

**CARACTERIZACIÓN DEL MOVIMIENTO VECTORIAL EN DATOS SÍSMICOS
MULTICOMPONENTE UTILIZANDO TÉCNICAS DE POLARIZACIÓN**

ARNOLD GUARIN RAMIREZ



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

2016

**CARACTERIZACIÓN DEL MOVIMIENTO VECTORIAL EN DATOS SÍSMICOS
MULTICOMPONENTE UTILIZANDO TÉCNICAS DE POLARIZACIÓN**

ARNOLD GUARIN RAMIREZ

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero electrónico

DIRECTOR

DANIEL ALFONSO SIERRA BUENO
Ingeniero Electrónico, Ph.D

CODIRECTORES

CÉSAR ANTONIO DUARTE GUALDRÓN
Ingeniero Electrónico, Ph.D

IVAN JAVIER SÁNCHEZ GALVIS
Ingeniero Electrónico, Ph.D

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2016

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por brindarme la oportunidad de estudiar, y apoyarme a lo largo de la carrera.

A la Universidad Industrial de Santander, por haber sido la promotora de mi formación profesional.

A mi director de proyecto Daniel Sierra por su paciencia y siempre disponer de su tiempo para guiarme en lo que fuera necesario, a mi codirector Ivan Sánchez por su acompañamiento, guía y apoyo a lo largo de este proyecto, y por ultimo a mi codirector Cesar Duarte por todo lo que me enseñó y permitirme realizar este proyecto.

A los profesores que me compartieron un poco de su conocimiento, y que siempre me mostraron que la mejor forma de aprender es preguntar e investigar.

A los compañeros que estuvieron conmigo a lo largo de la carrera y siempre me ayudaron en los momentos que necesitaba.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. MARCO TEÓRICO.....	15
1.1. ONDAS SÍSMICAS	15
1.2. POLARIZACIÓN EN ONDAS	16
1.3. SÍSMICA MULTICOMPONENTE	18
1.4. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE POLARIZACIÓN.....	19
1.4.1. Descomposición en valores propios (EVD)	19
1.4.2. Descomposición en valores singulares (SVD).....	21
1.4.3. Métodos instantáneos o directos.....	23
1.5. ANÁLISIS DE MÚLTIPLES TRAZAS	24
2. TÉCNICAS IMPLEMENTADAS.....	25
2.1. DESCOMPOSICIÓN EN VALORES SINGULARES EN MÚLTIPLES ESTACIONES.....	25
2.2. MÉTODO DE LA MATRIZ ESPECTRAL MULTICOMPONENTE	27
2.2.1. Modelo matemático utilizado	27
2.2.2. Definición de la matriz espectral multicomponente	29
2.2.3. Estimación de la matriz espectral.....	31
2.2.4. Separación de las señales	33
2.2.5. Estimación de los parámetros de polarización	34
3. RESULTADOS	37
3.1. DATOS SINTÉTICOS.....	37

3.1.1. Descomposición en valores singulares en múltiples estaciones	38
3.1.2. Matriz espectral multicomponente.....	40
3.2. DATOS MULTICOMPONENTE REALES.....	42
3.2.1. Descomposición en valores singulares en múltiples estaciones	43
3.2.2. Matriz espectral multicomponente	47
4. CONCLUSIONES.....	52
CITAS	53
BIBLIOGRAFÍA	55

LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Representación de la propagación de las ondas sísmicas. Fuente [7].	16
Figura 2. Elipse de polarización. Fuente [9]	18
Figura 3. Adquisición multicomponente. Fuente [10]	19
Figura 4. Registro de datos sísmicos multicomponente. Fuente [28]	28
Figura 5. Matriz espectral de dos componentes. Fuente [9]	30
Figura 6. Ejemplo de suavizado espacial ($K_s = 1$). Fuente [9]	31
Figura 7. Ejemplo del suavizado frecuencial ($K_f = 2$). Fuente [9]	32
Figura 8. Esquema de la matriz espectral multicomponente. Fuente [9]	35
Figura 9. Datos sintéticos multicomponente generados.	37
Figura 10. Figura de polarización de las dos ondas en los datos sintéticos. Componente horizontal (DH) en función del componente vertical (DV).	38
Figura 11. Resultados obtenidos con el método de SVD usando datos sintéticos.	39
Figura 12. Ondas y parámetros de polarización de la traza 40 en los datos sintéticos.	39
Figura 13. Resultados obtenidos con el método de la matriz espectral usando datos sintéticos.	40
Figura 14. Ondas y parámetros de polarización de la traza 40 en los datos sintéticos.	41
Figura 15. Primer conjunto de datos sísmicos multicomponente reales.	42
Figura 16. Segundo conjunto de datos sísmicos multicomponente reales.	42
Figura 17. Resultados de las pruebas realizadas con el primer conjunto de datos.	44
Figura 18. Resultados de las pruebas realizadas con el segundo conjunto de datos.	45

Figura 19. Ondas y parámetros de polarización de la traza 8 en el primer conjunto de datos reales.	46
Figura 20. Ondas y parámetros de polarización de la traza 8 en el segundo conjunto de datos reales.	46
Figura 21. Parámetros de polarización del primer conjunto de datos en el plano DV-DT.	47
Figura 22. Parámetros de polarización del primer conjunto de datos en el plano DV-DR.	48
Figura 23. Parámetros de polarización del primer conjunto de datos en el plano DT-DR.	48
Figura 24. Parámetros de polarización del segundo conjunto de datos en el plano DV-DT.	49
Figura 25. Parámetros de polarización del segundo conjunto de datos en el plano DV-DR.	49
Figura 26. Parámetros de polarización del segundo conjunto de datos en el plano DT-DR.	50
Figura 27. Ondas y parámetros de polarización de la traza 8 en el primer conjunto de datos reales.	50
Figura 28. Ondas y parámetros de polarización de la traza 8 en el segundo conjunto de datos reales.	51

RESUMEN

TÍTULO: CARACTERIZACIÓN DEL MOVIMIENTO VECTORIAL EN DATOS SÍSMICOS MULTICOMPONENTE UTILIZANDO TÉCNICAS DE POLARIZACIÓN*

AUTOR: ARNOLD GUARIN RAMIREZ**

PALABRAS CLAVES: Sísmica multicomponente, Análisis de polarización, Caracterización.

DESCRIPCIÓN:

Cuando se inyecta energía en un terreno esta se propaga en forma de onda, este fenómeno se denomina onda sísmica. Las ondas sísmicas permiten extraer información del terreno en el que se desplazaron. Sin embargo, no todas las ondas que se miden entregan información relevante, por ende, es necesario diferenciar y separar las diferentes clases ondas que se encuentren en el registro de datos sísmicos. Hay diferentes formas de diferenciar estas ondas, bien sea por la velocidad a la que se desplazan, la frecuencia a la que vibran o analizando el movimiento de las partículas del suelo donde se propaga la onda. Este último se logra identificar por medio de la polarización de la onda sísmica, lo cual ha permitido el desarrollo de algoritmos que permiten obtener características cuantitativas de la polarización en las ondas sísmicas que se encuentren en un registro de datos. En este trabajo presenta el análisis e implementación de dos algoritmos de análisis de polarización por múltiples trazas, con el fin de estudiar métodos que encuentren parámetros de polarización a partir de un conjunto de diferentes trazas del registro sísmico, a diferencia de los métodos convencionales que realizan el análisis traza por traza de manera consecutiva.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas. Escuela de Ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones. Director PhD. Daniel Alfonso Sierra Bueno, Codirectores PhD. Cesar Antonio Duarte Gualdrón e Ing. Ivan Javier Sánchez Galvis.

ABSTRACT

TITLE: CHARACTERIZATION OF THE VECTOR MOVEMENT IN MULTICOMPONENT SEISMIC DATA WITH POLARIZATION TECHNIQUES*

AUTHOR: ARNOLD GUARIN RAMIREZ**

KEY WORDS: Multicomponent seismic, Polarization analysis, Characterization.

DESCRIPTION:

When we inject energy in the earth by, for example, an explosion, this energy spreads in a waveform, this event is called a seismic wave. The seismic waves let us obtain information of the ground where they traveled. However, not all the waves can give us relevant information, this is why it is necessary to identify and separate the different type of waves in the seismic record. There are several ways to identify these waves, one of them can be by comparing the speed of propagation in the ground, other can be comparing the frequency of the waves, or analyzing the particles movement on the ground where the wave travels. The last one can be achieved analyzing the property of polarization of the seismic wave. Because of this, there are several algorithms that can obtain quantitative characteristics of the polarization of the waves in a seismic record. This work presents the theory description and implementation of two polarization analysis multiple traces algorithms, whit the purpose of studying methods that can find polarizations parameters from a set of different traces in a seismic record, and not trace by trace as it used to be in the common methods for polarization analysis.

* Bachelor thesis

** Faculty of Physical – Mechanics Engineering. Electrical, electronics and telecommunications engineering School. Advisor PhD. Daniel Alfonso Sierra Bueno, Co-advisors PhD. Cesar Antonio Duarte Gualdrón and Ing. Ivan Javier Sánchez Galvis.

