paquete de procesamiento Echos, específicamente del modelo de fuentes. Las fuentes seleccionadas para el análisis se muestran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

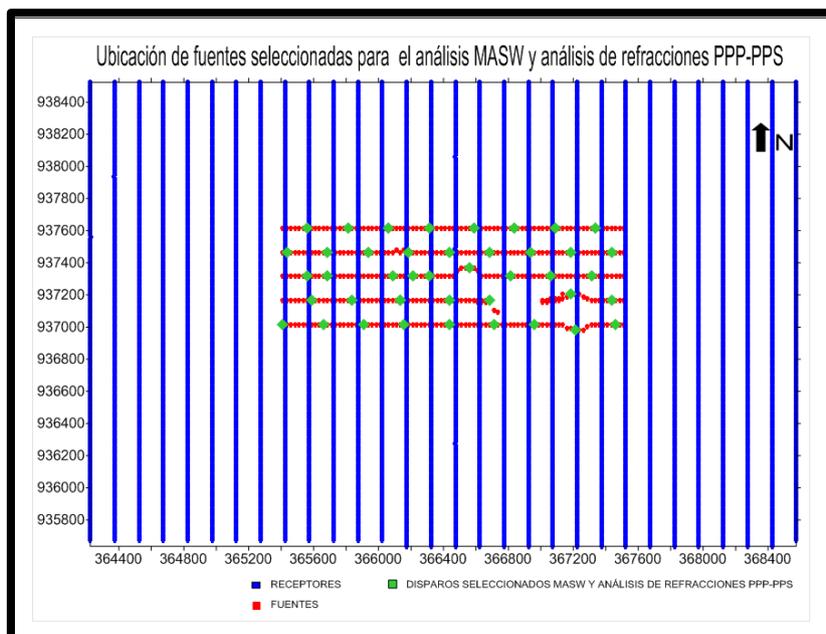


Figura 52. Disparos seleccionados para el análisis espectral de ondas superficiales y para el análisis de refracciones PPP-PPS.

Para el procesamiento del análisis multicanal de ondas superficiales, se trabajó con la herramienta SeisImager/SW de Geometrics. El software permite el análisis tanto para el uso de una fuente activa, así como también, una fuente pasiva (microtemores).

El programa SeisImager consiste de tres módulos para el análisis de ondas superficiales y datos de refracción, Pickwin, Plotrefa y WaveEq. Los módulos Pickwin y WaveEq del paquete SeisImager/SW, son usados para el análisis de datos de ondas superficiales; Pickwin y Plotrefa son usados para el análisis de datos de refracción en un programa separado denominado Seismager/2D (manual de SeisImager/SW).

El módulo Plotrefa está diseñado para la visualización de las curvas camino-tiempo (CT), asociadas a la selección de las primeras llegadas definidas en el módulo de Pickwin. Sobre estas curvas, este módulo permite definir las dromocronas presentes en la curva CT, así como también, realizar asignaciones de velocidades para cada dromocrona presente. A partir de la inversión de los datos, el módulo Plotrefa permite al usuario generar los modelos, tanto de velocidades como de espesores, asociados en particular para cada tendido sísmico.

El módulo WaveEq se usa para realizar el análisis de ondas superficiales. WaveEq trabaja con la información proveniente de Pickwin, al seleccionar los máximos de energía, para luego realizar el control de calidad con WaveEq y realizar secciones de inversión de la onda S vertical, y a su vez obtener un valor estimado de la velocidad de la onda S en los primeros 30 metros de profundidad.

Los 43 registros de *shot gathers*, se cargaron de manera individual, para el análisis de las curvas de dispersión. Los datos se exportaron del software *Echos* de *Paradigm* en formato SEG-Y. En el programa *Pickwin*, se abrieron los disparos en el formato SEG-Y, con un intervalo de receptores de 12,5 metros como lo muestra la Figura 53.

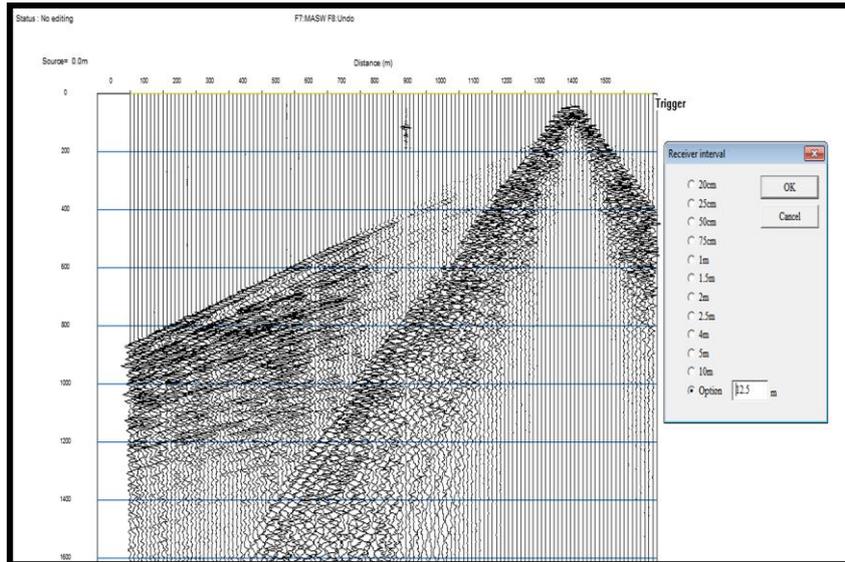


Figura 53. Asignación del intervalo de receptores en 12,5 metros.

Luego se procedió a pasar al dominio velocidad de fase-frecuencia, donde se estableció como velocidad máxima 1000 m/s, dado los valores observados en las pendientes de velocidad de las ondas superficiales y un rango de frecuencias de 0 a 30 Hz, que se estimó a partir de las pruebas realizadas en los registros.

Una vez seleccionado el rango de frecuencias y la velocidad máxima de las ondas superficiales, se procede a realizar la selección de los máximos asociados al modo fundamental de las ondas Rayleigh. Para ello se despliega la opción “*Pick phase velocity (1D)*”, como se observa en la Figura 54.

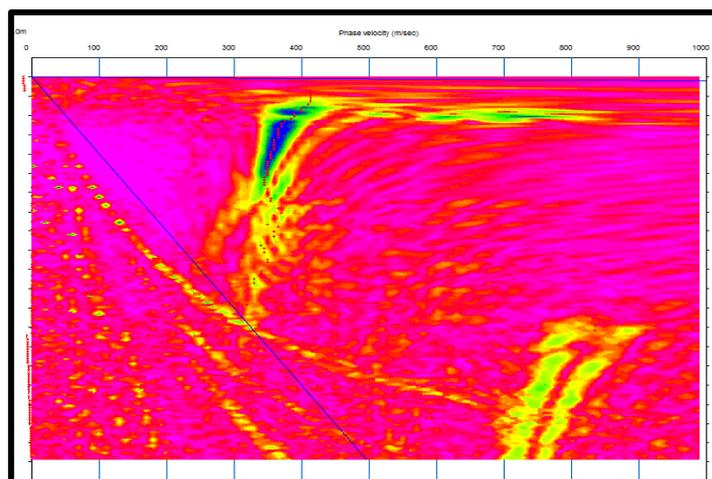


Figura 54. Ventana de “*pick phase velocity*”.

Consecutivamente, se seleccionaron las frecuencias mínimas y máximas asociadas a las ondas superficiales, para así obtener las velocidades de fase. El programa despliega de forma automática, una selección de puntos de color rojo a lo largo de la curva, representando las máximas amplitudes para cada frecuencia, definiendo la curva de dispersión del modo fundamental de las ondas Rayleigh. La selección automática de las máximas amplitudes que realiza el software no es muy precisa; por lo tanto, pueden existir puntos que estén fuera de la curva de dispersión, por lo cual se realiza el ajuste, con la selección manual de los máximos de la curva de dispersión.

Seguidamente se procede a mostrar la curva de frecuencia versus velocidad de fase asociada a los puntos previamente seleccionados y para ello se abre la ventana “*Show phase velocity curve (1D)*”. Posteriormente se abre el módulo WaveEq (*Surface Wave Analysis*) de SeisImager, que muestra una gráfica de velocidad de fase versus frecuencia. La gráfica representada por dos curvas, una roja en la parte inferior, que representa la curva de dispersión generada por la selección de puntos en el módulo anterior y una curva punteada en la parte superior, que indica la calidad del ajuste de puntos previamente seleccionados en la curva de dispersión. Existen segmentos de la gráfica donde se puede observar que la calidad de la curva no es apropiada para la generación de los perfiles de velocidad, por ello se debe limitar la curva al segmento, donde el rango de frecuencia represente un buen ajuste asociado, principalmente, al modo fundamental de las ondas Rayleigh.

El programa permite realizar el corte de la curva de manera manual y dejar el segmento que se considere de buena calidad, también se pueden borrar los puntos de baja calidad de manera automática, seleccionando en una escala del cero al uno (donde uno representa la máxima calidad de la curva) un valor máximo, para que el programa descarte todos los puntos que estén por debajo de dicho límite. El límite predeterminado, que establece el programa es 0,7. La Figura 56 muestra la misma curva de velocidad de fase versus frecuencia pero sin los datos de baja calidad, para finalmente proceder a generar los perfiles de velocidad de las ondas de corte.

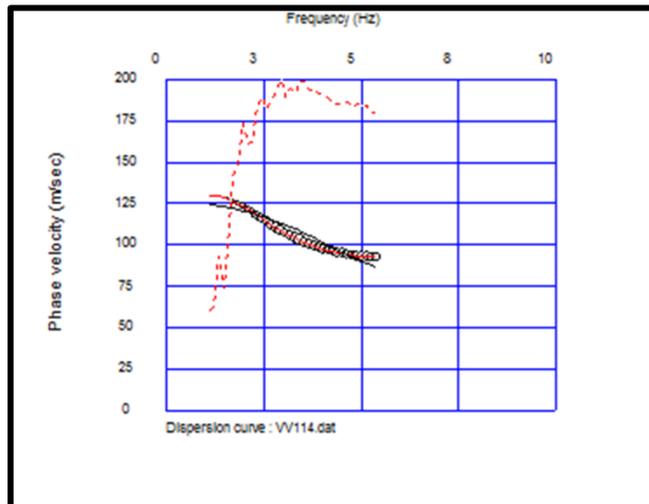


Figura 55. Curva de velocidad de fase versus frecuencia con una selección de puntos de buena calidad.

Como etapa inicial para crear los perfiles verticales de velocidad, se debe generar un modelo previo del subsuelo, asignándole al programa el valor de profundidad en metros y el número de capas del modelo inicial. Se despliega la opción de modelo inicial (*initial model*). Se establecieron como parámetros del modelo inicial, un espesor de 60 m y un total de 2 capas. Esto se realizó según el resultado de las pruebas realizadas dado el tipo de geófonos.

Una vez aplicada las consideraciones anteriores, se creó el modelo inicial de velocidades de ondas de corte V_s . En el modelo se pueden apreciar las velocidades de las ondas de corte para cada capa en profundidad. Una vez que se tiene el modelo inicial y se genera el primer perfil de velocidad de ondas de corte V_s , se procede a realizar la inversión de la curva de dispersión para generar el perfil V_s definitivo. Para ello es necesario seleccionar el número de iteraciones; en este caso se escogió un total de 20 iteraciones, dado que este valor fue el de mejor ajuste en el error de la curva a partir de las pruebas realizadas.

Al seleccionar el número de iteraciones, el programa realiza el ajuste de las curvas a través de mínimos cuadrados, generando de esta manera el perfil de velocidad de ondas de corte. El software a su vez permite visualizar la curva de velocidad de fase aparente, denotada por la curva de puntos y si el error se ha reducido en el proceso de inversión. Este se puede exportar en porcentaje (%) en un archivo "RMSE.txt", que se guarda finalizada la inversión, Figura 56.

Finalmente, se guarda la tabla, y en ella aparecen los valores obtenidos del perfil de velocidad, específicamente el valor de profundidad de cada capa, el valor de velocidad de onda S, el valor de velocidad de onda P y la densidad.

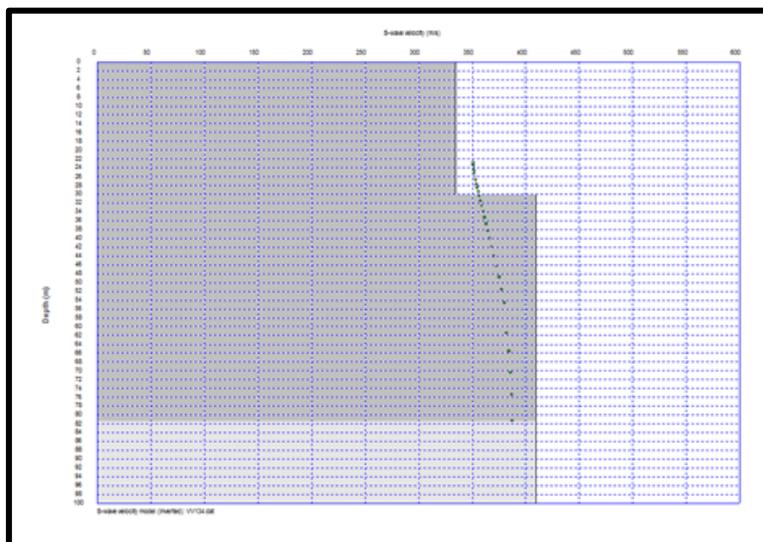


Figura 56. Perfil de velocidades de ondas de corte V_s , finalizada la inversión.

4.7. Análisis de factibilidad basada las refracciones PPP y PPS

Este punto dentro del presente trabajo, representó la base fundamental, es decir, la hipótesis de trabajo. Una vez obtenido un modelo de velocidades de ondas de corte, en particular la velocidad de corte de la capa suprayacente V_{s0} , se dispuso a evaluar mediante el modelo de dos capas horizontales si las diferencias de tiempo de las refracciones PPS y PPP eran apreciables.

En primer lugar, el personal del Centro de Procesamiento de Datos Geofísicos (CPDG) de PDVSA INTEVEP, disponía de datos de refracción provenientes de un estudio previo realizado en marzo 2013, como se mencionó anteriormente, con estos valores se realizaron algunas pruebas para determinar la diferencia de tiempo de PPP y PPS.

