

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ATENUACIÓN DE RUIDO EN BANDAS DE FRECUENCIA DE DATOS SÍSMICOS MULTICOMPONENTE DEL BLOQUE JUNÍN, FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO, POR EL MÉTODO DE DESCOMPOSICIÓN EN VALORES SINGULARES.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por el Br. Jorge E., García D.

Para optar al Título
de Ingeniero Geofísico.

Caracas, 2012.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ATENUACIÓN DE RUIDO EN BANDAS DE FRECUENCIA DE DATOS SÍSMICOS MULTICOMPONENTE DEL BLOQUE JUNÍN, FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO, POR EL MÉTODO DE DESCOMPOSICIÓN EN VALORES SINGULARES.

TUTOR ACADÉMICO: Prof. José Cavada.

TUTOR INDUSTRIAL: MSc. Asdrúbal Ovalles.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por el Br. Jorge E., García D.

Para optar al Título
de Ingeniero Geofísico.

Caracas, 2012.

DEDICATORIA

A mis padres, Auxiliadora y Jorge

A mi hermana, Yesika

A mi sobrino, Alessandro

A Piedad de Jiménez

AGRADECIMIENTOS

A Dios, Todopoderoso. Artifice de la sincronización perfecta del universo. A dos de sus grandes obras, el imaginario y la literatura fantástica.

A la Ilustre Universidad Central de Venezuela, por regalarme todos los conocimientos y experiencias que me acompañaran a lo largo de mi vida. Es un orgullo y un privilegio para mi ser Ucevista. Gracias UCV.

A mi Patria Venezuela, por ser el escenario de mis éxitos, a ti he de honrar y representar por el resto de mis días.

A PDVSA - INTEVEP, por prestarme la oportunidad de desempeñarme en el área laboral.

Al Ing. Asdrúbal Ovalles por ser mi mentor durante esta investigación. Gracias a sus enseñanzas y a su gran dedicación esta etapa ha sido un éxito.

Al Ing. Héctor Pineda, por darnos herramientas indispensables para nuestro desarrollo académico y profesional. Que Dios lo tenga en su Gloria.

Al Prof. José Cavada, por ser un gran apoyo intelectual y por estar siempre dispuesto a aclarar todas las dudas que surgieron durante este trabajo y a lo largo de esta maravillosa carrera universitaria.

A los profesores del departamento de Geofísica, Antonio Ughi, Jesús Gonzalez, Juan Infante, Vincenzo De Lisa, Yaraixa Pérez, Adriana González, Inírida Rodríguez, Michael Schmitz, Yaneth Garzón, Ricardo Ambrosio, Mariano Arnaiz y Nuris Orihuela. A Dani Mendoza por su gran apoyo. A Paúl Romero y a Ander De Abrisqueta del departamento de Geología.

Gracias a mis padres, Auxiliadora y Jorge y a mi hermana Yesika, por su apoyo incondicional, sin su ayuda este sueño no habría sido posible. También a Piedad de Jiménez por su apoyo incondicional.

A mis dos grandes compañeros durante la carrera, Sofía Villanueva y Halis Benitez. Gracias por todo!.

A los camaradas Laura González, Jesús Ovalles, Yessy Palacios, Sinahir Mambie, Gabriela Romero, Sara Otero, Néstor Cahuana, Fabian Linares, Atilio Torres, Said Roa, César Yepez, Manuel Bravo, Airam Flores, Ricardo Macero, José Campos, Ricardo Nobregas, Juan Natera, Alberti Viloría, Marco Perez, Carlos Corredor, Katiuska Sánchez, Krizia Colomé, Rafael Borges.

A mis hermanos y hermanas del alma, Carlos Daniel Rivas, Carlos Felipe Borges, Rafael Octavio Hidalgo, Zuhe Jeréz Coronil, Adrián, Yetzenia Delgado y María José Barazarte.

A los amigos de la vida, Valeria Escobar, Roberto Castro, Iván Guzmán, Catherine De las Heras, Mariana Guevara, Nayrin Forne, Jacnelis Rodriguez y Esteban Mejía.

García D., Jorge E

ATENUACIÓN DE RUIDO EN BANDAS DE FRECUENCIA DE DATOS SÍSMICOS MULTICOMPONENTE DEL BLOQUE JUNÍN, FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO, POR EL MÉTODO DE DESCOMPOSICIÓN EN VALORES SINGULARES.

Tutor Académico: Prof. José Cavada. Tutor Industrial: MSc. Asdrúbal Ovalles. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Geológica, Minas y Geofísica. Año 2012, 77 p

Palabras Claves: Registros sísmicos multicomponente, polarización, sísmica-ruido, Faja Petrolífera del Orinoco

Resumen.: Con el fin de separar la señal del ruido en los registros sísmicos, generalmente se aplican filtros pasabanda. La dificultad se encuentra, en la elección de fases que presentan un comportamiento espectral similar, es decir, cuando la señal y el ruido exhiben una banda de frecuencia similar estas técnicas de filtrado no son efectivas. Por ende, es necesario estudiar otras propiedades de las ondas, como es el caso de la polarización. El siguiente trabajo tiene como objetivo implementar una herramienta para la atenuación de energía asociada a modos de ondas con polarizaciones no lineales. Para lo cual se emplea un filtro adaptativo en bandas de frecuencia basado en la descomposición en valores singulares (SVD, por sus siglas en inglés). Para generar la herramienta, primero se obtuvieron datos sintéticos multicomponente y después se agregó ruido aleatorio a los registros. Luego, se realizaron pruebas para determinar los parámetros más efectivos para preservar la señal polarizada linealmente mientras se atenúa el ruido con polarización no lineal. Posteriormente, se programó el código del filtro adaptativo y los guiones *bash* de funcionamiento de la herramienta. En la siguiente etapa, se implementó el filtro adaptativo en tres bandas de frecuencia. Finalmente, el filtro se aplicó a datos reales (un registro de Junín y otro adicional de Barinas) en dos bandas

de frecuencia.

Los resultados obtenidos para los datos sintéticos evidencian la correcta disminución del ruido aleatorio mientras se preserva la señal de interés. Para los datos de Barinas también se aprecia la atenuación del ruido, principalmente del ruido de ondas superficiales (*groundroll*), mejorando notablemente la relación señal ruido del registro triaxial. Para los datos de Junín el filtro removió parcialmente el ruido de las ondas superficiales y se preservaron los eventos polarizados linealmente. En general, la herramienta de filtrado evalúa elemento a elemento la matriz de datos SVD, por lo cual no son necesarias interpolaciones, permitiendo reproducir adecuadamente las amplitudes y fases de la señal de interés. El éxito del filtro adaptativo en bandas de frecuencia, consiste en la correcta separación de la señal del ruido. Este trabajo permitirá mejorar la secuencia de procesamiento de datos multicomponente, para aprovechar al máximo la información de las reflexiones.

Índice general

RESUMEN	VI
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. El problema de la investigación.	1
1.2. Objetivos.	2
1.2.1. Objetivo general.	2
1.2.2. Metodología.	2
1.3. Justificación.	3
II. MARCO TEÓRICO	4
2.1. Ondas en medios elásticos.	4
2.1.1. Ondas corpóreas.	5
2.1.2. Ondas superficiales.	5
2.2. Propiedades de las ondas elásticas	6
2.2.1. Polarización.	6
2.2.2. Conversión de modo. Onda PS.	9
2.3. Tratamiento de señales sísmicas.	10
2.3.1. Señal.	10
2.3.2. Análisis de Fourier y suma de armónicos.	11
2.3.3. Señal y ruido	14
2.4. Sísmica multicomponente.	15
2.4.1. Registros sintéticos y reales.	16
2.4.2. Ruido en sísmica multicomponente.	16
2.5. Filtros como parte del procesamiento de datos multicomponente.	18

2.5.1.	Filtros de polarización.	18
2.5.2.	Filtro de polarización basado en la descomposición en valores singulares	19
III.	METODOLOGÍA	25
3.1.	Método	25
3.1.1.	Datos de entrada	26
3.1.2.	Codificación de guiones <i>bash</i> o <i>shell-scripts</i>	28
3.1.3.	Codificación del filtro de polarización basado en la descompo- sición en valores singulares (SVD)	29
3.1.4.	Filtrado de polarización en bandas de frecuencia de los datos sintéticos	34
3.1.5.	Filtrado de polarización en bandas de frecuencia de datos reales	35
3.1.6.	Datos de salida	36
3.2.	Herramientas	36
IV.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	38
4.1.	Registros sintéticos	38
4.1.1.	Aplicación del filtro	40
4.2.	Registros reales	50
4.2.1.	Datos del bloque Junín	50
4.2.2.	Aplicación del filtro	51
4.2.3.	Datos de Barinas	62
4.2.4.	Aplicación del filtro	63
4.3.	Discusión sobre el filtro	70
V.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	72
	APÉNDICES	78

Índice de cuadros

4.1. Parámetros del registro sintético	38
4.2. Parámetros del registro del bloque Junín	50
4.3. Parámetros del registro de Barinas	62

Índice de figuras

2.1. Trayectoria de polarización de los diferentes tipos de onda. (Modificado de Tatham and McCormack, 1991).	7
2.2. Ejemplo del movimiento de las partículas en el <i>ground roll</i> . (Tomado y modificado de De Meersman, 2008)	8
2.3. Trayectoria de rayos de onda convertida PS. (Tomado y modificado de Stewart et al., 2002)	9
2.4. Señal sinusoidal obtenida por proyectar un vector de rotación complejo sobre los ejes imaginarios. Tomado y modificado de Rauscher (2001) . .	10
2.5. Aproximación de una señal rectangular mediante la suma de armónicos. Tomado y modificado de Rauscher (2001)	13
2.6. Magnitud del espectro de la aproximación de una señal rectangular mostrado en la figura 2.5	14
2.7. Transformación a hiperelipse	20
2.8. Algoritmo SVD. Tomado y modificado de Franco and Musacchio, 2001.	24
3.1. Esquema del funcionamiento del filtro SVD.	25
3.2. Propiedades elásticas del medio.	26
3.3. Espectro de potencia de registros sintéticos, obtenido con el script 1. . .	27
3.4. Esquema de los procesos dentro del algoritmo SVD.	34
3.5. Procedimiento para registros sintéticos.	35
3.6. Procedimiento para registros reales.	36

4.1. Registros sintéticos originales, componentes a) vertical b) radial c) transversal.	44
4.2. Registros sintéticos con ruido gaussiano, componentes a) vertical b) radial c) transversal.	45
4.3. Estimación de la planaridad con las ventanas, con longitud A) 40 ms B) 160 ms C) 1200 ms	46
4.4. Registros sintéticos filtrados en bandas, componentes a) vertical b) radial c) transversal.	47
4.5. Registros sintéticos filtrados con la banda completa, componentes a) vertical b) radial c) transversal.	48
4.6. Espectro de amplitud de los registros sintéticos	49
4.7. Componente vertical de los datos sísmicos del bloque Junín	53
4.8. Componente radial de los datos sísmicos del bloque Junín	54
4.9. Componente transversa de los datos sísmicos del bloque Junín	55
4.10. Hodograma de los datos sísmicos Junín para la traza 1, en la ventana entre a) 2 y 2,32 s b) 2 y 2.6 s	56
4.11. Componente vertical de los datos sísmicos del bloque Junín a) crudo b) filtrado en bandas	57
4.12. Hodograma de los datos sísmicos Junín para la traza 1, en la ventana entre a) 2 y 2,32 s b) 2 y 2.6 s. Cada hodograma está normalizado individualmente, los eventos lineales en color rojo representan ondas P que antes se encontraban enmascaradas.	58
4.13. Componente vertical de los datos sísmicos del bloque Junín a) crudo b) filtrado banda completa	59
4.14. Diferencia de la componente vertical de los datos sísmicos del bloque Junín a) registro filtrado en bandas b) registro filtrado con la banda completa	60
4.15. Espectros de amplitud de los datos sísmicos del bloque Junín	61
4.16. Datos sísmicos Barinas, componentes a) vertical b) radial c) transversal.	65

4.17. Datos sísmicos Barinas filtrados en bandas, componentes a) vertical b) radial c) transversal.	66
4.18. Componente vertical de los datos sísmicos Barinas a) crudo b) filtrado en bandas c) diferencia entre ambos.	67
4.19. Componente vertical para banda completa de los datos sísmicos Barinas a) crudo b) filtrado c) diferencia entre ambos.	68
4.20. Espectro de amplitud de los datos sísmicos Barinas	69
5.1. Banda 1 $f=2,4,16,24$ Hz, componentes a) vertical b) radial c) transversal.	79
5.2. Autoimagen 1 banda 1, componentes a) vertical b) radial c) transversal.	80
5.3. Autoimagen 2 banda 1, componentes a) vertical b) radial c) transversal.	81
5.4. Factores de peso banda 1. A) R_1 B) R_2 C) P	82
5.5. Banda 1 filtrada, componentes a) vertical b) radial c) transversal.	83
5.6. Banda 2 $f=16,20,32,44$ Hz, componentes a) vertical b) radial c) transversal.	84
5.7. Autoimagen 1 banda 2, componentes a) vertical b) radial c) transversal.	85
5.8. Autoimagen 2 banda 2, componentes a) vertical b) radial c) transversal.	86
5.9. Factores de peso banda 2. A) R_1 B) R_2 C) P	87
5.10. Banda 2 filtrada, componentes a) vertical b) radial c) transversal.	88
5.11. Banda 3 $f=32,38,225,250$ Hz, componentes a) vertical b) radial c) transversal.	89
5.12. Autoimagen 1 banda 3, componentes a) vertical b) radial c) transversal.	90
5.13. Autoimagen 2 banda 3, componentes a) vertical b) radial c) transversal.	91
5.14. Factores de peso banda 3. A) R_1 B) R_2 C) P	92
5.15. Banda 3 filtrada, componentes a) vertical b) radial c) transversal.	93
5.16. Registros con ruido con frecuencia central 20Hz . a) Componente vertical con ruido b) Componente vertical filtrada	94
5.17. Componente vertical banda 1 de los datos sísmicos del bloque Junín, $f=4,8,12,30$ Hz	96

5.18. Autoimagen 1 banda 1 de los datos sísmicos del bloque Junín, componente vertical	97
5.19. Autoimagen 2 banda 1 de los datos sísmicos del bloque Junín, componente vertical	98
5.20. R_1 banda 1 de los datos sísmicos del bloque Junín	99
5.21. R_2 banda 1 de los datos sísmicos del bloque Junín	100
5.22. P banda 1 de los datos sísmicos del bloque Junín	101
5.23. Componente vertical filtrada banda 1 de los datos sísmicos del bloque Junín	102
5.24. Componente vertical banda 2 de los datos sísmicos del bloque Junín, $f=12,30,100,120$ Hz.	103
5.25. Autoimagen 1 banda 2 de los datos sísmicos del bloque Junín, componente vertical	104
5.26. Autoimagen 2 banda 2 de los datos sísmicos del bloque Junín, componente vertical	105
5.27. R_1 banda 2 de los datos sísmicos del bloque Junín	106
5.28. R_2 banda 2 de los datos sísmicos del bloque Junín	107
5.29. P banda 2 de los datos sísmicos del bloque Junín	108
5.30. Componente vertical filtrada banda 2 de los datos sísmicos del bloque Junín	109
5.31. Componente vertical filtrada de los datos sísmicos del bloque Junín,	110
5.32. Banda 1 de los datos sísmicos de Barinas, $f=4,8,12,30$ Hz y componentes a) vertical b) radial c) transversal.	112
5.33. Autoimagen 1 banda 1 de los datos sísmicos de Barinas, componentes a) vertical b) radial c) transversal.	113
5.34. Autoimagen 2 banda 1 de los datos sísmicos de Barinas, componentes a) vertical b) radial c) transversal.	114
5.35. Factores de peso banda 1 de los datos sísmicos de Barinas. A) R_1 B) R_2 C) P	115

5.36. Banda 1 filtrada, componentes de los datos sísmicos de Barinas a) vertical b) radial c) transversal.	116
5.37. Banda 2 de los datos sísmicos de Barinas, f=12,30,100,120 Hz y componentes a) vertical b) radial c) transversal.	117
5.38. Autoimagen 1 banda 2 de los datos sísmicos de Barinas, componentes a) vertical b) radial c) transversal.	118
5.39. Autoimagen 2 banda 2 de los datos sísmicos de Barinas, componentes a) vertical b) radial c) transversal.	119
5.40. Factores de peso banda 2 de los datos sísmicos de Barinas. a) R_1 b) R_2 c) P	120
5.41. Banda 2 filtrad de los datos sísmicos de Barinas, componentes a) vertical b) radial c) transversal.	121

Capítulo I

INTRODUCCIÓN

1.1. El problema de la investigación.

En la actualidad las técnicas de sísmica multicomponente han demostrado tener ventaja sobre las técnicas de datos sísmicos convencionales (Stewart et al., 2002).

Mediante la sísmica multicomponente es posible obtener datos triaxiales (componentes radial, transversal y vertical) del campo de propagación de las ondas en el subsuelo. Por lo tanto se trata como una superposición de múltiples señales en el dominio del tiempo, cada una con diferente contenido de frecuencias y polarizaciones variables con el tiempo (Shieh and Herrmann, 1990). Con el fin de identificar y estudiar el campo de las ondas, es necesario separar la señal de interés del ruido presente en el registro sísmico, empleando para ello operadores matemáticos de filtrado. El ruido aleatorio es generalmente el principal problema para la visualización de los datos, ya que oscurece los detalles finos y complica la identificación de las características de la imagen sísmica (Ristau and Moon, 2001). Los filtros tradicionales incluyen, el uso de arreglos de receptores durante la adquisición, el método de arreglo de apilamiento *stack array*, filtros lineales y filtros multicanales (filtrado en el dominio de la frecuencia, f-k, τ -p, filtros de coherencia, deconvolución F-X-Y y filtros radon).

Los filtros pasabanda (filtros lineales) se emplean generalmente para mejorar la relación señal ruido, la dificultad se encuentra en la elección de las fases que presentan

bandas de frecuencia similares, es decir, cuando la señal y el ruido exhiben características espectrales similares, los filtros pasabanda no son eficientes, como es el caso de las ondas convertidas parcialmente. Por lo tanto, es necesario implementar técnicas que aprovechen las propiedades de polarización de las ondas, realcen las vibraciones de las partículas en una dirección de polarización preferencial y atenúen las vibraciones que no cumplan las condiciones de polarización. Dentro de estas técnicas se encuentran, los métodos basados en la matriz de covarianza y los basados en la descomposición en valores singulares (SVD). Considerando, que la aplicación de los métodos convencionales basados en la matriz de covarianza incluye un proceso de rotación de las direcciones principales de la elipse de polarización (condición que no permite preservar la relatividad de las amplitudes de las trazas); los métodos basados en la descomposición en valores singulares parecen ser más efectivos (Franco and Musacchio, 2001).

1.2. Objetivos.

1.2.1. Objetivo general.

Implementar una herramienta para la atenuación de energía asociada a modos de ondas con polarizaciones no lineales, con base en la descomposición en valores singulares (SVD) de datos multicomponente sintéticos y reales.

1.2.2. Metodología.

- Generar una sección con datos triaxiales sintéticos.
- Emplear el filtro de polarización sobre la sección sintética, con el fin de entender los parámetros (bandas de frecuencia) que resultan más efectivos para remover polarizaciones no lineales (ruido), mientras se preserva la señal.
- Aplicar el filtro adaptativo en bandas de frecuencia a los datos reales.

- Comparar los resultados del filtrado de datos sintéticos con el procedimiento sobre datos reales.

1.3. Justificación.

La presente investigación permitirá comprobar la factibilidad de las técnicas de filtrado basadas en las propiedades de polarización de las ondas. Se busca desarrollar una técnica que combine el procedimiento de descomposición en valores singulares (SVD) con el principio de separación de la energía en la suma de armónicos de acuerdo a bandas de frecuencias específicas.

Este trabajo es de gran importancia en el marco de la exploración sísmica actual y futura de datos multicomponente, permitiendo mejorar la secuencia de procesamiento de datos sísmicos multicomponente, con énfasis en incrementar la relación señal ruido para aprovechar al máximo la información de las reflexiones. También, el estudio actual, busca fomentar futuros trabajos que aprovechen el campo completo de propagación de las ondas, con el fin de mejorar las imágenes sísmicas de ondas convertidas y de esta manera disminuir la incertidumbre en la exploración sísmica petrolera actual.

Capítulo II

MARCO TEÓRICO

2.1. Ondas en medios elásticos.

Un medio se considera elástico si posee un estado natural (en donde los esfuerzos y deformaciones son cero), el cual se revertirá (volverá a su forma original) cuando los esfuerzos aplicados sean retirados (Aki and Richards, 2002).

Es de suma importancia conocer las características de estos medios. La física enseña que en alguna escala, ningún sólido es homogéneo, así, si un cambio de propiedades con la dirección distingue un sólido como anisotrópico o como no homogéneo simplemente es una función de escala. Por consideración práctica, el medio de propagación es aproximado a un medio homogéneo. Debido a esto, el concepto de anisotropía se refiere a la variación de la medición de las propiedades de un material considerado homogéneo con la variación de la dirección de medición en un punto del mismo. Inversamente, el concepto de isotropía se refiere a la invariabilidad de las propiedades físicas independientemente de la variación de la dirección de medición en un punto del mismo (Winterstein, 1990).

Desde el punto de vista de la concentración espacial de la energía, las ondas pueden ser divididas en ondas corpóreas y en ondas superficiales. Las ondas de cuerpo se pueden propagar en el interior del medio correspondiente, mientras que las ondas superficiales se concentran alrededor de la superficie de éste (Novotny, 1999).

2.1.1. Ondas corpóreas.

Las ondas de cuerpo en un medio homogéneo e isotrópico, se pueden separar generalmente en ondas con fases P (compresionales) y S (corte). En las ondas P, la dirección de la vibración de las partículas es la misma que la dirección de propagación de la onda, mientras que, en las ondas S, la vibración es normal a la dirección de propagación. Estas fases, se pueden considerar como un grupo de llegadas no dispersivas (Aki and Richards, 2002).

En el caso de un medio anisotrópico heterogéneo, se conocen a las ondas quasi-compresionales (qP) como ondas P. Esta simplificación del término se debe al hecho de que el desplazamiento de las partículas está casi alineado con la dirección de propagación. Similarmente, las ondas de quasi-corte (qS), pueden ser referidas por simplicidad como ondas S, ya que en un medio anisotrópico el desplazamiento de las partículas es casi perpendicular a la dirección de propagación (Slawinski, 1996).

2.1.2. Ondas superficiales.

Solo las ondas P y S pueden propagarse en un medio homogéneo, isotrópico e ilimitado. Si el medio es sólido y se encuentra estratificado, las ondas superficiales se propagan en la superficie del mismo. Pueden ser consideradas perturbaciones dispersivas con bajas velocidades y grandes amplitudes en comparación con los eventos de reflexión (Aki and Richards, 2002).

Estas ondas forman usualmente las fases principales en un sismograma, distinguiéndose dos tipos principalmente: Rayleigh y Love, en las cuales la principal diferencia es el movimiento de las partículas (Pujol, 2003); las primeras, se encuentran elípticamente polarizadas en el plano determinado por la componente normal a la superficie y a la dirección de propagación (Novotny, 1999). Cerca de la superficie de un semiespacio homogéneo, la vibración de las partículas describe una elipse vertical retrógrada. Las ondas Love no pueden propagarse en un semiespacio homogéneo, solo lo logran cuando la velocidad de la onda S incrementa con la distancia de la superficie del medio

(Novotny,1999), por ende, el caso mas simple donde se puede generar una onda Love, es una capa homogénea sobre un semiespacio homogéneo (Aki and Richards, 2002).

2.2. Propiedades de las ondas elásticas

Es importante definir algunas propiedades características de las ondas elásticas, como es el caso de la polarización y la conversión de modo.

2.2.1. Polarización.

El término polarización se refiere a las propiedades geométricas de una partícula en movimiento, incluyendo la forma de su trayectoria y su orientación espacial y excluyendo la magnitud del movimiento. Para las ondas corpóreas la polarización es lineal y la dirección de polarización está determinada por la anisotropía del medio por el cual viaja la onda (Winterstein, 1990).

De acuerdo a la relación entre la dirección de polarización y el plano de polarización se pueden definir dos tipos de ondas S: la ondas S vertical (SV) y la onda S horizontal (SH). La polarización de SV ocurre en el plano de la trayectoria ortogonal a la interfase de reflexión mientras que, la de SH en el plano paralelo. Con la incidencia no vertical sobre el plano de un reflector horizontal, las SV son generadas por ondas P y viceversa; las ondas generadas de esta manera se conocen como ondas convertidas (PS). En este caso, las ondas P y SV son un par acoplado y las ondas SH son independientes de ellas (Tatham and McCormack, 1991). Por lo tanto, si una onda elástica se propaga a través de un medio sólido, existen tres estados posibles de polarización (onda P, SH y SV), de tal forma que se pueden grabar las tres polarizaciones o cualquier combinación superpuesta de ellas, con la finalidad de reconstruir el movimiento de la superficie de la tierra (Nguyen, 1989).

En el caso de las ondas superficiales, las tipo Rayleigh, se encuentran polarizadas elípticamente en el plano vertical-radial, los modos fundamentales despliegan un movimien-

to retrógrado de las partículas y los modos altos progradan o retrogradan elípticamente, mientras que, las ondas Love tienden a ser polarizadas en forma lineal, en el mismo plano que las ondas SH (Kanasewich, 1981). La figura 2.1 ilustra los modos de onda y el acoplamiento en un medio homogéneo con estratos paralelos (Tatham and McCormack, 1991).

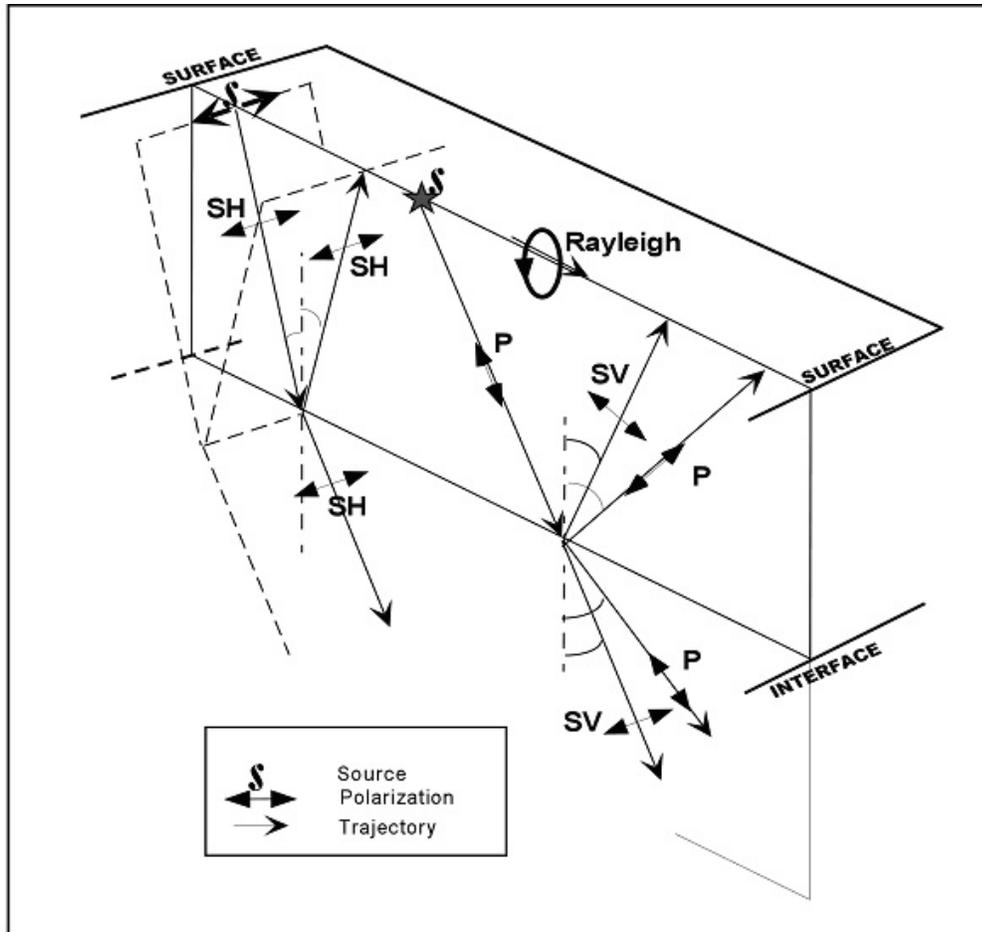


Figura 2.1: Trayectoria de polarización de los diferentes tipos de onda. (Modificado de Tatham and McCormack, 1991).

Debido a que la mayoría del ruido es de tipo Rayleigh, exhibirá polarización elíptica, con una dirección preferencial (Aki and Richards, 2002). La principal consecuencia del movimiento elíptico desplegado, es que la energía del *ground roll* grabada en cualquiera de las componentes, es una simple copia escalada y con un desplazamiento en

fase de las otras componentes. El hodograma (diagrama de polarización), muestra gráficamente la trayectoria del movimiento de las partículas, usualmente se proyecta a un plano como un gráfico cruzado para dos componentes ortogonales dentro del registro (Winterstein, 1990).

El hodograma del *ground roll* para una estación 3C real se ilustra en la figura 2.2 (De Meersman, 2008), el movimiento es aproximadamente elíptico y está confinado al plano XZ.

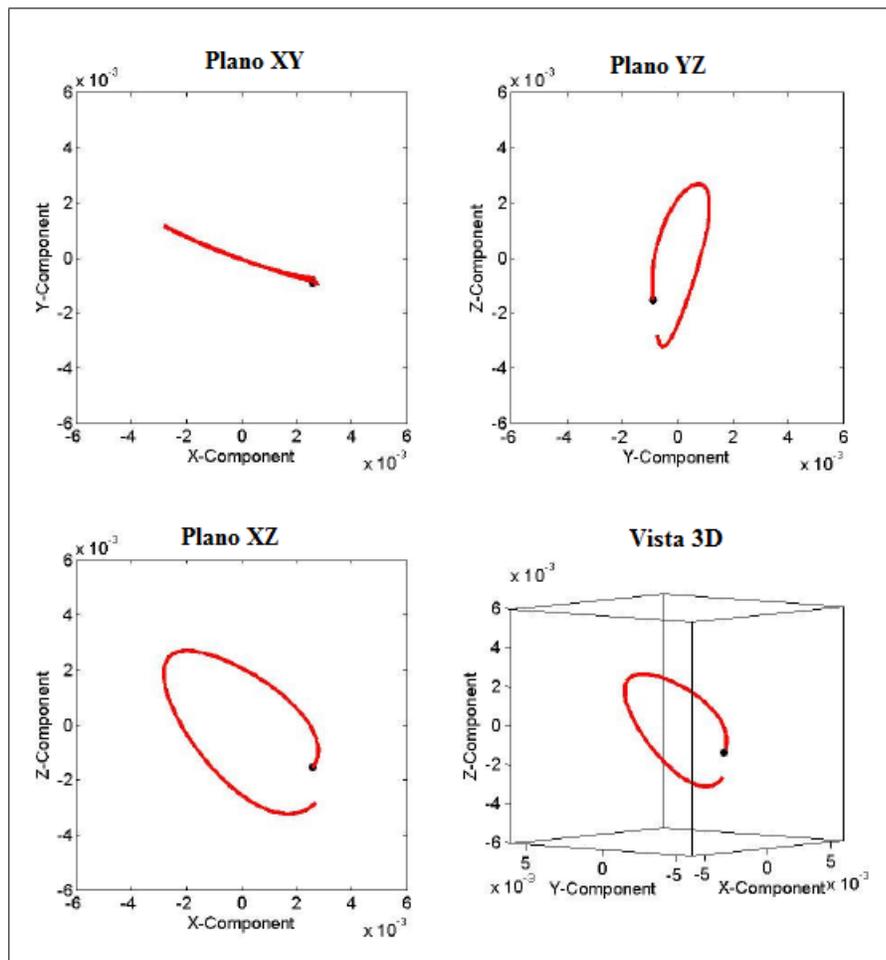


Figura 2.2: Ejemplo del movimiento de las partículas en el *ground roll*. (Tomado y modificado de De Meersman, 2008)

2.2.2. Conversión de modo. Onda PS.

Según Zoeppritz, al incidir una onda corpórea (P o S) sobre una interfase de manera no ortogonal, la energía se transmite y se refleja en forma de P y S. Si la incidencia es perpendicular la onda se transmitirá con la misma fase incidente sea esta P o S (Aki and Richards, 2002). En el estudio de ondas convertidas se utiliza la onda descendente que se inicia como P y que al reflejarse en el punto más profundo de penetración se transforma en una onda S que asciende “onda PS”. Según la ley de Snell los rayos de propagación de estas ondas presentan ángulos asimétricos (Stewart et al., 2002). En la figura 2.3 se muestra que el ángulo de incidencia de la onda P (θ) es mayor que el de la reflexión de onda S (ϕ), debido a que la velocidad de la onda P (V_p) es mayor a la velocidad de la onda S (V_s).

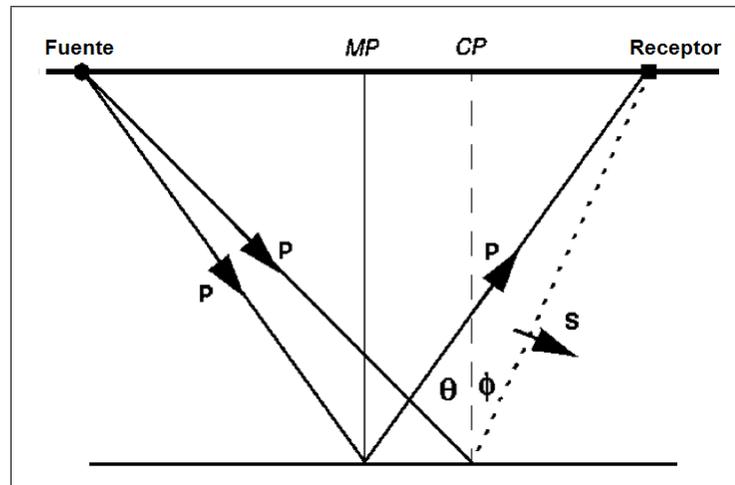


Figura 2.3: Trayectoria de rayos de onda convertida PS. (Tomado y modificado de Stewart et al., 2002)

2.3. Tratamiento de señales sísmicas.

2.3.1. Señal.

Se puede definir una señal como una función que representa una cantidad o variable física y contiene la información sobre el comportamiento o la naturaleza de un fenómeno. Por momentos, en un circuito RC la señal puede representar el voltaje a través del condensador o la corriente que fluye en la resistencia (Hsu, 1995). Matemáticamente, una señal se representa como una función de una variable independiente t . Usualmente t representa el tiempo. Por lo tanto, $x(t)$ es la denotación de la señal (Hsu, 1995).

De acuerdo con Rauscher (2001) para una señal $x(t) = A(\text{sen } 2\pi f_0 t)$, la amplitud A que se grafica en función del tiempo corresponde a la proyección de un vector de rotación sobre el eje imaginario jIm , como se ilustra en la figura 2.4; La frecuencia angular del vector se obtiene de:

$$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_0$$

donde:

ω_0 = frecuencia angular en s^{-1} .

f_0 = frecuencia de la señal en Hz .

Además, $x(t)$ se puede escribir como $x(t) = A \text{Im} (e^{j 2\pi f_0 t})$.

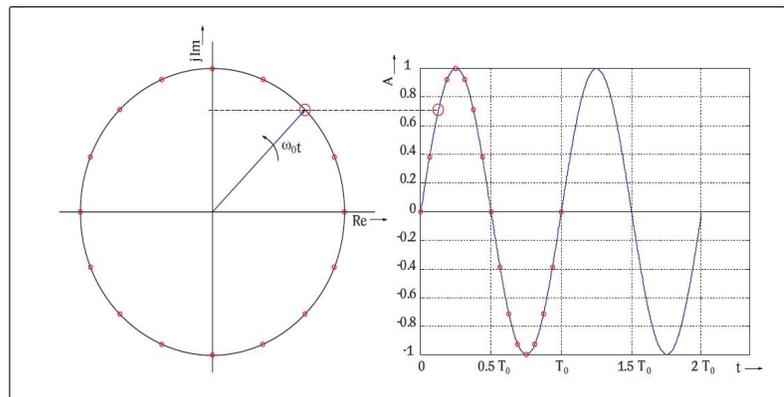


Figura 2.4: Señal sinusoidal obtenida por proyectar un vector de rotación complejo sobre los ejes imaginarios. Tomado y modificado de Rauscher (2001)

2.3.2. Análisis de Fourier y suma de armónicos.

Una señal puede ser descrita en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia. El dominio del tiempo es donde un evento, como un cambio en la amplitud, es medido sobre el tiempo (t) y en el dominio de la frecuencia, la amplitud de la señal es medida en relación a la frecuencia (Winder, 2002). Ambos modos se relacionan entre si con la transformada de Fourier (denominada F), mediante la cual cada señal variable en el dominio del tiempo presenta un espectro de potencia característico. La expresión de la transformada de Fourier es (Rauscher, 2001):

$$X_f(f) = F\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi f t} dt \quad (2.1)$$

y

$$x(t) = F^{-1}\{X_f(f)\} = \int_{-\infty}^{\infty} X_f(f) \cdot e^{j2\pi f t} df$$

donde

$F\{x(t)\}$: transformada de Fourier de $x(t)$

$F^{-1}\{X(f)\}$: transformada inversa de Fourier de $X(f)$

$x(t)$: señal en dominio del tiempo

$X_f(f)$: señal compleja en el dominio de la frecuencia

El fuerte de la transformada de Fourier en análisis de señales y reconocimiento de patrones, es la capacidad de revelar estructuras que pueden ser usadas para caracterizar una señal. Para una señal periódica, la potencia se concentra en bandas de frecuencia estrechas, indicando la existencia de la estructura y carácter predecible de la señal (Vaseghi, 2006).

Teorema de Fourier

De acuerdo al teorema de Fourier, una señal periódica en tiempo puede ser representada como una suma de senos y cosenos de distintas frecuencias y amplitudes; según la siguiente expresión (Rauscher, 2001):

$$x(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \operatorname{sen}(n 2 \pi f_0 t) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \operatorname{cos}(n 2 \pi f_0 t) \quad (2.2)$$

Los coeficientes de Fourier A_0 , A_n y B_n dependen de la forma de la señal $x(t)$ y pueden ser calculados de la siguiente manera:

$$A_0 = \frac{2}{T_0} \int_0^T x(t) dt$$
$$A_n = \frac{2}{T_0} \int_0^T x(t) \operatorname{sen}(n \cdot w_0) dt$$
$$B_n = \frac{2}{T_0} \int_0^T x(t) \operatorname{cos}(n \cdot w_0) dt$$

donde:

$\frac{A_0}{2}$ = componente DC

$x(t)$ = señal en el dominio del tiempo

n = orden de la oscilación armónica

T_0 = periodo

w_0 = frecuencia angular

Empleando las series de Fourier es posible reconstruir la señal en estudio, en la figura 2.5 se observa una señal rectangular aproximada a partir de la suma de varias oscilaciones sinusoidales. A mayor número de componentes en la serie, más se aproxima la señal al pulso rectangular ideal.

A partir de las señales senos y cosenos, se puede encontrar otra solución para la ecuación 2.1, de tal manera que las siguientes relaciones se obtiene para el espectro complejo:

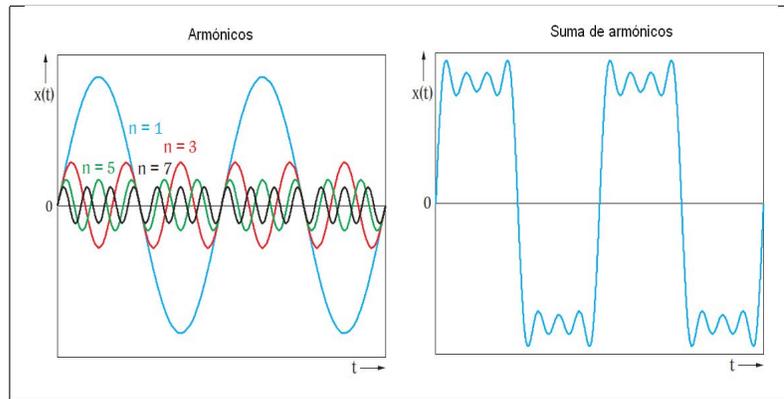


Figura 2.5: Aproximación de una señal rectangular mediante la suma de armónicos. Tomado y modificado de Rauscher (2001)

$$F\{\text{sen}(2\pi f_0 t)\} = \frac{1}{j} \delta(f - f_0) = -j \delta(f - f_0)$$

y

$$F\{\text{cos}(2\pi f_0 t)\} = \delta(f - f_0)$$

donde $\delta(f - f_0)$ es la función Dirac; $\delta(f - f_0) = 1$ si $f - f_0 = 0$ y $f = f_0$, de lo contrario $\delta(f - f_0) = 0$. Por lo tanto el espectro de amplitud de las señales senos y cosenos consiste de un pulso Dirac único en f_0 . Las transformadas de Fourier de las señales senos y cosenos son idénticas en magnitud, por lo cual las dos señales exhiben una magnitud de espectro idéntica para la misma frecuencia f_0 . Para calcular el espectro de amplitud de una señal periódica cuyo momento característico se describe mediante una serie de Fourier de acuerdo con la ecuación 2.2, cada componente de la serie tiene que ser transformada. Cada uno de estos elementos conduce a un impulso de Dirac, que es un componente discreto en el dominio de la frecuencia. Las señales periódicas siempre muestran espectros discretos conocidos como línea espectral. En consecuencia, el espectro mostrado en la figura 2.6 se obtiene para la señal rectangular aproximada de la figura 2.5.

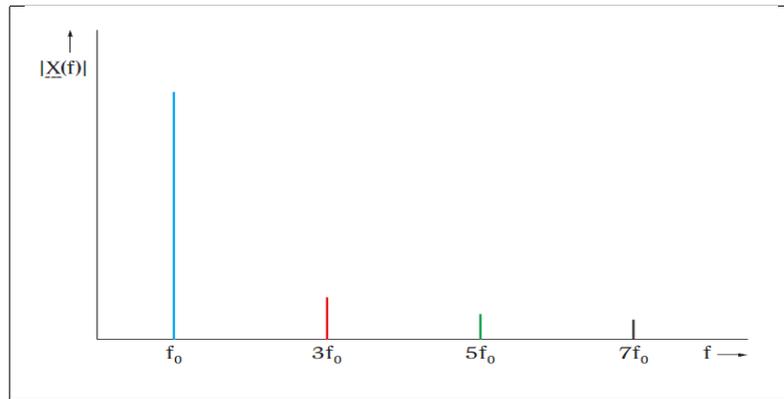


Figura 2.6: Magnitud del espectro de la aproximación de una señal rectangular mostrado en la figura 2.5

Espectro de potencia y correlación

El espectro de potencia y la correlación son transformada de Fourier uno del otro, y contienen exactamente la misma información presentada en diferentes dominios: la correlación es una función en el dominio del tiempo y el espectro de potencia, una función en el dominio de la frecuencia. El espectro de potencia de una señal proporciona la distribución de la potencia de la señal entre varias frecuencias, muestra la existencia y también la potencia relativa de patrones repetitivos y/o de estructuras aleatorias en la señal, mientras que la correlación es una medida de auto-similaridad de una señal con su versión desplazada. Como el espectro de potencia, la función de correlación revela información en la estructura periódica o aleatoria de la señal (Vaseghi, 2006).

2.3.3. Señal y ruido

De acuerdo con Scales and Sneider (1998), los datos geofísicos no se pueden reproducir exactamente mediante el cálculo con modelos del subsuelo ya que estos son aproximaciones (es imposible usar infinitos parámetros).

La señal sísmica es la superposición de múltiples señales en el dominio del tiempo, cada una con contenido de frecuencia diferente y polarización variable en el tiempo (Shieh and Herrmann, 1990). Se puede definir el ruido como la parte de la señal sísmi-

ca que no es de interés dentro del campo de ondas estudiado. El ruido presenta distintos comportamientos como: ruido coherente (determinístico) y ruido incoherente (no determinístico), el primero asociado principalmente a ondas superficiales (*ground roll*) y a reverberaciones cercanas a superficie; el segundo asociado a irregularidades de los estratos superficiales. Dentro de la señal existe otra forma de ruido como las llegadas de ondas corpóreas que se convierten en ondas superficiales. El ruido coherente asociado al *ground roll* tiene bajas velocidades de grupo, altas amplitudes y esta restringido a bajas frecuencias (Yilmaz, 1987). El ruido aleatorio, el cual no es coherente, posee una probabilidad aleatoria y es clave ya que los datos geofísicos pueden ser modelados exitosamente usando procesos aleatorios (Scales and Sneider, 1998).

Por otra parte, la relación señal ruido es la comparación entre la amplitud de la señal sísmica y la amplitud del ruido. En términos cuantitativos, la energía de la señal para una frecuencia dada, dividida entre la energía remanente (Plesinger et al., 1995).

La relación señal ruido permite cuantificar la calidad de los registros sísmicos (Sheriff, 1991), obteniéndose mejoras al aumentar esta relación (SNR, según sus siglas en inglés).

2.4. Sísmica multicomponente.

El método sísmico toma ventaja de la propagación de ondas para obtener información sobre el subsuelo terrestre. En la sísmica multicomponente terrestre, se utilizan sensores de tres componentes (3C), permitiendo detectar el vector de desplazamiento de las ondas (Stewart et al., 2002). La configuración usada comúnmente es el sistema cartesiano u ortogonal XYZ. En esta configuración, una componente es vertical y las otras dos son horizontales. En general el producto final del método de onda convertida es una imagen de la Tierra con reflexiones de onda P y otra imagen con reflexiones PS (Guevara, 2000). Las secciones PS actuales se acercan y en algunos casos superan la calidad de los datos sísmicos convencionales PP (Stewart et. al, 2002). Los registros multicomponente permiten reconstruir la vibración de las partículas en el subsuelo y

determinar su polarización (Aki and Richards, 2002).

Para la adquisición de datos multicomponente generalmente se emplean receptores individuales o arreglos de receptores. En áreas donde se necesita recuperar el contenido de altas frecuencias los sistemas de un solo receptor superan a los sistemas de arreglos de receptores (De Meersman and Ansoger, 2007).