INTRODUCCIÓN

La geofísica es la ciencia que aplica los principios de la física para estudiar la tierra. Las investigaciones realizadas para el estudio del interior de la tierra involucran mediciones cerca de la superficie de la tierra, las cuales son influenciadas por la distribución y las propiedades físicas del suelo. El análisis de esas mediciones puede revelar cómo varían las propiedades físicas del terreno verticalmente y lateralmente [1].

Los métodos para investigar las subcapas de la tierra utilizados en la geofísica generalmente son: métodos de reconocimiento geofísicos o perforación del suelo. Sin embargo, ninguno de los dos métodos es perfecto. La perforación del suelo tiene la desventaja de que es un proceso costoso y provee información en localizaciones discretas, por otro lado, aunque los reconocimientos geofísicos pueden presentar incertidumbres en las interpretaciones, estos proveen medios relativamente más económicos y rápidos de información aproximada a la que se desea encontrar. Aunque no disponen totalmente de la necesidad de perforar el suelo, mediante programas de análisis se puede maximizar el área de estudio mientras se minimizan los requerimientos de perforado [1].

Los métodos de reconocimiento geofísicos se pueden dividir en dos categorías, están aquellos que utilizan los campos naturales de la tierra y aquellos que necesitan inyectar energía de forma artificial a la tierra. Los métodos de campos naturales utilizan los campos gravitacionales, magnéticos, eléctricos y electromagnéticos de la tierra, mientras que los métodos de fuentes de energía artificiales generan campos eléctricos o electromagnéticos, o generan ondas sísmicas mediante explosiones controladas. La efectividad de cada uno de estos métodos varía según el tipo de estudio que se vaya a realizar, por ejemplo, en la exploración de combustibles fósiles es más apropiada un análisis sísmico,

gravitatorio o magnético; en la exploración de fuentes de agua subterráneas se recomienda el análisis de resistividad eléctrica y la sísmica; etc [1].

Se desea realizar énfasis en las técnicas utilizadas en la sísmica, las cuales miden los tiempos de arribo de las ondas sísmicas reflejadas o refractadas para realizar los análisis del terreno; sin embargo, no todos los datos registrados brindan información relevante, lo cual implica que se deben desarrollar algoritmos que permitan extraer la información deseada de la medición. Los algoritmos se centran principalmente en separar las diferentes ondas presentes en un registro sísmico, esto se logra debido a las diferentes características que estas ondas presentan, bien sea las frecuencias a las que vibran, el movimiento de las partículas por donde viaja la onda, o la velocidad de estas [2]. La característica estudiada en este proyecto es el movimiento de las partículas, también llamada polarización, ya que se han desarrollado diferentes métodos que permiten estudiar la polarización en ondas sísmicas, como los son la matriz de covarianza [3], la descomposición en valores singulares [4] o el análisis en el dominio complejo [5]. Para mejorar la calidad de los resultados, los métodos han sido adaptados para que respondan mejor a situaciones específicas, una situación común es cuando las señales se solapan en el tiempo, o existen dos señales que vibran a la misma frecuencia, para estos casos se utilizan métodos que lleven la señal al dominio tiempo-frecuencia [6].

En este trabajo se estudiarán dos algoritmos que se adaptan a una situación en la cual se desea realizar un análisis de los datos con las mediciones de más de un sensor, debido a que en estas situaciones, la técnica de análisis a implementar es utilizada en cada uno de los sensores por separado. Lo que se busca es analizar los resultados obtenidos a partir de estos métodos y mirar qué tan confiables son, cuál es su rango de error y bajo qué condiciones el método puede ser óptimo.

Primero se presentará un marco teórico en el cual se explicarán conceptos básicos, seguido de un resumen de la revisión bibliográfica hecha como punto de partida. Posteriormente se explicará de forma detallada los métodos utilizados y el algoritmo utilizado para la implementación del mismo, luego, se presentarán los resultados obtenidos de las pruebas realizadas con sus respectivos análisis, para finalmente presentar las conclusiones del trabajo.

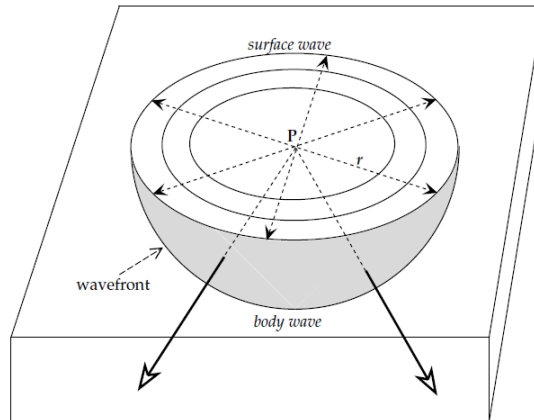
1. MARCO TEÓRICO

1.1. ONDAS SÍSMICAS

Una onda sísmica es la propagación de una perturbación sísmica a través de un medio heterogéneo, aunque debido a la complejidad que esto representa para describir su comportamiento, es necesario realizar suposiciones para simplificar su modelo matemático. Una forma de observar esto es una explosión causada en un determinado lugar, la primera suposición que se hace es asumir que la propagación de la perturbación sísmica se da mediante desplazamientos elásticos de las partículas en el medio. La segunda suposición que se hace es modelar el medio heterogéneo como diferentes capas de medios homogéneos. Aun cuando ambas suposiciones no son exactas, se pueden obtener muy buenas aproximaciones dependiendo de las condiciones en las que se trabaje. Por ejemplo, la propagación elástica no aplica cerca de la fuente sísmica, debido a que en los lugares cerca de la explosión el terreno es destruido, o visto de otra forma, las partículas del terreno se mueven de manera inelástica al no volver a su posición original; sin embargo, después de que la perturbación se aleja lo suficiente de la fuente, la magnitud de la onda decrece y el medio se deforma de manera elástica permitiendo su propagación; por otro lado, si se escoge de manera adecuada el grosor, la densidad y las propiedades elásticas de cada una de las capas, las condiciones reales pueden ser aproximadas [7].

Las ondas sísmicas se separan en dos clases: *ondas de cuerpo*, las cuales viajan a lo largo del medio en forma directa, y *ondas superficiales*, las cuales viajan a través de la superficie del medio. En la Figura 1 se presenta un ejemplo de cómo se propagan las distintas clases de ondas sísmicas.

Figura 1. Representación de la propagación de las ondas sísmicas. Fuente [7].



1.2. POLARIZACIÓN EN ONDAS

La polarización es una propiedad de las ondas que pueden oscilar en más de una dirección, la cual describe como se relacionan dos o más oscilaciones presentes en una onda. Hace referencia principalmente a las ondas transversales, que son aquellas que en un punto determinado presentan diferentes componentes vectoriales que oscilan perpendicularmente a la dirección de propagación [8]. Al analizar el comportamiento de un componente con respecto al otro, es posible obtener parámetros que permiten describir la relación entre estos componentes; visualmente se obtiene una figura geométrica, la cual puede ser una elipse, una línea recta o una circunferencia.

Debido a que es necesario tener un punto de vista cuantitativo de la figura de polarización para poder identificarla sin la necesidad de utilizar gráficas, se generalizan las posibles figuras geométricas que se puedan obtener como elipses. De esta forma, a partir de las funciones que describen la oscilación de cada componente transversal, es posible caracterizar la elipse de polarización, obteniendo los valores del semieje mayor y menor de la elipse, al igual que el ángulo de inclinación con respecto al eje de coordenadas cartesianas. Los semiejes de la elipse hacen referencia a los ejes perpendiculares desde los cuales

la elipse es simétrica, y a partir de la relación de estos se tienen los distintos casos de polarización. Si los dos semiejes son iguales se tiene una polarización circular; si uno de los semiejes es mucho más grande que el otro, este describe una polarización lineal; y en caso de que no sea ninguna de los dos casos, se tiene una polarización elíptica.

