

**REVISIÓN DEL CONCEPTO DE FILTRO DE POLARIZACIÓN PARA SEÑALES
MULTICOMPONENTE: UN CASO DE APLICACIÓN DE UN FILTRO DE
POLARIZACIÓN NOTCH DE FASE NULA PARA EL FILTRADO DE RUIDO
COHERENTE EN SEÑALES SÍSMICAS MULTICOMPONENTE.**

**DANIEL ENRIQUE MENESES SANGUINO
LUIS CARLOS RINCÓN GUTIÉRREZ**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2015

**REVISIÓN DEL CONCEPTO DE FILTRO DE POLARIZACIÓN PARA SEÑALES
MULTICOMPONENTE: UN CASO DE APLICACIÓN DE UN FILTRO DE
POLARIZACIÓN NOTCH DE FASE NULA PARA EL FILTRADO DE RUIDO
COHERENTE EN SEÑALES SÍSMICAS MULTICOMPONENTE.**

**DANIEL ENRIQUE MENESES SANGUINO
LUIS CARLOS RINCÓN GUTIÉRREZ**

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electrónico

Director

**CÉSAR ANTONIO DUARTE GUALDRÓN
Ingeniero Electricista, Ph.D**

Codirector

**CARLOS ANDRÉS NIÑO NIÑO
Ingeniero Electrónico, M.Sc**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2015

*Dedicado a Dios, mi familia,
mis profesores y amigos*

Luis Carlos Rincón Gutiérrez

*A Dios mi guía y a mi familia
por su compañía*

Daniel Enrique Meneses Sanguino

AGRADECIMIENTOS

A la UIS por permitirnos desarrollar nuestras competencias como profesionales y personas, brindando espacios para conocer maravillosos amigos y excelentes profesores que influyeron en nuestras vidas. A nuestro director el profesor PhD. César Antonio Duarte Gualdrón por su gran compromiso y valiosos aportes en todo el proceso de desarrollo de este proyecto. Muchas gracias. A nuestro codirector el profesor M.Sc Carlos Andrés Niño Niño por su amistad y apoyo en todo momento, aun cuando las circunstancias no eran favorables. Gracias profe.

A todos los compañeros, amigos y familiares que de alguna u otra forma permitieron que nuestro sueño se hiciera realidad.

Finalmente nuestro más grande agradecimiento a Dios por darnos la oportunidad de vivir y conocer las maravillas creadas por El.

Muchas gracias.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	22
1. ANTECEDENTES	24
2. REVISIÓN DEL CONCEPTO DE POLARIZACIÓN	26
2.1 CONCEPTO DE POLARIZACIÓN	26
2.1.1 Polarización en matemáticas	26
2.1.2 Polarización en física.	26
2.1.3 Polarización en información	33
2.2 POLARIZACIÓN DE INFORMACIÓN BICOMPONENTE PROVENIENTE DE FENÓMENOS FÍSICOS MODELADOS EN UN SISTEMA CARTESIANO.....	34
3. FILTROS DE POLARIZACIÓN	37

3.1 CONCEPTO DE FILTRO DE POLARIZACIÓN	37
3.2 FILTROS DE POLARIZACIÓN FÍSICOS	37
3.2.1 Dicroísmo.....	38
3.2.2 Birrefringencia.....	39
3.2.3 Scattering.....	39
3.2.4 Polarización por reflexión.....	40
3.2.5 Polarización mediante retardadores	40
3.2.6 Polarizadores por interferencia	40
3.3 FILTROS DE POLARIZACIÓN DIGITALES.....	41
3.3.1 Filtro de polarización de proyección ortogonal.....	41
3.3.2 Filtros de polarización oblicua.....	44

3.3.3 Filtro de polarización: método de proyección oblicua	47
3.3.4 Filtro de polarización basado en la descomposición en valores singulares ..	51
3.3.5 Filtro de polarización basado en transformada S	55
3.3.6 Filtro de polarización diseñado con la técnica Samson y Olson	58
3.4 CONTRASTE ENTRE TÉCNICAS DE DISEÑO DE FILTROS DE POLARIZACIÓN DIGITALES.....	59
3.5 POSIBLE APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE FILTROS DE POLARIZACIÓN EN LA ATENUACIÓN DE RUIDO COHERENTE PRESENTE EN SEÑALES SÍSMICAS	61
3.5.1 Filtro de polarización de proyección ortogonal.....	61
3.5.2 Filtro de polarización oblicua.....	62
3.5.3 Filtro de polarización de proyección oblicua	63
3.5.4 Filtro de polarización basado en la descomposición en valores singulares. .	64

3.5.5 Filtro de polarización basado en transformada S.....	65
3.5.6 Filtro de polarización basado en la técnica Samson y Olson	65
3.5.7 Conclusión sobre técnicas de diseño de filtro de polarización	66
4. FILTRO DE POLARIZACIÓN NOTCH DE FASE NULA (NPSP)	67
4.1 EL PROBLEMA DE INVERSIÓN DE LOS FILTROS DE POLARIZACIÓN ORTOGONALES	68
4.2 RECUPERACIÓN DE LA SEÑAL OBJETIVO	68
5. DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL FILTRO NPSP	74
5.1 PRE FILTRADO.....	74
5.2 FILTRADO	75
5.3 RECUPERACIÓN DE LA SEÑAL OBJETIVO	75
5.4 ALGORITMOS	76

6. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DEL FILTRO NPSP EN SEÑALES MULTICOMPONENTE.	82
6.1 CARACTERIZACIÓN DE SEÑALES A ESTUDIAR.....	82
6.1.1 Señales de radares.....	82
6.1.2 Señales sísmicas.....	84
6.2 EXPERIMENTOS REALIZADOS.....	86
6.2.1 Señales de radares.....	87
6.2.2 Señales sísmicas.....	87
6.3 RESULTADOS.....	91
6.3.1 Señales de radares.....	91
6.3.2 Señales sísmicas.....	99

6.4 DISCUSIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DEL FILTRO NPSP EN SEÑALES MULTICOMPONENTE	120
6.4.1 Señales de radar.....	120
6.4.2 Señales sísmicas	122
7. CONCLUSIONES	127
BIBLIOGRAFÍA.....	129

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Onda longitudinal en un medio isótropo	28
Figura 2. Onda transversal en un medio isótropo	28
Figura 3. Tipos de polarizaciones	32
Figura 4. Elipse de polarización tricomponente.	33
Figura 5. Filtro de polarización físico por principio de dicroísmo (Rejilla de alambre).	38
Figura 6. Filtro de polarización físico por principio de birrefringencia (Tipos de cristales polarizadores).	39
Figura 7. Filtro de polarización por reflexión.	40
Figura 8. Ventana de tiempo deslizante para descomposición SVD	51
Figura 9. Elipsoide formado por valores y vectores propios de la matriz de correlación	52
Figura 10. Método de análisis de polarización por hodograma.	55
Figura 11. Componente horizontal de la señal total (negro), objetivo (azul) e interferencia (rojo) del experimento señal de radar 1.	92

Figura 12. Componente vertical de la señal total (negro), objetivo (azul) e interferencia (rojo) del experimento señal de radar 1	93
Figura 13. Señal filtrada (azul) y sin filtrar (negro) de las componentes horizontal y vertical del experimento señal de radar 2.	94
Figura 14. Señal filtrada (azul) y objetivo (rojo) de las componentes horizontal y vertical del experimento señal de radar 1	95
Figura 15. Sector con señal de frecuencia 25 [MHz], señal filtrada (azul) y objetivo (rojo) de las componentes horizontal y vertical del experimento señal de radar 1	95
Figura 16. Componente horizontal y vertical señal de la señal total	96
Figura 17. Componente horizontal y vertical de la señal de 10 MHz.	97
Figura 18. Un microsegundo de la señal filtrada (rojo) y la señal de entrada (negro) del experimento señal de radar 2.	98
Figura 19. Diferencia entre la FFT de la señal sin filtrar y filtrada de las componentes horizontal y vertical del experimento señal de radar 2.	99
Figura 20. Resultados en la componente horizontal del experimento 1 de la señal sísmica sintética.	102
Figura 21. Resultados en la componente vertical del experimento 1 de la señal sísmica sintética.	103
Figura 22. Diferencia entre la señal sin filtrar y filtrada de las componentes horizontal y vertical de experimento 1 de la señal sintética.	103

Figura 23. Grado de polarización por ventanas de los resultados del experimento 1 de la señal sísmica sintética. Negro, polarización con tendencia circular. Blanco, polarización con tendencia lineal.	104
Figura 24. Cantidad de frecuencias consideradas ground roll de la señal sísmica sintética del experimento 1.	104
Figura 25. Resultados en la componente horizontal del experimento 2 de la señal sísmica sintética.	106
Figura 26. Resultados en la componente vertical del experimento 2 de la señal sísmica sintética.	106
Figura 27. Diferencia entre la señal sin filtrar y filtrada de las componentes horizontal y vertical del experimento 2 de la señal sísmica sintética.	107
Figura 28. Grado de polarización por ventanas de los resultados del experimento 2 de la señal sísmica sintética. Negro, polarización con tendencia circular. Blanco, polarización con tendencia lineal.	107
Figura 29. Cantidad de frecuencias consideradas ground roll de la señal sísmica sintética después del filtrado en el experimento 2.	108
Figura 30. Grado de polarización por ventanas de los resultados de la señal sísmica sintética filtrada por SVD. Negro, polarización con tendencia circular. Blanco, polarización con tendencia lineal.	109
Figura 31. Cantidad de frecuencias consideradas ground roll de la señal sísmica sintética después del filtrado mediante SVD.	110

Figura 32. Resultados del filtrado en la componente horizontal de la señal sísmica real	112
Figura 33. Resultados del filtrado en la componente vertical de la señal sísmica real	113
Figura 34. Diferencia entre la señal sin filtrar y filtrada de las componentes horizontal y vertical de la señal sísmica real.	114
Figura 35. Grado de polarización por ventanas de los resultados de la señal sísmica. Negro, polarización con tendencia circular. Blanco, polarización con tendencia lineal.	115
Figura 36. Cantidad de frecuencias consideradas ground roll de la señal sísmica real.	116
Figura 37. Grado de polarización por ventanas de los resultados de la señal sísmica real filtrada por SVD. Negro, polarización con tendencia circular. Blanco, polarización con tendencia lineal	118
Figura 38. Cantidad de frecuencias consideradas ground roll de la señal sísmica real después del filtrado mediante SVD.	119
Figura 39 Señal filtrada (rojo) y sin filtrar (azul) en la zona con ground roll de la traza 150 del experimento 2 de la señal sísmica sintética.	123
Figura 40. Señal filtrada (rojo) y sin filtrar (azul) en la zona con ground roll de la traza 300 de la señal sísmica real.	125

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Comparación de las técnicas de diseño de filtros de polarización.	60
Cuadro 2. Rango de parámetros elípticos de polarización para el prefiltrado de la señal de radar 1. Fuente: Autores	83
Cuadro 3. Rango de parámetros elípticos de polarización para el prefiltrado de la señal de radar 2. Fuente: Autores	84
Cuadro 4. Rango de parámetros elípticos de polarización para el prefiltrado de la señal sísmica sintética.	85
Cuadro 5. Rango de parámetros elípticos de polarización para el prefiltrado de la señal sísmica real	86
Cuadro 6. Frecuencias y parámetros de polarización para cada señal de 1 micro segundo.	92
Cuadro 7. Parámetros de polarización de la señal de 10 [MHz].	96
Cuadro 8. Parámetros elípticos de la señal objetivo de 10 [Mhz] y señal filtrada	97
Cuadro 9. Grado de polarización global y por frecuencia sobre zona de ground roll de señal sin filtrar.	100
Cuadro 10. Grado de polarización promedio y por frecuencia sobre zona de ground roll de la señal filtrada con el criterio 3 y parámetros variables.	102

Cuadro 11. Grado de polarización promedio y por frecuencia sobre zona de ground roll de la señal filtrada con el criterio 4 y parámetros fijos.	105
Cuadro 12. Grado de polarización promedio y por frecuencia sobre zona de ground roll de la señal sintética filtrada con SVD.	109
Cuadro 13. Grado de polarización global y por frecuencia sobre zona de ground roll de señal sin filtrar	110
Cuadro 14. Grado de polarización promedio y por frecuencia sobre zona de ground roll de la señal real filtrada con el criterio 4 y parámetros fijos.	111
Cuadro 15. Grado de polarización promedio y por frecuencia sobre zona de ground roll de la señal real filtrada con SVD.	117

RESUMEN

TITULO: REVISIÓN DEL CONCEPTO DE FILTRO DE POLARIZACIÓN PARA SEÑALES MULTICOMPONENTE: UN CASO DE APLICACIÓN DE UN FILTRO DE POLARIZACIÓN NOTCH DE FASE NULA PARA EL FILTRADO DE RUIDO COHERENTE EN SEÑALES SÍSMICAS MULTICOMPONENTE*.

AUTORES: Daniel Enrique Meneses Sanguino.
Luis Carlos Rincón Gutiérrez**.

PALABRAS CLAVES: Sísmica multicomponente, Ground roll, Null Phase-Shift Polarization – NPSP – Filter, Filtro de polarización, polarización.

DESCRIPCIÓN:

En este trabajo se realiza una revisión bibliográfica para identificar los múltiples tipos de filtros de polarización para señales multicomponente, distinguiendo diferencias entre ellos, como la definición de los datos de entrada, transformación de los datos para su posterior análisis de polarización en sus diferentes dominios y modelos de inversión para obtener de sus salidas la señal recuperada. Entre estos filtros se encuentran filtros de proyección ortogonal y basados en la descomposición de valores singulares. Se presenta en una tabla la síntesis de los diferentes filtros de polarización y se discute su posible aplicación en la atenuación de ruido coherente en señales sísmicas.

Posteriormente se implementó el filtro NPSP (Null Phase-Shift Polarization – NPSP – Filter), el cual es una mejora de los filtros de polarización de proyección ortogonal, para el filtrado de ruido coherente en señales sísmicas multicomponente e interferencia en señales de radar. Se muestran los resultados de la implementación del filtro NPSP en el filtrado de señales de radares comparando la señal objetivo y la señal recuperada del filtro. En el filtrado de señales sísmicas se analizan los resultados basados en los grados de polarización, las zonas consideradas ground roll y la forma de la señal antes y después del filtrado.

En cuanto al filtro NPSP, solo se recupera la señal objetivo sin cambio de amplitud y fase, cuando la entrada tenga polarización vertical o se caractericen perfectamente los parámetros de polarización de la interferencia y el parámetro de polarización deseado de la señal objetivo.

* Proyecto de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director PhD. César Antonio Duarte Gualdrón, Codirector Msc. Carlos Andrés Niño,

ABSTRACT

TITLE: REVIEW OF THE POLARIZATION FILTER CONCEPT FOR SIGNALS MULTICOMPONENT: A CASE OF APPLICATION OF A NOTCH POLARIZATION FILTER OF NULL PHASE FOR THE FILTERED OF NOISE COHERENT IN SIGNALS SEISMIC MULTICOMPONENT*.

AUTHORS: Daniel Enrique Meneses Sanguino.
Luis Carlos Rincón Gutiérrez**.

KEYWORDS: Sísmica multicomponente, Ground roll, Null Phase-Shift Polarization – NPSP – Filter, Filtro de polarización, polarización.

DESCRIPTION:

In this paper a bibliographic description is performed in order to identify multiple types of polarization filters for multicomponent signals, distinguishing differences between them, like the definition of the entrance information, transformation of the information for its later analysis of polarization in its different domains and investment models to get of their outputs the recovered signal. Between these filters are found orthogonal projection filters and based on the decomposition of singular values. The synthesis of different polarizing filters is presented in a table and discussed its possible application in the attenuation of coherent noise in seismic signals.

Later the filter NPSP (Null Phase-Shift Polarization – NPSP – Filter) was implemented, which is an improvement of the polarization filters of orthogonal projection, for the coherent filtered noise in seismic signals multicomponent and interference of radar signals. The results of the implementation of NPSP filter are shown in the radar signals filtering and the signal recovered of the filter. In the seismic signals filtering the results are analyzed based on the degrees of polarization, the considered areas ground roll and the shape of the signal before and after filtering.

In the case of the filter NPSP, only the signal objective is recovered without amplitude change and phase, when the entrance has vertical polarization or the parameters of polarization of the interference are characterized perfectly and the desired polarization parameters of the target signal.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director PhD. César Antonio Duarte Gualdrón, Codirector Msc. Carlos Andrés Niño,

INTRODUCCIÓN

La polarización se ha convertido en un tema de investigación en diversas áreas, debido a que es un concepto transversal presente tanto en el mundo físico como en el dominio de la información. Esto ha permitido extrapolar técnicas y conceptos adyacentes entre estos campos, logrando analizar fenómenos y comportamientos físicos, a través del reconocimiento de características distintivas de conjuntos de información multicomponente inicialmente indiferenciados^{1 2 3}.

En el análisis de información pueden existir datos con energía indeseada pero con alta correlación con la información, generada por la fuente de datos⁴, (Ruido coherente) lo que degrada la calidad de la información y dificulta su análisis. Por esta razón, es necesario implementar técnicas y mecanismos que permitan mitigar el impacto de estos datos sin afectar la información contenida en ellos. Entre estas técnicas se destacan los filtros de polarización⁵. Los filtros de polarización se dividen en dos categorías, filtros de polarización físicos y filtros de polarización digitales⁶, siendo estos últimos los estudiados en este proyecto de grado.

¹ VERA, Raúl. Implementación de una herramienta software que atenúe el ruido coherente ground roll presente en datos sísmicos multicomponente. . Trabajo de grado ingeniería Electrónica. Bucaramanga, Colombia.: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2011. 61p

² SERRANO, Jheyston y SÁNCHEZ Iván. Implementación de un filtro de polarización basado en la descomposición en valores singulares para la atenuación de ruido coherente ground roll. Trabajo de grado ingeniería Electrónica. Bucaramanga, Colombia.: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2014. 61p

³ WINSTON. Polarization in the physical sciences [Online]. Wikipedia, 2010 [citado 2 marzo 2015]. Disponible en internet: <http://en.wikipedia.org/wiki/Polarization#In_the_physical_sciences>

⁴ SERRANO Jheyston Omar, SÁNCHEZ Iván Javier Op. Cit.

⁵ VERA Raúl, NIÑO Carlos Op. Cit.

⁶ TÉLLEZ, María Juliana. Análisis e interpretación de ondas P y S de perfiles sísmicos. Tesis de grado Doctor en ciencias físicas. Madrid.: Universidad Complutense de Madrid. Facultad de ciencias físicas. Departamento de física de la tierra, astronomía y astrofísica, 1993. 309 p

Los filtros de polarización digitales pueden ser usados en señales multicomponente, como lo pueden ser las señales sísmicas, donde gran parte de la energía presente en el ruido coherente es debido a las ondas Rayleigh también conocidas como *ground roll*, ondas a atenuar en el procesamiento de datos sísmicos. Una alternativa, en pro del mejoramiento continuo del análisis de datos sísmicos, es el estudio y posterior aplicación al área, de los filtros de polarización usados en radares para la supresión de radio interferencias, por las características comunes entre las ondas sísmicas y las ondas electromagnéticas y las semejanzas que estas señales multicomponente presentan entre sí^{7 8}.

En este trabajo se presenta la revisión y estudio de los filtro de polarización en el capítulo 3, discutiendo su posible aplicación para atenuar el ruido coherente presente en señales sísmicas multicomponente. Para esto se realiza la síntesis de 6 filtros de polarización diseñados con diferentes técnicas, los cuales son: 1) filtros de proyección ortogonal, 2) oblicuos, 3) proyección oblicua, 4) basados en la transformada S, 5) basados en descomposición en valores singulares y 6) filtros de polarización diseñados con la técnica Samson y Olson. Posteriormente, en el capítulo 4 se describe el modelo matemático que rige al filtro de polarización notch de fase nula para así, en los capítulos 5 y 6, ser implementado en la atenuación del ruido coherente presente en señales multicomponente de radar y sísmica, analizando y discutiendo los resultados. Finalmente, se presentan las conclusiones de los resultados obtenidos, los análisis realizados y las discusiones desarrolladas.

⁷ HUGHH, Young; FREEDMAN, Roger; SEARS, Francis y ZEMANSKY, Mark. Física universitaria volumen 1. México D.C.: Pearson Educación, 2009. 763 p. ISBN 978-607-442-288-71

⁸ HUGHH, Young; FREEDMAN, Roger; SEARS, Francis y ZEMANSKY, Mark. Física universitaria volumen 2. México D.C.: Pearson Educación, 2009. 1482 p. ISBN 970-26-0672-1

1. ANTECEDENTES

Desde mediados de los años sesenta, se han desarrollado distintos filtros de polarización digitales, los cuales, basándose en las propiedades de polarización de las ondas, permiten mejorar la relación señal-ruido⁹. El trabajo teórico en el análisis de la polarización se desarrolló por primera vez para la teoría de las ondas electromagnéticas por Born y Wolf (1964). Ese mismo año, Shimshoni y Smith junto con White fueron los primeros que investigaron el uso de las propiedades de polarización de las ondas transversales. Shimshoni y Smith proponen un método para separar la señal del ruido a partir de registros de tres componentes. El método se basa en la diferencia entre la polarización lineal de la señal y la polarización elíptica del ruido. En el mismo trabajo, los autores proponen descomponer el movimiento vertical y radial en sus componentes de Fourier y calcular en cada instante de tiempo los parámetros (excentricidad, eje principal e inclinación) de una elipse equivalente¹⁰.

En 1964 White propuso un método para eliminar el ruido y determinar la dirección de llegada de cualquier onda sísmica. El método se basa en la relación entre las fases de las diferentes componentes de la oscilación observada en un punto. Cada una de las componentes horizontales del movimiento se multiplica por la componente vertical, con o sin cambio de fase, y los dos productos resultantes se representan como un vector que indica la dirección de la fuente de las ondas sísmicas¹¹.

⁹ TÉLLEZ María Juliana Op. Cit.

¹⁰ BORN, Max y WOLF, Emil. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light. 7th ed. Estados Unidos.: Cambridge University Press, 1999. 378 p. ISBN 0-521-78449-2

¹¹ TÉLLEZ María Juliana Op. Cit

Un planteamiento diferente en el desarrollo de un filtro de polarización fue seguido por Flinn (1965) y algo más tarde por Montalbetti y Kanasewich (1970). Con este método no sólo se determina la linealidad del movimiento de la partícula sino también su dirección. Para ello, se calcula la matriz de covarianza de las tres componentes ortogonales del movimiento del suelo en un intervalo de tiempo. La linealidad de la trayectoria del movimiento de la partícula, en un intervalo de tiempo determinado, se obtiene a partir de una función que relaciona los ejes principales de la matriz; la dirección de polarización es calculada a partir del autovector^(*) del mayor eje principal¹².

Winterstein (1990) presenta un método llamado hodograma para realizar un análisis visual detallado de las características de polarización. Un hodograma se define como una gráfica del desplazamiento de una partícula proyectado en un plano, en una ventana de tiempo elegido, de dos componentes ortogonales de datos¹³.

En la E3T, se han realizado algunos trabajos de grado enfocados a la aplicación de filtros de polarización, entre los que se encuentran: La implementación de un filtro de polarización basado en la descomposición en valores singulares para la atenuación de ruido coherente ground roll por Serrano y Sánchez (2014)¹⁴ y el diseño e implementación de una herramienta software que atenúa el ruido coherente ground roll presente en datos sísmicos multicomponente por Vera y Niño (2011)¹⁵.

(*) Son los vectores no nulos que, cuando son transformados por el operador, dan lugar a un múltiplo escalar de sí mismos, con lo que no cambian su dirección

¹² NGUYEN, D. T.; D BROWN, R.; LAWTON, D. C. Polarization filter for multi-component seismic data. *Exploration Geophysics*, [Online] 2001, [citado 2 marzo 2015] pp. 90-101. Disponible en Biblioteca UIS: Base de datos IEEE.

¹³ GUEVARA, Saúl. Analysis and filtering of near-surface effects in land multicomponent seismic data. Trabajo de grado master en ciencias. Calgary, Alberta.: Universidad de Calgary. Facultad de Geología. Departamento de Geología y Geofísica, 2000. 146 p.

¹⁴ SERRANO Jheyston Omar, SÁNCHEZ Iván Javier Op. Cit

¹⁵ VERA Raúl, NIÑO Carlos Op. Cit

2. REVISIÓN DEL CONCEPTO DE POLARIZACIÓN

2.1 CONCEPTO DE POLARIZACIÓN

La definición de polarización está presente en diversas áreas del conocimiento, tomando un significado diferente y una aplicación propia de cada área, pero manteniendo el mismo concepto¹⁶. En este trabajo de grado se adopta el concepto de polarización como el proceso por el cual se determinan dos o más características distintivas de un conjunto de información inicialmente indiferenciado.

2.1.1 Polarización en matemáticas. En las matemáticas, la polarización es la técnica para expresar un polinomio homogéneo de una manera más simple, produciendo una forma multilineal con la que el polinomio original puede ser recuperado mediante la evaluación a lo largo de cierta diagonal¹⁷. Otro uso en el área, es la identidad de polarización, la cual es cualquier familia de fórmulas que expresan el producto interno de dos vectores, en términos de la norma de un espacio vectorial normalizado¹⁸.

2.1.2 Polarización en física. En física, el concepto de polarización se enfoca al estudio de las ondas. Estas se generan por la propagación de una perturbación de alguna propiedad, como densidad, presión, campo eléctrico o campo magnético, a través de un medio, implicando únicamente un transporte de energía¹⁹ ²⁰. Toda perturbación, ψ , que cumpla con la ecuación general (1) es considerada onda:

¹⁶ WIKIPEDIA ENCICLOPEDIA LIBRE. Polarization in the physical sciences Op. Cit.

¹⁷ PROCESI, Claudio. An approach through Invariants and representation. 1st ed. LieGroups. Springer, 207. 600 p. ISBN 978-0-387-28929-8

¹⁸ RAYA SARO, Andrés; RÍDER MOYANO, Alfonso y RUBIO Ruis, Rafael. Álgebra y geometría lineal. Madrid.: Reverté, 2010. 512 p. ISBN 9788429150384

¹⁹ RAYMOND, Serway y FAUGHN Jerry, Física. 7ma ed. México D.C.: Pearson Educación, 2001. 724 p. ISBN 978-607481357-9

$$\nabla^2\psi = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2\psi}{\partial t^2} \quad (1),$$

donde v es una constante correspondiente a la velocidad de propagación de la onda.

Según su naturaleza, las ondas pueden clasificarse en gravitacionales, mecánicas y electromagnéticas. Las ondas gravitacionales describen la gravedad como una curvatura del espacio-tiempo, propagándose en forma de ondas alejándose de su fuente (cuerpos con autogravedad casi nula), cuya curvatura puede ilustrarse trazando un triángulo a partir de tres puntos de un sistema con solo dimensiones espaciales, donde la suma de sus ángulos no es 180° ^{21 22}. Las ondas mecánicas necesitan de un medio material para su propagación. Al transmitirse, genera que las partículas del medio sufran deformaciones y desplazamientos²³. Las ondas electromagnéticas no necesitan de un medio para su propagación. Estas ondas se generan y propagan mediante oscilaciones de campos eléctricos y magnéticos asociados^{24 25 26}.

Para aplicar el concepto de polarización, como la propiedad que las ondas tienen de oscilar en más de una orientación^{27 28}, es necesario clasificarlas (según la oscilación de la perturbación respecto a la dirección de propagación) en longitudinales o transversales. Las ondas longitudinales se caracterizan porque las partículas del medio se mueven (vibran) paralelamente a la dirección de

²⁰ SEARS. ZEMAMSKY Op. Cit.

²¹ MORENO, Claudia; GARCIA, Ricardo; LARA Arturo y RAMÍREZ Jaime. Inducción a las ondas gravitacionales. EDVCATIO PHYSICORVM QVO NON ASCENDAM [En línea]. Septiembre, 2008 Vol. 2 [citado 2 marzo 2015], pp. 311-319.

²² LAZKOZ, Ruth. Ondas gravitatorias. Revista mexicana de física [En línea]. Agosto, 2013, vol. 49, no. 4 [citado 2 marzo 2015], pp. 384-390.

²³ SEARS. ZEMAMSKY Op. Cit.

²⁴ MORENO Claudia, SALCEDO Arturo Lara, RAMÍREZ Jaime Op. Cit.

²⁵ RAYMOND Serway, FAUGHN Jerry Op. Cit.

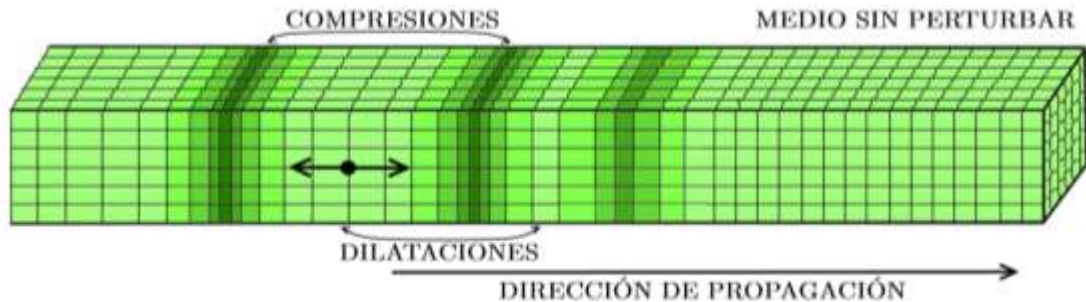
²⁶ SEARS. ZEMAMSKY Op. Cit.

²⁷ Ibíd

²⁸ SERWAY Raymond. FAUGHN Jerry Op. Cit.

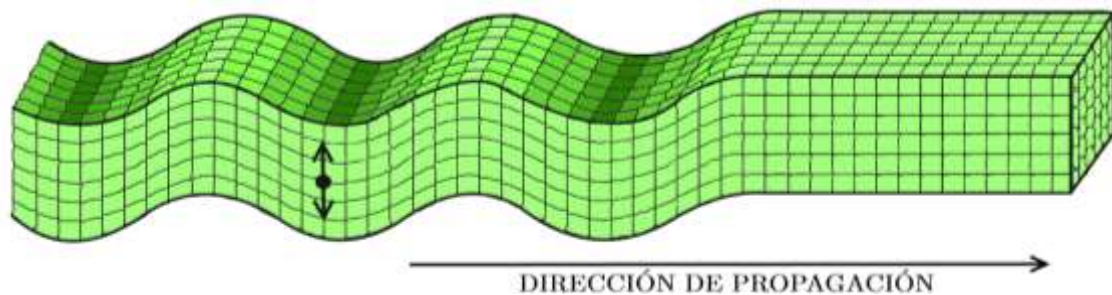
propagación de la onda tal como se muestra en la Figura 1. En las ondas transversales la oscilación de la perturbación es perpendicular a la dirección de propagación del medio²⁹, tal como se muestra en la Figura 2.

Figura 1. Onda longitudinal en un medio isótropo



Fuente: LAZKOZ, Ruth. Ondas gravitatorias. Revista mexicana de física [En línea]. Agosto, 2013, vol. 49, no. 4 [citado 2 marzo 2015], pp. 384-390. Modificada por los autores.

Figura 2. Onda transversal en un medio isótropo



Fuente: LAZKOZ, Ruth. Ondas gravitatorias. Revista mexicana de física [En línea]. Agosto, 2013, vol. 49, no. 4 [citado 2 marzo 2015], pp. 384-390. Modificada por los autores.

Debido a que sólo las ondas transversales pueden presentar oscilaciones en más de una orientación (Por ser perpendiculares a la dirección de propagación), el estudio de polarización se centra en las ondas mecánicas y electromagnéticas

²⁹ Ibíd.

transversales, que pueden presentar polarización de forma lineal, circular o elíptica³⁰.

Con el fin de modelar la polarización de ondas transversales, supóngase que se tiene una perturbación $\vec{\varphi}$ en un sistema de coordenadas cartesianas (x, y, z) que cumple con (1) y varía de forma definida respecto al vector unitario \vec{k} , siendo \vec{r} el vector posición tal que:

$$\vec{\varphi} = [\varphi_x(\vec{r}, t), \varphi_y(\vec{r}, t), \varphi_z(\vec{r}, t)]. \quad (2)$$

Si se asume que la perturbación se propaga en la dirección z en un medio isótropo^(*):

$$\vec{k} \cdot \vec{r} = k z \rightarrow \varphi_z(\vec{r}, t) = 0 \quad (3).$$

Donde k es la magnitud del vector \vec{k} , la perturbación de este vector es cero en la dirección de propagación z debido a que se está modelando como una onda transversal plana (solución homogénea de la ecuación (1)), de presentar perturbación en la dirección z se estaría modelando una onda longitudinal. Por lo cual (2) se reescribe como:

$$\vec{\varphi} = Re\{(\varphi_x, \varphi_y, 0)e^{i(\omega t - kz)}\} \quad (4)$$

Dado que φ_x y φ_y son fasores, entonces se reescribe (4) como:

$$\vec{\varphi} = Re\{[\varphi_{0x}, \varphi_{0y}e^{i\delta}, 0]e^{i(\omega t - kz)}\} \quad (5)$$

³⁰ SERWAY Raymond. FAUGHN Jerry Op. Cit..