Empleado las ecuaciones de la ley de Snell (2, 3 y 4) mencionada en el capítulo 3 de esta investigación y utilizando los valores de las velocidad para P de V_{p0} y para V_{p1} de 1039 m/s y 1199 m/s (valores promedios obtenidos mediante la refracción), una velocidad de S (V_{s0} de 344 m/s valor promedio obtenido en el punto anterior mediante MASW) y con un espesor de 30 m. Se realizó el ejercicio teórico de determinar

cinemáticamente las diferencias de tiempo de las refracciones PPP y PPS, obteniéndose las siguientes fórmulas:

$$t_{PPP} = \frac{x}{v_{P1}} + \frac{2h}{v_{P0}v_{P1}} \sqrt{v_{P1}^2 - v_{P0}^2} \quad [\text{Ec. 18}]$$

$$t_{PPS} = \frac{x}{v_{P1}} + \frac{h}{\sqrt{v_{P1}^2 - v_{P0}^2}} \left\{ \left(\frac{v_{P1}}{v_{P0}} \right) - 2 \left(\frac{v_{P0}}{v_{P1}} \right) \right\} + \frac{h}{\sqrt{v_{P1}^2 - v_{S0}^2}} \left\{ \left(\frac{v_{S0}}{v_{P1}} \right) - 2 \left(\frac{v_{P1}}{v_{S0}} \right) \right\} \quad [\text{Ec. 19}]$$

Finalmente se obtuvo la diferencia de tiempo PPP Y PPS con esta fórmula $\Delta t = t_{PPS} - t_{PPP}$, y se obtuvo la gráfica diferencia de tiempo (dromocronicas).

4.8. Determinación de la diferencia de tiempo de las refracciones PPP-PPS experimentalmente.

Una vez cumplida la hipótesis de trabajo (teóricamente), se procedió a determinar las diferencias de tiempo de las refracciones sobre el dato sísmico multicomponente (vertical y radial). A continuación se muestra el esquema de trabajo empleado figura 57.

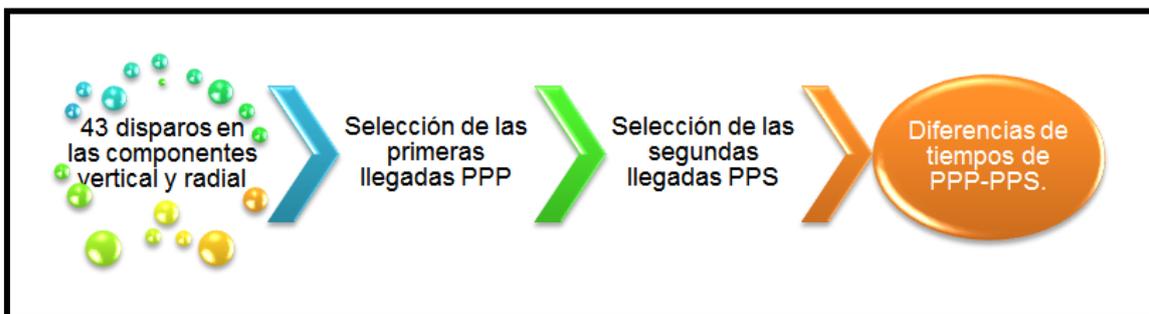


Figura 57. Esquema para obtener la diferencia de tiempo de las refracciones PPP-PPS.

El procedimiento se basó en la selección de los mismos 43 disparos para el análisis espectral de ondas superficiales, considerando las líneas receptoras más cercanas a cada uno de los mismos. Seguidamente se creó un flujo de trabajo para exportar los datos del programa Echos de Paradigm, en formato SEG-Y, tanto para los datos en la componente vertical y componente radial para luego procesar en el programa Pickwin que está diseñado para la visualización, edición de los registros sísmicos y para llevar a cabo la

selección de las primeras llegadas. Los archivos utilizados en este módulo corresponden a los archivos generados por el equipo de adquisición y almacenamiento, los cuales se encuentran en un formato SEG-2 o SEG-Y.

Procesamiento de los disparos en la componente vertical.

Se dispuso de 43 registros de *shot gathers*, en la componente vertical, los cuales se cargaron de manera individual, en formato SEG-Y, en el programa *Pickwin* y se colocó el intervalo entre receptores que es de 12,5 metros.

Se determinaron las primeras llegadas sobre los datos sin filtrar y sobre los datos filtrados, mediante un filtro pasa banda con una baja frecuencia de 4 Hz y una alta frecuencia de 60 Hz, (Figura 58).

Se seleccionó la opción de *pick first break automatically*, donde se selecciona las primeras llegadas de la onda P de manera automática, en cada caso. Después se revisó para ver si la selección de las primeras llegadas era la correcta. Cuando no era así se corrigió de forma manual los primeros quiebres e inmediatamente se guardó como un archivo .txt que se denominó de acuerdo al número de *shot* ejemplo 9PICKVV, Figura 59.

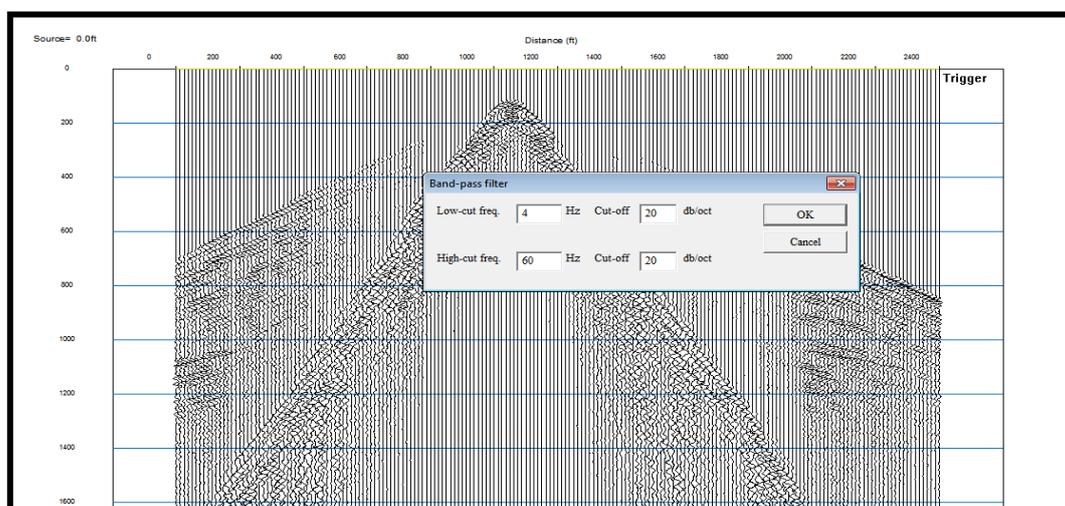


Figura 58. Filtro pasa banda para los datos de la componente vertical.

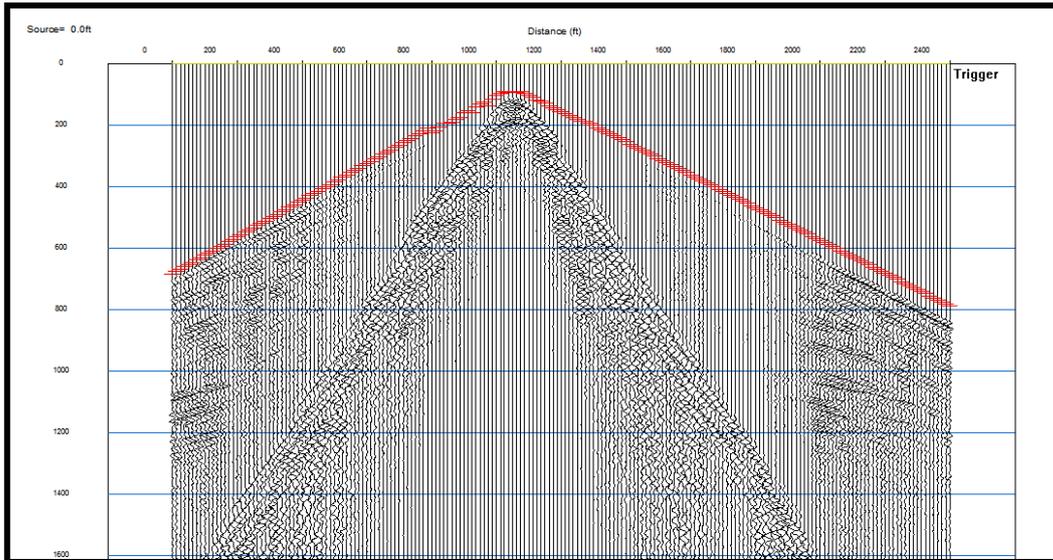


Figura 59. Selección de las primeras llegadas para la componente vertical.

Procesamiento de los disparos en la componente radial

Se dispuso con 43 registros de *shot gathers*, en la componente radial, los cuales se cargaron de manera individual, en formato SEG-Y y se colocó el intervalo entre receptores que es de 12,5 metros.

Se emplearon datos sin filtrar y datos filtrados, con un filtro pasa banda con una baja frecuencia de 4 Hz y una alta frecuencia de 60 Hz, (Figura 60).

Se seleccionó la opción *open pick file* donde se abrió el archivo de las primeras llegadas de PPP llamado 9PICKVV.txt y se superpusieron los disparos. Al observar este archivo anterior con los datos rotados se seleccionó la segunda llegada (PPS), y se guardó como 9PICKRR.txt, Figura 61.

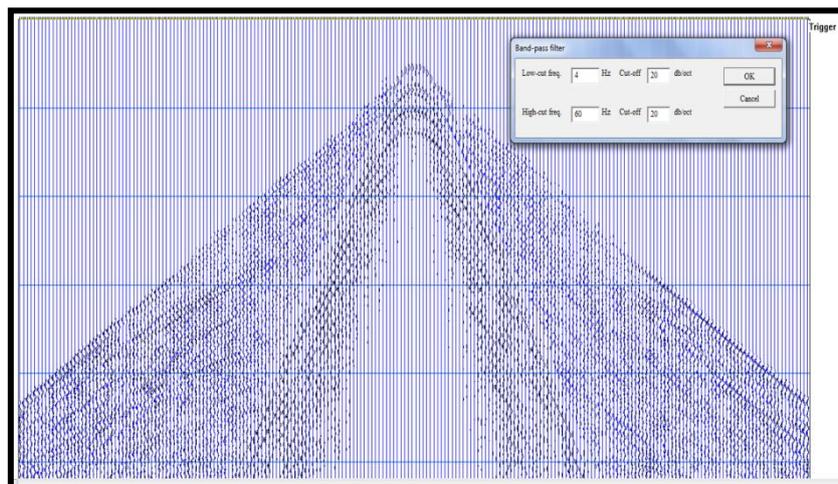


Figura 60. Filtro pasa banda para los datos de la componente radial.

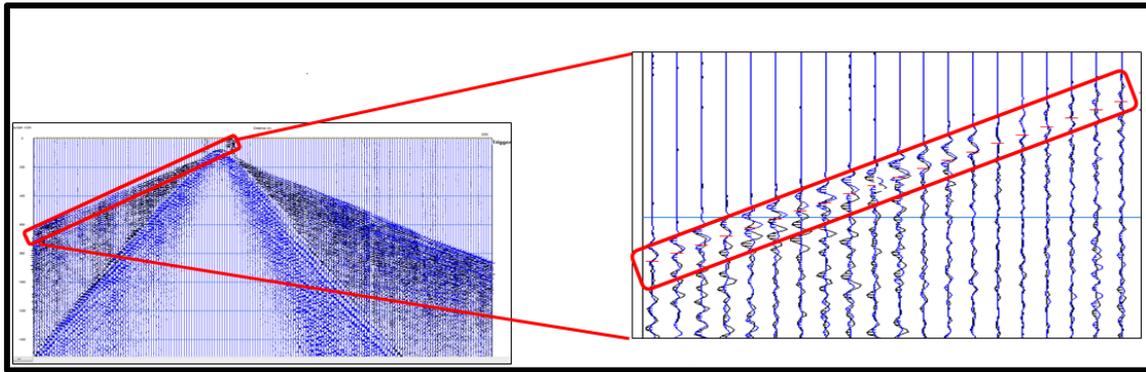


Figura 61. Segundas llegadas de los datos en la componente radial.

El criterio de selección empleado, fue un poco más robusto que el propuesto en la metodología encontrada en la literatura (Meulenbroek, 2011), pues al superponer los disparos verticales y radiales, en ambos las primeras llegadas son similares pero luego ocurre un desfase al observar este desfase se asumió la refracción PPS.

Luego en el programa *block* de notas se abrieron los dos archivos tanto en componente vertical como radial, se sustituyeron los puntos por coma y se verificó que coincidiera el número en ambos archivos. Luego se abrieron en Microsoft Excel los archivos mencionados para calcular las diferencias de tiempos con la resta de los tiempos PPS y PPS.

Posteriormente en el programa Echos de Paradigm, se obtuvieron los valores de elevación, coordenadas relativas y reales, número de canales, líneas de receptores entre otros y se procedió asignar las coordenadas reales para las diferencias de tiempos de obtenidas en cada disparo, para líneas con receptores comunes, se calculó el promedio para las diferencias de tiempos y finalmente se obtuvieron valores x,y,z finales para generar mapas en Surfer (para control de calidad) y posteriormente fueron introducidos al programa Echos, Figura 62 . Los valores x,y,z manejados en esta etapa fue un total de 3314 datos.

9PICKVV: Bloc de notas					9PICKRR: Bloc de notas				
Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda	Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
1996	0	3,000000			1996	0	3,000000		
0	1	12,500000			0	1	12,500000		
0,000000	193	0,000000			0,000000	193	0,000000		
0,000000	684	0,000000	1		0,000000	717,984375	1		
12,500000	678	0,000000	1		12,500000	710,753967	1		
25,000000	672	0,000000	1		25,000000	703,523560	1		
37,500000	660	0,000000	1		37,500000	696,293213	1		
50,000000	660	0,000000	1		50,000000	689,062805	1		
62,500000	652	0,000000	1		62,500000	681,832397	1		
75,000000	632	0,000000	1		75,000000	674,601990	1		
87,500000	626	0,000000	1		87,500000	667,371643	1		
100,000000	632	0,000000	1		100,000000	660,141235	1		
112,500000	612	0,000000	1		112,500000	652,910828	1		
125,000000	596	0,000000	1		125,000000	645,680481	1		
137,500000	596	0,000000	1		137,500000	638,450073	1		
150,000000	590	0,000000	1		150,000000	631,219666	1		
162,500000	582	0,000000	1		162,500000	623,989258	1		
175,000000	574	0,000000	1		175,000000	616,758911	1		
187,500000	568	0,000000	1		187,500000	609,528503	1		
200,000000	562	0,000000	1		200,000000	602,298096	1		
212,500000	556	0,000000	1		212,500000	595,067749	1		
225,000000	550	0,000000	1		225,000000	587,837341	1		
237,500000	538	0,000000	1		237,500000	580,606934	1		
250,000000	538	0,000000	1		250,000000	573,376526	1		
262,500000	524	0,000000	1		262,500000	566,146179	1		
275,000000	492	0,000000	1		275,000000	558,915771	1		
287,500000	510	0,000000	1		287,500000	551,685364	1		
300,000000	496	0,000000	1		300,000000	544,454956	1		
312,500000	496	0,000000	1		312,500000	537,224609	1		
325,000000	482	0,000000	1		325,000000	529,994202	1		
337,500000	468	0,000000	1		337,500000	522,763794	1		
350,000000	468	0,000000	1		350,000000	515,533447	1		
362,500000	460	0,000000	1		362,500000	508,303040	1		
375,000000	446	0,000000	1		375,000000	501,072632	1		

Figura 62. Valores de los tiempos de viaje de refracciones PPP y PPS en *block* de notas.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en esta investigación con su respectivo análisis, siguiendo el esquema de la secuencia de procesamiento mostrado en la metodología basándose principalmente en los apilados por estáticas de elevación y refracción para los datos de la onda P, seguidamente el análisis de ondas superficiales, análisis de factibilidad de la diferencia de tiempo PPP y PPS, por último apilados por estáticas de elevación y refracción de la onda convertida.