2.4.1. Registros sintéticos y reales.

La simulación numérica de ondas sísmica (modelado), es una herramienta útil para comprender la complejidad del campo de propagación de las ondas. Existen diferentes tipos de algoritmos para crear datos sintéticos. Entre estos se encuentra el método de diferencias finitas de orden n (FD, por sus siglas en inglés), el cual es una simulación del campo completo de propagación y se utiliza para resolver cualquier problema físico expresado en términos de ecuaciones diferenciales. La ecuación que representa el problema físico es resuelta numéricamente usando diferencias finitas en vez de derivadas parciales. El modelado con FD implica una versión discreta de la ecuación de onda, propagándose por pasos de tiempo a través del modelo geológico. La geometría y las propiedades elásticas del medio son definidas en el modelo geológico, el cual es representado como un mallado de cuadrados. La fuente de energía es incluida en las condiciones iniciales; luego de que todos estos parámetros se definen, el campo entero de propagación de las ondas puede ser calculado secuencialmente a través del modelo geológico (Guevara, 2000). Por otra parte, se conoce como registro real, al registro que se obtiene directamente al realizar la adquisición de datos multicomponente (datos sin procesar). Éstos están compuestos por múltiples llegadas, cada una con polarización y frecuencia característica diferentes (Shieh and Herrmann, 1990).

2.4.2. Ruido en sísmica multicomponente.

Los registros multicomponente se pueden obtener en las modalidades de sintéticos y reales, en los sintéticos el ruido es controlable mientras que en los reales, se conocen

ciertos tipos de ruidos característicos. Éstos se puede agrupar en tres categorías: ruido aleatorio, picos de ruido y ruido coherente, como ondas superficiales y ondas de refracción crítica (Schieck, 1993):

▷ **Ruido aleatorio:**

El ruido aleatorio 2D y 3D en grupos de datos digitales se puede definir como ruido que no muestra correlación entre un punto y sus puntos vecinos en una distancia corta (Ristau and Moon, 2001).

▷ **Ondas superficiales:**

En los receptores las ondas superficiales interfieren con las ondas de cuerpo que llevan información de los estratos en profundidad (Guevara, 2000). Las ondas Rayleigh y Love son eventos de gran amplitud, baja frecuencia y baja velocidad en el registro. El ancho de banda de este tipo de ruido se solapa con el ancho de banda de las señales de ondas de corte. Este solapamiento en frecuencias dificulta la separación de las ondas superficiales de las ondas convertidas en base al contenido de frecuencia. Sin embargo, en el caso de múltiples estratos cercanos a la superficie estas ondas son dispersivas: su velocidad de fase es una función de la frecuencia (Al- Husseini et al, 1981). Esta propiedad puede ser usada para separar las ondas superficiales de las ondas convertidas subyacentes (Schieck, 1993).

▷ ***Spikes, glitches* y trazas dañadas:**

Cuando se planta un geófono multicomponente individual, se debe tener cuidado para asegurar un buen acople con el suelo. En el caso de arreglos multicomponente o ristras, la posibilidad de que todos los receptores estén poco acoplados es baja. Generalmente, los registros crudos obtenidos utilizando un solo receptor por canal de grabación tienen un gran número de trazas dañadas, pobre relación señal ruido y un rango pequeño de amplitudes (Edelmann and Helbig, 1987); por lo tanto es necesario editar las trazas y frecuentemente se encontrarán picos de

gran amplitud (*spikes*) o fallos (*glitches*), es decir muestras de datos perdidas o con errores (Schieck, 1993).

2.5. Filtros como parte del procesamiento de datos multicomponente.

Las técnicas digitales se caracterizan por su flexibilidad y precisión, dos propiedades que son mejor explotadas en el campo técnico del procesamiento adaptativo de señales. Entre las operaciones de procesamiento, el filtrado lineal es probablemente el más común e importante (filtros pasabanda). Se convierte en adaptativo cuando los parámetros y coeficientes varían de acuerdo con criterios específicos (Bellanger, 2001). Dentro de los filtros adaptativos es muy importante la longitud de la ventana adaptativa, se debe buscar la longitud óptima para una buena supresión de ruido mientras se preservan las señales de interés. La longitud óptima se determina por ensayo y error (Aki and Richards, 2002).

2.5.1. Filtros de polarización.

En base al análisis de polarización de las ondas sísmicas, es posible diseñar filtros que preserven la energía que satisface condiciones específicas de polarización en una dirección particular y atenúen las vibraciones que no satisfagan dicho criterio. En general, las técnicas de computación digital permiten tomar ventaja de las propiedades de polarización para mejorar la relación señal ruido de las tres componentes grabadas.

Los métodos para obtener atributos de polarización se encuentran en dos categorías: la descomposición en valores singulares y los basados en covarianza (Franco and Musacchio, 2001). Una ventaja del filtrado de polarización es la independencia con respecto a los diferentes espectros de frecuencia y velocidad de la señal y el ruido (Aki and Richards, 2002).

Los análisis de la covarianza de una matriz triaxial de datos sísmicos condujeron al

estudio de atributos de polarización (Galperin and Frolova, 1960; Archambeau et al., 1965; Flinn, 1965; Alkaz et al., 1977; Kanasewich, 1981; Emersoy, 1984; Park et al., 1987; Jurkevics, 1988; Jackson et al., 1991; Perelberg and Hornborstel, 1994; Wang and Teng, 1997). Trabajos como los de Franco and Musacchio (2001) aplicaron la descomposición SVD para generar un filtro de polarización para registros asociados a una estación 3D-3C, obteniendo resultados satisfactorios. Otras investigaciones consideran estaciones cercanas a la estación en estudio, como es el caso de De Meersman and Kendall (2005), De Meersman and Ansoger (2007) y De Meersman (2008).

2.5.2. Filtro de polarización basado en la descomposición en valores singulares

Fundamento matemático

La descomposición en valores singulares es una forma de representar la transformada de *Karhunen-Loeve*.

Los valores singulares son el resultado de la búsqueda de una forma de reducir las formas cuadráticas a forma diagonal mediante cambios de base ortonormales. Esto implica un hecho geométrico destacado: las aplicaciones lineales transforman las esferas unidad en hiperelipses.

Una hiperelipse es la generalización a m dimensiones de una elipse. Se podría definir como la superficie que se obtiene al estirar o comprimir la esfera unidad en m direcciones ortogonales por factores $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m$ (posiblemente cero). Es decir, si fijamos m vectores ortonormales $v_1, v_2, \dots, v_m \in \mathbb{F}^m$, los vectores $\sigma_1 v_1, \dots, \sigma_m v_m$ son los semi-ejes de la hiperelipse con longitudes $\sigma_1, \dots, \sigma_m$.

Si

$$S^{m-1} = \{\chi \in \mathbb{F}^m \mid \|\chi\|_2 = 1\}$$

es la esfera unidad y $A \in \mathbb{F}^{m \times n}$ entonces $A(S^{m-1})$ es una hiperelipse. La figura 2.7

representa el caso $n = m = 2$ y $\mathbb{F} = \mathbb{R}$.

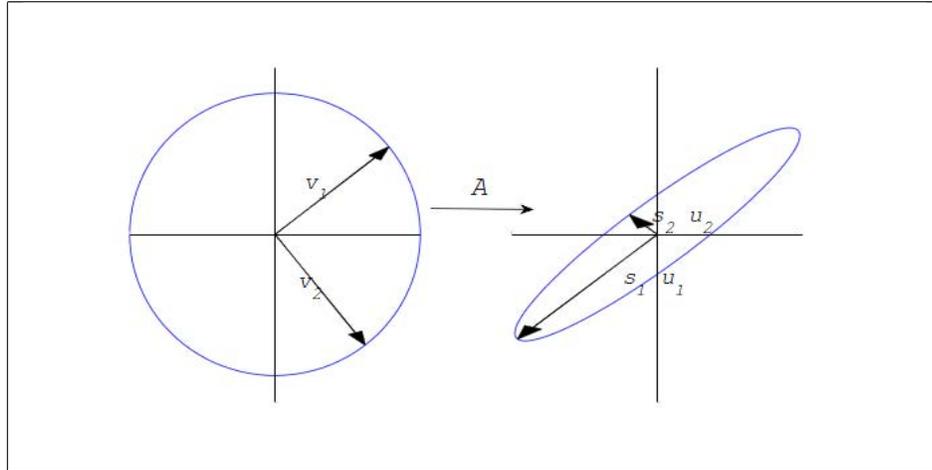


Figura 2.7: Transformación a hiperelipse

SVD descompone una matriz $m \times n$, M en tres matrices (Kaplan, 1998):

$$M = U \Sigma V^T$$

T : representa la transpuesta.

V : contiene los autovectores de $M^T M$

Σ : contiene los valores singulares de M a lo largo de su diagonal.

U : contiene una base ortonormal producto de la combinación de Σ y V y V : contiene los autovectores de $M M^T$.

También se puede describir el SVD de una manera alternativa, en lugar de descomponer una matriz en tres nuevas matrices, es posible descomponerla en la suma de múltiples matrices (Lanczos, 1961):

$$M = \sum_{n=i} \sigma_i U_i V_i^T$$

Cada matriz contiene una autoimagen, $U_i V_i^T$ (Andrews and Hunt, 1977), y cada autoimagen es ponderada por un valor singular, σ . Al estudiar los valores singulares es posible ver como la señal se distribuye a lo largo de las autoimágenes.

Una sección sísmica que consiste de M trazas con N puntos por traza, se puede representar como una matriz X donde los elementos X_{ij} representan las i^{th} puntos de la traza

j^{th}

$$X = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \dots a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \dots a_{2N} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \dots a_{1N} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{M1} & a_{M2} & a_{M3} \dots a_{MN} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Tal que al aplicar la descomposición SVD se obtiene:

$$X = \sum_{n=1} \sigma_n U_n V_n^T$$

En el caso de que todas las trazas M sean linealmente independientes, todos los σ_i son diferentes de cero y una perfecta reconstrucción de X requiere el empleo de todas las autoimágenes. Por otra parte, en el caso de que todas las trazas M son iguales dependiendo de un factor de escala, todas las trazas son linealmente dependientes, X es de rango uno y puede ser perfectamente reconstruida por la primera autoimagen $\sigma_1 U_1 V_1^T$. En general, de acuerdo a la dependencia lineal de trazas, X puede ser reconstruida con solo las primeras autoimágenes.

Consideraciones teóricas

Para este algoritmo se trabaja con base a que la mayor parte de la señal se concentra en las dos primeras autoimágenes derivadas de los datos SVD, por lo tanto, los factores de ponderación que dependen estrictamente de la intensidad (rectilinealidad y planaridad) del elipsoide de polarización son aplicados a estas.

Se supone que las vibraciones de las partículas son esencialmente 2D y que el mínimo valor singular (σ_3) representa ruido polarizado aleatoriamente (Franco and Musacchio, 2001).

El método numérico SVD y los métodos basados en covarianza, tienen los mismos principios teóricos para la solución del problema de los autovalores, pero SVD no requiere ninguna rotación alrededor del eje principal de polarización. Uno de los efectos de promediar la direccionalidad en un filtro basado en la covarianza, es la incorrecta

reproducción de las amplitudes en las trazas sísmicas. En consecuencia, las vibraciones de las partículas de las trazas filtradas muestran una rotación de la elipse de polarización. Este algoritmo reproduce propiamente los atributos de polarización, amplitud y fase de la señal original (Franco and Musacchio, 2001).

Método

El método de filtrado se basa en el trabajo descrito por Franco and Musacchio (2001) y es el siguiente: la matriz X se define como una matriz de dimensión $(Nx3)$, donde N es el número de muestras en la ventana de tiempo seleccionada, y cada columna es una traza que corresponde a cada componente de una estación receptora (m). $X_{c(c=z,r,t)}$ representa la componente triaxial expresada en el sistema de referencia. X se puede representar como:

$$X = \begin{bmatrix} Z_{1.l} & R_{1.l} & T_{1.l} \\ Z_{2.l} & R_{2.l} & T_{2.l} \\ Z_{3.l} & R_{3.l} & T_{3.l} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{N.l} & R_{N.l} & T_{N.l} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

donde:

$X = [Nx3]$: es la matriz de entrada.

$N = 1, 2, 3 \dots, n$: es el número de muestras por ventana.

(Z_l, R_l, T_l) , son las componentes vertical, radial y transversal respectivamente y $l = 1, 2, 3 \dots m$ representa el número de estación receptora.

Posteriormente se aplica la técnica SVD sobre la matriz X , obteniéndose:

$$X = U \Sigma V^T = \sum_i \sigma_i U_i V_i^T = \sum_{i=1}^3 E_i = e_{1c} + e_{2c} + e_{3c} \quad (2.5)$$

$c=z,r,t ; i = 1, 2, 3$

donde:

$E_i = e_{ic}(Nx3)$: son llamadas autoimágenes de la matriz X .

Se busca obtener las dos primeras autoimágenes. Los vectores V_1 y V_2 (primer y segundo autovector de la matriz XX^T) proveen una estimación de los mínimos cuadrados de la polarización elíptica. σ_i^2 (siendo σ_i el i -ésimo valor singular de X donde $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \dots \geq \sigma_m$, según el teorema SVD), representa la energía de las componentes principales a lo largo de V_i (i -ésimo autovector de $X^T X$), la energía total de cada eje es $(\sigma_1^2 - \sigma_3^2)$ a lo largo de V_1 , $(\sigma_2^2 - \sigma_3^2)$ y (σ_3^2) a lo largo de V_2 y V_3 respectivamente.

Luego, a partir de los valores singulares, se calculan los siguientes factores de ponderación para el filtrado:

▷ **Rectilinealidad**

$$R1 = 1 - \left(\frac{\sigma_3^2}{\sigma_1^2} \right) \quad (2.6)$$

$$R2 = 1 - \left(\frac{\sigma_3^2}{\sigma_2^2} \right) \quad (2.7)$$

$R1$ y $R2$ representan la rectilinealidad sobre el primer y segundo eje principal de la hiperelipse de polarización. La rectilinealidad mide el grado de polarización lineal de una señal de tres componentes; en general aumenta si la energía sísmica se concentra en una dirección principal. Se espera su máximo valor (1) en el tiempo de llegada de las ondas P y S, ya que éstas se encuentran polarizada en forma lineal y 0 cuando no existe polarización (Anant et al., 1997).

▷ **Planaridad**

$$P = 1 - \left(\frac{2\sigma_3^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \right) \quad (2.8)$$

La planaridad registra el grado de polarización de una señal de tres componentes en un plano (Oonincx, 1998).

Finalmente, la matriz filtrada queda determinada por la siguiente ecuación:

$$F = \sum_{i=1}^2 (U_i \sigma_i V_i^T R_i) P = (E_1 R_1 + E_2 R_2) P \quad (2.9)$$

o para cada componente, $c = z, r, t$:

$$F_c = (e_{1c} R_1 + e_{2c} R_2) P$$

La figura 2.8, ilustra el algoritmo descrito por Franco and Musacchio, 2001:

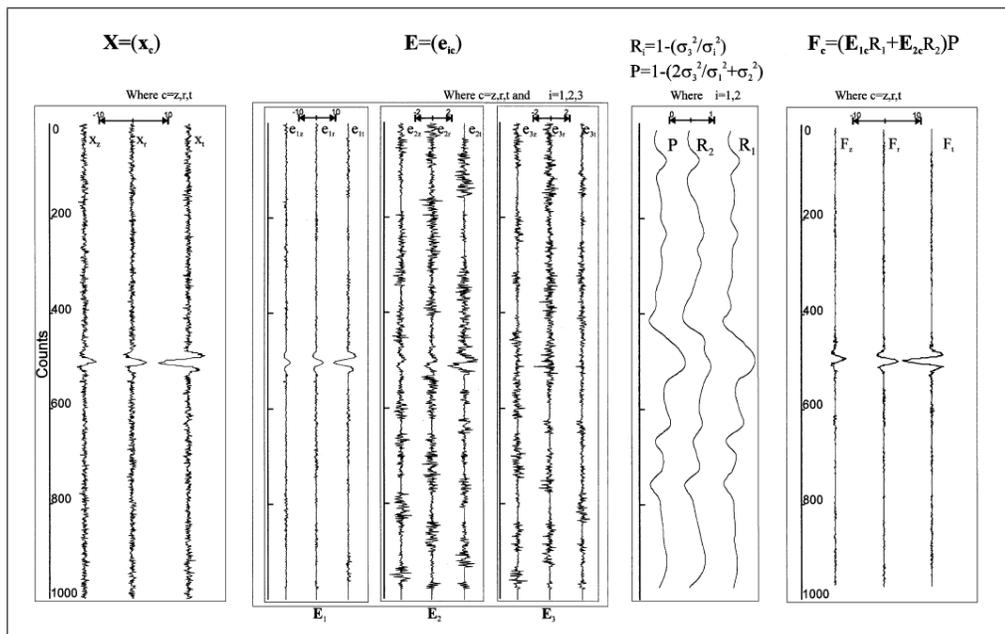


Figura 2.8: Algoritmo SVD. Tomado y modificado de Franco and Musacchio, 2001.

Capítulo III

METODOLOGÍA

3.1. Método

Mediante el filtro adaptativo los datos de entrada (componente triaxial), son descompuestos en bandas de frecuencias (*script 2*) y manipulados con un algoritmo que funciona con ventanas deslizantes (código SVD), luego el resultado se suma (con el *script 3*) para reconstruir los datos de salida (filtrados), los cuales son desplegados con el *script 4*. El *script 1*, permite obtener los espectros de potencia. El proceso se muestra en la figura 3.1.

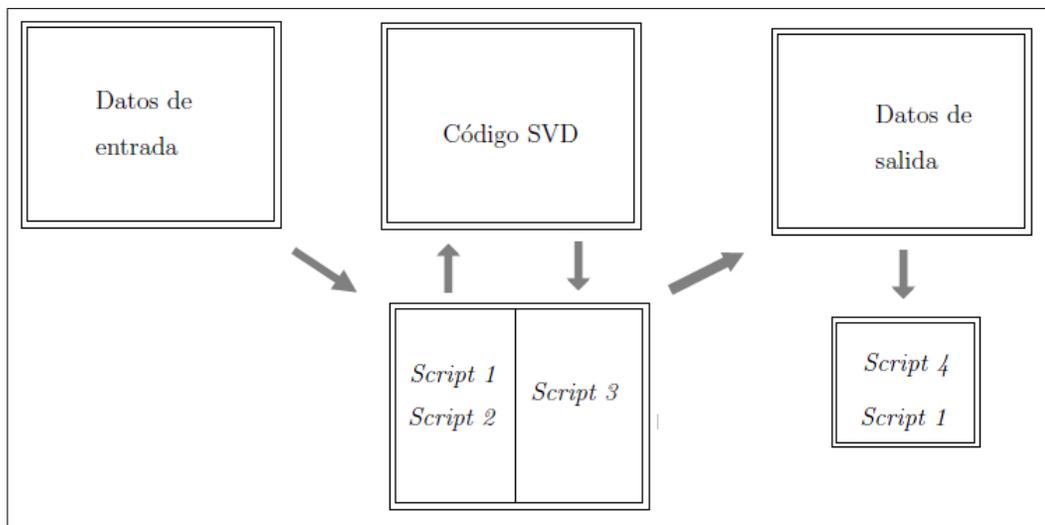


Figura 3.1: Esquema del funcionamiento del filtro SVD.

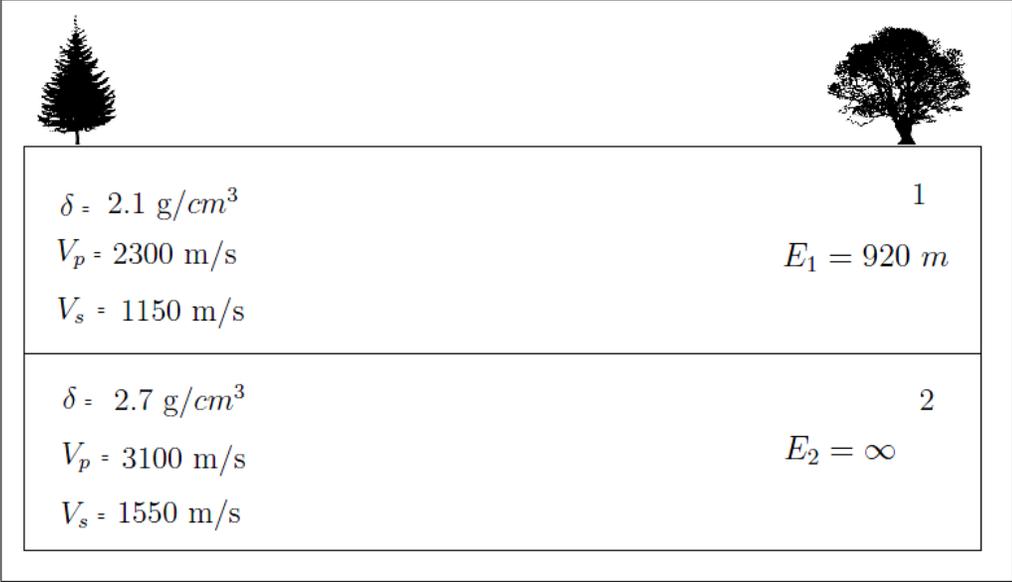
3.1.1. Datos de entrada

Para condicionar los datos de entrada (sintéticos y reales) al algoritmo de filtrado de MATLAB, se aplicaron los siguientes pasos:

Datos sintéticos:

1. Generación de datos multicomponente

Empleando un software de modelado sísmico por diferencia finita de octavo orden e3d_anel21, se generaron registros sísmicos de componente vertical, radial y transversal, simulando un disparo en el origen de una antena conformada por 40 estaciones receptoras espaciadas cada 20 m sobre un medio homogéneo e isotrópico con una interfase. Las características del medio se muestran en la figura 3.2.



$\delta = 2.1 \text{ g/cm}^3$ $V_p = 2300 \text{ m/s}$ $V_s = 1150 \text{ m/s}$	1 $E_1 = 920 \text{ m}$
$\delta = 2.7 \text{ g/cm}^3$ $V_p = 3100 \text{ m/s}$ $V_s = 1550 \text{ m/s}$	2 $E_2 = \infty$

Figura 3.2: Propiedades elásticas del medio.

Además se aplicó una ondícula fuente de tipo Ricker de 25 Hz, para un total de 900 muestras (ns) con un intervalo de muestreo (dt) de 2 ms .

2. Adición de ruido

Se agregó ruido aleatorio con una distribución gaussiana a los datos sintéticos, utilizando el programa *suaddnoise de SU*. Esta operación se ejecutó para toda la banda de frecuencia de los datos (4 a 250 Hz) y en frecuencias cercanas a la frecuencia dominante (20 Hz), estas frecuencias se muestran en el espectro de amplitud de la figura 3.3.

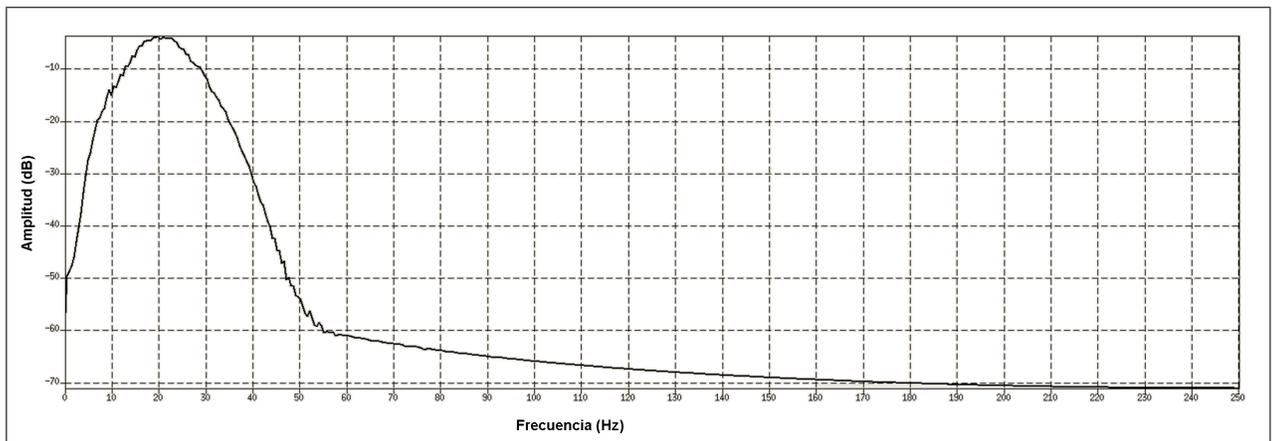


Figura 3.3: Espectro de potencia de registros sintéticos, obtenido con el script 1.

3. Transformación de formato de datos

Con la ayuda del programa *sustrip* de SU, los registros con extensión seismic unix (.su) se transformaron en archivos binarios (.bin).

Datos reales

1. Lectura de encabezados

A partir de los encabezados (headers), se extrajeron los parámetros principales de la sísmica, como el número de muestras (ns), el intervalo de muestreo (dt) y las distancias fuente - receptor (offset), empleando para ello el programa *surange* en SU. Éstos parámetros son necesarios para ejecutar los programas de SU.

2. Remuestreo

Los datos fueron remuestreados con un intervalo de muestreo de 4 ms, utilizando

ProMAX. Se aplicó un filtro antialias que cortó las componentes de frecuencia mayores a 125 Hz .

3. Transformación de formato de datos

Los registros con formato interno SEG-Y (.segy) se convirtieron en seismic unix (.su), aplicando la sentencia *segypread* de SU y luego a binarios (.bin) con la ayuda de *sustrip* de SU.

3.1.2. Codificación de guiones *bash* o *shell-scripts*

1. Guión de espectro de potencia (*Script 1*):

Para generar el espectro de potencia de los datos, se escribió un guión de *bash* que incluye principalmente el programa *sufft* de SU.

2. Guión de descomposición en bandas (*Script 2*):

Para la elección de las bandas apropiadas, fue necesario realizar un análisis de los espectros de potencia, se buscó que las bandas permitieran reconstruir los datos de entrada, al igual que lograran separar la señal y el ruido.

Para descomponer los datos sísmicos (sintéticos y reales), en bandas consecutivas de frecuencia, se escribió un guión *bash* cuyo núcleo principal es el programa *sufilter* de SU y se basa en la aplicación de filtros pasobanda.

3. Guión de reconstrucción de bandas (*Script 3*):

Para sumar los datos descompuestos tras el filtrado de polarización, se codificó un guión *bash* con el empleo del programa *sustack* de SU, el cual se basa en el principio de reconstrucción de señales mediante la suma de armónicos.

4. Guión de despliegue de registros (*Script 4*):

Para desplegar los registros sísmicos crudos, los parámetros de peso y los registros filtrados posteriormente, se utilizó un guión *bash* cuyos programas base fueron *suxwigb*, *xwigb* y *ximage* de SU.

Los códigos de los guiones, se muestran en el apéndice D, de la sección apéndices.

3.1.3. Codificación del filtro de polarización basado en la descomposición en valores singulares (SVD)

Con la herramienta de software MATLAB se codificó el método de filtrado adaptativo el cual consiste en el estudio de la polarización de los datos de tres componente, en los cuales primeramente se aplica el método numérico (SVD) para obtener los vectores ortonormales que indican direcciones principales de vibración de las partículas, las autoimágenes y los valores singulares, para luego con estos últimos estimar la rectilinealidad del movimiento sobre los vectores (factores R_1 y R_2) y la proyección del movimiento sobre un plano (factor P). La función de filtrado consiste en la multiplicación de las autoimágenes con los factores R_1, R_2 y P (el código se muestran en el apéndice E, de la sección apéndices), para esto se aplicaron los siguientes pasos:

1) Se generó una interfaz para pedir al usuario los parámetros de entrada para la aplicación del algoritmo matemático (la longitud de la ventana y el número de muestras en el registro sísmico).

```
##### Parámetros de entrada #####  
  
nt=input('Ingrese el número de "Muestras" en registro <==');  
  
w=input('Ingrese la longitud de la ventana deslizante de paso 1 ms <==');
```

2) Se programó una función que carga los archivos de datos sísmicos triaxiales al formato de matrices binarias (de dimensiones $m \times n$), donde m representa el número de muestras y n el número de trazas (con base en la ecuación 2.3) y luego se estableció una matriz que agrupa las tres matrices cargadas anteriormente.

```

##### Carga de Archivos #####
%path(path, '/geofsrv/datos15/ovallesaj/FILTROPOLAR_2012/filtropasobanda:') %%% Ruta de archivos de entrada %%%

fid1=fopen('VVJUN2001.bin','r+', 'l'); % Archivo binario little ending floating point

fid2=fopen('ILJUN2001.bin','r+', 'l');

fid3=fopen('XLJUN2001.bin','r+', 'l');

Z=fread(fid1,[nt,inf], 'float'); %%% Z: Componente vertical.
R=fread(fid2,[nt,inf], 'float'); %%% R: Componente radial.
T=fread(fid3,[nt,inf], 'float'); %%% T: Componente transversal.

tc=length(Z(1,:));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

##### Reagrupación de matrices #####
for i=1:tc
Y(:, :, i)=[Z(:, i), R(:, i), T(:, i)]; %%% La matriz Y representa la señal de entrada
end

```

3) Se calcularon algunos parámetros como el número de trazas en el registro, el límite inferior de la ventana sobre los datos, y el vector promedio de la ventana, el cual tiene una forma de trapecio con un paso de 1 ms .

```

##### trapecio promedio #####
K=w*ones(length(Z(:, 1)), 3);
K(1:w, 1)=linspace(1, w, w)';
K(1:w, 2)=linspace(1, w, w)';
K(1:w, 3)=linspace(1, w, w)';
K(wt+1:nt, 1)=linspace(w, 1, w)';
K(wt+1:nt, 2)=linspace(w, 1, w)';
K(wt+1:nt, 3)=linspace(w, 1, w)';

wt=nt-w; %%% Limite inferior de la ventana sobre los datos.

```

4) Se codificó una función para la agrupación respecto al número de traza de las matrices binarias, en matrices de dimensión $N \times 3$ (ecuación 2.4), en la cual la dimensión i corresponde al número de muestras en la ventana de tiempo a analizar y la dimensión j a las tres componentes de una estación receptora. La ventana en tiempo se desliza con un paso de 1 ms .

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Ventana deslizante en tiempo %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for k=1:tc;
    D=zeros(length(Z(:,1)),3);
    F=D;
    for i=1:wt;
        X=Y(i:w+i-1,:,k);
    end
end

```

5) Se aplicó la descomposición SVD a las matrices de dimensión $N \times 3$, con base en la ecuación 2.5, obteniéndose así los valores singulares σ_i para cada ventana deslizante.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Descomposición SVD %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

[U,S,V]=svd(X);

```

6) En base a los valores singulares se obtuvieron las direcciones principales de vibración de los datos de entrada en cada ventana de tiempo, determinándose las matrices de los parámetros de peso para el filtrado (las funciones rectilinealidad sobre el eje principal de polarización (ecuación 2.6), la rectilinealidad sobre el eje secundario (ecuación 2.7) y la planaridad (ecuación 2.8)).

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Parámetros de filtrado %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

s_1=S(1,1);
s_2=S(2,2);
s_3=S(3,3);

S1=(s_1)^2;
S2=(s_2)^2;
S3=(s_3)^2;

R1=(1-(((s_3)/(s_1))^2));
R2=(1-(((s_3)/(s_2))^2));
P=(1-(((s_3)^2)/(((s_1)^2)+((s_2)^2))));

if (s_1==0 & (s_2)==0;
    M_R1(i+w/2-1,k)=0;
    M_R2(i+w/2-1,k)=0;
    M_P(i+w/2-1,k)=0;

elseif (s_2==0 & (s_2)~0;
    M_R1(i+w/2-1,k)=R1;
    M_R2(i+w/2-1,k)=0;
    M_P(i+w/2-1,k)=P;

else
    M_R1(i+w/2-1,k)=R1;
    M_R2(i+w/2-1,k)=R2;
    M_P(i+w/2-1,k)=P;

end

```

7) Con la transformada Karhunen-Loeve de la ecuación 2.5 se determinaron las autoimágenes y se programaron dos matrices que agrupan respectivamente las primeras y segundas autoimágenes (autoimágenes provenientes de todos los segmentos de las ventanas), posteriormente, se sumaron los segmentos de las ventanas, promediándolos con el vector trapecio (de paso 1 ms y longitud semejante a la de la ventana), para finalmente obtener las primeras y segundas autoimágenes para cada componente.

```

s_mod=zeros(size(S));
s_mod(1,1)=S(1,1);

s_mod1=zeros(size(S));
s_mod1(2,2)=S(2,2);

autoimag1=U*s_mod*V';
autoimag2=U*s_mod1*V';

D(i:i+w-1,:)=D(i:i+w-1,:)+(autoimag1)*R1*P;
F(i:i+w-1,:)=F(i:i+w-1,:)+(autoimag2)*R2*P;

end

N=D./K;

Q=F./K;

V_1autoimg(:,k)=N(:,1);
Y_1autoimg(:,k)=N(:,2);
X_1autoimg(:,k)=N(:,3);

V_2autoimg(:,k)=Q(:,1);
Y_2autoimg(:,k)=Q(:,2);
X_2autoimg(:,k)=Q(:,3);

```

8) Habiendo determinado los parámetros de peso y las autoimágenes, se programó la función de filtrado (F) y se aplicó a los datos, siguiendo la ecuación 2.9, obteniéndose así los registros triaxiales filtrados.

```

##### Filtro #####
V_filt=((V_1autoimg.*M_R1)+(V_2autoimg.*M_R2)).*M_P;
Y_filt=((Y_1autoimg.*M_R1)+(Y_2autoimg.*M_R2)).*M_P;
X_filt=((X_1autoimg.*M_R1)+(X_2autoimg.*M_R2)).*M_P;

```

9) Se programó la salida de los archivos filtrados, los parámetros de peso y las autoimágenes, todos estos en el formato de matrices binarias “IEEE floating point with little-endian byte ordering”(bin).

```

##### Salida de archivos #####

fclose('all');

fid4= fopen('V_filt','w+', 'l');
fwrite(fid4,V_filt,'float32');

fid5= fopen('R_filt','w+', 'l');
fwrite(fid5,Y_filt,'float32');

fid6= fopen('T_filt','w+', 'l');
fwrite(fid6,X_filt,'float32');

fid7= fopen('R1','w+', 'l');
fwrite(fid7,M_R1,'float32');

fid8= fopen('R2','w+', 'l');
fwrite(fid8,M_R2,'float32');

fid9= fopen('P','w+', 'l');
fwrite(fid9,M_P,'float32');

fid10=fopen('VE1','w+', 'l');
fwrite(fid10,V_1autoimg,'float32');

fid11=fopen('VE2','w+', 'l');
fwrite(fid11,V_2autoimg,'float32');