(*) Medio que mantiene las mismas propiedades en cualquier dirección.

donde φ_{0x} y φ_{0y} son números reales positivos y δ el desfase relativo entre las componentes en las direcciones X y Y.

Con el fin de independizar del espacio tiempo la expresión (5), se realiza el cambio $(\omega t - kz) = \beta$ en (6) y (7):

$$\varphi_x = \varphi_{0x} \cos(\omega t - kz) \quad (6)$$

$$\varphi_y = \varphi_{0y} \cos(\omega t - kz + \delta) \quad (7)$$

De (6) y (7):

$$\frac{\varphi_x}{\varphi_{0x}} = \cos \beta \quad (8)$$

$$\frac{\varphi_y}{\varphi_{0y}} = \cos(\beta + \delta) = \cos \beta \cos \delta - \sin \beta \sin \delta \quad (9)$$

Reemplazando (8) en (9):

$$\frac{\varphi_y}{\varphi_{0y}} - \frac{\varphi_x}{\varphi_{0x}} \cos \delta = -\sin \beta \sin \delta \quad (10)$$

Elevando al cuadrado ambos lados de la ecuación:

$$\left(\frac{\varphi_y}{\varphi_{0y}} - \frac{\varphi_x}{\varphi_{0x}} \cos \delta \right)^2 = \sin^2 \beta \sin^2 \delta = \left(1 - \left(\frac{\varphi_x}{\varphi_{0x}} \right)^2 \right) \sin^2 \delta \quad (11)$$

Desarrollando y simplificando la expresión anterior se obtiene la forma general de la polarización de una onda transversal plana³¹:

³¹ LELYEN, Ruth. ¿Qué son las ondas gravitacionales? [Online]. Batanga, 2012 [citado 2 marzo 2015]. Disponible en internet: <<http://curiosidades.batanga.com/3728/que-son-las-ondas-gravitacionales>>

$$\left(\frac{\varphi_y}{\varphi_{0y}}\right)^2 + \left(\frac{\varphi_x}{\varphi_{0x}}\right)^2 - 2\frac{\varphi_y}{\varphi_{0y}}\frac{\varphi_x}{\varphi_{0x}}\cos\delta = \sin^2\delta \quad (12)$$

La variación de los parámetros φ_{0y} , φ_{0x} y δ determinan el tipo de polarización de una onda transversal plana. Si φ_{0y} y φ_{0x} son reales y $\delta = \pm m\pi$, donde m son números enteros, se obtiene una polarización lineal (ver Figura 3a)³², con ángulo de polarización ε definido como:

$$\varepsilon = \tan^{-1}\left(\frac{\varphi_{0x}}{\varphi_{0y}}\right) \quad (13)$$

Si φ_y y φ_x se encuentran desfasados $\delta = \left(\pm\frac{\pi}{2} \pm m\pi\right)$ donde m son números enteros y además $|\varphi_{0x}| = |\varphi_{0y}|$ da como resultado una polarización circular (ver Figura 3b)³³, con ángulo de polarización ε definido como:

$$\pm\varepsilon = \tan^{-1}\left(\frac{\varphi_{0x}}{\varphi_{0y}}\right) = \pm(\omega t - kz) \quad (14)$$

Si el desfase es $\delta = \left(\frac{\pi}{2} \pm m\pi\right)$ se tiene polarización circular izquierda y si el desfase es $\delta = \left(-\frac{\pi}{2} \pm m\pi\right)$ se tiene polarización circular derecha.

Finalmente se obtiene polarización elíptica si no se cumplen con las condiciones de los casos anteriores. El ángulo ε es definido como (Figura 3c)³⁴:

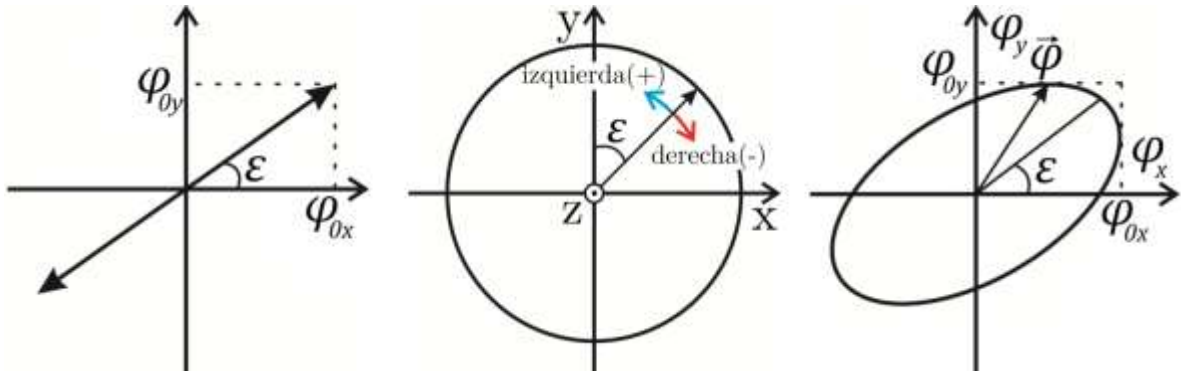
$$\tan(2\varepsilon) = \frac{2\varphi_{0x}\varphi_{0y}\cos\delta}{(\varphi_{0x})^2 - (\varphi_{0y})^2} \quad (15)$$

³² Ibíd.

³³ Ibíd.

³⁴ Ibíd.

Figura 3. Tipos de polarizaciones



(a) Polarización lineal

(b) Polarización circular

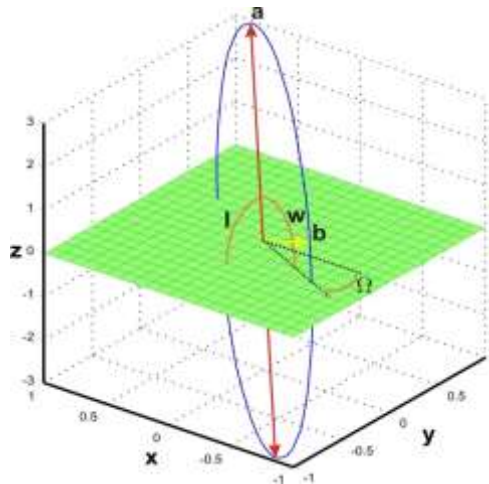
(c) Polarización elíptica

Fuente: LELYEN, Ruth. ¿Qué son las ondas gravitacionales? [Online]. Batanga, 2012 [citado 2 marzo 2015]. Disponible en internet: <<http://curiosidades.batanga.com/3728/que-son-las-ondas-gravitacionales>>. Modificada por los autores

La forma general de la polarización para ondas transversales planas puede ser expresada a partir de elementos elípticos, que permiten describir la elipse de polarización de la expresión (12). Para sistemas tri-componente, cuya polarización es una elipse tridimensional, existen parámetros geométricos que permiten definirla. Estos son: eje mayor de la elipse **a**; eje menor de la elipse **b**; ángulo de inclinación del plano de la elipse **I**; azimut del nodo ascendente **Ω**; ángulo entre el eje mayor y el nodo ascendente **w**; y la fase medida con respecto al tiempo de máximo desplazamiento ϕ ³⁵. En la siguiente Figura se ilustran 5 de los parámetros geométricos para definir la elipse de polarización en sistemas tricomponente:

³⁵ VERA Raúl, Niño Carlos Op. Cit.

Figura 4. Elipse de polarización tricomponente.



Fuente: VERA, Raúl. Implementación de una herramienta software que atenúe el ruido coherente ground roll presente en datos sísmicos multicomponente. . Trabajo de grado ingeniería Electrónica. Bucaramanga, Colombia.: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2011. 61p. Modificada por los autores.

2.1.3 Polarización en información. Al ser un concepto transversal, la polarización permite el análisis de información multicomponente. Para esto es necesario que la información a analizar presente independencia lineal entre los conjuntos que la conforman. En el caso de información adquirida de un fenómeno físico, se pueden aprovechar todos los conceptos de polarización aplicados a ondas, permitiendo así analizar fenómenos como lo son: las ondas sísmicas Rayleigh captadas por sensores multicomponente en exploraciones sísmicas y las señales de radio con interferencia presente en la frecuencia de la información^{36 37}.

³⁶ VERA Raúl, NIÑO Carlos Op. Cit.

³⁷ SERRANO Jheyston Omar, SÁNCHEZ Iván Javier Op. Cit.

2.2 POLARIZACIÓN DE INFORMACIÓN BICOMPONENTE PROVENIENTE DE FENÓMENOS FÍSICOS MODELADOS EN UN SISTEMA CARTESIANO.

Con el fin de realizar el análisis de polarización en información proveniente de fenómenos físicos, se considera un sistema de coordenadas cartesianas, con la coordenada z representando la dirección de propagación y la base ortogonal definida por vectores unitarios horizontal (H) y vertical (V). Seleccionando ventanas de tiempo que permitan analizar la señal como estacionaria e ignorando la fase absoluta de la señal recibida, esta puede ser descrita como³⁸:

$$\mathbf{E}_t(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{tH}(t) \\ \mathbf{E}_{tV}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_t \cos(\varepsilon_t) e^{j(\omega_t t)} \\ E_t \sin(\varepsilon_t) e^{j(\omega_t t + \delta_t)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{tH} e^{j(\omega_t t)} \\ E_{tV} e^{j(\omega_t t + \delta_t)} \end{bmatrix} \quad (16)$$

donde:

$$E_t = \sqrt{E_{tH}^2 + E_{tV}^2} \quad (17)$$

El estado de polarización de la señal recibida $\mathbf{E}_t(t)$, está definido por el ángulo de polarización ε_t y su desfase relativo δ_t los cuales se calculan como:

$$\varepsilon_t = \tan^{-1} \left(\frac{|E_{tV}|}{|E_{tH}|} \right) \quad (18) \quad \delta_t = \text{angle}\{E_{tV}(t)\} - \text{angle}\{E_{tH}(t)\} \quad (19)$$

Con estos parámetros se puede realizar el estudio de polarización de la señal recibida³⁹. Cuando se desea realizar el análisis de polarización como la descomposición de dos señales, se asume que la señal $\mathbf{E}_t(t)$ está compuesta

³⁸ KEAREY, Philip; BROOKS, Michael y HILL, Ian, An introduction to geophysical exploration. 3rd ed. Iowa.: Blackwell Science, 2002. 272 p. ISBN 978-0-632-04929-5

³⁹ *Ibíd.*

únicamente por señal objetivo $E_s(t)$ y la señal interferencia $E_i(t)$ de la siguiente forma:

$$\mathbf{E}_t(t) = \mathbf{E}_s(t) + \mathbf{E}_i(t) \quad (20)$$

donde:

$$\mathbf{E}_s(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{sH}(t) \\ \mathbf{E}_{sV}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varepsilon_s) \\ \sin(\varepsilon_s) e^{j\delta_s} \end{bmatrix} E_s e^{j\omega_s t} = \begin{bmatrix} E_{sH} e^{j\omega_s t} \\ E_{sV} e^{j(\omega_s t + \delta_s)} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\mathbf{E}_i(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{iH}(t) \\ \mathbf{E}_{iV}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varepsilon_i) \\ \sin(\varepsilon_i) e^{j\delta_i} \end{bmatrix} E_i e^{j\omega_i t} = \begin{bmatrix} E_{iH} e^{j\omega_i t} \\ E_{iV} e^{j(\omega_i t + \delta_i)} \end{bmatrix} \quad (22)$$

ε_s y ε_i representan la relación de amplitudes o ángulo de polarización entre la componente vertical y horizontal de las señales objetivo e interferencia, respectivamente. δ_s y δ_i representan la diferencia de fase relativa entre las componentes de la señal objetivo e interferencia. E_s y E_i representan la amplitud de la señal objetivo e interferencia respectivamente⁴⁰, dónde:

$$E_s = \sqrt{E_{sH}^2 + E_{sV}^2} \quad (23)$$

$$E_i = \sqrt{E_{iH}^2 + E_{iV}^2} \quad (24)$$

$$\varepsilon_s = \tan^{-1} \left(\frac{|E_{sV}|}{|E_{sH}|} \right) \quad (25)$$

$$\varepsilon_i = \tan^{-1} \left(\frac{|E_{iV}|}{|E_{iH}|} \right) \quad (26)$$

$$\delta_s = \text{angle}\{E_{sV}(t)\} - \text{angle}\{E_{sH}(t)\} \quad (27)$$

$$\delta_i = \text{angle}\{E_{iV}(t)\} - \text{angle}\{E_{iH}(t)\} \quad (28)$$

Reescribiendo la ecuación (20) en términos de (21) y (22) se obtiene:

$$\mathbf{E}_t(t) = \begin{bmatrix} E_s \cos(\varepsilon_s) e^{j\omega_s t} \\ E_s \sin(\varepsilon_s) e^{j(\omega_s t + \delta_s)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_i \cos(\varepsilon_i) e^{j\omega_i t} \\ E_i \sin(\varepsilon_i) e^{j(\omega_i t + \delta_i)} \end{bmatrix} \quad (29)$$

⁴⁰ Ibíd.

Para el caso en que la señal objetivo y la interferencia tienen la misma frecuencia central, ω_s y ω_i son reemplazados por ω_0 . Este será el caso a analizar en la siguiente discusión:

$$\mathbf{E}_t(\mathbf{t}) = \begin{bmatrix} \cos(\varepsilon_s) \\ \sin(\varepsilon_s) e^{j\delta_s} \end{bmatrix} E_s e^{j\omega_0 t} + \begin{bmatrix} \cos(\varepsilon_i) \\ \sin(\varepsilon_i) e^{j\delta_i} \end{bmatrix} E_i e^{j\omega_0 t} \quad (30)$$

Así, se llega al modelo general usado en algunos filtros de polarización, en los cuales se desea separar o eliminar una polarización particular de la señal recibida⁴¹.

De otra parte, al igual que las ecuaciones provenientes de fenómenos físicos modelados en el sistema cartesiano, es posible realizar cambio de sistema de coordenadas y modelar fenómenos físicos en el sistema circular de mano derecha e izquierda⁴².

⁴¹ KEAREY Philip, BROOKS Michael, HILL Ian. Op. Cit

⁴² Ibíd.

3. FILTROS DE POLARIZACIÓN

3.1 CONCEPTO DE FILTRO DE POLARIZACIÓN

Los filtros de polarización se basan en la diferencia de estado de polarización de las señales a analizar. Estos pueden ser usados para la separación de componentes de la señal, o en la eliminación de componentes con ciertas características de polarización^{43 44 45 46 47}. Existen dos grandes categorías de filtros de polarización: los filtros físicos y los filtros digitales.

3.2 FILTROS DE POLARIZACIÓN FÍSICOS

Los filtros de polarización físicos, utilizan las características de ciertos materiales para la separación de componentes de ondas transversales. Entre las técnicas para el diseño de filtros físicos se destacan: El Dicroísmo, la birrefringencia, el scattering, la reflexión y la interferencia, entre otras ^{48 49}. Para mayor información sobre los filtros de polarización físicos^{50 51}.

⁴³ GUEVARA Saúl Ernesto Op. Cit.

⁴⁴ KEAREY Philip, BROOKS Michael, HILL Ian Op. Cit.

⁴⁵ Ondas Electromagnéticas [Online]. Universidad de la Republica Uruguay: Apuntes para la asignatura FIS-140, [citado 2 marzo 2015]. Disponible en internet: <http://www.fing.edu.uy/if/cursos/optica/apuntes_files/Polarizacion.pdf>

⁴⁶ XIANG-PENG, Mao; WIE-BO Deng y YONG-TAN Liu. Null phase-shift polarization filter for high frequency radar radio interference suppressing. Harbin Institute of Technology [Online]. Mayo, 2008 [citado 3 marzo 2015], pp. 1-5.

⁴⁷ BOERNER Wolfgang M, YAN Wei-ling, XI An Qing, y YAMAGUICHI Yoshio. On the Basic Principles Polarimetry: the Target of Radar Characteristic Polarization State Theory of Kennaugh, Huynen's Polarization Fork Concept, and its Extension to the Partially Polarized Case. Proceedings of the IEEE [Online]. Octubre, 1991, vol. 79 [citado 2 marzo 2015], pp. 1538-1550. Disponible en Biblioteca UIS: Base de datos IEEE.

⁴⁸ *Ibíd.*

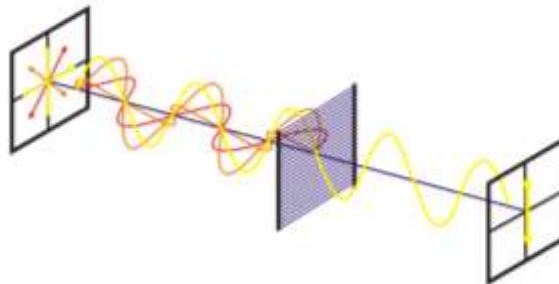
⁴⁹ ZHANG, QinYu, et al. Polarization filtering technique based on oblique projections. *Science China Information Sciences* [Online]. Mayo, 2010, vol. 53, no 5 [citado 3 marzo 2015], p. 1056-1066.

⁵⁰ SEARS y ZEMAMSKY Op. Cit.

⁵¹ JONG-SEN, Lee y POTTIER Eric, Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications. 1st ed. Florida.: CRC Press, 2009. 438 p. ISBN 9781420054972

3.2.1 Dicroísmo. El dicroísmo consiste en la absorción selectiva de una de las componentes ortogonales de la onda transversal debido a las características anisotrópicas^(*) en la construcción del instrumento polarizador. Los polarizadores más comunes empleando esta técnica son: cristales dicroicos, polarizadores de alambre y polaroids⁵². Como ejemplo de esta técnica se tienen los polarizadores de rejilla de alambre: Este aparato consiste en un conjunto de finos alambres colocados paralelamente, los cuales tienen una alta conductividad para los campos paralelos a ellos, de modo que la energía de la componente paralela de la onda se pierde en pequeñas corrientes eléctricas por efecto joule debido a la resistencia de los alambres^{53 54} (Ver Figura 5).

Figura 5. Filtro de polarización físico por principio de dicroísmo (Rejilla de alambre).



Fuente: FERNÁNDEZ, Ángel. Transparencias: Polarización de la luz [Online]. Universidad de Vigo: Grupo de investigación en aplicación laser, 2009 [citado 2 marzo 2015]. Disponible en internet: <http://www.laser.uvigo.es/Docencia/Teleco/Fav.10/restringido/Transparencias/4_FAV_Polarizacion.pdf>. Modificada por los autores.

^(*) Es la propiedad general de la materia según la cual cualidades como: elasticidad, temperatura, conductividad, velocidad de propagación de la luz, etc. varían según la dirección en que son examinadas.

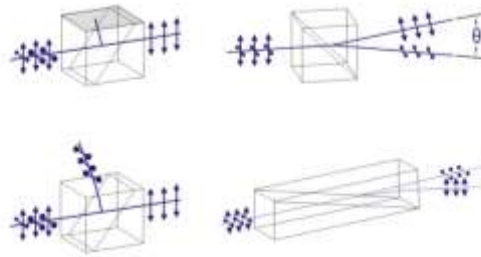
⁵² FERNÁNDEZ, Ángel. Polarización de la luz [Online]. Universidad de Vigo: Grupo de investigación en aplicación laser, 2009 [citado 2 marzo 2015]. Disponible en internet: http://www.laser.uvigo.es/Docencia/Teleco/Fav.10/restringido/Explicaciones/FAv04_Explicacion.pdf

⁵³ ZHANG QinYu, CAO Bin, WANG Jian, ZHANG NaiTong Op. Cit.

⁵⁴ UNIVERSIDAD DE VIGO. (2015, Enero) Grupo de investigación en aplicación laser Op. Cit.

3.2.2 Birrefringencia. La birrefringencia es una propiedad óptica de ciertos materiales, que les permite descomponer un rayo de luz incidente en dos haces de luz con polarizaciones lineales perpendiculares entre sí, generándose un desplazamiento de fase entre las componentes de polarización que viajan con diferentes velocidades dentro del material.⁵⁵ (Ver Figura 6).

Figura 6. Filtro de polarización físico por principio de birrefringencia (Tipos de cristales polarizadores).



Fuente: Polarización de la luz [Online], Física en el IES tierra Estella, 2012 [citado 2 marzo 2015]. Disponible en internet: <<http://fqieste2fisica.blogspot.com/>>. Modificada por los autores

3.2.3 Scattering. Esta técnica de polarización de ondas electromagnéticas está basada en la remoción de un haz de luz por electrones (libres o ligados). Cuando la luz alcanza una nube de partículas polarizables, hace que las cargas eléctricas de sus átomos y moléculas vibren en la dirección de su campo eléctrico. Estos dipolos oscilantes radian nuevas ondas luminosas dispersadas sólo en aquellas direcciones en que su vibración tiene componente transversal⁵⁶. Dentro de esta técnica se encuentran la dispersión *Thompson*, el efecto *Compton* y el mecanismo *Rayleigh*⁵⁷.

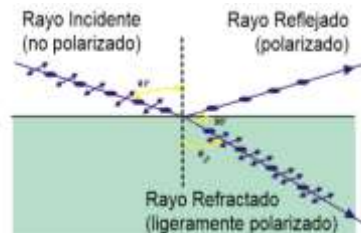
⁵⁵ ZHANG QinYu, CAO Bin, WANG Jian, ZHANG NaiTong Op. Cit.

⁵⁶ Polarización de la luz [Online], Física en el IES tierra Estella, 2012 [citado 2 marzo 2015]. Disponible en internet: <<http://fqieste2fisica.blogspot.com/>>

⁵⁷ REVILLA, Miguel. Birrefringencia [Online]. Universidad Complutense Madrid, oct 2007 [citado 2 marzo 2015]. Disponible en internet: http://pendientedemigracion.ucm.es/info/opticaf/OPT_FIS/apuntes_sueltos_prov/pdf/Tema3_b.pdf

3.2.4 Polarización por reflexión. Cuando una onda electromagnética no polarizada se refleja en una superficie plana entre dos medios transparentes, la onda está parcialmente polarizada dependiendo del ángulo de incidencia y del índice de refracción de ambos medios. Cuando dicho ángulo es tal que los ángulos reflejados y refractados son perpendiculares entre sí, la onda reflejada está completamente polarizada^{58 59} (Ver Figura 7).

Figura 7. Filtro de polarización por reflexión.



Fuente: Polarización de la luz [Online], Física en el IES tierra Estella, 2012 [citado 2 marzo 2015]. Disponible en internet: <<http://fqieste2fisica.blogspot.com/>>. Modificada por los autores

3.2.5 Polarización mediante retardadores. Se basa en el mismo principio de birrefringencia. En esta técnica se usan elementos ópticos que cambian la polarización al introducir una fase entre las componentes ortogonales del haz de luz⁶⁰.

3.2.6 Polarizadores por interferencia. Son dispositivos polarizadores diseñados para trabajar con una longitud de onda y un ángulo de incidencia determinado. Están constituidos por una o varias películas delgadas de materiales dieléctricos cuyo espesor e índice de refracción se calcula para que las componentes de los

⁵⁸ SEARS, ZEMAMSKY Op. Cit.

⁵⁹ LEE JONG Sen, POTTIER Eric Op. Cit.

⁶⁰ ZHANG QinYu, CAO Bin, WANG Jian, ZHANG NaiTong Op. Cit.

haces reflejados en las dos caras de las láminas interfieran destructivamente, tal que sólo se reflejen las componentes deseadas⁶¹.

3.3 FILTROS DE POLARIZACIÓN DIGITALES

Son técnicas que permiten atenuar el ruido coherente presente en información multicomponente, basados en la diferencia de estado de polarización de las señales a analizar, permitiendo resolver problemas como^{62 63}:

- Detección y separación de ondas con diferentes tipos de polarización.
- Determinación de las direcciones de desplazamiento en oscilaciones polarizadas linealmente.
- Separación de oscilaciones linealmente polarizadas en una dirección determinada de oscilaciones con otros parámetros de polarización.
- Determinación de los parámetros de oscilación de las ondas polarizadas elípticamente.

En este grupo de técnicas se encuentran diferentes filtros de polarización: de proyección ortogonal, oblicuos, de proyección oblicua, basados en descomposición en valores singulares, basados en transformada S y filtros de polarización diseñados con la técnica Samson y Olson.

3.3.1 Filtro de polarización de proyección ortogonal. En el filtro de polarización ortogonal, o simplemente filtro de polarización, se realiza la proyección del vector de la señal total sobre la función del filtro de polarización, el cual al ser ortogonal a la interferencia conduce a su perfecta eliminación, dejando únicamente la información relacionada a la señal objetivo^{64 65 66}.

⁶¹ Ibíd.

⁶² VERA Raúl, Niño Carlos, Op. Cit.

⁶³ TÉLLEZ María Juliana, Op. Cit

⁶⁴ KEAREY Philip, BROOKS Michael, HILL Ian, Op. Cit

Diseño del filtro de polarización de proyección ortogonal.

Partiendo de la señal recibida $\mathbf{E}_t(t)$ y asumiendo que los estados de polarización de la señal objetivo e interferencia son conocidos, se plantea la función de proyección ortogonal \mathbf{H}_r como:

$$\mathbf{H}_r = \begin{bmatrix} H_r \cos(\varepsilon_r) \\ H_r \sin(\varepsilon_r) e^{j\delta_r} \end{bmatrix} \quad (31)$$

Donde H_r es la amplitud, ε_r el ángulo de polarización y δ_r la diferencia de fase entre las componentes ortogonales de la función ⁶⁷ ⁶⁸. Aplicando la función \mathbf{H}_r a la señal recibida $\mathbf{E}_t(t)$ se obtiene:

$$E_o(t) = \mathbf{E}_t(t) \cdot \mathbf{H}_r \quad (32)$$

Remplazando la ecuación (20) en (32):

$$E_o(t) = [\mathbf{E}_s(t) + \mathbf{E}_i(t)] \cdot \mathbf{H}_r = [\mathbf{E}_s(t) + \mathbf{E}_i(t)]^T \mathbf{H}_r^* \quad (33)$$

Donde \cdot denota producto punto, T la transposición del vector y $*$ el conjugado.

$$E_o(t) = \mathbf{E}_s(t)^T \mathbf{H}_r^* + \mathbf{E}_i(t)^T \mathbf{H}_r^* \quad (34)$$

Analizando la parte relacionada con la interferencia en la ecuación (34) se tiene:

⁶⁵ BOERNER W M, YAN Wei-ling, XI A Q, YAMAGUICHI Y, Op. Cit

⁶⁶ FERNÁNDEZ, Ángel. Transparencias: Polarización de la luz [Online]. Universidad de Vigo: Grupo de investigación en aplicación laser, 2009 [citado 2 marzo 2015]. Disponible en internet: <http://www.laser.uvigo.es/Docencia/Teleco/Fav.10/restringido/Transparencias/4_FAV_Polarizacion.pdf>

⁶⁷ KEAREY Philip, BROOKS Michael, HILL Ian, Op. Cit

⁶⁸ PENG XIANG Mao, WIE-BO Beng, LIU YOUNG Tan, Op. Cit

$$E_{oi}(t) = \mathbf{E}_i(t)^T \mathbf{H}_r^* = \begin{bmatrix} \cos(\varepsilon_i) \\ \sin(\varepsilon_i) e^{j\delta_i} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \cos(\varepsilon_r) \\ \sin(\varepsilon_r) e^{j\delta_r} \end{bmatrix}^* H_r E_i e^{j\omega_0 t} \quad (35)$$

$$= \{ \cos(\varepsilon_i) \cos(\varepsilon_r) + \sin(\varepsilon_i) \sin(\varepsilon_r) e^{j(\delta_i - \delta_r)} \} H_r E_i e^{j\omega_0 t} \quad (36)$$

Utilizando la representación con la esfera de Poincaré, se puede deducir que para la supresión de la interferencia se requiere que la distancia entre los puntos de \mathbf{H}_r y $\mathbf{E}_i(t)$ sea igual a π ⁶⁹ ⁷⁰. Debido a esto, los parámetros de \mathbf{H}_r (ε_r, δ_r) se calculan a partir de los parámetros de $\mathbf{E}_i(t)$ (ε_i, δ_i), de acuerdo con:

$$\begin{cases} \varepsilon_r + \varepsilon_i = \frac{\pi}{2} \\ \delta_r - \delta_i = \pm\pi \end{cases} \quad (37)$$

Esto convierte la función \mathbf{H}_r en un vector ortogonal a la polarización de la interferencia. Reemplazando la condición (37) en (36) se obtiene la perfecta supresión de la interferencia⁷¹:

$$E_{oi}(t) = \mathbf{E}_i(t)^T \mathbf{H}_r^* = 0 \quad (38)$$

Analizando la señal recibida cumpliendo con las condiciones para la perfecta supresión de la interferencia, la salida del filtro de polarización se define por:

$$E_o(t) = \mathbf{E}_s(t)^T \mathbf{H}_r^* + \mathbf{E}_i(t)^T \mathbf{H}_r^* = \mathbf{E}_s(t)^T \mathbf{H}_r^* \quad (39)$$

$$E_o(t) = [\cos(\varepsilon_s) \cos(\varepsilon_r) + \sin(\varepsilon_s) \sin(\varepsilon_r) e^{j(\delta_s - \delta_r)}] H_r E_s e^{j\omega_0 t} \quad (40)$$

La ecuación (40) muestra que las distorsiones en fase y amplitud de la señal se introducen por \mathbf{H}_r , limitando la aplicación de esta clase de filtros. Además, cuando

⁶⁹ KEAREY Philip, BROOKS Michael, HILL Ian, Op. Cit

⁷⁰ SNIK, Frans. Astronomical Polarimetry. 1st ed. Utrecht.: Utrecht University, 2009. 148 p. ISBN 978-90-393-5184-0

⁷¹ PENG XIANG Mao, WIE-BO Beng, LIU YOUNG Tan, Op. Cit

los ángulos de polarización del objetivo e interferencia son 90° , la señal objetivo y la interferencia se suprimen simultáneamente, sin importar el resto de parámetros de polarización, restringiendo aún más su rango de aplicación. Para superar esto, se plantea una nueva forma del filtro de proyección ortogonal, llamado Filtro de Polarización Notch de Fase Nula (**NPSP - Null Phase Shift Polarization**) el cual será tratado posteriormente ^{72 73}.

3.3.2 Filtros de polarización oblicua. Los filtros de polarización oblicua, se basan en el uso de rotaciones, cambios de fase y ajuste de amplitud, para la separación de los efectos producidos por la señal objetivo e interferencia sobre la señal recibida⁷⁴.

Diseño del filtro de polarización oblicua

Partiendo de la ecuación (30), y asumiendo que los estados de polarización de las señales objetivo e inferencia son conocidos, realizando las operaciones algebraicas correspondientes, se obtiene:

$$\mathbf{E}(t) = \begin{bmatrix} 1 \\ \tan(\varepsilon_s) e^{j\delta_s} \end{bmatrix} E_s e^{j\omega_0 t} + \begin{bmatrix} 1 \\ \tan(\varepsilon_i) e^{j\delta_i} \end{bmatrix} E_i e^{j\omega_0 t} \quad (41)$$

Con el fin de eliminar la fase de la componente vertical de la señal objetivo, se realiza el primer cambio de fase, multiplicando $\mathbf{E}(t)$ con la siguiente matriz⁷⁵:

⁷² KEAREY Philip, BROOKS Michael, HILL Ian, Op. Cit

⁷³ PENG XIANG Mao, WIE-BO Beng, LIU YOUNG Tan Op. Cit

⁷⁴ ROUEFF, Antoine; CHANUSSOT, Jocelyn; MARS y Jérôme I. Estimation of polarization parameters using time–frequency representations and its application to waves separation. *Signal processing* [Online]. 2006, vol. 86, no 12 [citado 2 marzo 2015], pp. 3714-3731.

⁷⁴ BEHRENS, Richard, T y SCHARF, Louis, L. Signal Processing Applications of Oblique Projection Operators. *IEEE Transactions on Signal Processing* [Online]. Junio, 1994, vol. 42 [citado 2 marzo 2015], pp. 1413-1424. Disponible en Biblioteca UIS: Base de datos IEEE.