5.1. Apilado de estática de elevación de P en la línea 378 en la dirección *inline*.

Para la obtención del apilado de elevación que se observa en la Figura 63, se realizaron todas las pruebas sobre la *inline* 378 debido que presenta mayor cobertura. A partir de 1 s, se observa la presencia de un ruido de alta frecuencia, lo cual puede ser una firma del ruido de ondas superficiales o *ground roll*, el cual como es usual en los datos de la faja se enmascara con la frecuencia del dato sísmico de reflexión. Sin embargo, es apreciable la continuidad y coherencia de las reflexiones al menos hasta 1 segundo, lo cual indica que la velocidad de reemplazo de 1800 m/s seleccionada a *a priori* representó un valor apropiado para la obtención de una imagen del subsuelo de una calidad apreciable, siendo este un apilado considerado de referencia.

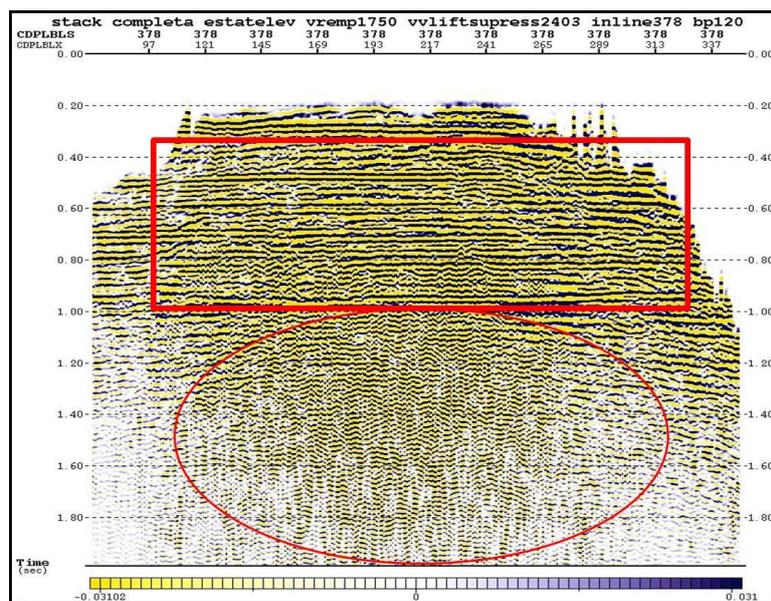


Figura 63. Apilado de estática de elevación en P en el inline 378.

5.2. Apilado de estáticas de refracción de P en la línea 378 en la dirección inline.

En la Figura 64, se observa el apilado de estáticas de refracción en la *inline* 378, en esta los reflectores presentan discontinuidades a partir de 1 hasta 2,25 s, debido a que se sigue observando la huella de las ondas superficiales (*ground roll*), sin embargo en la parte superior en un tiempo de 0,25 hasta 1 s, se observa como los reflectores presentan una mayor continuidad y se presentan más horizontales, debido a que las estáticas de refracción corrigieron las anomalías correspondientes a los efectos de la capa meteorizada, este apilado presenta un contenido en frecuencia en una banda de frecuencia de 15 a 80 Hz .

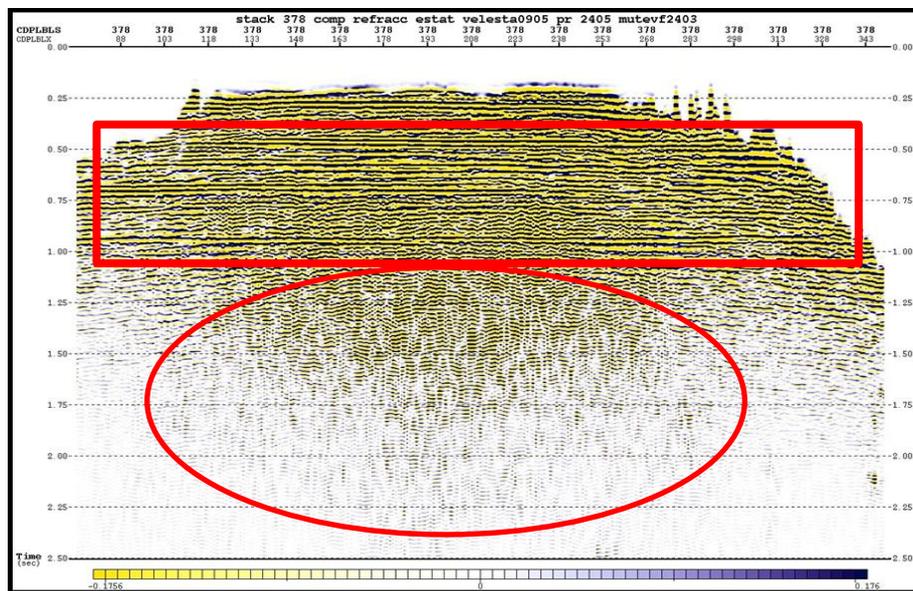


Figura 64. Apilado de estática de refracción para la onda P.

En ambos apilados, Figura 63 y Figura 64 se observa como es de vital importancia las correcciones estáticas, ya que mejoró significativamente las discontinuidades de los reflectores, permitiendo una continuidad lateral en los reflectores someros, los cuales representan los objetivos de interés en la zona de la faja petrolífera de Venezuela, la cual se caracteriza por yacimientos someros (en tiempo pudiera decirse cercano a los 800ms). La selección de primeras llegadas determinó que la velocidad del refractor fue de 1750 m/s, lo cual es un valor cercano al empleado en el apilado de estáticas de elevación y es por ello la continuidad y calidad aceptable de imagen que presentó el mismo. Otro valor a tener en cuenta, en el procesamiento de la onda P es el concerniente a las estáticas de receptor que en promedio da un valor de 17ms, este es un valor de referencia para posteriores análisis en este documento.

Una vez obtenida una imagen de onda P de bastante calidad, lo cual es indicativo, de que el modelo de velocidades de onda P, es bastante aceptable se procede a la obtención del apilado de onda convertida por elevación.

5.3. Apilado con estáticas de elevación de onda convertida PS.

Una vez tratado o procesado el dato sísmico correspondiente a las componentes horizontales, según la secuencia de procesamiento mostrada en la parte derecha de la figura 30, se obtuvo el apilado de referencia PS que es el correspondiente a las estáticas de elevación. Para ello, se usó como velocidades de reemplazo para la onda P 1750m/s (para las fuentes, velocidad obtenida a partir del modelo de refractor de onda P) y para la onda S 600 m/s, el cual es un valor *a priori* dado por los analistas de procesamiento del CPDG INTEVEP. En virtud de que la cobertura es más irregular debido a la asimetría del rayo PS, se emplearon las *inlines* de control 350 y 400. El apilado por estáticas de elevación PS para la *inline* 400, es mostrado en la figura 65.

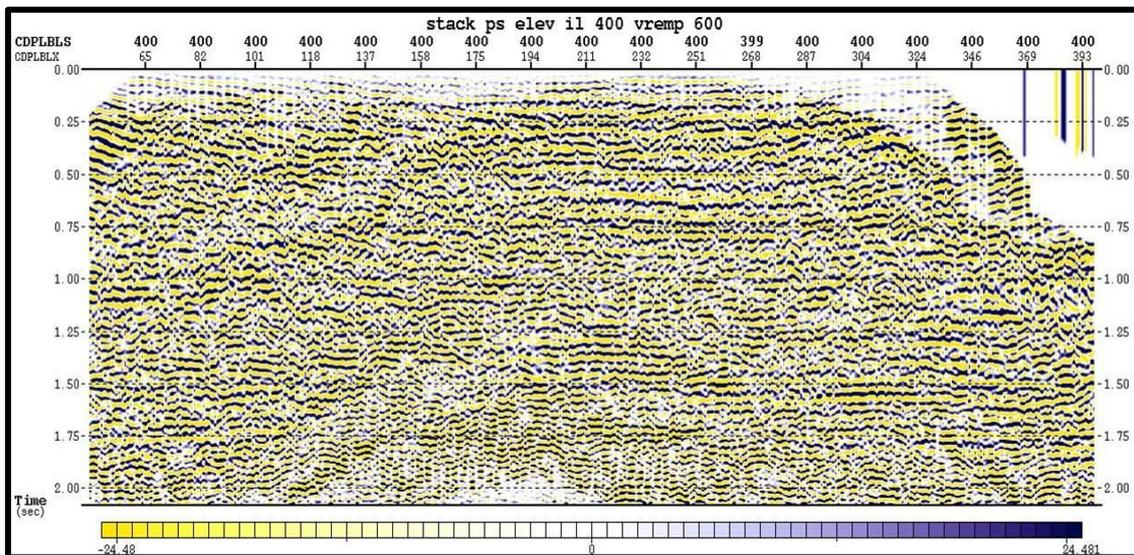


Figura 65. Apilado de estáticas de elevación PS *inline* 400.

Este apilado es de menor frecuencia como es de esperarse, la información espectral contenida en este es de 18-45 Hz, pero sin embargo presenta una continuidad aceptable. Este apilado será contra el cual se realizarán las comparaciones pertinentes.

5.4. Análisis de ondas superficiales.

Mediante el método de análisis multiespectral de ondas superficiales, se logró caracterizar la capa meteorizada del área de estudio, en lo que respecta a las velocidades de ondas de corte, se generaron 43 perfiles de velocidad S los cuales tuvieron una profundidad de aproximadamente 60 metros. Los perfiles de velocidades de ondas de corte, generaron un modelo de dos capas una primera capa con una profundidad de 30 m y una segunda capa con una profundidad 30-60 m, sin embargo estos valores van variando de acuerdo al perfil según la frecuencia mínima registrada durante la selección de puntos del modo fundamental en la curva de dispersión de las ondas Rayleigh. Con los valores obtenidos para cada capa se obtienen los mapas de las velocidades para la capa inferior y la capa superior. Los resultados de los perfiles tienen un error promedio de 3,4 m/s que es aproximadamente el 0,90 %, lo que, representa un buen ajuste entre ambas curvas.

En la Figura 66, se observa el mapa de las velocidades de la onda S en la capa superior, con una velocidad mayor de 382 m/s al norte del mapa, que coincide con la topografía más alta de la zona y con una mínima velocidad de 314 m/s al sur este del mapa. En cambio en Figura 67, se observa el mapa de las velocidades de la onda S en la capa inferior con valor máximo de velocidad de 427 m/s, que se observa al norte del mapa y un valor mínimo de velocidad de 383 m/s. De estos mapas, son empleados tanto los valores de velocidad promedio en cada una de las capas, así como su variabilidad según los mapas.

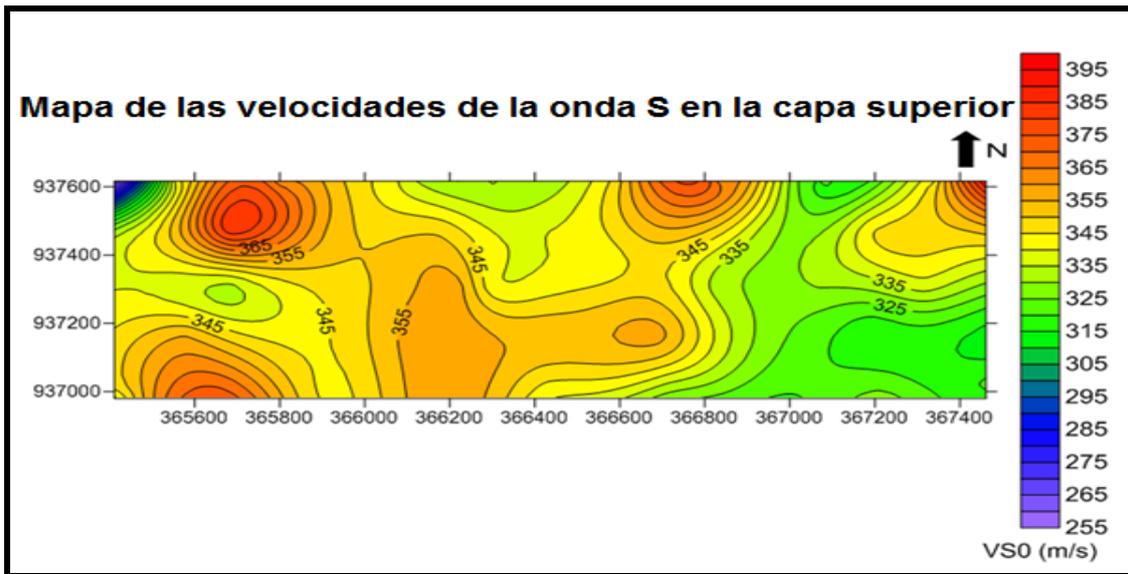


Figura 66. Mapa de velocidad de la onda S para la capa superior.

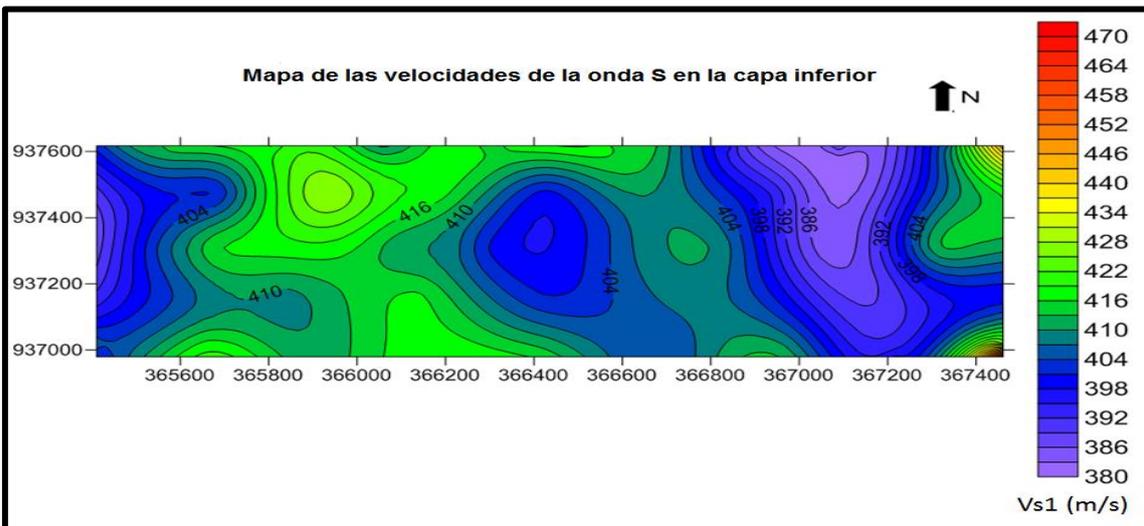


Figura 67. Mapa de las velocidades de la onda S para la capa inferior.