fid12=fopen('RE1','w+', 'l');
fwrite(fid12,Y_1autoimg,'float32');

```

El esquema (figura 3.4) ilustra las operaciones dentro del código SVD: \mathbb{D} representa la matriz componente triaxial, formada por tres matrices (mxn), \mathbb{X} es la matriz señal (Nx3). Luego de aplicar la descomposición svd, se obtienen las autoimágenes \mathbb{E}_1 y \mathbb{E}_2 , seguidamente con los valores singulares se obtienen los factores de peso \mathbb{R}_1 , \mathbb{R}_2 , \mathbb{P} y se aplica la función de filtrado (F). Finalmente la sección filtrada \mathbb{X}^* se transforma en la matriz \mathbb{D}^* , la cual representa la componente triaxial filtrada.

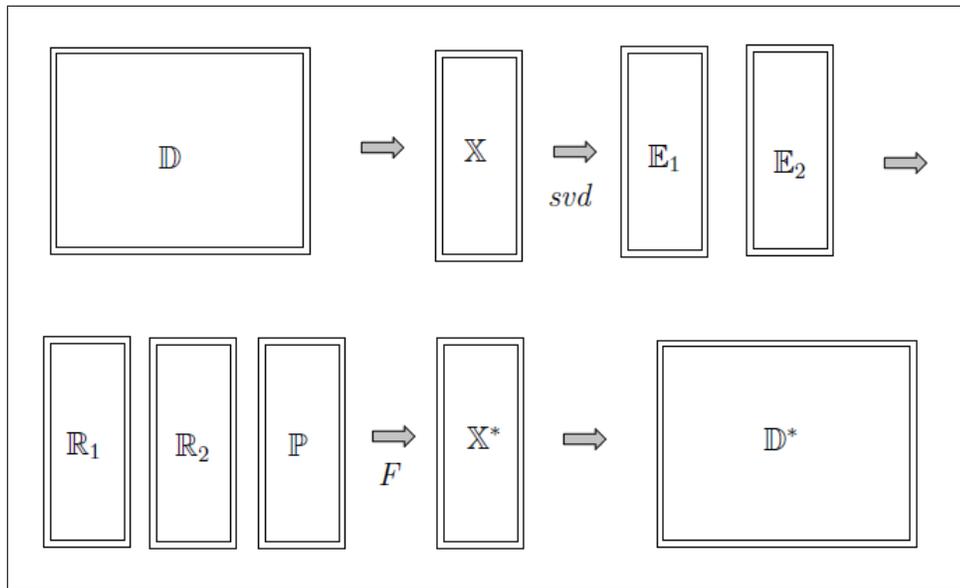


Figura 3.4: Esquema de los procesos dentro del algoritmo SVD.

3.1.4. Filtrado de polarización en bandas de frecuencia de los datos sintéticos

Los datos sintéticos se utilizaron para probar la rutina programada en MATLAB para la aplicación del filtrado de polarización.

Para la elección de la ventana deslizante se realizaron pruebas en longitudes de 20, 80 y 600 ms .

En esta etapa se utilizó el *script 2* (filtros pasabanda) para descomponer los datos en tres (3) bandas de frecuencias consecutivas, seguido del filtrado de los datos de cada banda (mediante el código SVD), para luego reconstruir la banda completa usando el *script 3* (reconstrucción de señales en el dominio del tiempo). La secuencia se describe en el esquema de la figura 3.5.

Las frecuencias fueron: 2,4,16,24 Hz para la banda 1; 16,20,32,44 Hz para la banda 2 y 32,38,225,250 Hz para la banda 3.

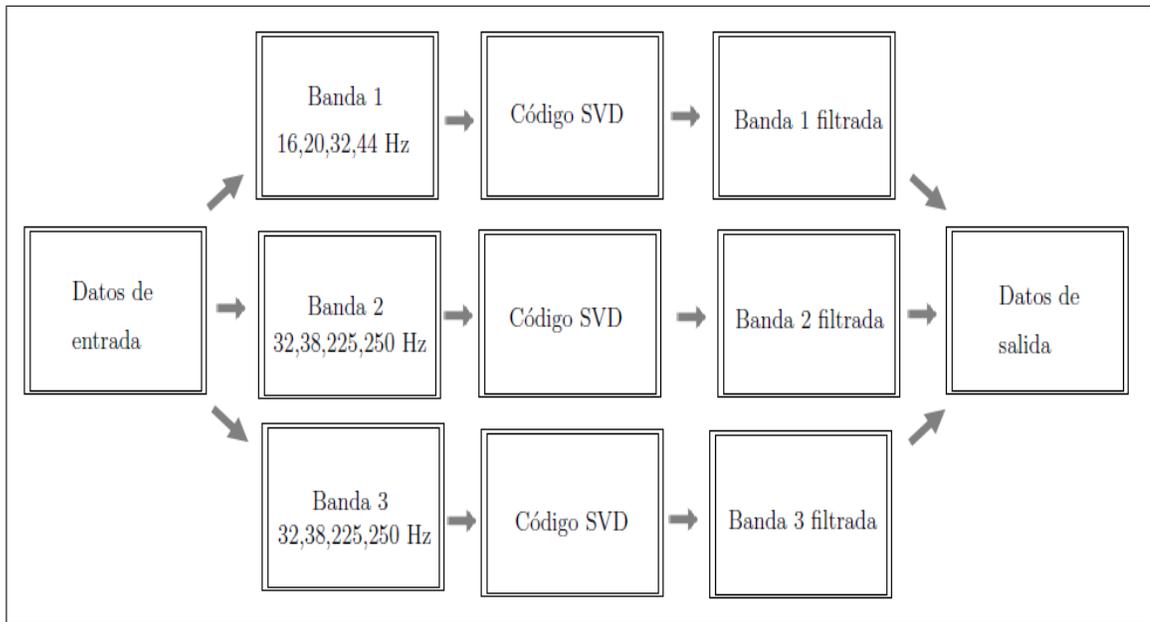


Figura 3.5: Procedimiento para registros sintéticos.

3.1.5. Filtrado de polarización en bandas de frecuencia de datos reales

Para los datos reales, se aplicó la secuencia ensayada con los datos sintéticos, también se utilizó el *script* 2 (solo que para dos (2) bandas de frecuencias consecutivas en este caso), para luego realizar el filtrado de los datos de cada banda y posteriormente lograr reconstruir la banda completa usando el *script* 3. El esquema de la figura 3.6, describe el proceso.

Las frecuencias fueron: 4,8,12,30 Hz para la banda 1 y 12,30,100,120 Hz para la banda 2.

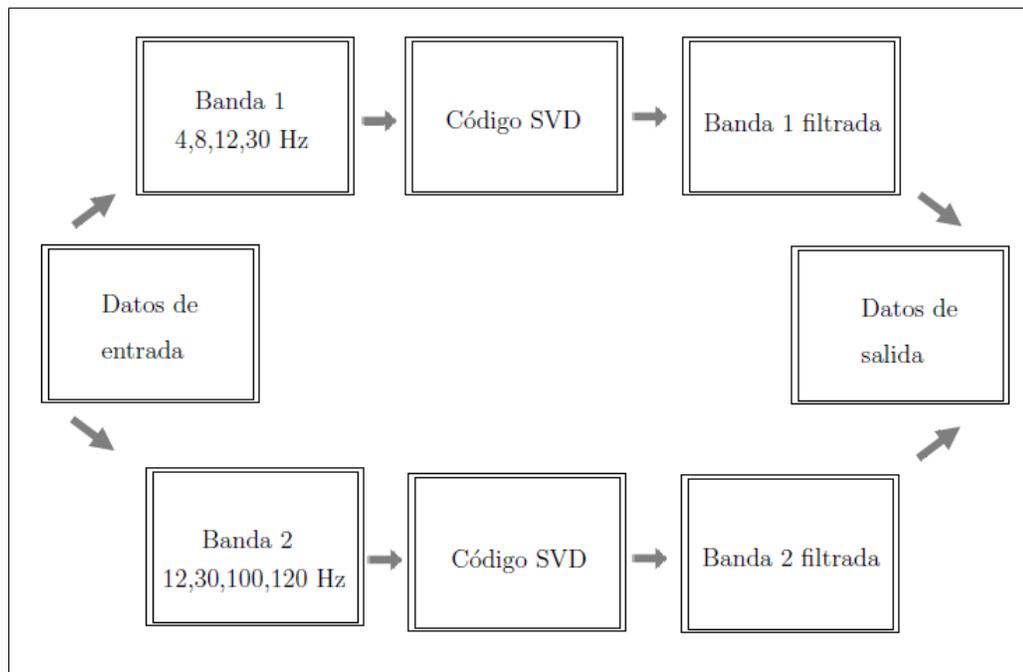


Figura 3.6: Procedimiento para registros reales.

3.1.6. Datos de salida

Debido a que los registros de salida del código SVD fueron de tipo binario (.bin), se convirtieron en seismic unix (.su), empleando el comando *suaddhead* de SU, para lo cual fueron necesarios los encabezados tratados con el programa *surange*.

Finalmente los resultados fueron desplegados aplicando el *script 4* y sus respectivos espectros de potencia con el *script 1*.

3.2. Herramientas

▷ BASH (Bourne Again Shell):

Un intérprete de comandos de Unix es tanto una interfaz de ejecución de órdenes y utilidades como un lenguaje de programación, que admite crear nuevas órdenes denominadas guiones (shellscripts). BASH es la evolución de BSH, con características de KSH y CSH, ya que es el intérprete de comandos más utilizado

en Linux e incluye un lenguaje completo para programación estructurada y gran variedad de funciones internas.

▷ **e3d.anel21:**

Es un modelador de datos sintéticos multicomponente, generado en PDVSA-INTEVEP.

▷ **L^AT_EX:**

Es un sistema de composición de textos, formado por un gran conjunto de macros de T_EX y orientado a la creación de documentos técnicos que contengan fórmulas matemáticas.

▷ **MATLAB (MATrix LABoratory):**

Es un entorno de programación para el desarrollo de algoritmos, análisis de datos, visualización y cálculo numérico.

▷ **ProMAX (Landmark Inc.):**

Es una herramienta para el procesamiento y análisis de datos sísmicos, de la corporación Landmark.

▷ **SU (Seismic Unix):**

Consiste en un paquete de utilidades sísmicas en código abierto, soportado por el “Center of Wave Phenomena” de la Escuela de Minas de Colorado.

Capítulo IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1. Registros sintéticos

En esta investigación, primero se utilizó un registro multicomponente sintético para probar el filtro, ya que en la simulación de datos multicomponente se tiene el control de los parámetros elásticos del subsuelo, al igual que de la geometría de la antena receptora. Los registros sintéticos de componentes vertical, radial y transversal (figura 4.1), simula un disparo con una configuración “off end - spread (disparo en el origen del tendido)”, para obtener un offset máximo de 800 m y una longitud del registro de 1.8 s . Los parámetros del registro se muestran en la tablas 4.1.

Cuadro 4.1: Parámetros del registro sintético

Trazas	Intervalo entre trazas	Muestras en tiempo	Intervalo de muestreo
41	20 m	900	2 ms

En la componente vertical (figura 4.1.a), se observan para offset mínimo, las primeras llegadas de energía sísmica en forma de ondas directas, para el mismo offset a los 0.8 s se observa la reflexión PP y a los 1.2 s aproximadamente para un offset de 380 m, aparece la reflexión PS. En la componente radial (figura 4.1.b) también se observan las ondas directas llegando a los 0.1 s para offset mínimo y la reflexión PS, a los 1.2 s para

un offset de 200 m aproximadamente. Al comparar ambas componentes se tiene que, la reflexión PP es registrada principalmente en la componente vertical, mientras que la reflexión PS en la componente radial y en la vertical, solo que presenta mucha menor amplitud en la componente vertical. Esto se debe a las características de propagación de las ondas PS, las cuales al no propagarse de manera vertical producen que los modos S tengan proyecciones en la componente vertical. Por otra parte, la onda directa presenta mayor amplitud en la componente radial que en la vertical, esto se puede asociar al hecho de que la onda directa (que es una onda P que se polariza en el plano vertical-radial) presenta una mayor componente horizontal que vertical, debido a que se propaga casi paralelamente a la superficie.

Debido a que el medio es homogéneo e isotrópico solo se generan las ondas que se polarizan en el plano vertical-radial, los modos que se polarizan perpendicular a este plano (onda SH) no se producen. Por ende, la componente transversal del registro presenta trazas sin información (figura 4.1.c).

En los registros sintéticos es posible controlar los niveles de ruido. En el caso del registro de la figura 4.2, se agregó ruido aleatorio con una distribución gaussiana a cada componente, en una banda de frecuencia de 4 hasta 250 Hz (abarcando toda la banda de frecuencia de los datos), para esto se trabajó con una relación señal ruido de 300. Al comparar traza por traza los registros de la figura 4.2 con los de la figura 4.1, se observa que los registros ruidosos de la figura 4.2 tienen una menor relación señal ruido, quedando enmascaradas las reflexiones.

Con estos registros se realizaron pruebas para determinar las condiciones del filtro que mejor remueven el ruido con polarización no lineal mientras preservan la señal polarizada linealmente; los parámetros principales son, la banda de frecuencia a la cual se aplica el algoritmo y la ventana deslizante. La longitud de la ventana controla la cantidad de energía que es analizada, ésta longitud depende del ciclo que exhibe la señal polarizada linealmente. En la figura 4.3 se muestra una prueba del factor planaridad para diferentes longitudes de la ventana, y se tiene que a mayor longitud hay mayor pérdida de información, esto se observa en los extremos de la figura 4.3.c, los cuales

son valores promedio (asociados al punto medio de cada ventana deslizante). Entre las ventanas de 40 ms (figura 4.3.a) y 160 ms (figura 4.3.b), la de mayor longitud permite identificar de manera mas apropiada los eventos con polarización lineal. La ventana de 1200 ms, analiza diferentes tipos de llegadas de ondas, por lo que no es posible diferenciar la polarización de los eventos. En cuanto a las bandas de frecuencias a las que se aplica el filtro, se tiene que estas deben abarcar todo el contenido de frecuencia de los registros (4 a 250 Hz), para lograr separar la señal del ruido. La banda 1 consiste de las frecuencias 2,4,16 y 24 Hz, la banda 2 de las frecuencias 16,20,32 y 44 Hz y la banda 3 de las frecuencias 32,38,225 y 250 Hz. Diferentes niveles de energía sísmica se distribuyen en estas bandas, de manera que la banda 2 (figura 5.6) presenta la señal con mayor energía (la frecuencia dominante en los registros es de 20 Hz como se observa en el espectro de la figura 3.3), seguida por la banda 1 (figura 5.1) y luego por la banda 3 (figura 5.11); banda en la cual se encuentra el ruido aleatorio.

4.1.1. Aplicación del filtro

Luego de tener preparados los datos de entrada (registros ruidosos separados en bandas de frecuencia), se procedió a aplicar la técnica de filtrado adaptativo, el cual consiste en la suma de las dos primeras autoimágenes de la matriz SVD de los datos, ponderada por la rectilinealidad y la planaridad. La matriz de entrada por componente fue de dimensión 900 x 41, correspondiente a 41 trazas por 900 muestras en tiempo. Al aplicar la ventana deslizante (80 muestras con un dt de 2 ms), la matriz obtuvo una dimensión de 80 x 3, que expresa la longitud (en muestras) de la ventana para cada traza en cada componente. El resultado de aplicar la descomposición SVD, fue una matriz U de dimensión 80 x 80, una matriz Σ de dimensión 80 x 3 y una matriz V de dimensión 3 x 3. Con estos elementos, se calcularon las autoimágenes según la ecuación 2.5 y luego los factores de filtrado (rectilinealidad y planaridad, ecuaciones 2.6, 2.7 y 2.8). Posteriormente la ventana se desplazó 1 ms en tiempo y se realizaron las mismas operaciones, hasta abarcar todas las muestras en el registro (900), es decir 820 desplazamientos de