⁷⁵ Ibíd.

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{(-j\delta_s)} \end{bmatrix} \quad (42)$$

Dando como resultado:

$$\mathbf{E}_a(t) = \mathbf{E}(t) \times \mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ \tan(\varepsilon_s) \end{bmatrix} E_s e^{j\omega_0 t} + \begin{bmatrix} 1 \\ \tan(\varepsilon_i) e^{j(\delta_i - \delta_s)} \end{bmatrix} E_i e^{j\omega_0 t} \quad (43)$$

Posteriormente se elimina la componente vertical de la señal objetivo. Por medio de la multiplicación de la señal $\mathbf{E}_a(t)$ con \mathbf{M}_2 ⁷⁶.

$$\mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} \cos(\varepsilon_s) & \sin(\varepsilon_s) \\ -\sin(\varepsilon_s) & \cos(\varepsilon_s) \end{bmatrix} \quad (44)$$

De lo cual se obtiene la ecuación (45):

$$\mathbf{E}_b(t) = \mathbf{E}_a(t) \times \mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} \rho_2 \\ 0 \end{bmatrix} W_1 + \begin{bmatrix} \lambda_2 e^{j\psi_2} \\ \lambda_3 e^{j\psi_3} \end{bmatrix} W_2 \quad (45)$$

donde:

$$\rho_2 = \frac{1}{\cos(\varepsilon_s)} \quad (46)$$

$$\lambda_2 e^{j\psi_2} = \cos(\varepsilon_s) + \tan(\varepsilon_i) \sin(\varepsilon_s) e^{j(\delta_i - \delta_s)} \quad (47)$$

$$\lambda_3 e^{j\psi_3} = -\sin(\varepsilon_s) + \tan(\varepsilon_i) \cos(\varepsilon_s) e^{j(\delta_i - \delta_s)} \quad (48)$$

$$W_1 = E_s e^{j\omega_0 t} \quad (49)$$

$$W_2 = E_i e^{j\omega_0 t} \quad (50)$$

Posteriormente se realiza el segundo cambio de fase, con el fin de modificar la fase de la componente vertical de la señal interferencia, dejando la componente

⁷⁶ Ibíd.

vertical y horizontal con el mismo desfase relativo. Esto se realiza por medio de la multiplicación de $\mathbf{E}_b(t)$ con \mathbf{M}_3 ⁷⁷.

$$\mathbf{M}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{j(\psi_2 - \psi_3)} \end{bmatrix} \quad (51)$$

Dando como resultado:

$$\mathbf{E}_c(t) = \mathbf{E}_b(t) \times \mathbf{M}_3 = \begin{bmatrix} \rho_2 \\ 0 \end{bmatrix} W_1 + \begin{bmatrix} \lambda_2 e^{j\psi_2} \\ \lambda_3 e^{j\psi_2} \end{bmatrix} W_2 \quad (52)$$

Se realiza la segunda rotación multiplicando la señal $\mathbf{E}_c(t)$ con \mathbf{M}_4 ⁷⁸.

$$\mathbf{M}_4 = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & \sin(\gamma) \\ -\sin(\gamma) & \cos(\gamma) \end{bmatrix} \quad (53)$$

Después de aplicar la rotación se tiene:

$$\mathbf{E}_d(t) = \mathbf{E}_c(t) \times \mathbf{M}_4 = \begin{bmatrix} \rho_2 \cos(\gamma) \\ -\rho_2 \sin(\gamma) \end{bmatrix} W_1 + \begin{bmatrix} \lambda_3 e^{j\psi_2} / (2 \sin(\gamma)) \\ \lambda_3 e^{j\psi_2} / (2 \cos(\gamma)) \end{bmatrix} W_2 \quad (54)$$

donde:

$$\gamma = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_2} \right) \quad (55)$$

Se realiza la amplificación de la señal $\mathbf{E}_d(t)$ multiplicandola por \mathbf{M}_5 ⁷⁹:

$$\mathbf{M}_5 = \begin{bmatrix} \tan(\gamma) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (56)$$

⁷⁷ Ibíd.

⁷⁸ Ibíd.

⁷⁹ Ibíd.

Obteniendo:

$$\mathbf{E}_e(t) = \mathbf{E}_d(t) \times \mathbf{M}_5 = \begin{bmatrix} \rho_2 \sin(\gamma) \\ -\rho_2 \sin(\gamma) \end{bmatrix} W_1 + \begin{bmatrix} \lambda_3 e^{(j\psi_2)}/(2 \cos(\gamma)) \\ \lambda_3 e^{(j\psi_2)}/(2 \cos(\gamma)) \end{bmatrix} W_2 \quad (57)$$

La rotación final corresponde a la siguiente matriz.

$$\mathbf{M}_6 = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (58)$$

Con lo cual se obtiene la separación de las componentes de la siguiente manera:

$$\mathbf{E}_f(t) = \mathbf{E}_e(t) \times \mathbf{M}_6 = \begin{bmatrix} 2\rho_2 \sin(\gamma) \\ 0 \end{bmatrix} W_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ \lambda_3 e^{(j\psi_2)}/\cos(\gamma) \end{bmatrix} W_2 \quad (59)$$

$$= \begin{bmatrix} [2\rho_2 \sin(\gamma)] W_1 \\ [\lambda_3 e^{(j\psi_2)}/\cos(\gamma)] W_2 \end{bmatrix} \quad (60)$$

De la salida del filtro, la información relacionada al objetivo e interferencia queda en las componentes horizontal y vertical respectivamente⁸⁰.

3.3.3 Filtro de polarización: método de proyección oblicua. Este método se basa en el uso del operador de proyección oblicua y en la teoría de subespacios⁸¹. La idea básica del operador es la construcción de un modelo lineal después de la estimación de los parámetros del subespacio correspondiente.

Principio del operador de proyección oblicua.

⁸⁰ Ibíd.

⁸¹ ARNAL, Petra y GIL, Jose. El modelo de la esfera de Poincaré: Representación de medios materiales. Zobia [Online]. Junio, 1991, vol. 9 [citado 2 marzo 2015], pp. 9-17.

Considerando que S es una matriz compleja de tamaño $n \times k$ con rango k e I una matriz compleja de tamaño $n \times m$ con rango m y suponiendo $k + m < n$, entonces, las columnas de S e I son linealmente independientes, indicando que la intersección de los subespacios $\langle S \rangle$ y $\langle I \rangle$ es nula, es decir $S \cap I = \{0\}$ ^{82 83}. Si la intercepción es nula se dice que los subespacios son disjuntos. No obstante, dados dos vectores disjuntos, esto no implica que tales vectores sean ortogonales entre sí. Con base en lo anterior, la matriz compuesta $[S, I]$, es también de rango completo y su rango es $k + m$ ^{84 85 86 87}.

El operador de proyección oblicua a lo largo del subespacio $\langle I \rangle$ sobre el subespacio $\langle S \rangle$ se define como:

$$E_{SI} = [S \ 0] \begin{bmatrix} S^H S & S^H I \\ I^H S & I^H I \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} S^H \\ I^H \end{bmatrix} \quad (61)$$

donde -1 denota la inversa de la matriz y H denota la transposición conjugada de la matriz. La proyección oblicua E_{SI} tienen las siguientes propiedades^{88 89}:

$$\begin{cases} E_{SI} S = S \\ E_{SI} I = 0 \end{cases} \quad (62)$$

Se puede apreciar que el rango de E_{SI} es S , e I es un subespacio del espacio nulo del operador de proyección oblicua^{90 91}. Al ser una extensión de la proyección ortogonal, la proyección oblicua no necesita que los dos subespacios sean

⁸² *Ibíd.*

⁸³ PENG XIANG Mao, WIE-BO Beng, LIU YOUNG Tan Op. Cit

⁸⁴ GIL J. PEREZ ARNAL P Gil Op. Cit

⁸⁵ PENG XIANG Mao, WIE-BO Beng, LIU YOUNG Tan Op. Cit

⁸⁶ ROUEFF Antonie, CHANUSSOT Jocelyn, MARS Jérôme I. Op. Cit

⁸⁷ BEHRENS Richard T Op. Cit

⁸⁸ PENG XIANG Mao, WIE-BO Beng, LIU YOUNG Tan Op. Cit

⁸⁹ GIL J. PEREZ ARNAL P Gil Op. Cit

⁹⁰ PENG XIANG Mao, WIE-BO Beng, LIU YOUNG Tan Op. Cit

⁹¹ GIL J. PEREZ ARNAL P Gil Op. Cit

ortogonales para su funcionamiento. Si los subespacios son ortogonales, el operador de proyección oblicua se convierte en el operador de proyección ortogonal⁹². Una explicación completa del modelo de subespacio se puede encontrar en⁹³.

Filtro de polarización de proyección oblicua para la mitigación de interferencia sencilla.

Partiendo de la señal $E_t(t)$ de la ecuación (20) y de acuerdo a la teoría del operador de proyección se definen los subespacios de polarización de la señal objetivo S y de la interferencia I como ^{94 95}:

$$S = \begin{bmatrix} \cos(\varepsilon_s) \\ \sin(\varepsilon_s) e^{j\delta_s} \end{bmatrix} \quad (63)$$

$$I = \begin{bmatrix} \cos(\varepsilon_i) \\ \sin(\varepsilon_i) e^{j\delta_i} \end{bmatrix} \quad (64)$$

Si los estados de polarización de la señal objetivo y la interferencia son diferentes, los subespacios $\langle S \rangle$ y $\langle I \rangle$ son disjuntos^{96 97}. Por otra parte, $\theta = E_s e^{j\omega_0 t}$ y $\emptyset = E_i e^{j\omega_0 t}$ representan la forma de la señal deseada y la interferencia, respectivamente. Por lo tanto podemos reescribir (65) y (66) como:

⁹² PENG XIANG Mao, WIE-BO Beng, LIU YOUNG Tan Op. Cit

⁹³ YAN, Bing; LI, Xiang y GUO, Hu, Sheng. The Method of Polarization Filter Based on Oblique Projection Operators in Process of Multi-component Acquired Data. Applied Mechanics and Materials [Online]. Julio, 2013, vol. 333 [citado 3 marzo 2015], pp. 656-660.

⁹⁴ PENG XIANG Mao, WIE-BO Beng, LIU YOUNG Tan Op. Cit

⁹⁵ AI-JUN, Liu y XING-PENG, Mao. A Polarization Filtering Method Based On Oblique Projection Operator. Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications [Online]. Octubre, 2009 [citado 2 marzo 2015], pp. 436 - 439. Disponible en Biblioteca UIS: Base de datos IEEE.

⁹⁶ PENG XIANG Mao, WIE-BO Beng, LIU YOUNG Tan Op. Cit

⁹⁷ BEHRENS, Richard. Subspace signal processing in structured noise. Tesis de grado Doctor en Filosofía. Colorado.: University of Colorado. Facultad de graduados. Departamento de ingeniería eléctrica y computación, 1990. 145 p

$$\mathbf{E}_s(t) = \mathbf{S}\theta \quad (65)$$

$$\mathbf{E}_i(t) = \mathbf{I}\phi \quad (66)$$

Remplazando (65) y (66) en (20) se obtiene:

$$\mathbf{E}_r(t) = \mathbf{S}\theta + \mathbf{I}\phi \quad (67)$$

El operador de proyección oblicua, correspondiente a los subespacios de polarización del objetivo y la interferencia, puede ser construido para extraer la señal objetivo. Para ello se expande (61) como⁹⁸:

$$\mathbf{E}_{SI} = \mathbf{S}(\mathbf{S}^H \mathbf{P}_I^\perp \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^H \mathbf{P}_I^\perp \quad (68)$$

Donde \mathbf{P}_I^\perp es el operador de proyección ortogonal sobre el subespacio complementario ortogonal de \mathbf{I} , el cual se calcula como^{99 100}:

$$\mathbf{P}_I^\perp = \mathbf{E} - \mathbf{P}_I = \mathbf{E} - \mathbf{I}(\mathbf{I}^H \mathbf{I})^{-1} \mathbf{I}^H \quad (69)$$

Donde \mathbf{E} denota la matriz identidad y \mathbf{P}_I es el operador de proyección ortogonal sobre el subespacio de interferencia \mathbf{I}^{101} . La salida del filtro de polarización de proyección oblicua corresponde así a:

$$\mathbf{E}_o(t) = \mathbf{E}_{SI}(\mathbf{S}\theta + \mathbf{I}\phi) = \mathbf{S}\theta = \mathbf{E}_s(t) \quad (70)$$

De la ecuación (70) se observa la perfecta eliminación de la interferencia, obteniendo como salida la señal objetivo original. Esto se logra siempre que exista una diferencia en los estados de polarización de la señal objetivo e interferencia,

⁹⁸ PENG XIANG Mao, WIE-BO Beng, LIU YOUNG Tan Op. Cit

⁹⁹ Ibid

¹⁰⁰ GIL J. PEREZ ARNAL P Gil Op. Cit

¹⁰¹ PENG XIANG Mao, WIE-BO Beng, LIU YOUNG Tan Op. Cit

sin necesidad de que sus ángulos de desfase y sus ángulos de polarización sean diferentes al mismo tiempo¹⁰².

3.3.4 Filtro de polarización basado en la descomposición en valores singulares. Este se basa en tres tareas principales. Una primera tarea de filtrado en frecuencia, seguido de la identificación y por último un filtrado adaptativo^{103 104}.

Filtrado en frecuencia

Debido a que las señales a analizar pueden presentar diversos tipos de ondas, se plantea realizar un filtrado para seleccionar las frecuencias en las cuales la mayor parte de la energía contenida sea de la información que se desea procesar. De esta forma se reducen los efectos producidos por el procesado de información no relevante¹⁰⁵.

Identificación

La identificación de la polarización presente en la información multicomponente, se realiza por medio de la descomposición en valores singulares, tomando la información de las tres componentes, asociadas al mismo conjunto de información en una ventana de tiempo deslizante W ¹⁰⁶ (Ver Figura 8).

Figura 8. Ventana de tiempo deslizante para descomposición SVD

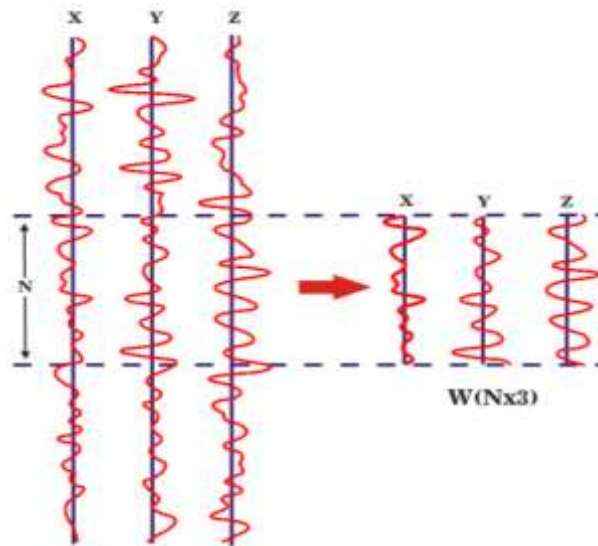
¹⁰² PENG XIANG Mao, WIE-BO Beng, LIU YOUNG Tan Op. Cit

¹⁰³ SERRANO Jheyston Omar, SÁNCHEZ Iván Javier Op. Cit.

¹⁰⁴ TRAVIS BEHRENS Richard Op. Cit

¹⁰⁵ SERRANO Jheyston Omar, SÁNCHEZ Iván Javier Op. Cit.

¹⁰⁶ *Ibíd.*



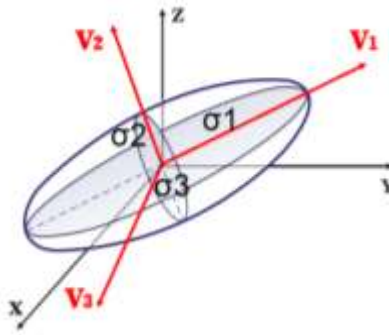
Fuente: LUQUE, Rubén; HURTADO, Nuri y OVALLES Asdrúbal. Implementación de un Filtro de Polarización basado en la Descomposición del Valor Singular (SVD). Tribunal del Investigador [En línea]. 2011, vol. 12 [Citado 2 marzo 2015], pp. 24-27. Modificada por los autores

Al descomponer en valores singulares la matriz W se tiene:

$$W = \sum_{i=1}^3 \sigma_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T = \sum_{i=1}^3 \mathbf{A}_i \quad (71)$$

Donde \mathbf{A}_i son las autoimágenes de la ventana de datos que se está analizando.

Figura 9. Elipsoide formado por valores y vectores propios de la matriz de correlación



Fuente: LUQUE, Rubén; HURTADO, Nuri y OVALLES Asdrúbal. Implementación de un Filtro de Polarización basado en la Descomposición del Valor Singular (SVD). Tribunal del Investigador [En línea]. 2011, vol. 12 [Citado 2 marzo 2015], pp. 24-27. Modificada por los autores

A partir de las características del elipsoide formado por los valores $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ y vectores (V_1, V_2, V_3) propios de la matriz de correlación (Ver Figura 9), se analizan las características de polarización de la información por medio del parámetro e , el cual cuantifica el grado de elipticidad presente en la señal¹⁰⁷.

$$e = (\sigma_1 - \sigma_3)(\sigma_2 - \sigma_3) \quad (72)$$

Para determinar si la señal cumple con las características deseadas, se define el rango de elipticidad el cual tiene como límite e_g , parámetro que corresponde al valor de referencia para determinar la presencia de cierta polarización. Con base en este criterio se define una variable booleana para realizar el filtrado adaptativo^{108 109}.

Filtrado adaptativo

¹⁰⁷ Ibíd.

¹⁰⁸ Ibíd.

¹⁰⁹ LUQUE, Rubén; HURTADO, Nuri y OVALLES Asdrúbal. Implementación de un Filtro de Polarización basado en la Descomposición del Valor Singular (SVD). Tribunal del Investigador [En línea]. 2011, vol. 12 [Citado 2 marzo 2015], pp. 24-27.

Consiste en remover la energía asociada con la polarización deseada en las zonas donde esté presente. Por ejemplo, el filtro adaptativo propuesto en¹¹⁰ es de la forma:

$$F = (1 - g)W - g(W - \tilde{A}_1 - \tilde{A}_2) \quad (73)$$

Donde F son los datos después de aplicado el filtrado adaptativo, g es una variable booleana que toma el valor $g = 1$ cuando $e > e_g$ y $g = 0$ para otros valores. W es la ventana de tiempo que se está analizando, \tilde{A}_1 y \tilde{A}_2 son las dos primeras autoimágenes luego de haber aplicado el filtrado en frecuencia¹¹¹.

El funcionamiento del filtro presentado es tal, que cuando $g = 0$ se determina la no presencia de la polarización deseada y los datos filtrados son los mismos datos originales. Pero cuando $g = 1$ se considera que existe la presencia de la polarización deseada y son restadas las dos primeras autoimágenes de los datos filtrados en frecuencia¹¹². En ¹¹³ se recomienda añadir al filtro la tercera autoimagen \tilde{A}_3 , cuando exista presencia de otras ondas de la misma naturaleza que no presenten la polarización deseada, quedando el filtro representado por la ecuación:

$$F = (1 - g)W - g(W - \tilde{A}_1 - \tilde{A}_2 - \tilde{A}_3) \quad (74)$$

donde \tilde{A}_1, \tilde{A}_2 y \tilde{A}_3 son las autoimágenes de la ventana de datos que se está analizando después de ser filtrada, lo cual se realiza para seleccionar las frecuencias en las cuales la mayor parte de la energía contenida sea de la información que se desea procesar .

¹¹⁰ *Ibíd.*

¹¹¹ SERRANO Jheyston Omar SÁNCHEZ Ivan Javier Op. Cit

¹¹² *Ibíd.*

¹¹³ LUQUE Rubén, HURTADO Nuri, OVALLES Asdrúbal Op. Cit

3.3.5 Filtro de polarización basado en transformada S. Este filtro se basa en el uso de la transformada S, la cual es una técnica de representación espectral en tiempo-frecuencia, con características de la transformada continua Wavelet y la transformada localizada de Fourier; es decir, incorpora características de dos dominios, el dominio de la frecuencia y el dominio del tiempo ^{114 115 116} .

La transformada S es una generalización de la transformada de Fourier para señales no estacionarias y se define como (ver ¹¹⁷ para consulta el desarrollo completo de la ecuación (75)):

$$x(\tau, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{\frac{(t-\tau)^2 f^2}{2}} e^{-j2\pi f t} dt \quad (75)$$

Para la caracterización de la polarización presente en la información, se aplica la transformada S a secciones de la información de cada componente, posteriormente se hace uso de la correlación que presentan los datos obtenido y se plantean los parámetros elípticos en función de las partes reales e imaginarias de las transformadas S de cada traza. La discusión completa sobre este método se puede encontrar en ¹¹⁸. Para la representación de la polarización se hace uso de la técnica de hodograma (Ver Figura 10)¹¹⁹ (para más información ver ¹²⁰ y ¹²¹).

Figura 10. Método de análisis de polarización por hodograma.

¹¹⁴ VERA Raúl, NIÑO Carlos Op. Cit

¹¹⁵ SERRANO Jheyston Omar, SÁNCHEZ Iván Javier Op. Cit.

¹¹⁶ SEARS ZEMAMSKY Op. Cit

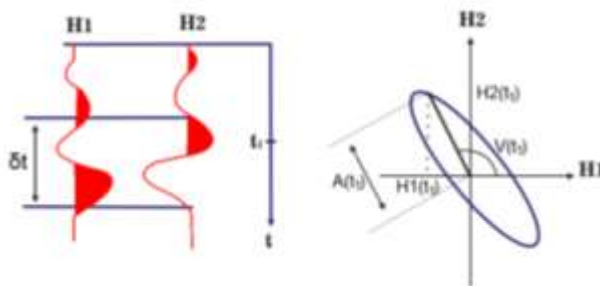
¹¹⁷ VERA Raúl, NIÑO Carlos Op. Cit

¹¹⁸ *Ibíd.*

¹¹⁹ *Ibíd.*

¹²⁰ *Ibíd.*

¹²¹ TIAPKINA, Olena; LANDRØ, Martin; TYAPKIN, Yuriy y LINK, Brian. Single-station SVD-based polarization filtering of ground roll: Perfection and investigation of limitations and pitfalls. *Journal of Geophysics and Engineering* [Online]. Abril, 2012, vol. 77 [citado 2 marzo 2015], pp. 41-59.



(a) Señal bicomponente (b) Hodograma

Fuente: GUEVARA, Saúl. Analysis and filtering of near-surface effects in land multicomponent seismic data. Trabajo de grado master en ciencias. Calgary, Alberta.: Universidad de Calgary. Facultad de Geología. Departamento de Geología y Geofísica, 2000. 146 p. Modificada por los autores.

De manera que los elementos elípticos de dicha elipse tridimensional (Hodograma) describen la contribución que una frecuencia particular f hace a la señal total. La descripción del procedimiento para obtener el hodograma se pueden encontrar en ¹²².

El filtro de polarización basado en transformada S está compuesto por tres filtros que rechazan regiones tiempo-frecuencia para las cuales se cumplen el criterio de polarización deseado. Dichos filtros son función del ángulo de inclinación I del plano de la elipse con el plano horizontal (x,y) , del azimut Ω del nodo ascendente (punto al cual la función cruza el plano horizontal (x,y) en la dirección z positiva) y de los ejes mayor y menor de la elipse de polarización a y b respectivamente. Para el caso particular, en el cual la región de rechazo está comprendida por $I \sim \pi/2$, $\Omega \sim 0$ y $b \geq a/2$, las definiciones matemáticas de los filtros son^{123 124}

¹²² VERA Raúl, NIÑO Carlos Op. Cit

¹²³ Ibid.

¹²⁴ TIAPKINA Olena, LANDRØ Martin, TYAPKIN Yuriy, LINK Brian Op. Cit

$$F_1(I) = \begin{cases} 0, & |I - \frac{\pi}{2}| < \frac{\pi}{10} \\ \frac{1 - \cos[10|I - \frac{\pi}{2}| - \pi]}{2}, & \frac{\pi}{10} \leq |I - \frac{\pi}{2}| \leq \frac{\pi}{5} \\ 1, & |I - \frac{\pi}{2}| > \frac{\pi}{5} \end{cases} \quad (76)$$

$$F_2(b/a) = \begin{cases} 0, & b < 0.4 a \\ \frac{1 + \cos[10\pi(\frac{b}{a} - 0.5)]}{2}, & 0.4 a \leq b \leq 0.5 a \\ 1, & b > 0.5 a \end{cases} \quad (77)$$

$$F_3(\Omega) = \begin{cases} 0, & |\Omega| < \frac{\pi}{6} \\ \frac{1 - \cos[6|\Omega| - \pi]}{2}, & \frac{\pi}{6} \leq |\Omega| \leq \frac{\pi}{3} \\ 1, & |\Omega| > \frac{\pi}{3} \end{cases} \quad (78)$$

Los filtros F_1 y F_3 , aprovechan las características de polarización de ondas que presenten movimientos elípticos retrógrados sobre el plano de propagación de la onda. De otra parte, el filtro F_2 filtra elipses que presenten tendencia circular¹²⁵. El filtro total se obtiene sustituyendo los espectros de la Transformada S de a , b , I y Ω en una ecuación que integre los tres filtros individuales¹²⁶:

$$F[\tau, f] = 1 - \{1 - F_1[\tau_n, f_n]\} \left\{ 1 - F_2\left(\frac{b[\tau_n, f_n]}{a[\tau_n, f_n]}\right) \right\} \{1 - F_3[\tau_n, f_n]\} \quad (79)$$

La ecuación anterior asegura que las partes del domino de la transformada S $[\tau_n, f_n]$ rechazadas por F sean sólo aquellas que son rechazadas por los tres filtros F_1 , F_2 y F_3 , evitando así que las ondas internas que no presentan la polarización deseada y que cumplan con algunas de estas restricciones sean eliminadas^{127 128}. El subíndice n indica que la variable es discreta.

¹²⁵ Ibid.

¹²⁶ VERA Raúl, NIÑO Carlos Op. Cit

¹²⁷ Ibid.

Por último la reconstrucción de la señal total se realiza aplicando la transformada S inversa sobre el conjunto de información obtenida después del filtrado, para recuperar la señal objetivo.

3.3.6 Filtro de polarización diseñado con la técnica Samson y Olson. Este filtro se basa en el uso de la convolución y la transformada de Fourier para la atenuación de información que cumpla con los parámetros de polarización deseados. Este filtro no requiere de prefiltrado de polarización, debido a que el filtro actúa sobre toda polarización diferente a la lineal¹²⁹.

Método de diseño del filtro de polarización basado en la técnica Samson y Olson

Se parte denotando el multicanal (señal multicomponente) de información como:

$$\mathbf{x}^T(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)] \quad (80)$$

Suponiendo que se tienen 3 componentes, el multicanal se redefine de la siguiente forma:

$$\mathbf{x}^T(t) = [x_1(t), x_2(t), x_3(t)] \quad (81)$$

Con $x_1(t)$ como la componente vertical, definida positiva hacia arriba y utilizando el sistema cartesiano de mano derecha, se plantea el grado de polarización “P” como¹³⁰:

$$P = \frac{n(\text{Tr}\mathbf{S}^2) - (\text{Tr}\mathbf{S})^2}{(n - 1)(\text{Tr}\mathbf{S})^2} \quad (82)$$

¹²⁸ TIAPKINA Olena, LANDRØ Martin, TYAPKIN Yuriy, LINK Brian Op. Cit

¹²⁹ S JIN S RONEN, "Ground Roll Detection and Attenuation by 3C Polarization Analysis," in 67th EAGE Conference & Exhibition , 2005.

¹³⁰ SAMSON, J. C. y OLSON, J. V. Data-adaptive polarization filters for multichannel geophysical data. *Geophysics* [Online]. Febrero, 1981 Vol. 46 [citado 2 marzo 2015], pp. 1423-143.

Donde Tr denota el operador traza, n el número de canales y S la matriz de densidad espectral de la información, la cual se define como:

$$S(f, \delta) = \int_{f-\delta}^{f+\delta} \mathbf{z}(\omega)\mathbf{z}^{-1}(\omega) d\omega \quad (83)$$

donde -1 denota la inversa de la matriz y $\mathbf{z}(\omega)$ es:

$$\mathbf{z}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{x}(t) e^{-i2\pi f t} dt \quad (84)$$

Por último el filtro de polarización propuesto puede expresarse como:

$$\mathbf{y}(t) = \frac{1}{2\pi T} \int_{-\infty}^{\infty} P^g(\omega)\mathbf{z}(\omega)e^{i\omega t} d\omega \quad (85)$$

Donde T denota la longitud de la ventana que se usa para seleccionar la porción de señal que se desea analizar y g es un número positivo que se puede aumentar para incrementar el rechazo de polarizaciones no lineales¹³¹.

Este filtro elimina las polarización con grado de polarización cero (0) y atenúa el resto de polarizaciones elípticas en función del grado de rechazo caracterizado con el parámetro g . Sólo las señales con polarización lineal no son filtradas. La salida es la reconstrucción en tiempo de las señales filtradas.

3.4 CONTRASTE ENTRE TÉCNICAS DE DISEÑO DE FILTROS DE POLARIZACIÓN DIGITALES

¹³¹ Ibid.

En el siguiente cuadro se identifican las ventajas y desventajas de los filtros de polarización presentados en la sección anterior, analizando y comparando la literatura revisada sobre cada método.

Cuadro 1. Comparación de las técnicas de diseño de filtros de polarización.

Técnica	Ventajas o características	Desventajas
Proyección Ortogonal	<ul style="list-style-type: none"> • La caracterización del filtro para la perfecta supresión de la interferencia de una señal bicomponente sólo depende de dos parámetros de polarización. • La matemática que rige al filtro está basada en la proyección ortogonal entre vectores. • Existen diferentes versiones de filtros de polarización basados en esta técnica, los cuales buscan mejorar los problemas que presenta este filtro. 	<ul style="list-style-type: none"> • La salida es un número escalar, lo cual hace que la reconstrucción de la señal tenga infinitas posibilidades. Por lo tanto, es necesario implementar una técnica de inversión para recuperar la señal después del filtrado. • Se introduce un cambio de amplitud y fase por la función filtro. • Es necesario determinar exactamente los parámetros de polarización de la interferencia y conocer un parámetro de polarización de la señal objetivo para garantizar el perfecto funcionamiento e inversión del filtro.
Filtro Oblicuo	<ul style="list-style-type: none"> • La matemática que rige este filtro está basada en rotaciones, cambios de fases y amplificaciones, por medio de multiplicaciones matriciales. • Se separan las polarizaciones deseadas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Es necesario caracterizar perfectamente los parámetros de polarización tanto del objetivo como de la interferencia, para garantizar el perfecto funcionamiento del filtro. • Es necesario implementar una técnica de inversión para recuperar la señal después del filtrado. • No permite eliminar componentes de polarización de la señal total.
Proyección Oblicua	<ul style="list-style-type: none"> • No es necesaria ninguna técnica de inversión después de filtrar la señal. • No introduce cambios de amplitud o fase, en la señal filtrada 	<ul style="list-style-type: none"> • Es necesario caracterizar perfectamente los parámetros de polarización tanto del objetivo como de la interferencia, para garantizar el perfecto funcionamiento del filtro.
Descomposición en valores singulares (SVD)	<ul style="list-style-type: none"> • Se analiza la polarización de la señal multicomponente en el dominio del tiempo. • Se aplica un filtrado adaptativo en las zonas donde se ha localizado la señal con la polarización deseada. • Permite analizar el grado de polarización como la contribución de infinitas frecuencias. 	<ul style="list-style-type: none"> • No se analiza la contribución por frecuencia en el comportamiento de la señal total. • De ser encontrada la polarización deseada, se eliminan las autoimágenes que la contiene, con lo cual se pierde la información de frecuencias en las cuales no estaban presentes las características deseadas. • No se analiza la señal a filtrar como la

Cuadro 1. Continuación.