Tomando el caso de una onda con dos componentes transversales $O_x = a_1 \cos(2\pi ft + \varphi_1)$ y $O_z = a_2 \cos(2\pi ft + \varphi_2)$. Al combinar las ecuaciones de estos componentes, y despejando para anular la dependencia del tiempo en la ecuación se tiene la ecuación de la elipse que se presenta a continuación:

$$\left(\frac{O_x}{a_1}\right)^2 + \left(\frac{O_z}{a_2}\right)^2 = 2 \frac{O_x O_z}{a_1 a_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = \sin^2(\varphi_2 - \varphi_1). \quad (1.1)$$

En la Figura 2 se presenta la elipse de polarización descrita por los dos componentes transversales. Donde a y b son el semieje mayor y menor respectivamente, y ψ es la inclinación de la elipse, donde $-\frac{\pi}{2} \leq \psi \leq \frac{\pi}{2}$. Para facilitar el cálculo de estos parámetros se definen las tres constantes la relación de amplitudes entre componentes $\alpha = a_2/a_1$, la diferencia de fases $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$, y el grado de elipticidad $e = b/a$. Los parámetros de polarización están dados por las siguientes ecuaciones:

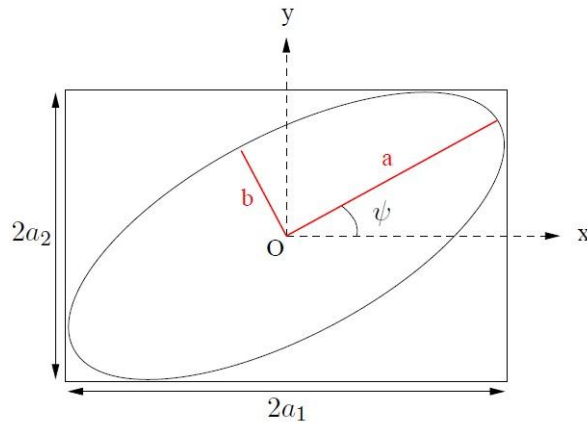
$$\tan(2\psi) = \frac{2\alpha}{1 - \alpha^2} \cos(\varphi), \quad (1.2)$$

$$\frac{e}{1 + e^2} = \frac{\alpha}{1 + \alpha^2} \sin(\varphi). \quad (1.3)$$

Es importante resaltar que el grado de elipticidad puede ser tanto positivo como negativo, lo que influye en el signo de este es la dirección en que se mueven las

partículas, si el signo llega a ser positivo la dirección en que la elipse es dibujada es en el sentido de las manecillas del reloj, y si llega a ser negativo, la elipse se dibuja en sentido contrario a las manecillas del reloj.

Figura 2. Elipse de polarización. Fuente [9]

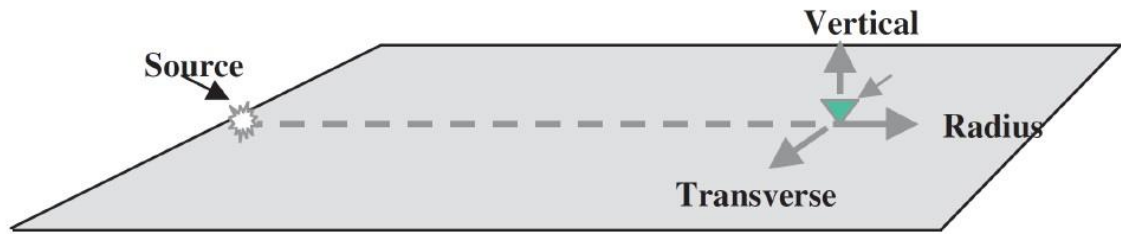


En las ondas sísmicas la polarización hace referencia a la forma en que las partículas se mueven en el medio donde se propaga la perturbación, esto depende del tipo de onda que está viajando en el medio; siendo una polarización lineal la que caracteriza principalmente a las ondas de cuerpo, y una polarización elíptica a las ondas superficiales.

1.3. SÍSMICA MULTICOMPONENTE

Los sensores utilizados actualmente en la sísmica miden los cambios de presión en tres direcciones diferentes: vertical, transversal y radial; esas direcciones son llamadas componentes. La energía registrada en el componente vertical proviene principalmente de las ondas directas; en los componentes transversal y radial, la mayor parte de su energía proviene de ondas superficiales. En la Figura 3 se muestra el ejemplo de una adquisición sísmica multicomponente.

Figura 3. Adquisición multicomponente. Fuente [10].



1.4. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE POLARIZACIÓN

Debido a que se puede distinguir el tipo de onda sísmica por medio de su polarización, se han desarrollado diferentes algoritmos que permiten obtener características cuantitativas de la polarización de una onda sísmica, entre ellos destacan la descomposición en valores propios [3], la descomposición en valores singulares [4] y los métodos instantáneos o directos [5]. Cada uno de estas técnicas permite encontrar los parámetros de polarización de una señal periódica ideal, debido a esto, no son métodos que cubran las condiciones que presentan las ondas sísmicas, por este motivo, en este trabajo estos métodos son llamados *métodos clásicos*, y las modificaciones realizadas para cubrir las condiciones particulares de las ondas sísmicas son llamadas en este trabajo *extensiones de los métodos clásicos* [11], [12].

1.4.1. Descomposición en valores propios (EVD). Este método clásico consiste en expresar una matriz como el resultado de la multiplicación de sus valores y vectores propios y a partir de estos modelar la polarización de la onda sísmica [3].

En el análisis de datos sísmicos, este método es aplicado a la matriz de covarianza de los datos recolectados, la cual consiste en generar una matriz a partir de la

covarianza entre los n elementos de dos vectores; por ejemplo, sean A y B dos vectores columna de una matriz con dimensiones $n \times 2$, la matriz de correlación M es conformada por los $m_{i,j}$ valores que se definen como:

$$m_{i,j} = E[(A_i - \mu_A)(B_j - \mu_B)], \quad (1.4)$$

donde μ_x es la media aritmética del vector x , y E denota la operación valor esperado. Otra forma de calcular esta matriz de correlación es mediante un producto matricial; por ejemplo, sea D una matriz de datos, la matriz de covarianza puede ser expresada

$$M = E\{D^T D\} \text{ o } M = E\{DD^T\}, \quad (1.5)$$

donde X^T es la transpuesta de la matriz X , y E es la operación de promediado en una matriz. En el caso de que la matriz de datos sea compleja se reemplaza la operación transpuesta por la operación transpuesta conjugada la cual se representa con H [13]. Por otro lado, los vectores propios v de una matriz A son aquellos que satisfacen la condición:

$$Av = \lambda v, \quad (1.6)$$

donde λ es el valor propio asociado al vector propio. La descomposición de la matriz de covarianza en sus valores y vectores propios implica que una matriz M de dimensiones $n \times n$, puede ser factorizada como:

$$M = V\Lambda^2V^T = \sum_{i=1}^m v_i \lambda_i v_i^T, \quad (1.7)$$

donde es una matriz V ortogonal de dimensiones $n \times n$, cuya i -ésima columna es el vector propio v_i de M , y Λ es una matriz diagonal, donde los elementos de la diagonal λ_i son los valores propios de M . En esta descomposición la dirección de los vectores propios y sus respectivos valores propios, indican la dirección y la magnitud de los componentes principales del elipsoide de polarización de los datos sísmicos.

Al tomar en cuenta las limitaciones que presenta el método en su aplicación directa en el filtrado de señales sísmicas [3], se han desarrollado extensiones que permiten ampliar el rango de aplicación del método, como los son: la complementación con el estudio de señales analíticas [13], la implementación del método en el dominio de la frecuencia [11], la implementación en el dominio tiempo-frecuencia con la transformada Wavelet [6] y con la transformada S [14]. En todas las extensiones con los valores y vectores propios, dependiendo de la dimensión de la matriz se pueden calcular diferentes parámetros, como el nivel de linealidad de la matriz, las direcciones y magnitudes de los semiejes del elipsoide de polarización, la dirección en la que se movieron las partículas y la inclinación del elipsoide de polarización con respecto al eje de coordenadas.

1.4.2. Descomposición en valores singulares (SVD). Este método, al igual que la descomposición en valores y vectores propios, busca recrear una matriz de datos a partir de una multiplicación de tres matrices, en este caso el método se aplica directamente a la matriz de datos sísmicos. Sea D una matriz de dimensiones $n \times m$, la descomposición de valores singulares está dada por:

$$D = U\Lambda V^T = \sum_{i=1}^m \sigma_i u_i v_i^T, \quad (1.8)$$

donde \mathbf{U} es una matriz de tamaño $n \times n$, cuyas columnas \mathbf{u}_i son llamadas los vectores singulares izquierdos, $\mathbf{\Lambda}$ es una matriz diagonal de tamaño $n \times m$, cuyos valores en la diagonal σ_i son los valores singulares, y la matriz \mathbf{V} de tamaño $m \times m$, sus columnas son llamadas vectores singulares derechos. Cada una de estas matrices entrega características diferentes de los datos presentes en la matriz \mathbf{D} ; los vectores singulares izquierdos \mathbf{u}_i , entregan la forma de onda, los vectores singulares derechos \mathbf{v}_i , presentan las direcciones de los ejes donde se concentra la mayor cantidad de información, y los valores propios σ_i , presentan la magnitud de la energía de su respectivo vector singular derecho. Este método está directamente relacionado con el análisis de valores y vectores propios, ya que los vectores singulares derechos son equivalentes a los vectores propios de $\mathbf{D}^T \mathbf{D}$, los vectores singulares izquierdos son los vectores propios de $\mathbf{D} \mathbf{D}^T$, y los valores propios equivalen a los valores singulares elevados al cuadrado, $\lambda_i = \sigma_i^2$ [4].

Como se muestra en (1.8) y debido a la directa relación con la descomposición de valores y vectores propios, con este método también es posible describir la polarización de las señales, ya que brinda información de la dirección y magnitud de los ejes principales del elipsoide de polarización. Partiendo de eso, este método ha sido implementado para identificar las señales sinusoidales presentes en un registro de datos [15], realizar análisis de polarización directamente de los registros sísmicos [16], hacer filtrado de señales sísmicas en el dominio del tiempo [17]; por otro lado, las extensiones involucran el análisis de señales analíticas [18] y aplicaciones en el dominio tiempo-frecuencia [19]. Debido a la directa relación entre la SVD y la EVD los parámetros de caracterización de la polarización son los mismos en ambos casos.