la ventana.

En este algoritmo se supone que la vibración de las partículas es 2D, por lo tanto se emplean los dos primeros valores singulares (σ_1 y σ_2) y σ_3 se considera ruido polarizado aleatoriamente. Las relaciones de magnitud de estos valores singulares indican la cantidad de energía que se proyecta sobre los ejes que permiten estimar la polarización (V_1 y V_2) y se ven reflejadas en las autoimágenes.

En las componentes de la banda 1 (figura 5.1) se observa que la mayor cantidad de energía está contenida en la primera autoimagen (figura 5.2) en comparación con la segunda autoimagen (figura 5.3), la cual muestra cualitativamente muy bajos niveles de energía sísmica, esto se debe a que el sismograma en esta banda está conformado casi en su totalidad por eventos polarizados linealmente sobre el primer eje del hiperelipse ($\sigma_1 \gg \sigma_2$). La misma relación de las autoimágenes de la banda 1 ocurre para las componentes de la banda 2 (figuras 5.7 y 5.8). Diferente a éstas, la banda 3 (figura 5.11) está conformada por ruido aleatorio, por lo cual la primera y segunda autoimagen (figuras 5.12 y 5.13) presentan energía sísmica cualitativamente similar ($\sigma_1 \approx \sigma_2$). A su vez, las relaciones de las magnitudes de los valores singulares también se ven reflejadas en los factores que dependen directamente de la intensidad de la energía (rectilinealidad y planaridad). La rectilinealidad mide el grado de polarización lineal de los sismogramas de componente triaxial, R_1 se refiere a la rectilinealidad sobre el eje principal del hiperelipse de polarización y R_2 a esta propiedad sobre el eje secundario. El valor máximo de rectilinealidad es 1 (polarización lineal máxima), en el caso de R_1 el valor singular $\sigma_1 \gg \sigma_3$ para que la relación $\left(\frac{\sigma_3^2}{\sigma_1^2}\right) \approx 0$ y $R_1 = 1$, este valor se asocia a los modos de ondas P y S. Para la banda 1, en la figura 5.4.a, los valores máximos de rectilinealidad (en color azul) están asociados a las ondas directas, a la reflexión PP y a la reflexión PS. Los valores mínimos (color rojo) representan eventos con baja o inexistente polarización lineal. Esta propiedad evidencia la predominancia de eventos polarizados linealmente. Para R_2 $\sigma_2 \gg \sigma_3$ tal que la relación $\left(\frac{\sigma_3^2}{\sigma_2^2}\right) \approx 0$ y $R_2=1$, en la figura 5.4.b los valores máximos de rectilinealidad (en color azul) están asociados a las ondas directas (componente radial) y a la reflexión PS, los menores valores (color rojo) evidencia la ausencia

de polarización lineal sobre el segundo eje del hiperelipse. La R_1 de la banda 1, presenta un comportamiento similar a la R_1 (figura 5.9.A) de la banda 2 (predominancia de eventos lineales con $\sigma_1 \gg \sigma_2$), igualmente para los R_2 de ambas bandas se observa la energía asociada a las ondas directas y a la reflexión PS (figura 5.9.B y figura 5.4.B). Por otra parte, para la banda 3, R_1 y R_2 (figuras 5.14.A y 5.9.B) evidencian la predominancia de eventos con polarización no lineal ($\sigma_1 \approx \sigma_2$), que corresponden al ruido aleatorio en color rojo.

La planaridad registra el grado de polarización de una señal triaxial en un plano, por lo cual P para la banda 1 (figura 5.4.c) y para la banda 2 (figura 5.9.c) $\sigma_1 \gg \sigma_2$, evidencia la energía de las ondas directas, la reflexión PP y la reflexión PS, ya que para estos modos de onda el movimiento de las partículas está confinado al plano vertical-radial. Generando que la tendencia de la respuesta de P coincida con la del parámetro R_1 , los valores de ambos factores oscilan entre 1 y 0.44 . Para la banda 3, se evidencia el predominio de eventos con polarización no lineal (figura 5.14.c).

Con las autoimágenes y los parámetros de peso se aplicó el algoritmo de filtrado a cada una de las bandas por separado, los sismogramas se muestran en las figuras 5.5 para la banda 1, 5.10 para la banda 2 y 5.15 para la banda 3. En general en estos sismogramas, se observa como el filtro preserva la señal polarizada linealmente (ondas directas y los modos de cuerpo PP y PS) en las bandas 1 y 2, mientras remueve el ruido con polarización no lineal en la banda 3. Posteriormente, las bandas de frecuencia de los registros filtrados se apilan para generar el registro filtrado final (figura 4.4). Luego de reconstruir estas señales se observa como se mantienen las amplitudes relativas dentro del sismograma. En este resultado, se aprecia cualitativamente una mejoría de la relación señal ruido en comparación con el registro con ruido de la figura 4.2.

El mismo procedimiento de filtrado aplicado a las bandas se efectuó sobre los sismogramas en la banda completa, el resultado se aprecia en la figura 4.5. Al comparar este sismograma con el de la figura 4.4 (filtrado en bandas), se observa la pérdida de amplitud de las señales de interés polarizadas linealmente, ésta pérdida se evidencia en el reflector PP de la componente vertical (figura 4.5.a) y en el reflector PS de la compo-

nente radial (figura 4.5.b); el éxito del filtrado en bandas se debe a la eficaz separación de la señal del ruido. Otro experimento se realizó con los datos sintéticos, se agregó ruido aleatorio con distribución gaussiana en una banda con frecuencia central igual a 20 Hz y con un relación señal ruido de 300. Debido a que la frecuencia dominante es 20 Hz, el filtro no removió el ruido agregado, es decir cuando la señal y el ruido se encuentran en resonancia el filtro no es efectivo, como se evidencia en la figura 5.16. En los espectros de amplitud se observa la señal con una frecuencia dominante de 20 Hz y el espectro plano del ruido blanco, disminuido en 20 dB aproximadamente luego del filtrado (figura 4.6, a y b).

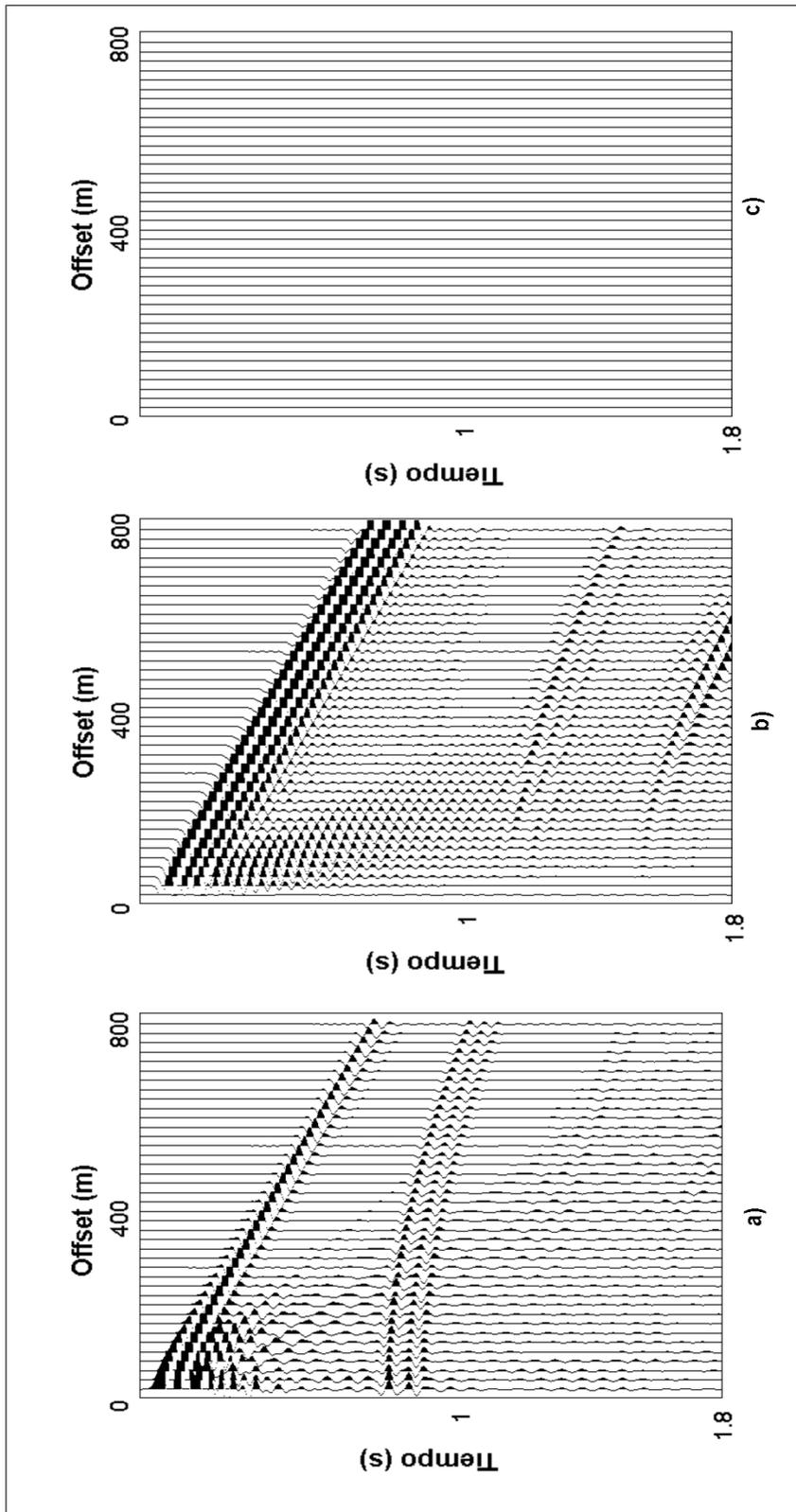


Figura 4.1: Registros sintéticos originales, componentes a) vertical b) radial c) transversal.

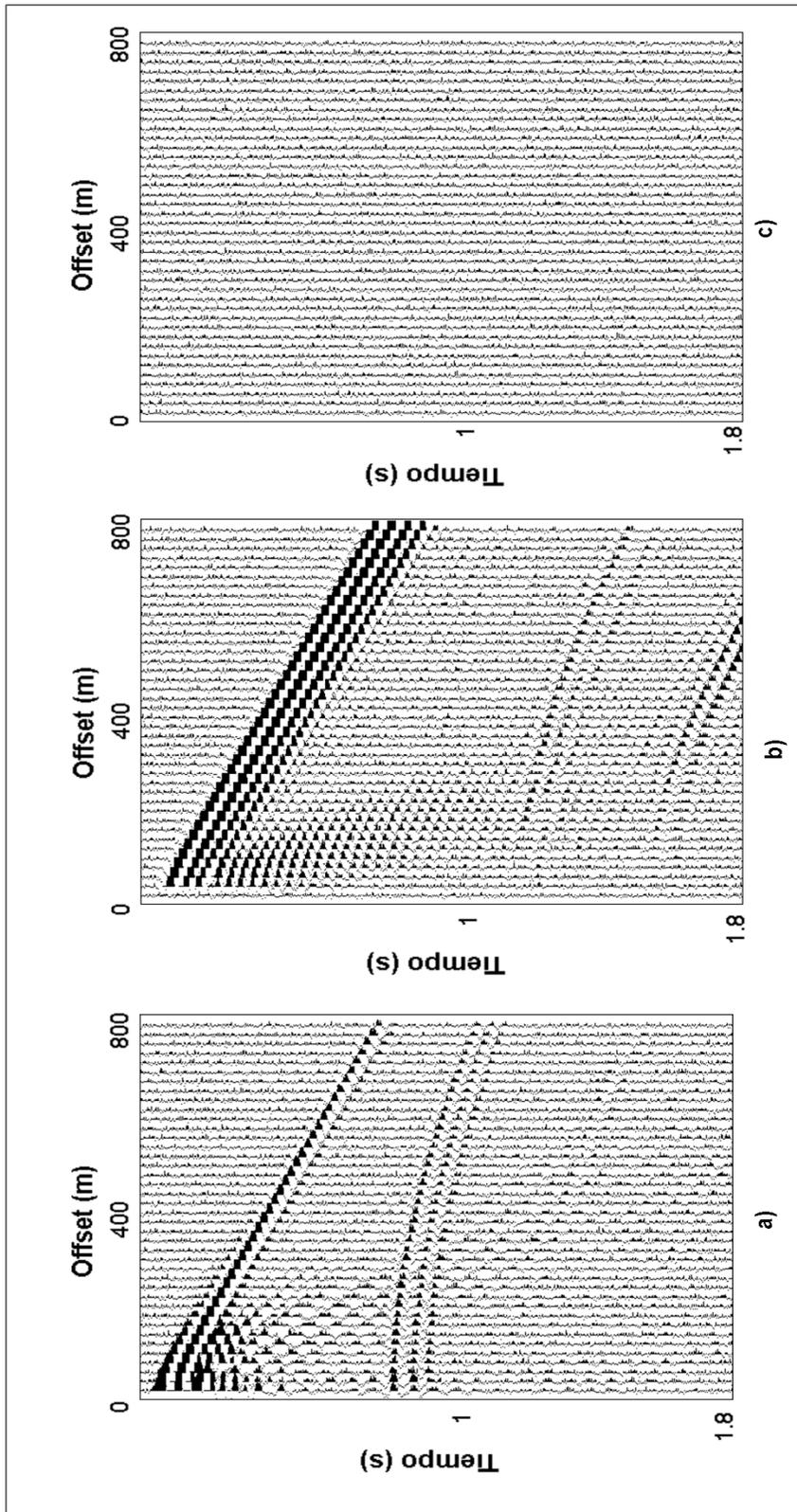


Figura 4.2: Registros sintéticos con ruido gaussiano, componentes a) vertical b) radial c) transversal.

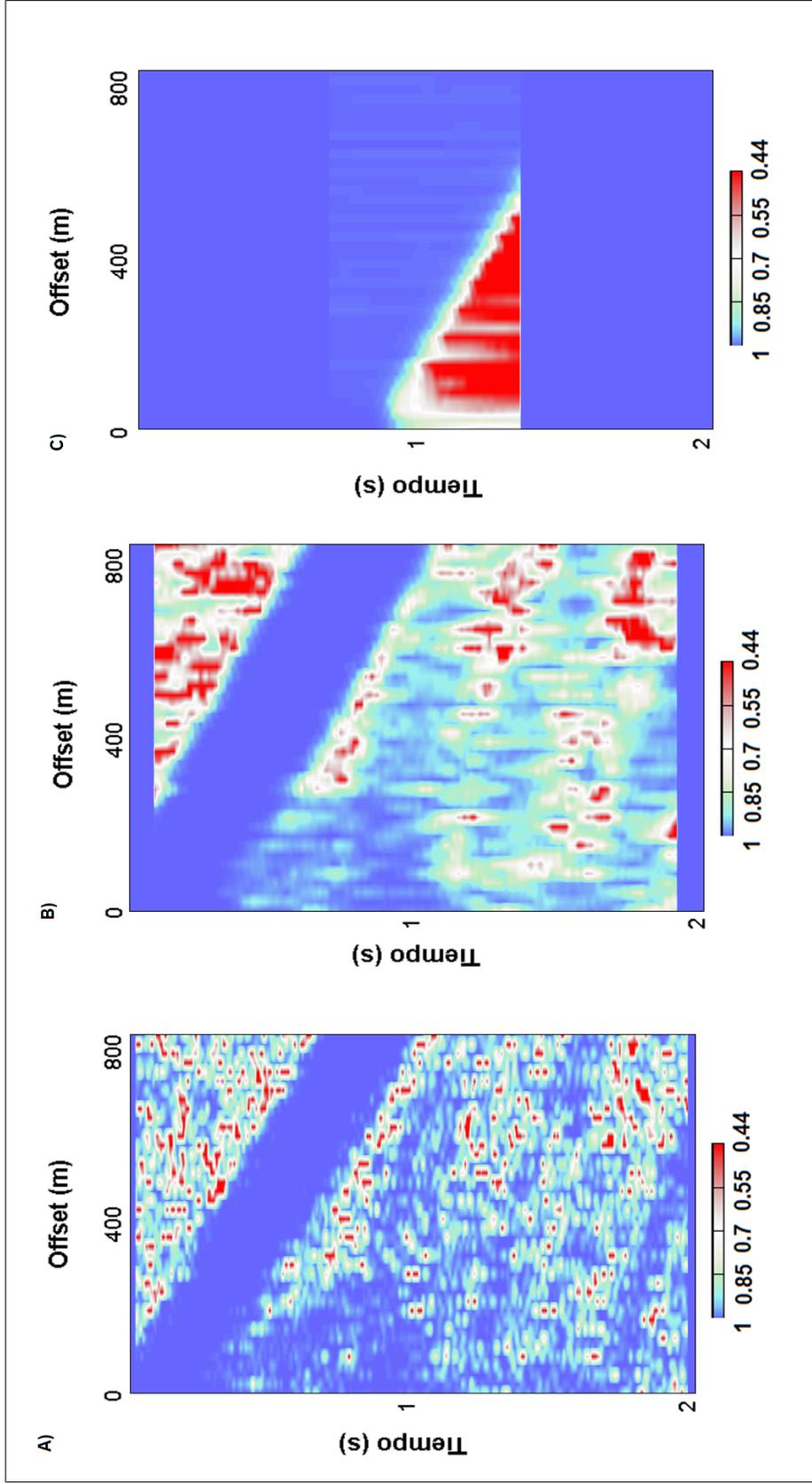


Figura 4.3: Estimación de la planaridad con las ventanas, con longitud A) 40 ms B) 160 ms C) 1200 ms .

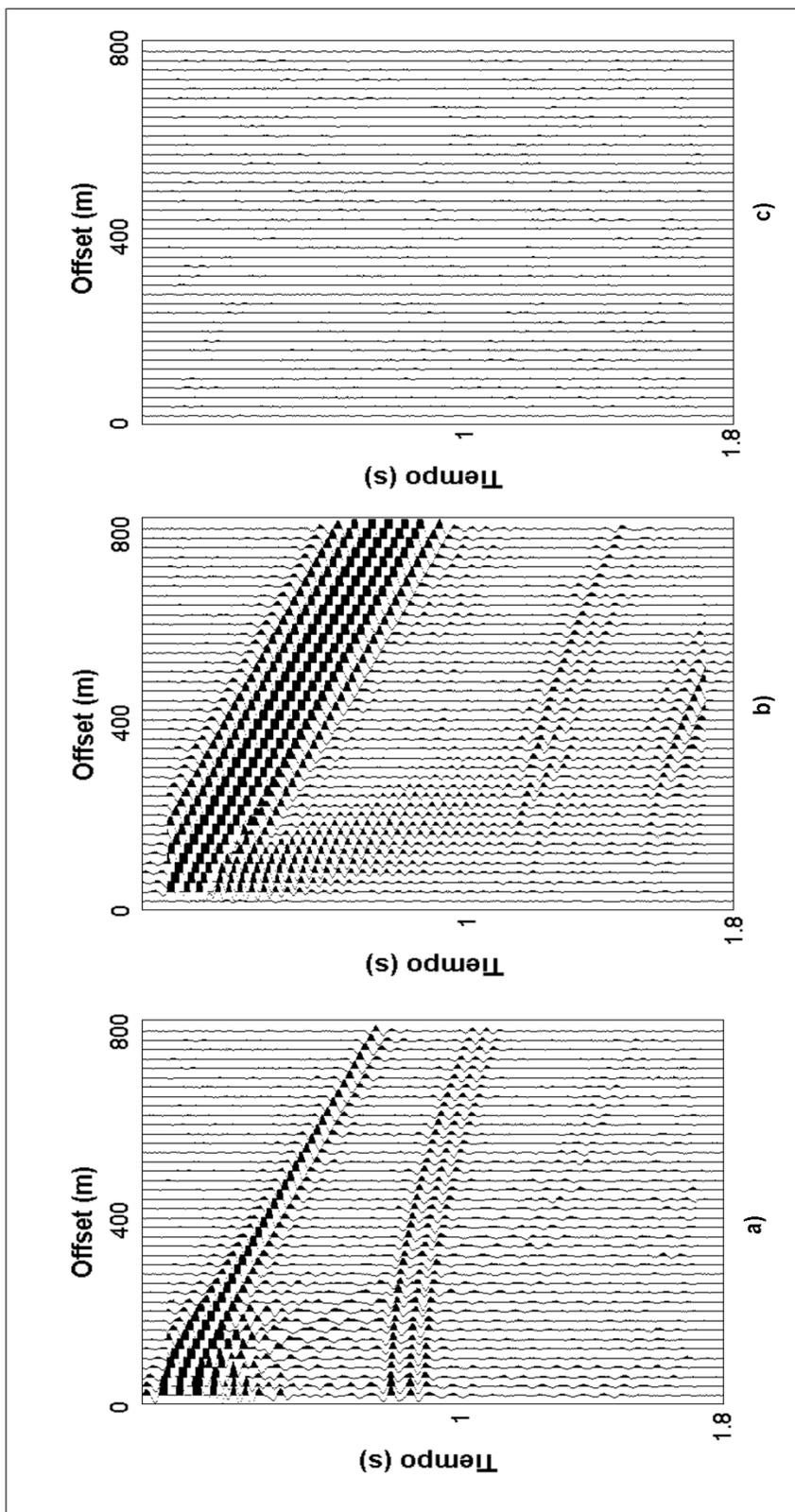


Figura 4.4: Registros sintéticos filtrados en bandas, componentes a) vertical b) radial c) transversal.

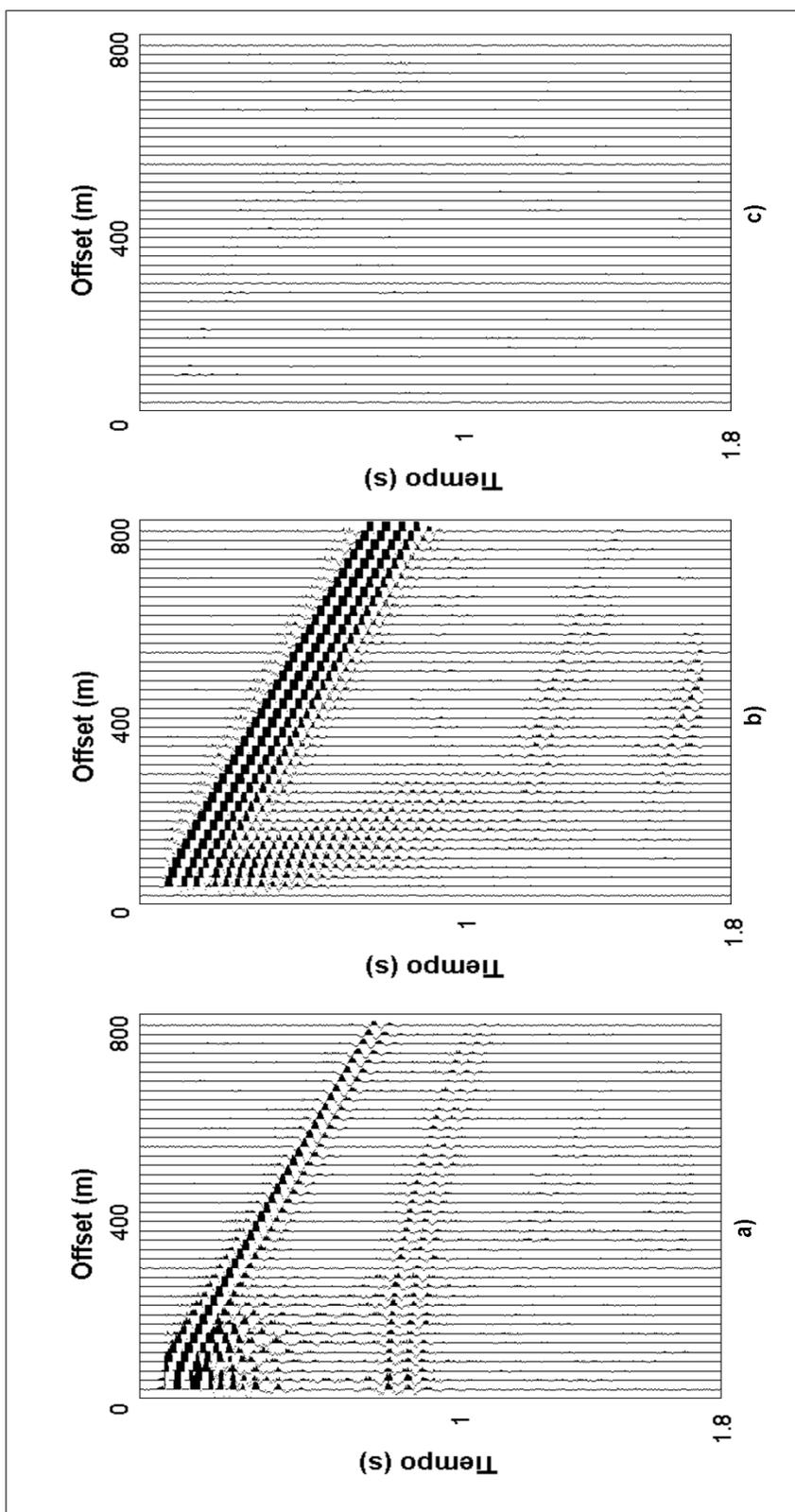
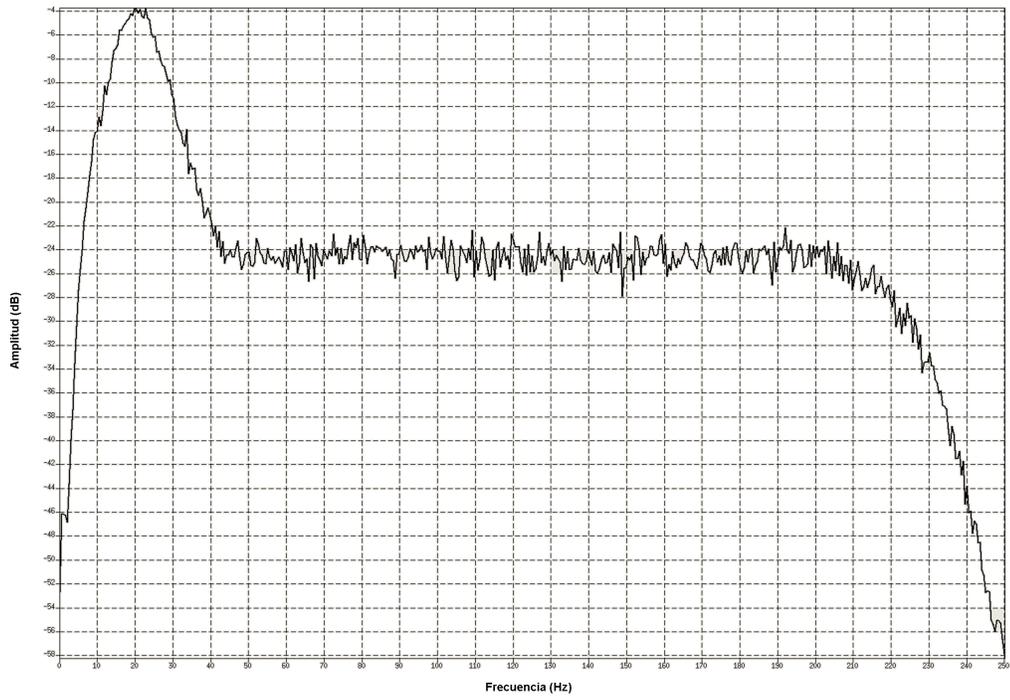
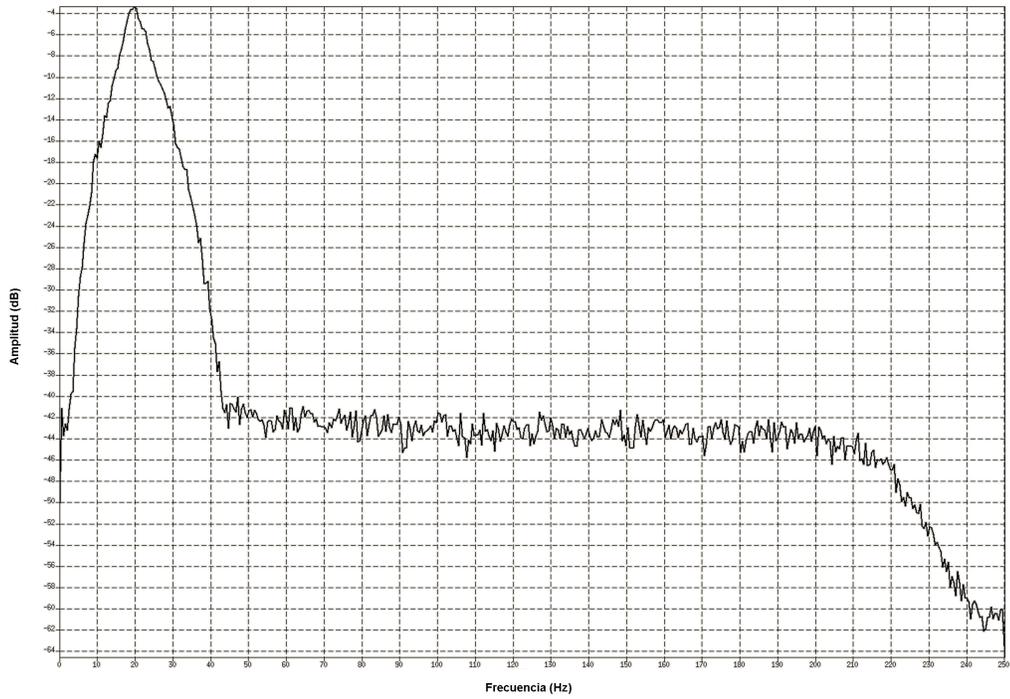


Figura 4.5: Registros sintéticos filtrados con la banda completa, componentes a) vertical b) radial c) transversal.



(a) Registro con ruido



(b) Registro filtrado

Figura 4.6: Espectro de amplitud de los registros sintéticos

4.2. Registros reales

Los datos reales fueron usados para probar el filtro de polarización. Consisten en un registro 3D-3C del bloque Junín de la Faja Petrolífera del Orinoco y adicionalmente, en un registro 3D-3C de Barinas, ambos registros multicomponente terrestres. Los datos de Junín se encuentran en una banda de frecuencia más amplia.

4.2.1. Datos del bloque Junín

La línea 3D-3C del Bloque Junín, fue adquirida con acelerómetros DSU-3 con una fuente de dinamita, permitiendo la recuperación de las componentes de alta frecuencia (80 Hz aproximadamente), por lo tanto el contenido de frecuencia se encuentra en un amplio rango. El registro presenta una configuración “off end - spread (disparo en el origen del tendido)”, con un offset de 5000 m y una longitud del registro de 4 s . Los parámetros del registro se muestran en la tabla 4.2

Cuadro 4.2: Parámetros del registro del bloque Junín

Trazas	Intervalo entre trazas	Muestras en tiempo	Intervalo de muestreo
401	12,5 m	1000	4 ms

La amplitud en el registro supone ser una medida de la magnitud del desplazamiento de las partículas en la dirección del vector velocidad de las mismas para cuando llega cada onda. En la figura 4.7 se observa la componente vertical, las componente horizontales se muestran en las figuras 4.8 (componente radial) y 4.9 (componente transversal). La componente vertical exhibe mayor amplitud, seguida por la componente radial y luego por la componente transversal. Las tres componentes evidencian energía sísmica en forma de ondas directas, ondas de aire, ondas de refracción crítica, ondas superficiales del *groundroll* y las reflexiones PP y PS, solo que en la componente vertical aparecen ondas de refracción profunda (posiblemente en el basamento). El ancho de banda en

este registro es de 2 a 125 Hz; para estos datos se trabajó con dos bandas de frecuencia, la banda 1 de 4, 8, 12 y 30 Hz y la banda 2 de frecuencias 12, 30, 100 y 120 Hz . Para el análisis de polarización se aplicó una ventana de 20 muestras (80 ms).

4.2.2. Aplicación del filtro

La herramienta se aplicó a los datos sin ningún procedimiento efectuado previamente. Los datos de entrada por componente, fueron representados en una matriz de dimensión 1000 x 401, cuyas dimensiones representan 401 trazas con 1000 muestras en tiempo. Luego de aplicar la ventana deslizante, se obtuvo una matriz de dimensión 20 x 3, la cual indica la longitud de la ventana (en muestras) para cada traza en cada componente. Con la aplicación de la descomposición SVD, se generaron una matriz U de dimensión 20 x 20, una matriz Σ de dimensión 20 x 3 y una matriz V de dimensión 3 x 3. Con estos elementos se obtuvieron las autoimágenes y los factores de peso (rectilinealidad y planaridad). Posteriormente la ventana se desplazó 1 ms en tiempo y se realizaron los mismos procedimientos (descomposición SVD) hasta abarcar las 1000 muestras en el registro, es decir 800 corridas de la ventana.