Técnica	Ventajas o características	Desventajas
		suma de señal objetivo e interferencia, lo cual no permite la recuperación de una señal en el caso de cumplir con las características de polarización deseadas.
Transformada S	<ul style="list-style-type: none"> • Se analizan las frecuencias que componen la señal, permitiendo la eliminación selectiva de polarización en cada frecuencia. • Se hace un análisis de polarización tomando las tres componentes de tal manera que se atenúan las componentes elípticas y se resaltan los componentes lineales. • Se realiza un filtrado adaptativo. 	<ul style="list-style-type: none"> • La transformada S inversa en la señal reconstruida, queda con energía indeseada en diferentes intervalos de tiempo. • No se analiza la señal a filtrar como la suma de señal objetivo e interferencia, lo cual no permite la recuperación de una señal en el caso de cumplir con las características de polarización deseadas.
Samson y Olson	<ul style="list-style-type: none"> • Se analizan las frecuencias que componen la señal, permitiendo la eliminación selectiva de polarización en cada frecuencia. • No se necesita de técnica de inversión post filtrado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Si la señal de entrada es de polarización lineal el filtro no actúa. Sólo permite atenuar señales de acuerdo con los respectivos factores de polarización y de rechazo. • No se analiza la señal a filtrar como la suma de señal objetivo e interferencia, lo cual no permite la recuperación de una señal en el caso de cumplir con las características de polarización deseadas.

3.5 POSIBLE APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE FILTROS DE POLARIZACIÓN EN LA ATENUACIÓN DE RUIDO COHERENTE PRESENTE EN SEÑALES SÍSMICAS

Se presentan las discusiones relacionadas con la posible aplicación de los filtros de polarización digitales expuestos, para la atenuación de ruido coherente presente en señales sísmicas multicomponente.

3.5.1 Filtro de polarización de proyección ortogonal. Los filtros de proyección ortogonal pueden ser usados con ciertas restricciones y modificaciones en la atenuación de ruido coherente presente en señales sísmicas multicomponente, como se demostrará en el capítulo 4, en el cual se implementará el filtro de

polarización notch de fase nula (**NPSP**), que hace parte del grupo de filtros de polarización de proyección ortogonal.

Estos filtros tienen la desventaja de tener como salida un número complejo, el cual está en función de los parámetros del filtro, la información de la polarización de la señal objetivo e información de la polarización de una señal remanente^{132 133 134} si no es suprimida perfectamente la interferencia, lo que obliga a implementar una técnica de inversión que permita recuperar una señal que contenga un parámetro de polarización deseado dentro del subconjunto de posibles soluciones (ver capítulo 4).

Este tipo de filtros obliga a tener conocimientos de los fenómenos físicos que se desean recuperar y atenuar, para lograr definir los parámetros de polarización utilizados en la recuperación de la señal deseada y en filtrado de la interferencia, siendo esto una restricción, debido a que el ruido coherente en señales sísmicas reales cambia dependiendo de la profundidad y el medio de transmisión¹³⁵, lo cual implica que utilizar un único par de parámetros de polarización para caracterizar la interferencia y un único parámetro de polarización para la señal deseada en todas las trazas analizadas puede llevar a la pérdida de información y un posible cambio del significado físico de la señal recuperada.

Para implementar estos filtros se deben solucionar los limitantes que presenta la técnica de inversión del filtrado y la caracterización de las señales objetivos e interferencia. Una solución se presenta en el capítulo 4.

3.5.2 Filtro de polarización oblicua. Debido a que este filtro solo separa la información asociada a la polarización de la interferencia y el objetivo, es

¹³² AI-JUN LIU AND XING-PENG MAO Op. Cit.

¹³³ SAMSON J C, OLSON J V. Op. Cit.

¹³⁴ DU, Zhijun; FOULGER, G. R.; MAO, Weijian. Noise reduction for broad-band, three-component seismograms using data-adaptive polarization filters. *Geophysical Journal International [Online]*. Marzo, 2000, vol. 141, no 3 [citado 5 marzo 2015], pp. 820-828.

¹³⁵ SERRANO Jheyston Omar, SÁNCHEZ Iván Javier Op. Cit.

necesario recurrir a otra técnica para realizar la eliminación o atenuación de la información considerada interferencia. Además, se necesita tener previamente definidos los parámetros de polarización de ambas señales.

Este filtro requiere de una técnica de inversión para la reconstrucción de la señal objetivo, debido a que su salida es un número complejo con información de la polarización de la señal objetivo, interferencia y los cambios de amplitud y fase realizados por la separación.

Se considera una técnica inviable en la atenuación de ruido coherente presente en señales sísmicas multicomponente, dado que solo permite la separación de polarizaciones y es necesario tener perfectamente caracterizadas tanto la señal objetivo como la interferencia.

3.5.3 Filtro de polarización de proyección oblicua. Este filtro de polarización realiza el filtrado por frecuencia y no requiere técnica de inversión. Su salida es una matriz de dos columnas con la información de las componentes horizontal y vertical filtradas.

Esta técnica se puede usar en la atenuación de ruido coherente en señales sísmicas bi-componente sin realizar ningún cambio al modelo presentado en el capítulo 3. Su principal dificultad radica en la caracterización de los parámetros de polarización usados para la creación de los subespacios de la señal objetivo e interferencia, debido a que una mala caracterización de dichos parámetros, repercutirá en la introducción de errores en la señal recuperada. En otras palabras, se introducirá una señal remanente a la salida del filtro que puede ocasionar la pérdida de información y modificar el sentido físico de las componentes de la señal obtenida después del filtrado. Para evitar este

inconveniente se plantea en ¹³⁶ usar un modelo estadístico y las funciones wavelets para definir un estándar de lo que se considerara señal objetivo e interferencia.

Se deben solucionar los problemas de la caracterización de los parámetros de polarización de las señales objetivo e interferencia, para la implementación de este filtro en la atenuación de ruido coherente presente en señales sísmicas multicomponente.

3.5.4 Filtro de polarización basado en la descomposición en valores singulares. Este filtro de polarización es implementado en el proyecto de grado de Sánchez y Serrano¹³⁷ para la atenuación de ruido coherente presente en señales sísmicas multicomponente. El filtro realiza el análisis de polarización en tiempo, con lo cual se analiza el ground roll como la contribución de diferentes frecuencias en un único movimiento elíptico retrógrado.

Para el filtrado de polarización, es necesario que se defina el rango del grado de polarización considerado ruido coherente, lo cual permite que no sea necesario un pre filtrado de polarización. La eliminación del ruido coherente se hace por medio de supresión de autoimágenes (Técnica explicada en el capítulo 3), lo cual genera la pérdida total de la información de la zona en la cual se realiza el filtrado.

Esta técnica ya es usada en la atenuación y eliminación de ruido coherente en señales sísmicas multicomponente. El método permite el estudio de las direcciones en las cuales se concentra la mayor energía de los datos, brindando la oportunidad de determinar parámetros que ayuden a estimar el ground roll presente en zonas localizadas de la señal.

¹³⁶ JIN S RONEN S Op. Cit.

¹³⁷ SERRANO Jheyston Omar, SÁNCHEZ Iván Javier Op. Cit.

3.5.5 Filtro de polarización basado en transformada S. Este filtro de polarización es implementado en el en el proyecto de grado de Vera y Niño¹³⁸ para la atenuación de ruido coherente presente en señales sísmicas multicomponente.

Este filtro realiza el análisis de polarización en el dominio tiempo-frecuencia, permitiendo analizar tramos de información de la señal de entrada para la posterior atenuación o eliminación de la señal considerada interferencia. Los parámetros de polarización son calculados por medio de la técnica de hodograma (técnica explicada en¹³⁹).

El filtrado de la polarización se realiza de forma adaptativa (técnica explicada en el capítulo 4), lo cual permite salvaguardar información que no cumple con todos los rangos considerados como ruido coherente. No obstante, al aplicar el proceso de filtrado y realizar la respectiva transformada S inversa, la señal reconstruida queda contaminada con energía indeseada en diferentes intervalos de tiempo¹⁴⁰.

Se considera que esta técnica puede ser usada en la atenuación de ruido coherente presente en señales multicomponente, si es evitada la suma del espectro en el tiempo al considerar cada espectro local como una función del tiempo (el centro de la ventana Gaussiana) que posteriormente es mapeado directamente al dominio del tiempo¹⁴¹.

3.5.6 Filtro de polarización basado en la técnica Samson y Olson. Esta técnica está restringida para eliminar únicamente polarización con características circulares, atenuando las señales en medida del factor de polarización y de rechazo. Su implementación para atenuar ruido coherente presente en señales sísmicas podría ser útil, si se modela el ruido coherente como de polarización

¹³⁸ Ibid.

¹³⁹ VERA Raúl. NIÑO Carlos Op. Cit.

¹⁴⁰ Ibid.

¹⁴¹ Ibid.

elíptica y la señal a recuperar como una señal con polarización lineal. Tiene como ventaja que no es necesaria una técnica de inversión para obtener las componentes horizontal y vertical de la señal filtrada, además, al realizar el filtrado por frecuencia, sólo las frecuencias con parámetros de polarización con tendencias circulares son afectadas.

3.5.7 Conclusión sobre técnicas de diseño de filtro de polarización. Al analizar las diferentes técnicas de diseño de filtros de polarización, se encontró gran variedad de aplicaciones en las cuales son usadas, siendo el área más común el filtrado de polarización en señales de radar. Filtros de polarización basados en descomposición en valores singulares y basados en transformada S, ya están siendo implementados en el análisis de señales sísmicas multicomponente. Por otra parte, filtros de polarización como los de proyección ortogonal aun no son aplicados en este tipo de señales, lo cual, nos brinda la posibilidad de explorar nuevas alternativas, haciendo uso de las características utilizadas en otras aplicaciones, para así probar la migración de técnicas entre diferentes aplicaciones.

4. FILTRO DE POLARIZACIÓN NOTCH DE FASE NULA (NPSP)

El filtro de polarización notch de fase nula (Null Phase-Shift Polarization – NPSP – filter) hace parte del grupo de los filtros de polarización de proyección ortogonal. Este es una mejora a los filtros ortogonales en los cuales se producen cambios de fase y amplitud por la función de filtrado. Con el fin de mejorar esta limitante, se plantea un factor de compensación de amplitud-fase¹⁴², para lo cual se parte de la ecuación (40).

$$E_o(t) = \mathbf{E}_s(t)^T \mathbf{H}_r^* = [\cos(\varepsilon_s) \cos(\varepsilon_r) + \sin(\varepsilon_s) \sin(\varepsilon_r) e^{j(\delta_s - \delta_r)}] H_r E_s e^{j\omega_0 t} \quad (86)$$

Un caso conveniente corresponde a la polarización lineal, en la que se tiene $\varepsilon_s \approx 90^\circ$, $\cos \varepsilon_s \approx 0$ y $\sin \varepsilon_s \approx 1$, y reemplazando estas condiciones en (86), se tiene¹⁴³:

$$E_o(t) = \mathbf{E}_s(t)^T \mathbf{H}_r^* \approx \sin(\varepsilon_r) e^{j(\delta_s - \delta_r)} E_s H_r e^{j\omega_0 t} \quad (87)$$

De la ecuación (87) se concluye que el cambio de amplitud dependen de ε_r y el cambio de fase de δ_r . Esto puede llevar a pérdida de información en sistemas con parámetros adaptativos para el filtro, debido a esto se plantea un factor de compensación de la forma $\mathbf{FC} = \frac{e^{j\delta_r}}{\sin(\varepsilon_r)}$ ^{144 145}. La salida del filtro de polarización aplicando el factor será:

$$E_o(t) = \mathbf{E}_s(t)^T \mathbf{H}_r^* \left(\frac{e^{j\delta_r}}{\sin(\varepsilon_r)} \right) \quad (88)$$

¹⁴² PENG XIANG Mao, WIE-BO Beng, LIU YOUNG Tan Op. Cit.

¹⁴³ *Ibíd.*

¹⁴⁴ *Ibíd.*

¹⁴⁵ S Jin, S Ronen Op. Cit.

4.1 EL PROBLEMA DE INVERSIÓN DE LOS FILTROS DE POLARIZACIÓN ORTOGONALES

Los filtros de polarización de proyección ortogonal, incluido el filtro **NPSP**, permiten la recuperación de infinitas señales objetivo acotadas dentro del subespacio de solución; el cual está determinado por los parámetros de la interferencia y la señal de entrada. Debido a esto, se deben conocer exactamente la interferencia y el comportamiento físico de la señal objetivo, para su perfecta separación.

4.2 RECUPERACIÓN DE LA SEÑAL OBJETIVO

Con el fin de solucionar el problema de inversión de los filtros de polarización ortogonales, se plantean tres casos para la recuperación de la señal objetivo:

Caso 1. Recuperación de polarización vertical.

La polarización vertical es un caso particular de polarización lineal, en el cual la señal multicomponente presenta grado de polarización $\varepsilon_s = \frac{\pi}{2}$, lo que implica que solo se tiene información en la componente vertical. Aplicando el filtro de polarización notch de fase nula (NPSP) sobre la señal descrita en (30) y asumiendo que se suprime perfectamente la interferencia se obtiene la siguiente expresión:

$$E_0(t) = E_s H_r e^{j\omega_0 t} \left[\frac{\cos(\varepsilon_s)}{\tan(\varepsilon_r)} e^{j\delta_r} + \sin(\varepsilon_s) e^{j\delta_s} \right] \quad (89).$$

Remplazando en la ecuación (89) la condición de polarización vertical y considerando $H_r = 1$ y $\sin(\varepsilon_s) = 1$ se obtiene:

$$E_0(t) = E_s e^{j(\omega_0 t + \delta_s)}. \quad (90)$$

Con lo cual se muestra que la salida del filtro de polarización es la señal objetivo $E_s(t)$ con polarización vertical que estaba presente en la señal recibida $E_r(t)$.

Caso 2. Recuperación de polarización lineal.

Una señal multicomponente presenta polarización lineal cuando su desfase relativo $\delta = 0$. Partiendo de la ecuación (88) y reemplazando la condición de polarización vertical la salida del filtro NPSP es:

$$E_0(t) = E_s H_r e^{j\omega_0 t} \left[\frac{\cos(\varepsilon_s)}{\tan(\varepsilon_r)} e^{j\delta_r} + \sin(\varepsilon_s) \right] \quad (91)$$

De la ecuación anterior se obtiene un sistema de dos ecuaciones y dos incógnitas. Suponiendo que $H_r = 1$ y expandiendo la ecuación (91) se obtiene:

$$E_0(t) = E_s e^{j\omega_0 t} \left[\frac{\cos(\varepsilon_s)}{\tan(\varepsilon_r)} \cos(\delta_r) + \sin(\varepsilon_s) + j \frac{\cos(\varepsilon_s)}{\tan(\varepsilon_r)} \sin(\delta_r) \right] \quad (92)$$

Aplicando algunas relaciones trigonométricas se obtiene:

$$\tan(\varepsilon_s) = \frac{K \sin(\delta_r) - \cos(\delta_r)}{\tan(\varepsilon_r)}. \quad (93)$$

donde

$$K = \frac{\text{Real}\{E_0(t)\}}{\text{Imag}\{E_0(t)\}}. \quad (94)$$

Deduciendo E_s de (92) se obtiene:

$$E_s = \frac{Imag\{E_0(t)\} \tan(\varepsilon_r)}{\sin(\delta_r) \cos(\varepsilon_s)}. \quad (95)$$

Utilizando las ecuaciones (93) y (94) se recupera la señal objetivo con polarización lineal. Con (93) se determina ε_s y luego con (94) se calcula E_s .

Caso 3. Recuperación de cualquier polarización.

En este caso se plantea la búsqueda de una señal con polarización diferente a lineal. Para esto se parte de la ecuación (88), con la cual se tiene un sistema de dos ecuaciones y tres incógnitas las cuales son E_s , δ_s y ε_s . Para poder realizar la inversión se determinó una serie de condiciones en función de la salida del filtro de polarización, el desfase relativo (δ_s), la amplitud (E_s) y el ángulo de polarización (ε_s) deseados. Se parte de la separación en parte real e imaginaria de la salida del filtro NPSP donde:

$$A = real\{E_0\} \quad (96) \quad B = imag\{E_0\} \quad (97)$$

Comparando la salida del filtro **NPSP**, con los valores que idealmente se obtendrían de ser eliminada perfectamente la interferencia y tomando $H_r = 1$ se crean las siguientes igualdades:

$$A = E_s \left[\frac{\cos(\delta_r)}{\tan(\varepsilon_r)} \cos(\varepsilon_s) + \sin(\varepsilon_s) \cos(\delta_s) \right] \quad (98)$$

$$B = E_s \left[\frac{\sin(\delta_r)}{\tan(\varepsilon_r)} \cos(\varepsilon_s) + \sin(\varepsilon_s) \sin(\delta_s) \right] \quad (99)$$

Realizando algunas manipulaciones algebraicas se obtiene:

$$\frac{A \sin(\delta_r) - B \cos(\delta_r)}{[B \cos(\delta_s) - A \sin(\delta_s)] \tan(\varepsilon_r)} = \tan(\varepsilon_s) \quad (100)$$

Asumiendo que $\tan(\varepsilon_s) > 0$ se puede representar cualquier situación de polarización, ya que se puede aceptar que las amplitudes que se usan en el cálculo de $\tan(\varepsilon_s) > 0$ siempre son positivas sin perder generalidad en el modelado. De otra parte, $\tan(\varepsilon_r)$ siempre es mayor que 0, debido a la definición de ε_r dada en (37) y considerando que el ángulo de polarización de la interferencia está acotado entre 0 y $\pi/2$. A partir de estas dos condiciones, se plantean tres condiciones basadas en el desfase relativo (δ_s) como parámetro deseado (las condiciones también pueden plantearse a partir del ángulo de polarización (ε_s) o la amplitud de la señal objetivo (E_s)) y se consideró $\delta_s^{limit} = \text{atan}\left(\frac{B}{A}\right)$ para determinar el subconjunto de posibles soluciones como:

Primera condición: Si $A \sin(\delta_r) - B \cos(\delta_r) > 0$, entonces se debe cumplir que $B \cos(\delta_s) - A \sin(\delta_s) > 0$. Esto acota el grupo de posibles desfases relativos a los ángulos que cumplan con:

1) Si A y B son positivos (diferentes que cero), entonces se cumplirá que:

$$(\delta_s^{limit} - \pi) < \delta_s < \delta_s^{limit}.$$

2) Si A y B son negativos (diferentes de cero), entonces se cumplirá que:

$$-\pi < \delta_s < (\delta_s^{limit} - \pi) \text{ y que } \delta_s^{limit} < \delta_s < \pi.$$

3) Si A <0 y B>0. Se cumplirá que:

$$\delta_s^{limit} < \delta_s < (\delta_s^{limit} + \pi).$$

4) Si $A > 0$ y $B < 0$. Se cumplirá que:

5)

$$-\pi < \delta_s < \delta_s^{limit} \text{ y que } (\pi + \delta_s^{limit}) < \delta_s < \pi.$$

Segunda condición: Si $A \sin(\delta_r) - B \cos(\delta_r) < 0$, entonces se debe cumplir que $B \cos(\delta_s) - A \sin(\delta_s) < 0$, acotando el grupo de posibles desfases relativos como los ángulos que cumplan con:

1) Si A y B son positivos (diferentes que cero), entonces se cumplirá que:

$$-\pi < \delta_s < (\delta_s^{limit} - \pi) \text{ y que } \delta_s^{limit} < \delta_s < \pi.$$

2) Si A y B son negativos (diferentes de cero), entonces se cumplirá que:

$$(\delta_s^{limit} - \pi) < \delta_s < \delta_s^{limit}.$$

3) Si $A < 0$ y $B > 0$. Se cumplirá que:

$$-\pi < \delta_s < \delta_s^{limit} \text{ y que } (\pi + \delta_s^{limit}) < \delta_s < \pi.$$

4) Si $A > 0$ y $B < 0$. Se cumplirá que:

$$\delta_s^{limit} < \delta_s < (\delta_s^{limit} + \pi).$$

Tercera condición: Si $A \sin(\delta_r) - B \cos(\delta_r) = 0$, obliga a que $B \cos(\delta_s) - A \sin(\delta_s) \neq 0$, acotando el grupo de posibles desfases relativos como los ángulos que cumplan con $\tan^{-1}\left(\frac{B}{A}\right) \neq \delta_s$.

De esta forma quedan descritas todas las posibilidades para recuperar la señal con la polarización deseada. Después de definir un desfase relativo (δ_s) que

satisfaga las condiciones anteriores, se procede a calcular el ángulo de elipticidad (ε_s) con (100). Por último se calcula la amplitud de la señal reemplazando los parámetros calculados anteriormente (ε_s, δ_s) en la ecuación (97) obteniendo:

$$E_s = \frac{A}{\left[\frac{\cos(\delta_r)}{\tan(\varepsilon_r)} \cos(\varepsilon_s) + \sin(\varepsilon_s) * \cos(\delta_s) \right]} \quad (101)$$

Cabe resaltar la importancia de seleccionar un parámetro de polarización deseado para la reconstrucción de la señal objetivo cuando esta no presenta polarización lineal o vertical, ya que se pueden recuperar infinitas señales objetivos que cumplen con las condiciones anteriormente mostradas.

5. DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL FILTRO NPSP

Para llevar a cabo la implementación del filtro NPSP se deben realizar tres tareas principales las cuales son: pre filtrado, filtrado y recuperación de la señal objetivo.

5.1 PRE FILTRADO.

En esta etapa se realiza el primer análisis de la información multicomponente, con el fin de seleccionar las frecuencias a filtrar. Primero se realiza la carga de datos con la información multicomponente, para así, seleccionar una ventana de datos que garantice que se toma como mínimo un periodo de cada frecuencia a analizar. Por cada tramo seleccionado se calculan los parámetros de polarización para cada frecuencia, y para un número de frecuencias acorde con la resolución necesaria. Estos parámetros de polarización son comparados con el rango previamente fijado; de estar en el rango, la frecuencia será filtrada, de lo contrario no lo será. Dicho rango se expresa en función de parámetros elípticos de polarización azimut Φ y ángulo de elipticidad τ . Se utilizan estos parámetros por la facilidad de ser identificarlos en una elipse de polarización¹⁴⁶, además son ampliamente usados en la literatura, ejemplo de esto es el proyecto de Vera y Niño^{147 148}. Estos parámetros se relacionan con el ángulo de polarización y el desfase relativo mediante las siguientes expresiones¹⁴⁹:

$$\Phi = \frac{\tan^{-1}(\tan(2 * \varepsilon) * \cos(\delta))}{2} \quad (102)$$

$$\tau = \frac{\sin^{-1}(\sin(2 * \varepsilon) * \sin(\delta))}{2} \quad (103)$$

¹⁴⁶ PENG XIANG Mao, WIE-BO Beng, LIU YOUNG Tan Op. Cit.

¹⁴⁷ VERA Raúl, NIÑO Carlos Op. Cit.

¹⁴⁸ AI-JUN Liu, XING-PENG Mao Op. Cit.

¹⁴⁹ PENG XIANG Mao, WIE-BO Beng, LIU YOUNG Tan Op. Cit.

5.2 FILTRADO

Las frecuencias que cumplen con el criterio del prefiltrado se consideran señales con la forma de la ecuación (30), por lo que se utiliza el filtro NPSP para eliminar la parte de la señal correspondiente a la interferencia. Los valores de los parámetros de la polarización que se desea eliminar son previamente determinados.

5.3 RECUPERACIÓN DE LA SEÑAL OBJETIVO

Debido a que la salida del filtro **NPSP** es un número complejo que contiene la información de la componente vertical y horizontal de la señal objetivo, es necesario implementar una técnica de inversión o recuperación de esta señal. Dicha técnica es presentada en el capítulo 4. Haciendo uso del caso 3 mostrado en dicho capítulo (“reconstrucción de cualquier polarización”) para recuperar de la señal deseada, es necesario seleccionar el desfase relativo basado en la física que rige el fenómeno que se está analizando.

Para la implementación del filtro **NPSP** en señales sísmicas, es modificado el algoritmo para que recupere la señal con polarización más lineal posible (ver capítulo 6), haciendo uso de igual forma de las condiciones establecidas en el caso 3 del capítulo 4.

5.4 ALGORITMOS

Algoritmo para la utilización del filtro NPSP

1: Datos

$a(1:Nt, 1:t\text{des}) \leftarrow$ Componente Vertical

$b(1:Nt, 1:t\text{des}) \leftarrow$ Componente Horizontal

2: Parámetros ventanas

$Ns \leftarrow fs/\text{Resolución}$

$\text{PasoVentana} \leftarrow Ns$

$Nitera \leftarrow ((Nt - Ns) / \text{PasoVentana}) + 1$

3: Selección traza

for $i \leftarrow 1 \dots t\text{des}$

$stv \leftarrow a(1:Nt, i)$

$sth \leftarrow b(1:Nt, i)$

4: Transformada Fourier ventanas

for $j \leftarrow 1 \dots Nitera$

$Vs(1:Ns, j) \leftarrow \text{fft}(stv(\text{inicial}:\text{final}))$

$Hs(1:Ns, j) \leftarrow \text{fft}(sth(\text{inicial}:\text{final}))$

end

5: Parámetros polarización

$et \leftarrow \text{atan}(\text{abs}(Vs) / \text{abs}(Hs))$

$dt \leftarrow \text{angle}(Vs * \text{conj}(Hs))$

6: Parámetros elípticos polarización

$[\text{Phit}, tt] \leftarrow \text{Pelipticos}(et, dt)$

7: Comparación rango

if $(\text{phit} \geq \text{pinf} \ \& \ \text{phit} \leq \text{psup} \ \& \ tt \geq \text{tinf} \ \& \ tt \leq \text{tsup})$

$x \leftarrow$ Frecuencia infectada

$y \leftarrow$ Ventana con frecuencia infectada

end

9: Filtro NPSP

```
for k ← 1 . . . length(x)
    FStv ← Vs(x(k),y(k))
    FSth ← Hs(x(k),y(k))
    [FSrh,FSrv] ← FNPSP(ei,di,FSth,FStv,Et,ds)
    Vs(x(k),y(k)) ← FSrv
    Hs(x(k),y(k)) ← FSrh
end
end
```

10: Transformada inversa Fourier ventanas

```
for j ← 1 . . . Nitera
    ReDav(1:Ns,j) ← ifft(Vs(1:Ns,j))
    ReDah(1:Ns,j) ← ifft(Hs(1:Ns,j))
End
```

11: Recuperación señal

```
for j ← 1 . . . Nitera
    SeSaliv(inicio:final,tdes)=ReDav(1:Ns,i);
    SeSalih(inicio:final,tdes)=ReDah(1:Ns,i);
End
```

Algoritmo NPSP

1: Parámetros filtro

```
er ← (π/2)-ei
dr ← π+di
FC ← exp(i*dr)/sin(er)
```

2: Filtro

$$\text{Sal} \leftarrow \begin{bmatrix} \text{FSth} & \text{FStv} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos(er) \\ \sin(er) \exp(-i * dr) \end{bmatrix} * \text{FC}$$

3: Variables recuperación señal

```

A ← real(Sal)
B ← imag(Sal)
P ← B/A
K ← abs(Sal)

```

4: Ecuaciones recuperación señal

```

es ← atan((sin(dr)-(P*cos(dr)))/(((P*cos(ds))-sin(ds))*tan(er)))
part1 ← (cos(es))^2
part2 ← (sin(es)*tan(er))^2
part3_1 ← 2*cos(es)*sin(es)*tan(er)
part3_2 ← (sin(dr)*sin(ds))+(cos(ds)*cos(dr))
Es ← (K*tan(er))/((part1+part2+(part3_1*part3_2))^0.5)

```

5: Condiciones de búsqueda

```

if (es>0 & es < π/2 & imag(Es)=0)
    FSrh ← Es*cos(es)
    FSrv ← Es*sin(es)*exp(i*ds);
else
    FSrh ← FSth
    FSrv ← FStv
end

```

Modificación algoritmo del filtro NPSP para implementación en señales sísmicas

```

er ← (π/2)-ei
dr ← π+di
FC ← exp(i*dr)/sin(er)

```

2: Filtro

$$\text{Sal} \leftarrow \begin{bmatrix} \text{FSth} & \text{FStv} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos(er) \\ \sin(er) \exp(-i * dr) \end{bmatrix} * \text{FC}$$

3: Variables recuperación señal

```

A ←real(Sal)
B ←imag(Sal)
P ←B/A
K ←abs(Sal)
Factor ←2
C1 ←(A*sin(dr))-(B*cos(dr))

```

4: Condiciones de selección

```

if C1>0
    if A>0 && B>0
        LI1← (dslimit-pi);
        LS1← dslimit;
        NC←1;
    elseif A<0 && B<0
        LI1← -pi;
        LS1← (dslimit-pi);
        LI2← dslimit;
        LS2← pi;
        NC← 2;
    elseif A<0 && B>=0
        LI1← dslimit;
        LS1← dslimit+pi;
        NC← 1;
    else
        LI1← -pi;
        LS1← dslimit;
        LI2← (pi+dslimit);
        LS2←pi;
        NC←2;
    end
elseif C1<0

```

```

if A>0 && B>0
    LI1←-pi;
    LS1← (dslimit-pi);
    LI2←dslimit;
    LS2←pi;
    NC←2;
elseif A<0 && B<0
    LI1← (dslimit-pi);
    LS1←dslimit;
    NC←1;
elseif A<0 && B>0
    LI1←-pi;
    LS1←dslimit;
    LI2← (pi+dslimit);
    LS2←pi;
    NC←2;
else
    LI1←dslimit;
    LS1←dslimit+pi;
    NC←1;
end
else
    LI1←0;
    LS1←2*pi;
    NC←1;
end

```

5: Búsqueda de la polarización más lineal.

```

[Gp, Posc, S1,es1,Es1,NCs] ←Busqueda2(dr, er, P, da, K, LI1, LS1, f, paso,
Et1, Factor);
dssal← Posc1;

```

essal ← es1;

Essal ← Es1;

6: Si la búsqueda no da resultado de polarización lineal se aplica bisección.

[PoscB, esB, EsB] ← Biseccion2(dr, er, P, da, K, Posc1, f);

dssal ← PoscB;

essal ← esB;

Essal ← EsB;

6. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DEL FILTRO NPSP EN SEÑALES MULTICOMPONENTE.

6.1 CARACTERIZACIÓN DE SEÑALES A ESTUDIAR

6.1.1 Señales de radares.

Señal de radar 1.

Se genera una señal de radar bicomponente de alta frecuencia (HF), de 5 micro segundos de duración y frecuencia de muestreo de 100 [MHz]. Esta señal está compuesta por 5 señales, cada una de un microsegundo de duración, frecuencia y parámetros elípticos diferentes entre sí, conformadas por la suma de diferentes señales objetivo e interferencia. Con el fin de analizar los resultados del proceso de filtrado, se seleccionan los paquetes de muestras correspondientes a las señales que conforman la señal total, de tal forma que el filtro sólo procesa ventanas de 100 muestras sin solape. Las 5 señales generadas son de frecuencia 5 [MHz], 10 [MHz], 15 [MHz], 20 [MHz] y 25 [MHz]. En la implementación del filtro NPSP se utilizaron los parámetros de polarización de la señal de 5 [MHz] para determinar la señal objetivo a recuperar y la señal interferencia a eliminar. Igualmente, para la etapa de prefiltrado, se definió el rango de parámetros elípticos de polarización alrededor de los calculados para la señal total de 5 [MHz] utilizando las expresiones (102) y (103). Dicha señal tiene un azimut $\Phi = 2,0352 [rad]$ y un ángulo de elipticidad $\tau = 0,5011[rad]$. El rango de parámetros establecido para el prefiltrado de la señal de radar 1 se muestra en el cuadro 2.

Cuadro 2. Rango de parámetros elípticos de polarización para el prefiltrado de la señal de radar 1. Fuente: Autores

Parámetros Rango	Azimut Φ [rad]	Ángulo elipticidad τ [rad]
Mínimo	1,8352	0,3011
Máximo	2,2352	0,7011

Señal de radar 2.

Se utiliza una señal bicomponente conformada por la suma de señales objetivo e interferencia con frecuencias entre 1 y 40 [MHz] en pasos de 1 [MHz], duración 5 microsegundos y frecuencia de muestreo de 100 [MHz], con amplitudes y desfases generados aleatoriamente con una distribución uniforme, en un rango de 0-15 unidades y 0-360 grados, respectivamente. De la señal se seleccionan para ser procesadas aquellas frecuencias en el ancho de banda de radares de alta frecuencia (HF) (3 [MHz] a 30 [MHz])¹⁵⁰. Para implementar el algoritmo del filtro NPSP son utilizados los parámetros de polarización de la señal de 10 [MHz]. Igualmente, para la etapa de prefiltrado, se define el rango de parámetros elípticos de polarización alrededor de los calculados para la señal total de 10 [MHz] utilizando las expresiones (102) y (103). Dicha señal tiene un azimut $\Phi = 0,8088$ [rad] y un ángulo de elipticidad $\tau = 0,4892$ [rad]. El rango de parámetros establecido para el prefiltrado de la señal de radar 2 se muestra en el cuadro 3.