A través del análisis de ondas superficiales, también se pudo obtener los mapas de velocidades para la capa superior e inferior y promedio para la onda P mediante una relación V_p/V_s constante. La diferencia de las velocidades de onda P, obtenidas entre la capa superior e inferior no es apreciable en lo que a la sísmica de reflexión concierne alrededor de 4%, por lo cual se considera una sola capa con una velocidad dada por el promedio ponderado por espesores de 1706 m/s, lo cual nos indica que es un valor que se encuentra en el rango del obtenido en el procesamiento de la onda P en la sísmica mediante la selección de los primeros arribos, la cual se obtuvo una sola capa para la onda P de 1750 m/s (alrededor del 5%), el cual se muestra en la figura 68.

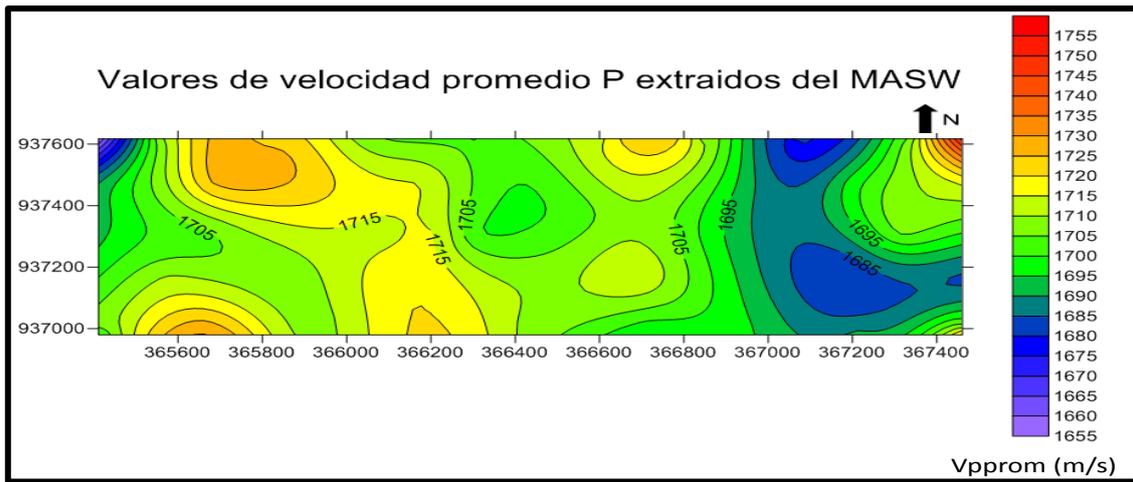


Figura 68. Mapa de las velocidades de la onda P promediada por espesores obtenidas del MASW.

Esta información de velocidades es introducida al programa Echos, en forma x,y,z, específicamente en el modelo de receptores, para asignar estos valores en cada posición de receptor.

5.4. Análisis de factibilidad basada en las diferencias de las refracciones PPP y PPS.

Debido a la metodología que se plantea en esta investigación, fue vital comparar de forma teórica si la metodología a proponer podía ser factible por lo tanto unos de los objetivos específicos cruciales fue el análisis de factibilidad basada en las diferencias de las refracciones PPP y PPS, por lo tanto se obtuvo la gráfica de refracción de las velocidades de la onda directa, onda refractada PPP y onda refractada PPS, observando aproximadamente la diferencia de tiempo entre la onda refractada PPP y PPS es de 40 ms, que para una sísmica cuyo intervalo de muestreo es 2 ms, representaría 20 muestras, que es apreciable sobre el dato sísmico de reflexión Figura 69.

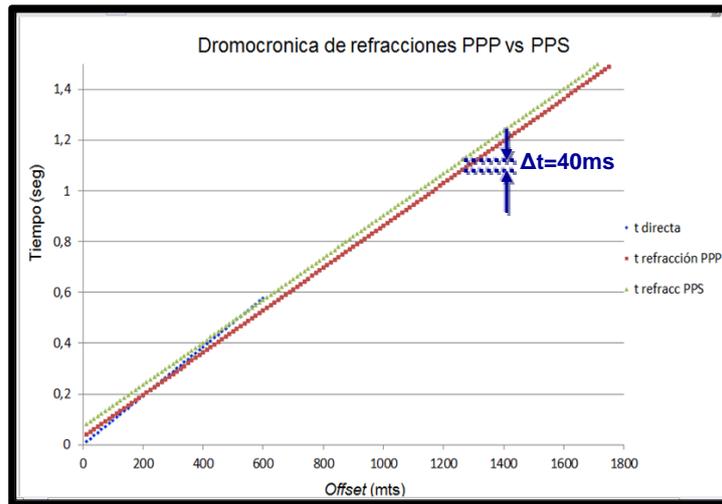


Figura 69. Gráfico de la diferencia de tiempos PPP –PPS.

5.5. Determinación de la diferencia de tiempo de las refracciones PPP-PPS.

Una vez verificada la hipótesis de trabajo, se procedió a determinar las diferencias de tiempo de las refracciones PPS-PPS experimentales, según la metodología explicada en el capítulo anterior. Para el disparo 9 sin filtrar se muestran las diferencias obtenidas figura 70.

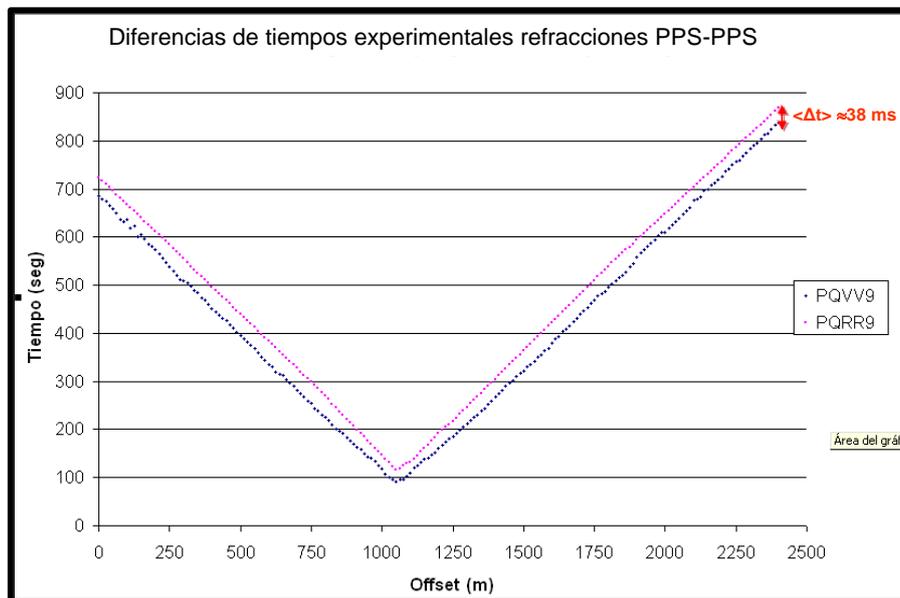


Figura 70. Gráfico de la diferencia de tiempos PPP –PPS.

Obsérvese que para este disparo analizado en particular, la diferencia entre las refracciones en promedio fue de 38 ms, lo cual es cercano al valor teórico de 40ms.

Luego de obtener las diferencias de tiempo entre los datos en la componente vertical y radial, tanto para los datos filtrados y para los datos crudos, se obtuvieron los siguientes mapas; el de la determinación de tiempo PPP y PPS con un filtro paso bajo con una frecuencia mínima de 4 Hz y una frecuencia máxima de 60 Hz (Figura 71), el cual presenta un valor máximo de la diferencia de tiempo de 86 ms, que se observa la sureste del mapa y el valor más bajo en la diferencia de tiempo es de 37 ms en la parte centro este del mapa. Luego observamos la diferencia de las refracciones de PPP y PPS sin los datos filtrados, con un valor máximo de 60 ms en la parte central, con una dirección OE y un valor mínimo de 28 ms, al sur oeste.

Al comparar ambos (Figura 71 y 72) se puede observar que los datos filtrados presentan mayor diferencia de tiempo, lo cual implicaría un factor mayor en la determinación de estáticas de ondas convertidas, cuyos efectos se verán o se reflejarán en las imágenes sísmicas PS, por otra parte con los datos no filtrados, una diferencia menor, correspondería a una estática de receptor menor en el apilado PS, cuyos efectos finales se observarán y evaluarán en la calidad de imagen. De igual forma este mapa (Figura 72) presenta muchas curvas irregulares lo significa que existe mucha discrepancia de los valores de los 43 disparos en la diferencia de los tiempos, en cambio el mapa (Figura 71) presenta un rango de valores muy similares entre los disparos lo que permite observar un comportamiento más uniforme en las curvas que representa las diferencia de tiempos

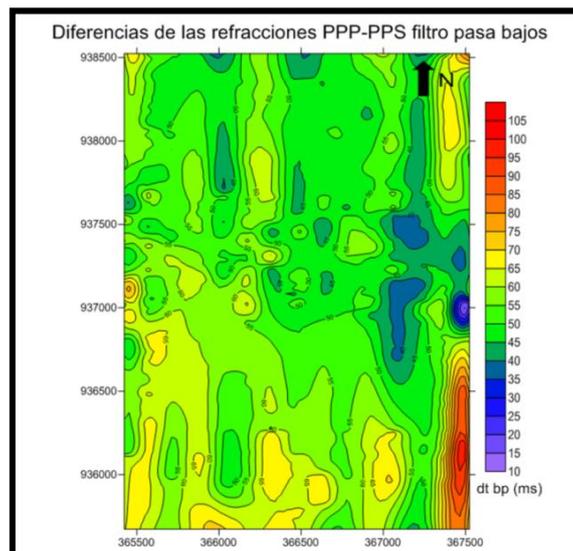


Figura 71. Mapa de diferencias de las refracciones PPP-PPS con filtro paso bajos.

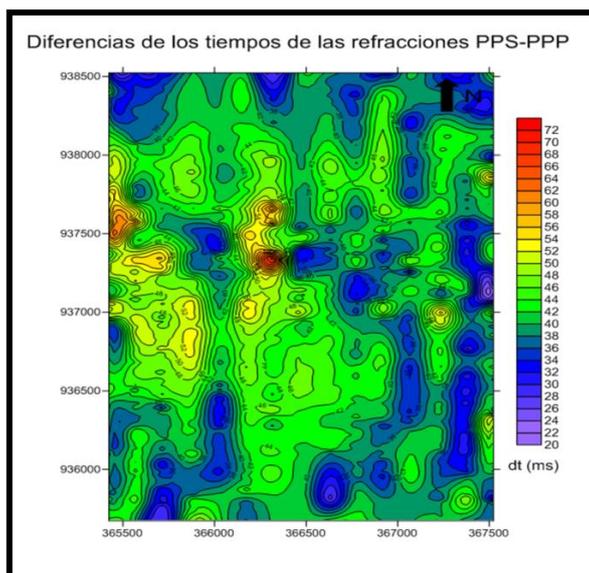


Figura 72. Mapa de diferencia de tiempos de las refracciones PPP-PPS.

Toda esta información generada externamente y visualizada en formas de mapas, fue nuevamente introducida en el programa de procesamiento de datos sísmicos Echos, en forma de tabla x,y,z. Específicamente, son asignadas en el modelo de receptores, donde para cada uno de ellos, se les calculó la corrección estática correspondientes según las ecuaciones 10 y 14.

5.6. Mapas de refracciones y correcciones estáticas mediante el programa Echos.

A continuación se muestra los mapas obtenidos mediante la campaña de refracción, realizada por INTEVEP en marzo 2013, el primer mapa de la velocidad de onda P para la capa superior, como se observa en la Figura 73. Presenta una velocidad máxima de 1200 m/s al noreste y una velocidad mínima de 900 m/s al noroeste. El segundo mapa es de la velocidad de la onda para la capa inferior como se observa en la Figura 74, presenta un valor máximo de velocidad de 1669 m/s al centro, y este valor es muy similar al valor obtenido mediante el procesamiento de la sísmica de reflexión que es de 1750 m/s y presenta un valor mínimo de 1000 m/s al noroeste.

Los valores de 192 a 531 representa la dirección *inline* y los valores de 1 a 458 es la dirección *crossline*.

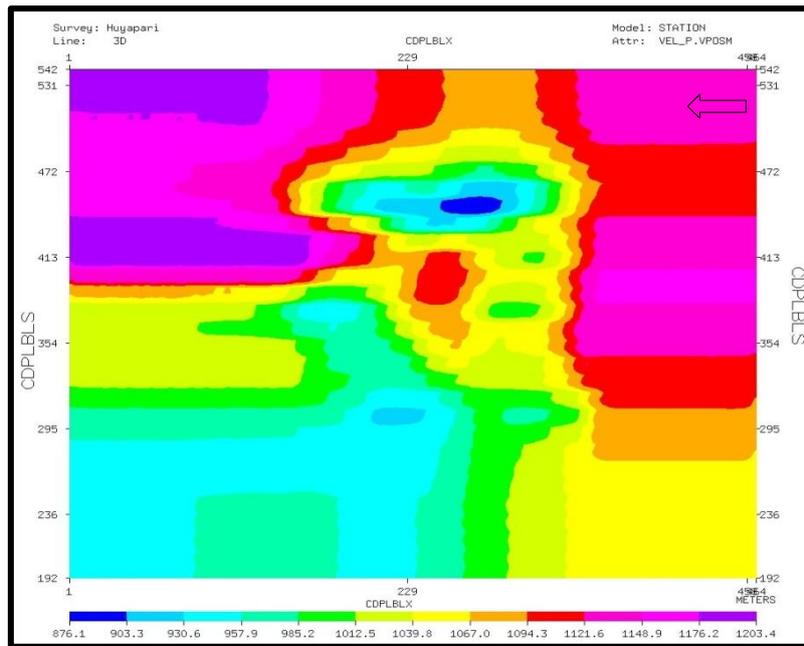


Figura 73. Mapa de velocidad de la onda P en la capa superior.