En la banda 1 la energía sísmica que predomina está asociada al *ground roll*, mientras que en la banda 2, se evidencian los eventos sísmicos de fondo. Para la banda 1 (figura 5.17) la autoimagen 1 (figura 5.18) presenta cualitativamente mayor energía que la autoimagen 2 (figura 5.19). Las autoimágenes permiten reconstruir la señal del sismograma efectivamente. En cuanto a los parámetros de peso, P presenta la misma respuesta que R_1 , ya que el movimiento de la partículas en las ondas con polarización lineal esta confinado al plano vertical-radial, los valores de estos factores se encuentran entre 0.99 y 0.71, para la banda 1. En general R_1 evidencia la polarización lineal de las ondas directas, de las refracciones profundas y las reflexiones, pero no muestra los eventos con polarización no lineal dentro del *ground roll* (figuras 5.20 y 5.27).

El hodograma consiste en gráficos que muestran la trayectoria de movimiento de las partícula para el tiempo en el que llega cada modo de onda, se representan para el

plano XZ formado por una traza de la componente vertical y la misma traza correspondiente a la componente radial y también para los planos YZ y XY. En el hodograma de la figura 4.10 se muestran para la segunda traza en el plano XZ, las polarizaciones (lineal y elíptica) en la zona del *ground roll* del registro y se tiene que a medida que aumenta la longitud de la ventana, se despliegan mayor número de polarizaciones asociadas a los modos de onda que llegan, por lo cual en el hodograma en la ventana de 2 a 2.6 s (figura 4.10.B) se observan más trayectorias del movimiento de las partículas, que en el hodograma de la ventana 2 a 2,32 s (figura 4.10.A).

En la figura 4.11 se muestra la componente vertical del registro crudo y del registro tras el filtrado en bandas de frecuencia. La figura 4.12 representa el hodograma antes y después del filtrado, en la ventana entre 2 y 2,32 s (4.12.A) y en la ventana de 2 a 2,6 s (4.12.B). Se observa como luego del filtrado (color rojo) se disminuyen las polarizaciones no lineales asociadas a las ondas superficiales mientras se resaltan las polarizaciones lineales asociadas a las ondas P y S. En la figura 4.13 se observa la misma componente antes y después del filtrado en la banda completa. La figura 4.14 es producto de restar el registro filtrado en bandas al registro crudo (figura 4.14.a) y la figura 4.14.b de restar el registro filtrado en la banda completa al registro crudo. En esta imagen se observa como el experimento en bandas parece remover mayor contenido de ruido de fondo que el procedimiento aplicado a la banda completa. En general, el filtro removi6 parcialmente el ruido de las ondas superficiales y se preservaron los eventos polarizados linealmente. En las figuras 5.20 y 5.27, se muestra la rectilinealidad sobre el primer eje para ambas bandas en estudio respectivamente.

En los espectros de amplitud de la figura 4.15 se aprecia la atenuaci6n de las frecuencias entre 2 y 10 Hz (se disminuy6 el *groundroll* en aproximadamente 10 dB) y tambi6n de frecuencias entre 100 y 125 Hz asociadas al ruido aleatorio.

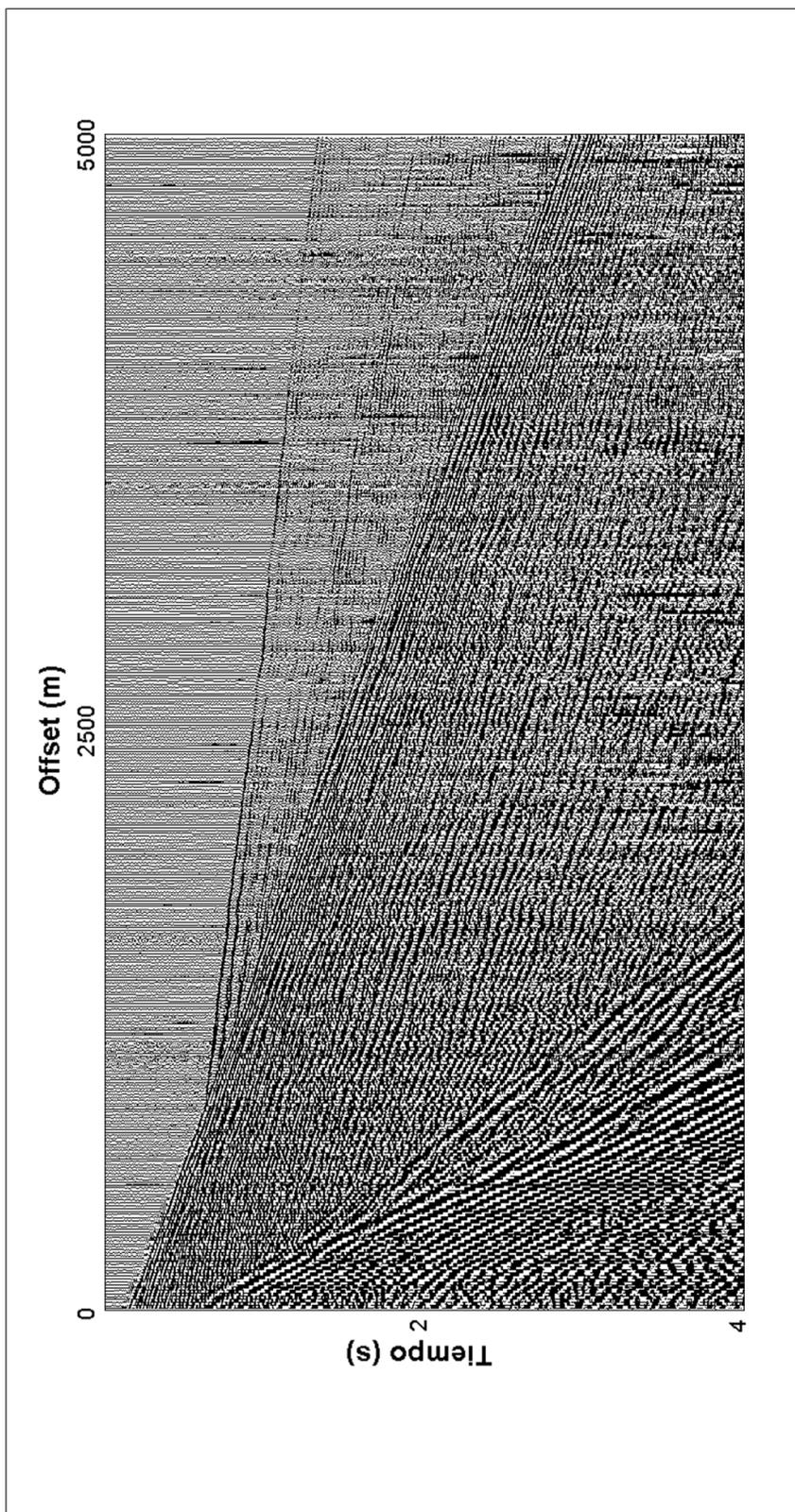


Figura 4.7: Componente vertical de los datos sísmicos del bloque Junín

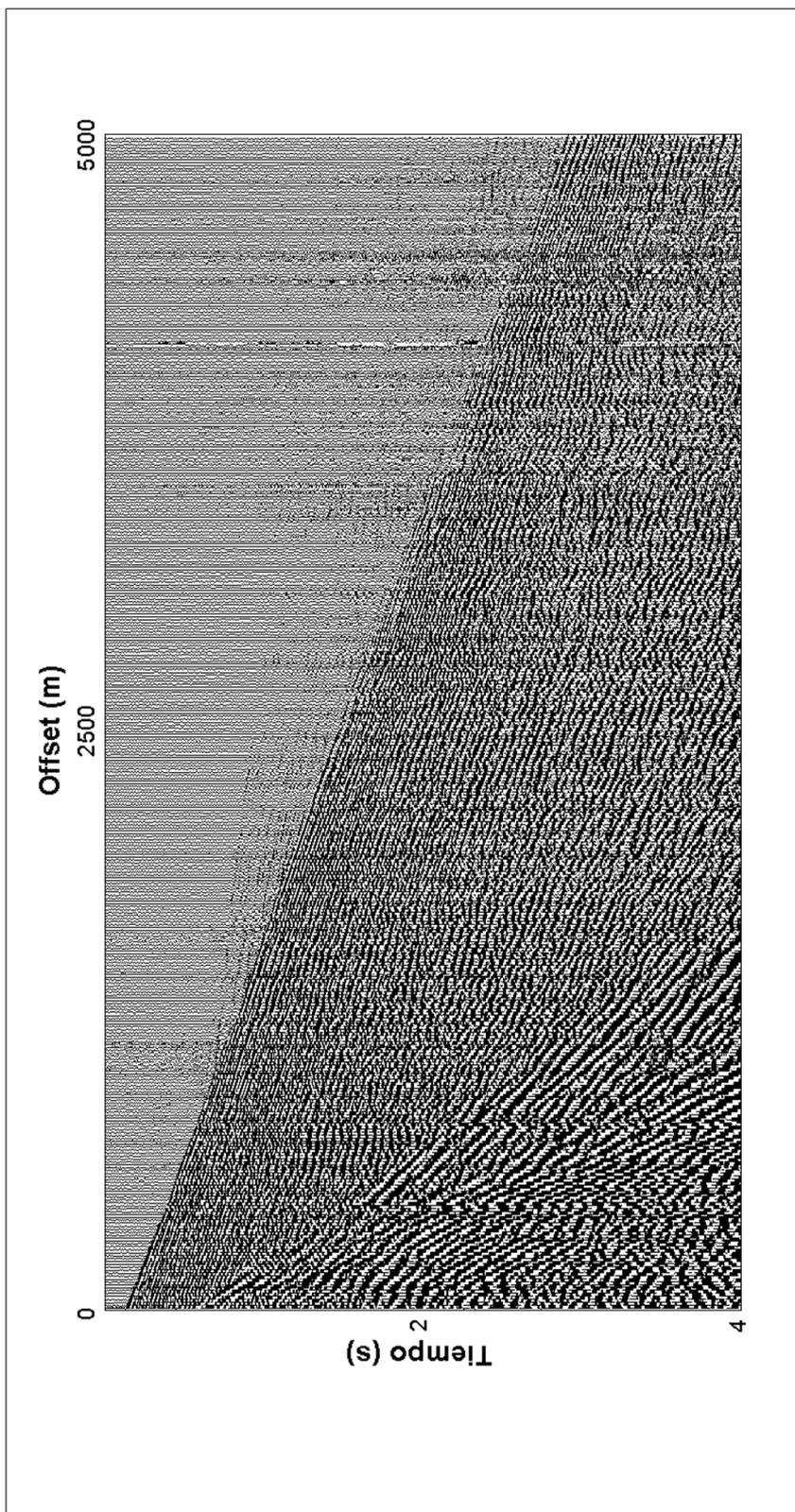


Figura 4.8: Componente radia de los datos sísmicos del bloque Junín

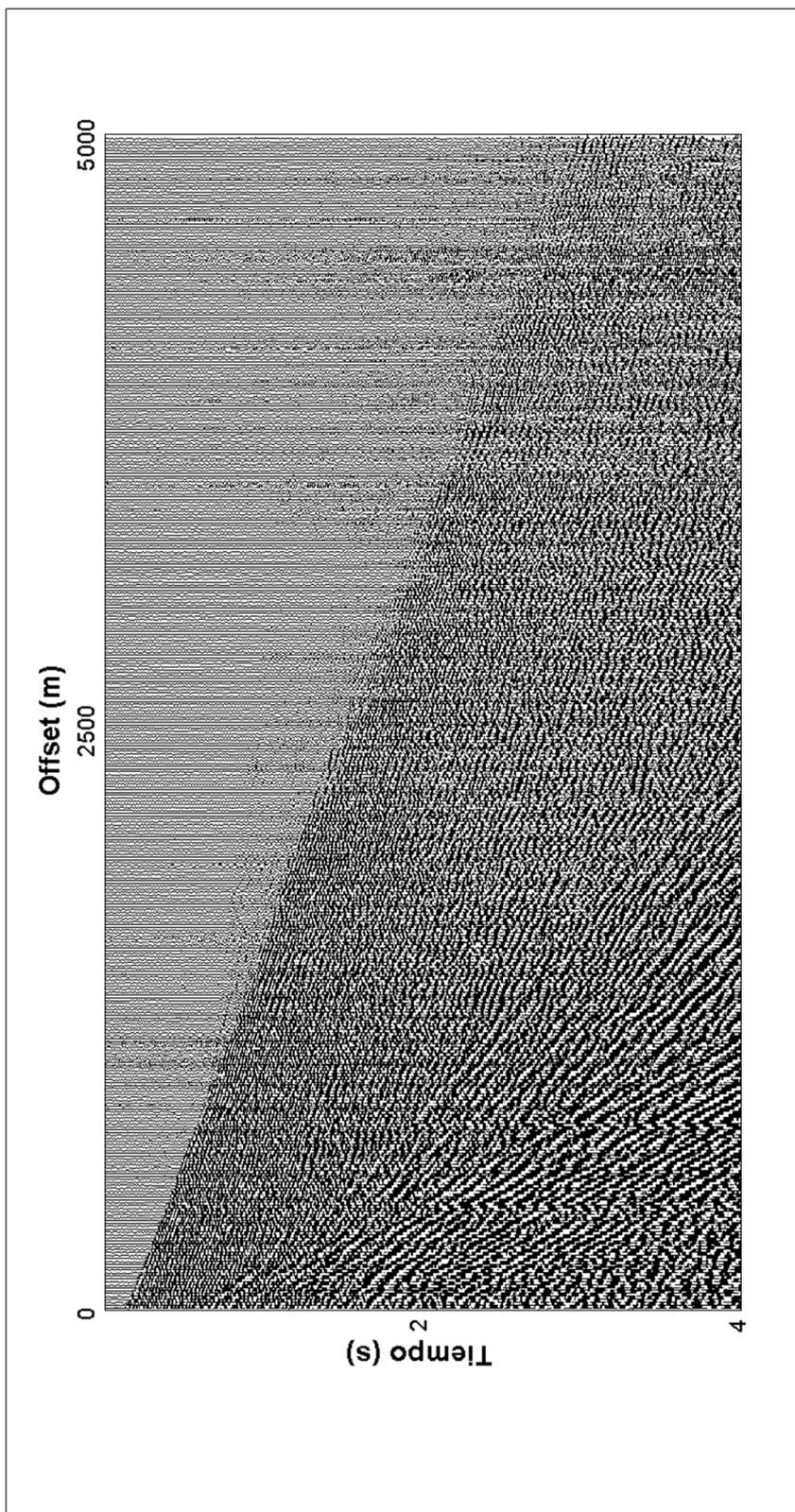


Figura 4.9: Componente transversa de los datos sísmicos del bloque Junín

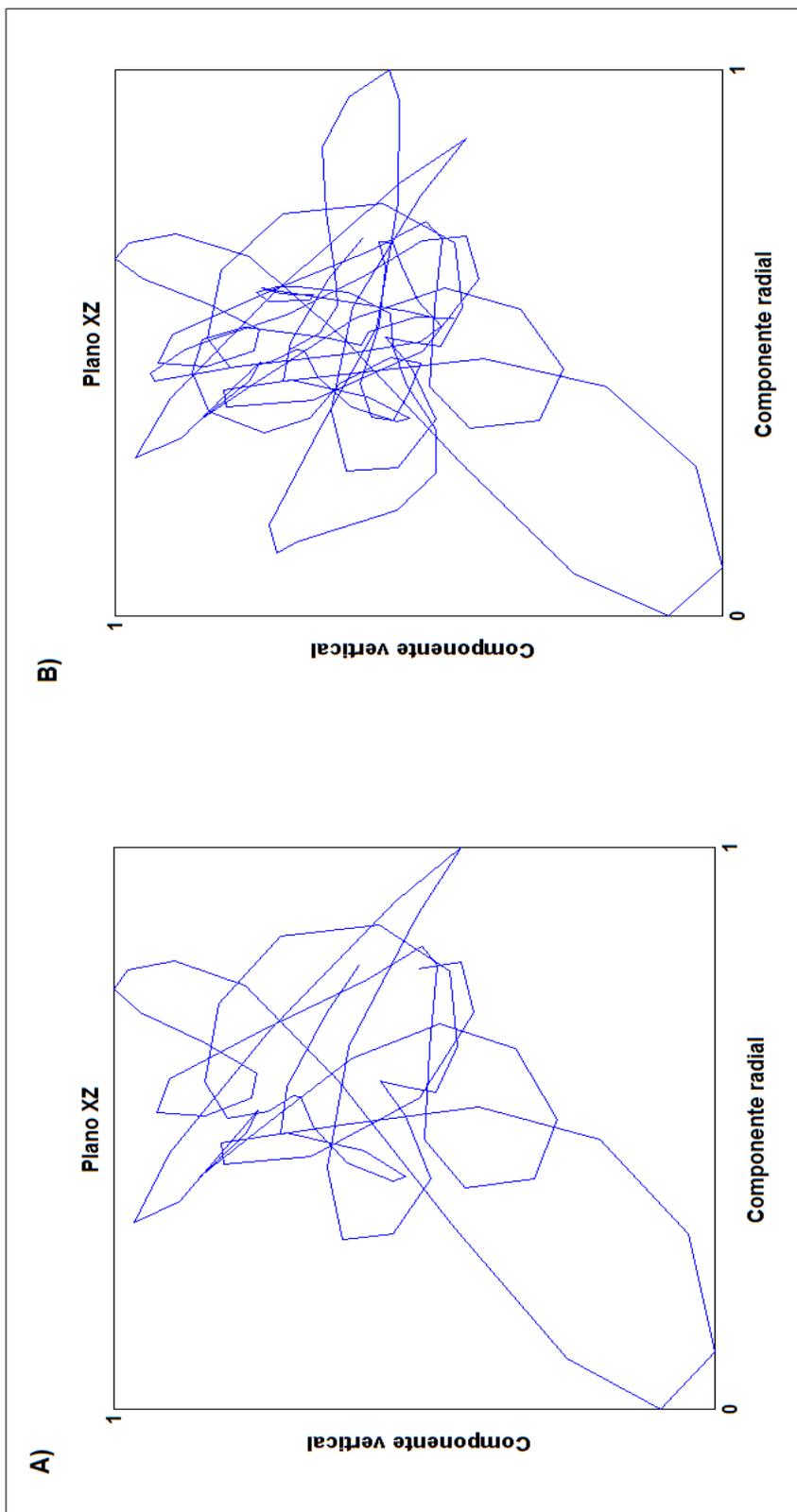


Figura 4.10: Hodograma de los datos sísmicos Junín para la traza 1, en la ventana entre a) 2 y 2,32 s b) 2 y 2.6 s

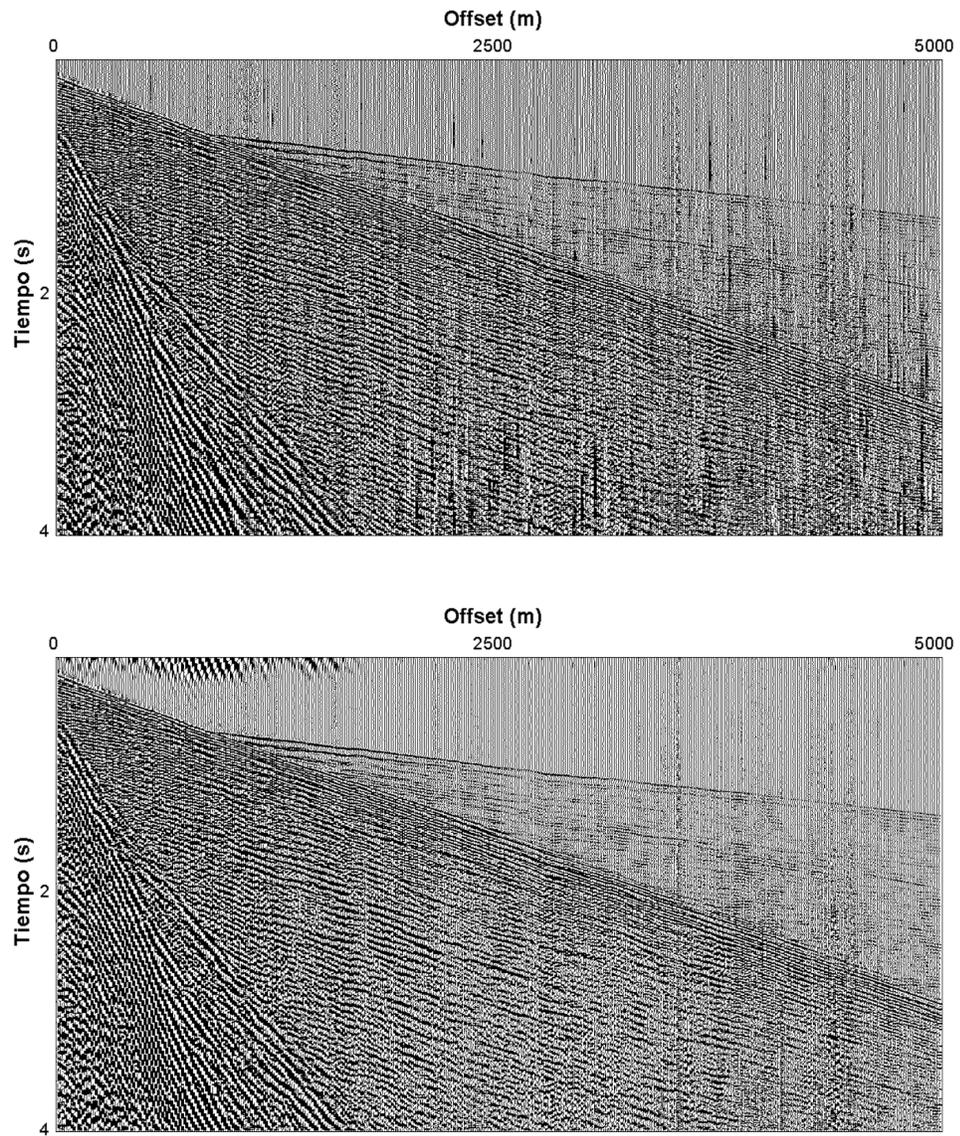


Figura 4.11: Componente vertical de los datos sísmicos del bloque Junín a) crudo b) filtrado en bandas

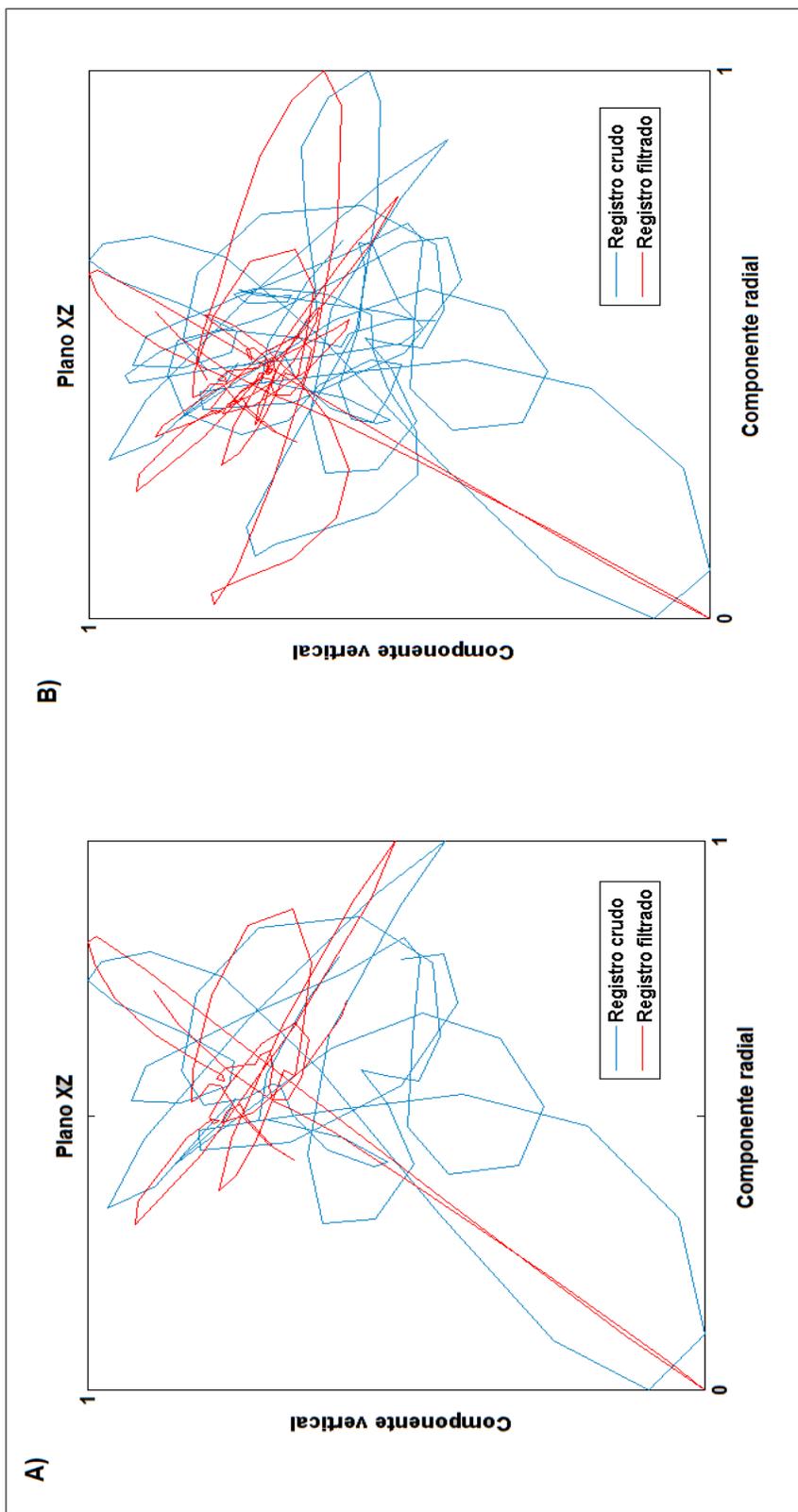


Figura 4.12: Hodograma de los datos sísmicos Junín para la traza 1, en la ventana entre a) 2 y 2,32 s b) 2 y 2.6 s. Cada hodograma está normalizado individualmente, los eventos lineales en color rojo representan ondas P que antes se encontraban enmascaradas.

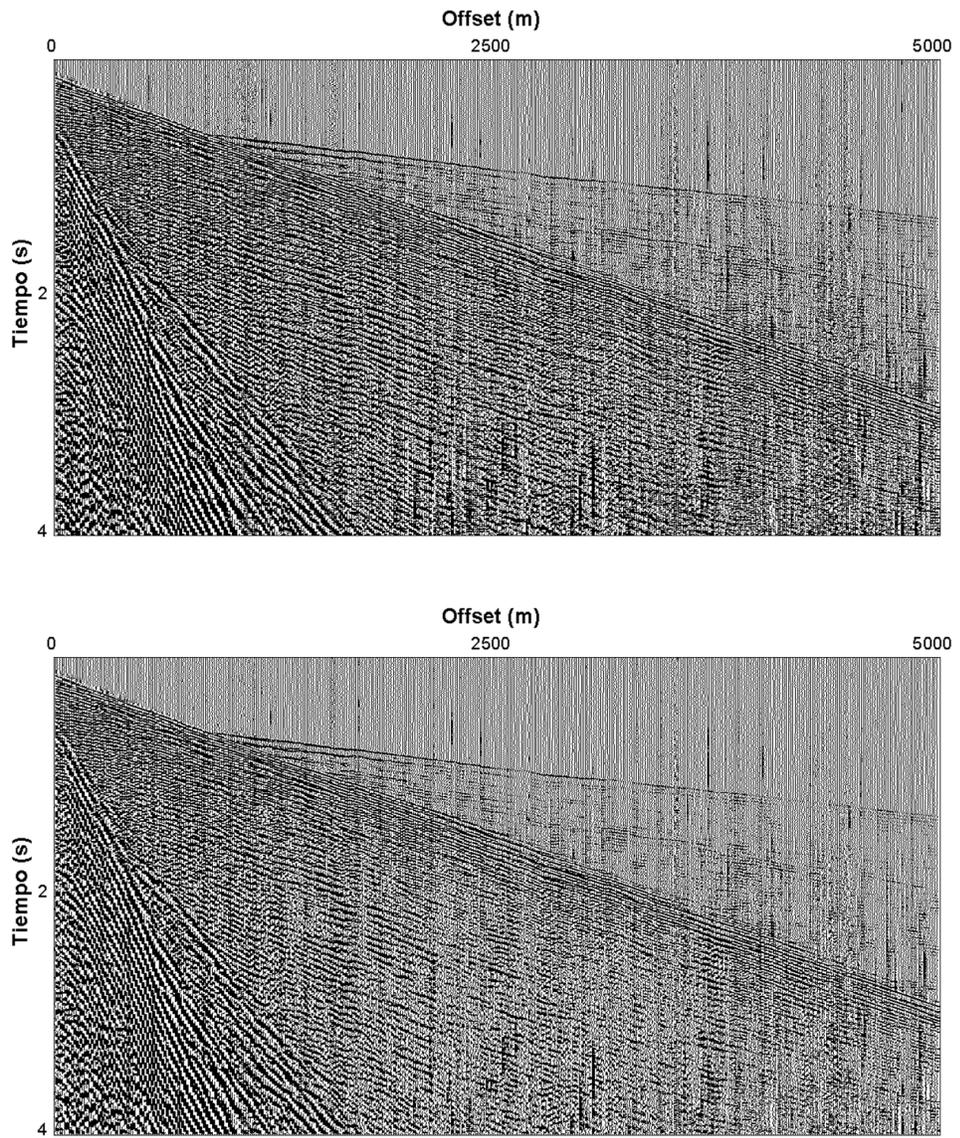


Figura 4.13: Componente vertical de los datos sísmicos del bloque Junín a) crudo b) filtrado banda completa

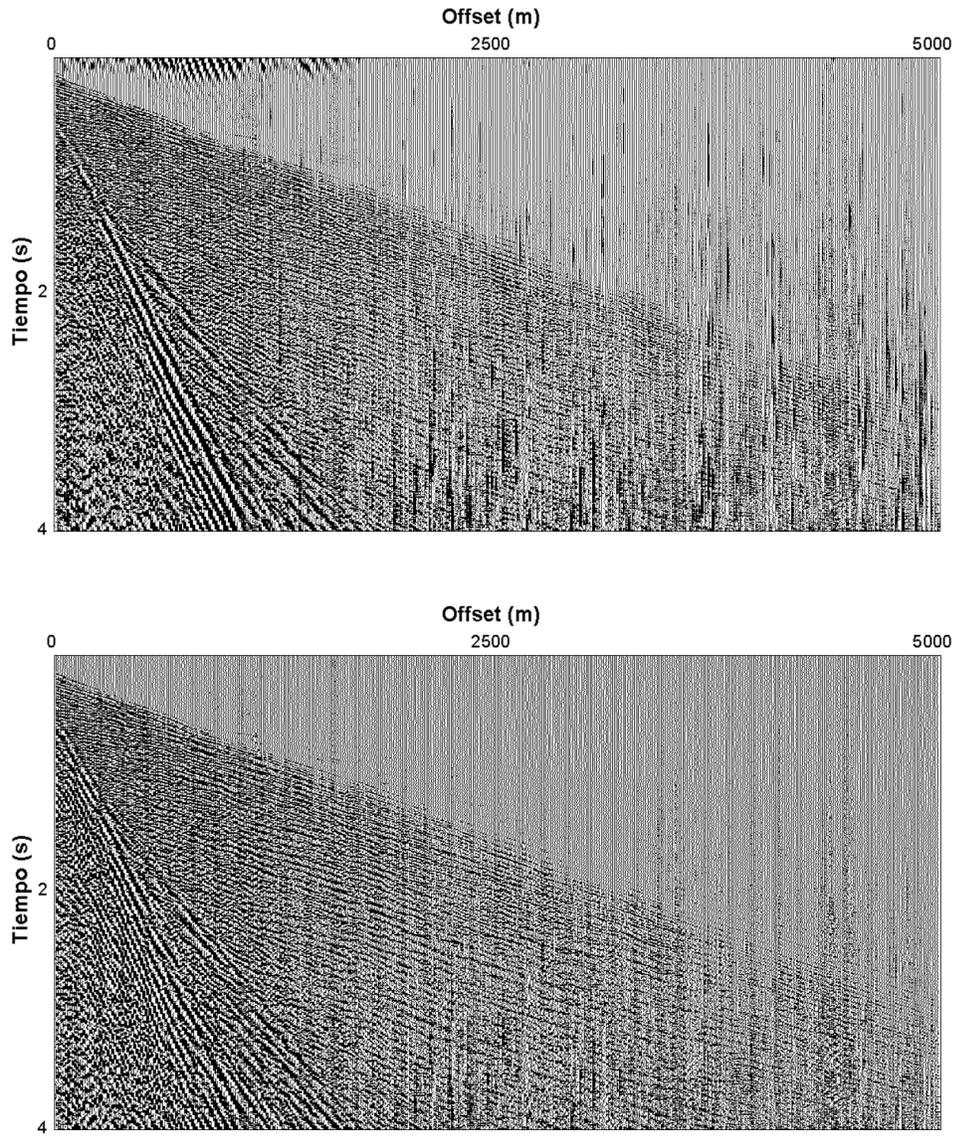


Figura 4.14: Diferencia de la componente vertical de los datos sísmicos del bloque Junín a) registro filtrado en bandas b) registro filtrado con la banda completa

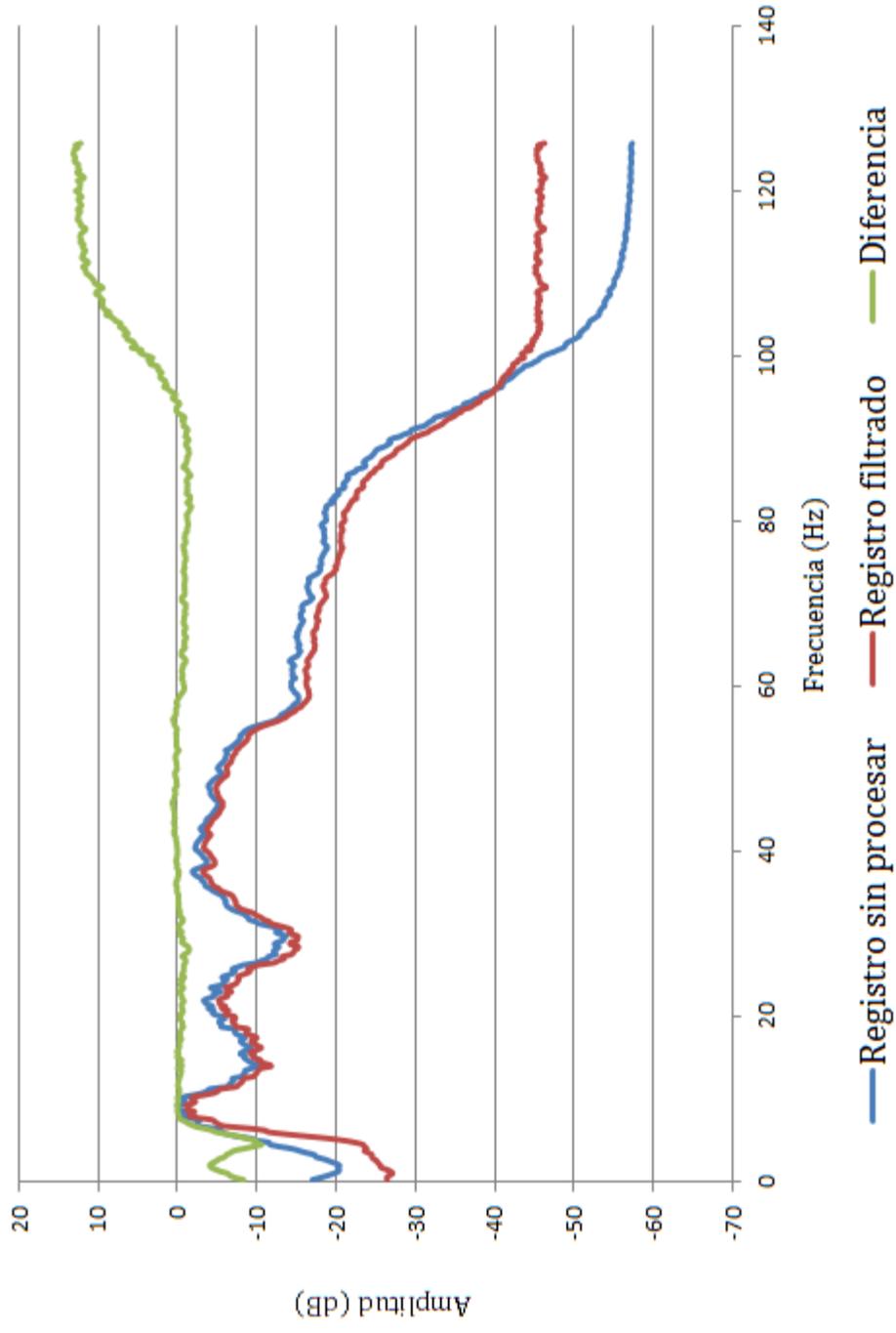


Figura 4.15: Espectros de amplitud de los datos sísmicos del bloque Junín

4.2.3. Datos de Barinas

Una línea 3D/3C adquirida en Barinas, Venezuela fué usada para probar el filtro de polarización. Los datos fueron obtenidos usando una fuente de dinamita y fueron grabados con receptores multicomponente convencionales en la modalidad “*stack array*”. El registro presenta una configuración “*split-spread*” y la longitud del registro es de 8 s. La tabla 4.3 muestra los parámetros del registro.

Cuadro 4.3: Parámetros del registro de Barinas

Trazas	Intervalo entre trazas	Muestras en tiempo	Intervalo de muestreo
91	12,5 m	2000	4 ms

El registro de componente triaxial se muestran en la figura 4.16, donde se observa una componente vertical y dos horizontales. La componente vertical presenta mayores amplitudes, seguida por la componente radial y luego por la transversal. Se observa energía en ambas componentes horizontales debido a la presencia de anisotropía intrínseca asociada a un sistema de fracturas verticales.

En la componente vertical de la figura 4.16.a se aprecian diferentes tipos de energía sísmica, en forma de ondas directas, onda de aire, refracciones críticas, las ondas superficiales y los modos de cuerpo PP y PS. Cualitativamente el ruido producido por las ondas superficiales presenta la energía predominante. También se observan artefactos típicos de la sísmica multicomponente, a los 365 m a la izquierda a partir del origen del tendido se observa un *glitch* (traza dañada) y para offset mínimo ruido provocado por la fuente.

En el caso de las componentes radial (figura 4.16.b) y transversal (figura 4.16.c), se aprecian las mismas respuestas sísmicas de la componente vertical, ondas directas, la onda de aire, las refracciones críticas, las ondas superficiales y las reflexiones PP y PS aparecen con poca energía. En ambas componentes se observa para offset mínimo ruido provocado por la fuente.

El ancho de banda en este registro presenta un rango de 2 a 125 Hz . Para estos datos al igual que para los datos de Junín, se aplicó una ventana de 20 ms y se descompuso cada componente en dos bandas de frecuencia, la banda 1 de 4,8,12 y 30 Hz y la banda 2, conformada por las frecuencias 12,30,100 y 120 Hz . Se puede apreciar que la banda 1 (figura 5.32) presenta mayor energía sísmica que la banda 2 (figura 5.37).

4.2.4. Aplicación del filtro

El filtro se aplicó a los datos crudos sin realizar ninguna corrección previa. Los datos de entrada por componente, fueron representados en una matriz de dimensión 2000 x 91, correspondientes a 91 trazas con 2000 muestras en tiempo. Similar a los datos de Junín tras aplicar la ventana deslizante, se obtuvo una matriz de dimensión 20 x 3 y luego de la aplicación de la descomposición SVD, se generaron las matrices U , Σ y V . Con estos elementos se determinaron las autoimágenes y los factores de peso. Posteriormente la ventana se desplazó 1 ms en tiempo y se realizaron los mismos procedimientos para 1800 corridas de la ventana.

En la banda 1 la energía predominante está asociada a las ondas superficiales, mientras que en la banda 2, los modos de cuerpo presentan mayor amplitud. Para la banda 1 (figura 5.32) la autoimagen 1 (figura 5.33) presenta cualitativamente mayor energía que la autoimagen 2 (figura 5.34). R_1 evidencia los modos polarizados linealmente, principalmente resalta la respuesta de las ondas directas (componente vertical) y el *ground roll* (componente vertical), esto se aprecia en color azul en la figura 5.35.A . R_2 muestra energía con polarización lineal asociada a las ondas directas (componente radial) y a parte del *ground roll* en la figura 5.35.b. Debido a que las ondas se polarizan en el plano vertical-radial, la respuesta de la planaridad coincide con la rectilinealidad sobre el primer eje. Los modos con polarización no lineal, como es el caso de la componente tipo Rayleigh del *ground roll* se muestran en color rojo en estos factores de peso (figura 5.35). De la misma manera, en la banda 2, la autoimagen 1 presenta mayor energía que la autoimagen 2 (figuras 5.38 y 5.39 respectivamente). En R_1 se resaltan las ondas

directas y las reflexiones PP y PS. En R_2 también se evidencia la polarización lineal de las ondas directas (color azul). Luego de aplicar el motor de filtrado a las dos bandas descompuestas, el resultado se apila para reconstruir las señales y generar los registros filtrados para cada componente. En la figura 4.16 se muestran las componentes del registro crudas y en la figura 4.17 las componentes filtradas; se observa como tras el filtrado se resaltan los reflectores PP y PS y se atenúa parte del ruido generado por las ondas superficiales, por lo tanto es obvia una mejoría de la relación señal ruido. Para la componente vertical (figura 4.18), se muestra la resta de ambos registros; la mayor diferencia se observa en el ruido de baja frecuencia (figura 4.18.c), donde parte de la componente del groundroll tipo Rayleigh parece ser atenuada efectivamente (se preserva ruido residual del *groundroll*).