¹⁵⁰ BIN Cao, QIN-YU, ZHANG, DONG Liang, SHOU-MING Wen, LIN Jin y YAN-QUN Zhang. Blind Adaptive Polarization Filtering Based on Oblique Projection, Communications (ICC) [Online]. Mayo, 2010 [citado 2 marzo 2015], pp. 1-5. Disponible en Biblioteca UIS: Base de datos IEEE.

Cuadro 3. Rango de parámetros elípticos de polarización para el prefiltrado de la señal de radar 2. Fuente: Autores

Parámetros Rango	Azimut Φ [rad]	Ángulo elipticidad τ [rad]
Mínimo	0,6088	0,2892
Máximo	1,0088	0,6892

6.1.2 Señales sísmicas. Para implementar el algoritmo en señales sísmicas se parte de la hipótesis de que éstas están conformadas por la suma de señales objetivo de polarización lineal y señales interferencia con polarización elíptica, asumiendo las ondas primarias (P) como el objetivo^{151 152} y el movimiento elíptico retrógrado de las ondas Rayleigh, de mayor amplitud en los registros sísmicos¹⁵³, como la interferencia.

Señal sísmica sintética.

Se utiliza una señal sintética bi-componente, generada por el software seismic unix utilizada en el proyecto de grado de Sánchez y Serrano¹⁵⁴. Dicha señal está compuesta por 390 trazas, con duración 12 segundos y frecuencia de muestreo de 250 [Hz].

Se caracteriza el ruido coherente ground roll (señal interferencia) para frecuencias menores e iguales a 25 [Hz]¹⁵⁵ utilizando una ventana de 100 muestras sobre la zona misma zona caracterizada como ground roll que se utilizó en¹⁵⁶. Esta ventana permite analizar frecuencias desde 2,5 [Hz] hasta 25 [Hz] en pasos de 2,5

¹⁵¹ SERRANO Jheyston Omar, SÁNCHEZ Iván Javier Op. Cit.

¹⁵² TRAVIS BEHRENS Richard Op. Cit.

¹⁵³ Ibid.

¹⁵⁴ SERRANO Jheyston Omar SÁNCHEZ Ivan Javier Op. Cit.

¹⁵⁵ AI-JUN Liu, XING-PENG Mao, WEI-BO Deng, "Oblique projection polarization filtering and its performance in High Frequency Surface Wave Radar," in Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), Chengdu, 2010, pp. 1618-1621.

¹⁵⁶ SERRANO Jheyston Omar, SÁNCHEZ Iván Javier Op. Cit.

[Hz]. Posteriormente se calculan por ventana y frecuencia los parámetros de polarización (ver los experimentos de la siguiente sección).

Para definir el rango de parámetros elípticos de polarización usado en la etapa de prefiltrado, se eligen 4 trazas y utilizando los parámetros de polarización previamente hallados para estas trazas, se obtienen el azimut y ángulo de elipticidad mediante las expresiones (102) y (103) respectivamente, seleccionando los máximos y mínimos valores (excluyendo datos por fuera de la distribución) de los calculados para cada frecuencia de cada ventana de las 4 trazas. El rango de parámetros establecido para el prefiltrado de la señal sísmica sintética se muestra en el cuadro 4.

Cuadro 4. Rango de parámetros elípticos de polarización para el prefiltrado de la señal sísmica sintética.

Parámetros Rango	Azimut Φ [rad]	Ángulo elipticidad τ [rad]
Mínimo	1,2	0,15
Máximo	1,6	0,4

Señal sísmica real.

Se utiliza una señal real bi-componente usada en el proyecto de grado de Sánchez y Serrano¹⁵⁷. Dicha señal está compuesta por 900 trazas, duración 5 segundos y frecuencia de muestreo de 500 [Hz].

Para la caracterización del ground roll (señal interferencia) se seleccionan 4 trazas que contengan en sus muestras zonas con este ruido coherente (zonas

¹⁵⁷ Ibid.

identificadas realizando descomposición en valores singulares en ¹⁵⁸). En dichas zonas, se realiza un ventaneo sin solape, tomando ventanas de 200 muestras, que permiten analizar frecuencias de 2,5 [Hz] hasta 25 [Hz] en pasos de 2,5 [Hz]. A continuación se calculan los parámetros de polarización épsilon y delta para cada frecuencia de cada ventana de las 4 trazas.

Para definir el rango de parámetros elípticos de polarización usado en la etapa de prefiltrado, se utilizan los parámetros de polarización calculados para las 4 trazas y se obtienen el azimut y ángulo de elipticidad, seleccionando los máximos y mínimos valores calculados (excluyendo datos por fuera de la distribución) de los calculados para cada frecuencia de cada ventana de las 4 trazas. El rango de parámetros establecido para el prefiltrado de la señal sísmica sintética se muestra en el cuadro 5. Las trazas caracterizadas son la 300, 400, 462 y 562, de las que se obtienen 6, 10, 10 y 7 ventanas en la zona de ground roll respectivamente.

Cuadro 5. Rango de parámetros elípticos de polarización para el prefiltrado de la señal sísmica real

Parámetros Rango	Azimut Φ [rad]	Ángulo elipticidad τ [rad]
Mínimo	$0 \leq \Phi \leq 0,8383$	-0,3178
Máximo	$2,3034 \leq \Phi \leq \pi$	0,4995

6.2 EXPERIMENTOS REALIZADOS

¹⁵⁸ Ibid.

6.2.1 Señales de radares

Experimento con señal de radar 1.

Se seleccionan como parámetros interferencia y desfase a recuperar, los caracterizados para la señal de 5 [MHz], expresada como la suma de objetivo e interferencia. En el experimento, las señales de 5 [MHz], 15 [MHz] y 25 [MHz] tienen los mismos parámetros interferencia, y solo las señales de 5 [MHz] y 15 [MHz] iguales desfases de señal objetivo. Las señales de 10 [MHz] y 20 [MHz] tienen parámetros interferencia y objetivo diferentes. En este experimento se define una resolución en la transformada rápida de Fourier (FFT) de 1 [MHz] para permitir que las ventanas de datos a analizar por el algoritmo, se ubiquen cada 100 muestras, seleccionando y procesando cada micro segundo de la señal total sin solape.

Experimento con señal de radar 2.

Se utiliza el filtro NPSP para eliminar la señal interferencia de 10 [MHz] y recuperar la señal objetivo a esta misma frecuencia. De la generación de la señal total se conocen todos los parámetros, con lo cual los resultados del filtrado son comparados con la señales de entrada. Se define una resolución de 1 [MHz] en la transformada rápida de Fourier (FFT), con lo que se garantiza que la ventana de datos seleccionada permitirá tomar como mínimo un periodo de cada frecuencia a analizar.

6.2.2 Señales sísmicas

Grado de polarización.

Con el fin de medir la eficacia del filtro se usa el grado de polarización. Este índice varía entre 0 y 1, permitiendo determinar qué tan elíptica es cierta polarización, siendo 1 una polarización lineal y 0 una polarización circular. Para calcular el grado de polarización se hace necesario escribir las componentes vertical y horizontal de la señal, en términos de los parámetros de Stokes S_0 , S_1 , S_2 y S_3 , donde S_0 es la suma de los cuadrados de las componentes ortogonales (representando la intensidad total de la onda y siendo siempre positiva), S_1 es la diferencia entre las intensidades en las componentes (muestra la preferencia de la onda con respecto a las direcciones de las componentes), S_2 representa la preferencia de la onda con respecto a $\pm 45^\circ$ (Si esta cantidad es positiva, la dirección preferida es $+45^\circ$; si es negativa, se prefiere la dirección -45°) y S_3 representa la componente circular (Si esta cantidad es positiva, existe una preferencia por polarización circular a la derecha; si es negativa, la polarización circular hacia la izquierda domina. Si esta cantidad es cero, no hay elipticidad en la polarización de la onda)¹⁵⁹. En ¹⁶⁰ puede consultarse una gráfica que ilustra los parámetros de Stokes.

El grado de polarización se determina por la expresión:

$$p = (S_1^2 + S_2^2 + S_3^2)/S_0^2$$

Criterios de selección.

¹⁵⁹ PADUAN, Jeffrey y GRAVEN, Hans. Introduction to high-frequency radar: reality and myth. *Oceanography* [Online]. 1997, vol. 10 [citado 3 marzo 2015], pp. 36-39

¹⁶⁰ DONNO, Daniela; NEHORAI, Arye y SPAGNOLINI, Umberto. Seismic velocity and polarization estimation for wavefield separation. *Signal Processing, IEEE Transactions* [Online]. Octubre, 2008 Vol. 56 [citado 2 marzo 2015], pp. 4794-4809.

Para la eliminación de la interferencia presente en las señales sísmicas, se hace necesario definir el ángulo de polarización ε_i y el desfase relativo δ_i como se explicó en el capítulo 4. Debido a que en la caracterización del ground roll se obtienen 10 pares de parámetros por cada ventana de datos (cada uno asociado a una frecuencia entre 2,5 [Hz] y 25 [Hz] en pasos de 2,5 [Hz]) es necesario plantear criterios para la selección de un único par de parámetros que puedan ser usados sobre toda la traza. En los experimentos con señales sísmicas se utilizaron los siguientes criterios:

- **Criterio 1:** Mediana de los parámetros ε_i y δ_i caracterizados.
- **Criterio 2:** Valores promedio de los parámetros ε_i y δ_i caracterizados.
- **Criterio 3:** Valor promedio de los ángulo de polarización ε_i caracterizados, con desfase relativo δ_i definido como la pareja del “ ε_i ” que presente la menor diferencia con respecto al promedio.
- **Criterio 4:** Valores máximos de los parámetros ε_i y δ_i caracterizados.
- **Criterio 5:** Valor máximo de los ángulos de polarización ε_i caracterizados, con el desfase relativo δ_i asociado a dicho máximo.
- **Criterio 6:** Valores mínimos de los parámetros ε_i y δ_i caracterizados.
- **Criterio 7:** Valor mínimo de los ángulos de polarización ε_i caracterizados, con el desfase relativo δ_i asociado a dicho mínimo.
- **Criterio 8:** Se definen los parámetros “ ε_i ” y “ δ_i ” como los calculados con la frecuencia de mayor energía de la transformada rápida Fourier de la componente vertical.
- **Criterio 9:** Se definen los parámetros “ ε_i ” y “ δ_i ” como los calculados con la frecuencia de mayor energía de la transformada rápida Fourier de la componente horizontal.
- **Criterio 10:** Se definen los parámetros “ ε_i ” y “ δ_i ” como los calculados con la frecuencia de mayor energía promediada de la transformada rápida Fourier de la componente horizontal y vertical.

Experimentos con señal sintética.

Se realizaron 2 grupos de experimentos variando los criterios de selección de los parámetros interferencia descritos anteriormente. En el primer grupo se probó cada uno de los 10 criterios de selección, utilizando el ε_i y δ_i determinado para cada traza. El segundo grupo son pruebas con criterios fijos, utilizando todos los parámetros obtenidos para cada traza como parámetros de filtrado de la señal bicomponente. Esto se repite por cada criterio de selección. Se realizan 390 experimentos por cada criterio, obteniendo en total 3.900 experimentos de parámetros fijos y 10 experimentos con parámetros propios de cada traza.

Experimentos con señal real.

Se caracterizaron 33 ventanas sobre las 4 trazas previamente seleccionadas con ground roll en sus muestras, para las cuales se variaron los criterios de selección de parámetros interferencia, obteniendo 330 experimentos. Los valores obtenidos se utilizaron como parámetros fijos de filtrado para todas las trazas.

Recuperación señal objetivo.

Según la hipótesis planteada para señales sísmicas, la señal a recuperar por el filtro debe tener polarización lineal. Para esto, se implementa un algoritmo que permite variar el desfase relativo de la señal deseada δ_s , cumpliendo las condiciones del caso 3 descritas en el capítulo 4, para encontrar la polarización más lineal en la señal objetivo. Dicho algoritmo, busca el grado de polarización más cercano a 1 (polarización lineal) utilizando el método de bisección sobre los posibles desfases relativos. Si el mejor grado de polarización obtenido es inferior a 0,8, el filtro no actúa, entregando la señal original sin filtrar.

6.3 RESULTADOS.

6.3.1 Señales de radares

Señal de radar 1.

En el cuadro 6 se muestran los parámetros de polarización de la señales objetivo e interferencia usadas (de duración un microsegundo), junto con sus respectivas frecuencias y rangos de tiempo en los cuales se ubican en las Figuras 11, 12, 13 y 14. También se muestran el azimut y ángulo de elipticidad para cada señal en el mismo cuadro.

Cuadro 6. Frecuencias y parámetros de polarización para cada señal de 1 micro segundo.

Frecuencia [MHz]	Rango de tiempo [μ s]	ϵ_s [rad]	δ_s [rad]	E_s [Unidades]	ϵ_i [rad]	δ_i [rad]	E_i [Unidades]	Φ [rad]	τ [rad]
5	0,01-1	1,1071	0,5236	4,4721	1,0769	2,3562	14,7648	2,0352	0,5011
10	1,01-2	1,4142	0,5236	19,2354	1,0883	1,5184	23,7065	1,3502	0,319
15	2,01-3	1,0304	0,5236	5,8310	1,0769	2,3562	14,7648	2,0785	0,5578
20	3,01-4	0,1521	2,7227	1,5175	1,2855	0,1920	7,8160	1,1078	0,0844
25	4,01-5	1,2490	0,0000	3,1623	1,0769	2,3562	14,7648	2,0882	0,4531

Las componentes horizontal y vertical de la señal generada se muestran a continuación, donde se aprecia la señal total y sus respectivas señales objetivo e interferencia:

Figura 11. Componente horizontal de la señal total (negro), objetivo (azul) e interferencia (rojo) del experimento señal de radar 1.

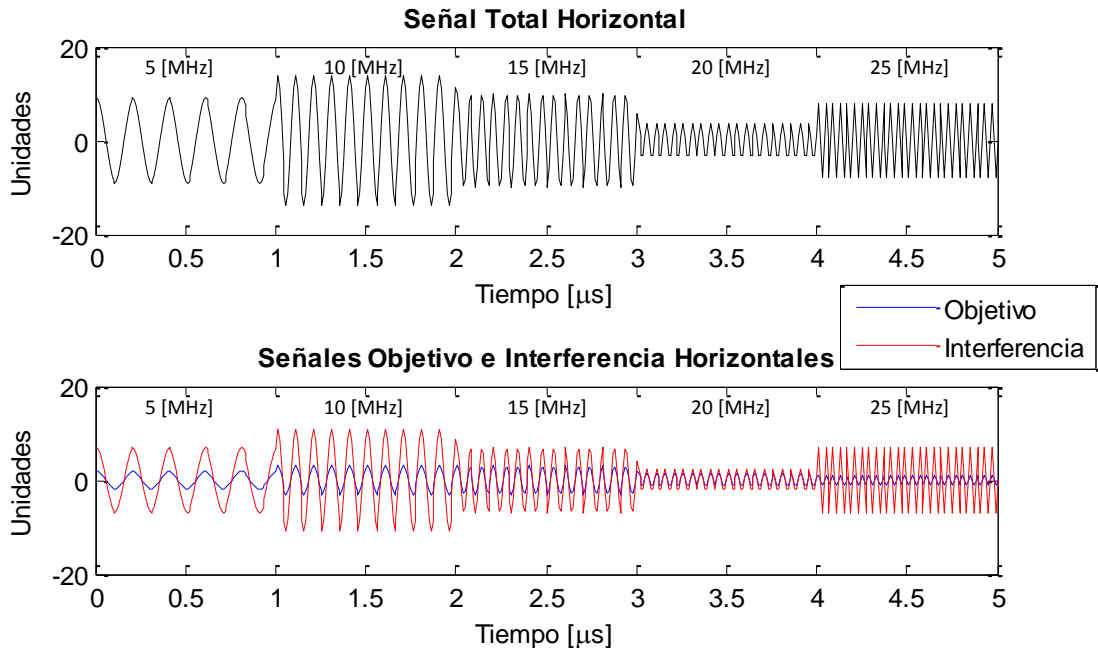
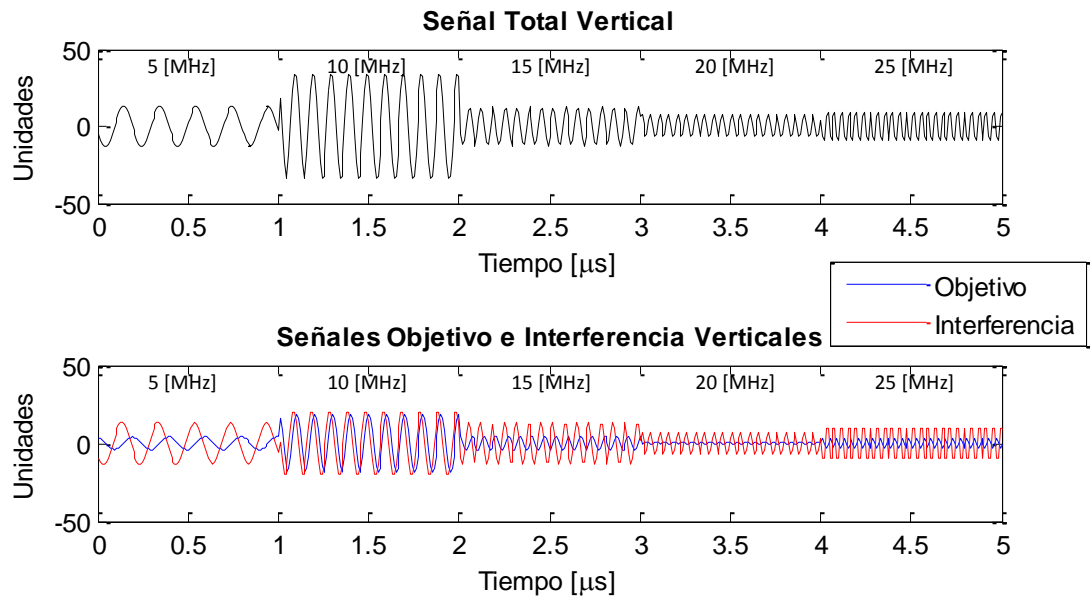
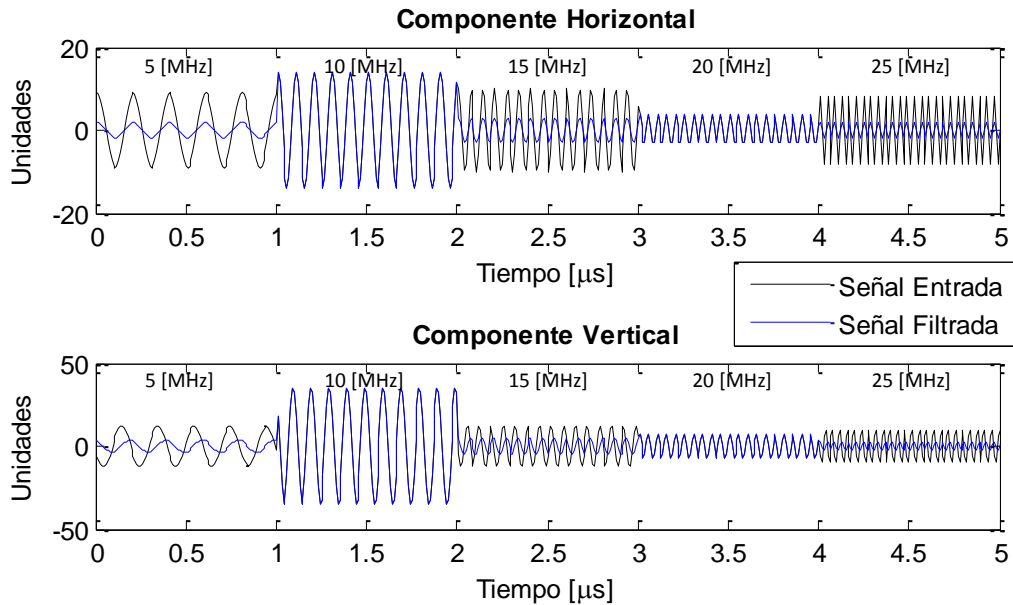


Figura 12. Componente vertical de la señal total (negro), objetivo (azul) e interferencia (rojo) del experimento señal de radar 1



Se observa en la Figura 13 que el filtro actúa solo en aquellos sectores de señal cuyos parámetros elípticos de polarización están dentro del rango establecido (cuadro 2). En negro se aprecian las componentes horizontal y vertical de la señal sin filtrar mientras que en azul se observan las componentes de la señal filtradas. Los sectores de frecuencias a 10 [MHz] y 20 [MHz] no sufren cambios.

Figura 13. Señal filtrada (azul) y sin filtrar (negro) de las componentes horizontal y vertical del experimento señal de radar 2.



En la Figura 14 se muestra la salida del filtro para ambas componentes y las respectivas señales objetivo (señales en rojo). Se observa que en los sectores en los cuales la señal total tiene frecuencias de 5 [MHz] y 15 [MHz], se ha eliminado la interferencia y la señal filtrada es la señal objetivo correspondiente. El sector a frecuencia 25 [MHz] tiene un desfase relativo en su señal objetivo diferente a la que el filtro recupera, por lo que este sector al ser filtrado recupera una señal con una polarización distinta, como se aprecia en la Figura 15.

Figura 14. Señal filtrada (azul) y objetivo (rojo) de las componentes horizontal y vertical del experimento señal de radar 1

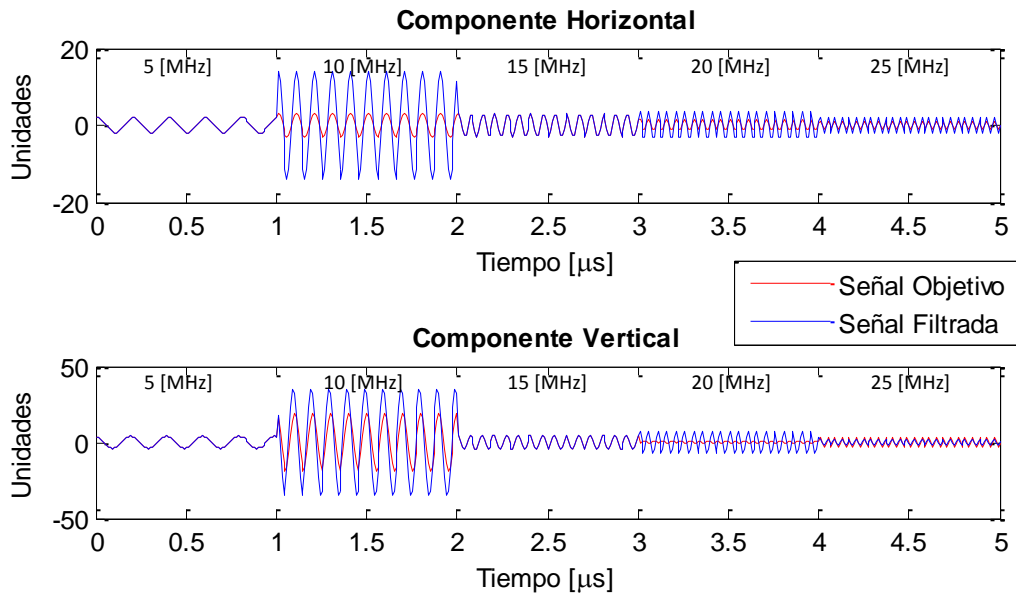
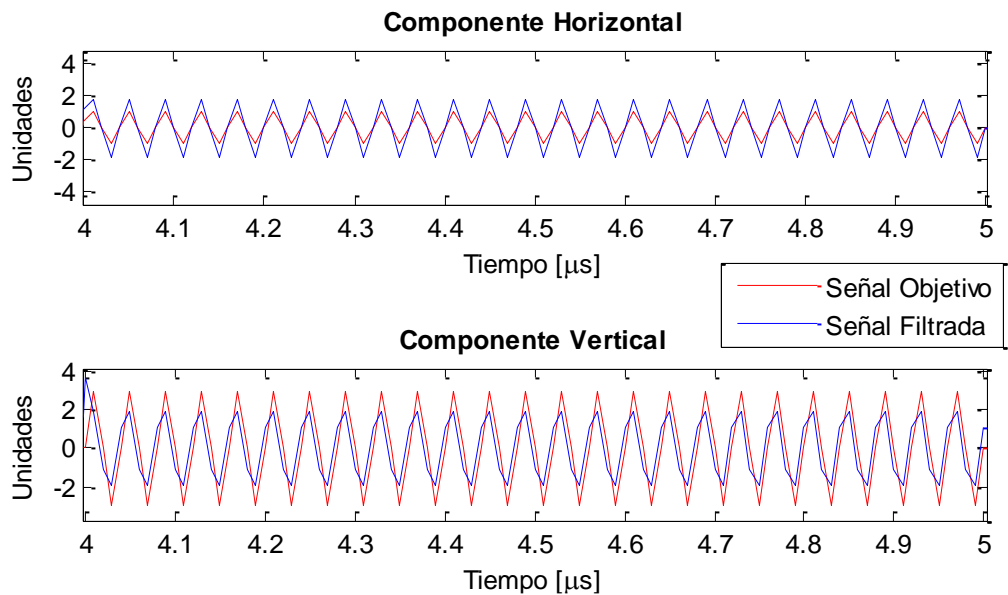


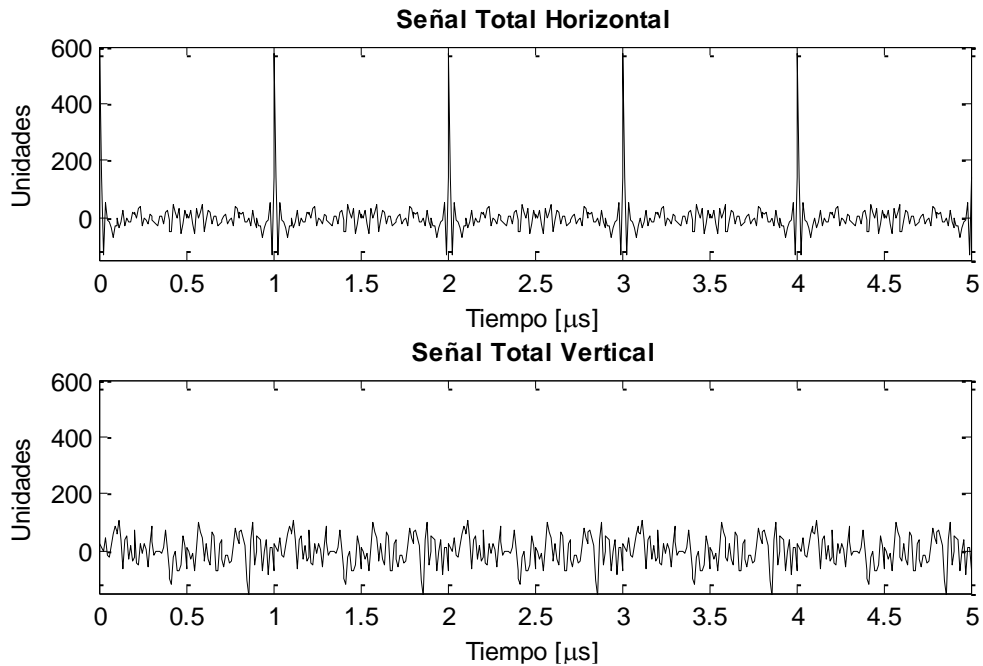
Figura 15. Sector con señal de frecuencia 25 [MHz], señal filtrada (azul) y objetivo (rojo) de las componentes horizontal y vertical del experimento señal de radar 1



Señal de radar 2.

Las componentes horizontal y vertical de la señal generada (objetivo más interferencia) se muestran a continuación:

Figura 16. Componente horizontal y vertical señal de la señal total

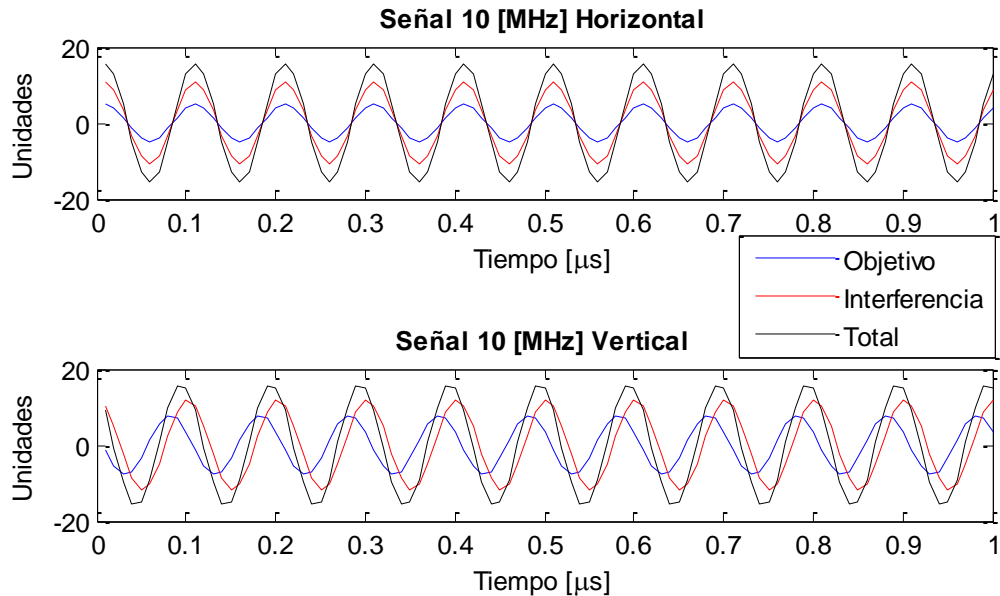


Se utilizaron como parámetros interferencia los caracterizados para la señal de 10 [MHz], los cuales son mostrados en el cuadro 7. Se observa en la Figura 17, un micro segundo de la señal a la frecuencia de 10 [MHz].

Cuadro 7. Parámetros de polarización de la señal de 10 [MHz].

Parámetros	ϵ	δ	E
Tipo de señal	[rad]	[rad]	[Unidades]
Objetivo	1,0022	1,7175	9,3058
Interferencia	0,8252	0,5093	15,8843
Total	0,7985	0,9788	22,6233

Figura 17. Componente horizontal y vertical de la señal de 10 MHz.



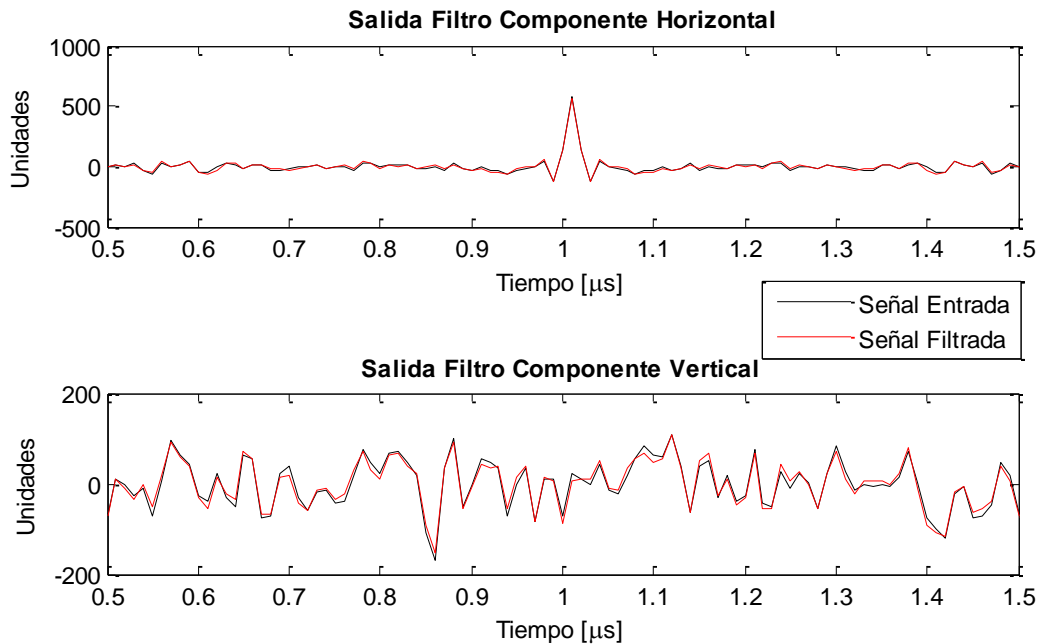
Para frecuencias entre 3 [MHz] y 30 [MHz] se realiza el filtrado, utilizando los parámetros de interferencia del cuadro 3 y definiendo el desfase a recuperar como el de la señal objetivo descrita en el mismo cuadro. Se obtienen los parámetros elípticos totales de la señal filtrada para la frecuencia de 10 [MHz]. Dichos parámetros son mostrados en el cuadro 8 junto con los parámetros elípticos de la señal objetivo de 10 [MHz].