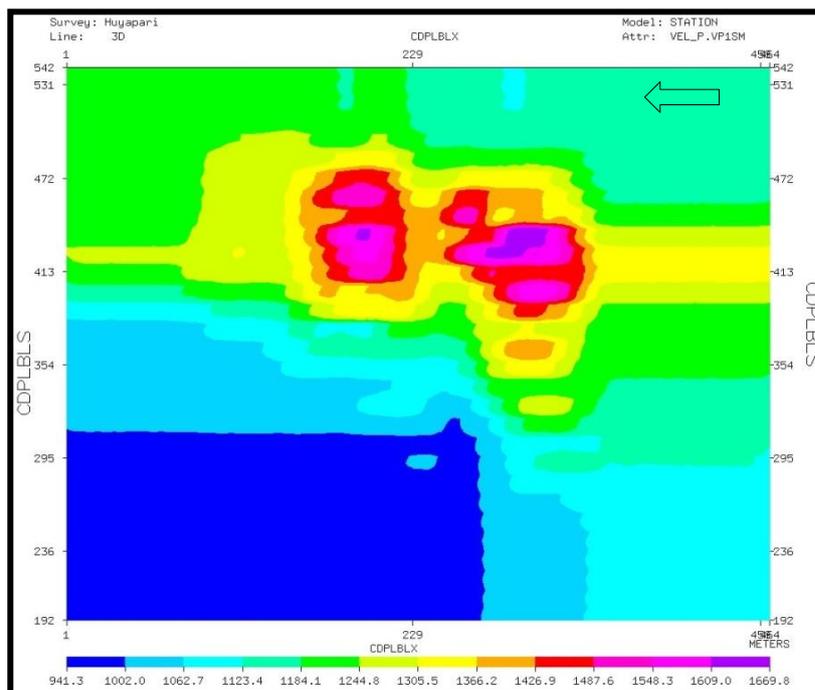


Figura 74. Mapa de velocidad de la onda P en la capa inferior.

Una vez obtenidas todas, las velocidades involucradas para el cálculo de la corrección estática, según las ecuaciones 10 y 14, en cada posición receptora, así como la determinación de tiempos asignados a las mismas, se calculó para cada receptor su corrección estática según las ecuaciones antes mencionadas. Los resultados pueden visualizarse en forma de mapas de correcciones estáticas de ondas convertidas, para

diferentes pruebas con datos filtrados y sin filtrar, de acuerdo con las ecuaciones 10 y 14.

A continuación es mostrado, el mapa de correcciones estáticas para los datos filtrados (figura 75), con una velocidad de $V_{s1} = 410$ m/s (valor promedio en la segunda capa según MASW) y empleando la ecuación 10.

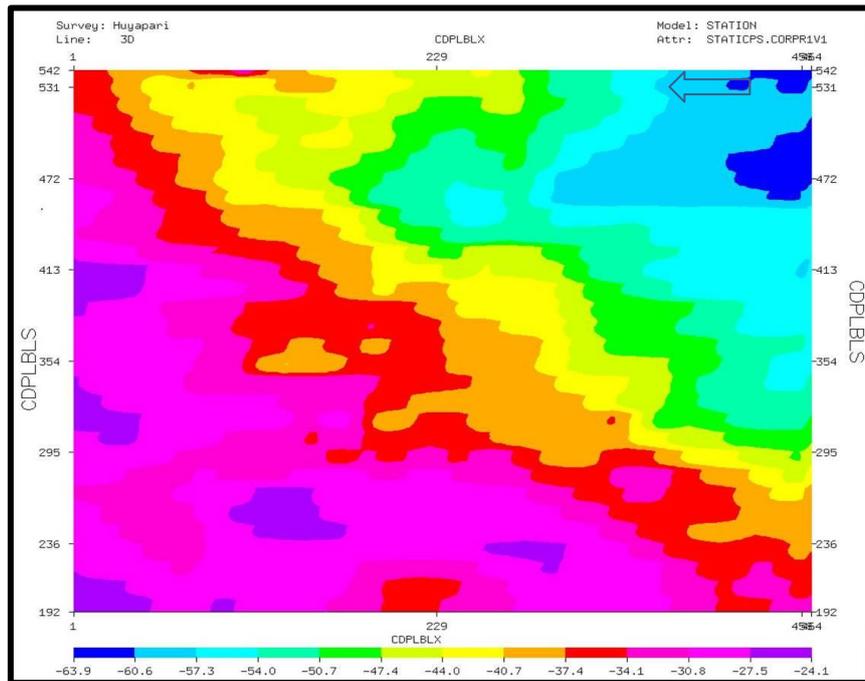


Figura 75. Mapa de corrección estática, mediante la ecuación 10 y para datos filtrados.

Este mapa muestra los valores más altos de $-24,1$ al noroeste, lo que coincide con la topografía donde se observa mayor elevación, por lo tanto las correcciones estáticas; serán mayores, debido al tiempo de viaje en la capa meteorizada. También presenta un valor mínimo de $-63,9$ al sureste de la zona, que coincide con el mapa de elevación (Figura 43) (el signo negativo corresponde a que el programa de procesamiento asume valores negativos en la dirección vertical ascendente).

5.7. Apilados de estáticas de elevación PS y comparación de los apilados de ondas convertidas en la capa meteorizada.

Los apilados PS que se obtuvieron como resultado, para las pruebas de las estáticas calculadas según esta metodología en las *inlines* 350 y 400, se sintetizan en las Tabla 2 y Tabla 3:

Tabla 2. Apilados obtenidos por elevación por PS.

Velocidades utilizadas	Apilados obtenidos
Velocidad de remplazo de onda S =600 m/s	Apilado de elevación PS
Velocidad de remplazo de onda S 410 m/s	Apilado de elevación PS

Tabla 3. Apilados obtenidos por las ecuaciones 10 y 14.

Apilados para la capa meteorizada mediante las ecuaciones 10 y 14	
Ec. 10	Datos de diferencias de tiempo PPP-PPS, sin filtrar para $V_{s1} = 410$ m/s
	Datos de diferencias de tiempo PPP-PPS, sin filtrar para una velocidad variable
	Datos de diferencias de tiempo PPP-PPS, filtrados con $V_{s1} = 410$ m/s
	Datos de diferencias de tiempo PPP-PPS, filtrados con velocidad variable
Ec. 14	Datos de diferencias de tiempo PPP-PPS, sin filtrar para $V_{s1} = 410$ m/s
	Datos de diferencias de tiempo PPP-PPS, sin filtrar para una velocidad variable
	Datos de diferencias de tiempo PPP-PPS, filtrados con $V_{s1} = 410$ m/s
	Datos de diferencias de tiempo PPP-PPS, filtrados con velocidad variable

A continuación se muestran, los apilados de elevación PS (Figura 76 y 77), en la línea 350 en la dirección *inline*, para dos velocidades de remplazo de ondas S; las cuales son $V_{s1}=600$ m/s que fue la velocidad de remplazo sugerida por los analistas de procesamiento del Centro de Procesamiento de Datos Geofísicos de INTEVEP y $V_{s1} = 410$ m/s (velocidad promedio de la capa subyacente obtenida mediante MASW).

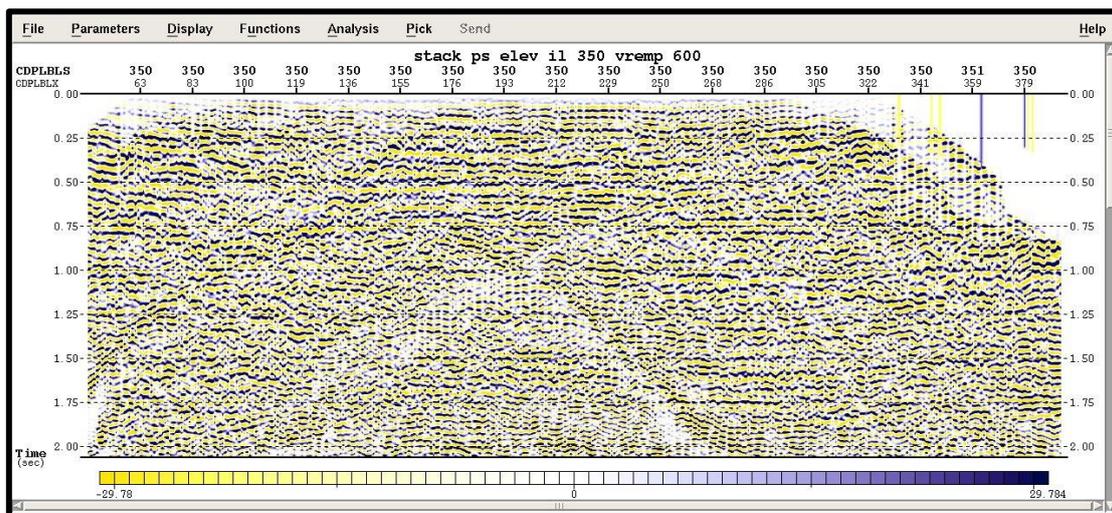


Figura 76. Apilado de estáticas de elevación PS, con V_{s1} de 600 m/s en la *inline* 350

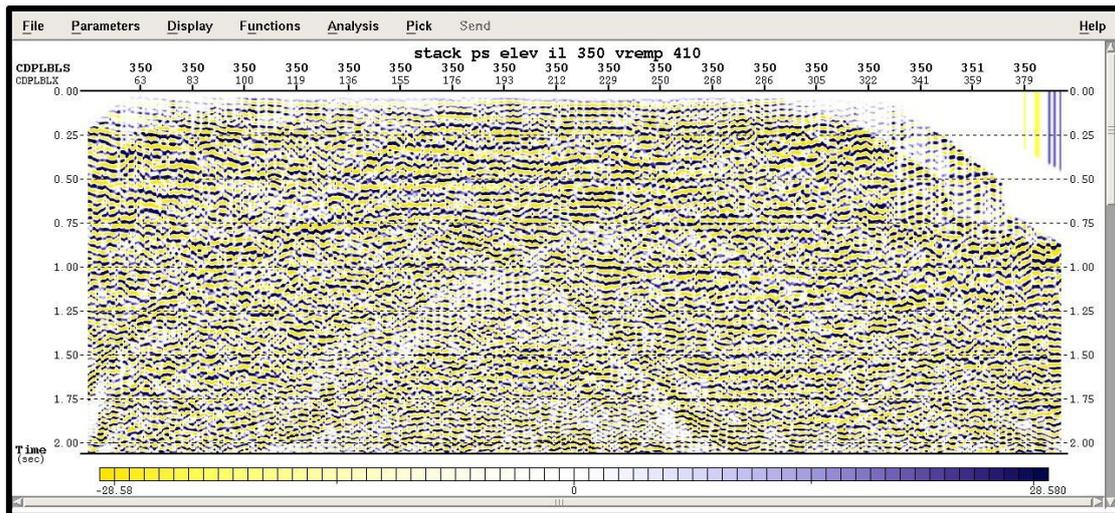


Figura 77. Apilado de estáticas de elevación PS, con V_{s1} de 410 m/s en la *inline* 350.

Ambos apilados tanto en esta *inline* como en la 400, no muestran diferencias significativas, sin embargo la velocidad de remplazo de 410 m/s proviene de la medición del dato sísmico, lo cual justifica su uso en adelante.

Una vez definida que la velocidad de reemplazo fuese de 410 m/s, todas las comparaciones en adelante serán con apilados con estáticas de elevación, con ésta velocidad de reemplazo. Por tanto todas las pruebas sobre los apilados de onda convertida que incluya el cálculo de estática propuesto en este trabajo, son comparadas contra este apilado de referencia.

El cálculo de estática propuesto, fue probado para velocidades $V_{s1} = 410$ m/s, y V_v variable (correspondiente a las velocidades obtenidas del MASW), así mismo se tienen las diferencias de tiempos de las refracciones PPP y PPS, para los datos sin filtrar y filtrados y además se calculan mediante la ecuación 10 y 14, lo cual nos da que para cada prueba, se generaron ocho apilados cuya descripción está en la tabla 3.

A continuación se muestran algunos apilados donde se observan que los saltos estáticos impactan significativamente en la mejora de la imagen de sísmica, para ello, es importante considerar que todas estas comparaciones son de tipo cualitativo y la selección de la solución de estáticas a emplear obedece, principalmente a subjetividades del analista de procesamiento. Por tanto, se muestran algunas pruebas generadas para

evaluar el impacto de las estáticas determinadas con la metodología propuesta en comparación al apilado PS de elevación.

La comparación en la *inline* 400 entre los apilados PS con estáticas de elevación y las del análisis de refracciones PPS-PPP, para las diferencias de tiempo determinadas sin filtrar y para la V_{s1} de 410 m/s se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.78.**

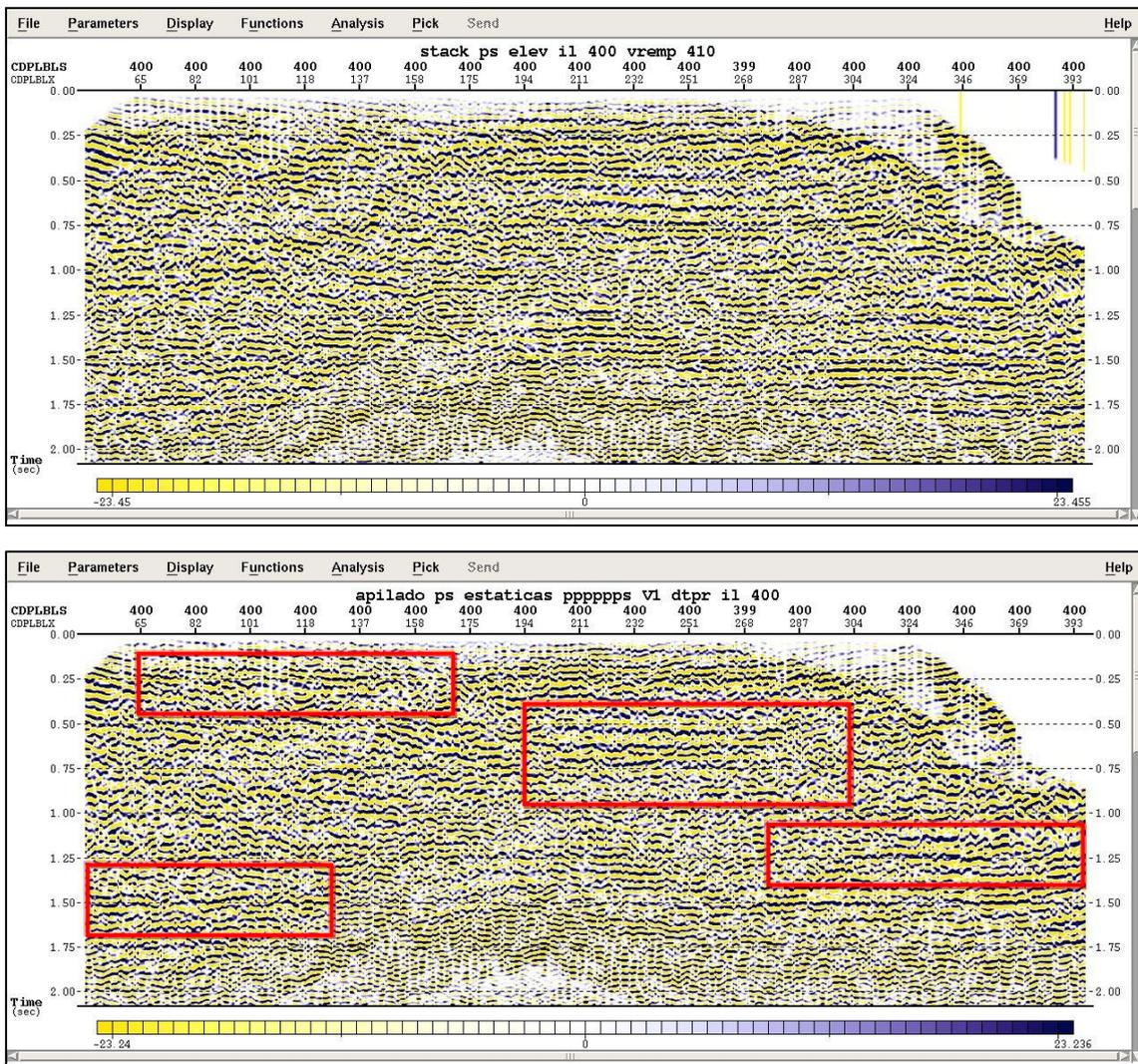


Figura 78. Comparación entre los apilados PS *inline* 400, estática de elevación (superior) y estáticas propuestas (inferior, caso diferencias de tiempos sin filtrar y $V_{s1}=410\text{m/s}$)

Obsérvese en recuadro rojo las zonas donde mejora la imagen inferior en relación a la superior.