1.4.3. Métodos instantáneos o directos. Los algoritmos de esta categoría utilizan la aritmética compleja para tratar vectorialmente los datos polarizados, donde los ejes real e imaginario son tratados como dos ejes perpendiculares para mover las coordenadas del plano cartesiano al plano polar, esto permite usar ventanas de tiempo cortas e incluso calcular parámetros instantáneos de polarización [5].

Para realizar la conversión del dominio real al dominio complejo, se utiliza señal analítica medida, la cual consiste en aplicarle la transformada de Hilbert a la señal de datos y sumar este resultado como parte compleja a la señal original, por ejemplo, sea $D(t)$ una señal real, la señal analítica se describe como:

$$D^c(t) = D(t) + iH\{D(t)\}, \quad (1.9)$$

donde D^c denota la señal analítica de D , y $H\{D\}$ es la transformada de Hilbert la señal D . A partir de la señal analítica se pueden calcular parámetros como la amplitud y la fase instantánea del vector polar que esta representa en cada instante de tiempo. La amplitud instantánea $A(t)$ y la fase instantánea $\theta(t)$ se representan:

$$A(t) = |D^c(t)|, \quad (1.10)$$

$$\theta(t) = \arctan\left(\frac{H\{D(t)\}}{D(t)}\right). \quad (1.11)$$

Con estas dos características es posible determinar las magnitudes y las inclinaciones de los semiejes del elipsoide de polarización; esto implica que, a diferencia de los métodos matriciales, los parámetros de polarización pueden ser calculados sin la necesidad de información a priori o posteriori. Este método ha

sido aplicado principalmente para análisis de polarización en ondas sísmicas [20], [21], [22]; aunque en la mayoría de los casos es utilizado para complementar los métodos matriciales [18], [19], [23].

1.5. ANÁLISIS DE MÚLTIPLES TRAZAS

En un registro de datos sísmicos es común que se utilice más de un sensor en la medición, ya que al ubicar una serie de sensores a una distancia conocida entre ellos se puede medir el comportamiento de la onda sísmica en función de su desplazamiento [24]. En los datos extraídos de la medición esto se observa como una matriz donde cada columna representa la información registrada en uno de los sensores.

A la hora de implementar los métodos de análisis en registros con múltiples trazas, lo que se hace es aplicar el algoritmo a cada una de las trazas del registro de forma iterativa. Sin embargo, existen extensiones de los métodos clásicos que permiten realizar el análisis a partir de múltiples trazas, de este modo es posible obtener información de un mismo evento que haya sido registrado en múltiples sensores sin la necesidad de asumir información similar en otro; incluso la influencia de ruido correlacionado con la señal puede ser disminuida siempre y cuando el ruido no esté presente en todos los sensores.

Extensiones como el método de la matriz espectral multicomponente [9] y la descomposición de valores singulares en múltiples estaciones [25] tienen la característica analizar más de un componente a la vez, y debido a que la complejidad matemática no aumenta considerablemente con respecto a su versión de análisis traza a traza, estos dos métodos son seleccionados para ser implementados en este trabajo de grado.

2. TÉCNICAS IMPLEMENTADAS

2.1. DESCOMPOSICIÓN EN VALORES SINGULARES EN MÚLTIPLES ESTACIONES

La descomposición de valores singulares es una técnica que puede ser utilizada en datos con cualquier cantidad de componentes, y también puede ser generalizado para trabajar con múltiples mediciones de tres componentes de forma simultánea [26]. Si se generaliza el método para analizar las mediciones de tres componentes en múltiples sensores o estaciones, una matriz \mathbf{D} de dimensión $n \times 3k$, donde k indica el número de estaciones, puede ser generada combinando las k diferentes matrices de tres componentes \mathbf{D}^j , con $j = 1, \dots, k$, de modo que $\mathbf{D} = [\mathbf{D}^1, \dots, \mathbf{D}^k]$. Para realizar este análisis, primero se asumen formas de onda \mathbf{u}_i^j iguales en cada uno de los sets de datos \mathbf{D}^j , mientras, que las amplitudes σ_i^j y polarizaciones \mathbf{v}_i^j pueden ser diferentes. La principal diferencia entre el análisis de una estación y de múltiples estaciones, es que la sumatoria de la ecuación (1.8) se realiza hasta $3k$, en vez de 3, y que los vectores de polarización \mathbf{v}_i tienen $3k$ elementos.

La meta final es interpretar los resultados en términos de señales $\sigma_i^j \mathbf{u}_i$ y polarizaciones \mathbf{v}_i^j en las k estaciones individuales. Para hacer esto se reagrupan los vectores de polarización \mathbf{v}_i de $3k$ elementos, en k vectores de 3 elementos \mathbf{v}_i^j por cada estación j ; los valores singulares σ_i también son distribuidos sobre las k estaciones de forma que $\sigma_i^j \mathbf{v}_i^j = \sigma_i [v(3j-2)_i, v(3j-1)_i, v(3j)_i]^T$. De este modo, para cada estación se tiene una descomposición alternativa de la matriz de datos

$$\mathbf{D}^j = \mathbf{U} \mathbf{\Lambda}^j \mathbf{V}^{jT} = \sum_{i=1}^m \mathbf{u}_i \sigma_i^j \mathbf{v}_i^{jT}. \quad (2.1)$$

Debido a que el dominio del tiempo solamente permite analizar señales con polarización lineal, si se quiere analizar señales con polarizaciones elípticas, se debe trabajar sobre las señales analíticas de los datos medidos \mathbf{D}^c [13]. La ecuación de la SVD para una estación (1.8) y múltiples estaciones (2.1) pueden ser usadas de igual manera, sin embargo, hay que reemplazar la operación traspuesta (T) por la operación conjugada traspuesta (H). Por otro lado, los vectores singulares izquierdos \mathbf{u}_i^{cj} y derechos \mathbf{v}_i^{cj} serán complejos, pero los valores singulares σ_i^{cj} se mantienen reales. Cada columna en $\sigma_i^{cj} \mathbf{u}_i^{cj} \mathbf{v}_i^{cjH}$ es el producto de una la señal analítica $\sigma_i^{cj} \mathbf{u}_i^{cj}$ con un elemento del vector complejo de polarización \mathbf{v}_i^{cjH} , estas columnas se diferencian mediante una relación de amplitud constante y una rotación; sin embargo, si se considera solo la parte real $\Re(\sigma_i^{cj} \mathbf{u}_i^{cj} \mathbf{v}_i^{cjH})$, sus columnas siguen siendo una copia escalada y rotada de las otras, lo cual permite analizar comportamientos elípticos en los datos.

En la etapa final se toma la parte real del primer vector singular \mathbf{v}_1^{cj} , calculado a partir de (2.1) como la dirección del semieje mayor de la elipse de polarización $\mathbf{a}_1^j = [a_1^j(1), a_1^j(2), a_1^j(3)]^T$ en cada estación j , y a partir de \mathbf{a}_1^j se calculan los parámetros para describir la polarización de los datos. Se calculan tres parámetros los ángulos θ_j y ϕ_j , y la linealidad lin_j definidos por:

$$\theta_j = \arctan\left(\frac{a_1^j(2)}{a_1^j(1)}\right), \quad (2.2)$$

$$\phi_j = \arctan\left(\frac{\sqrt{a_1^{j^2}(2) + a_1^{j^2}(1)}}{a_1^{j^2}(3)}\right), \quad (2.3)$$

$$lin_j = |\alpha_1^j|, \quad (2.4)$$

donde θ_j (también llamado azimut) mide la inclinación de la elipse formada por los datos que se encuentran en el plano vertical-transversal, ϕ_j mide la inclinación de elipse formada en el plano vertical-radial, y lin_j mide la linealidad del semieje mayor, en la cual 1 y 0 representan polarizaciones perfectamente lineales y 0.5 polarizaciones circulares.

2.2. MÉTODO DE LA MATRIZ ESPECTRAL MULTICOMPONENTE

Para la explicación de este método, primero se describirá el modelo matemático de las señales sísmicas utilizado por el autor Paulus [9], luego se definirá la matriz espectral multicomponente junto con un tratamiento previo que se debe realizar a la matriz, y finalmente, se describirá el análisis de polarización del método.