Por otra parte, se realizó el mismo experimento sin efectuar la descomposición en bandas, obteniendo el resultado de la figura 4.19, donde se muestra como la diferencia (figura 4.19.c) no es tan notable como en el experimento en bandas. Es decir no se removió el ruido con polarización no lineal, por ende parece ser más efectivo el algoritmo al aplicarse en bandas de frecuencia.

En los espectros de frecuencia de la figura 4.20, se observa como tras la aplicación del algoritmo se logra una mejoría de la relación señal ruido.

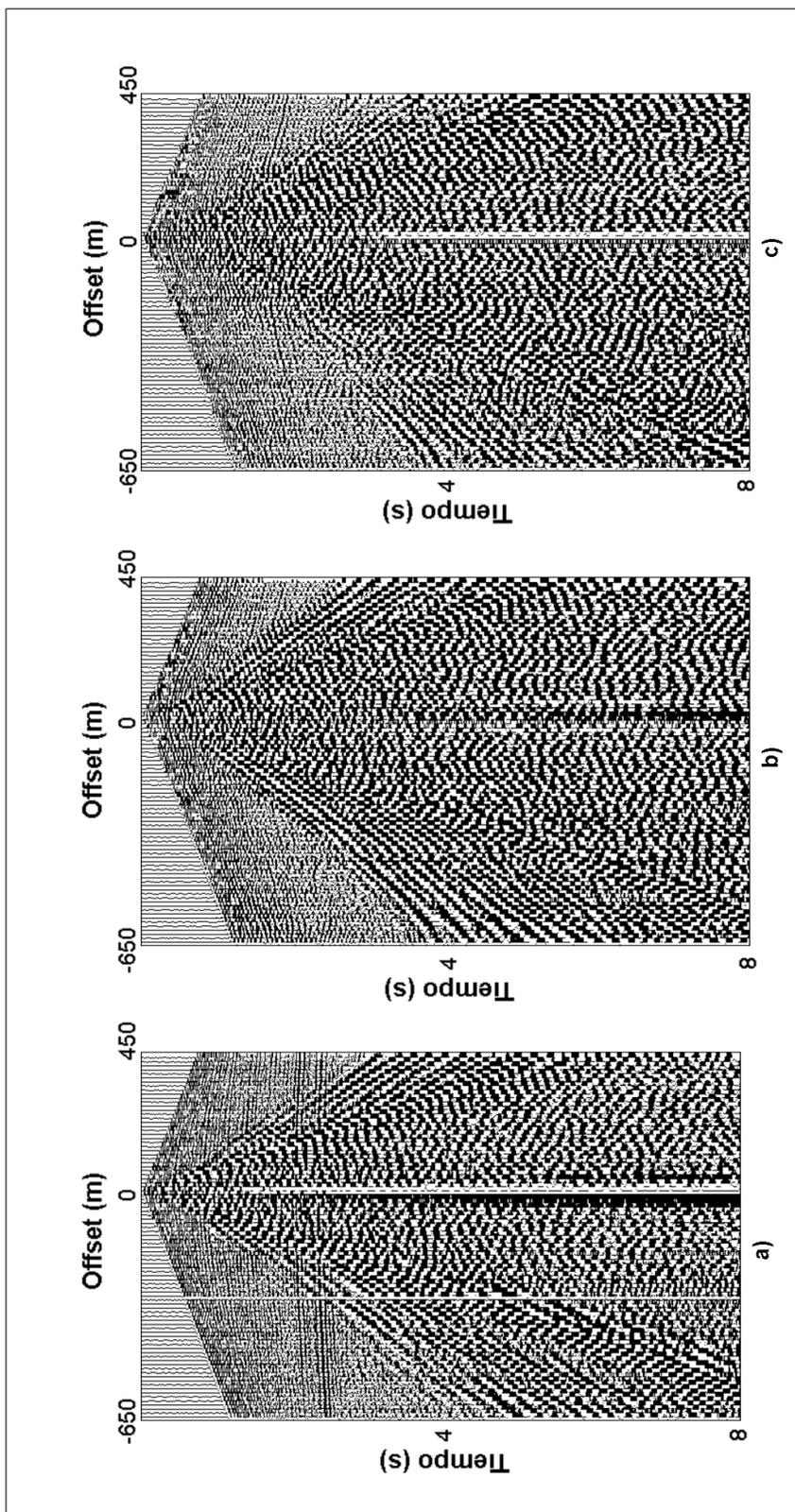


Figura 4.16: Datos sísmicos Barinas, componentes a) vertical b) radial c) transversal.

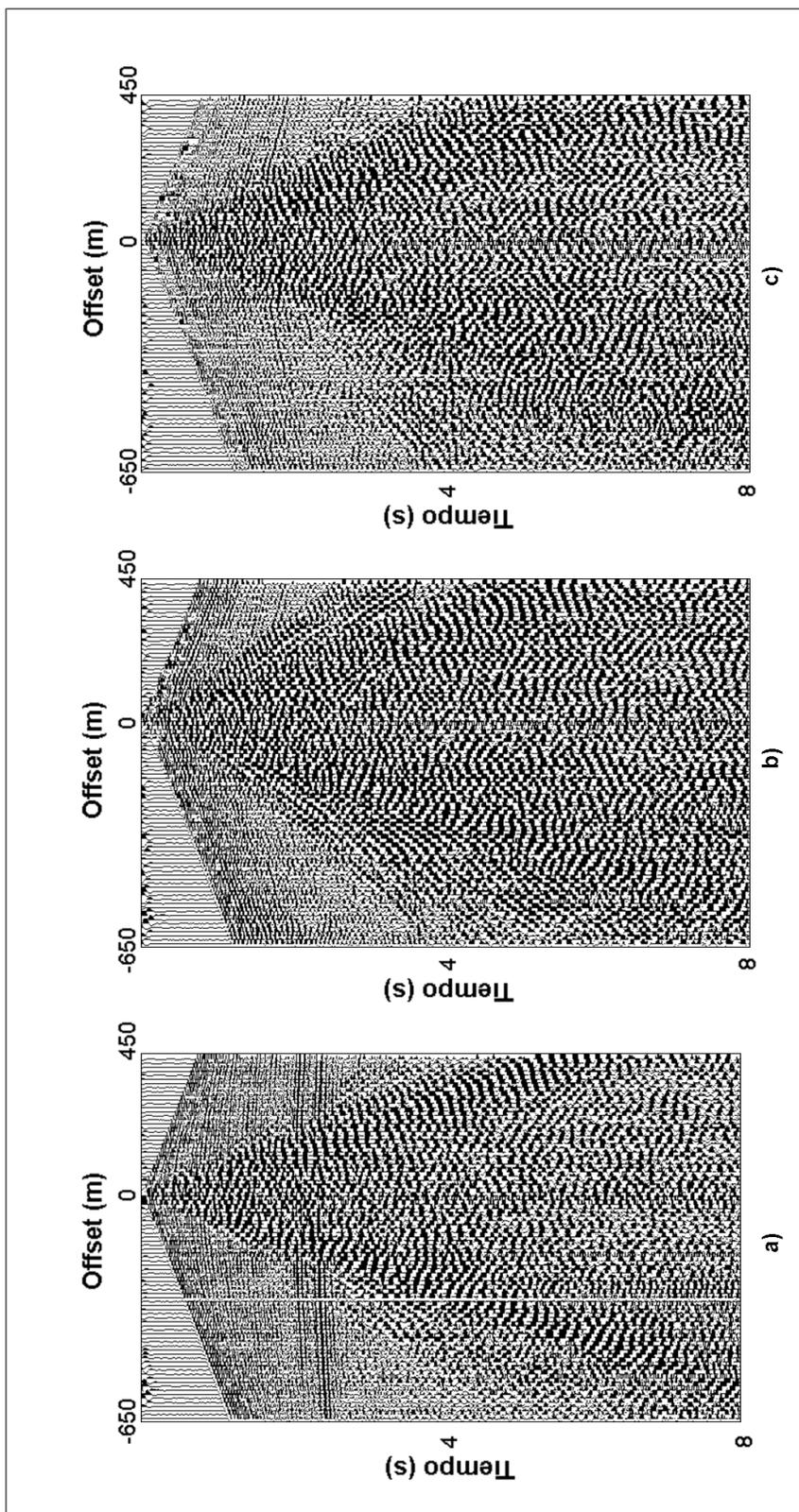


Figura 4.17: Datos sísmicos Barinas filtrados en bandas, componentes a) vertical b) radial c) transversal.

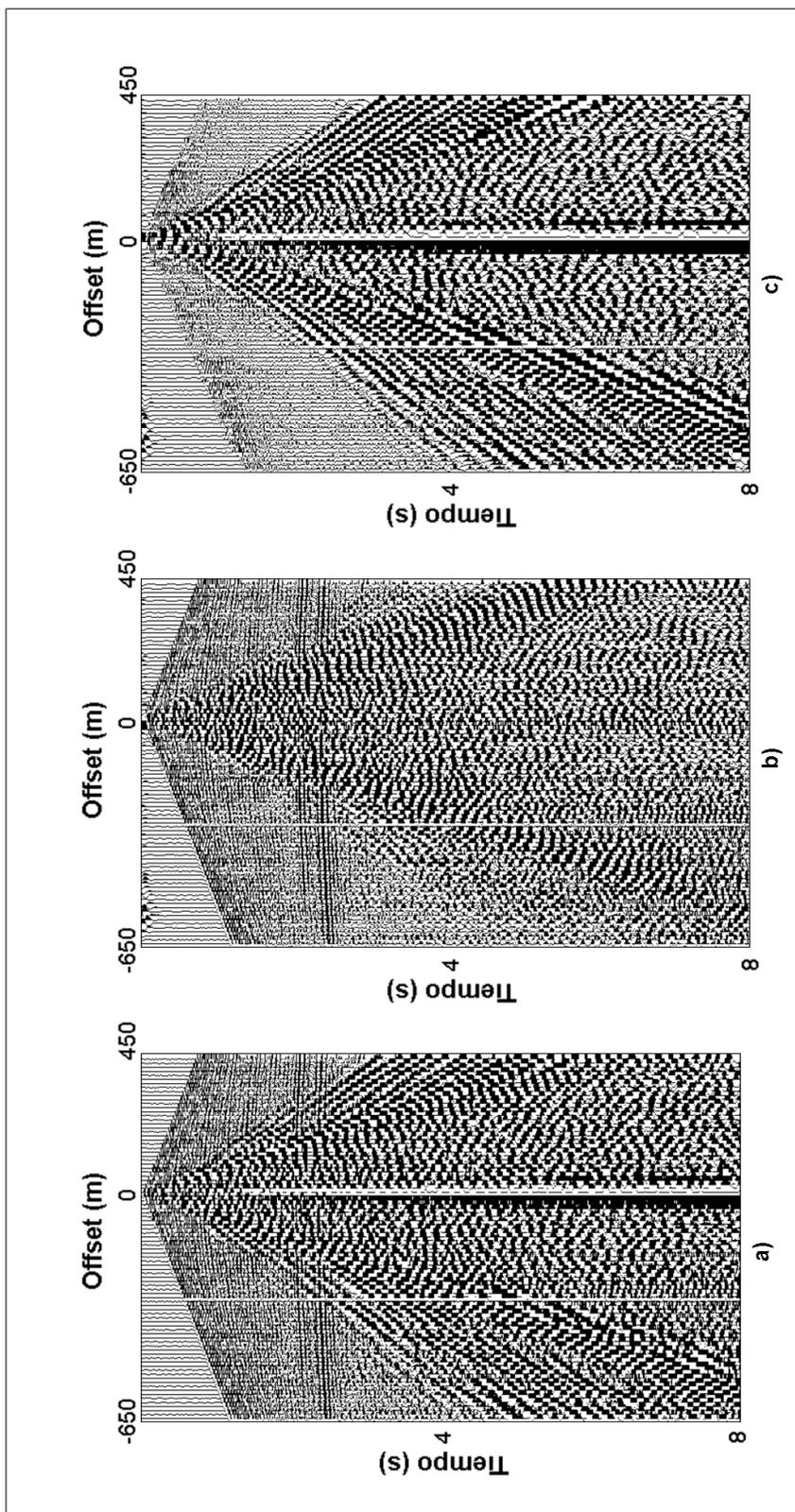


Figura 4.18: Componente vertical de los datos sísmicos Barinas a) crudo b) filtrado en bandas c) diferencia entre ambos.

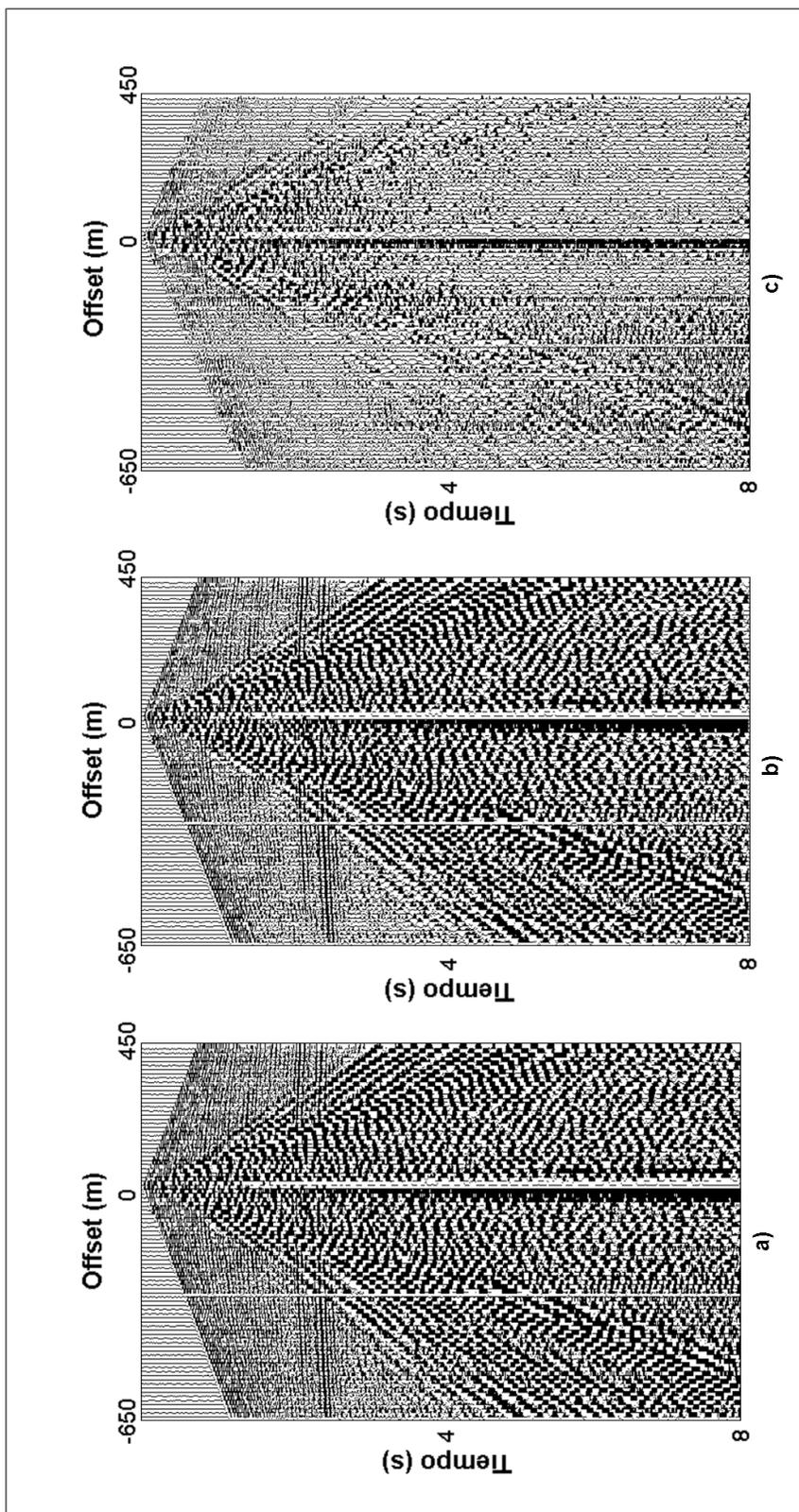
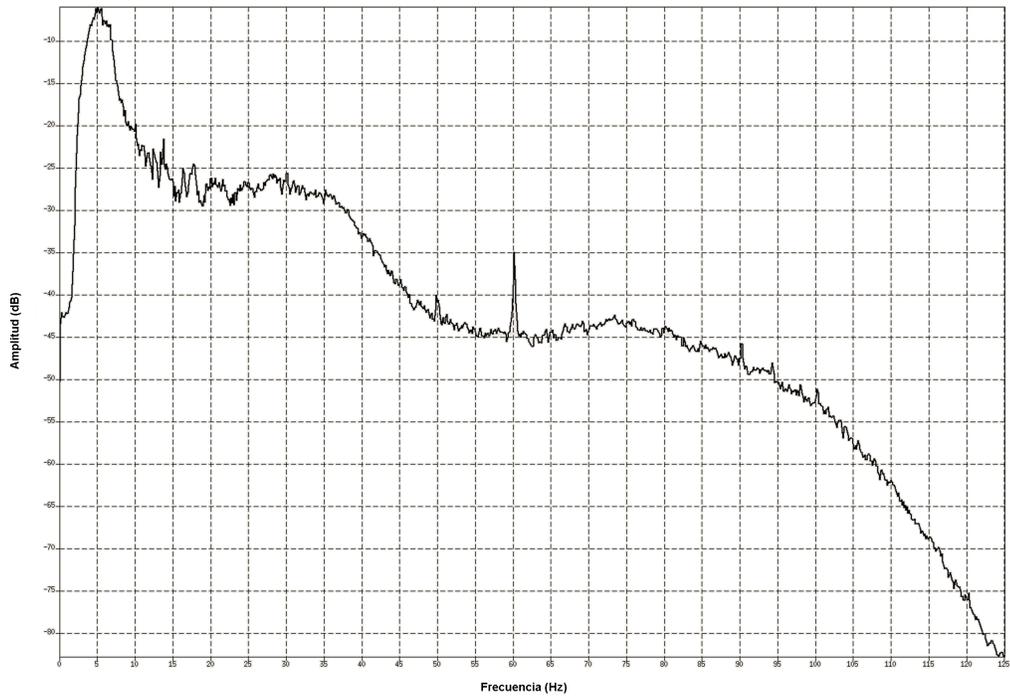
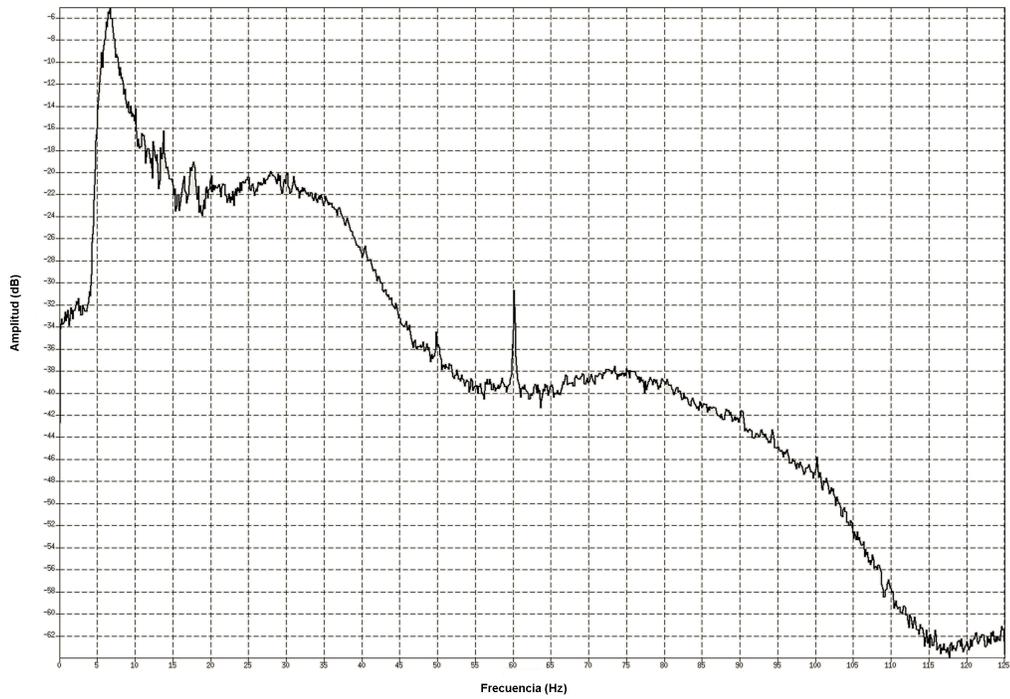


Figura 4.19: Componente vertical para banda completa de los datos sísmicos Barinas a) crudo b) filtrado c) diferencia entre ambos.



(a) Registro crudo



(b) Registro filtrado

Figura 4.20: Espectro de amplitud de los datos sísmicos Barinas

4.3. Discusión sobre el filtro

El análisis de la polarización utiliza la información del vector de los datos multicomponente para atenuar el ruido. Con la aplicación de la descomposición en valores singulares se evita el proceso de rotación de las direcciones principales de la elipse de polarización, permitiendo preservar la amplitud relativa entre las trazas del sismograma.

Los atributos de polarización son estimados para cada muestra en tiempo dentro de las ventanas deslizantes (solo en los extremos de la ventana se pierde la información). Otra de las ventajas de este algoritmo es la correcta reproducción de las amplitudes y fases de la señal, sin alterar el contenido de frecuencias del sismograma.

Los datos sintéticos permitieron establecer que los factores de mayor importancia son la longitud de la ventana y las bandas de frecuencia en la que se descomponen los datos. Luego de aplicar el filtro, el ruido aleatorio agregado previamente a los datos sintéticos fue removido para cada banda de frecuencia; el análisis es mas efectivo cuando existe un solo tipo de onda presente en la ventana deslizante. Luego las bandas de frecuencias se apilaron para reconstruir las señales y generar los registros filtrados por componente, preservando de esta manera la amplitud relativa de los eventos. El mismo algoritmo se probó posteriormente con datos reales, para los datos del Bloque Junín, se eliminó el ruido aleatorio y el *ground roll* parcialmente, en 10 dB aproximadamente. Para los datos de Barinas, se removió la componente tipo Rayleigh del *groundroll* efectivamente, preservando las reflexiones de interés; en la diferencia de la componente vertical se aprecia como el ruido removido consiste en la energía dispersiva y de baja frecuencia del *groundroll*, sin la presencia de reflexiones primarias.

Además, los resultados son superiores al aplicar el algoritmo en bandas de frecuencia que al emplearlo sobre los datos en la banda completa, esto se debe probablemente a que las bandas de frecuencia logran separar la señal del ruido.

Tanto para los datos reales como sintéticos se aprecia una notable mejoría de la relación señal ruido.

En general, este filtro es aplicable a cualquier geometría de adquisición ya que funciona para una estación en particular.

El *groundroll* no es removido completamente, debido a que los múltiples tipos de onda que pueden estar presentes en una ventana deslizante reducen la efectividad del análisis de polarización. Las reflexiones fuera de plano también afectan esta propiedad.

Capítulo V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los datos sintéticos generados simulan de manera adecuada la energía sísmica en forma de reflectores PP, PS y las ondas directas para un medio homogéneo e isotrópico. Esta respuesta sísmica sirvió de base para realizar los procedimientos de filtrado. De tal manera, que con las pruebas realizadas con estos datos se determinó que los parámetros más importantes del filtro son, la longitud de la ventana y el ancho de banda a la cual se aplica el algoritmo. Las bandas más eficaces se encuentran en el rango de frecuencias: 2,4,16 y 24 Hz para la banda 1, 16,20,32 y 44 Hz para la banda 2 y 32,38,225 y 250 Hz para la banda 3; estas bandas permitieron separar la señal del ruido, la señal predomina en las bandas 1 y 2, y el ruido en la banda 3. La ventana adaptativa fue de longitud 160 ms . Para éstos sismogramas sintéticos el filtro eliminó efectivamente el ruido aleatorio con polarización no lineal que fue agregado.

Para los datos reales (Junín y Barinas), el rango de bandas más apropiado consistió en la banda 1 con frecuencias 4,8,12 y 30 Hz y de la banda 2, conformada por las frecuencias 12,30,100 y 120 Hz . La señal de interés predomina en la banda 2 y el ruido asociado al *ground roll* en la banda 1. La longitud más apropiada para la ventana deslizante fué de 80 ms . En general, para los datos de Junín, se removió parcialmente el ruido asociado al *ground roll*. Para los datos de Barinas, se eliminaron efectivamente las ondas tipo Rayleigh del *groundroll* y se preservaron y resaltaron los reflectores PP y PS, mejorando notablemente la relación señal ruido del registro crudo.

Los resultados para los datos sintéticos y reales, evidencian que el filtro adaptativo

preserva efectivamente la señal polarizada linealmente mientras elimina el ruido con polarización no lineal. Lo cual demuestra que los procedimientos de filtrado funcionan efectivamente tanto para sismogramas con bajo contenido de frecuencias (registros sintéticos) como para sismogramas con alto contenido de frecuencias (registros reales). Los resultados son superiores al aplicar el algoritmo en bandas de frecuencia que al emplearlo sobre los datos en la banda completa, esto se debe probablemente a que las bandas de frecuencia logran separar la señal del ruido. Otras de las ventajas de esta herramienta son que, los atributos de polarización son estimados para cada muestra en tiempo dentro de las ventanas deslizantes y que el filtro es aplicable a cualquier geometría de adquisición ya que funciona para una estación en particular y es independiente de la tasa de muestreo aplicada sobre los datos.

Para estudios futuros, sería importante comparar estos resultados con los métodos basados en la matriz de covarianza y con las técnicas de filtrado FK. Otra consideración resaltante para ampliar este estudio, consiste en tomar en cuenta la información de estaciones vecinas a la estación en estudio, de manera de poder comprender la variación lateral de los atributos de polarización.

Bibliografía

- Al-Husseini, M.I., Glover, J.B., and Barley, B.J., (1981), *Dispersion patterns of the ground roll in eastern Saudi Arabia*. Geophysics, 46, 121-137.
- Aki K.; Richards P. G., (2002), *Quantitative Seismology*. University Science Books, Second Edition. Cap. 4, 5.
- Alkaz, V. G., Ornofrash, N. I., and Perelberg, A. I., (1977), *Polarization analysis of seismic waves*. Shtiintca Press.
- Anant, K. S. y Dowla, F. A. (1997), *Wavelet transform methods for phase identification in three-component seismograms*, University of California, Davis and Lawrence Livermore National Laboratory.
- Andrews H. C.; Hunt B. R. (1977). *Digital image restoration*. Prentice-Hall, Signal Processing Series.
- Archambeau, C. B., Bradford, J. C., Brome, P. W., Dean, W. C., Flinn, E. A., and Sax, R. L., (1965). *Data processing techniques for detection and interpretation of teleseismic signals*. Proc. IEEE, 53, 1860-1884.
- Bellanger, M., (2001), *Adaptive Digital Filters and Signal Analysis*, Universidad de París, Marcel Dekker, Inc.
- De Meersman,; Kendall R. (2005). *A complex SVD-polarization filter for ground roll attenuation on multi-component data*. CSEG Convention.
- De Meersman K.; Ansoger, C. (2007). *Ground Roll Removal and Signal Preservation by Cascading SVD Polarization Filters with Localized Fk-Filters*. CSPG CSEG Convention. 450.
- De Meersman K., (2008). *Ground Roll polarization filtering with spatial smooth-*

- ness constraints. SEG Expanded Abstracts, pp. 1053-1057.
- Esmersoy, C., (1984). *Polarisation analysis, rotation and velocity estimation in three-component VSP* Advanced concepts: Geophysical Press.
- Edelmann, H.A.K., and Helbig, K., (1987), *Shear-wave surveys: Some aspects of fieldlayout: in Shear Wave Exploration*, Soc. Expl. Geophys., Geophysical development series, V.I, 165-179.
- Flinn, E. A., (1965), *Signal analysis using rectilinearity and direction of particle motion: IEEE Proc.*, 12, 1874 - 1876.
- Franco, R; Musacchio, G. (2001). *Polarization filter with singular value decomposition*. Geophysics; 66 (8): 932 - 938.
- Gal'perin, E. I. (1984). *The polarization method of seismic exploration decomposition*. Reidel Publishing Co, Dordrecht, Holland.