A continuación se muestra la comparación para la *inline* 400 entre los apilados PS con estáticas de elevación y las del análisis de refracciones PPS-PPP, para las diferencias de tiempo determinadas sin filtrar y para la Vs1 variable en la figura 79.

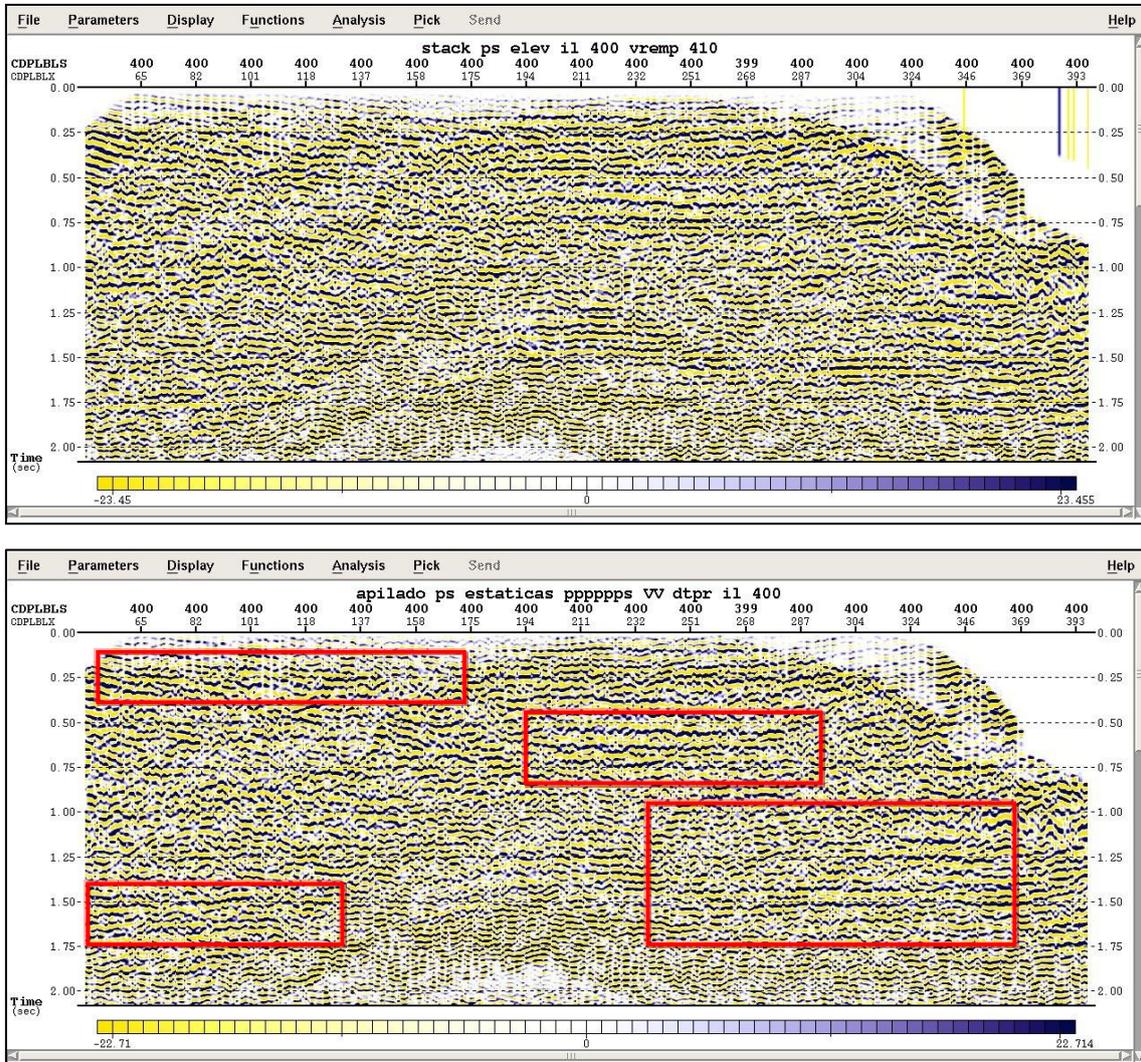
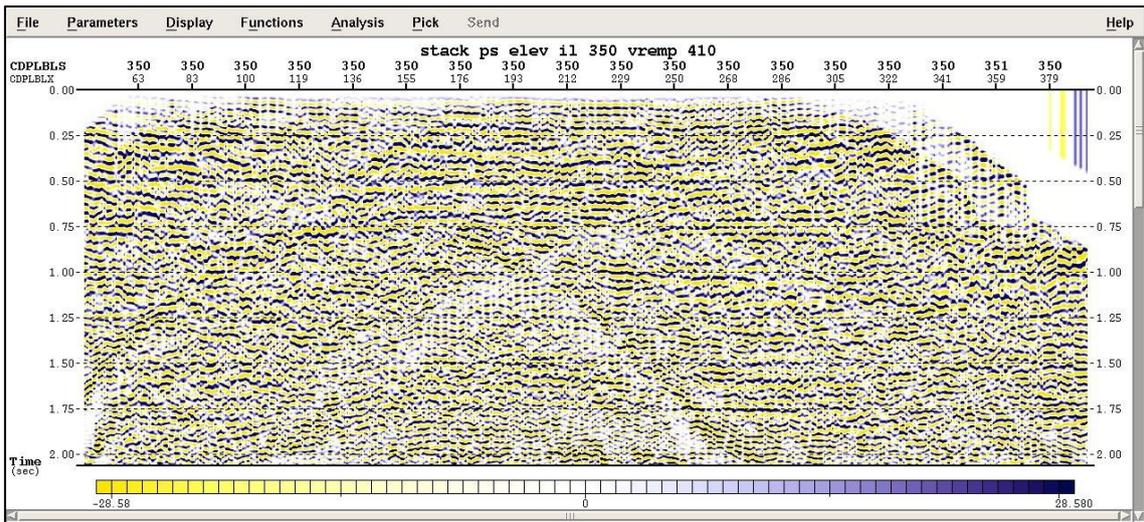


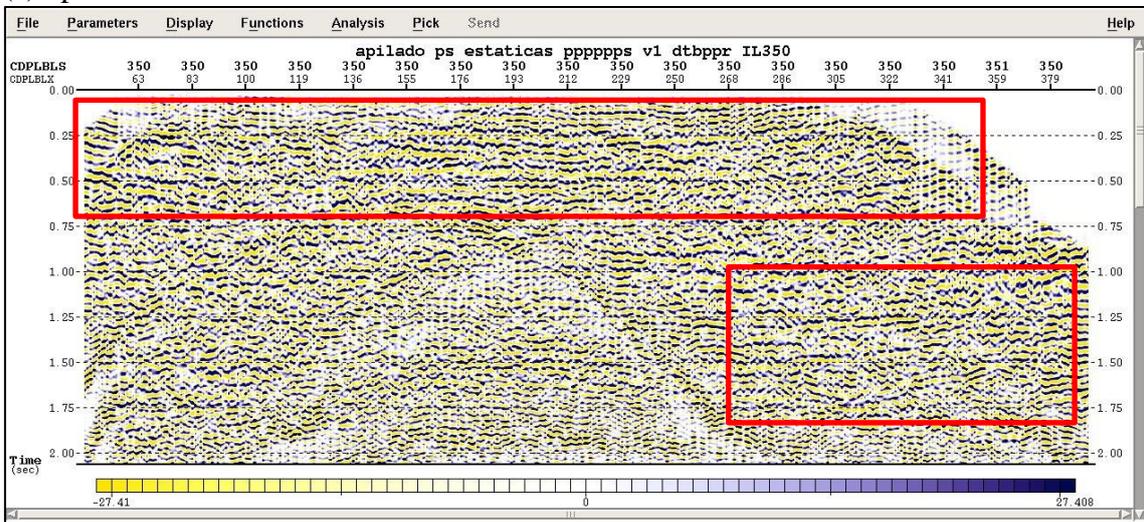
Figura 79. Comparación entre los apilados PS inline 400, estática de elevación (superior) y estáticas propuestas (inferior, caso diferencias de tiempos sin filtrar y Vs1 Variable).

Obsérvese nuevamente en recuadro rojo las zonas donde mejora la imagen inferior en relación a la superior.

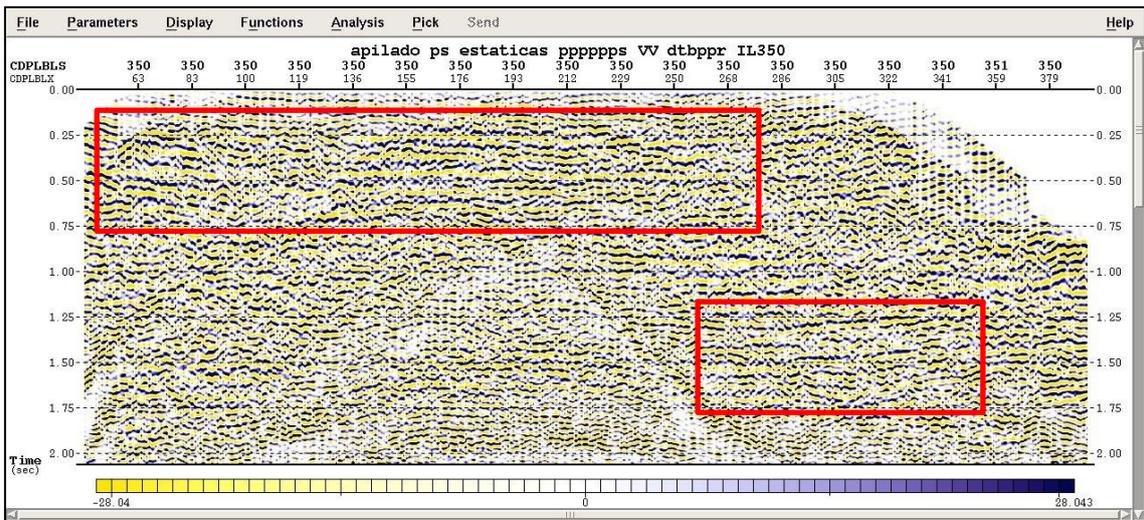
A continuación se muestra la comparación de imágenes de los apilados de la *inline* 350 PS con estáticas de elevación y las estáticas propuestas en este trabajo, en el caso de que las diferencias de tiempo en las refracciones PPS-PPP fueron determinadas para los datos filtrados, para las velocidades Vs1=410m/s y velocidad variable,(Figura 80)



(a) Apilado con estáticas de elevación PS *inline* 350.



(b) Apilado *inline* 350, con estáticas calculadas $Vs1=410$ m/s y diferencia de tiempo determinada con los datos filtrados.



(c) Apilado *inline* 350, con estáticas calculadas con $Vs1$ variable y diferencia de tiempo determinada con los datos filtrados.

Figura 80. Comparación para apilados en la *inline* 350, para diferencias de tiempo de refracciones PPS-PPP obtenidas para datos filtrados.

Obsérvese en los recuadros rojos, en la figura anterior, las zonas donde mejora la imagen sísmica en relación al apilado de estáticas de elevación.

Por otra parte, entre los apilados obtenidos entre las diferencias de tiempos de las refracciones PPS y PPP, con los datos filtrados y sin filtrar, las imágenes obtenidas presentan mínimas diferencias. Asimismo cuando se utilizó las ecuaciones 10 y 14, tampoco se apreciaron diferencias considerables sobre las imágenes sísmicas obtenidas.

Una visión cercana en la *inline* 350 comparando el apilado con estáticas de elevación y el de estáticas calculadas cuando la diferencia de tiempo de refracciones PPS-PPP es determinada sin filtrar los datos, es mostrada a continuación, (figura 81).

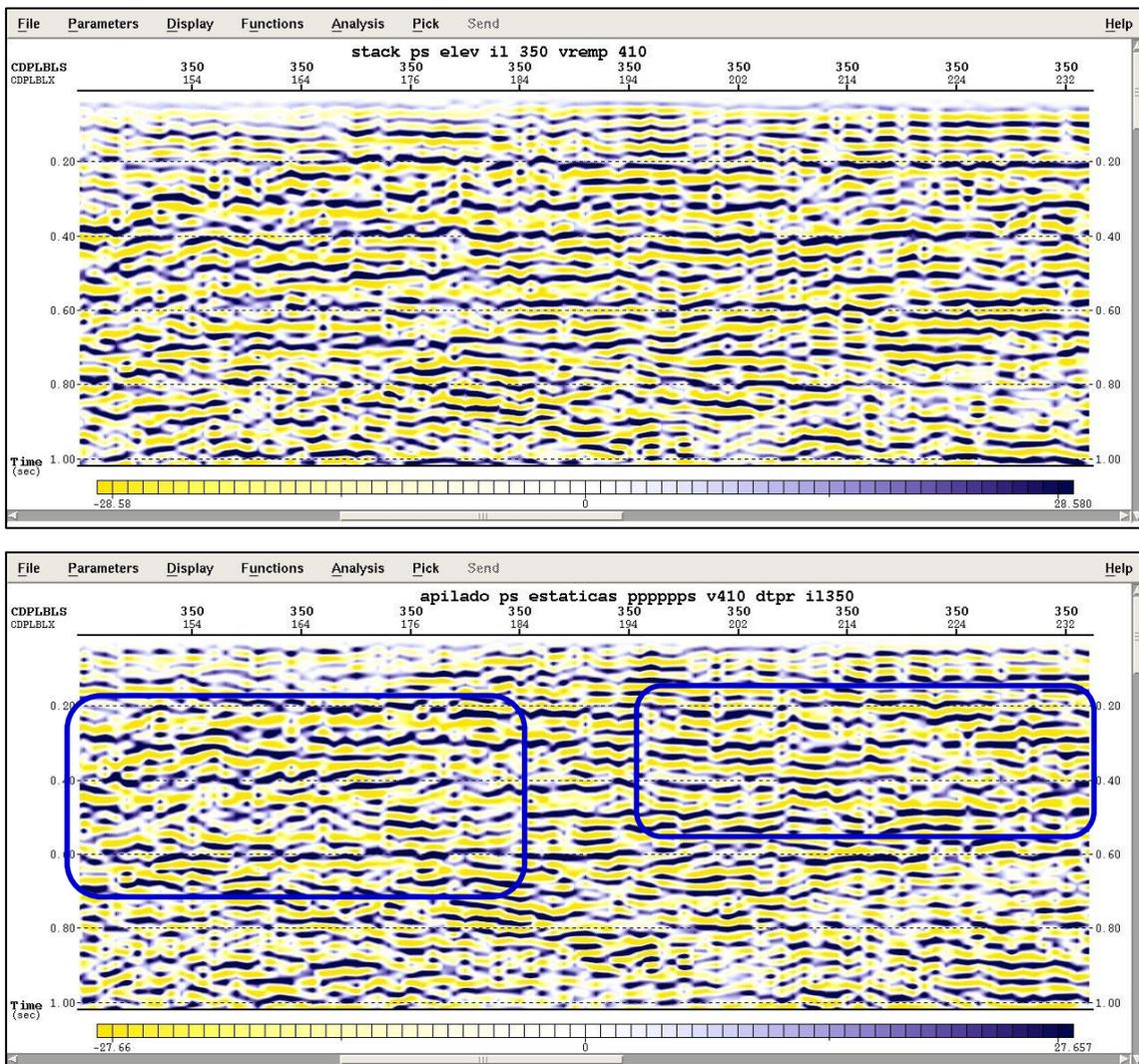


Figura 81. Visión cercana de apilado *inline* 350, comparación entre el apilado por estáticas de elevación (superior) y las estáticas del análisis de refracciones PPS-PPP, realizado con los datos sin filtrar (inferior).