2.2.1. Modelo matemático utilizado. La señal recogida por el sensor i en el instante de tiempo t corresponde a un modelo convolutivo [27] descrito como:

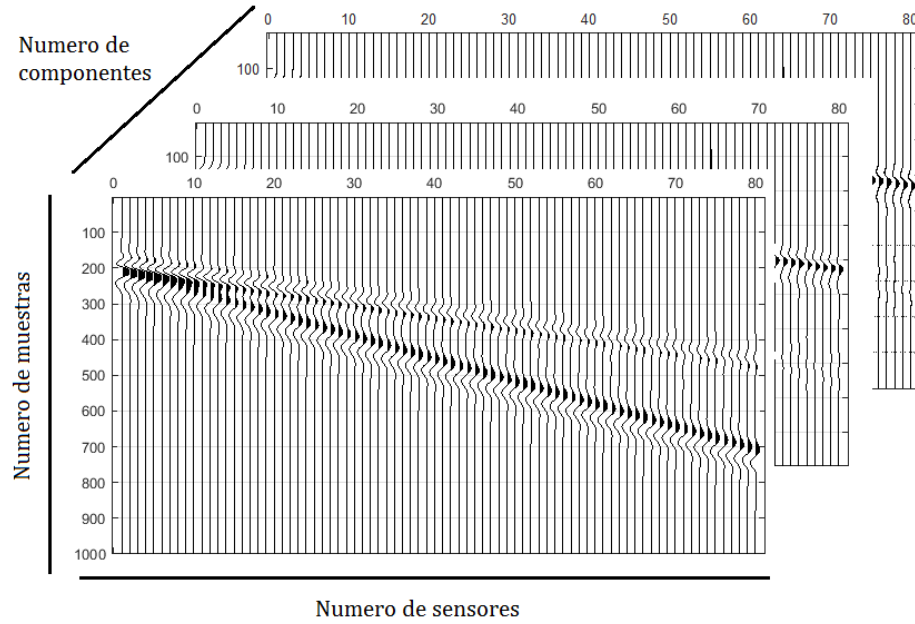
$$x_i(t) = \sum_{p=1}^P a_p w_p(t - \tau_i(t)) + b_i(t), \quad (2.5)$$

donde P es el número total de señales sísmicas, a_p es la amplitud aleatoria de la señal p , $w_p(t)$ es la señal emitida por una onda p , b_i es el ruido aditivo, y τ_i es el tiempo que demora la señal p llegar al sensor i . La ecuación (2.5) en el dominio frecuencial sería de la siguiente forma:

$$X_i(f) = \sum_{p=1}^P a_p W_p(f) e^{-j2\pi f \tau_i(f)} + B_i(f), \quad (2.6)$$

donde $X_i(f)$, $W_p(f)$, $\tau_i(f)$ y $B_i(f)$ son las respectivas transformadas de Fourier de $x_i(t)$, $w_p(t)$, $\tau(t)$ y $b_i(t)$. Hay que tener en cuenta que un registro de datos sísmicos multicomponente depende de tres parámetros: el tiempo (N_t muestras), la distancia (N_x sensores) y la dirección (N_c componentes). En la Figura 4 se presenta un ejemplo de un registro de datos sísmicos, donde se observa que los datos obtenidos pueden ser representados como una matriz $\mathbf{d}(t)$ de dimensiones $N_x \times N_t \times N_c$.

Figura 4. Registro de datos sísmicos multicomponente. Fuente [28]



A partir de la transformada de Fourier de la señal analítica de los datos $\mathbf{D}(f) = \mathcal{F}\{\mathbf{d}^c(t)\}$, se construye un vector \mathbf{T} de longitud $N_f N_x N_c$, el cual es definido como:

$$\mathbf{T} = \left[\mathbf{D}_1(f_1), \dots, \mathbf{D}_1(f_{N_f}), \mathbf{D}_2(f_1), \dots, \mathbf{D}_2(f_{N_f}), \dots, \mathbf{D}_{N_c}(f_1), \dots, \mathbf{D}_{N_c}(f_{N_f}) \right], \quad (2.7)$$

donde D_i es un vector de tamaño N_x que hace referencia a la i -ésima dirección o componente de D , f_i hace referencia al i -ésimo componente frecuencial de D , y N_f hace referencia al número de componentes frecuenciales de D . El modelo matemático del vector T está definido como:

$$T = SA + B, \quad (2.8)$$

donde A es un vector de longitud P , que representa las amplitudes aleatorias de las señales; B es un vector de longitud $N_f N_x N_c$, que contiene el ruido aditivo; S es una matriz de tamaño $N_f N_x N_c \times P$, donde las columnas describen la propagación de las P ondas a lo largo de los N_x sensores por todas las frecuencias de todos los componentes.

2.2.2. Definición de la matriz espectral multicomponente. Para construir la matriz espectral multicomponente, se aplica la ecuación (1.5) sobre el vector T para definir la matriz Γ de dimensiones $N_f N_x N_c \times N_f N_x N_c$, como se presenta a continuación:

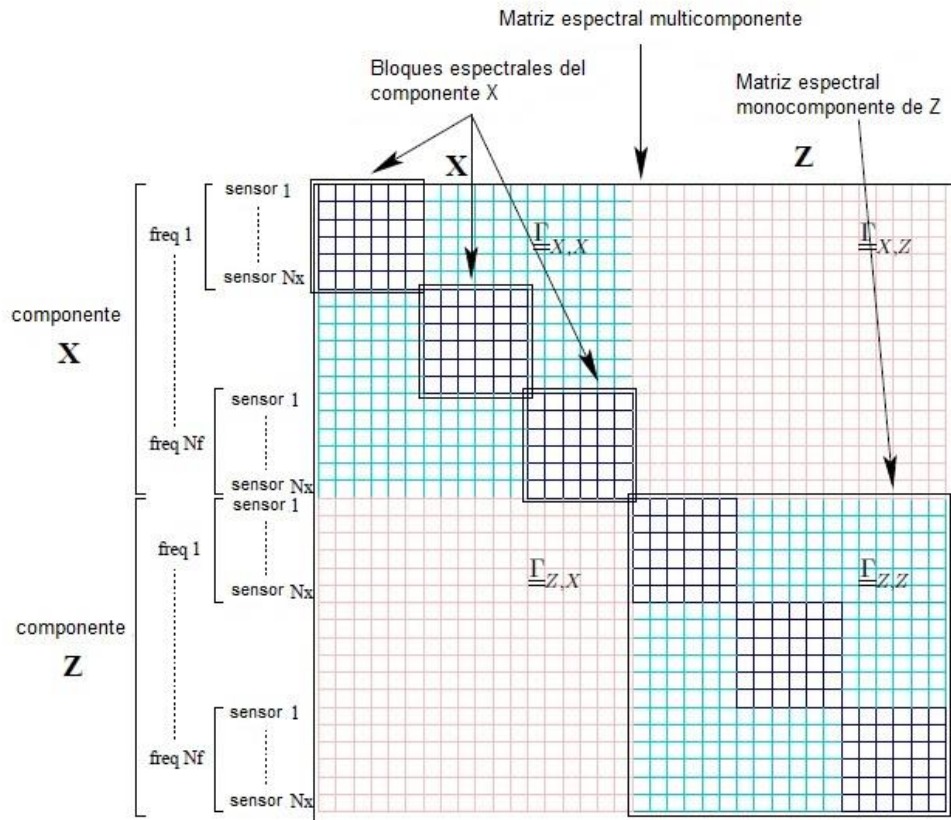
$$\Gamma = E\{TT^H\}. \quad (2.9)$$

Esta matriz está compuesta por $(N_f N_c)^2$ bloques de dimensión $N_x \times N_x$. Donde cada bloque caracteriza las señales registradas por todos los sensores en cada una de las frecuencias presentes por componente. Si se asume un registro de datos de dos componentes, la estructura de la matriz espectral es

$$\Gamma = \begin{pmatrix} \Gamma_{1,1} & \Gamma_{1,2} \\ \Gamma_{2,1} & \Gamma_{2,2} \end{pmatrix}, \quad (2.10)$$

donde $\Gamma_{1,1}$ y $\Gamma_{2,2}$ son las matrices espectrales monocomponente del primer y segundo componente respectivamente. Las matrices diferentes a las de la diagonal son las matrices que contienen la información correspondiente a la interacción entre los diferentes componentes. La Figura 5 ilustra la organización de una matriz espectral de dos componentes.

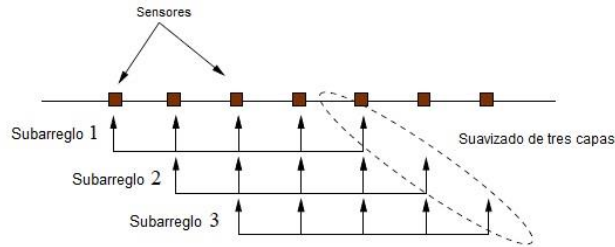
Figura 5. Matriz espectral de dos componentes. Fuente [9]



2.2.3. Estimación de la matriz espectral. Según se explicó en el Capítulo 1 del libro, una vez calculada la matriz de covarianza de los datos se procede a realizar un análisis de valores y vectores propios. Sin embargo, debido a que la matriz $\mathbf{T}\mathbf{T}^H$ es no invertible y de rango 1, es necesario realizar una etapa de suavizado para estimar la matriz $\mathbf{\Gamma}$, la cual reemplaza la operación matemática \mathbf{E} de la ecuación (2.9) por los operadores de suavizado espacial y frecuencial [29].

El suavizado espacial consiste en tomar un arreglo de N_x sensores y dividirlo en subarreglos que se superponen parcialmente. La idea principal es crear varios subarreglos de igual tamaño que sirvan para estimar la matriz espectral y promediarlos. Se denota el orden del suavizado espacial K_s , el tamaño de los subarreglos es de $N_x - 2K_s$ sensores, y el número de subarreglos es $2K_s + 1$. En la Figura 6 se presenta un ejemplo de un arreglo de 7 sensores divididos en 3 subarreglos ($K_s = 1$). Debido al tamaño de cada subarreglo hay una limitante para la constante de suavizado espacial $K_s \leq \frac{N_x - 1}{2}$.