Cuadro 8. Parámetros elípticos de la señal objetivo de 10 [Mhz] y señal filtrada

Parámetros / Tipo de señal	ϵ [rad]	δ [rad]	E [Unidades]
Objetivo	1,0022	1,7175	9,3058
Filtrada	1,0022	1,7175	9,3058
% Error	0,00%	0,00%	0,00%

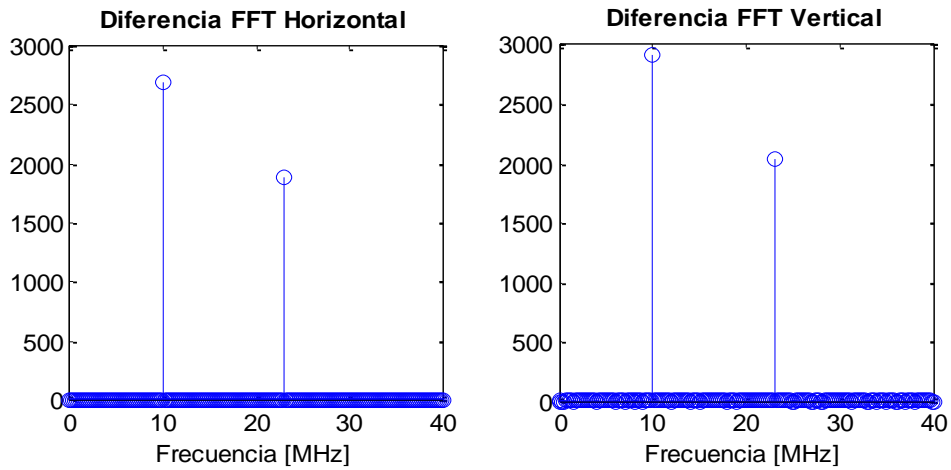
En la Figura 18 se observa un microsegundo de la salida filtrada.

Figura 18. Un microsegundo de la señal filtrada (rojo) y la señal de entrada (negro) del experimento señal de radar 2.



En las Figura 19 se muestra la diferencia entre el absoluto de la transformada de Fourier rápida (FFT) de la entrada y la salida del filtro para las componentes horizontal y vertical. En esta, se observa un cambio para la frecuencia de 10 [MHz], al igual que para la frecuencia de 23 [MHz], debido a que sus parámetros azimut y ángulo de elipticidad están dentro del rango de parámetros elípticos de polarización establecido para realizar el filtrado (cuadro 3).

Figura 19. Diferencia entre la FFT de la señal sin filtrar y filtrada de las componentes horizontal y vertical del experimento señal de radar 2.



6.3.2 Señales sísmicas. De forma general, para señales filtradas y sin filtrar, el grado de polarización es calculado para frecuencias inferiores e iguales a 25 [Hz], en las ventanas de 100 muestras con ground roll por traza de la señal sintética y en las ventanas sin solape de 200 muestras de las zonas identificadas con ground roll de las 4 trazas seleccionadas de la señal real. Dichos valores hallados en todas las ventanas, son promediados por frecuencia y mostrados en los cuadros del 9 al 15.

De igual forma, para cuantificar el aporte que cada frecuencia realiza al ground roll, se define un factor que representa la relación entre la amplitud de la onda a cada frecuencia y la suma de todas las amplitudes. Dicho factor es operado con el respectivo grado de polarización de cada frecuencia y sumado con los valores obtenidos de todas las frecuencias para así, obtener un valor general del grado de polarización por ventana. Este valor general del grado de polarización es calculado para todas las ventanas de las trazas y se grafica utilizando la función “contour” de Matlab, que permite realizar gráficas de curvas de nivel. Los valores generales del grado de polarización se calculan en las ventanas con ground roll y son

promediados para obtener el grado de polarización denominado por los autores “grado de polarización global”.

De los criterios descritos en la sección anterior para seleccionar los parámetros de interferencia en las señales sísmicas, se observó al realizar los experimentos, que definir parámetros de polarización ε_i y δ_i como los mínimos de los parámetros caracterizados (criterios 6 y 7) no se obtuvo en ningún experimento el mayor grado de polarización. Los mejores resultados, tanto para señales sintéticas como para señales reales se obtuvieron con los criterios 1, 2, 3, 4 y 5. De igual forma, se evidencio que los resultados de implementar los criterios 8, 9 y 10 (calculados con la mayor energía en la transformada rápida de Fourier) presentan similitud entre ellos.

Señal sintética.

Se calcula el grado de polarización promedio por frecuencia y global en las señales sin filtrar. Estos se muestran en el cuadro 9.

Cuadro 9. Grado de polarización global y por frecuencia sobre zona de ground roll de señal sin filtrar.

Grado de Polarización Global				
0,7089037				
Promedio frecuencia 2,5 Hz	Promedio frecuencia 5 Hz	Promedio frecuencia 7,5 Hz	Promedio frecuencia 10 Hz	Promedio frecuencia 12,5 Hz
0,52028	0,51851	0,63326	0,73326	0,81640
Promedio sobre frecuencia 15 Hz	Promedio frecuencia 17,5 Hz	Promedio frecuencia 20 Hz	Promedio frecuencia 22,5 Hz	Promedio frecuencia 25 Hz
0,87800	0,92525	0,92993	0,82647	0,83788

Utilizando el rango definido por los parámetros elípticos de polarización para la señal sintética (cuadro 4), se determinan la cantidad de frecuencias consideradas ground roll de la señal sintética antes y después del filtrado, graficadas y mostradas en las Figuras 24 y 29. Para obtener las imágenes, se realiza un barrido sin solape con una ventana de 100 muestras por traza, calculando por ventana y frecuencia, el azimut y ángulo de elipticidad para ser comparados con el rango caracterizado (cuadro 4). Las curvas de nivel entre 1 y 10 representan la cantidad de frecuencias que son consideradas ground roll en dichas ventanas. Cabe resaltar que la transformada de Fourier rápida (FFT) de una señal de 100 muestras y frecuencia de muestreo de 250 [Hz] tendrá una resolución de 2,5 [Hz]¹⁶¹, por lo cual son seleccionadas 10 frecuencias para las curvas de nivel.

Experimento 1 señal sintética.

El mejor resultado de este experimento, teniendo como referencia el grado de polarización global, se obtuvo utilizando los parámetros interferencia definidos con el criterio de selección 3 (valor promedio de los ángulo de polarización ε_i caracterizados, con desfase relativo δ_i definido como la pareja del “ ε_i ” que presente la menor diferencia con respecto al promedio). El grado de polarización global y promedio para las diferentes frecuencias en la zona con ground roll se muestran en el cuadro 10.

¹⁶¹ NIKOLOVA, L y RAMANUJAM P. Polarization holography. 1st ed. New York.: Cambridge University Press, 2009. 231 p. ISBN 9780511537059

Cuadro 10. Grado de polarización promedio y por frecuencia sobre zona de ground roll de la señal filtrada con el criterio 3 y parámetros variables.

Grado de Polarización Global				
0,875919373				
Mejoró 23,56%				
Promedio frecuencia 2,5 Hz	Promedio frecuencia 5 Hz	Promedio frecuencia 7,5 Hz	Promedio frecuencia 10 Hz	Promedio frecuencia 12,5 Hz
0,86476	0,80172	0,83152	0,82742	0,85236
Mejoró	Mejoró	Mejoró	Mejoró	Mejoró
66,21%	54,62%	31,31%	12,84%	4,40%
Promedio sobre frecuencia 15 Hz	Promedio frecuencia 17,5 Hz	Promedio frecuencia 20 Hz	Promedio frecuencia 22,5 Hz	Promedio frecuencia 25 Hz
0,86292	0,89087	0,89874	0,88857	0,89198
Empeoró	Empeoró	Empeoró	Mejoró	Mejoró
1,72%	3,72%	3,35%	7,51%	6,46%

Las componentes horizontal y vertical filtradas se observan en las Figuras 20, 21 y 22.

Figura 20. Resultados en la componente horizontal del experimento 1 de la señal sísmica sintética.

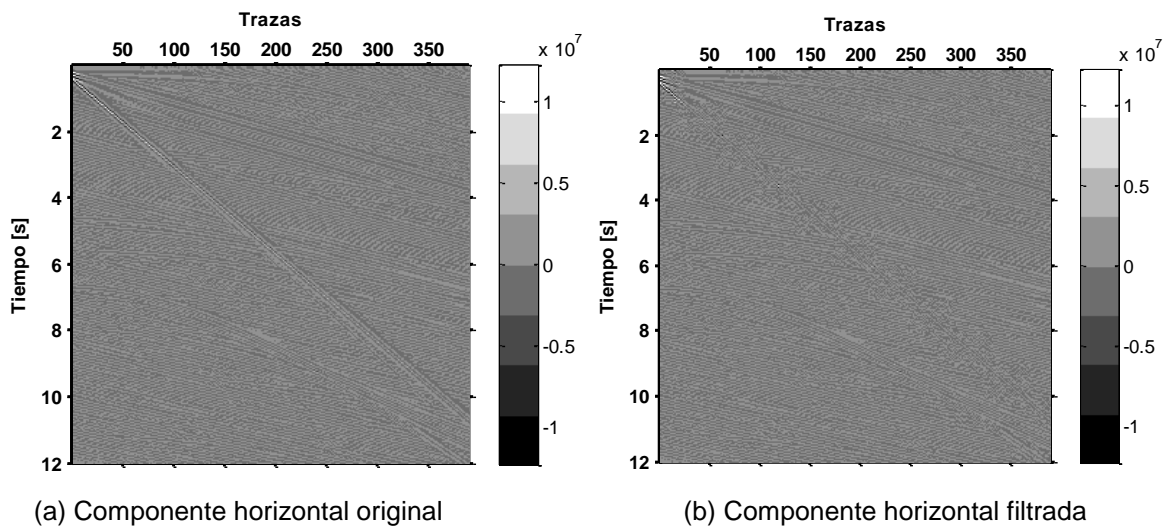


Figura 21. Resultados en la componente vertical del experimento 1 de la señal sísmica sintética.

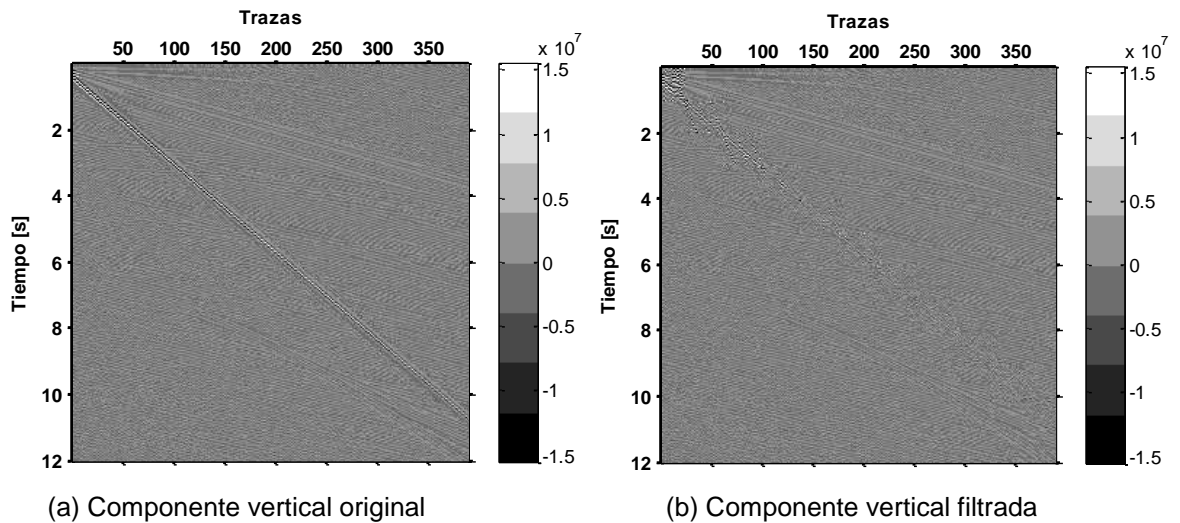
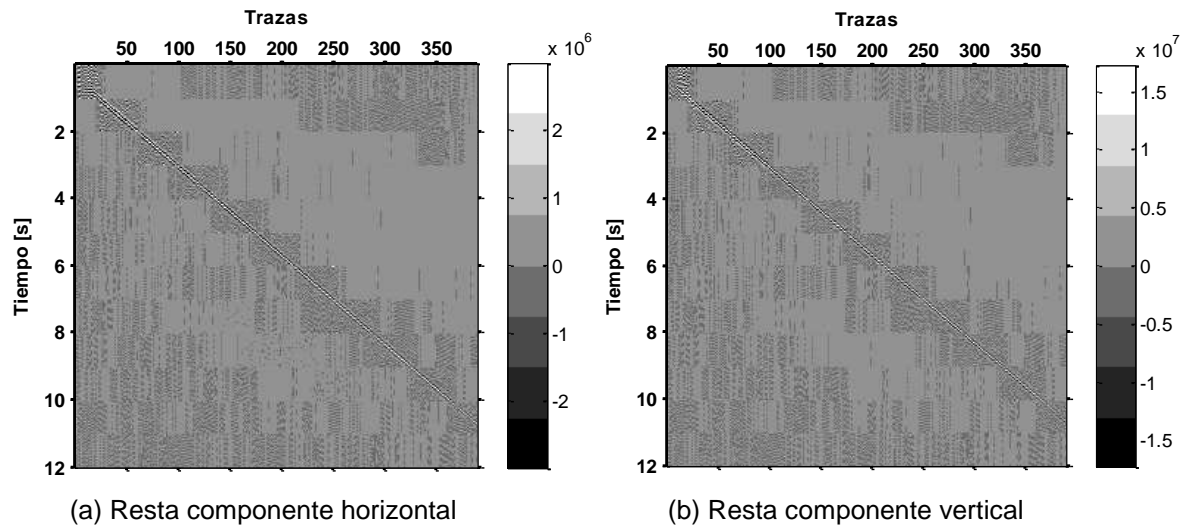
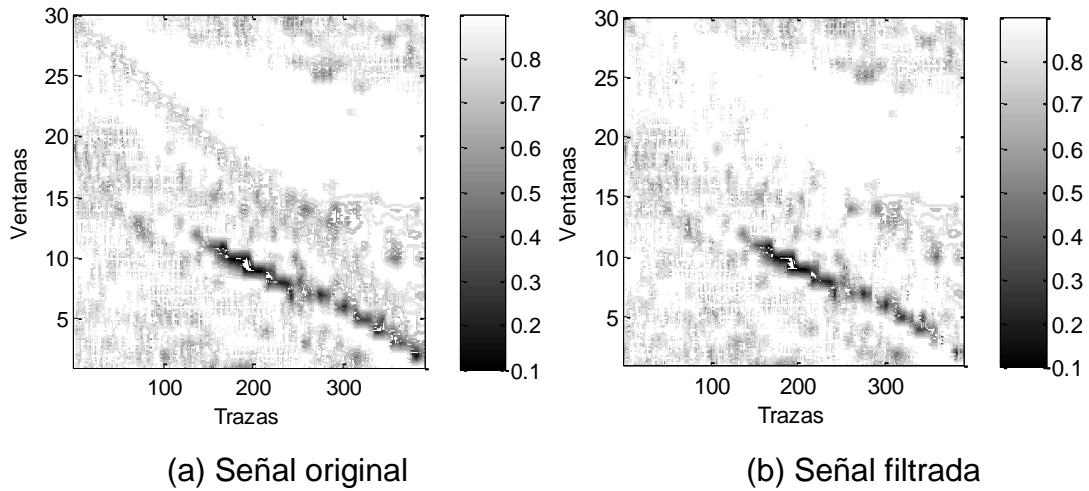


Figura 22. Diferencia entre la señal sin filtrar y filtrada de las componentes horizontal y vertical de experimento 1 de la señal sintética.



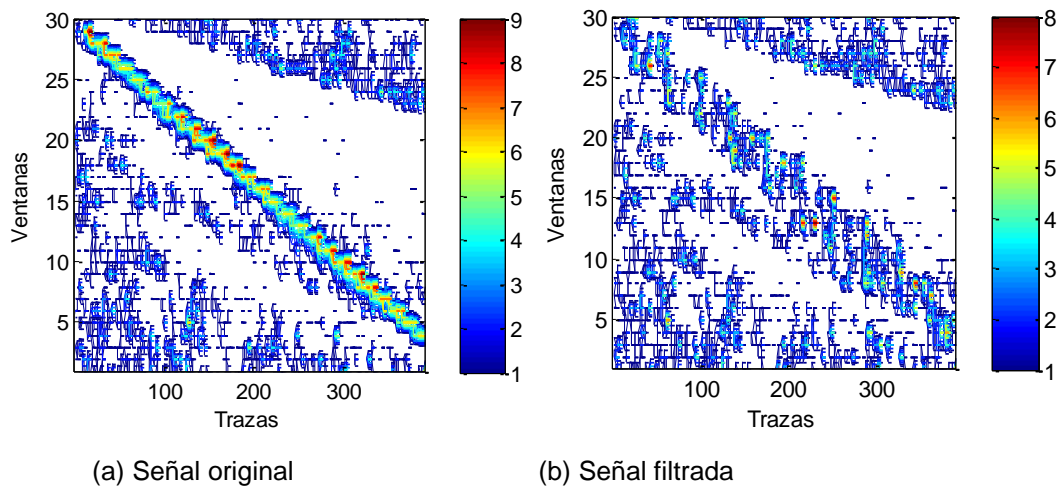
En la Figura 23 se aprecia del grado de polarización de todas las ventanas en todas las trazas para la señal filtrada con el criterio 3 y parámetros variables:

Figura 23. Grado de polarización por ventanas de los resultados del experimento 1 de la señal sísmica sintética. Negro, polarización con tendencia circular. Blanco, polarización con tendencia lineal.



Las zonas consideradas ground roll antes y después del filtrado se muestran en la Figura 24.

Figura 24. Cantidad de frecuencias consideradas ground roll de la señal sísmica sintética del experimento 1.



Experimento 2 señal sintética.

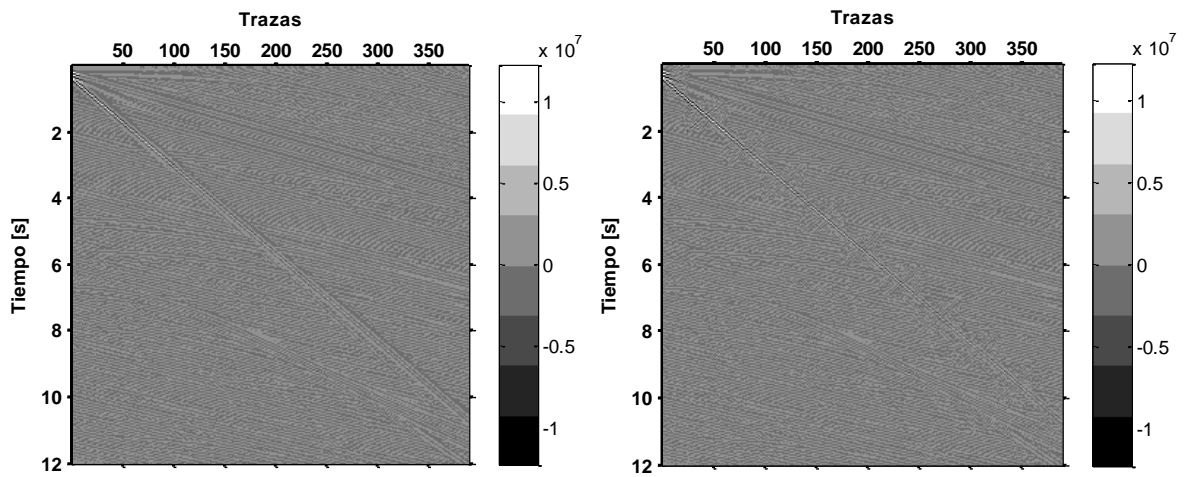
Utilizando los parámetros de polarización de la interferencia caracterizados, como criterio fijo para filtrar todas las trazas, el mayor grado de polarización global obtenido resulta de utilizar el criterio de selección 4 (valores máximos de los parámetros ε_i y δ_i caracterizados), con parámetros de interferencia $\varepsilon_i=1,3068$ [rad] y $\delta_i=2,7076$ [rad]. El grado de polarización global y promedio para las diferentes frecuencias en la zona con ground roll de este experimento se muestran en el cuadro 11.

Cuadro 11. Grado de polarización promedio y por frecuencia sobre zona de ground roll de la señal filtrada con el criterio 4 y parámetros fijos.

Grado de Polarización Global				
0,963113191				
Mejoró 35,86%				
Promedio frecuencia 2,5 Hz	Promedio frecuencia 5 Hz	Promedio frecuencia 7,5 Hz	Promedio frecuencia 10 Hz	Promedio frecuencia 12,5 Hz
0,94239	0,89383	0,93409	0,95902	0,94392
Mejoró	Mejoró	Mejoró	Mejoró	Mejoró
81,13%	72,38%	47,51%	30,79%	15,62%
Promedio sobre frecuencia 15 Hz	Promedio frecuencia 17,5 Hz	Promedio frecuencia 20 Hz	Promedio frecuencia 22,5 Hz	Promedio frecuencia 25 Hz
0,93222	0,89300	0,92080	0,90585	0,89399
Mejoró	Empeoró	Empeoró	Mejoró	Mejoró
6,17%	3,49%	0,98%	9,60%	6,70%

Las componentes horizontal y vertical filtradas se observan en las Figuras 25, 26 y 27.

Figura 25. Resultados en la componente horizontal del experimento 2 de la señal sísmica sintética.

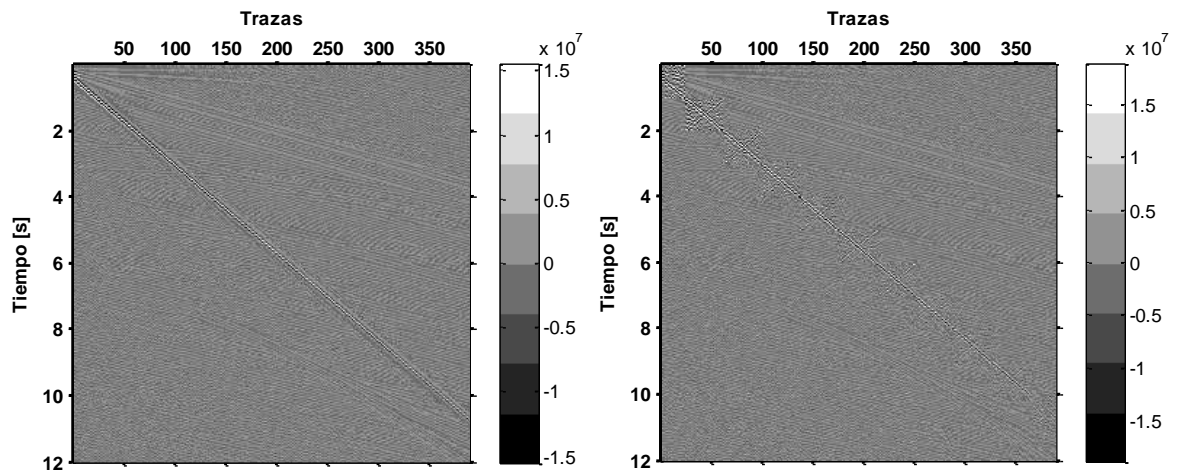


(a) Componente horizontal original

(b) Componente horizontal filtrada

Fuente: Autores

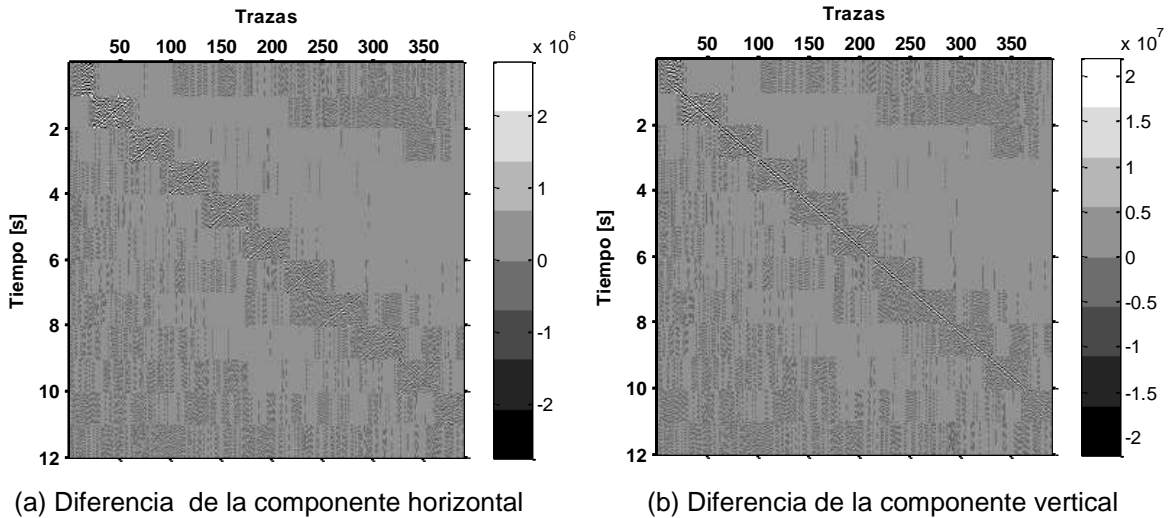
Figura 26. Resultados en la componente vertical del experimento 2 de la señal sísmica sintética.



(a) Componente vertical original

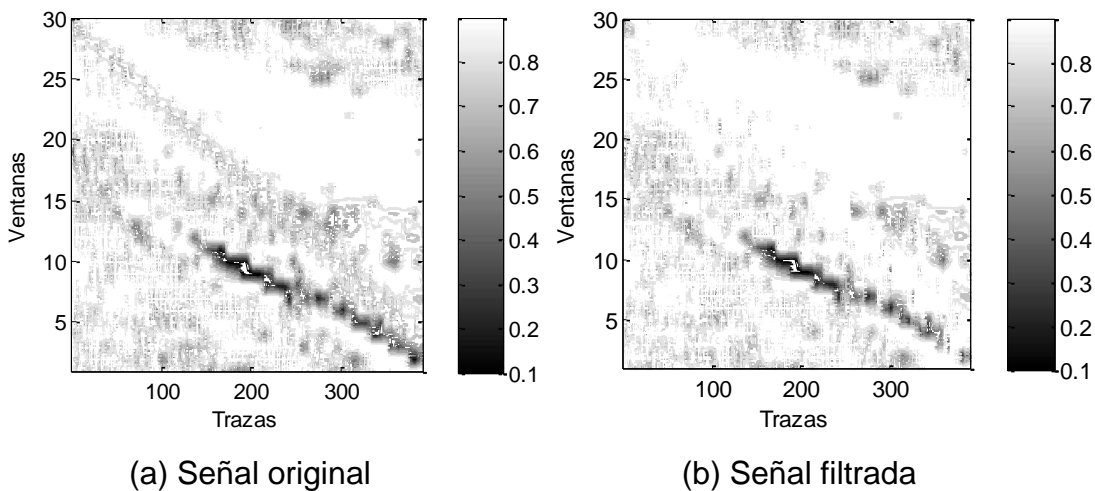
(b) Componente vertical filtrada

Figura 27. Diferencia entre la señal sin filtrar y filtrada de las componentes horizontal y vertical del experimento 2 de la señal sísmica sintética.



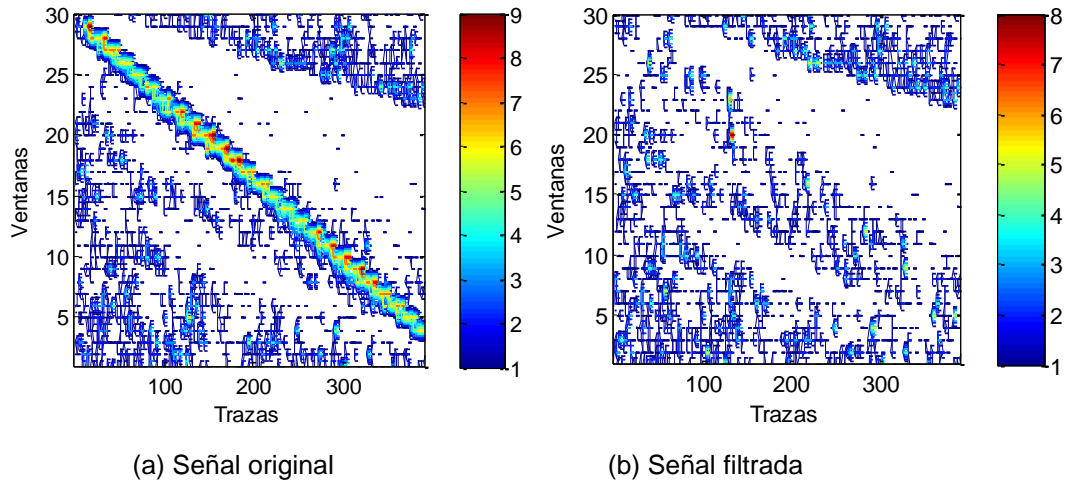
En la Figura 28 se aprecia el grado de polarización de todas las ventanas en todas las trazas para la señal filtrada con el criterio 4 y parámetros fijos:

Figura 28. Grado de polarización por ventanas de los resultados del experimento 2 de la señal sísmica sintética. Negro, polarización con tendencia circular. Blanco, polarización con tendencia lineal.



Las zonas consideradas ground roll antes y después del filtrado se muestran en la Figura 29.

Figura 29. Cantidad de frecuencias consideradas ground roll de la señal sísmica sintética después del filtrado en el experimento 2.



Resultados del filtrado mediante SVD para señal sintética.

Se calcula el grado de polarización global y promedio por frecuencia para la señal sísmica sintética filtrada por descomposición en valores singulares (resultados de la implementación en¹⁶²). Dichos valores, son comparados con los hallados para la señal sin filtrar (cuadro 9) y mostrados en el cuadro 12.

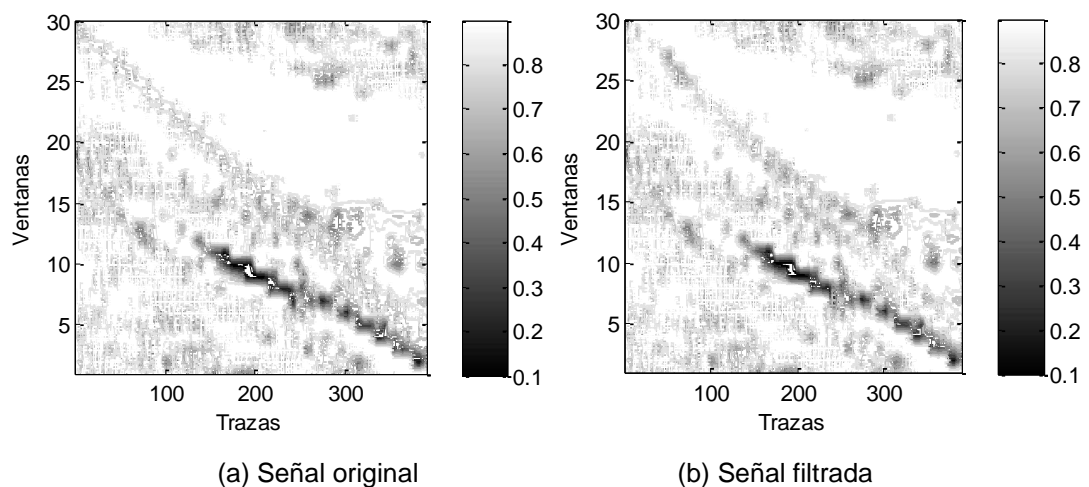
¹⁶² SERRANO Jheyston Omar, SÁNCHEZ Iván Javier Op. Cit.

Cuadro 12. Grado de polarización promedio y por frecuencia sobre zona de ground roll de la señal sintética filtrada con SVD.