Obsérvese en la figura anterior, en los recuadros azules las zonas donde mejor trabajan las estáticas calculadas con la metodología propuesta, en relación a la misma sección en el apilado de elevación PS.

Finalmente, de forma cualitativa se muestra en la Figura 82, un *gather* sin estática y uno con las estáticas aplicadas en la zona señalada, donde es notable que se define el trazo a la derecha de las hipérbolas, lo cual se traduce en una mejor visualización de la imagen sísmica.

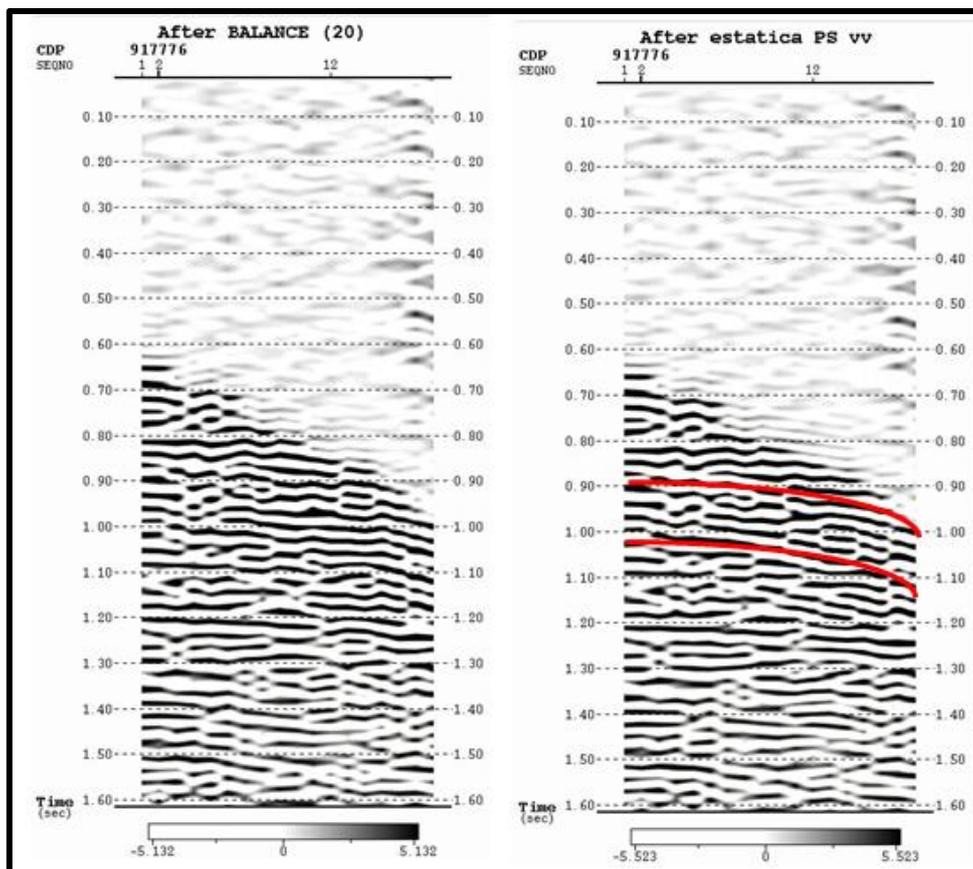


Figura 82. *Gather*, a la izquierda sin estática y a la derecha con estática.

Todo lo anterior, representa una análisis cualitativo, tal y como lo evaluaría un analista de procesamiento, evaluando y probando el impacto de las estáticas a nivel de imagen sísmica.

Por último, un análisis cuantitativo donde se involucran los valores promedios de todas las variables involucradas en el cálculo según las ecuaciones 10 y 14, para las estáticas de ondas convertida propuesta en este estudio, puede ser sintetizado en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores de correcciones estáticas para la onda convertida.

Ecuación	Velocidad S1 (m/s)	Estática de capa meteorizada (ms)	Estática de elevación receptor PS (ms)	Estática total de receptor PS (ms)	Estáticas PS receptor/estáticas PP rreceptor
Ec.10 dt	410	9,92	30,97	40,89	2,40
Ec.10 dt bp	410	13,96	30,97	44,93	2,64
Ec.14.dt	410	8,87	30,97	39,84	2,34
Ec.14.dt bp	410	9,93	30,97	40,90	2,40
Ec.10 dt	600	28,12	21,16	49,28	2,90
Ec.10 dt bp	600	33,66	21,16	54,82	3,22
Ec.14.dt	600	22,04	21,16	43,20	2,54
Ec.14.dt bp	600	29,09	21,16	50,25	2,95
Ec.10 dt	VARIABLE	8,12	31,12	39,23	2,31
Ec.10 dt bp	VARIABLE	12,51	31,12	43,63	2,56
Ec. 14 dt	VARIABLE	9,16	31,12	40,27	2,37
Ec.14.dt bp	VARIABLE	11,54	31,12	42,65	2,51
					Estáticas de receptor PP promedio (ms)
					17,02

A partir de la cual, se desprende el siguiente análisis:

- ✓ Los valores determinados con las ecuaciones 10 y 14, no muestran casi diferencia, siendo la máxima diferencia cuantificable 15ms, valor que es menor al promedio de estáticas PP. Lo cual es apreciable a nivel de las imágenes sísmicas.
- ✓ La estática de la onda convertida en la capa meteorizada, varía en un rango de 8,12 a 33,66 ms, de acuerdo a las velocidades utilizadas.
- ✓ La estática de elevación presenta un valor de 21,16 a 31,12 ms, que varía de acuerdo a la velocidad de onda S utilizada.
- ✓ La estática total para el receptor presenta un valor mínimo de 39, 84 ms calculado mediante la ecuación 14 para los datos obtenidos sin filtrar.
- ✓ La estática total para el receptor presenta un valor máximo de 54,82 ms, mediante la ecuación 10 en el caso de que la diferencia de tiempo es obtenida con datos filtrados.

Nótese como para valores de velocidad de corte de la capa infrayacente mayores, el valor de la corrección de estática de capa meteorizada, adquiere más peso en la suma para la obtención de la estática total, mientras que para valores menores de misma velocidad de corte, el efecto es el contrario, pues el mayor aporte en la suma es el que tiene que ver con la estática de elevación.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos en esta investigación y los análisis pertinentes de los mismos, permiten concluir que:

- ✓ Los apilados obtenidos de la onda P, mediante la secuencia empleada en esta investigación, muestra que los reflectores tiene una continuidad lateral, bastante buena, así como un contenido de frecuencia tolerable; lo cual indica que se tiene un modelo de velocidad onda de P aceptable.
- ✓ El análisis de ondas superficiales, muestra su utilidad a ser aplicado sobre los datos sísmicos, proporcionando una velocidad de remplazo de onda S y velocidad de reflector de onda P. Esto implicaría en el hipotético caso, de que no se fuese posible identificar los primeros quiebres, que el análisis de ondas superficiales ayudaría a la obtención de un modelo de refractor de la onda P.
- ✓ El análisis de factibilidad para la determinación de la diferencia de tiempos de las refracciones PPP y PPS, reveló que la diferencia de tiempo sobre estos datos fue de 40 ms; lo que indica que para el intervalo de muestreo de 2 ms representó 20 muestras, que se tradujo en un salto estático significativo a nivel de imagen sísmica. Con los datos disponibles para la capa meteorizada se tiene una relación V_p/V_s de 3 y analizando la cota inferior para este cociente es ($V_p/V_s=\sqrt{2}$), se obtendría una diferencia entre las refracciones de 13 ms, lo cual de entrada limitaría al método propuesto, por ser este valor menor al de estáticas de receptores promedios PP, establecido en 17 ms. Además, esta diferencia físicamente significa la mínima posible entre ambas refracciones, esperada para estos datos y esta metodología, propuesta y con el intervalo de muestreo para la sísmica empleada no representaría un salto estático apreciable (6 muestras).
- ✓ Al determinar las estáticas de ondas convertidas mediante la metodología propuesta, se observó cualitativamente que los mapas de elevación y los mapas de estática determinados para los distintos valores de velocidad de onda S y diferencia de tiempo de las refracciones PPP y PPS, presentan la misma tendencia.

- ✓ Se observó que no existe diferencia en los apilados de elevación con velocidad de reemplazo de onda S propuesta por el personal de procesamiento de INTEVEP y la determinada a través del análisis de ondas superficiales, el cual le da relevancia y ponderación a este último método.
- ✓ Cualitativamente a nivel de apilados PS, se observan mejoras sustanciales aplicando las estáticas; con la metodología propuesta en comparación con el apilado de elevación PS
- ✓ Con las velocidades de reemplazos de onda S consideradas, se encontró mediante esta metodología, la cual es físicamente sustentada, que las estáticas totales PS en el receptor son de 2,34 – 3,22 veces las estáticas en el receptor PP, lo cual se encuentra en el rango establecido por muchos autores que afirman que estas deben encontrarse entre 2 y 10.
- ✓ El cálculo de estáticas mediante esta metodología según las ecuaciones 10 y 14, no presentan diferencias y esto obedece a que el cociente entre las velocidad de onda de corte de la capa suprayacente y la velocidad de onda compresional de la capa infrayacente, no es significativo, para los datos empleados en este trabajo, lo cual se corroboró al comparar las imágenes sísmicas.

Asimismo, las recomendaciones pertinentes se exponen a continuación:

- ✓ Profundizar en el estudio teórico de los modos de conversión de refracción en especial el PPS, a través de un modelado sísmico. Pues la identificación de esta sobre el dato sísmico se realizó siguiendo una metodología de tipo práctica, lo cual representa una limitación del método.
- ✓ Para fines de producción, tratar de automatizar la determinación de las diferencias de tiempo de las refracciones PPP y PPS, a fin de agilizar el proceso y eliminar la parte interpretativa.
- ✓ Se recomienda el análisis multicanal de ondas superficiales, sobre los datos sísmicos de reflexión con la finalidad de tener una caracterización de ondas de corte más confiable y para ser empleado en el procesamiento de onda convertida.
- ✓ Se recomienda poseer información previa de valores de velocidad de onda P obtenidos por refracción del área del levantamiento y una distribución o densidad uniforme tanto de elementos fuentes y receptores en la misma, con la

finalidad de que se obtengan valores de velocidades de ondas de corte y diferencias de tiempos de refracción PPS –PPP acordes con el área de estudio, de tal modo de no extrapolar información (como ocurrió en este caso en particular) y no agregar incertidumbre al método propuesto para el cálculo de estáticas.

BIBLIOGRAFÍA

- Cabello. (2007). Análisis de velocidad en un medio anisótropo de tipo VTI para ondas PP y PPS. En Y. Cabello. Caracas: Universidad Simón Bolívar.
- Cabeza. (2012). *Caracterización de yacimientos utilizando inversión sísmica preapilamiento en el campo Cariña*. Caracas: Coordinación de ingeniería Geofísica Universidad Simón Bolívar.
- Cavada. (2000). *Guía de prospección sísmica por refracción*. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Chelotti. (2010). Procesamiento Sísmico de Reflexión. En L. A. Chelotti. Chubut, Argentina. Cátedra de Geofísica Aplicada, U.N.P.S.J.B.
- CIED, P. (1999). *Sísmica Multicomponente para exploración y producción*. Los Teques: Universidad Corporativa.
- Coplanarh. (1974). *Estudio geomorfológico de los llanos occidentales*. Caracas: Ministerio de Agricultura.
- Cova. (2011). QC componentes horizontales Vederó. Los Teques: PDVSA INTEVEP.
- Di Croce et. al. (1999). Estratigrafía secuencial y evolución estructural de la cuenca Oriental de Venezuela. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Dobrin. (1988). *Introducción a la prospección geofísica*. 3ª edic Mc. Graw-Hill.
- Everett. (2013). *Near Surface Applied Geophysics*. Cambridge University Press.
- Gonzalez de Juana C., Iturralde, J. y Picard, X., (1980). Geología de Venezuela y sus cuencas petrolíferas. Foninves.
- Hedberg. (1950). *Geology of the eastern Venezuela basin*. Geological Society Americana Bulletin.
- Larson. (1996). Acquisition, Processing, and Interpretation of P-P and P-S 3-D Seismic Data. En G. L. Larson, *Tesis de Maestría en Ciencias*. The University of Calgary.
- Li.Yan-Peng. (2012). Converted-Wave Static Correction Method.Chinese Journal of Geophysics Vol.55, No.1.
- Lowrie. (1997). *Fundamentals of geophysics*.Gran Bretaña.: Cambridge University Press.
- Marsden. (1993). Static Corrections a review. En M. Dave. Amoco Exploration Company London, Inglaterra: The Leading Edge.

- Alan Meulenbroek.(2011). Analysis of converted refractions for shear statics. En S. H. Australia: CSIRO PUBLISHING.
- Paradigm. (2011). Introduction to Echos 2011.2. En *Training guide*.
- Park. et al. (1999). *Estimation of near surface shear wave velocity by inversion of rayleigh Waves*. Geophysics Vol 64 .
- Parnaud. (1999). Petroleum geology of the central part of the eastern Venezuela basin. American Association of Petroleum Geologists.
- Pineda. (2011). *Sísmica de reflexión*. Los teques: PDVSA-INTEVEP.
- Regueiro. (2007). El Método Sísmico de Reflexión . En R. J, *Guía: "Sísmica para ingenieros y geólogos*.
- Ricaurte. (2014). *Presentación de resultados INTEVEP*. Los Teques .
- Sheriff. (2002). En R. E. Sheriff, *Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics*. Oklahoma: Society of Exploration Geophysicist Tulsa .
- Stewart. (2002). Converted-wave seismic exploration. En R. G. Stewart. CREWES Project.
- Velis. (2007). Data Sísmic. En V. Danilo. Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas UNLP.
- Yoris, & Ostos. (1997). Geología de Venezuela. En *Memorias de la Wec*. Caracas.
- Zinck, & Urriola. (1970). *Origen y evaluación de la formación Mesa*. Barcelona: Ministerio de Obras Públicas.