Figura 6. Ejemplo de suavizado espacial ($K_s = 1$). Fuente [9]



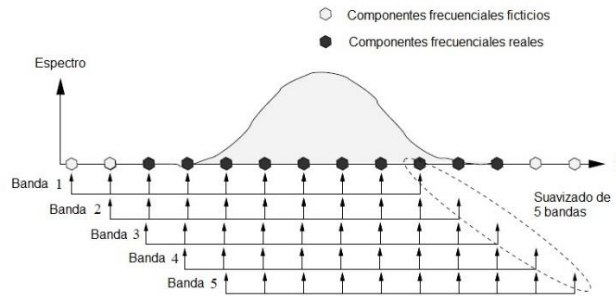
La matriz espectral generada por el suavizado espacial está dada por:

$$\mathbf{\Gamma}^s = \frac{1}{2K_s + 1} \sum_{k_s=1}^{2K_s+1} \mathbf{T}_{k_s} \mathbf{T}_{k_s}^H \quad (2.11)$$

donde \mathbf{T}_{k_s} es un vector de longitud $(N_x - 2K_s)N_f N_c$ creado a partir de los datos del subarreglo k_s .

El suavizado frecuencial es similar al suavizado espacial, la diferencia es que en este caso se utilizan bandas frecuenciales. Sea K_f el orden del suavizado frecuencial, se obtienen $2K_f + 1$ bandas frecuenciales de tamaño N_f . De esta forma a partir de un vector \mathbf{T} , el suavizado permite obtener $2K_f + 1$ vectores desfasados frecuencialmente. A diferencia del suavizado espacial no existe limitante para el orden del suavizado, esto es debido a que se crean canales ficticios en las primeras y últimas bandas frecuenciales. Sin embargo, para no modificar la naturaleza de la señal original, los canales ficticios son llenados con ceros. La Figura 7 presenta un ejemplo de una descomposición en bandas frecuenciales donde $N_f = 10$ y $K_f = 2$.

Figura 7. Ejemplo del suavizado frecuencial ($K_f = 2$). Fuente [9].



La matriz espectral generada está dada por:

$$\Gamma^f = \frac{1}{2K_f + 1} \sum_{k_f=1}^{2K_f+1} \mathbf{T}_{k_f} \mathbf{T}_{k_f}^H, \quad (2.12)$$

donde \mathbf{T}_{k_f} es un vector de longitud $N_x N_f N_c$ generado a partir de cada banda frecuencial k_f .

Finalmente, aplicando los dos tipos de suavizado, es posible generar una matriz espectral a partir de la siguiente expresión:

$$\mathbf{\Gamma} = \frac{1}{(2K_s + 1)(2K_f + 1)} \sum_{k_s=1}^{2K_s+1} \sum_{k_f=1}^{2K_f+1} \mathbf{T}_{k_s, k_f} \mathbf{T}_{k_s, k_f}^H, \quad (2.13)$$

donde \mathbf{T}_{k_s, k_f} hace referencia a un vector generado en una de las $K = (2K_s + 1)(2K_f + 1)$ iteraciones del suavizado. La matriz espectral estimada por este método tiene un rango igual a K , por ende, se recomienda escoger un valor de K superior al número de ondas P presentes en el registro de datos.

2.2.4. Separación de las señales. Una vez calculada la matriz espectral a partir del suavizado, el siguiente paso es realizar el análisis de valores y vectores propios a esta matriz. Aplicando la ecuación (1.7) a la matriz espectral se tiene que

$$\mathbf{\Gamma} = \sum_{i=1}^K \lambda_i \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^H. \quad (2.14)$$

En la ecuación (2.13) se observa que la matriz $\mathbf{\Gamma}$ se puede descomponer en K matrices ortogonales que contienen los diferentes niveles de energía de la polarización de la matriz; o visto de otra forma se separa en las K diferentes señales que dictan el comportamiento de las partículas. Para separar una determinada señal de los datos originales, se busca la energía que se encuentra en la dirección del vector propio de la señal a separar. De esta forma, para obtener

la información correspondiente a las P señales presentes en un registro sísmico, se define el vector \mathbf{T}_s como:

$$\mathbf{T}_s = \sum_{i=1}^P \langle \mathbf{T}, \mathbf{u}_i \rangle \mathbf{u}_i, \quad (2.15)$$

donde $\langle \cdot, \cdot \rangle$ es el producto escalar de dos vectores.

2.2.5. Estimación de los parámetros de polarización. Para explicar el análisis de polarización utilizado por los autores, se usará como referencia un caso particular de dos componentes X y Z . Se utiliza la matriz espectral $\mathbf{\Gamma}_s$ resultante del vector filtrado \mathbf{T}_s , y teniendo en cuenta que el modelo matemático de una señal p en la componente X registrada en el sensor i a la frecuencia f se describe como:

$$O_{x,p,i}(f) = a_p w_p(f) e^{j2\pi f \tau_i(f)}, \quad (2.16)$$

y en el componente Z se describe como

$$O_{z,p,i}(f) = \alpha_p e^{j\varphi_p} a_p w_p(f) e^{j2\pi f \tau_i(f)}, \quad (2.17)$$

donde α_p y φ_p son la relación de amplitud y la diferencia de fase de las componentes X y Z . Los elementos de la diagonal de la matriz $\mathbf{\Gamma}_s$ que dependen la frecuencia f y del sensor i en el bloque de interacción del componente X con el mismo, se expresa como:

$$\begin{aligned} \Gamma_{s,P(X,X)}(i, f) &= a_p w_p(f) e^{j2\pi f \tau_i(f)} a_p^* w_p^*(f) e^{-j2\pi f \tau_i(f)} \\ &= |a_p|^2 |w_p(f)|^2. \end{aligned} \quad (2.18)$$

De igual manera, el término correspondiente a la interacción del componente Z con el mismo es:

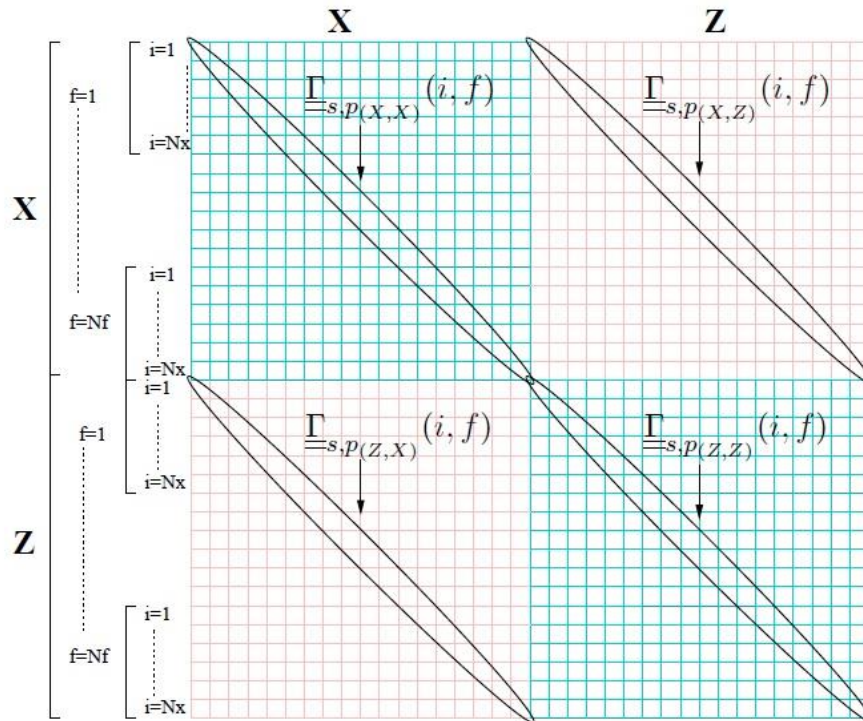
$$\begin{aligned}\Gamma_{s,P(Z,Z)}(i, f) &= \alpha_p e^{j\varphi_p} a_p w_p(f) e^{j2\pi f \tau_i(f)} \alpha_p e^{-j\varphi_p} a_p^* w_p(f)^* e^{-j2\pi f \tau_i(f)} \\ &= \alpha_p^2 |a_p|^2 |w_p(f)|^2.\end{aligned}\quad (2.19)$$

Y el término que corresponde a la interacción entre el componente X y Z es:

$$\begin{aligned}\Gamma_{s,P(X,Z)}(i, f) &= a_p w_p(f) e^{j2\pi f \tau_i(f)} \alpha_p e^{-j\varphi_p} a_p^* w_p(f)^* e^{-j2\pi f \tau_i(f)} \\ &= \alpha_p |a_p|^2 |w_p(f)|^2 e^{-j\varphi_p}.\end{aligned}\quad (2.20)$$

Todos los términos encontrados en las diagonales principales y secundarias de la matriz Γ_s se pueden observar en la Figura 8.