- Gal'perin, E. I., and Frolova, A. V., (1960). *Azimuth-phase correlation for elliptically polarised waves: Izv. Sov. Acad. Sci. Geophy. Series*, 2, 195 - 208.
- Guevara, S., (2000). *Analysis and filtering of near-surface effects in land multi-component seismic data*. The university of Calgary.
- Hsu, H., (1995). *Signals and systems* , Schaum's outlines. McGraw-Hill.
- Jackson, G. M., Mason, I. M., and Greenhalgh, S. A., (1991). *Principal component transforms of triaxial recording by singular value decomposition: Geophysics*, 56, 528 - 533.
- Jurkevics, A., (1988). *Polarisation analysis of three-component array data: Bull. Seis. Soc. Am.*, 78, 1725 - 1743.
- Kaplan Sam, T., (1998). *AVO analysis: Finding the hydrocarbon indicator using the Shuey approximation*. CDSST (Consortium for the development of specialized seismic techniques) annual report.
- Kanasewich, E.R., (1981). *Time sequence analysis in geophysics*. The university of Alberta press.
- Lanczos C. (1961). *Linear Differential Operators* , D. Van Nostrand Co.
- Nguyen D. T.; Brown R. D.; Lawton D. C. (1989). *Polarization filters for*

multicomponent seismic data. The University of Calgary.

Novotny, O., (1999). *Seismic surface waves*. Universidad Federal de Bahia.

Oonincx, P. I. (1998). *Automatic Phase Detection in Seismic Data using the Discrete Wavelet Transform*, Centrum voor Wiskunde en Informatica.

Park, J., Vernon, F. L. I., and Lindberg, C. R., (1987). *Frequency dependent polarisation analysis of high-frequency seismograms*: J. Geophys. Res., 92, 12664 - 12674.

Perelberg, A. I., and Hornborstel, S. C., (1994). *Application of seismic polarisation analysis*: Geophysics, 59, 119 - 130.

Plesinger, A., M.Zmeskal, J.Zednik, 1995. *PREPROC - Program for automated preprocessing of digital seismic data*. GI ASCR Prague, N.E.I.C. U.S.G.S. Golden, pp.130.

Pujol, J., (2003). *Elastic wave propagation and generation in seismology*. Cambridge University Press.

Rauscher, C. (2001). *Fundamentals of spectrum analysis*. Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG. Cap, 1.

Ristau, J., Moon, W. (2001). *Adaptive filtering of random noise in 2-D geophysical data*. Geophysics, 66 (1) : 342-349.

Scales, J.A; Snieder R. (1998). *What is the noise?*. Geophysics, 63 (4): 1122-1124.

Schieck, D., (1993). *Rayleigh-wave analysis and removal using a novel weighted median filter*. The University of Calgary.

Sheriff R., (1991). *Encyclopedic dictionary of Applied Geophysics*. The Society of Exploration Geophysicists, Fourth Edition.

Shieh, C.; Herrmann, R. (1990). *Ground roll rejection using polarization filters*. Geophysics, 55 (9): 1216-1222.

Slawinski, M., (1996). *On elastic-wave propagation in anisotropic media: reflection/refraction laws, raytracing, and travelttime inversion*. The university of Calgary.

- Stewart, R; James, E; Gaiser, R; Brown, J; Lawton, D. (2002). *Converted-wave seismic exploration: Methods*. Geophysics; 67 (4):1348-1363.
- Tatham, R. H. and McCormack, M. D., (1991). *Multicomponent seismology in petroleum exploration*. SEG, Investigations in Geophysics, Vol. 6.
- Vaseghi, S., (2006). *Advanced digital signal processing and noise reduction*. John Wiley & Sons Ltd. Vol 3. cap.
- Wang, J., and Teng, T., (1997). *Identification and picking of S phase using an artificial neural network*. Bull. Seis. Soc. Am., 87, 1140 - 1149.
- Winder, S., (2002). *Analog and digital filter design*. Newnes. Second edition
- Winterstein. D. F. (1990). *Velocity anisotropy terminology for geophysicsts* Geophysics; 55: 1070 - 1088.
- Yilmaz, OZ., (1987). *Seismic Data Analysis*. Society of Exploration Geophysicists., Investigations in Geophysics Vol. 2.

APÉNDICES

Apéndice A. Registros sintéticos:

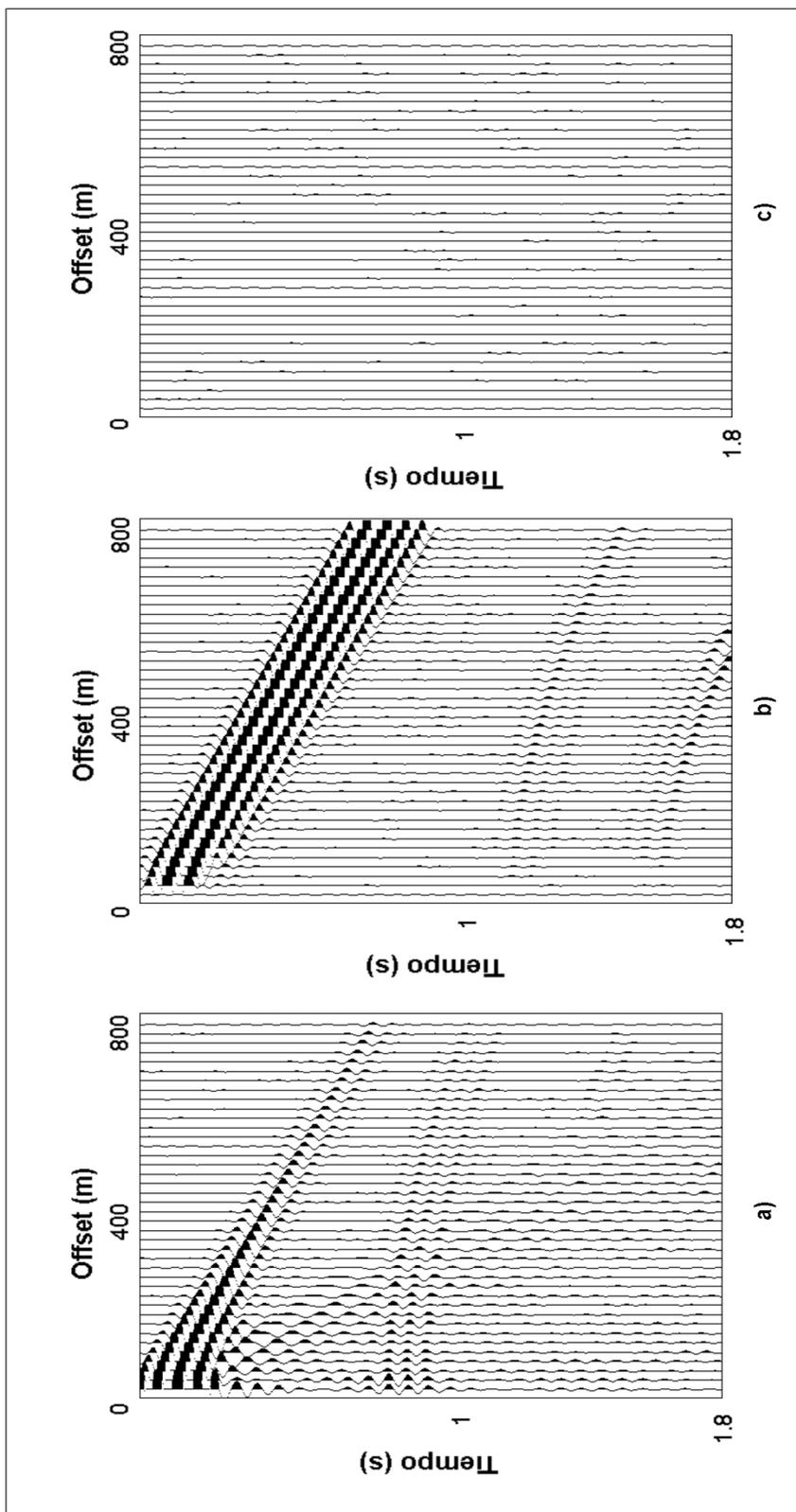


Figura 5.1: Banda 1 $f=2,4,16,24$ Hz, componentes a) vertical b) radial c) transversal.

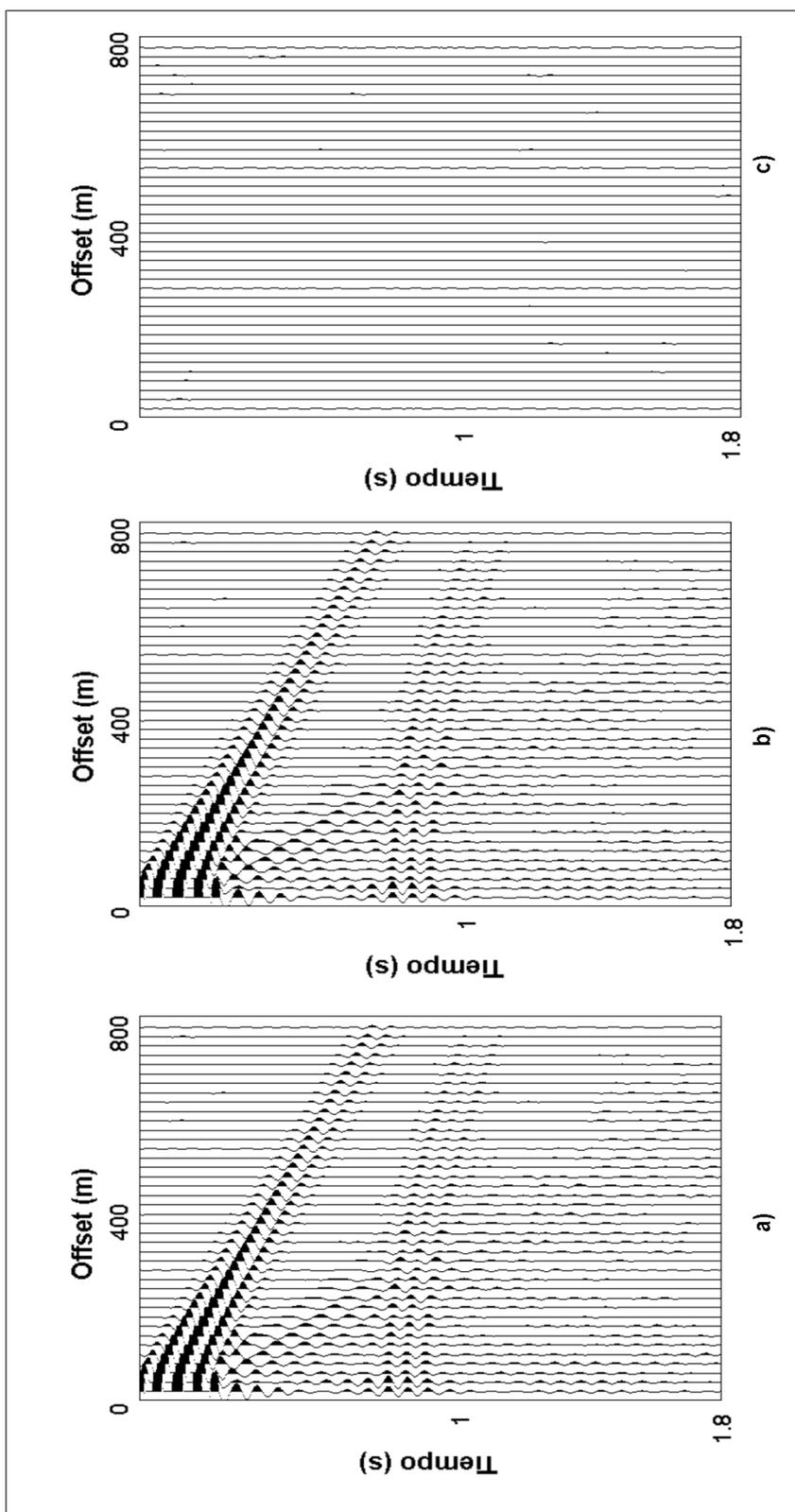


Figura 5.2: Autoimagen 1 banda 1, componentes a) vertical b) radial c) transversal.

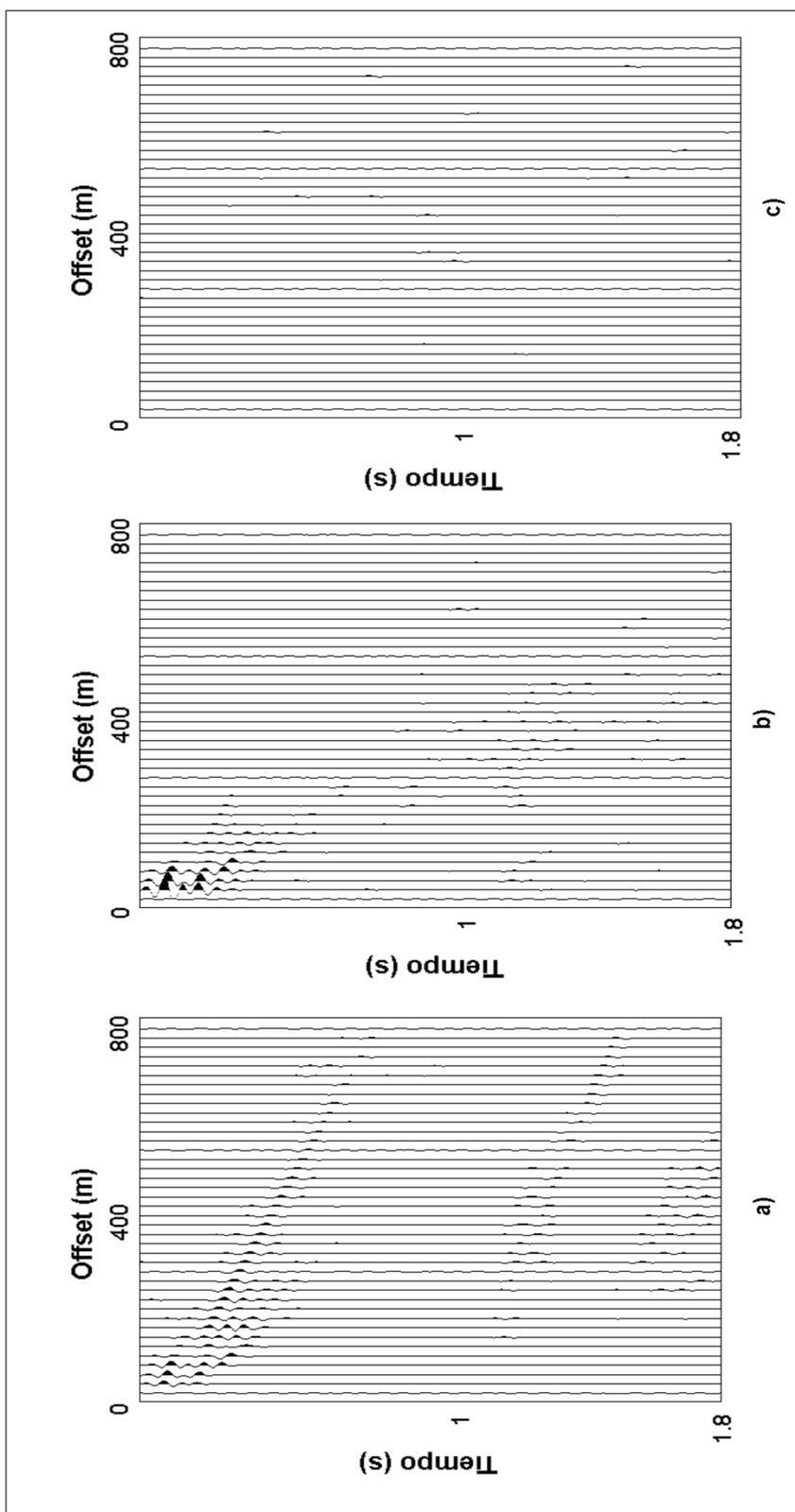


Figura 5.3: Autoimagen 2 banda 1, componentes a) vertical b) radial c) transversal.

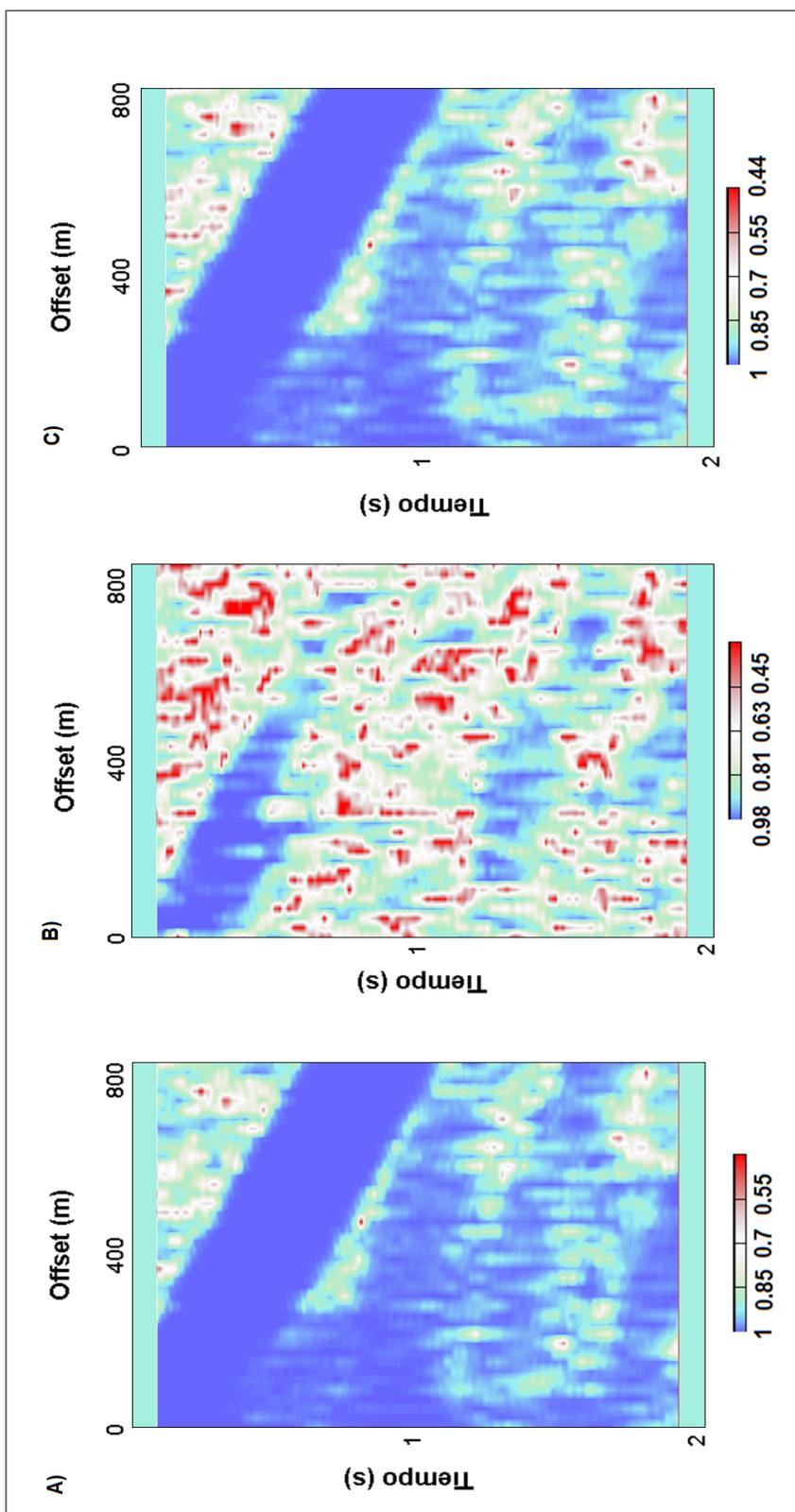


Figura 5.4: Factores de peso banda 1. A) R_1 B) R_2 C) P

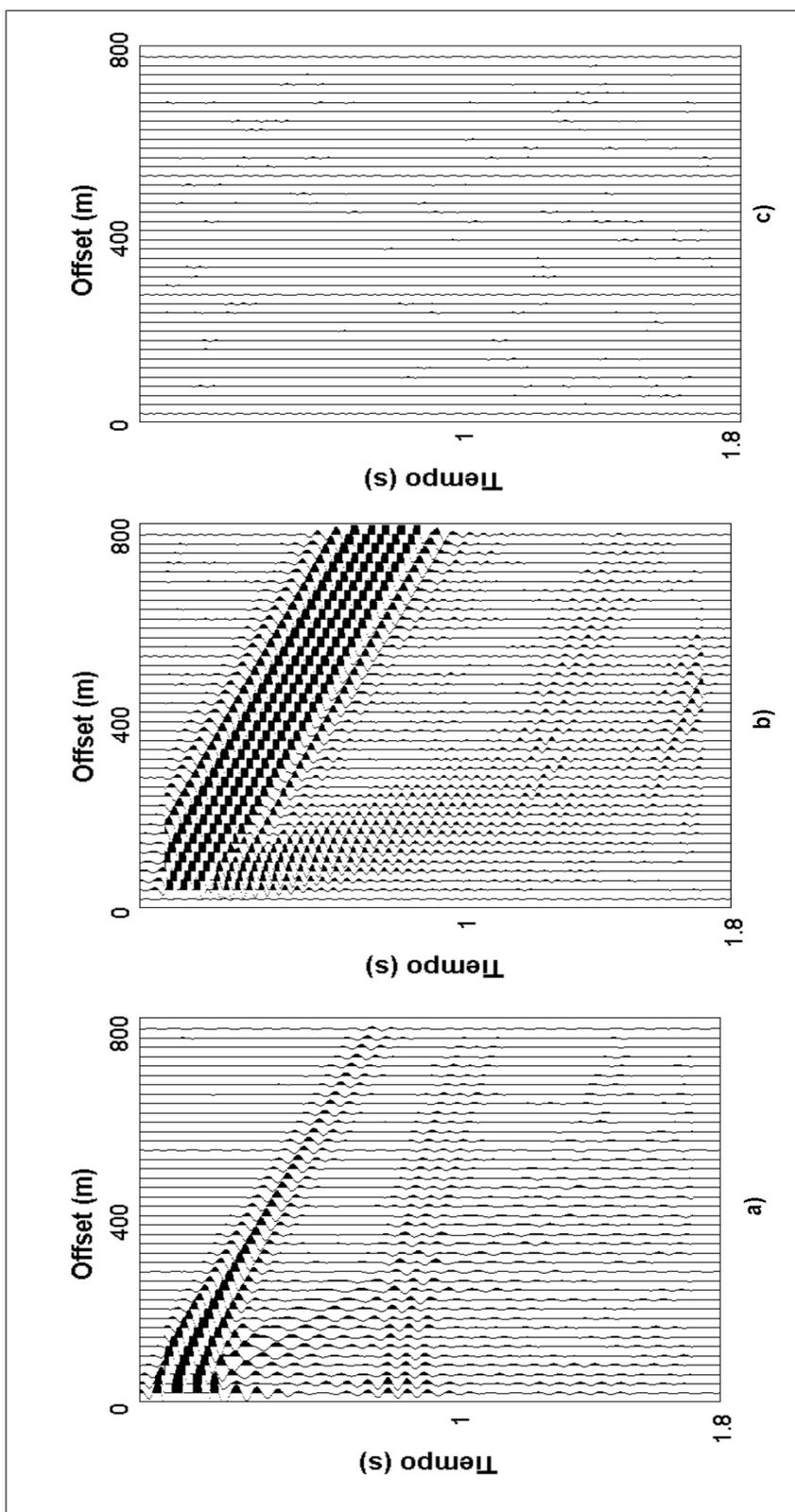


Figura 5.5: Banda 1 filtrada, componentes a) vertical b) radial c) transversal.

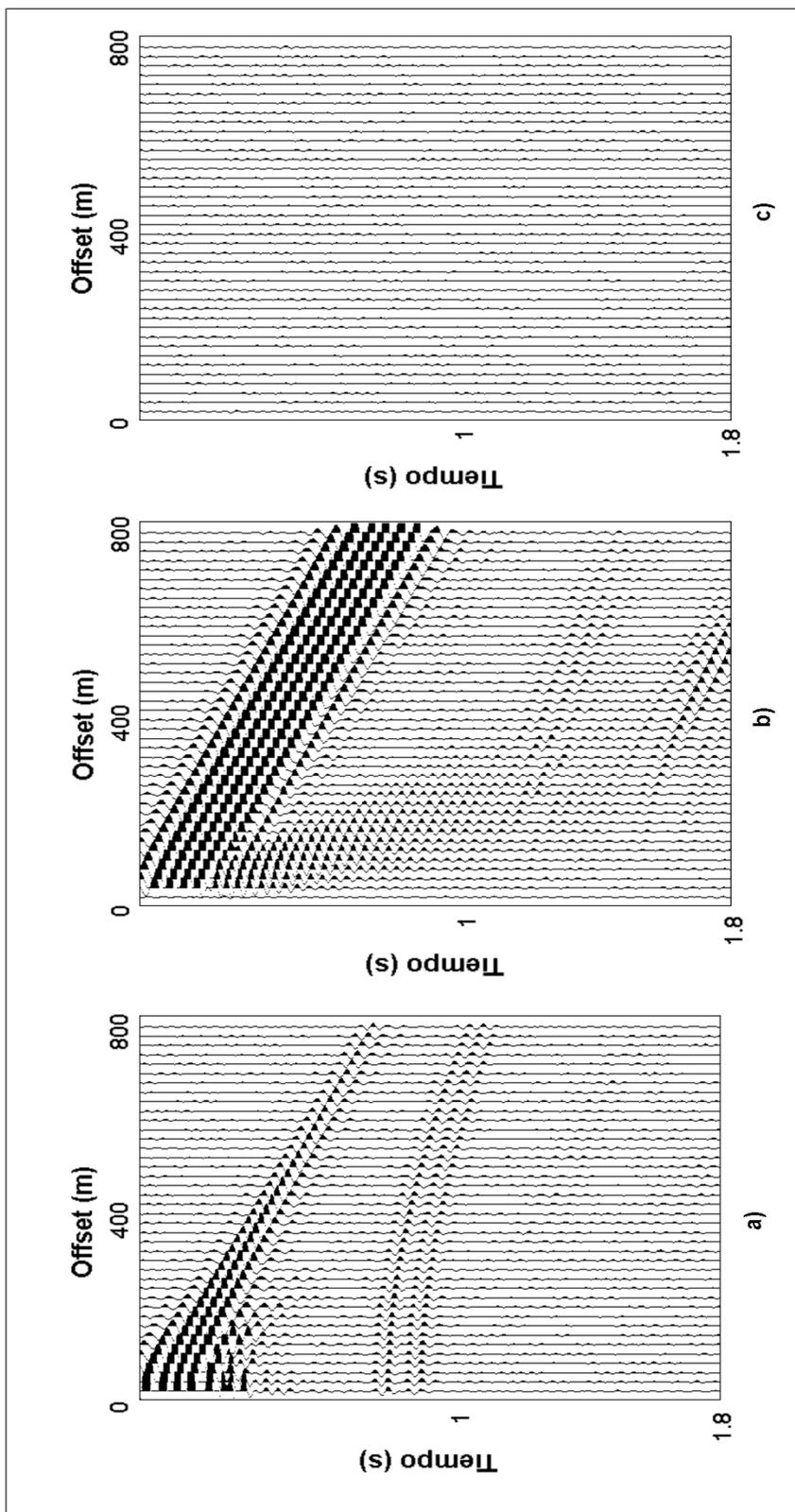


Figura 5.6: Banda 2 $f=16,20,32,44$ Hz, componentes a) vertical b) radial c) transversal.

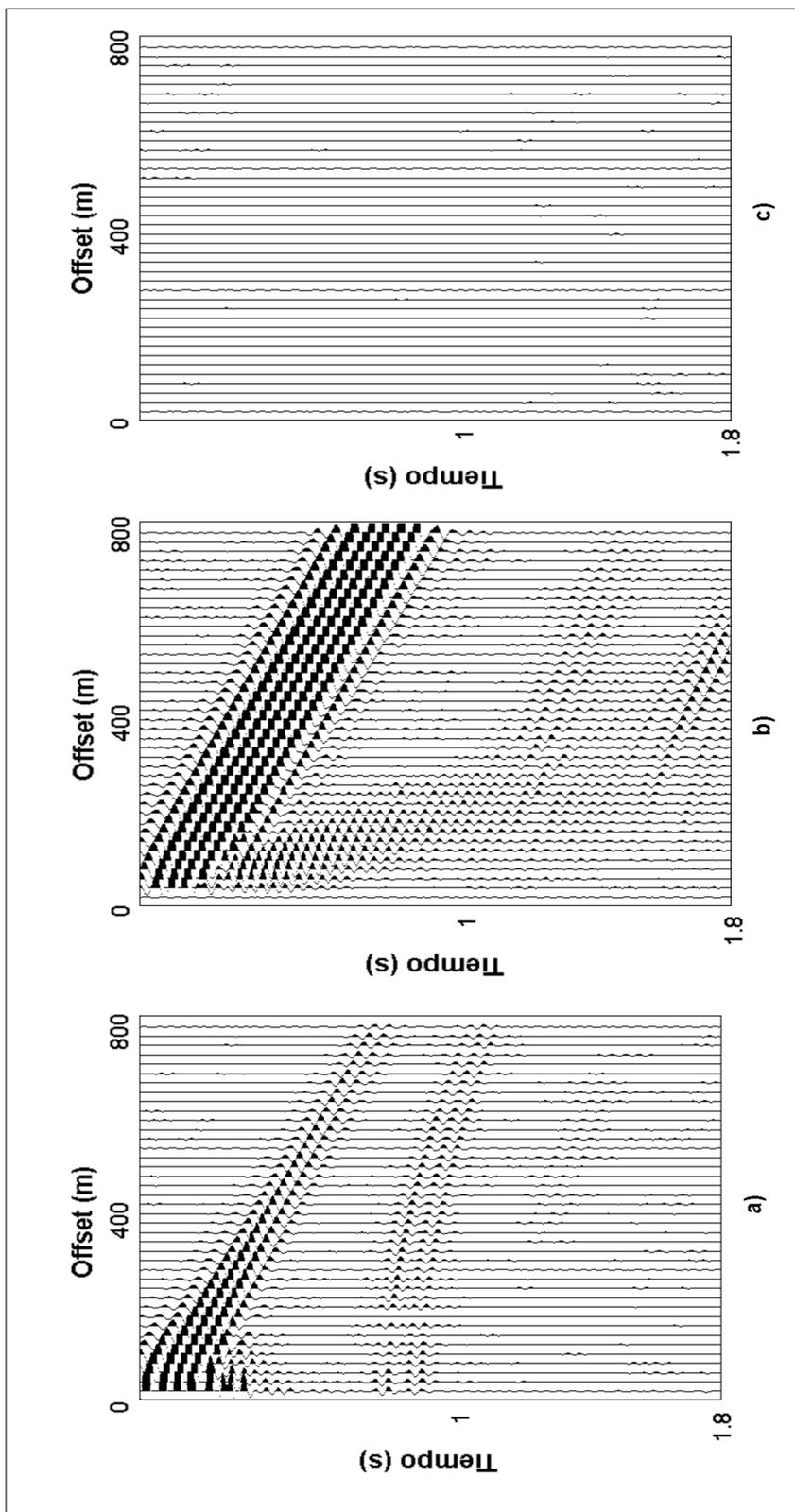


Figura 5.7: Autoimagen 1 banda 2, componentes a) vertical b) radial c) transversal.

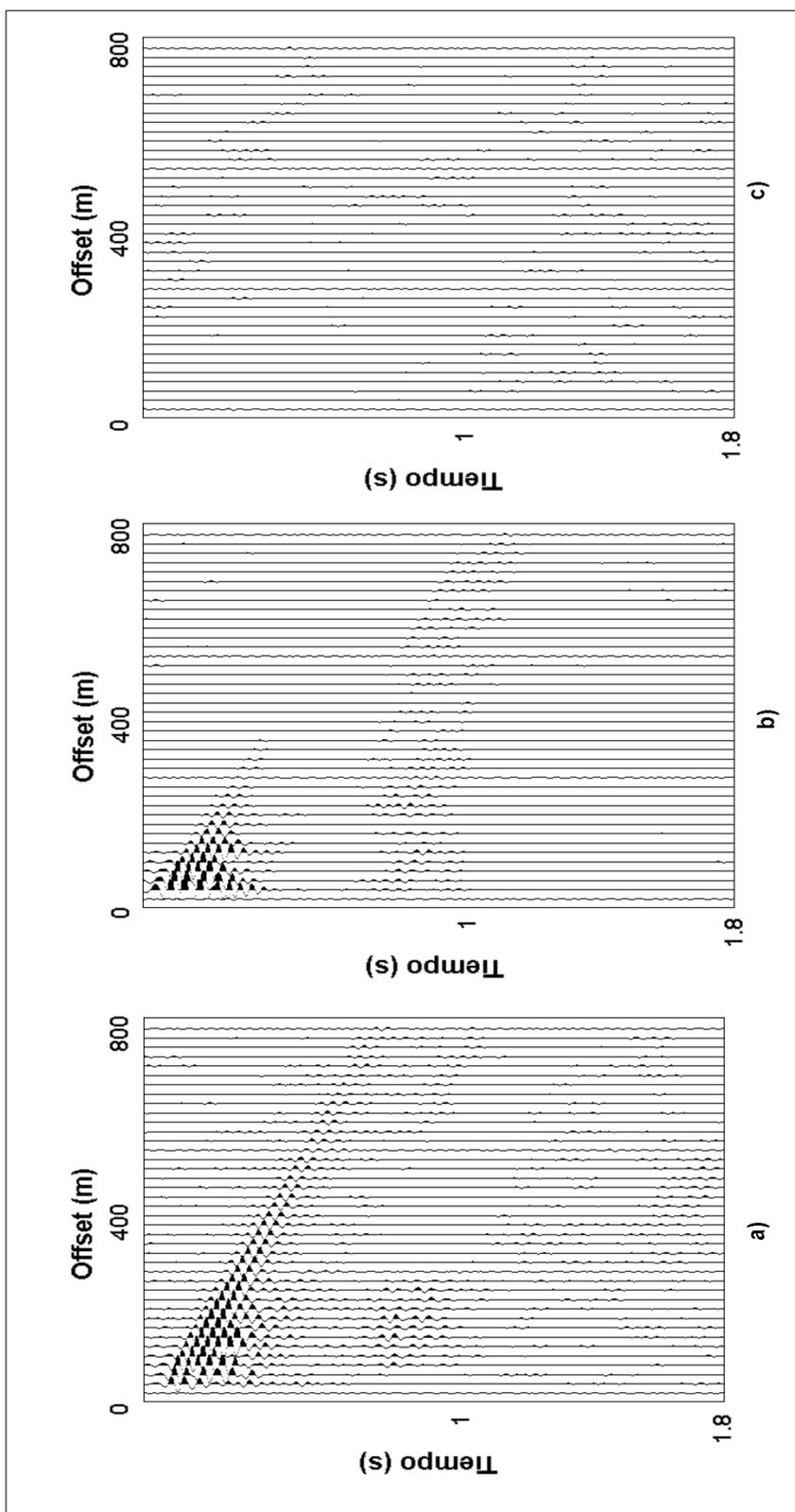


Figura 5.8: Autoimagen 2 banda 2, componentes a) vertical b) radial c) transversal.

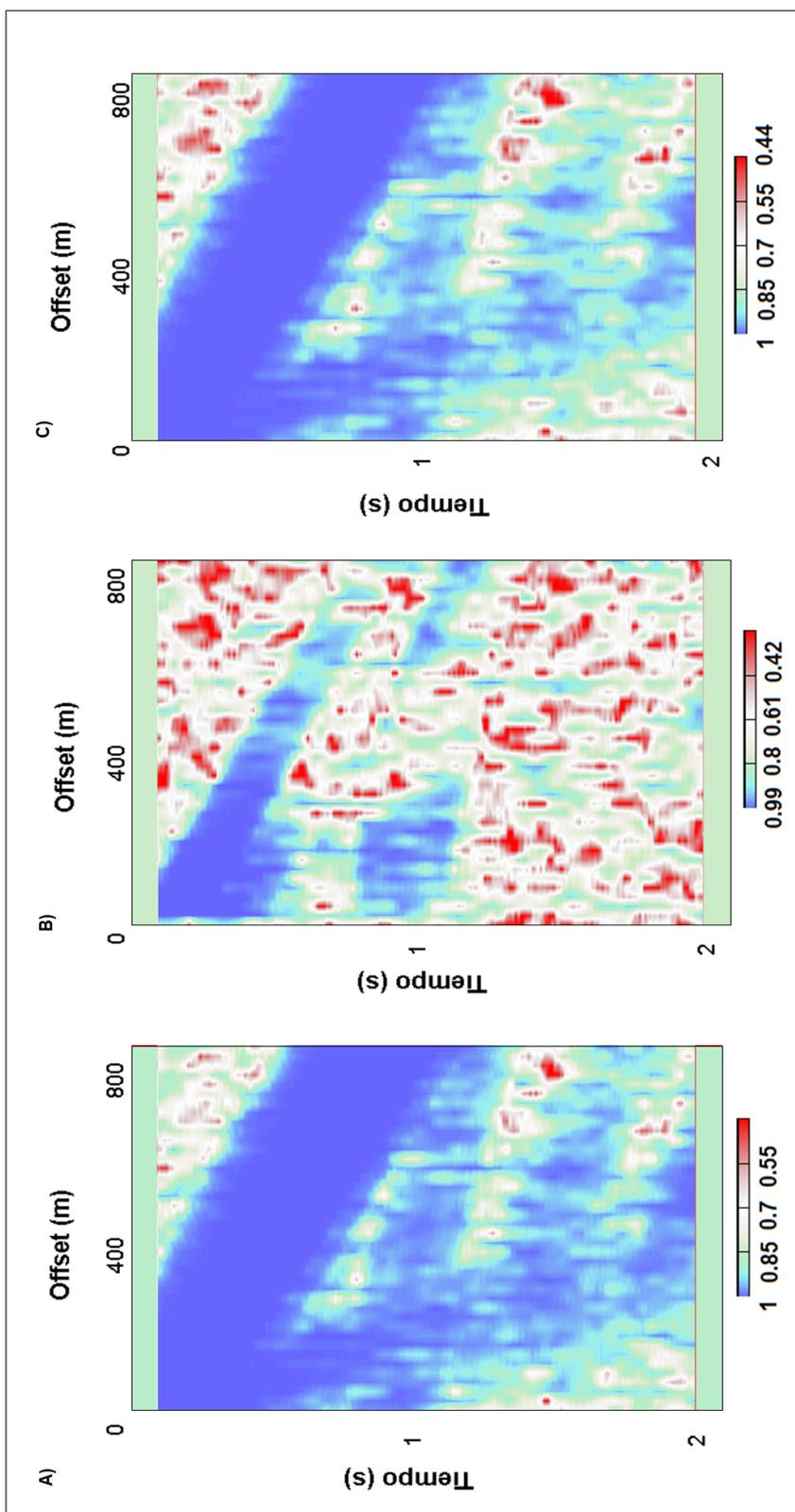


Figura 5.9: Factores de peso banda 2. A) R_1 B) R_2 C) P

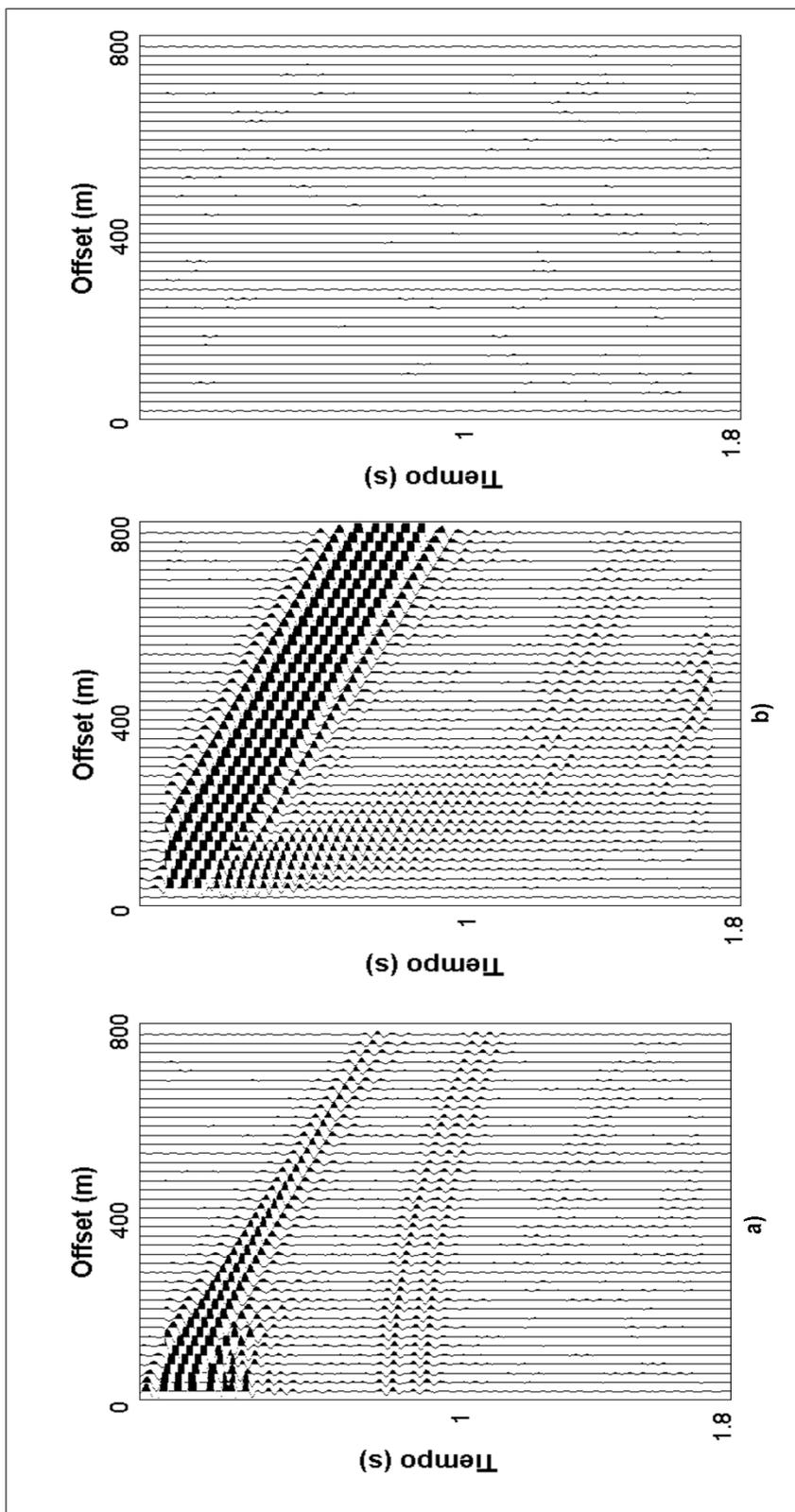


Figura 5.10: Banda 2 filtrada, componentes a) vertical b) radial c) transversal.

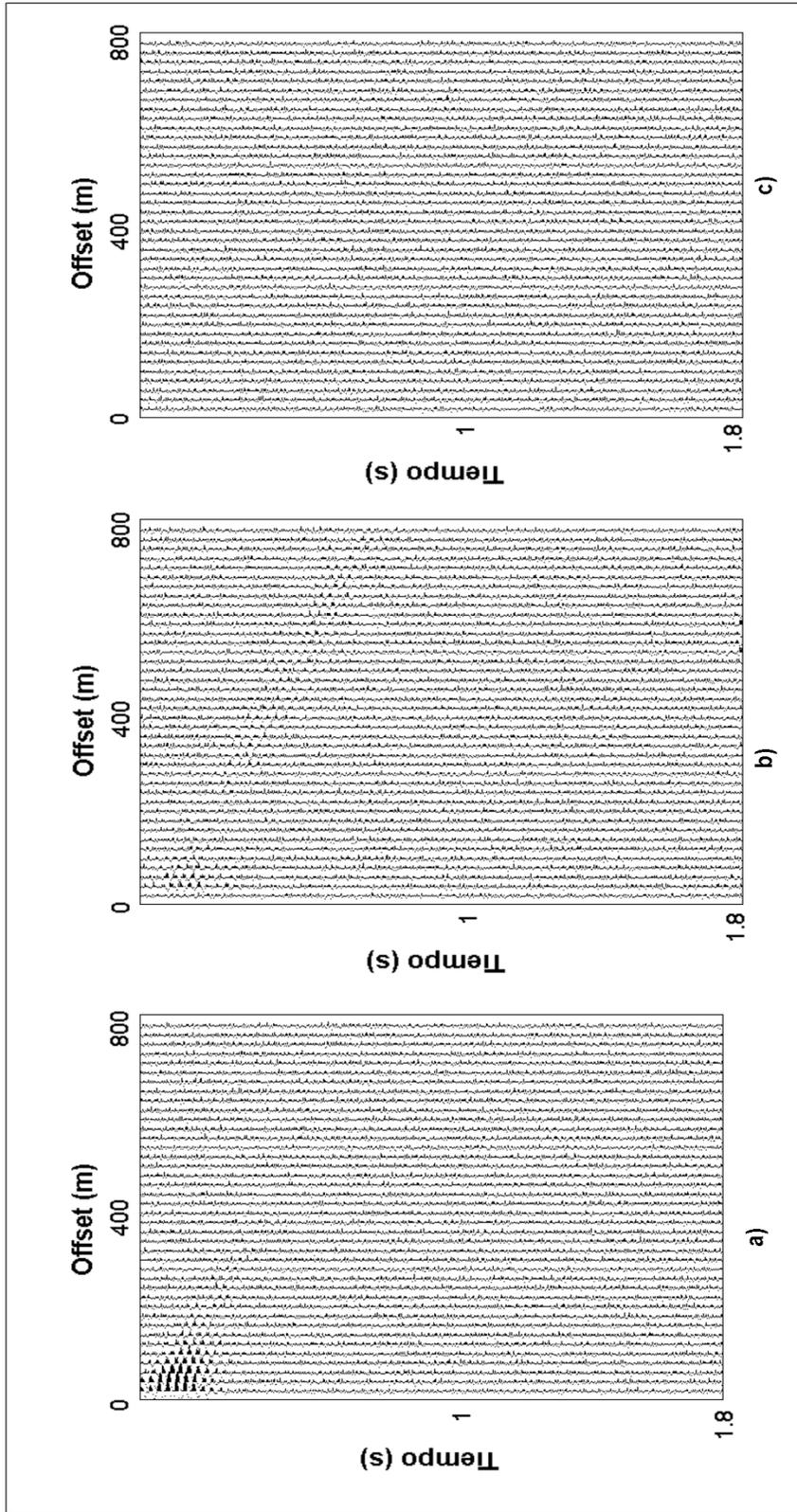


Figura 5.11: Banda 3 $f=32,38,225,250$ Hz, componentes a) vertical b) radial c) transversal.

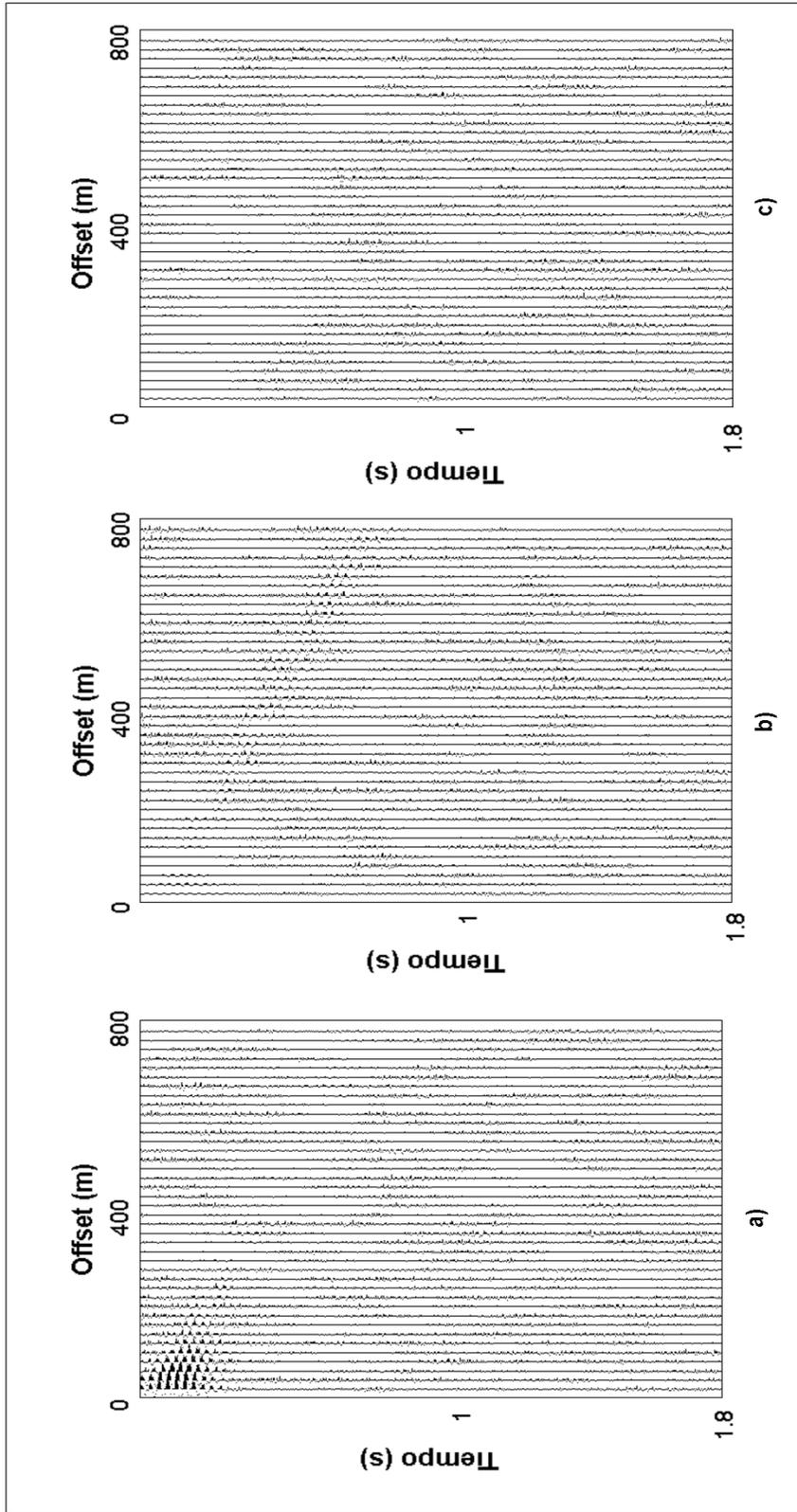


Figura 5.12: Autoimagen 1 banda 3, componentes a) vertical b) radial c) transversal.

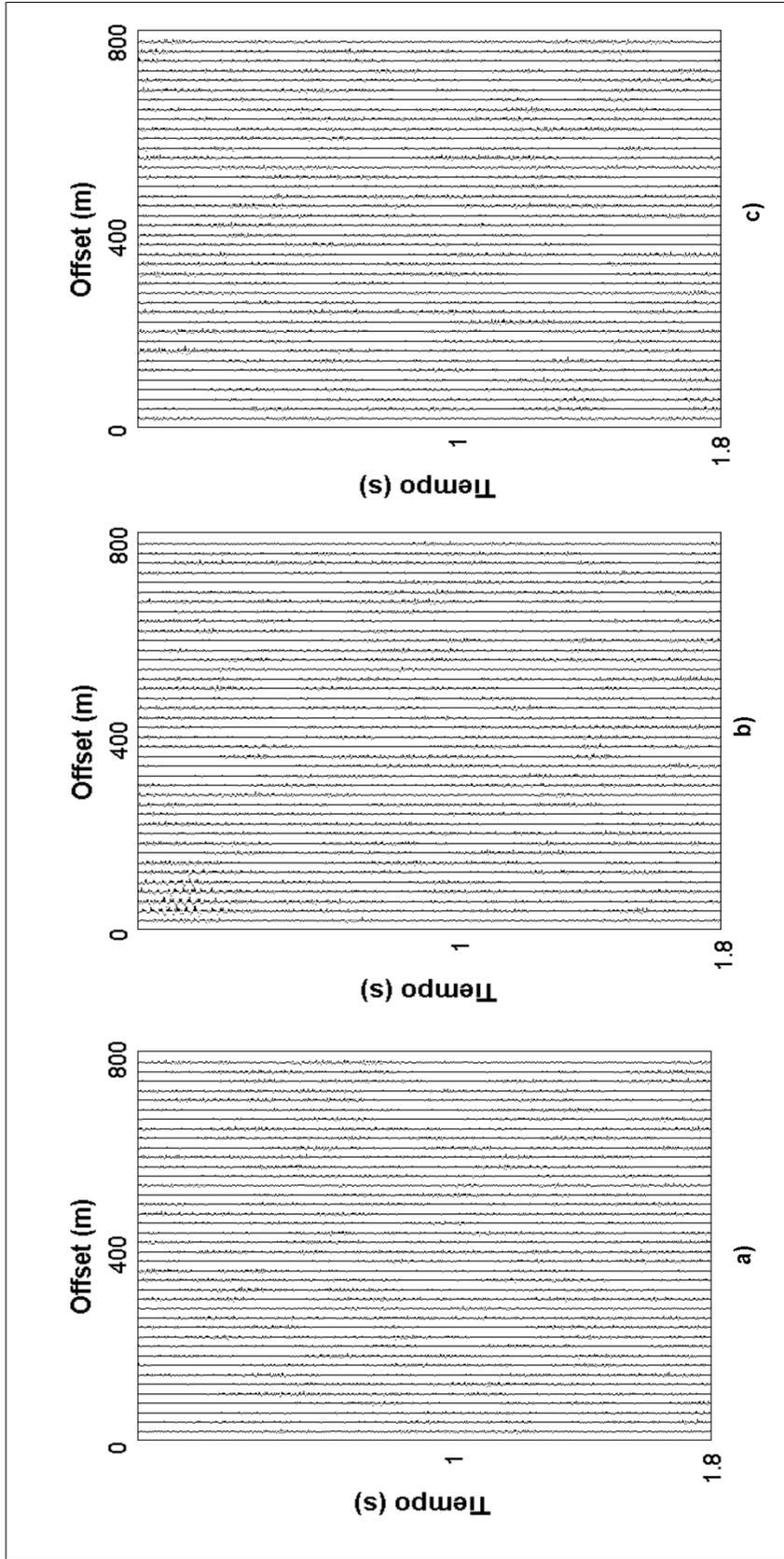


Figura 5.13: Autoimagen 2 banda 3, componentes a) vertical b) radial c) transversal.

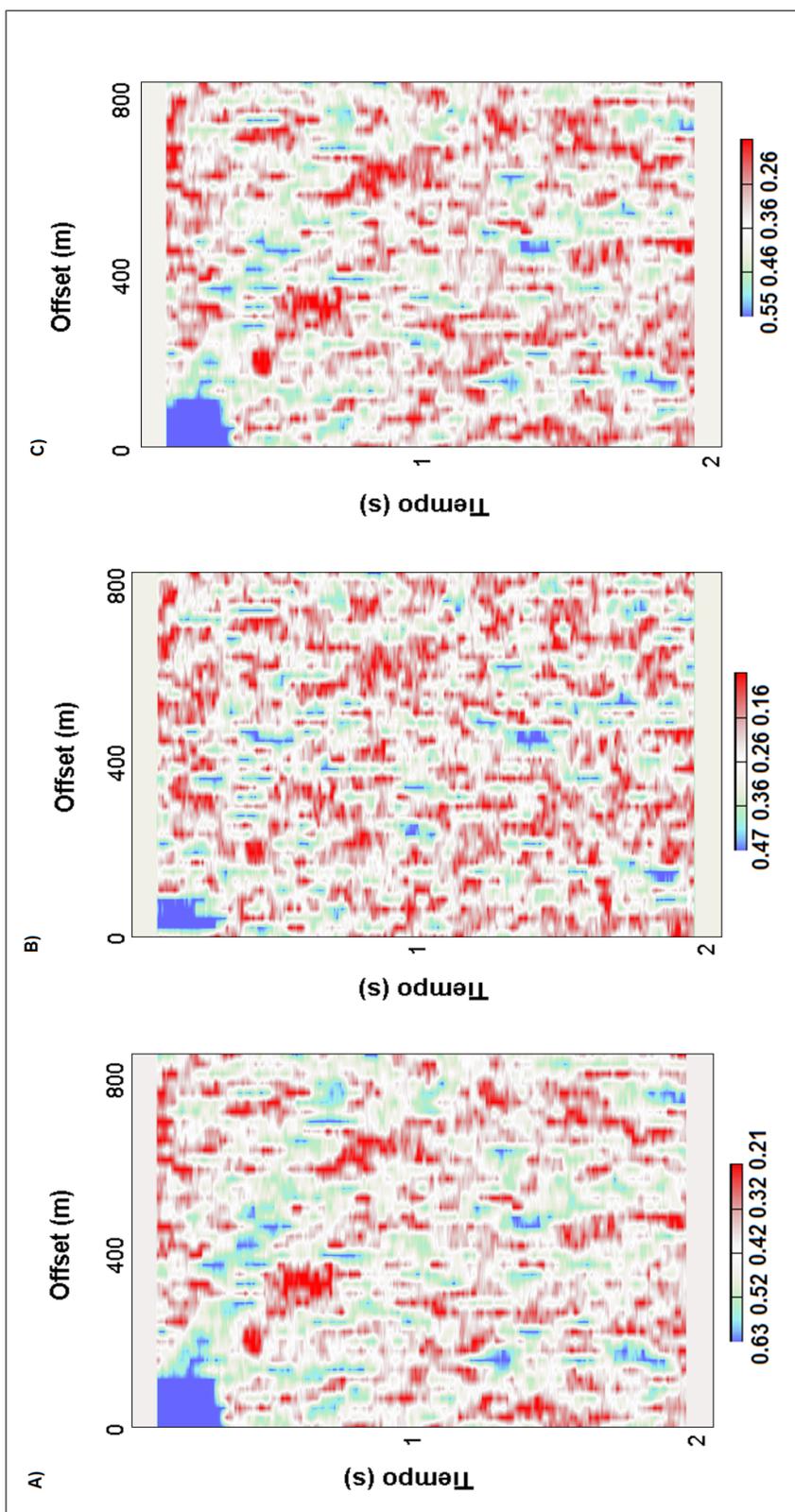


Figura 5.14: Factores de peso banda 3. A) R_1 B) R_2 C) P

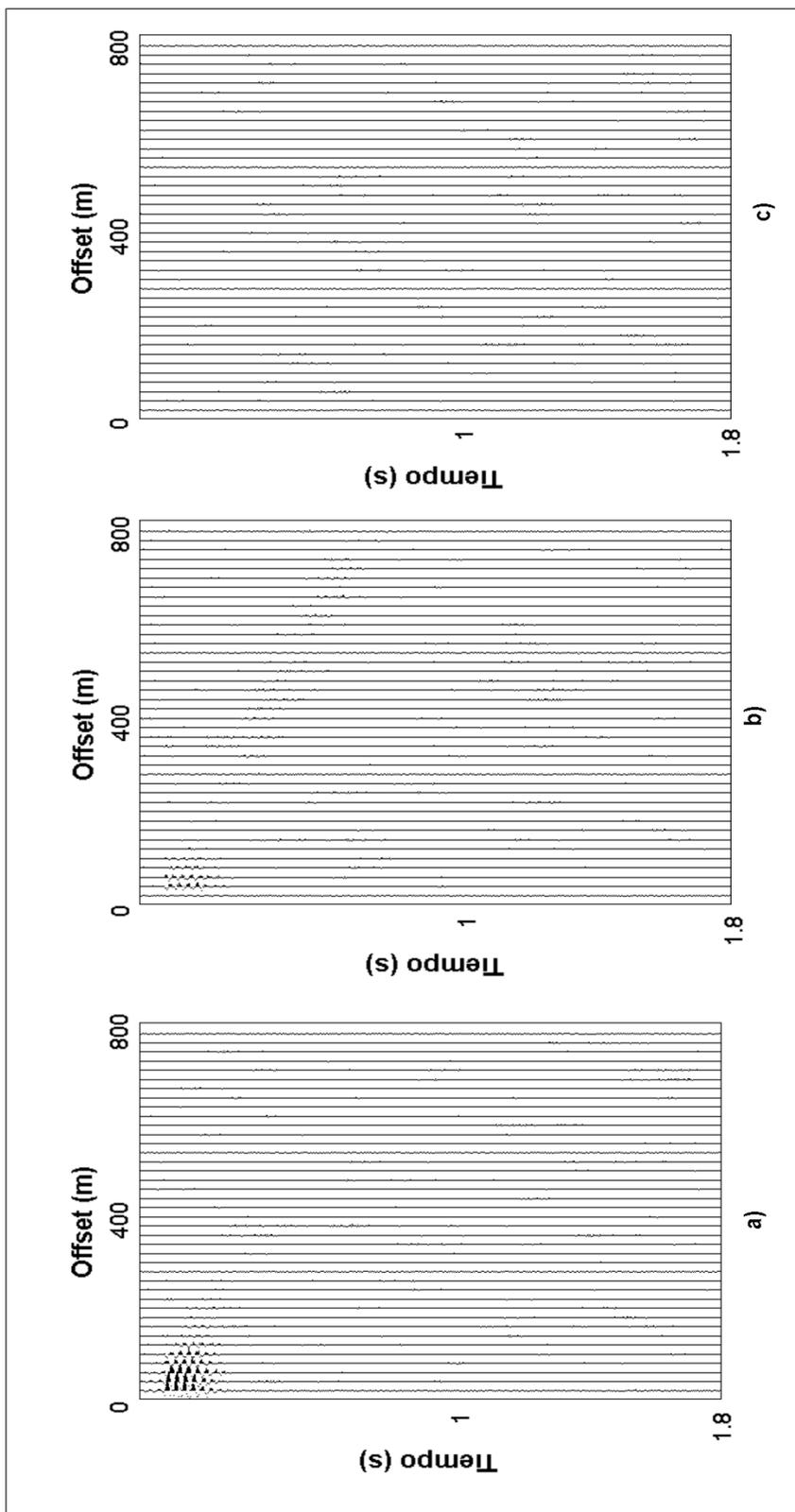


Figura 5.15: Banda 3 filtrada, componentes a) vertical b) radial c) transversal.

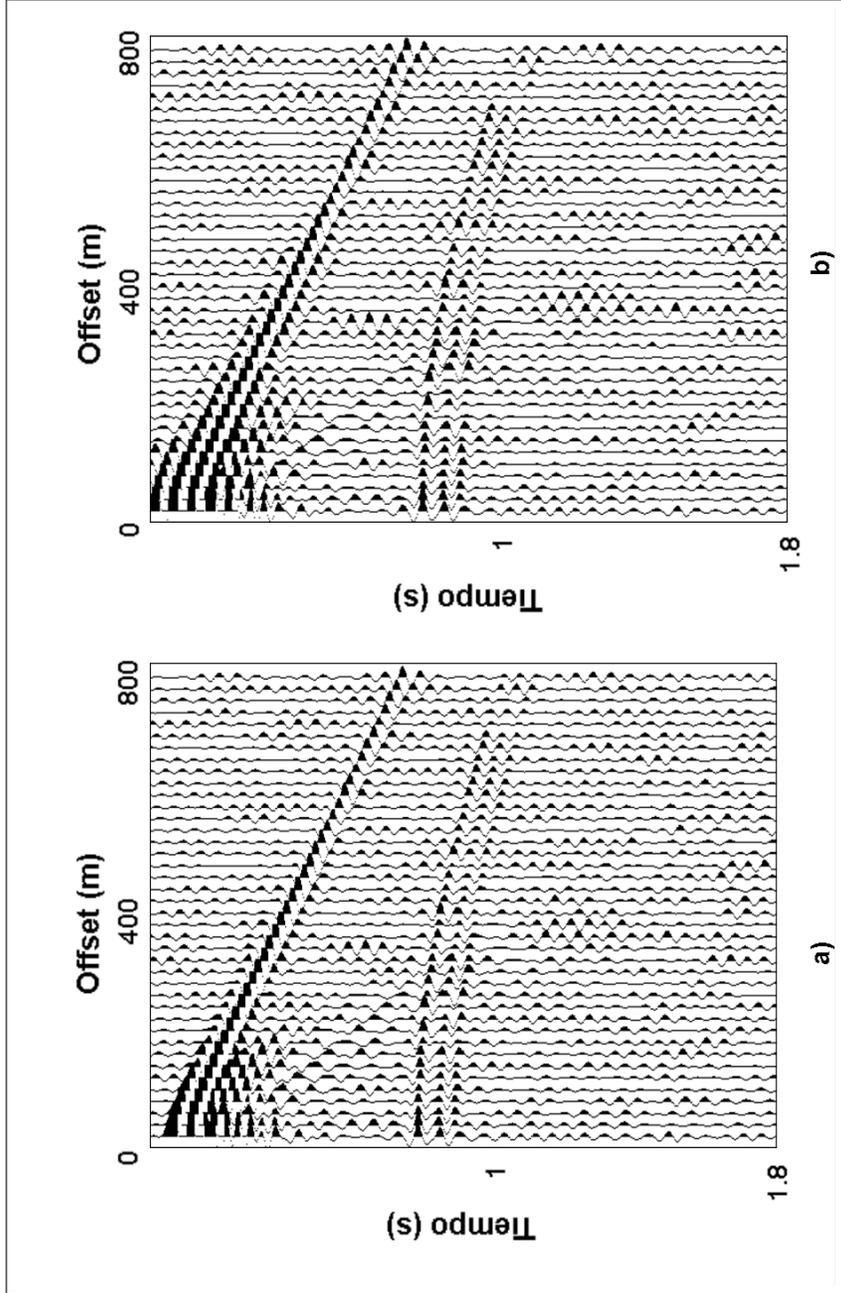


Figura 5.16: Registros con ruido con frecuencia central 20Hz . a) Componente vertical con ruido b) Componente vertical filtrada

Apéndice B. Registros sísmicos Junín:

Los registros sísmicos de Junín, componente vertical.

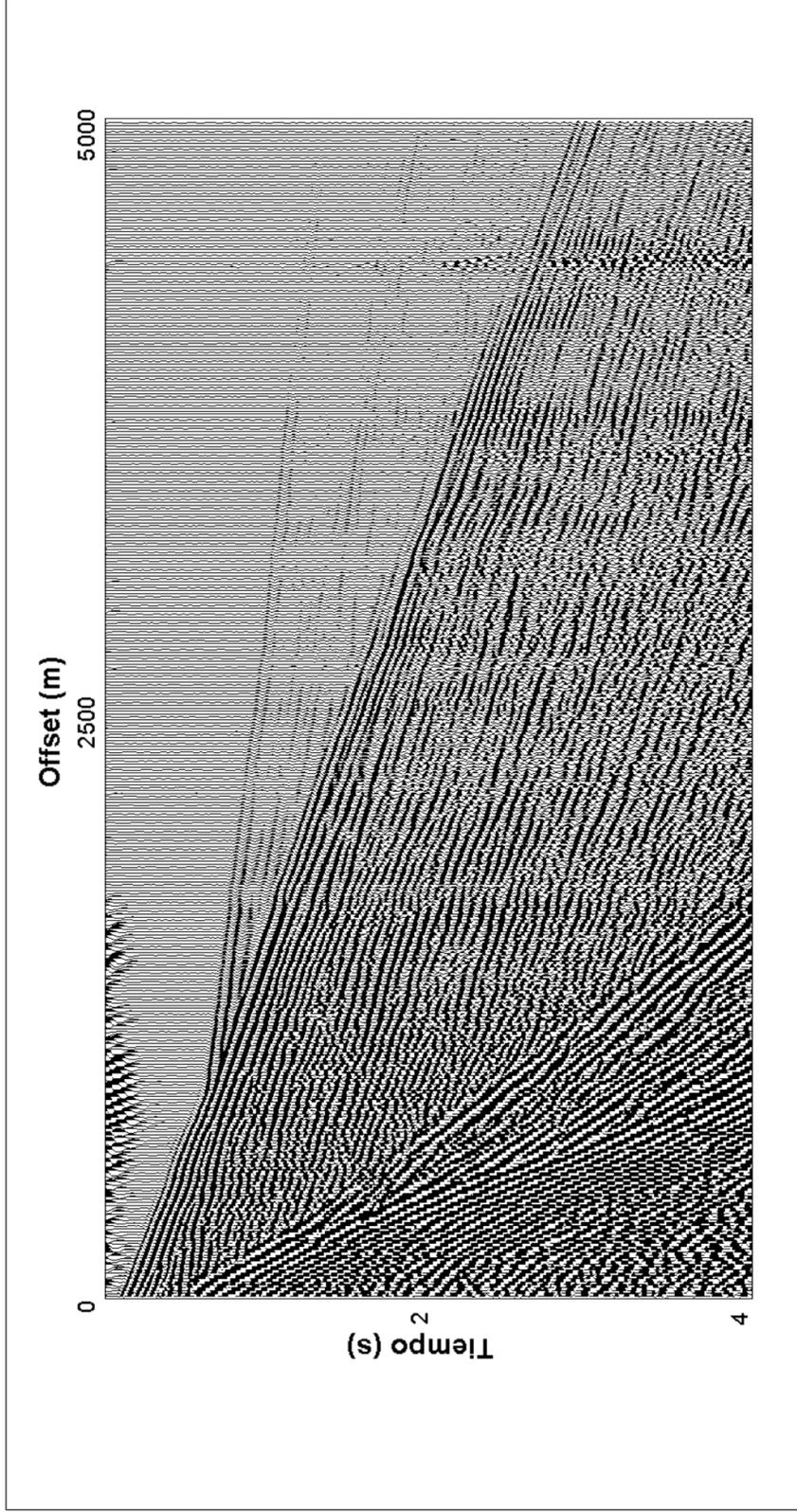


Figura 5.17: Componente vertical banda 1 de los datos sísmicos del bloque Junín, $f=4,8,12,30$ Hz .

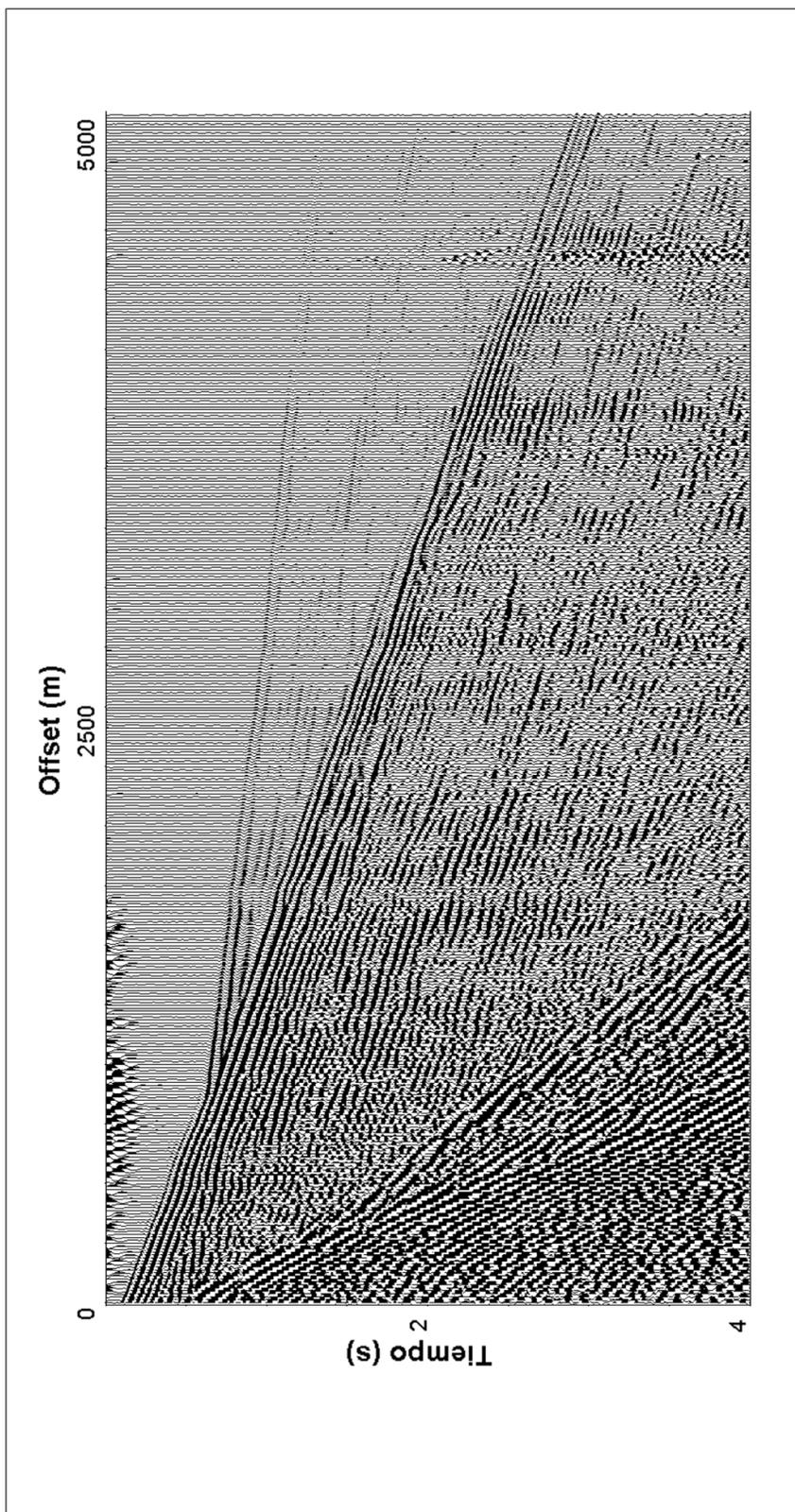


Figura 5.18: Autoimagen 1 banda 1 de los datos sísmicos del bloque Junín, componente vertical

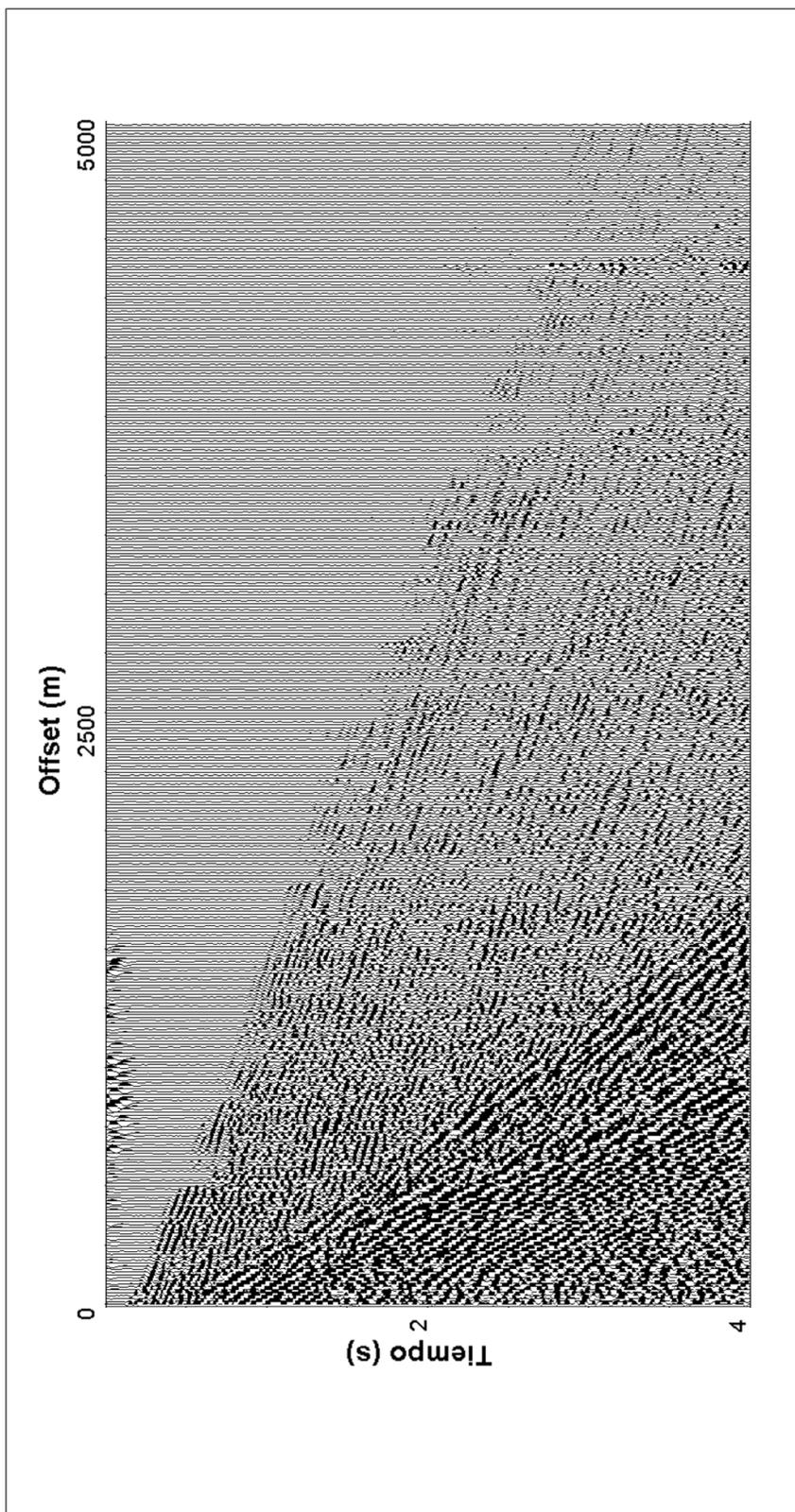


Figura 5.19: Autoimagen 2 banda 1 de los datos sísmicos del bloque Junín, componente vertical

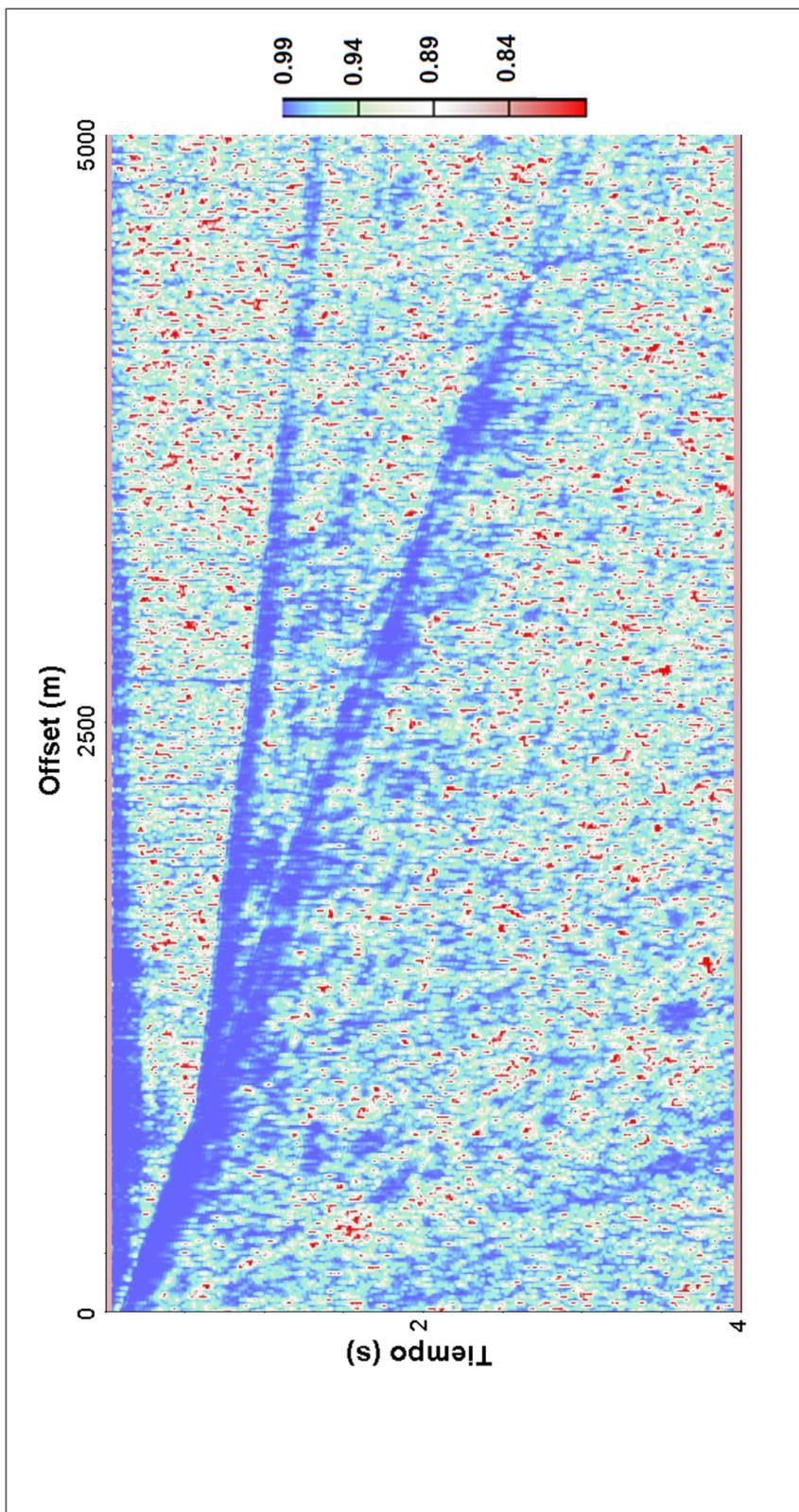


Figura 5.20: R_1 banda 1 de los datos sísmicos del bloque Junín

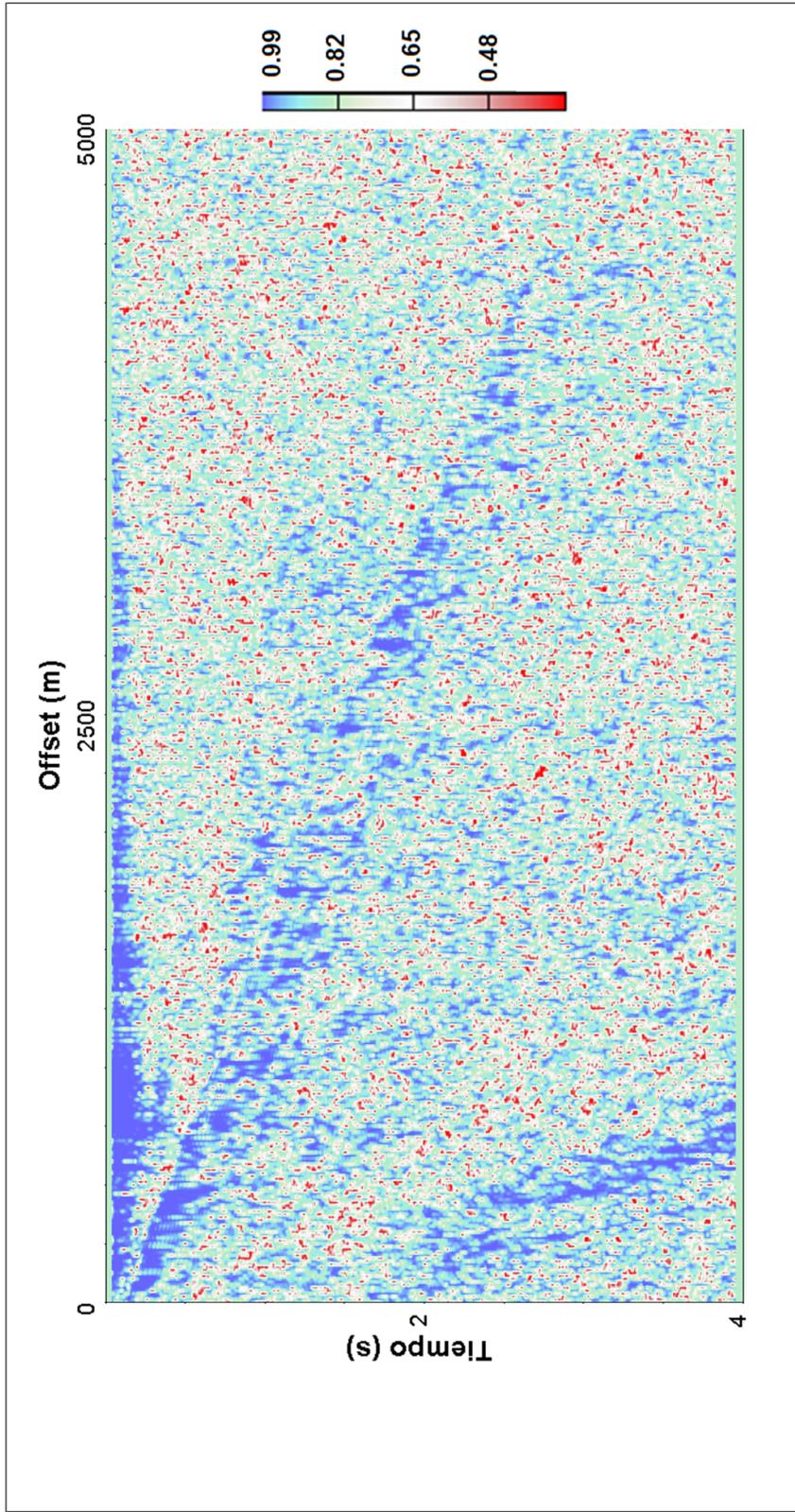


Figura 5.21: R_2 banda 1 de los datos sísmicos del bloque Junín

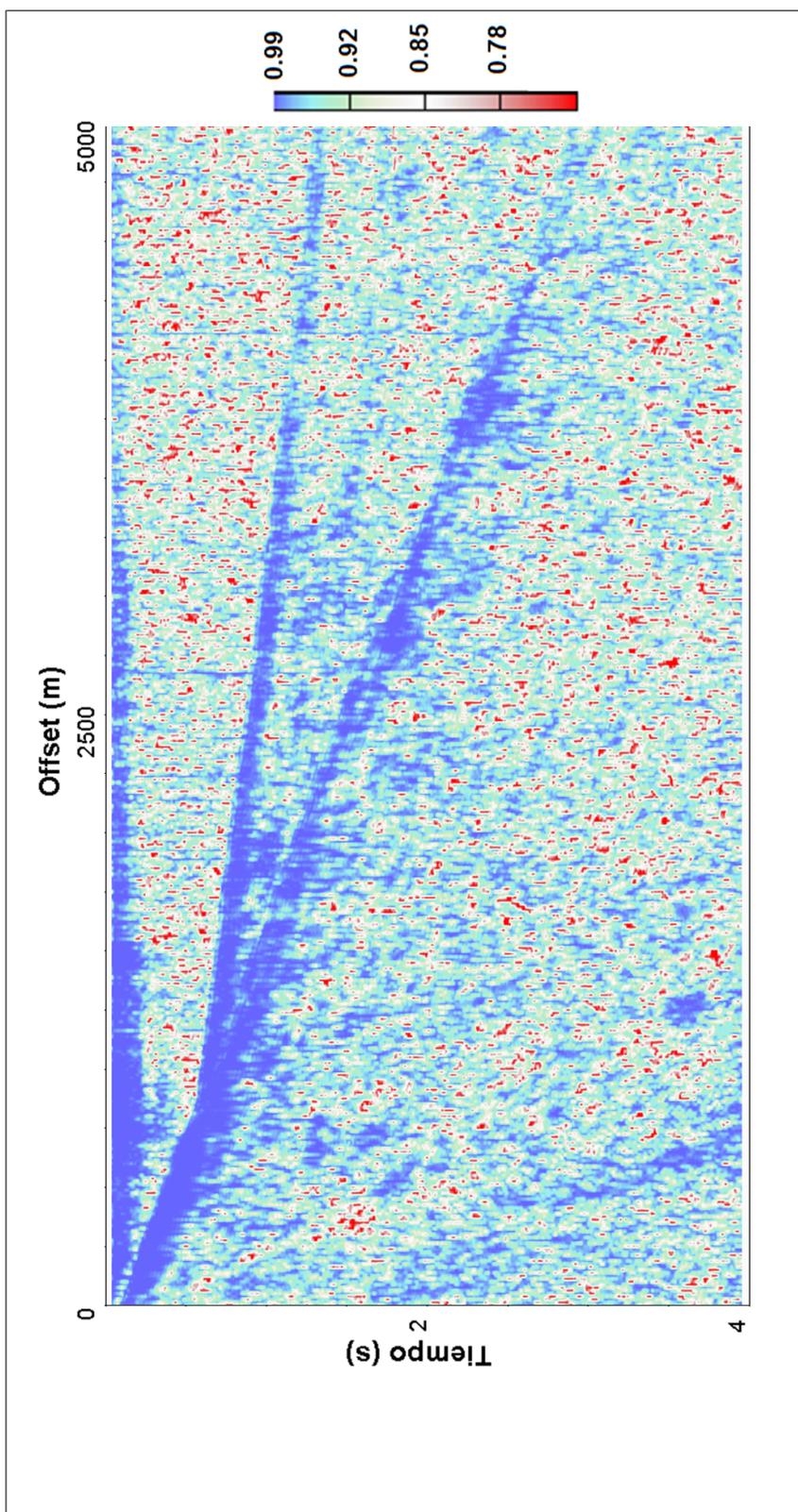


Figura 5.22: P banda 1 de los datos sísmicos del bloque Junín

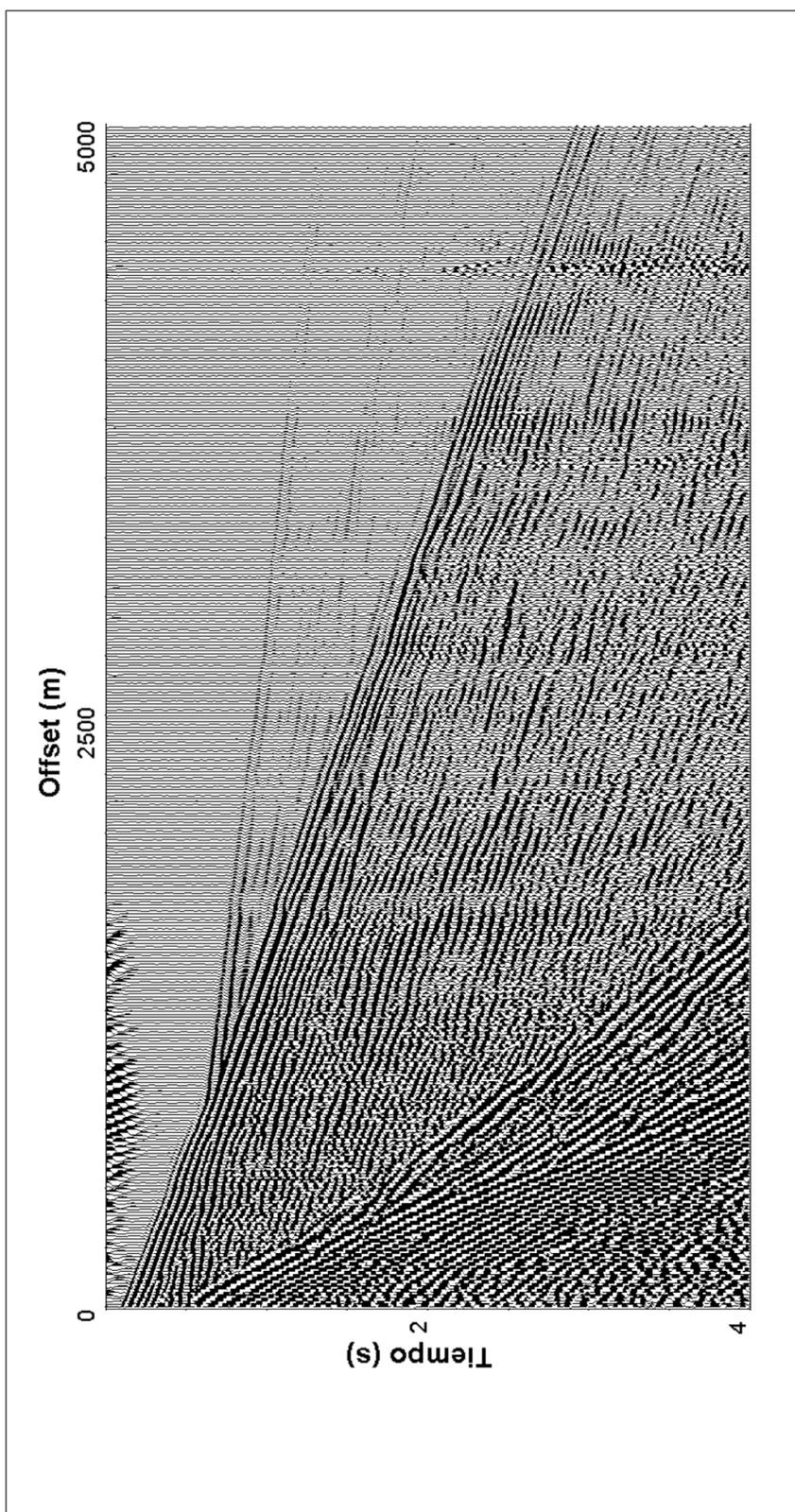


Figura 5.23: Componente vertical filtrada banda 1 de los datos sísmicos del bloque Junín

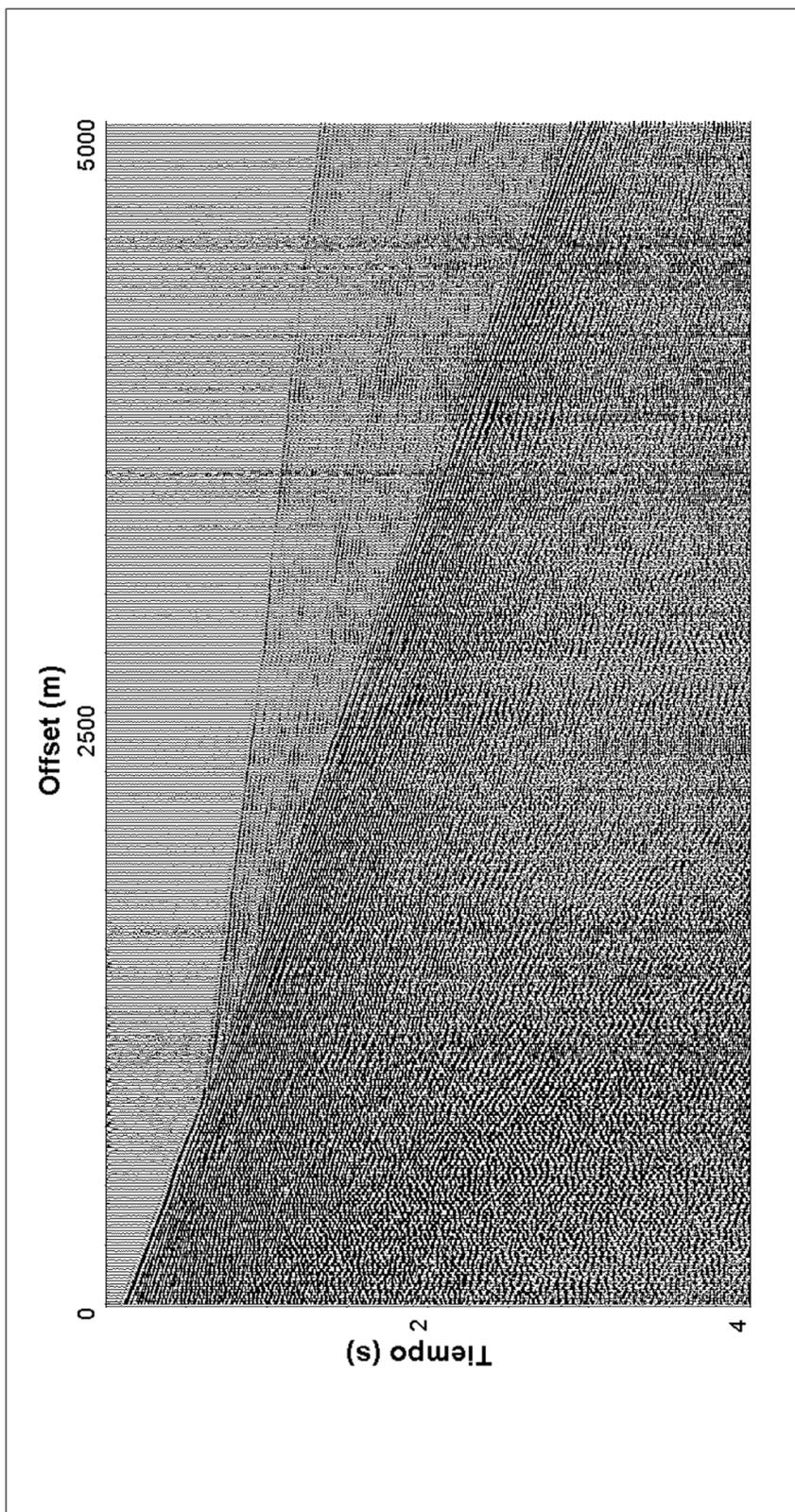


Figura 5.24: Componente vertical banda 2 de los datos sísmicos del bloque Junín, $f=12,30,100,120$ Hz.

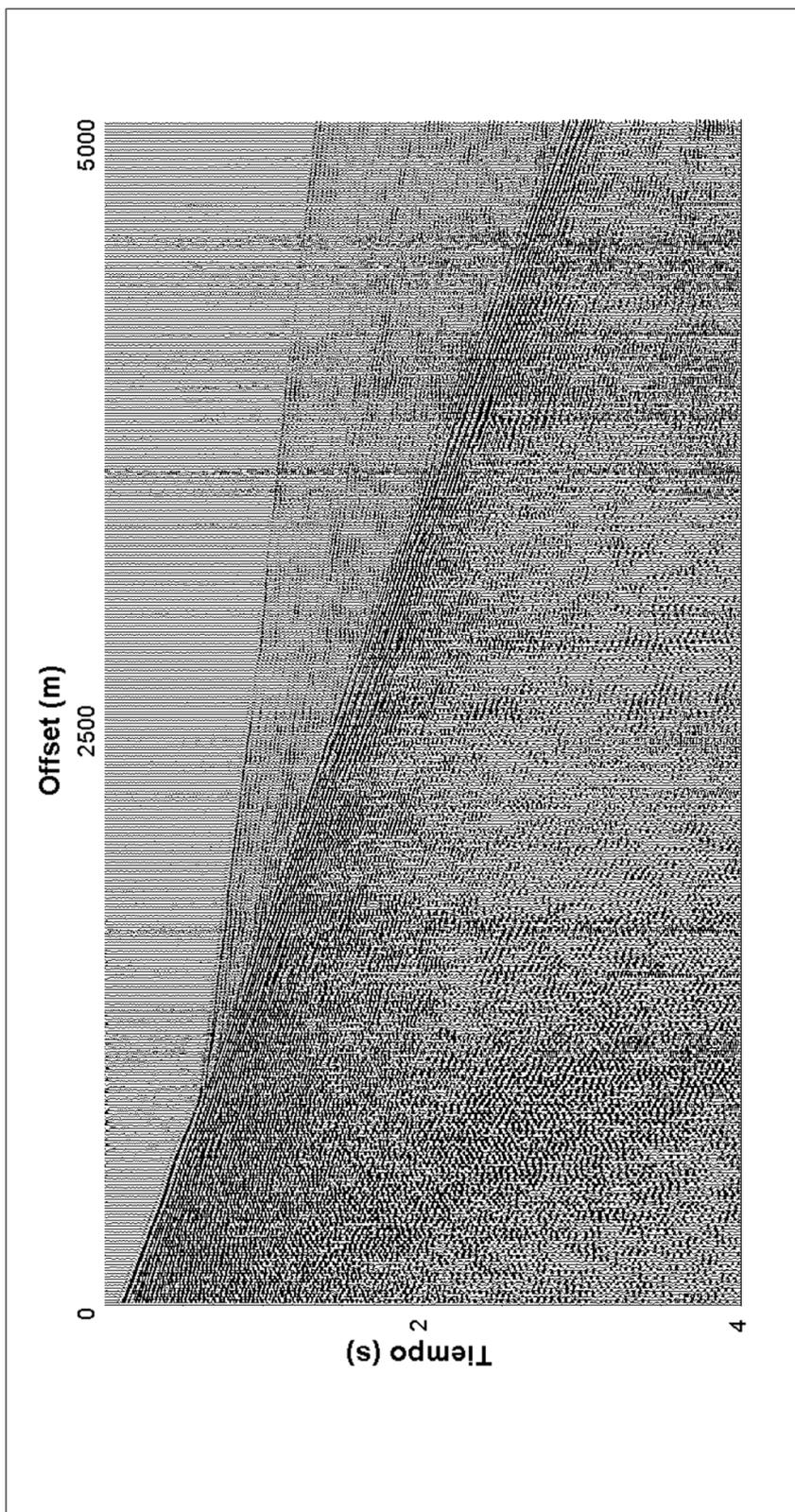


Figura 5.25: Autoimagen 1 banda 2 de los datos sísmicos del bloque Junín, componente vertical

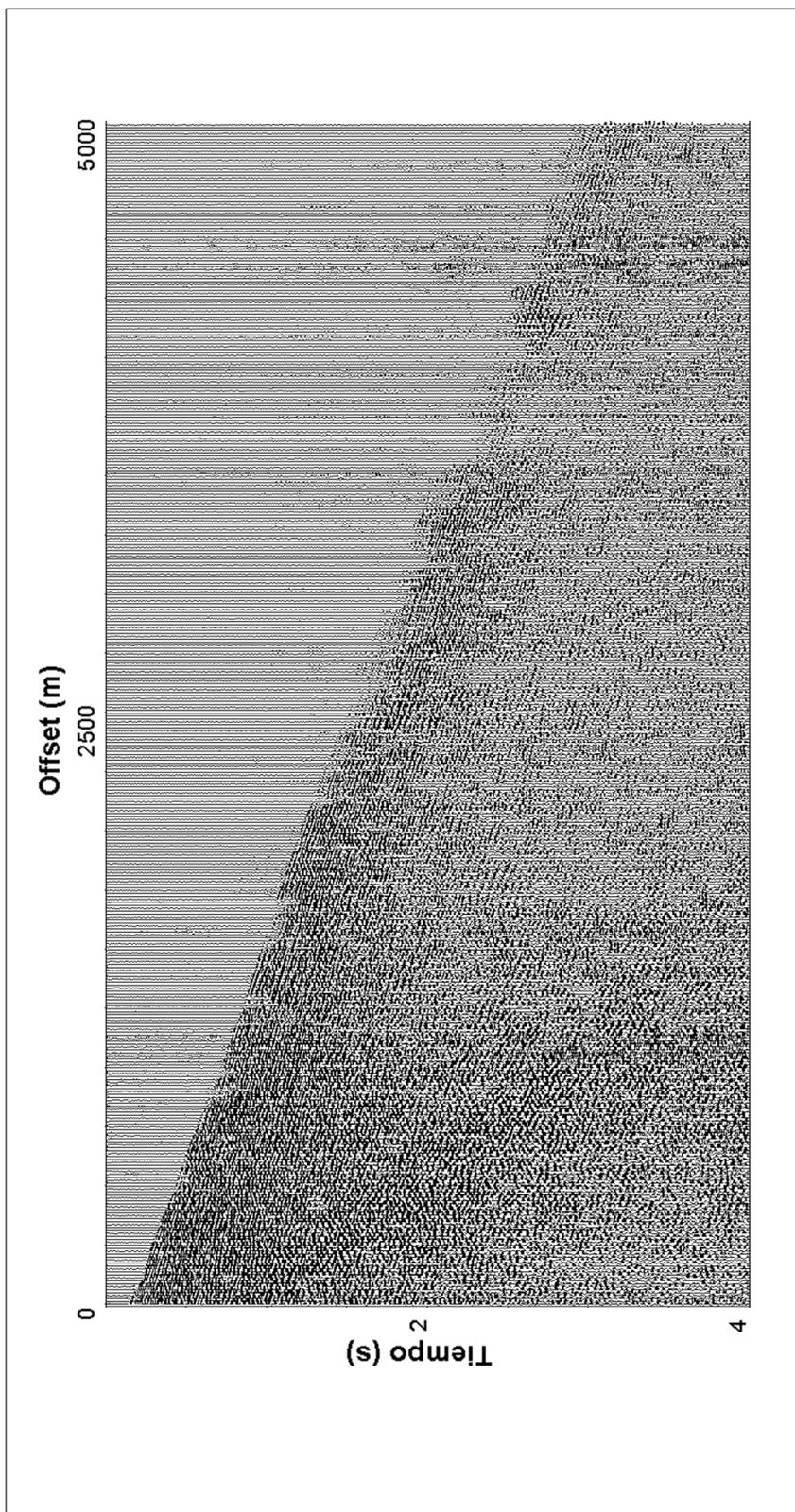


Figura 5.26: Autoimagen 2 banda 2 de los datos sísmicos del bloque Junín, componente vertical

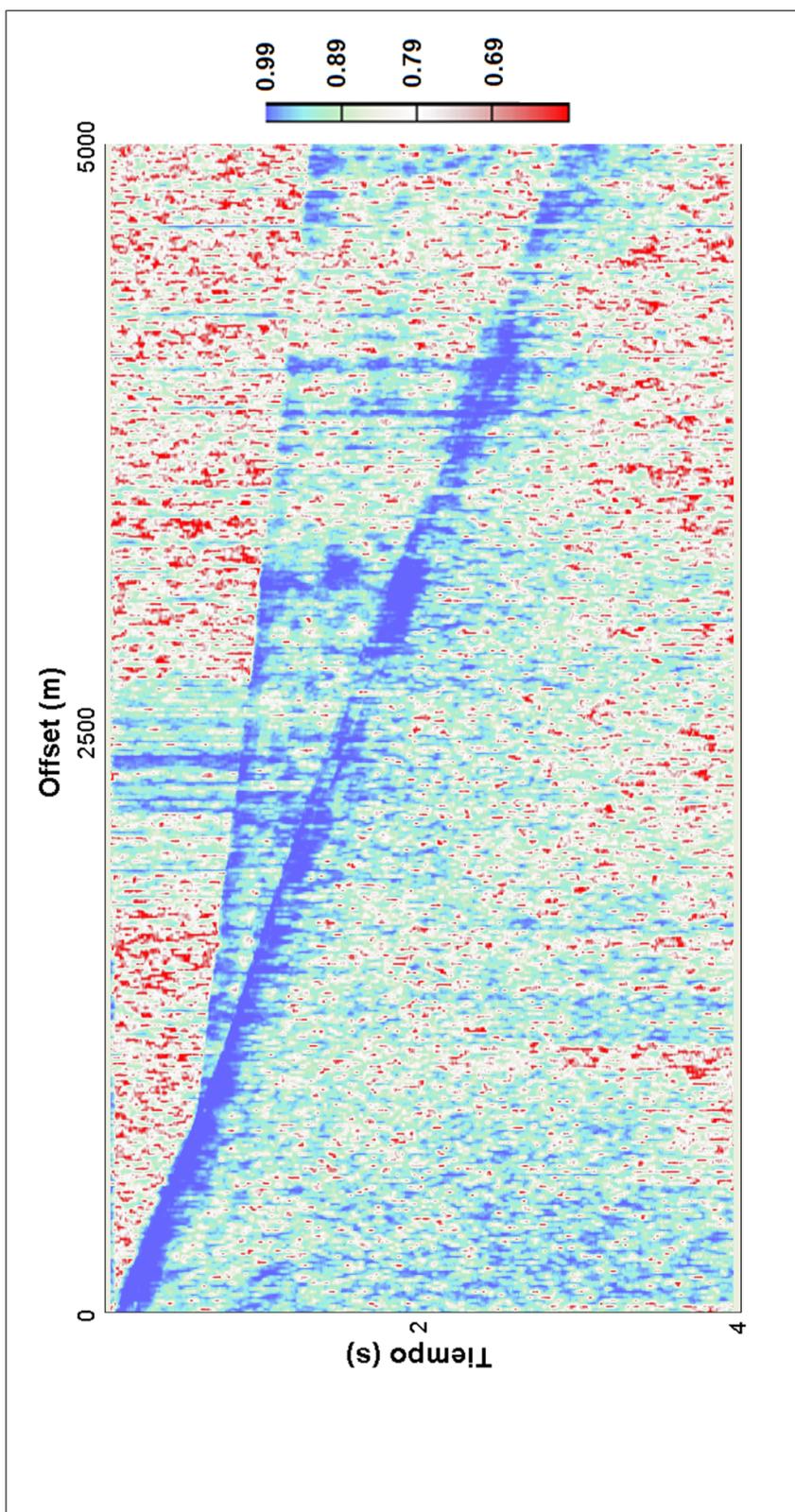


Figura 5.27: R_1 banda 2 de los datos sísmicos del bloque Junín

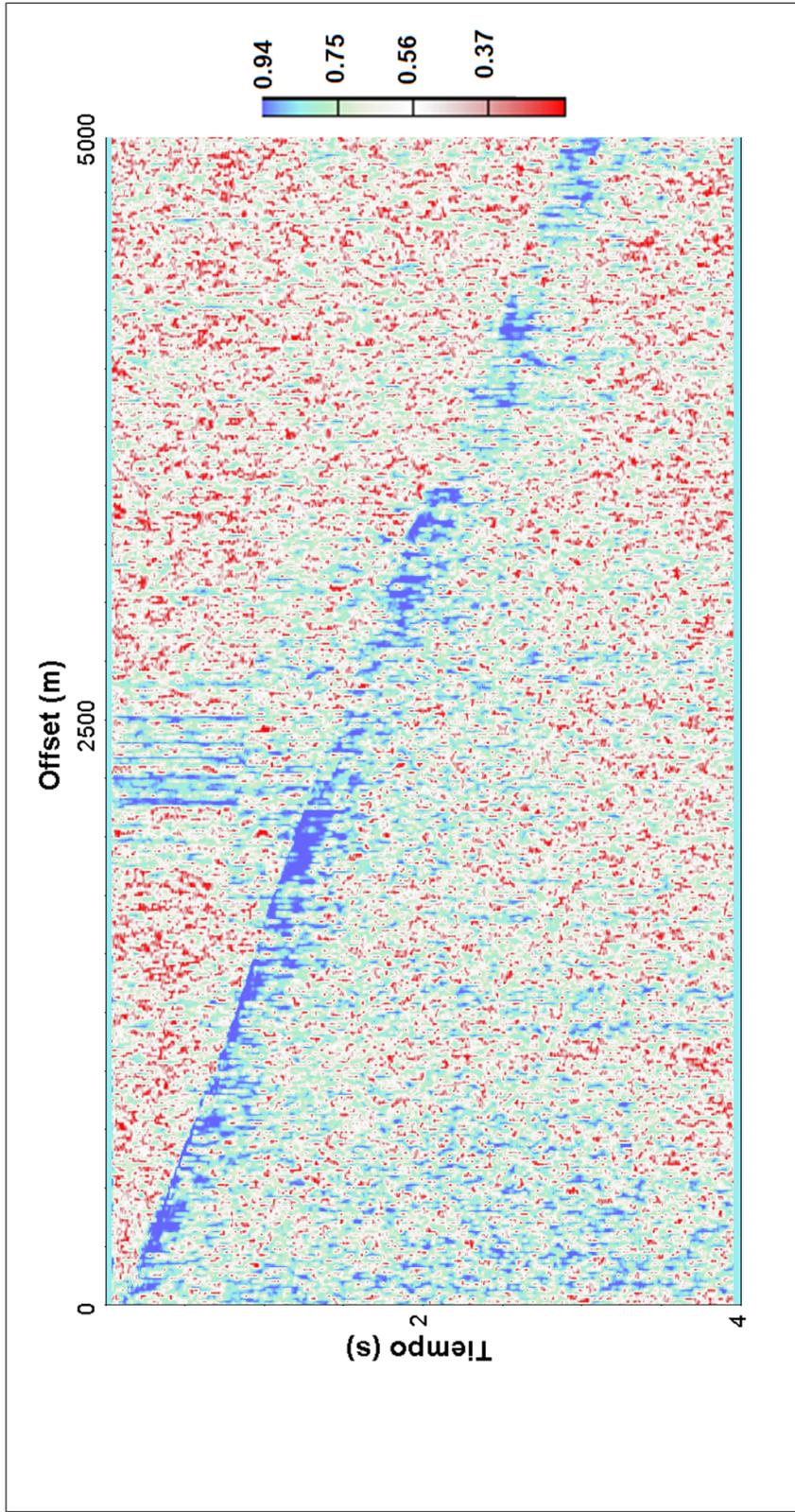


Figura 5.28: R_2 banda 2 de los datos sísmicos del bloque Junín

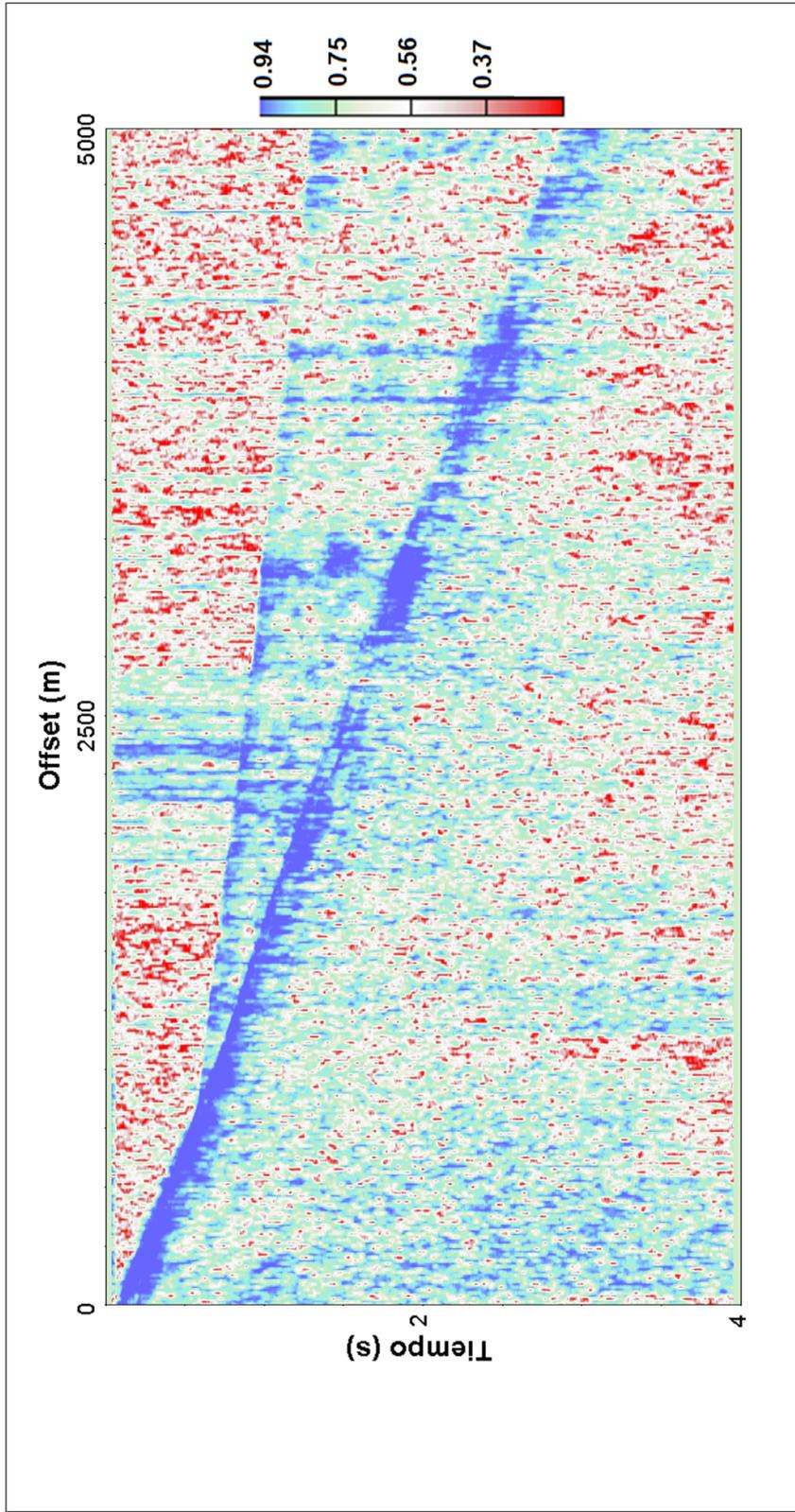


Figura 5.29: P banda 2 de los datos sísmicos del bloque Junín

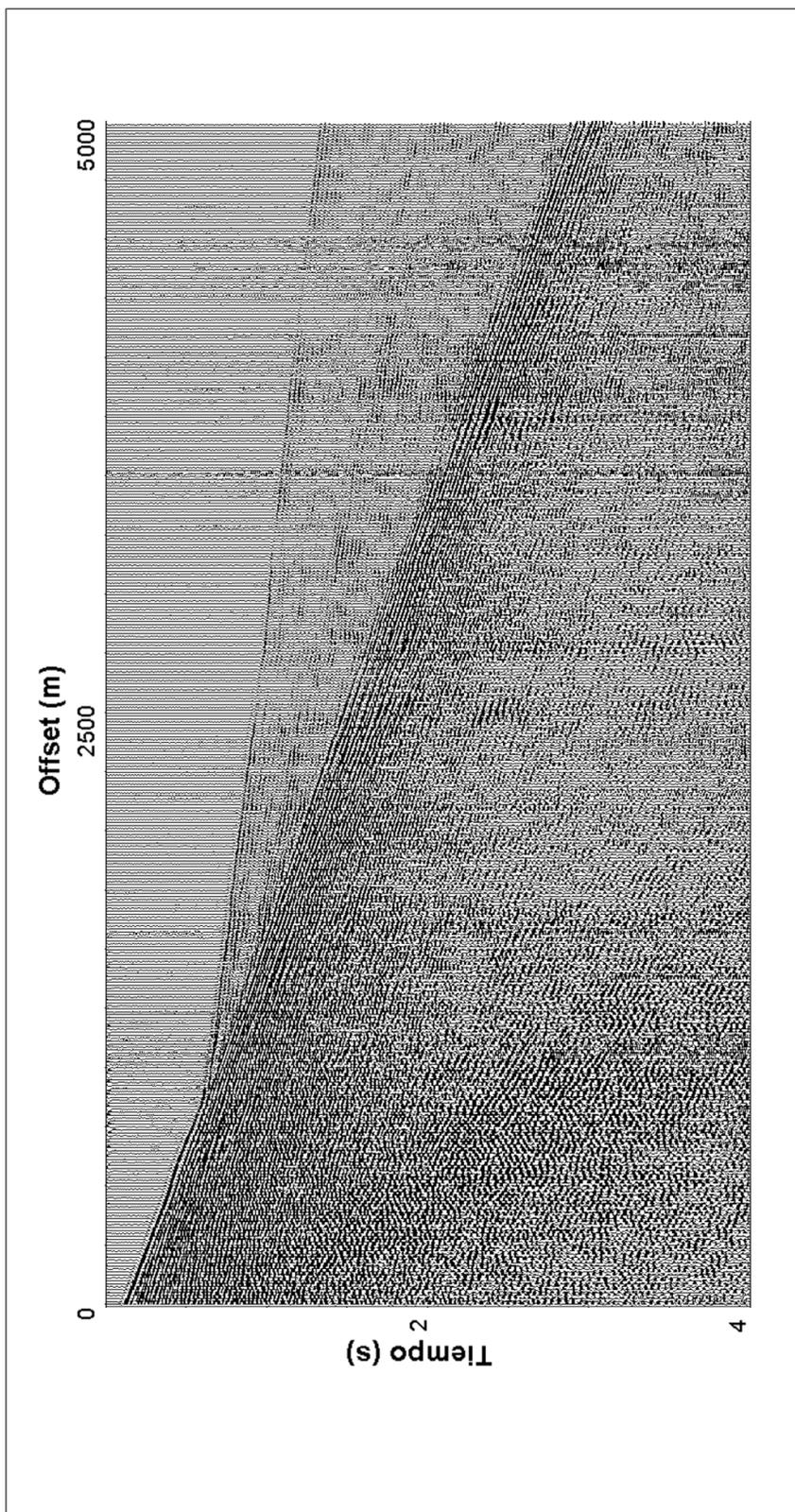


Figura 5.30: Componente vertical filtrada banda 2 de los datos sísmicos del bloque Junín

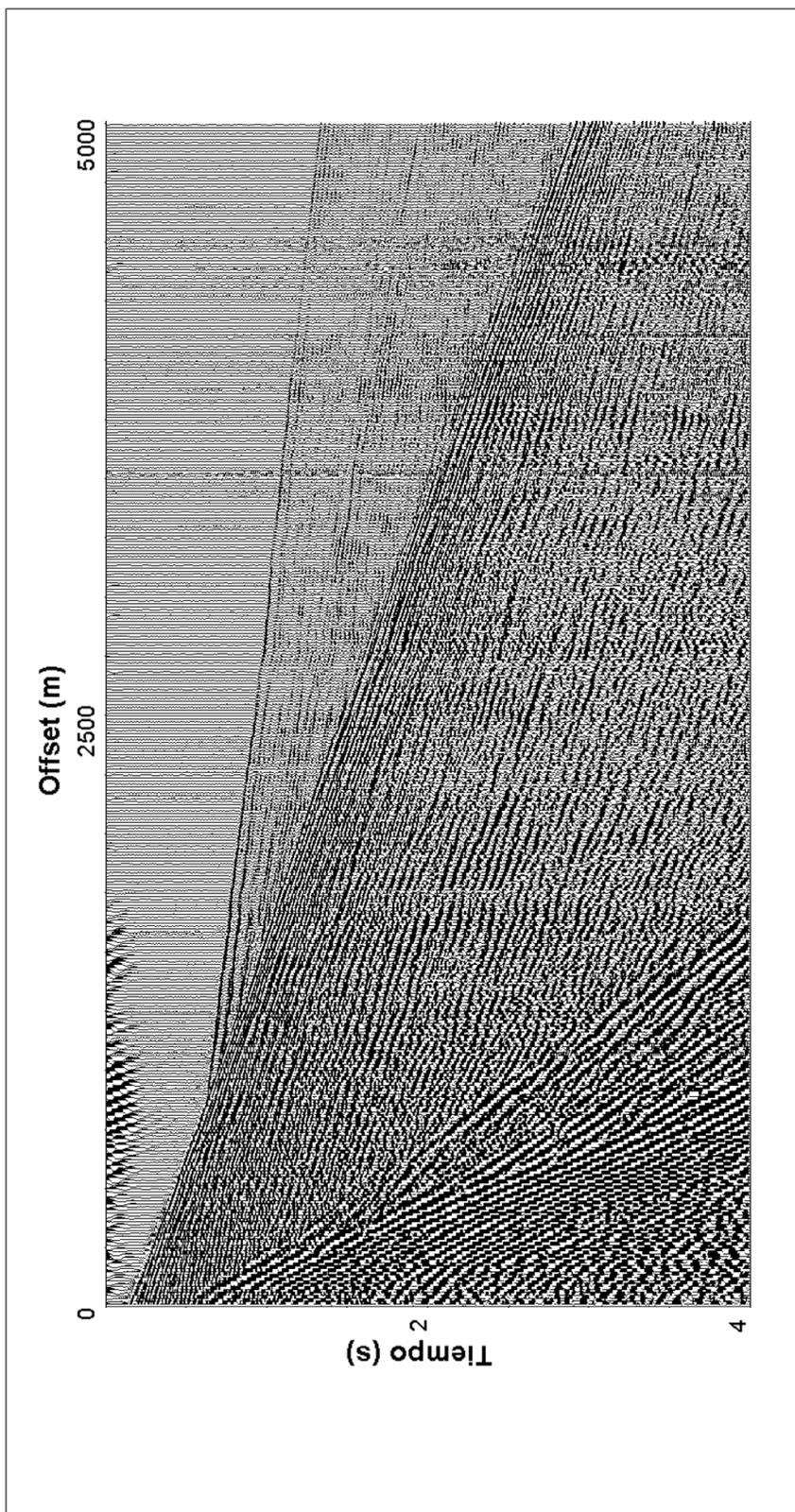


Figura 5.31: Componente vertical filtrada de los datos sísmicos del bloque Junín,

Apéndice C. Registros sísmicos Barinas:

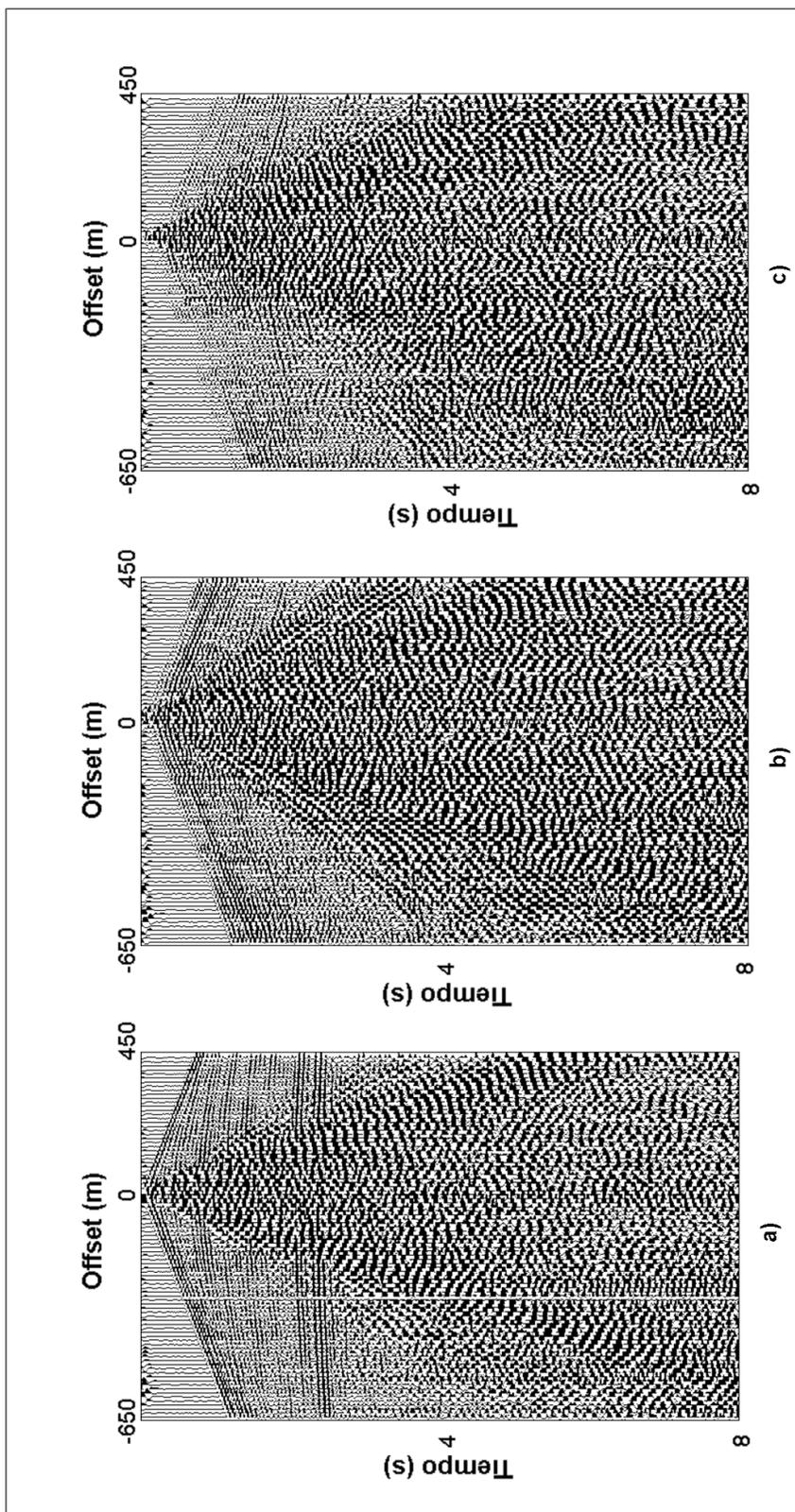


Figura 5.32: Banda 1 de los datos sísmicos de Barinas, $f=4,8,12,30$ Hz y componentes a) vertical b) radial c) transversal.

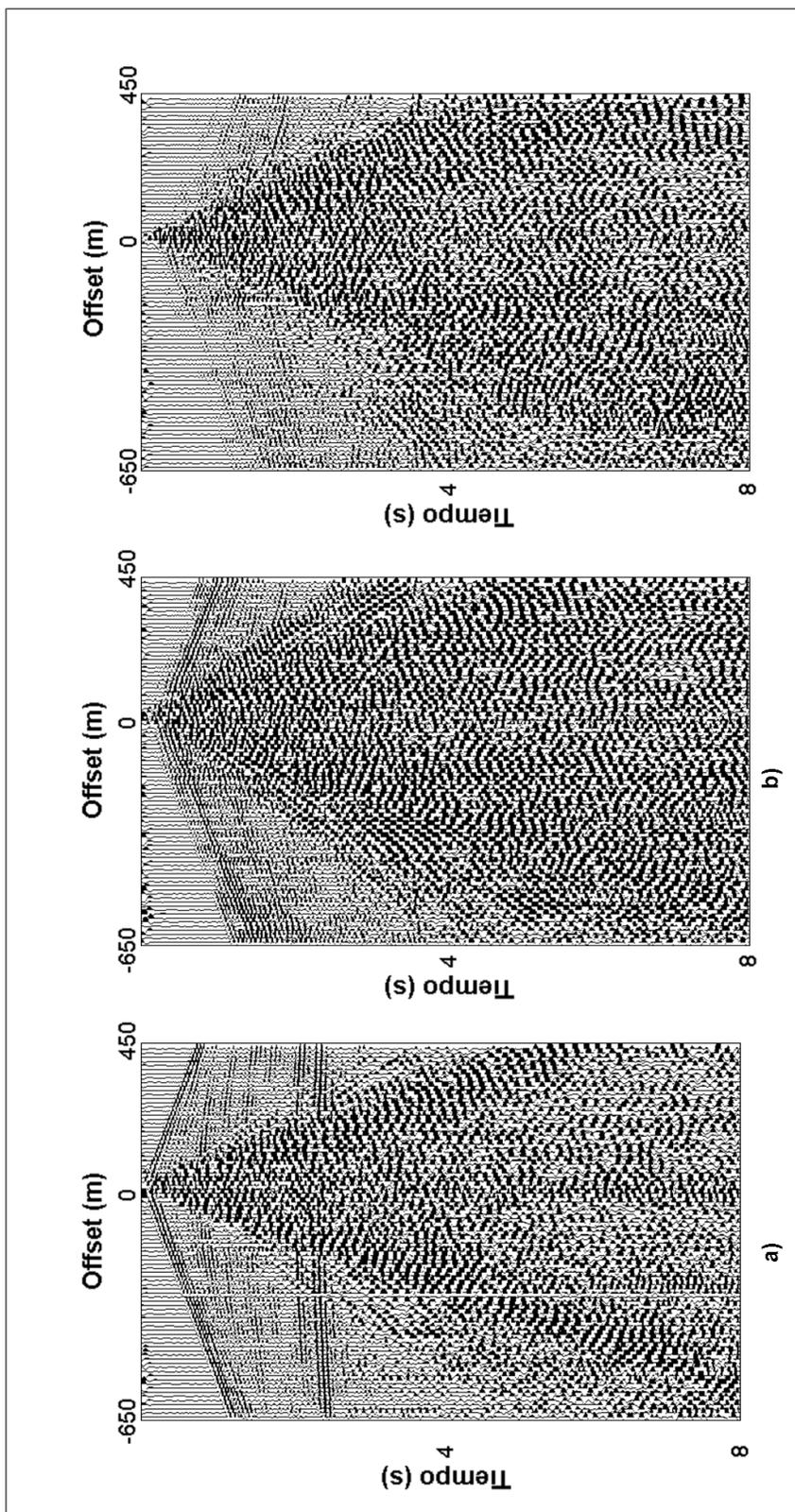


Figura 5.33: Autoimagen 1 banda 1 de los datos sísmicos de Barinas, componentes a) vertical b) radial c) transversal.

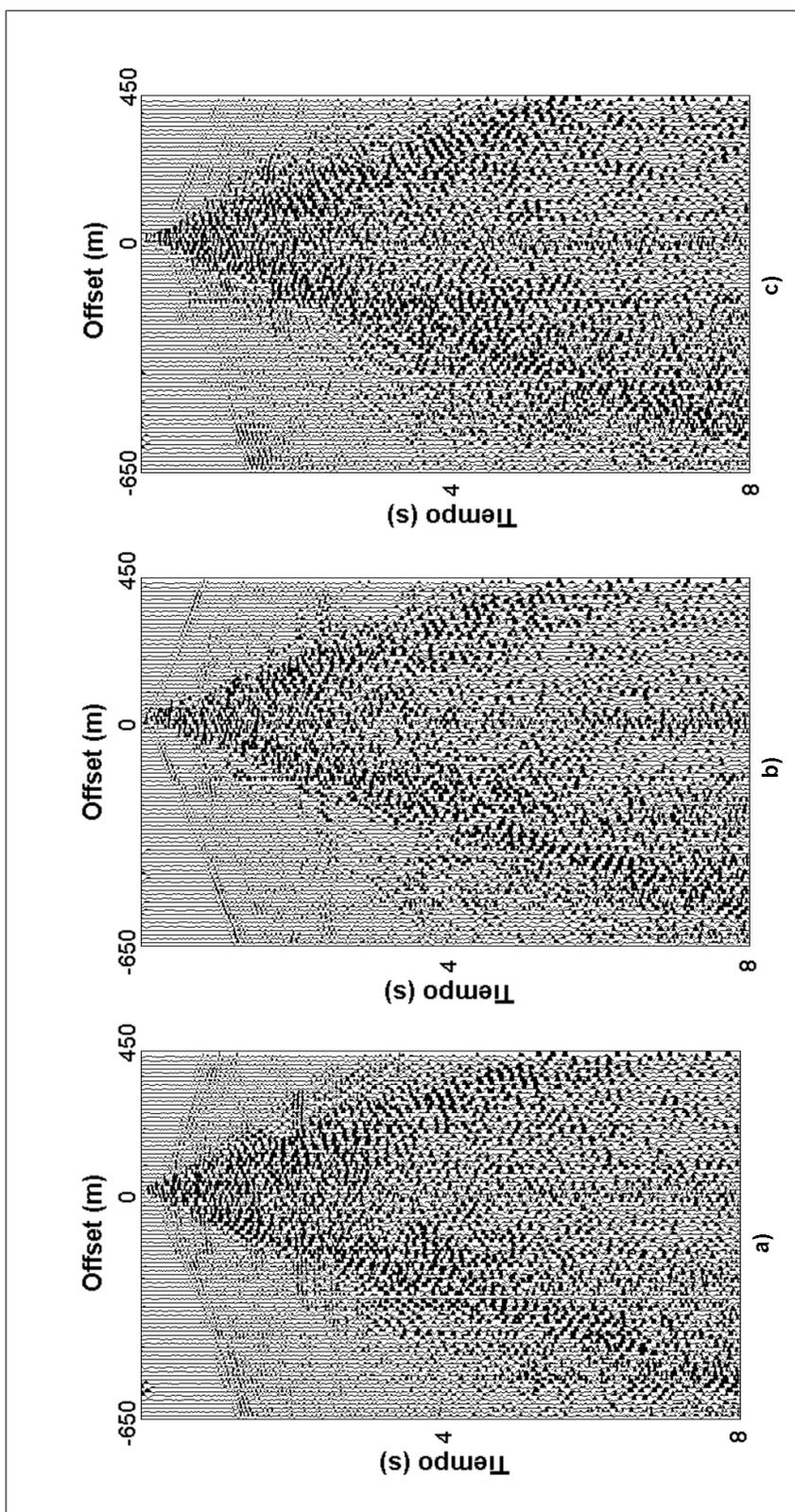


Figura 5.34: Autoimagen 2 banda 1 de los datos sísmicos de Barinas, componentes a) vertical b) radial c) transversal.

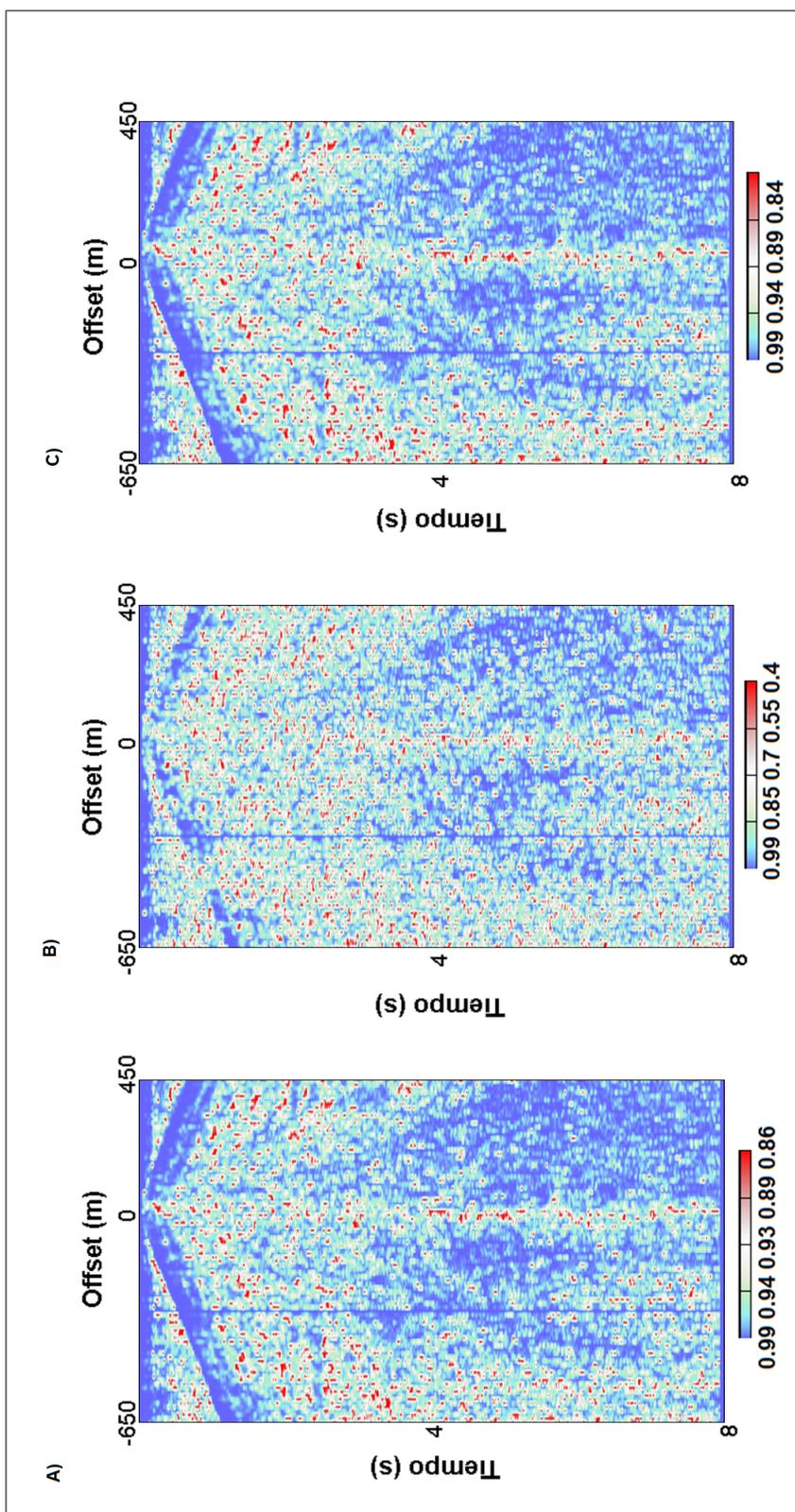


Figura 5.35: Factores de peso banda 1 de los datos sísmicos de Barinas. A) R_1 B) R_2 C) P

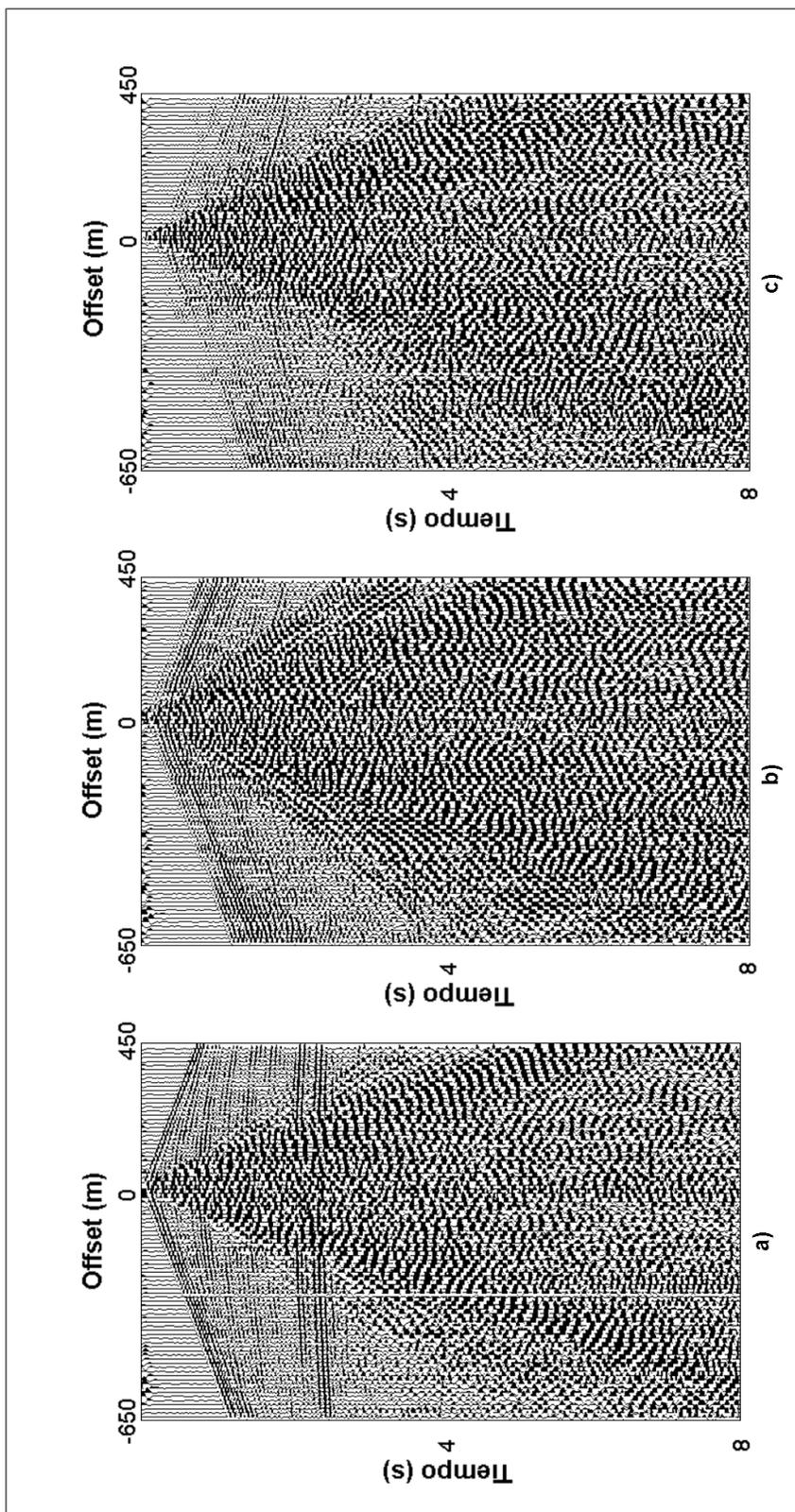


Figura 5.36: Banda 1 filtrada, componentes de los datos sísmicos de Barinas a) vertical b) radial c) transversal.

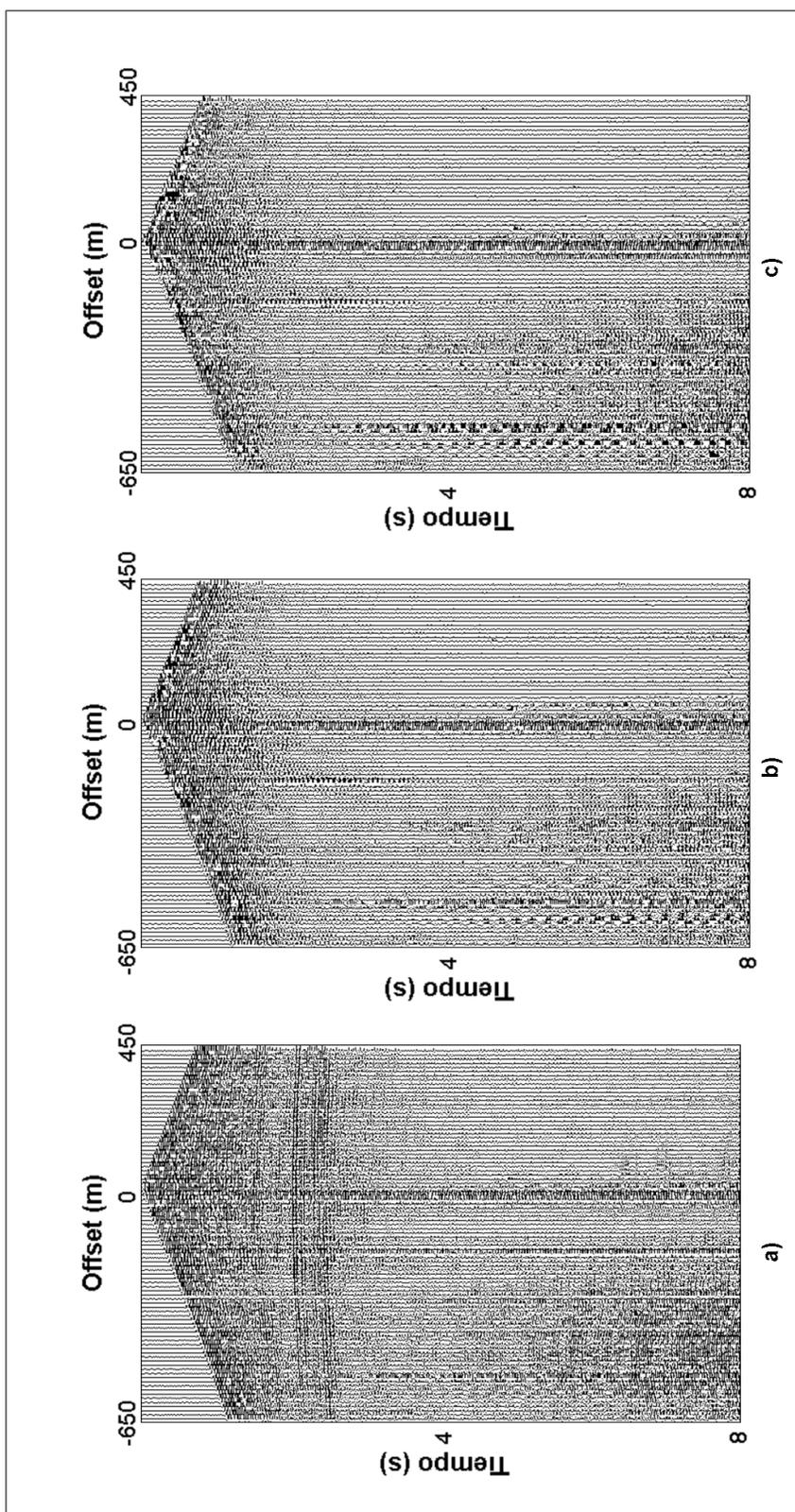


Figura 5.37: Banda 2 de los datos sísmicos de Barinas, $f=12,30,100,120$ Hz y componentes a) vertical b) radial c) transversal.

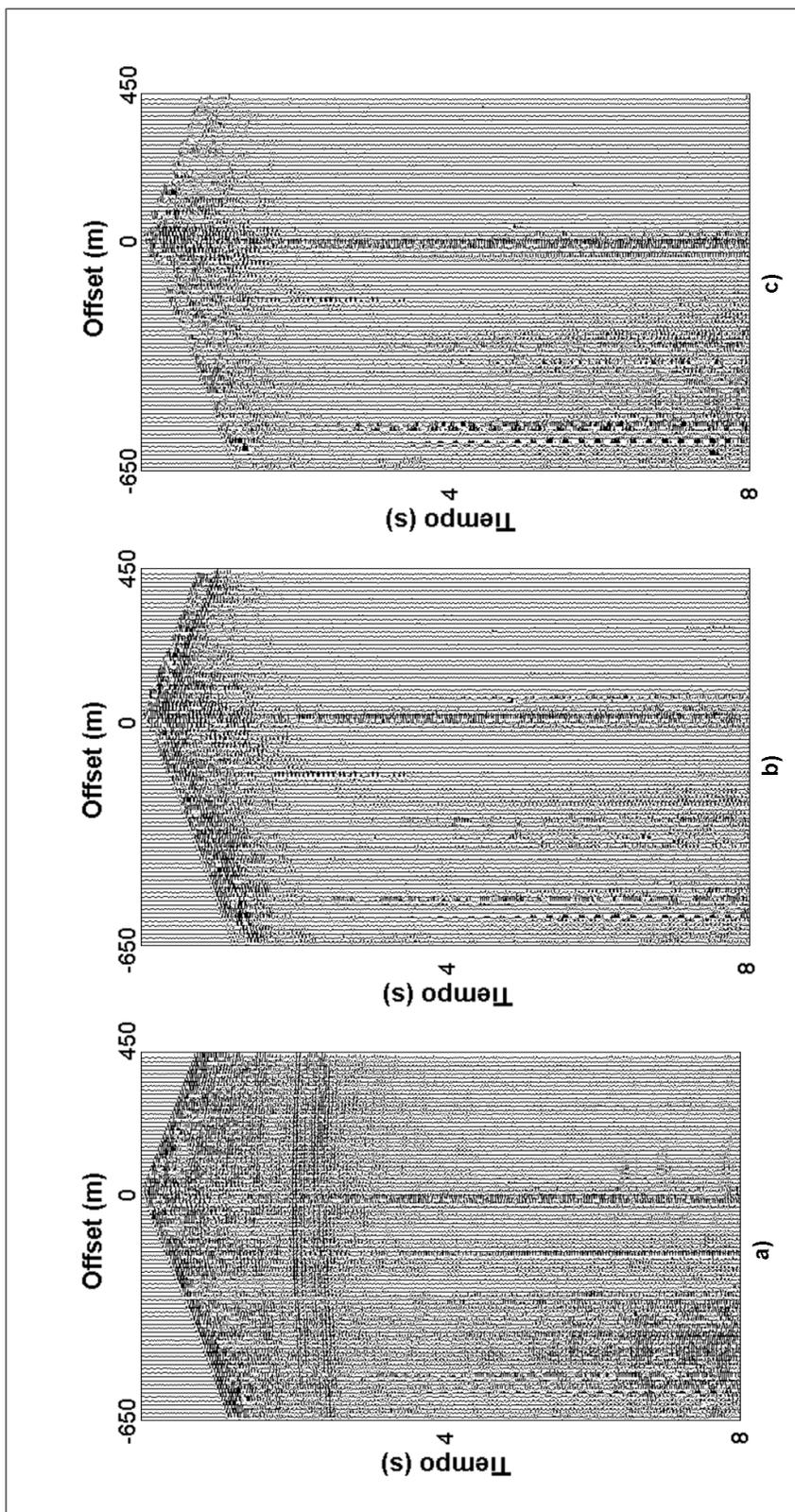


Figura 5.38: Autoimagen 1 banda 2 de los datos sísmicos de Barinas, componentes a) vertical b) radial c) transversal.

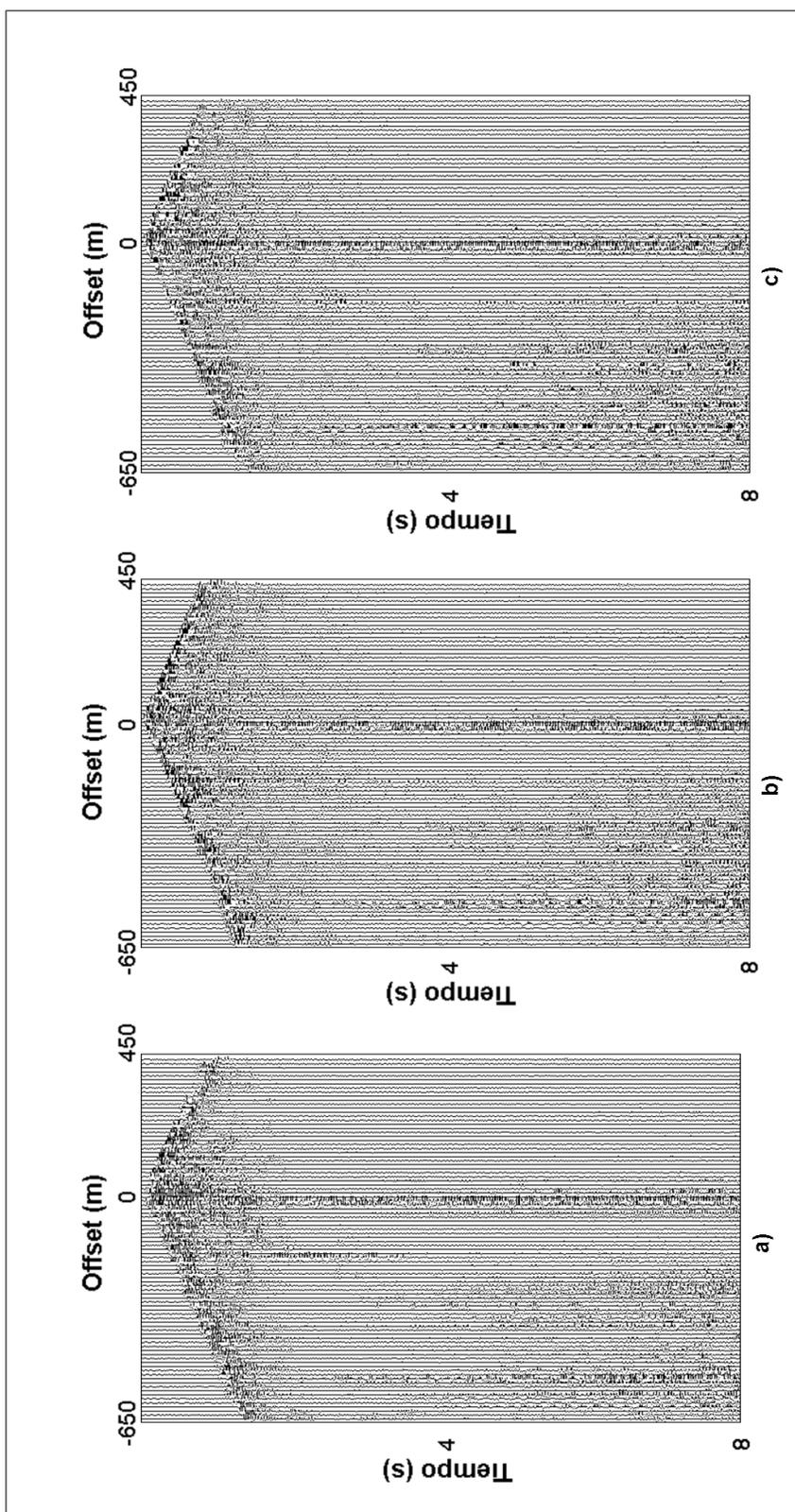


Figura 5.39: Autoimagen 2 banda 2 de los datos sísmicos de Barinas, componentes a) vertical b) radial c) transversal.

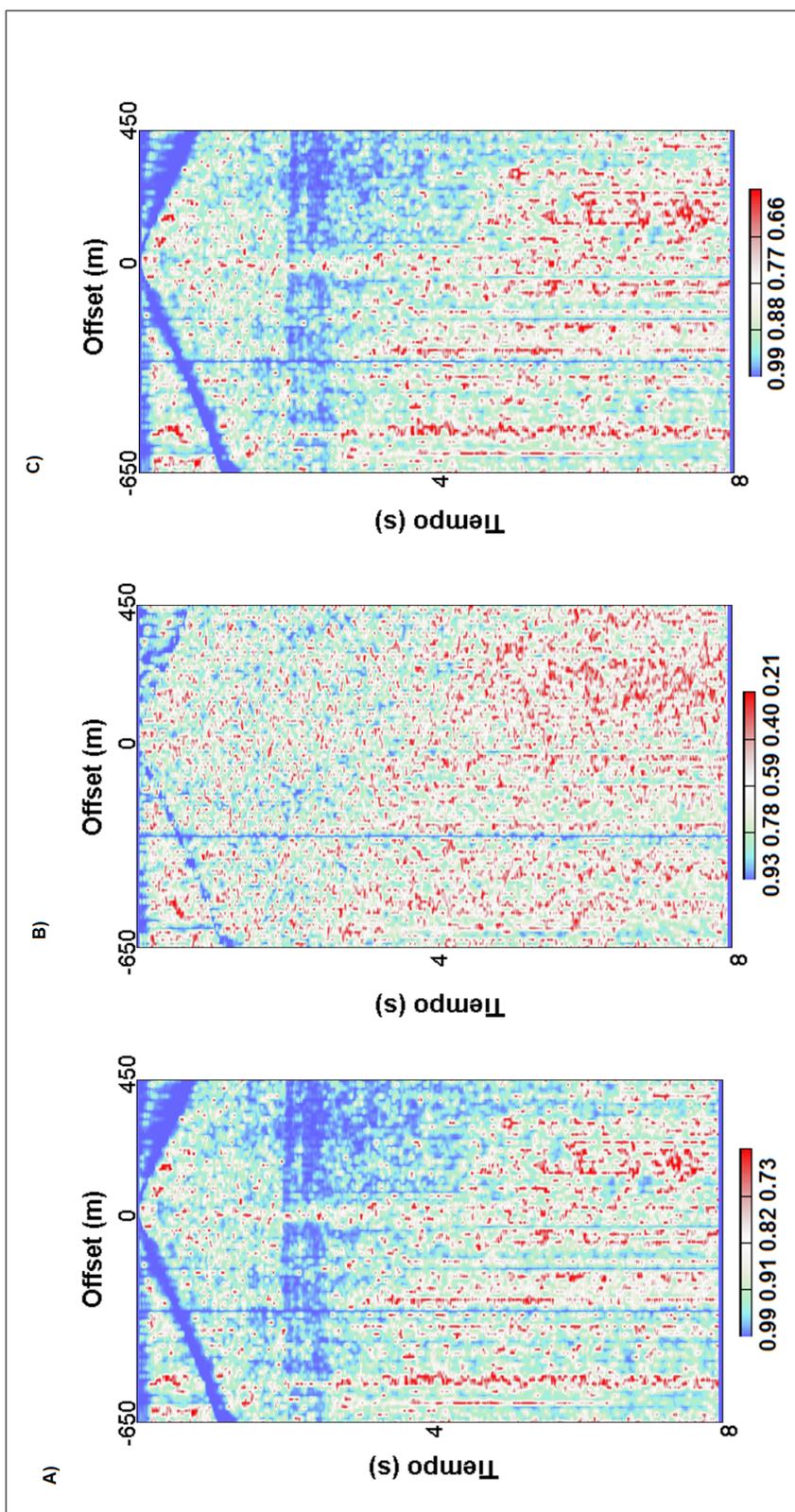


Figura 5.40: Factores de peso banda 2 de los datos sísmicos de Barinas. a) R_1 b) R_2 c) P

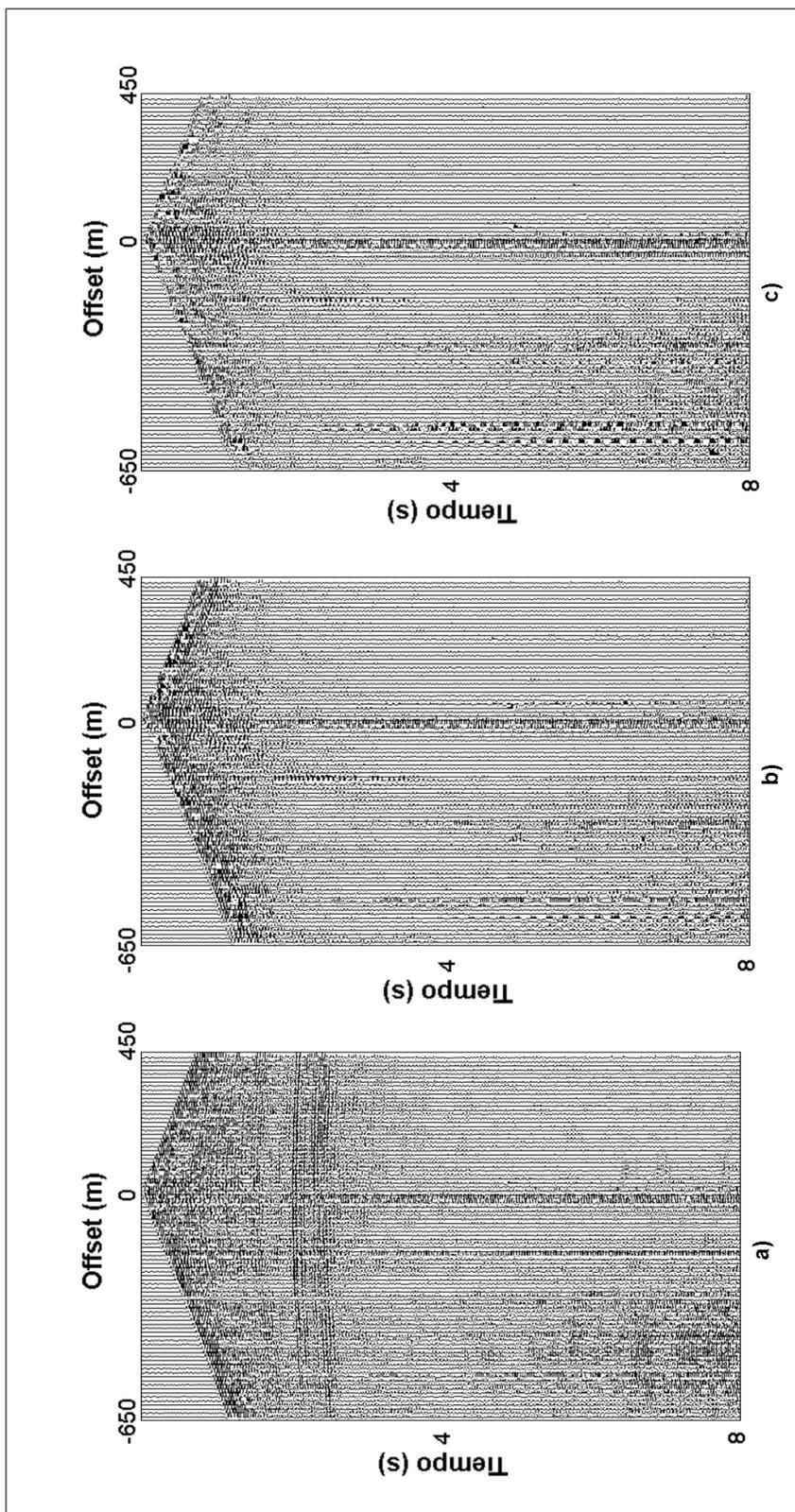


Figura 5.41: Banda 2 filtrado de los datos sísmicos de Barinas, componentes a) vertical b) radial c) transversal.

Apéndice D. Scripts:

Los ejemplos de los guiones se muestran para la componente vertical de los registros sintéticos (los mismos scripts aplican para los datos reales), las instrucciones son similares para la componente radial y transversal.

Script 1: Espectro de potencia