Grado de Polarización Global				
0,845972668				
Mejoró 19,34%				
Promedio frecuencia 2,5 Hz	Promedio frecuencia 5 Hz	Promedio frecuencia 7,5 Hz	Promedio frecuencia 10 Hz	Promedio frecuencia 12,5 Hz
0,92060	0,89690	0,80134	0,75324	0,68043
Mejoró	Mejoró	Mejoró	Mejoró	Empeoró
76,94%	72,98%	26,54%	2,73%	16,66%
Promedio sobre frecuencia 15 Hz	Promedio frecuencia 17,5 Hz	Promedio frecuencia 20 Hz	Promedio frecuencia 22,5 Hz	Promedio frecuencia 25 Hz
0,69480	0,82193	0,84680	0,75316	0,66083
Empeoró	Empeoró	Empeoró	Empeoró	Empeoró
20,87%	11,17%	8,94%	8,87%	21,13%

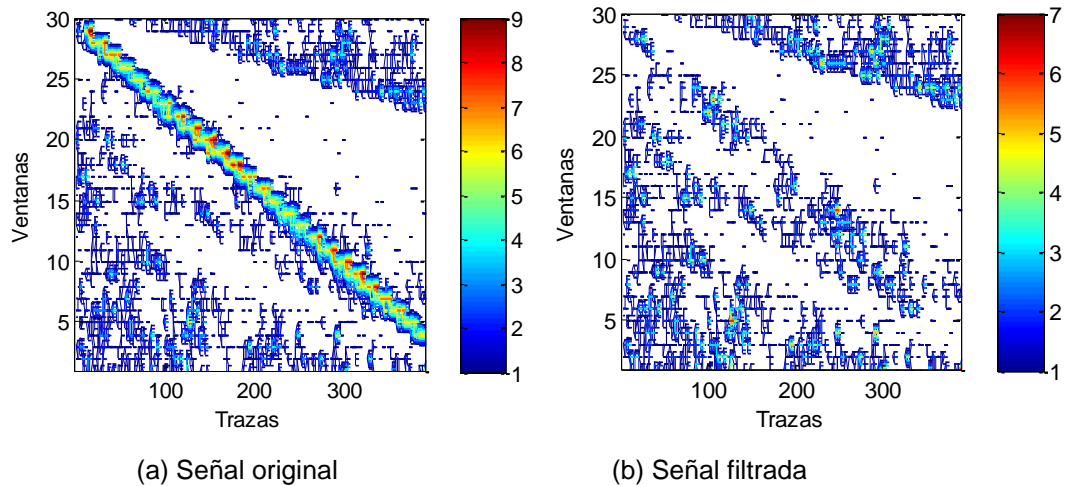
En la Figura 30 se observa el grado de polarización de todas las ventanas en todas las trazas para la señal filtrada utilizando descomposición en valores singulares:

Figura 30. Grado de polarización por ventanas de los resultados de la señal sísmica sintética filtrada por SVD. Negro, polarización con tendencia circular. Blanco, polarización con tendencia lineal.



Las zonas consideradas ground roll antes y después del filtrado (implementando descomposición en valores singulares) se muestran en la Figura 31.

Figura 31. Cantidad de frecuencias consideradas ground roll de la señal sísmica sintética después del filtrado mediante SVD.



Señal real.

Se calcula el grado de polarización promedio por frecuencia y global, calculados para las 33 ventanas caracterizadas y mostrados en el cuadro 13.

Cuadro 13. Grado de polarización global y por frecuencia sobre zona de ground roll de señal sin filtrar

Grado de Polarización Global				
0,71769432				
Promedio frecuencia 2,5 Hz	Promedio frecuencia 5 Hz	Promedio frecuencia 7,5 Hz	Promedio frecuencia 10 Hz	Promedio frecuencia 12,5 Hz
0,73200	0,67290	0,76898	0,69032	0,76591
Promedio sobre frecuencia 15 Hz	Promedio frecuencia 17,5 Hz	Promedio frecuencia 20 Hz	Promedio frecuencia 22,5 Hz	Promedio frecuencia 25 Hz
0,74051	0,83248	0,78841	0,84541	0,82112

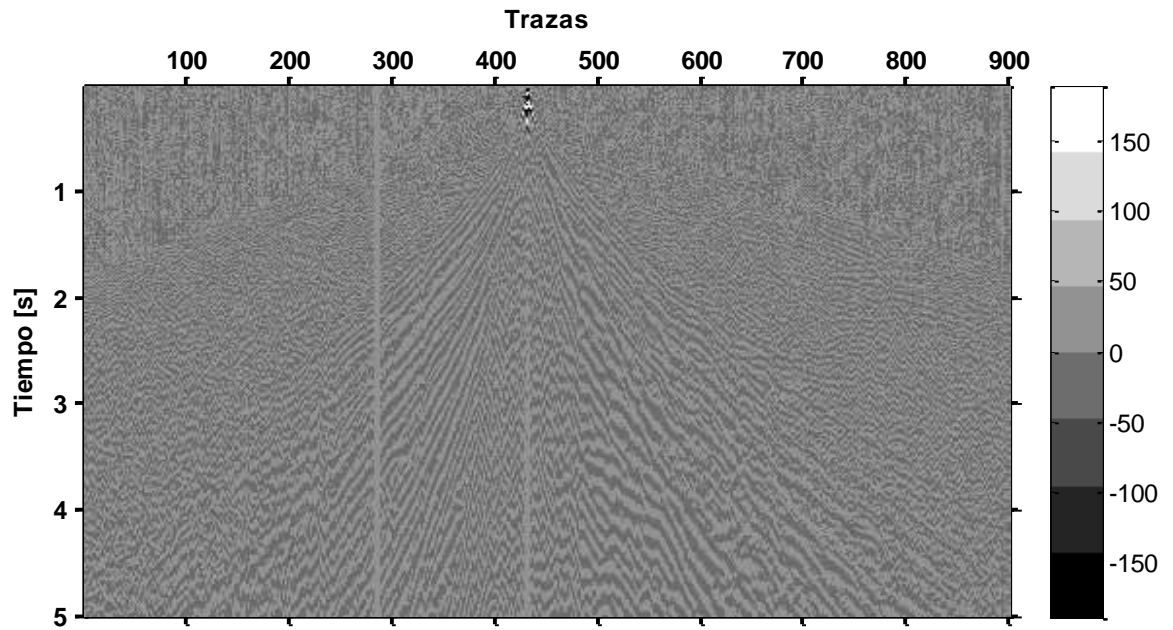
Utilizando el rango de parámetros elípticos de polarización en el que el filtro actúa (cuadro 5), se obtienen las zonas consideradas ground roll de la señal real antes y después del filtrado en la Figura 36. Para obtener la imagen, se realiza un barrido con una ventana de 200 muestras sin solape por traza, calculando por ventana y frecuencia, el azimut y ángulo de elipticidad para ser comparados con el rango caracterizado (cuadro 5). Las curvas de nivel entre 1 y 10 representan la cantidad de frecuencias que son consideradas ground roll en dichas ventanas.

El mejor resultado se obtienen de utilizar el criterio de selección 4 (valores máximos de los parámetros ε_i y δ_i caracterizados), con parámetros de interferencia fijos para todas las trazas de $\varepsilon_i=1,0291$ [rad] y $\delta_i=2,9008$ [rad]. El grado de polarización global y promedio para las diferentes frecuencias en la zona con ground roll de este experimento son mostrados en el cuadro 14. Las componentes horizontal y vertical filtradas se observan en las Figuras 32, 33 y 34.

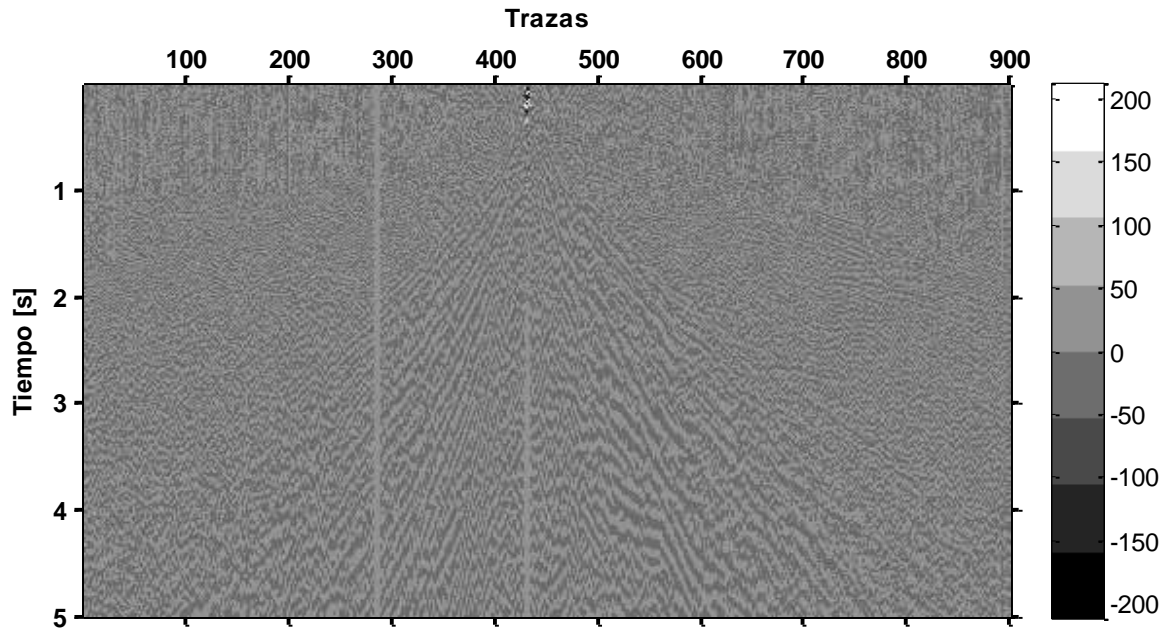
Cuadro 14. Grado de polarización promedio y por frecuencia sobre zona de ground roll de la señal real filtrada con el criterio 4 y parámetros fijos.

Grado de Polarización Global				
0,788231562				
Mejoró 9,83%				
Promedio frecuencia 2,5 Hz	Promedio frecuencia 5 Hz	Promedio frecuencia 7,5 Hz	Promedio frecuencia 10 Hz	Promedio frecuencia 12,5 Hz
0,77632	0,71889	0,72910	0,79696	0,77661
Mejoró	Mejoró	Empeoró	Mejoró	Mejoró
6,05%	6,83%	5,19%	15,45%	1,40%
Promedio sobre frecuencia 15 Hz	Promedio frecuencia 17,5 Hz	Promedio frecuencia 20 Hz	Promedio frecuencia 22,5 Hz	Promedio frecuencia 25 Hz
0,73952	0,72064	0,80483	0,78986	0,74238
Empeoró	Empeoró	Mejoró	Empeoró	Empeoró
0,13%	13,43%	2,08%	6,57%	9,59%

Figura 32. Resultados del filtrado en la componente horizontal de la señal sísmica real

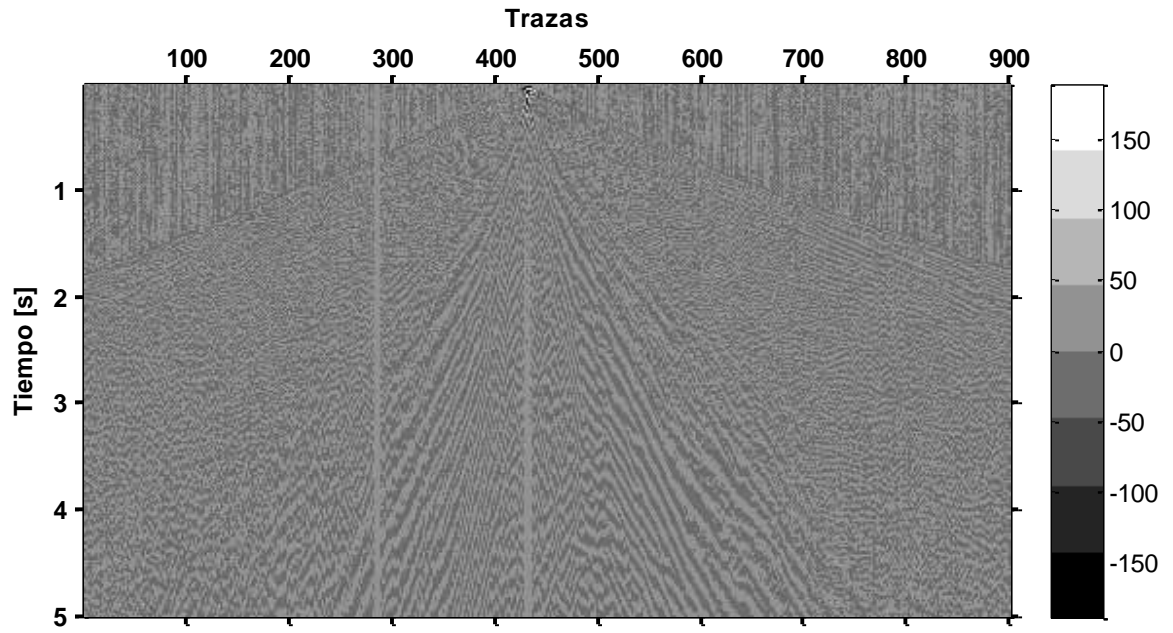


(a) Componente horizontal original

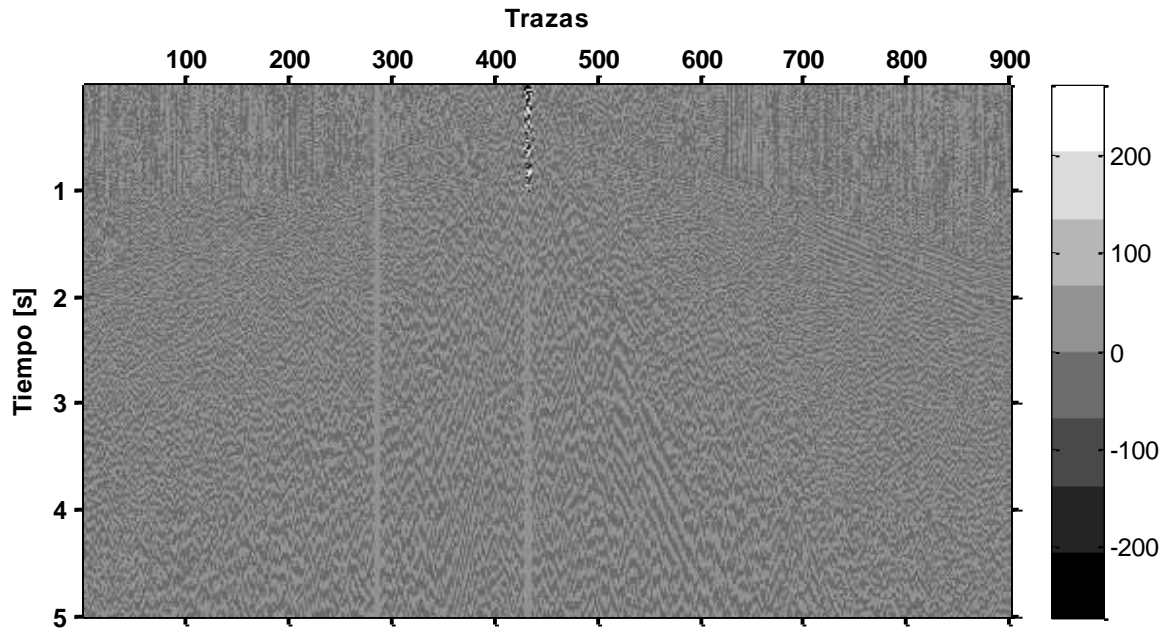


(b) Componente horizontal filtrada

Figura 33. Resultados del filtrado en la componente vertical de la señal sísmica real

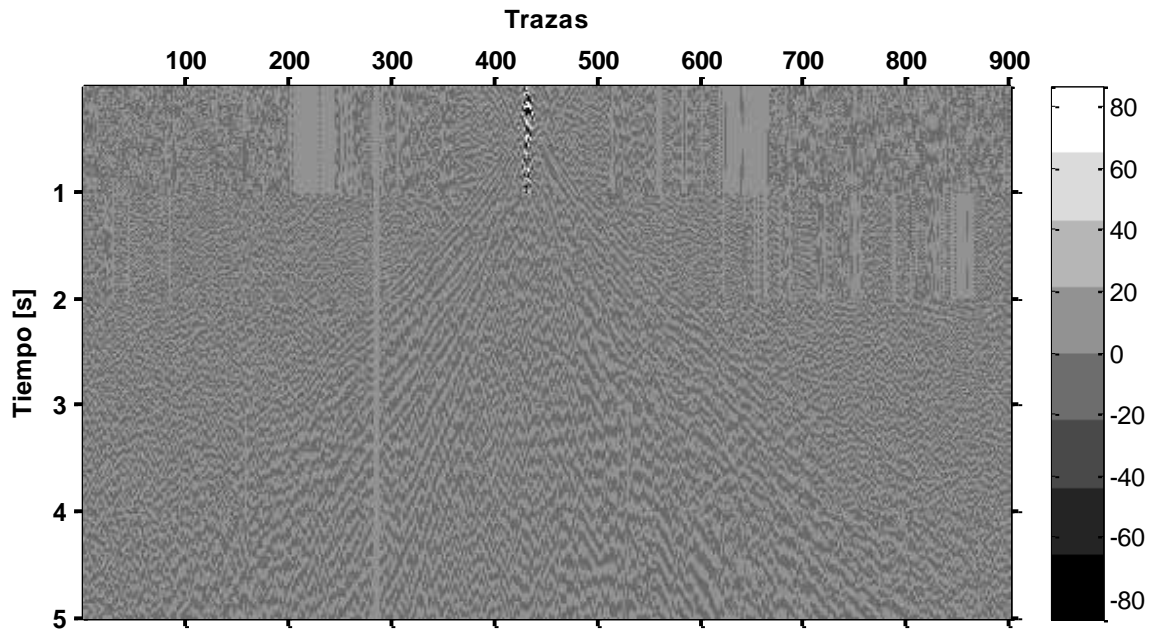


(a) Componente vertical original

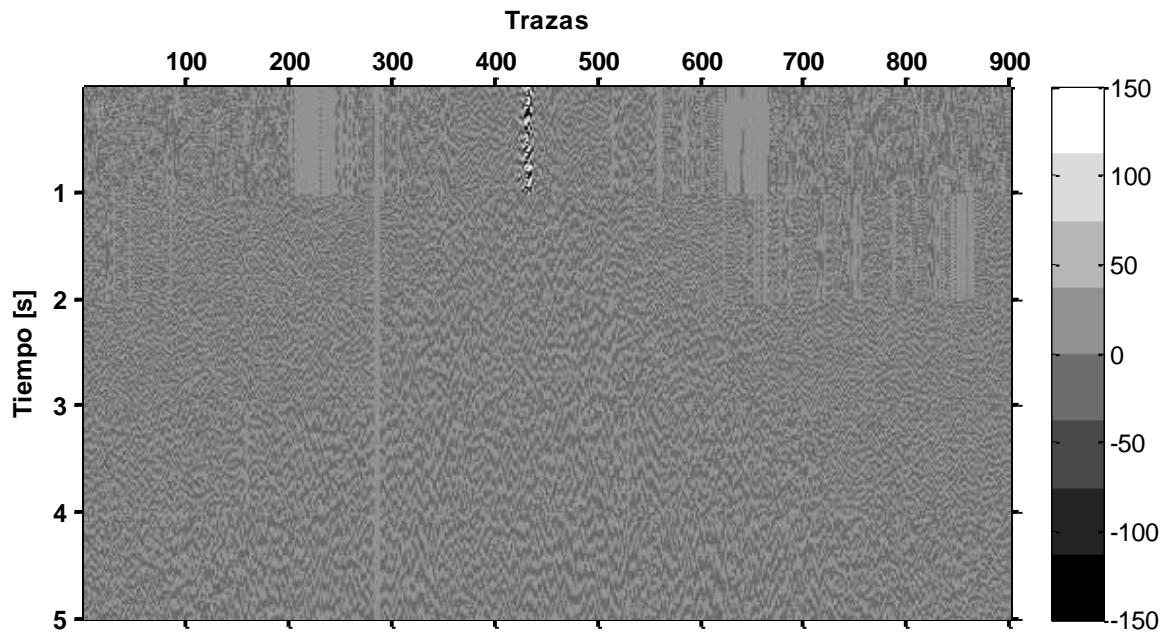


(b) Componente vertical filtrada

Figura 34. Diferencia entre la señal sin filtrar y filtrada de las componentes horizontal y vertical de la señal sísmica real.



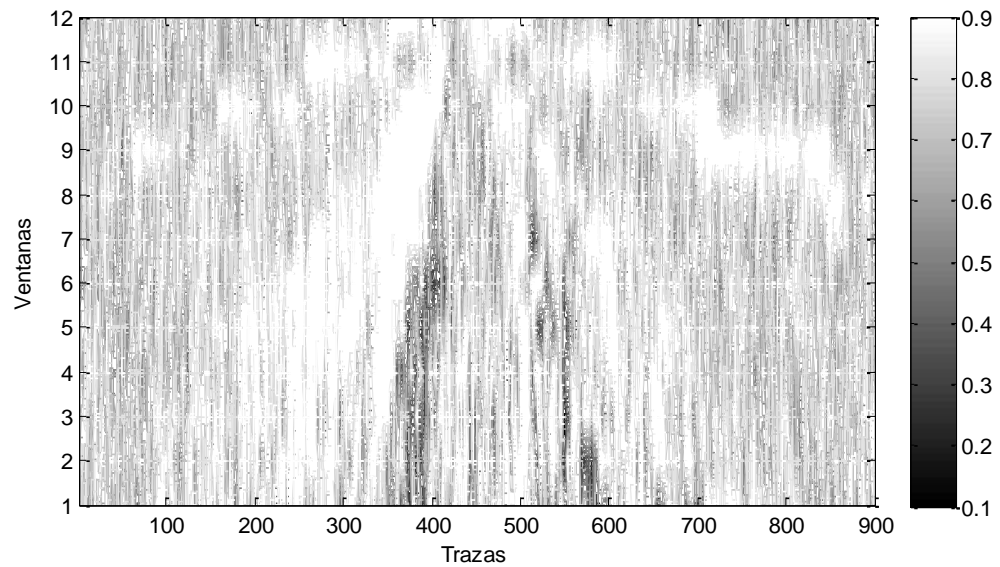
(a) Diferencia componente horizontal



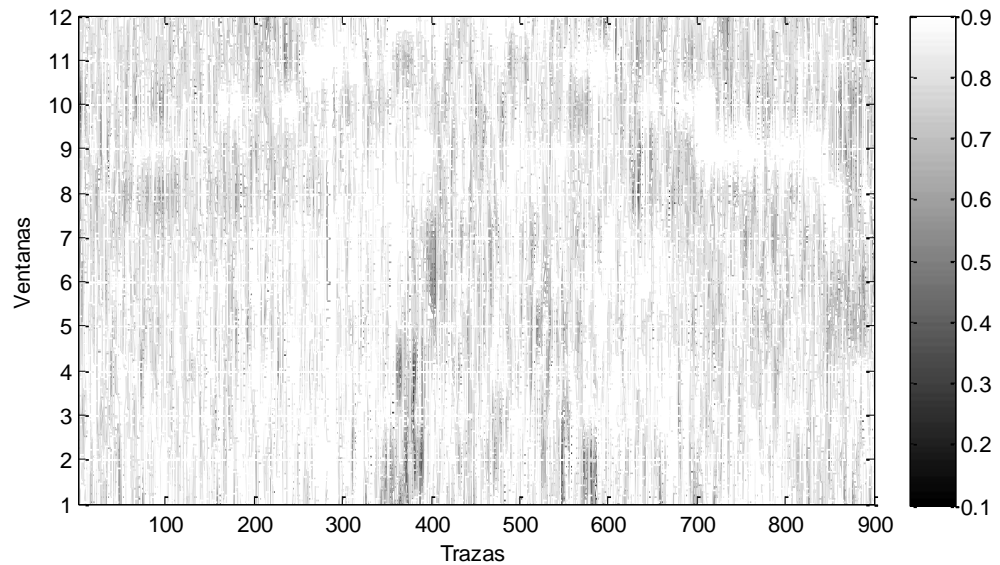
(b) Diferencia componente vertical

En la Figura 35 se aprecia el grado de polarización de todas las ventanas en todas las trazas para la señal real filtrada con el criterio 4 y parámetros fijos:

Figura 35. Grado de polarización por ventanas de los resultados de la señal sísmica. Negro, polarización con tendencia circular. Blanco, polarización con tendencia lineal.



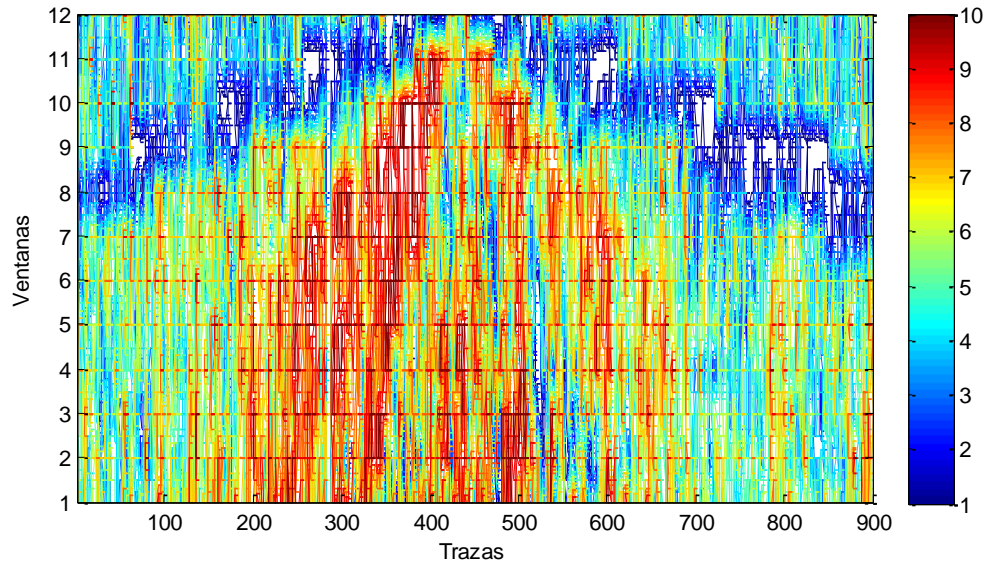
(a) Señal original.



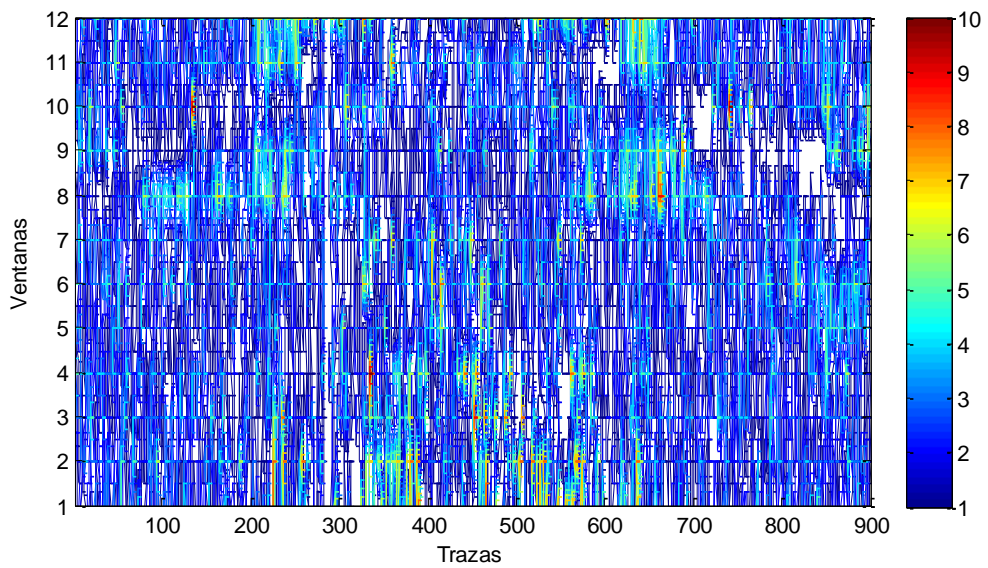
(b) Señal filtrada.

Las zonas consideradas ground roll antes y después del filtrado para el experimento con la señal real se muestran en la Figura 36.

Figura 36. Cantidad de frecuencias consideradas ground roll de la señal sísmica real.



(a) Señal original



(b) Señal filtrada

Resultados del filtrado mediante SVD para señal real.

Se calcula el grado de polarización global y promedio por frecuencia para la señal sísmica real filtrada por descomposición en valores singulares (resultados de la implementación en ¹⁶³). Dichos valores, son comparados con los hallados para la señal sin filtrar (cuadro 13) y mostrados en el cuadro 15.

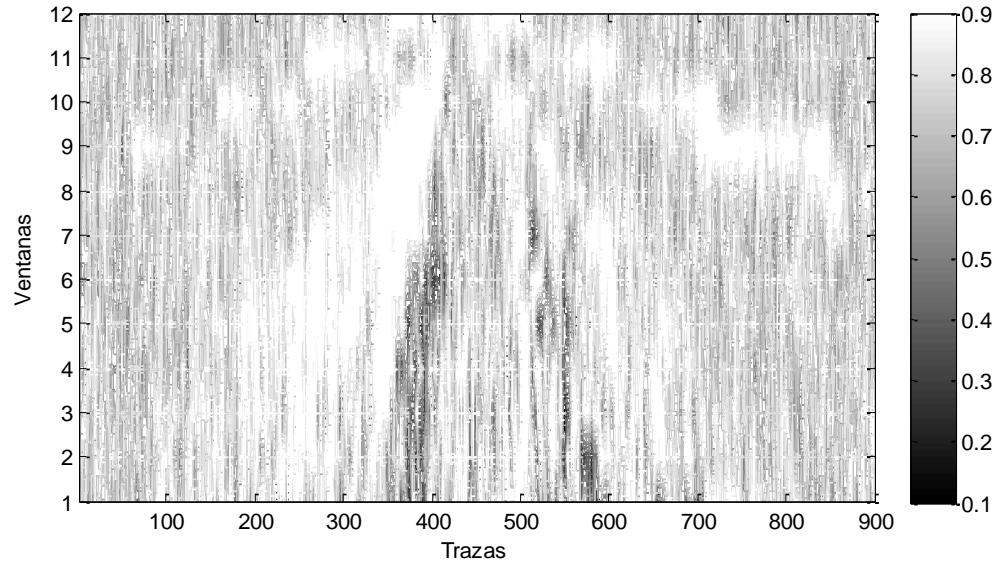
Cuadro 15. Grado de polarización promedio y por frecuencia sobre zona de ground roll de la señal real filtrada con SVD.

Grado de Polarización Global				
0,763439299				
Mejoró 6,37%				
Promedio frecuencia 2,5 Hz	Promedio frecuencia 5 Hz	Promedio frecuencia 7,5 Hz	Promedio frecuencia 10 Hz	Promedio frecuencia 12,5 Hz
0,78067	0,72198	0,79099	0,74489	0,80951
Mejoró	Mejoró	Mejoró	Mejoró	Mejoró
6,65%	7,29%	2,86%	7,91%	5,69%
Promedio sobre frecuencia 15 Hz	Promedio frecuencia 17,5 Hz	Promedio frecuencia 20 Hz	Promedio frecuencia 22,5 Hz	Promedio frecuencia 25 Hz
0,73020	0,70331	0,77465	0,77126	0,75617
Empeoró	Empeoró	Empeoró	Empeoró	Empeoró
1,39%	15,52%	1,74%	8,77%	7,91%

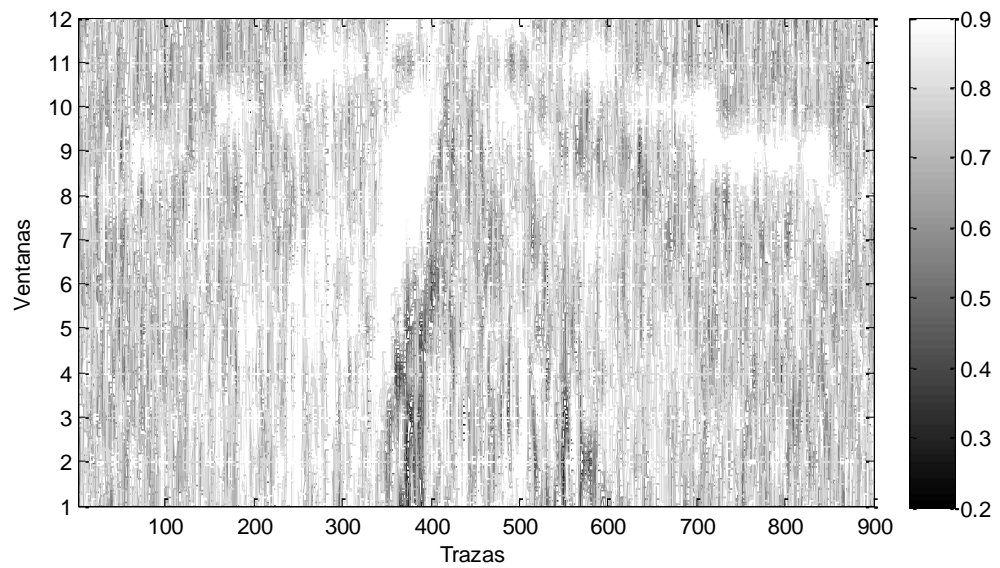
En la Figura 37 se observa el grado de polarización de todas las ventanas en las las trazas para la señal filtrada utilizando descomposición en valores singulares:

¹⁶³ Ibid.