Figura 8. Esquema de la matriz espectral multicomponente. Fuente [9]



En base a lo anterior, es posible calcular la relación de amplitud y la diferencia de fase de una señal p en los componentes X y Z con las siguientes ecuaciones:

$$\alpha_p(i, f) = \sqrt{\frac{\Gamma_{s,p(Z,Z)}(i, f)}{\Gamma_{s,p(X,X)}(i, f)}} \quad (2.21)$$

$$\varphi_p(i, f) = \arg[\Gamma_{s,p(X,Z)}(i, f)]. \quad (2.22)$$

Para tener una mejor estimación de estos dos parámetros, el autor recomienda calcularlos usando los componentes frecuenciales que contengan la mayor energía, utilizando un ancho de banda $L_{3dB} = [f_{inf}, f_{sup}]$ a $-3dB$ de la potencia máxima. De esta forma las ecuaciones (2.21) y (2.22) quedan de la siguiente manera:

$$\alpha_p(i, f) = \sqrt{\frac{1}{card(L_{3dB}) * N_x} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{f=f_{inf}}^{f_{sup}} \frac{\Gamma_{s,p(Z,Z)}(i, f)}{\Gamma_{s,p(X,X)}(i, f)}} \quad (2.23)$$

$$\varphi_p(i, f) = \arg \left[\frac{1}{card(L_{3dB}) * N_x} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{f=f_{inf}}^{f_{sup}} \Gamma_{s,p(X,Z)}(i, f) \right], \quad (2.24)$$

donde $card$ corresponde al cardinal de un conjunto finito.

Finalmente utilizando las ecuaciones (1.2) y (1.3) se calculan los parámetros que caracterizan la elipse de polarización. En el caso de que los datos a analizar sean de tres componentes, para analizar la polarización con este método hay que analizar cada pareja de componentes por separado.

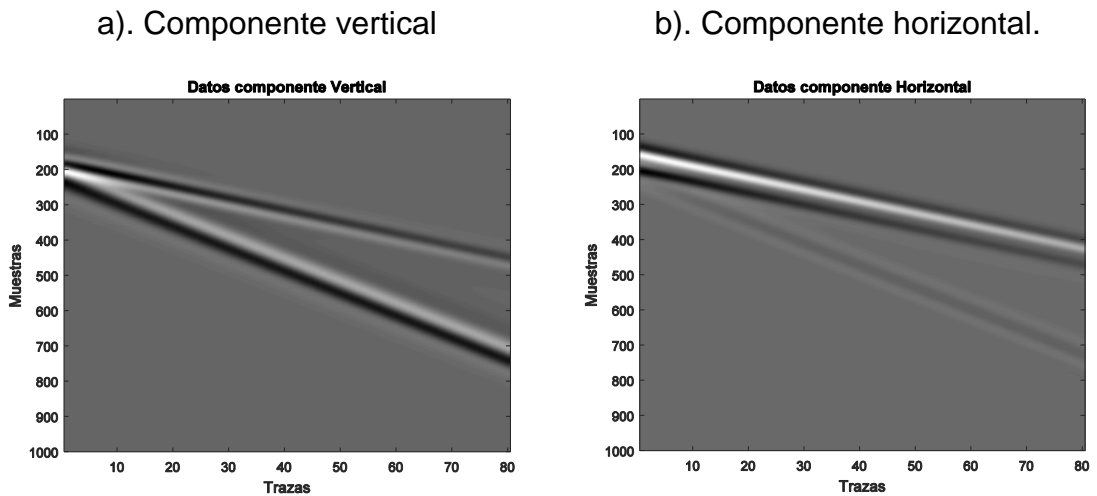
3. RESULTADOS

Los métodos seleccionados fueron utilizados para analizar los parámetros de polarización presentes en un conjunto de datos sísmicos multicomponente sintéticos y reales.

3.1. DATOS SINTÉTICOS

Los sismogramas sintéticos fueron adquiridos mediante la simulación de la propagación de la onda elástica en 2D usando el método de diferencias finitas [30]. Estos sismogramas son de dos componentes, sin embargo, los métodos de análisis seleccionados pueden operarlos sin problema alguno. En la Figura 9 se presentan los datos sintéticos utilizados, en los cuales cada componente tiene dos ondas sísmicas, la onda superior es una onda directa y la onda inferior es una onda superficial.

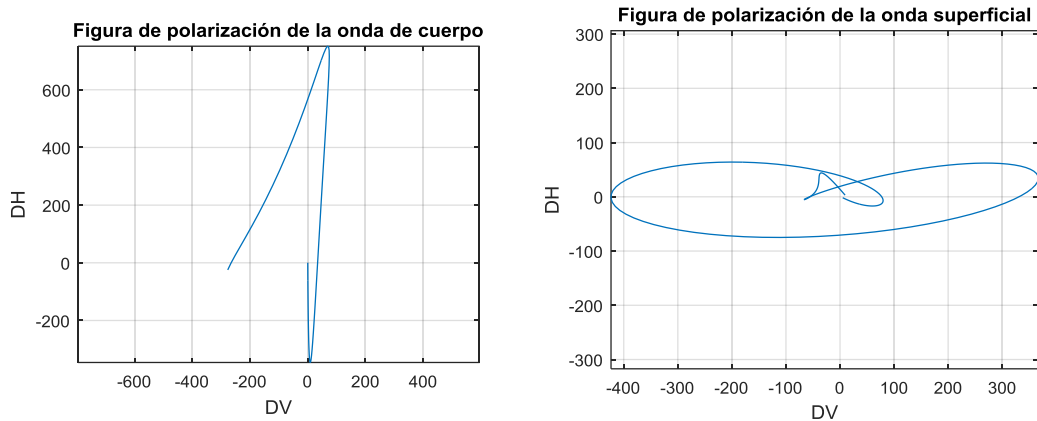
Figura 9. Datos sintéticos multicomponente generados.



Como la finalidad es estimar los parámetros de polarización de estas señales, en la Figura 10 se muestra la figura de polarización de todas las estaciones en ambos componentes. En esta figura se observan dos estados polarización pertenecientes

a las dos ondas de los componentes; el primero, es una polarización fuertemente lineal con un ángulo cercano a los 80° ; y el segundo, es una polarización elíptica con una inclinación cercana a los 10° .

Figura 10. Figura de polarización de las dos ondas en los datos sintéticos. Componente horizontal (DH) en función del componente vertical (DV).



3.1.1. Descomposición en valores singulares en múltiples estaciones.

Al analizar los parámetros de polarización de los datos sintéticos por medio de la descomposición de valores singulares, se obtuvieron los resultados que se presentan en la Figura 11. Posteriormente, en la Figura 12 se presentan las señales de una de las trazas del registro de datos, junto con los parámetros calculados en esa traza. En la Figura 11 se muestra el grado linealidad de la elipse de polarización junto con el ángulo de inclinación de la elipse de polarización. Se observa en ambas graficas la correlación de los parámetros con las ondas de los registros sísmicos, y sus valores coinciden con lo esperado desde la Figura 10.

Se puede observar que las marcas correspondientes a la primera onda no superan una intensidad mayor a 0.2. Por otro lado, las marcas correspondientes a la segunda onda comienzan con linealidades cercanas a 0.1 y conforme se desplaza la onda, el movimiento elíptico de las partículas aumenta. Por otro lado, en la gráfica de azimuth también, se observa la correlación con el registro de datos, al

igual que la relación con la figura de polarización, ya que las marcas de la primera onda tienen inclinaciones cercanas a los 80° , y las segundas marcas tienen inclinaciones entre los 0° y 20° .

Figura 11. Resultados obtenidos con el método de SVD usando datos sintéticos.