APENDICES

Tabla A.1. Valores de velocidades de corte, compresionales y promedio de P obtenidos del análisis multiespectral de ondas superficiales.

Fuente	Fuentes-x (m)	Fuentes-y (m)	Vs0 (m/s)	Vs1 (m/s)	Vp0 (m/s)	Vp1 (m/s)	<V>p0p1(m/s)
9	367436,19	937467,12	351,188987	415,294588	1679,946184	1750,944257	1714,710611
21	367461,09	937017,12	321,903378	424,576432	1647,312641	1761,279821	1702,39097
28	367436,19	937167,12	314,160854	399,593055	1638,730407	1733,543754	1684,804216
45	367311,19	937317,12	337,485164	412,546366	1664,612532	1747,923613	1705,251126
56	367336,19	937617,19	344,372571	407,11692	1672,314167	1741,868377	1706,382788
61	367086,19	937617,12	322,246194	388,657421	1647,708893	1721,404672	1683,750774
68	367186,09	937467,19	344,396204	388,57761	1672,284126	1721,320033	1696,447807
80	367186,31	937204,69	318,677306	390,041828	1643,743157	1722,943425	1682,41171
90	367211	936979,81	327,98633	398,227006	1654,074073	1732,029557	1692,154462
92	366961,19	937017,12	321,614981	409,686476	1647,859097	1744,446278	1694,777652
108	367061,09	937317,19	330,36384	383,979291	1656,728268	1716,205597	1685,94253
114	366936,09	937467,12	332,877189	394,162953	1659,92105	1727,397442	1692,987171
123	366836,09	937617,19	360,646993	396,112323	1690,370679	1729,663849	1709,791542
134	366811,09	937317,12	334,165245	409,075111	1660,944343	1744,066238	1701,49072
153	366711,19	937017,12	334,110647	404,978037	1661,374211	1739,391208	1699,487815
161	366686,09	937167,12	356,32813	407,577246	1685,815096	1742,34724	1713,615046
174	366686,09	937467,12	353,989154	409,327179	1683,267355	1744,217753	1713,200619
182	366586,09	937617,12	347,249061	413,366765	1675,89128	1748,687267	1711,515564
198	366561	937369,12	342,550874	404,161543	1670,575976	1738,549232	1703,884957
212	366436,09	937017,12	344,214767	411,587864	1672,582388	1746,668458	1708,822799
221	366436,09	937167,12	353,78629	401,018649	1682,937264	1735,05199	1708,597325
233	366436,09	937467,12	339,615405	400,055736	1667,493105	1733,829141	1700,014247
254	366136,09	937167,12	362,006456	414,414853	1692,264318	1749,888301	1720,593977
260	366136,09	937167,12	355,134964	418,543547	1684,639573	1754,388809	1718,806876
261	366086,09	937317,12	353,220612	411,041111	1682,550669	1746,073127	1713,723455
266	366211,09	937317,12	356,945068	408,067793	1686,589122	1742,82527	1714,246111
270	366311,09	937317,12	341,542244	400,616318	1669,38138	1734,560728	1701,347021
276	366186,09	937467,12	348,47641	417,636484	1677,236676	1753,475666	1714,509061
284	366061,19	937617,12	344,290227	409,521222	1672,546506	1744,479656	1707,755935
294	366311,09	937617,19	336,133212	413,328081	1663,652539	1748,632073	1705,084141
295	366156,19	937017,12	358,438939	417,58126	1688,234329	1753,396988	1720,198775
304	365911,19	937017,12	343,717247	410,706401	1671,974182	1745,721698	1708,052273
320	365936,09	937467,12	352,614045	427,760988	1681,958914	1764,612436	1722,294602
333	365811,19	937617,12	361,474663	415,782899	1691,62035	1751,31321	1720,949309
353	365836,19	937167,12	343,403667	409,138232	1671,647906	1743,987679	1707,05175
362	365686,09	937467,12	382,093638	401,376575	1714,354038	1735,363007	1724,79455
372	365436,09	937467,12	333,479524	392,616451	1660,692692	1725,489497	1692,47113
384	365561,19	937617,12	342,378765	412,617177	1670,534134	1747,866869	1708,325772
385	365561,09	937317,12	337,263614	404,797822	1664,804697	1739,213705	1701,195942
395	365686,19	937317,12	333,813578	415,388823	1661,20863	1750,903845	1704,877315
402	365586,19	937167,12	354,594827	403,594792	1684,094429	1737,815619	1710,533335
418	365661,19	937017,12	368,757457	416,748583	1699,697375	1752,478242	1725,684321
421	365411,19	937017,12	348,460853	406,193286	1677,378654	1740,669966	1708,438334

Tabla A.2. Valores generados mediante la determinación de diferencias de tiempo de refracciones PPS-PPP, para dos capas horizontales

x (m)	h (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	t _{directa} (seg)	t _{ppp} (seg)	t _{pps} (seg)	$\Delta\tau$ (seg)
12,5	30	1039	344	0,012030799	0,039246189	0,079922251	0,040676062
25		1199		0,024061598	0,049671543	0,090347605	0,040676062
37,5				0,036092397	0,060096898	0,10077296	0,040676062
50				0,048123195	0,070522252	0,111198314	0,040676062
62,5				0,060153994	0,080947607	0,121623669	0,040676062
75				0,072184793	0,091372961	0,132049023	0,040676062
87,5				0,084215592	0,101798316	0,142474378	0,040676062
100				0,096246391	0,11222367	0,152899732	0,040676062
112,5				0,10827719	0,122649025	0,163325087	0,040676062
125				0,120307988	0,133074379	0,173750441	0,040676062
137,5				0,132338787	0,143499734	0,184175796	0,040676062
150				0,144369586	0,153925088	0,19460115	0,040676062
162,5				0,156400385	0,164350443	0,205026505	0,040676062
175				0,168431184	0,174775797	0,215451859	0,040676062
187,5				0,180461983	0,185201151	0,225877213	0,040676062
200				0,192492782	0,195626506	0,236302568	0,040676062
212,5				0,20452358	0,20605186	0,246727922	0,040676062
225				0,216554379	0,216477215	0,257153277	0,040676062
237,5				0,228585178	0,226902569	0,267578631	0,040676062
250				0,240615977	0,237327924	0,278003986	0,040676062
262,5				0,252646776	0,247753278	0,28842934	0,040676062
275				0,264677575	0,258178633	0,298854695	0,040676062
287,5				0,276708373	0,268603987	0,309280049	0,040676062
300				0,288739172	0,279029342	0,319705404	0,040676062
312,5				0,300769971	0,289454696	0,330130758	0,040676062
325				0,31280077	0,299880051	0,340556113	0,040676062
337,5				0,324831569	0,310305405	0,350981467	0,040676062
350				0,336862368	0,320730759	0,361406821	0,040676062
362,5				0,348893167	0,331156114	0,371832176	0,040676062
375				0,360923965	0,341581468	0,38225753	0,040676062
387,5				0,372954764	0,352006823	0,392682885	0,040676062
400				0,384985563	0,362432177	0,403108239	0,040676062
412,5				0,397016362	0,372857532	0,413533594	0,040676062
425				0,409047161	0,383282886	0,423958948	0,040676062
437,5				0,42107796	0,393708241	0,434384303	0,040676062
450				0,433108758	0,404133595	0,444809657	0,040676062
462,5				0,445139557	0,41455895	0,455235012	0,040676062
475				0,457170356	0,424984304	0,465660366	0,040676062
487,5				0,469201155	0,435409659	0,476085721	0,040676062
500				0,481231954	0,445835013	0,486511075	0,040676062
512,5				0,493262753	0,456260367	0,496936429	0,040676062
525				0,505293551	0,466685722	0,507361784	0,040676062
537,5				0,51732435	0,477111076	0,517787138	0,040676062
550				0,529355149	0,487536431	0,528212493	0,040676062
562,5				0,541385948	0,497961785	0,538637847	0,040676062
575				0,553416747	0,50838714	0,549063202	0,040676062
587,5				0,565447546	0,518812494	0,559488556	0,040676062
600				0,577478345	0,529237849	0,569913911	0,040676062
612,5				0,589509143	0,539663203	0,580339265	0,040676062
625				0,601539942	0,550088558	0,59076462	0,040676062
637,5				0,613570741	0,560513912	0,601189974	0,040676062
650				0,62560154	0,570939267	0,611615329	0,040676062
662,5				0,637632339	0,581364621	0,622040683	0,040676062
675				0,649663138	0,591789975	0,632466037	0,040676062
687,5				0,661693936	0,60221533	0,642891392	0,040676062
700				0,673724735	0,612640684	0,653316746	0,040676062
712,5				0,685755534	0,623066039	0,663742101	0,040676062
725				0,697786333	0,633491393	0,674167455	0,040676062
737,5				0,709817132	0,643916748	0,68459281	0,040676062
750				0,721847931	0,654342102	0,695018164	0,040676062
762,5				0,73387873	0,664767457	0,705443519	0,040676062
775				0,745909528	0,675192811	0,715868873	0,040676062
787,5				0,757940327	0,685618166	0,726294228	0,040676062
800				0,769971126	0,69604352	0,736719582	0,040676062
812,5				0,782001925	0,706468875	0,747144937	0,040676062

x (m)	h (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	tdirecta (seg)	tppp (seg)	tpps (seg)	$\Delta\tau$ (seg)
825				0,794032724	0,716894229	0,757570291	0,040676062
837,5				0,806063523	0,727319583	0,767995645	0,040676062
850				0,818094321	0,737744938	0,778421	0,040676062
862,5				0,83012512	0,748170292	0,788846354	0,040676062
875				0,842155919	0,758595647	0,799271709	0,040676062
887,5				0,854186718	0,769021001	0,809697063	0,040676062
900				0,866217517	0,779446356	0,820122418	0,040676062
912,5				0,878248316	0,78987171	0,830547772	0,040676062
925				0,890279115	0,800297065	0,840973127	0,040676062
937,5				0,902309913	0,810722419	0,851398481	0,040676062
950				0,914340712	0,821147774	0,861823836	0,040676062
962,5				0,926371511	0,831573128	0,87224919	0,040676062
975				0,93840231	0,841998483	0,882674545	0,040676062
987,5				0,950433109	0,852423837	0,893099899	0,040676062
1000				0,962463908	0,862849192	0,903525253	0,040676062
1012,5				0,974494706	0,873274546	0,913950608	0,040676062
1025				0,986525505	0,8836999	0,924375962	0,040676062
1037,5				0,998556304	0,894125255	0,934801317	0,040676062
1050				1,010587103	0,904550609	0,945226671	0,040676062
1062,5				1,022617902	0,914975964	0,955652026	0,040676062
1075				1,034648701	0,925401318	0,96607738	0,040676062
1087,5				1,0466795	0,935826673	0,976502735	0,040676062
1100				1,058710298	0,946252027	0,986928089	0,040676062
1112,5				1,070741097	0,956677382	0,997353444	0,040676062
1125				1,082771896	0,967102736	1,007778798	0,040676062
1137,5				1,094802695	0,977528091	1,018204153	0,040676062
1150				1,106833494	0,987953445	1,028629507	0,040676062
1162,5				1,118864293	0,9983788	1,039054861	0,040676062
1175				1,130895091	1,008804154	1,049480216	0,040676062
1187,5				1,14292589	1,019229508	1,05990557	0,040676062
1200				1,154956689	1,029654863	1,070330925	0,040676062
1212,5				1,166987488	1,040080217	1,080756279	0,040676062
1225				1,179018287	1,050505572	1,091181634	0,040676062
1237,5				1,191049086	1,060930926	1,101606988	0,040676062
1250				1,203079885	1,071356281	1,112032343	0,040676062
1262,5				1,215110683	1,081781635	1,122457697	0,040676062
1275				1,227141482	1,09220699	1,132883052	0,040676062
1287,5				1,239172281	1,102632344	1,143308406	0,040676062
1300				1,25120308	1,113057699	1,153733761	0,040676062
1312,5				1,263233879	1,123483053	1,164159115	0,040676062
1325				1,275264678	1,133908408	1,174584469	0,040676062
1337,5				1,287295476	1,144333762	1,185009824	0,040676062
1350				1,299326275	1,154759116	1,195435178	0,040676062
1362,5				1,311357074	1,165184471	1,205860533	0,040676062
1375				1,323387873	1,175609825	1,216285887	0,040676062
1387,5				1,335418672	1,18603518	1,226711242	0,040676062
1400				1,347449471	1,196460534	1,237136596	0,040676062
1412,5				1,359480269	1,206885889	1,247561951	0,040676062
1425				1,371511068	1,217311243	1,257987305	0,040676062
1437,5				1,383541867	1,227736598	1,26841266	0,040676062
1450				1,395572666	1,238161952	1,278838014	0,040676062
1462,5				1,407603465	1,248587307	1,289263369	0,040676062
1475				1,419634264	1,259012661	1,299688723	0,040676062
1487,5				1,431665063	1,269438016	1,310114077	0,040676062
1500				1,443695861	1,27986337	1,320539432	0,040676062
1512,5				1,45572666	1,290288724	1,330964786	0,040676062
1525				1,467757459	1,300714079	1,341390141	0,040676062
1537,5				1,479788258	1,311139433	1,351815495	0,040676062
1550				1,491819057	1,321564788	1,36224085	0,040676062
1562,5				1,503849856	1,331990142	1,372666204	0,040676062
1575				1,515880654	1,342415497	1,383091559	0,040676062
1587,5				1,527911453	1,352840851	1,393516913	0,040676062
1600				1,539942252	1,363266206	1,403942268	0,040676062
1612,5				1,551973051	1,37369156	1,414367622	0,040676062
1625				1,56400385	1,384116915	1,424792977	0,040676062
1637,5				1,576034649	1,394542269	1,435218331	0,040676062
1650				1,588065448	1,404967624	1,445643685	0,040676062
1662,5				1,600096246	1,415392978	1,45606904	0,040676062
1675				1,612127045	1,425818332	1,466494394	0,040676062

x (m)	h (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	tdirecta (seg)	tppp (seg)	tpps (seg)	$\Delta\tau$ (seg)
1687,5				1,624157844	1,436243687	1,476919749	0,040676062
1700				1,636188643	1,446669041	1,487345103	0,040676062
1712,5				1,648219442	1,457094396	1,497770458	0,040676062
1725				1,660250241	1,46751975	1,508195812	0,040676062
1737,5				1,672281039	1,477945105	1,518621167	0,040676062
1750				1,684311838	1,488370459	1,529046521	0,040676062