Figura 37. Grado de polarización por ventanas de los resultados de la señal sísmica real filtrada por SVD. Negro, polarización con tendencia circular. Blanco, polarización con tendencia lineal



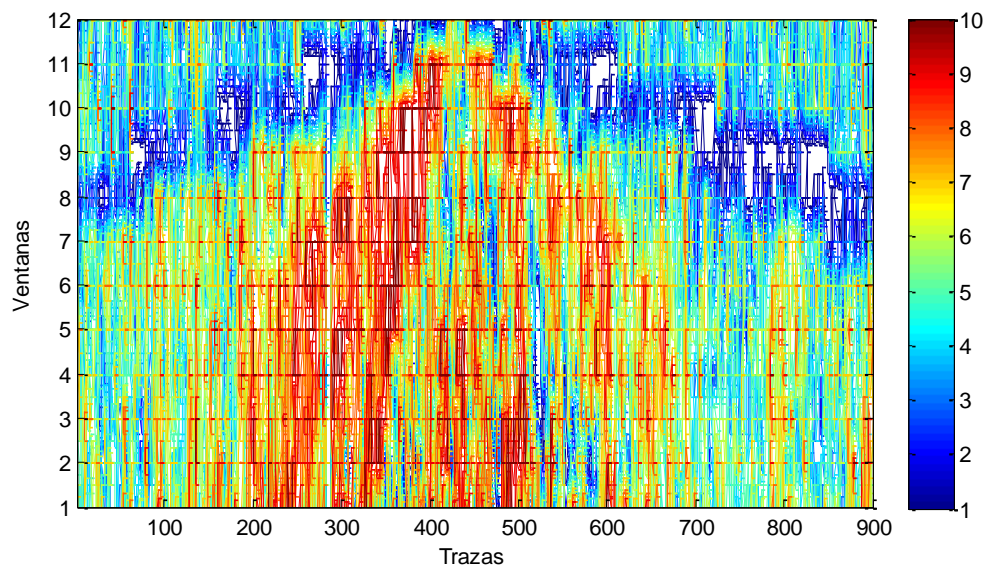
(a) Señal original.



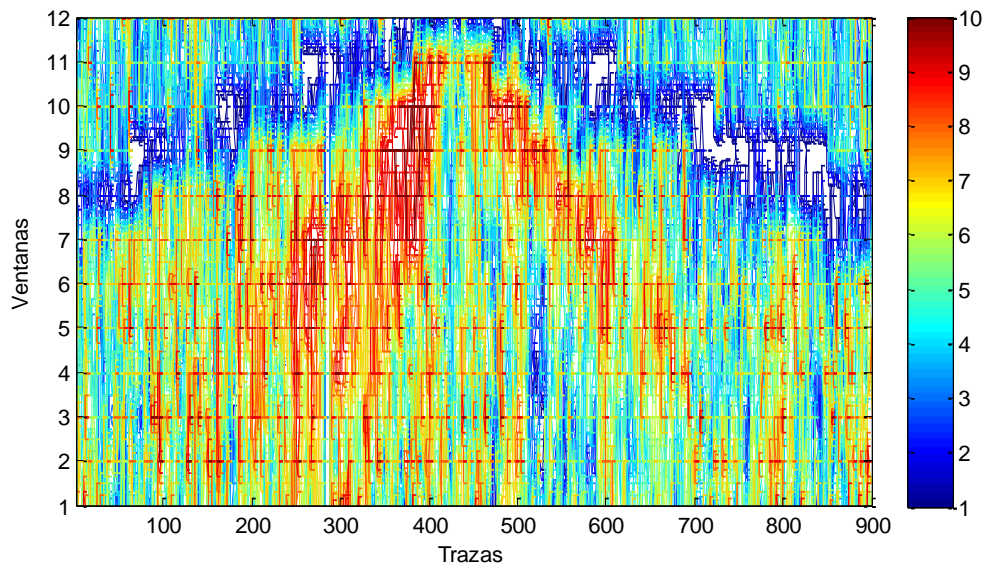
(b) Señal filtrada.

Las zonas consideradas ground roll antes y después del filtrado para la señal real (implementando descomposición en valores singulares) se muestran en la Figura 38.

Figura 38. Cantidad de frecuencias consideradas ground roll de la señal sísmica real después del filtrado mediante SVD.



(a) Señal original



(b) Señal filtrada

6.4 DISCUSIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DEL FILTRO NPSP EN SEÑALES MULTICOMPONENTE

En la presente sección, se discute el desempeño del filtro NPSP en la atenuación y eliminación de interferencias para señales de radares. Igualmente se evalúa el desempeño del filtro NPSP en el filtrado de ground roll de señales sísmicas sintéticas y reales.

6.4.1 Señales de radar.

Señal de radar 1.

Las señales totales a frecuencias 5 [MHz], 15 [MHz] y 25 [MHz] tienen parámetros elípticos de polarización dentro del rango definido para el prefiltrado de polarización (cuadro 2). De esta forma se aprecia en la Figura 13, que solo estas señales son filtradas. Estas tres señales tienen los mismos parámetros de polarización en sus señales interferencia, y solo las señales a 5 [MHz] y 15 [MHz] igual desfase relativo en las componentes de sus señales objetivo, por lo que el filtro, caracterizado con los parámetros de polarización de la señal de 5 [MHz], solo permite recuperar la señal objetivo de estas señales, como se evidencia en la Figura 14. Para la señal de 25 [MHz], se recupera una señal con parámetros de polarización diferentes, debido a que el desfase de la señal objetivo que esta señal tiene, es diferente al utilizado por el filtro para recuperar señales. En la Figura 15 se nota el hecho de que la señal recuperada tiene diferente amplitud y fase comparada con la señal objetivo a esta frecuencia.

Señal de radar 2.

Del cuadro 8 se observa que la señal filtrada, analizando la frecuencia de 10 [MHz], tiene los mismos parámetros de polarización de la señal objetivo generada

para la misma frecuencia, con lo que se evidencia que se elimina la señal interferencia completamente.

Se observa en la Figura 19 que la energía de la señal de 10 [MHz] se modifica. Una consecuencia de haber generado los parámetros de polarización de forma aleatoria de la señal HF de radar, es que la energía de la señal con frecuencia 23 [MHz] también se modifica, como se observa en esta misma Figura. Los parámetros elípticos de polarización que esta señal tiene ($\Phi = 0,9911$ [rad] y $\tau = 0,6889$ [rad]), la hacen ser parte del rango en el que el filtro debe actuar (cuadro 3), definido por el azimut y ángulo de elipticidad de la señal de 10 [MHz]. La señal a 23 [MHz] se generó con una señal objetivo e interferencia con ángulos de polarización y desfases relativos de $\varepsilon_s = 1,0300$ [rad], $\delta_s = 1,0780$ [rad], $\varepsilon_i = 0,6923$ [rad], $\delta_i = 1,7981$ [rad] y ángulo de polarización y desfase relativo en su señal total de $\varepsilon_t = 0,8238$ [rad], $\delta_t = 1,3936$ [rad], pero la señal recuperada de frecuencia 23 [MHz] tiene unos parámetros de polarización de $\varepsilon = 0,9341$ [rad] y $\delta = 1,7175$ [rad], con lo que se muestra que el filtro actuó, pero recupero una señal con parámetros de polarización diferentes, debido a que la caracterización utilizada en el filtro difiere a las características de esta señal.

Discusión experimentos de radar.

De los experimentos realizados con ambas señales de radar simuladas, se comprueba que es posible eliminar por completo la interferencia de una señal y recuperar la señal objetivo, siempre y cuando los parámetros del filtro estén perfectamente sintonizados con la interferencia y el desfase que se desea recuperar sea el de la señal objetivo. De no cumplirse estas condiciones, se recupera una señal con un ángulo de polarización, desfase relativo y amplitud diferentes. Esto permite verificar que el algoritmo de inversión diseñado funciona correctamente.

6.4.2 Señales sísmicas. Se parte de la hipótesis que las zonas con ground están conformadas por señales objetivo de polarización lineal y señales interferencia con polarización elíptica. Esta hipótesis surge del movimiento elíptico retrógrado de las ondas Rayleigh, generadas por la interacción de las ondas P y ondas SV¹⁶⁴, y de conocer que las ondas primarias (P) son de polarización lineal^{165 166}. Bajo estas conjeturas, se seleccionan las zonas caracterizadas como ground roll (zonas identificadas realizando descomposición en valores singulares en¹⁶⁷) para obtener sus parámetros de polarización. Teniendo como referencia que el ground roll son las ondas que presenta mayor amplitud en los registros sísmicos¹⁶⁸ se definen como parámetros de interferencia los obtenidos para las zonas consideradas como ground roll y se recuperan las señales con el grado de polarización más cercano a 1. Para cuantificar la acción del filtro, se utiliza el índice denominado grado de polarización global, explicado en el capítulo 6.

Señal sintética.

El mejor resultado obtenido, teniendo como referencia el grado de polarización global medido en zonas con ground roll, se obtiene con los parámetros de interferencia caracterizados para la traza 3 utilizando el criterio de selección 4 (valores máximos de los parámetros ε_i y δ_i caracterizados) para filtrar todas las trazas (Experimento 2). Estos parámetros de polarización permiten aumentar el grado de polarización global un 35,86% en comparación a la entrada. En la Figura 6.18 se aprecia que la señal que se recuperó tiene grados de polarización más cercanos a 1 que la señal sin filtrar en la zona considerada ground roll. En la Figura 29 se muestra que la cantidad de frecuencias consideradas ground roll

¹⁶⁴ SERRANO Jheyston Omar, SÁNCHEZ Iván Javier Op. Cit.

¹⁶⁵ Ibid

¹⁶⁶ TRAVIS BEHRENS Richard Op. Cit.

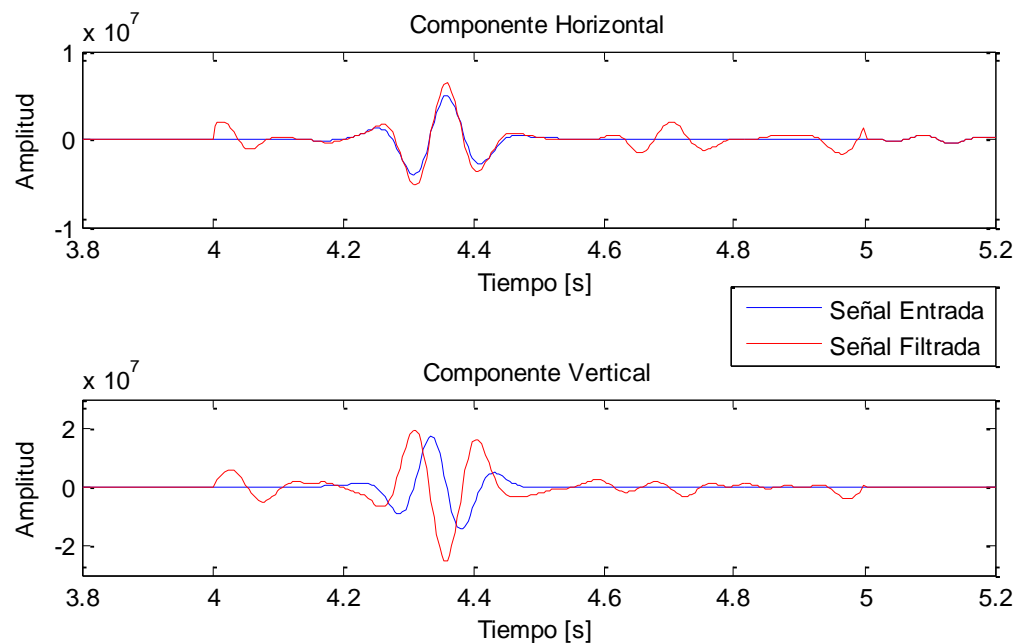
¹⁶⁷ SERRANO Jheyston Omar, SÁNCHEZ Iván Javier Op. Cit.

¹⁶⁸ Ibid

después del filtrado se disminuyen, con lo cual se demuestra que se ha atenuado lo que se considera ground roll.

De los resultados puede evidenciarse que realmente se atenúa el ground roll y se recupera una señal con una polarización más lineal, tal como se planteó en la hipótesis inicial. La señal de entrada al filtro se considera como la suma de una señal objetivo más una señal interferencia, en las cuales se puede presentar suma constructiva o destructiva de señales. Se muestra el resultado del filtrado sobre la traza 150 en la Figura 39, de la cual se grafican las componentes horizontal y vertical antes y después del filtrado

Figura 39 Señal filtrada (rojo) y sin filtrar (azul) en la zona con ground roll de la traza 150 del experimento 2 de la señal sísmica sintética.



Se observa en la Figura 39, que la señal recuperada es de mayor amplitud, lo que intuye que esta señal, filtrada con los parámetros de polarización establecidos,

tiene una señal objetivo que presenta un desfase relativo y ángulo de polarización, tal que la interferencia al ser sumada atenúa la amplitud de dicha señal (Suma destructiva de señales).

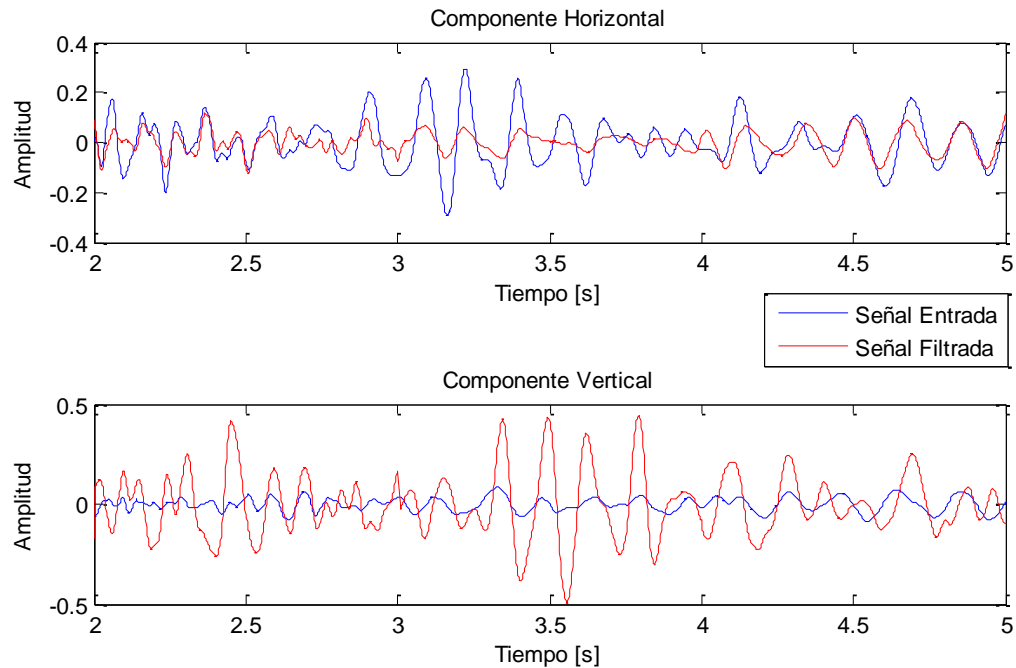
La técnica propuesta por los autores para el filtrado de señales sísmicas multicomponente utilizando el filtro NPSP, permite satisfacer la hipótesis planteada con mejores resultados (grado de polarización) en comparación al filtrado por descomposición en valores singulares (SVD). De los experimentos realizados, el mejor resultado implementando el filtro NPSP aumenta el grado de polarización 35,86%, mientras que la implementación de SVD incrementa el grado de polarización 19,34%. De igual forma, menor cantidad de zonas son consideradas ground roll para los resultados del filtro NPSP en comparación a SVD, como se aprecia en las Figuras 29 y 31.

Señal real.

Los mejores resultados obtenidos de los experimentos, respecto al grado de polarización, permiten incrementar este índice un 9,83% (cuadro 13) con respecto a la señal original. Se puede observar en la Figura 35, que la señal filtrada en la zona con ground roll tiende a una polarización lineal, pero la cantidad de frecuencias consideradas ground roll no sufre grandes cambios respecto a las zonas de ground roll de la señal original (Figura 36).

Se muestra el resultado del filtrado sobre la traza 300 en la Figura 40, de la cual se grafican las componentes horizontal y vertical antes y después del filtrado.

Figura 40. Señal filtrada (rojo) y sin filtrar (azul) en la zona con ground roll de la traza 300 de la señal sísmica real.



Con los resultados obtenidos de la implementación del filtro NPSP en señales sísmicas reales se incrementa el grado de polarización global 9,83%, utilizando la técnica propuesta se obtienen mejores resultados en comparación al filtrado por descomposición en valores singulares (SVD), cuyo grado de polarización se incrementa 6,37% en relación a la señal sin filtrar. A pesar de incrementar en menor medida el grado de polarización en comparación a los resultados de la señal sintética, existe menor cantidad de zonas consideradas ground roll para los resultados del filtro NPSP en comparación a SVD, como se aprecia en las Figuras 36 y 38.

Con los resultados obtenidos se aprecia que los filtros NPSP pueden ser usados para atenuar ruido coherente presente en señales sísmicas. El menor aumento del grado de polarización en los experimentos con señales reales en comparación a señales sintéticas se debe a la poca cantidad de trazas utilizadas para caracterizar

el ground roll. Una hipótesis para investigaciones futuras en pro de mejorar los resultados, es realizar una caracterización adaptativa del ground roll, donde los parámetros de interferencia del filtro sean los caracterizados para cada frecuencia en las ventanas de datos. Igualmente, analizando los promedios de grado de polarización por frecuencia obtenidos para señales sintéticas y señales reales, se aprecia que estos siempre mejoran para frecuencias inferiores a 10 [Hz], con lo que se podría considerar el ground roll aun de más baja frecuencia al rango de 25 [Hz] establecido en los experimentos. Finalmente, podrían obtenerse mejores resultados para la implementación en señales sísmicas reales, planteando e implementando una hipótesis que modele los datos como la suma de señales objetivo e interferencia, considerando reflexiones, ondas P, ondas S y ondas superficiales.

7. CONCLUSIONES

- Las técnicas para el diseño de filtros de polarización, hacen uso de diversos dominios transformados, analizan de forma diferente la señal y el modelo de inversión necesario varía en cada una de ellas, por lo cual debe trabajarse de forma independiente cada técnica hasta que estudios posteriores permitan obtener el planteamiento de un modelo general de los filtros de polarización.
- Cumpliendo las condiciones de tener perfectamente caracterizada la interferencia y de conocer un parámetro de la señal a recuperar, el error será del 0% en la reconstrucción de la señal objetivo, como se evidencia en los resultados con la señal de 10 [MHz] del experimento señal de radar 2. En caso de no cumplir con alguna de las condiciones anteriores, no es posible recuperar la señal objetivo original, como se muestra en los resultados de la señal a frecuencia 23 [MHz], en la cual, el porcentaje de error entre la señal objetivo obtenida y la señal objetivo original es del 9,31% y 59,32% en el ángulo de polarización y desfase relativo respectivamente.
- La hipótesis de considerar las señales sísmicas como la suma de una señal objetivo con polarización lineal (Onda P) y una señal interferencia con polarización elíptica (Ground roll) en la implementación del filtro NPSP en señales sísmicas, genera un aumento del grado de polarización global en señales sintéticas del 35,86% y en reales del 9,83% con relación a las señales originales. Para mejorar la atenuación del ruido coherente presente en señales sísmicas se deben considerar ambas señales como no estacionarias y modelar la propagación de las ondas en un medio no lineal.
- Para la implementación del filtro NPSP y recuperar la señal objetivo con polarización diferente a vertical, se hace necesario el uso de una técnica de

inversión que permita recuperar esta señal. Las técnicas implementadas en este proyecto, modelan la señal objetivo como senoidal estacionaria, introduciendo un efecto de periodicidad al reconstruir la señal total. Como trabajo futuro en la línea de investigación, se propone utilizar una técnica de inversión que haga uso de Wavelets para evitar este efecto.

- Durante el estudio se encontró evidencia de que los inconvenientes de utilizar filtros de polarización pueden ser solucionados de 3 formas diferentes. La primera, es implementar modelos estadísticos y transformadas wavelets para definir los parámetros de polarización de las señales¹⁶⁹. La segunda, es implementar de forma conjunta diferentes técnicas de filtrado, como descomposición en valores singulares y el filtro NPSP, logrando así, un análisis en el dominio tiempo-frecuencia. Por último, plantear diferentes modelos de descomposición de la señal total con el fin de no solo recuperar un tipo de polarización. Dichas soluciones se proponen por los autores como trabajo futuro en la línea de investigación.

¹⁶⁹ JIN S RONEN S Op. Cit.

BIBLIOGRAFÍA

AI-JUN, Liu y XING-PENG, Mao. A Polarization Filtering Method Based On Oblique Projection Operator. Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications [Online]. Octubre, 2009 [citado 2 marzo 2015], pp. 436 - 439. Disponible en Biblioteca UIS: Base de datos IEEE.

ARNAL, Petra y GIL, Jose. El modelo de la esfera de Poincaré: Representación de medios materiales. Zubia [Online]. Junio, 1991, vol. 9 [citado 2 marzo 2015], pp. 9-17.

BEHRENS, Richard, T y SCHARF, Louis, L. Signal Processing Applications of Oblique Projection Operators. IEEE Transactions on Signal Processing [Online]. Junio, 1994, vol. 42 [citado 2 marzo 2015], pp. 1413-1424. Disponible en Biblioteca UIS: Base de datos IEEE.

BEHRENS, Richard. Subspace signal processing in structured noise. Tesis de grado Doctor en Filosofía. Colorado.: University of Colorado. Facultad de graduados. Departamento de ingeniería eléctrica y computación, 1990. 145 p

BIN Cao, QIN-YU, ZHANG, DONG Liang, SHOU-MING Wen, LIN Jin y YAN-QUN Zhang. Blind Adaptive Polarization Filtering Based on Oblique Projection, Communications (ICC) [Online]. Mayo, 2010 [citado 2 marzo 2015], pp. 1-5. Disponible en Biblioteca UIS: Base de datos IEEE.

BOERNER Wolfgang M, YAN Wei-ling, XI An Qing, y YAMAGUICHI Yoshio. On the Basic Principles Polarimetry: the Target of Radar Characteristic Polarization State Theory of Kennaugh, Huynen's Polarization Fork Concept, and its Extension to the Partially Polarized Case. Proceedings of the IEEE [Online]. Octubre, 1991,

vol. 79 [citado 2 marzo 2015], pp. 1538-1550. Disponible en Biblioteca UIS: Base de datos IEEE.

BORN, Max y WOLF, Emil. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light. 7th ed. Estados Unidos.: Cambridge University Press, 1999. 378 p. ISBN 0-521-78449-2

DONNO, Daniela; NEHORAI, Arye y SPAGNOLINI, Umberto. Seismic velocity and polarization estimation for wavefield separation. *Signal Processing, IEEE Transactions* [Online]. Octubre, 2008 Vol. 56 [citado 2 marzo 2015], pp. 4794-4809.

DU, Zhijun; FOULGER, G. R.; MAO, Weijian. Noise reduction for broad-band, three-component seismograms using data-adaptive polarization filters. *Geophysical Journal International* [Online]. Marzo, 2000, vol. 141, no 3 [citado 5 marzo 2015], pp. 820-828.

FERNÁNDEZ, Ángel. Polarización de la luz [Online]. Universidad de Vigo: Grupo de investigación en aplicación laser, 2009 [citado 2 marzo 2015]. Disponible en internet:

<http://www.laser.uvigo.es/Docencia/Teleco/Fav.10/restringido/Explicaciones/FAv04_Explicacion.pdf>

FERNÁNDEZ, Ángel. Transparencias: Polarización de la luz [Online]. Universidad de Vigo: Grupo de investigación en aplicación laser, 2009 [citado 2 marzo 2015].

Disponible en internet:
<http://www.laser.uvigo.es/Docencia/Teleco/Fav.10/restringido/Transparencias/4_FAV_Polarizacion.pdf>

GUEVARA, Saúl. Analysis and filtering of near-surface effects in land multicomponent seismic data. Trabajo de grado master en ciencias. Calgary, Alberta.: Universidad de Calgary. Facultad de Geología. Departamento de Geología y Geofísica, 2000. 146 p.

HUGHH, Young; FREEDMAN, Roger; SEARS, Francis y ZEMANSKY, Mark. Física universitaria volumen 1. México D.C.: Pearson Educación, 2009. 763 p. ISBN 978-607-442-288-71

HUGHH, Young; FREEDMAN, Roger; SEARS, Francis y ZEMANSKY, Mark. Física universitaria volumen 2. México D.C.: Pearson Educación, 2009. 1482 p. ISBN 970-26-0672-1

JAAP Timbergen. Astronomical Polarimetry. 1st ed. New York.: Cambridge University Press, 2005. 176 p .ISBN 978-0521018586

KEAREY, Philip; BROOKS, Michael y HILL, Ian, An introduction to geophysical exploration. 3rd ed. Iowa.: Blackwell Science, 2002. 272 p. ISBN 978-0-632-04929-5

JONG-SEN, Lee y POTTIER Eric, Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications. 1st ed. Florida.: CRC Press, 2009. 438 p. ISBN 9781420054972

LAZKOZ, Ruth. Ondas gravitatorias. Revista mexicana de física [En línea]. Agosto, 2013, vol. 49, no. 4 [citado 2 marzo 2015], pp. 384-390.

LELYEN, Ruth. ¿Qué son las ondas gravitacionales? [Online]. Batanga, 2012 [citado 2 marzo 2015]. Disponible en internet: <<http://curiosidades.batanga.com/3728/que-son-las-ondas-gravitacionales>>

LUQUE, Rubén; HURTADO, Nuri y OVALLES Asdrúbal. Implementación de un Filtro de Polarización basado en la Descomposición del Valor Singular (SVD). Tribunal del Investigador [En línea]. 2011, vol. 12 [Citado 2 marzo 2015], pp. 24-27.

MORENO, Claudia; GARCIA, Ricardo; LARA Arturo y RAMÍREZ Jaime. Inducción a las ondas gravitacionales. EDVCATIO PHYSICORVM QVO NON ASCENDAM [En línea]. Septiembre, 2008 Vol. 2 [citado 2 marzo 2015], pp. 311-319.

NGUYEN, D. T.; D BROWN, R.; LAWTON, D. C. Polarization filter for multi-component seismic data. *Exploration Geophysics*, [Online] 2001, [citado 2 marzo 2015] pp. 90-101. Disponible en Biblioteca UIS: Base de datos IEEE.

NIKOLOVA, L y RAMANUJAM P. Polarization holography. 1st ed. New York.: Cambridge University Press, 2009. 231 p. ISBN 9780511537059

NILSEN, J; CHENG, K. y JOHNSON, W. Thomson scattering in the average-atom approximation. American Physical Society [Online]. Septiembre, 2012, vol. 86 [citado 2 marzo 2015], pp 1-9.

Ondas Electromagnéticas [Online]. Universidad de la Republica Uruguay: Apuntes para la asignatura FIS-140, [citado 2 marzo 2015]. Disponible en internet: <http://www.fing.edu.uy/if/cursos/optica/apuntes_files/Polarizacion.pdf>

PADUAN, Jeffrey y GRAVEN, Hans. Introduction to high-frequency radar: reality and myth. *Oceanography* [Online]. 1997, vol. 10 [citado 3 marzo 2015], pp. 36-39.

PEREZ, Jose. Efecto Compton [Online]. Wikipedia, 2011 [citado 2 marzo 2015]. Disponible en internet: <http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_Compton>

PINNEGAR, C. R. Polarization analysis and polarization filtering of three-component signals with the time—frequency S transform. *Geophysical Journal International* [online]. Enero, 2006, vol. 165 [citado 2 marzo 2015], pp. 596-606.

Polarización de la luz [Online], Física en el IES tierra Estella, 2012 [citado 2 marzo 2015]. Disponible en internet: <<http://fqieste2fisica.blogspot.com/>>

PROCESI, Claudio. An approach through Invariants and representation. 1st ed. LieGroups. Springer, 207. 600 p. ISBN 978-0-387-28929-8

RAYA SARO, Andrés; RÍDER MOYANO, Alfonso y RUBIO Ruis, Rafael. Álgebra y geometría lineal. Madrid.: Reverté, 2010. 512 p. ISBN 9788429150384

RAYMOND, Serway y FAUGHN Jerry, Física. 7ma ed. México D.C.: Pearson Educación, 2001. 724 p. ISBN 978-607481357-9

REVILLA, Miguel. Birrefringencia [Online]. Universidad Complutense Madrid, oct 2007 [citado 2 marzo 2015]. Disponible en internet: <http://pendientedemigracion.ucm.es/info/opticaf/OPT_FIS/apuntes_sueltos_prov/pdf/Tema3_b.pdf>

ROUEFF, Antoine; CHANUSSOT, Jocelyn; MARS y Jérôme I. Estimation of polarization parameters using time—frequency representations and its application to waves separation. *Signal processing* [Online]. 2006, vol. 86, no 12 [citado 2 marzo 2015], pp. 3714-3731.

SAMSON, J. C. y OLSON, J. V. Data-adaptive polarization filters for multichannel geophysical data. *Geophysics* [Online]. Febrero, 1981 Vol. 46 [citado 2 marzo 2015], pp. 1423-143.

SERRANO, Jheyston y SÁNCHEZ Iván. Implementación de un filtro de polarización basado en la descomposición en valores singulares para la atenuación de ruido coherente ground roll. Trabajo de grado ingeniería Electrónica. Bucaramanga, Colombia.: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2014. 61p

SETHARES, William. *rhythm and transforms*, 1st ed. Madison.: Springer, 2007. 350 p. ISBN 978-1846286391

SNIK, Frans. *Astronomical Polarimetry*. 1st ed. Utrecht.: Utrecht University, 2009. 148 p. ISBN 978-90-393-5184-0

TÉLLEZ, María Juliana. Análisis e interpretación de ondas P y S de perfiles sísmicos. Tesis de grado Doctor en ciencias físicas. Madrid.: Universidad Complutense de Madrid. Facultad de ciencias físicas. Departamento de física de la tierra, astronomía y astrofísica, 1993. 309 p

TIAPKINA, Olena; LANDRØ, Martin; TYAPKIN, Yuriy y LINK, Brian. Single-station SVD-based polarization filtering of ground roll: Perfection and investigation of limitations and pitfalls. *Journal of Geophysics and Engineering* [Online]. Abril, 2012, vol. 77 [citado 2 marzo 2015], pp. 41-59.

VALDERRAMA, Jose. *Información tecnológica*. 10th ed. Brasilia.: Editorial del norte, 1999. 192 p. ISBN 0716-8756

VERA, Raúl. Implementación de una herramienta software que atenúe el ruido coherente ground roll presente en datos sísmicos multicomponente. . Trabajo de grado ingeniería Electrónica. Bucaramanga, Colombia.: Universidad Industrial de

Santander. Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2011. 61p

WINSTON. Polarization in the physical sciences [Online]. Wikipedia, 2010 [citado 2 marzo 2015]. Disponible en internet: <http://en.wikipedia.org/wiki/Polarization#In_the_physical_sciences>

XIANG-PENG, Mao; WIE-BO Deng y YONG-TAN Liu. Null phase-shift polarization filter for high frequency radar radio interference suppressing. Harbin Institute of Technology [Online]. Mayo, 2008 [citado 3 marzo 2015], pp. 1-5.

YAN, Bing; LI, Xiang y GUO, Hu, Sheng. The Method of Polarization Filter Based on Oblique Projection Operators in Process of Multi-component Acquired Data. Applied Mechanics and Materials [Online]. Julio, 2013, vol. 333 [citado 3 marzo 2015], pp. 656-660.

YONGTAN, Liu; FUSHENG, Dai y XINGPENG, Mao. Detection and Estimation of Target on Using in Polarization Signal Processing. International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology Proceedings [Online]. Agosto, 2004 [citado 5 marzo 2015], pp. 935-939.

ZHANG, QinYu, et al. Polarization filtering technique based on oblique projections. *Science China Information Sciences* [Online]. Mayo, 2010, vol. 53, no 5 [citado 3 marzo 2015], p. 1056-1066.