```
% El archivo de entrada debe ser la componente vertical (gather_v);
el archivo de salida representa el espectro de potencia de la com-
ponente vertical (espectro_V)

#!/bin/bash

sufft < gather_v.su | suamp mode=amp
| suop op=norm| suop op=db > espectro_v.su

sustack < espectro_v.su > espectro_V.su key=dt

suxgraph style=normal < espectro_V.su &
```

Script 2: Descomposición en bandas de frecuencia consecutivas

```
%Filtro paso banda.
% El archivo de entrada debe ser la componente vertical
(gather_v); los archivos de salida representan las bandas
descompuestas (v1,v2 y v3)
```

```
#!/bin/bash
```

```
sufilter f=2,4,16,24 < gather_v.su | sustrip ns=900 > v1.bin &
```

```
sufilter f=16,20,32,44 < gather_v.su | sustrip ns=900 > v2.bin &
```

```
sufilter f=32,38,225,250 <gather_v.su | sustrip ns=900 > v3.bin &
```

Script 3: Reconstrucción de bandas

%El archivo de entrada deben ser las bandas filtradas (v_filt);
el archivo de salida V1_V2_V3_filt.

```
#!/bin/bash
```

```
suaddhead < v1_filt.bin ns=900 | sushw key=dt a=2000 > v1_filt.su
```

```
suaddhead < v2_filt.bin ns=900 | sushw key=dt a=2000 > v2_filt.su
```

```
suaddhead < v3_filt.bin ns=900 | sushw key=dt a=2000 > v3_filt.su
```

```
suchw key1=cdp key2=tracl < v1_filt.su > v1_filt_cdp.su
```

```
suchw key1=cdp key2=tracl < v2_filt.su > v2_filt_cdp.su
```

```
suchw key1=cdp key2=tracl < v3_filt.su > v3_filt_cdp.su
```

```
cat v1_filt_cdp.su v2_filt_cdp.su > v1_v2_filt_cdp.su
```

```
cat v1_v2_filt_cdp.su v3_filt_cdp.su > v1_v2_v3_filt_cdp.su

susort cdp < v1_v2_v3_filt_cdp.su | sustack key=cdp normpow=0
| sushw key=dt a=2000 > V1_V2_V3_filt.su
```

Script 4: Despliegue de registros

```
% Para los registros originales

#!/bin/bash

suxwiggb ns=900 clip=0.001 < gather_v.su &

% Para los registros filtrados

#!/bin/bash

suxwiggb ns=900 clip=0.01 < V1_V2_V3_filt.su &

% Para los factores de filtrado

#!/bin/bash

ximage ns=900 perc=97 cmap='hsv5' legend=1 < R1.bin' &

ximage ns=900 perc=97 cmap='hsv5' legend=1 < R2.bin' &

ximage ns=900 perc=97 cmap='hsv5' Legend=1 < P.bin' &
```

```

% Para las autoimagenes

#!/bin/bash

xwrgb ns=900 clip=0.001 < vE1.bin &

xwrgb ns=900 clip=0.001 < vE2.bin &

```

Apéndice E. Código SVD MATLAB

```

fclose('all');
clear all;

%%% Parametros de entrada (Paso 1, seccion 3.1.3 del capitulo III) %%%

nt=input('Ingrese el numero de "Muestras en tiempo"
del registro <==');

w=input('Ingrese la longitud de la ventana deslizante
de paso 1 ms <==');

%%% Carga de Archivos (Paso 2) %%%
% Archivo binario little ending floating point

fid1=fopen('v1.bin','r+','l');

fid2=fopen('t1.bin','r+','l');

```

```

fid3=fopen('r1.bin','r+','l');

% v1, t1, r1, son los archivos de entrada,
el numero corresponde a la banda de descomposicion. %

V=fread(fid1,[nt,inf],'float'); % V: Componente vertical.
R=fread(fid2,[nt,inf],'float'); % R: Componente radial.
T=fread(fid3,[nt,inf],'float'); % T: Componente transversal.

%%% Agrupacion de matrices (mxn) %%%

for i=1:tc
Y(:, :, i)=[Z(:, i),R(:, i),T(:, i)];
end

% La matriz Y agrupa las matrices V,R y T. %

%%% Parametros calculados (Paso 3) %%%

tc=length(Z(1, :)); % Numero de trazas
wt=nt-w; % Muestras menos longitud de ventana.

% trapecio promedio para la ventana deslizante (K) %

K=w*ones(length(Z(:, 1)), 3);
K(1:w, 1)=linspace(1, w, w)';
K(1:w, 2)=linspace(1, w, w)';
K(1:w, 3)=linspace(1, w, w)';
K(wt+1:nt, 1)=linspace(w, 1, w)';

```

```

K(wt+1:nt,2)=linspace(w,1,w)';
K(wt+1:nt,3)=linspace(w,1,w)';

%%% Transformacion de matrices (mxn) a una matriz X (Nx3)
asociada a cada traza. (Paso 4) %%%

for k=1:tc;
    D=zeros(length(Z(:,1)),3);
    F=D;
    for i=1:wt;
        X=Y(i:w+i-1,:,k); % X representa la matriz de entrada.

%%% Descomposicion SVD sobre X (Paso 5) %%%

        [U,S,V]=svd(X);

%%% Estimacion de los parametros de filtrado (Paso 6) %%%

s_1=S(1,1); % s_1 representa el primer valor singular %
s_2=S(2,2); % s_2 representa el segundor valor singular %
s_3=S(3,3); % s_3 representa el tercer valor singular %

R1=(1-(((s_3)/(s_1))^2));
R2=(1-(((s_3)/(s_2))^2));
P=(1-((2*(s_3)^2)/(((s_1)^2)+((s_2)^2))));

if S1==0 & S2==0;

M_r1(i+w/2-1,k)=0; %M_r1 representa la matriz

```

```

de rectilinealidad (R1)
M_r2(i+w/2-1,k)=0; %M_r2 representa la matriz
de rectilinealidad (R2)
M_p(i+w/2-1,k)=0; %M_p representa la matriz
de planaridad (P)

elseif S2==0 & S1~0;

M_r1(i+w/2-1,k)=R1;
M_r2(i+w/2-1,k)=0;
M_p(i+w/2-1,k)=P;

else

M_r1(i+w/2-1,k)=R1;
M_r2(i+w/2-1,k)=R2;
M_p(i+w/2-1,k)=P;

end

%%% Calculo de las autoimagenes (Paso 7) %%%

s_mod=zeros(size(S)); % Representa la matriz diagonal con solo
s_mod(1,1)=S(1,1); % el primer valor singular

s_mod1=zeros(size(S)); % Representa la matriz diagonal con solo
s_mod1(2,2)=S(2,2); % el segundo valor singular

autoimag1=U*s_mod*V'; % Primera autoimagen

```

```

autoimag2=U*s_mod1*V';    % Segunda autoimagen

D(i:i+w-1,:)=D(i:i+w-1,:)+autoimag1;

% Agrupa las primeras autoimagenes
de todas las ventanas

F(i:i+w-1,:)=F(i:i+w-1,:)+autoimag2;

% Agrupa las segundas autoimagenes
de todas las ventanas

end

%%% Promedio de las autoimagenes %%%

N=D./K;    % Promedio de las primeras autoimagenes
           de cada ventana

Q=F./K;    % Promedio de las segundas autoimagenes
           de cada ventana

V_1autoimg(:,k)=N(:,1); % Primera autoimagen para
                       cada muestra vertical

Y_1autoimg(:,k)=N(:,2); % Primera autoimagen para

```

```

                                cada muestra radial

X_1autoimg(:,k)=N(:,3); % Primera autoimagen para
                                cada muestra transversal

V_2autoimg(:,k)=Q(:,1); % Segunda autoimagen para
                                cada muestra vertical

Y_2autoimg(:,k)=Q(:,2); % Segunda autoimagen para
                                cada muestra radial

X_2autoimg(:,k)=Q(:,3); % Segunda autoimagen para
                                cada muestra transversal

end

%%% Filtro de polarizacion (Paso 8) %%%

V_filt=((V_1autoimg.*M_r1)+(V_2autoimg.*M_r2)).*M_p;

% Vertical filtrada

Y_filt=((Y_1autoimg.*M_r1)+(Y_2autoimg.*M_r2)).*M_p;

% Radial filtrada

X_filt=((X_1autoimg.*M_r1)+(X_2autoimg.*M_r2)).*M_p;

% Transversal filtrada

```

```

%%% Salida de archivos (Paso 9) %%%

fclose('all');

fid4= fopen('v1_filt.bin','w+','l');
fwrite(fid4,V_filt,'float32');
%Componente vertical filtrada
fid5= fopen('r1_filt.bin','w+','l');
fwrite(fid5,Y_filt,'float32');
%Componente radial filtrada
fid6= fopen('t1_filt.bin','w+','l');
fwrite(fid6,X_filt,'float32');
%Componente transversal filtrada
fid7= fopen('R1.bin','w+','l');
fwrite(fid7,M_r1,'float32');
% R1
fid8= fopen('R2.bin','w+','l');
fwrite(fid8,M_r2,'float32');
% R2
fid9= fopen('P.bin','w+','l');
fwrite(fid9,M_p,'float32');
% P
fid10=fopen('vE1.bin','w+','l');
fwrite(fid10,V_1autoimg,'float32');
% Primera autoimagen vertical
fid11=fopen('vE2.bin','w+','l');
fwrite(fid11,V_2autoimg,'float32');

```

```

% Segunda autoimagen vertical
fid12=fopen('rE1.bin','w+','l');
fwrite(fid12,Y_1autoimg,'float32');
% Primera autoimagen radial
fid13=fopen('rE2.bin','w+','l');
fwrite(fid13,Y_2autoimg,'float32');
% Segunda autoimagen radial
fid14=fopen('tE1.bin','w+','l');
fwrite(fid14,X_1autoimg,'float32');
% Primera autoimagen transversal
fid15=fopen('tE2.bin','w+','l');
fwrite(fid15,X_2autoimg,'float32');
% Segunda autoimagen transversal
fclose('all');
display('Fin del proceso')

```

```

%%%% Hodogramas

```

```

%%Componente vertical cruda
ZZ=Z(500:650,1);
maxi=max(max(ZZ));
mini=min(min(ZZ));
ZZ=((ZZ-(mini))/(maxi-mini));

%%Componente radial cruda
RR=R(500:650,1);
maxi=max(max(RR));
mini=min(min(RR));
RR=((RR-(mini))/(maxi-mini));

```

```

%%Componente vertical filtrada
VV=V_filt(500:650,1);
maxi=max(max(VV));
mini=min(min(VV));
VV=((VV-(mini))/(maxi-mini));

%%Componente radial filtrada
YY=Y_filt(500:650,1);
maxi=max(max(YY));
mini=min(min(YY));
YY=((YY-(mini))/(maxi-mini));

%Hododograma registro crudo
figure, plot(RR,ZZ)
xlabel('Componente radial','FontWeight','bold','FontSize',14);
ylabel('Componente vertical','FontWeight','bold','FontSize',14);
title({'Plano XZ'},'FontWeight','bold','FontSize',14);

%Hododograma registro crudo y filtrado
plot(RR,ZZ,YY,VV)
xlabel('Componente radial','FontWeight','bold','FontSize',14);
ylabel('Componente vertical','FontWeight','bold','FontSize',14);
title({'Plano XZ'},'FontWeight','bold','FontSize',14);

```