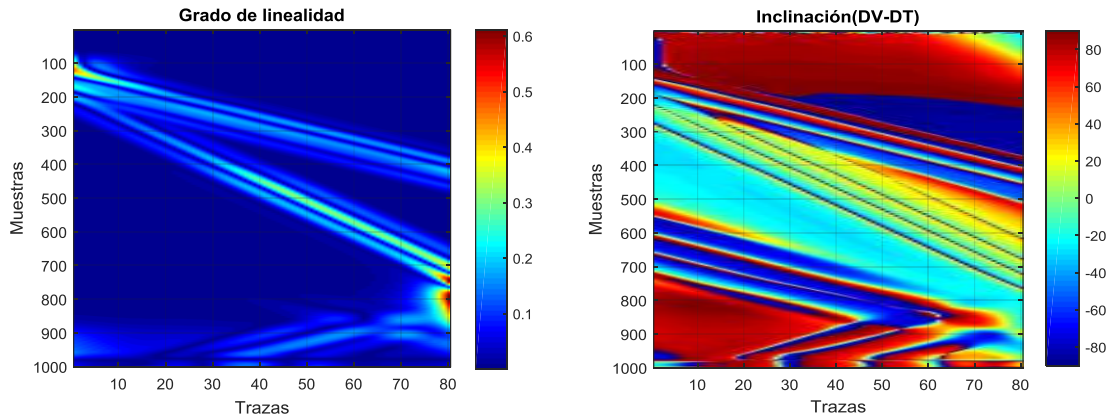
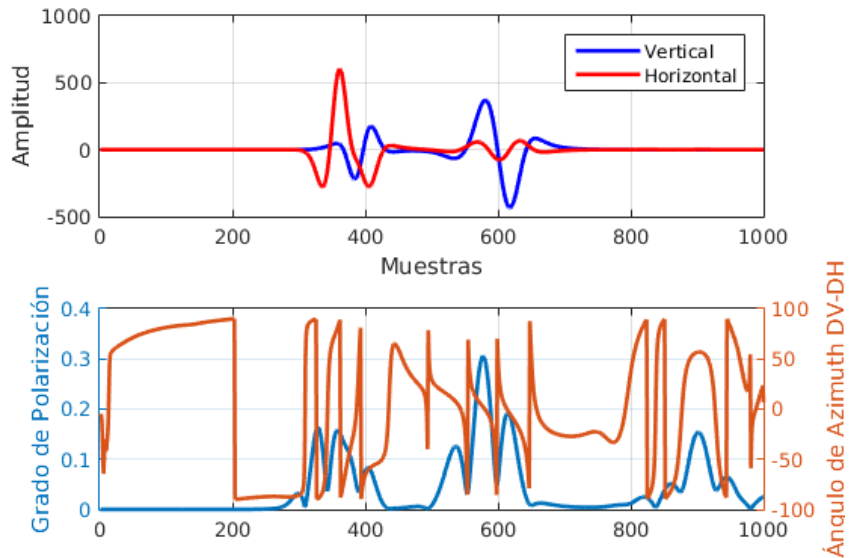


Figura 12. Ondas y parámetros de polarización de la traza 40 en los datos sintéticos.



3.1.2. Matriz espectral multicomponente. Al observar las ecuaciones (2.7) y (2.9), se puede deducir, que dependiendo de la cantidad de muestras y el número de sensores utilizados este método puede tener un costo computacional elevado. En el caso de los datos sintéticos, el vector T es de longitud $N_x N_f N_c = 160000$, por ende, la matriz Γ es de dimensiones 160000×160000 , lo cual computacionalmente exige mucha potencia. Debido a lo anterior, el método fue implementado usando una ventana deslizante de tiempo y de sensores, la cual cada iteración se obtiene la relación de amplitudes (2.23), y la diferencia de fase (2.24); sin embargo, la matriz espectral de los datos no pudo ser graficada. La ventana de tiempo utilizada fue de **40** muestras, ya que con esta cantidad se alcanza a tomar una oscilación de la onda, y la ventana de sensores se usó de 8, para que se mantenga la coherencia entre trazas adyacentes. Para el suavizado, teniendo en cuenta los tamaños de las ventanas se usaron unos coeficientes de suavizado $K_s = 2$ y $K_f = 10$.

En la Figura 13 se encuentra el grado de elipticidad e (1.3) y la inclinación de la elipse ψ (1.2) obtenidos, y en la Figura 14 se presentan las señales y resultados de la traza 40.

Figura 13. Resultados obtenidos con el método de la matriz espectral usando datos sintéticos.

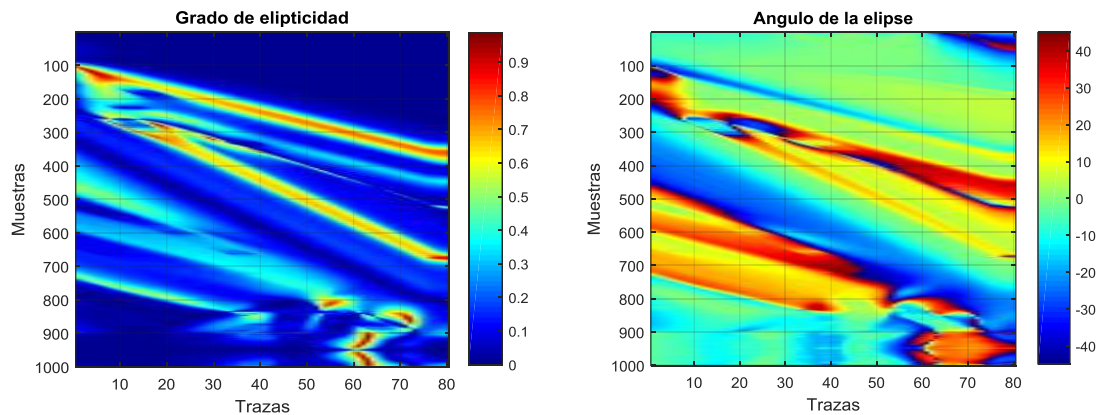
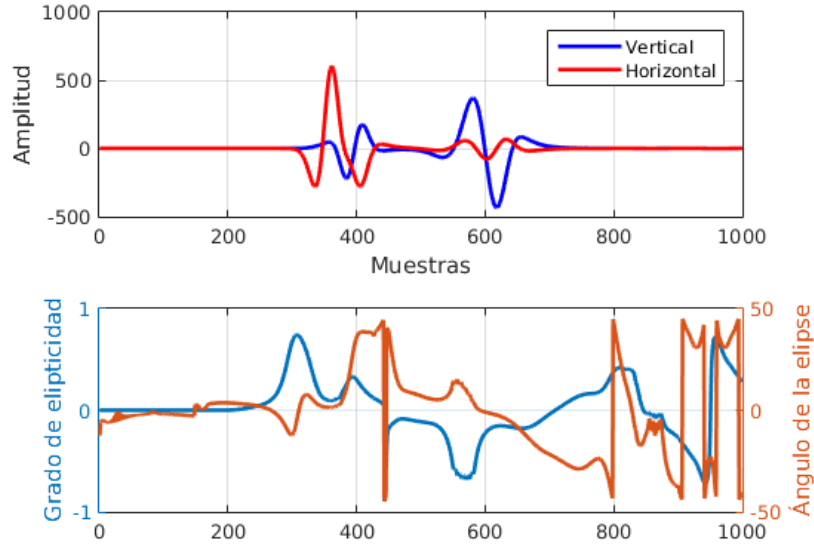


Figura 14. Ondas y parámetros de polarización de la traza 40 en los datos sintéticos.



En las dos gráficas se observa que los parámetros de polarización están correlacionados con los datos originales. En el caso del grado de elipticidad, éste concuerda con los valores esperados después de analizar la figura de polarización, por otro lado, el ángulo de la elipse presenta fallas a la hora del cálculo. Despejando ψ de la ecuación (1.2) se tiene que:

$$\psi = \frac{\arctan\left(\frac{2\alpha}{1-\alpha^2}\cos(\varphi)\right)}{2}. \quad (3.1)$$

Teniendo en cuenta que el dominio de la función \arctan esta limitado entre $-\pi/2$ y $\pi/2$, se puede deducir que la ecuación (3.1) está limitada entre $-\pi/4$ y $\pi/4$, lo cual limita los valores ψ y trae consigo errores para los calculos en este registro de datos.

3.2. DATOS MULTICOMPONENTE REALES

Para las pruebas con datos reales se utilizaron dos conjuntos de datos sísmicos de tres componentes. En la Figura 15 y Figura 16 se presentan los dos conjuntos de datos de tres componentes de utilizados.

Figura 15. Primer conjunto de datos sísmicos multicomponente reales.

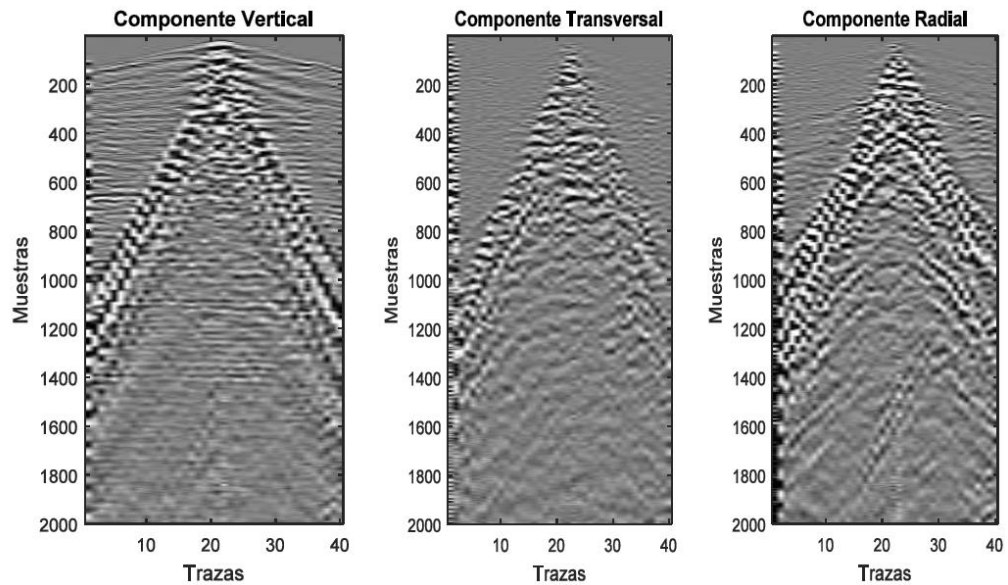
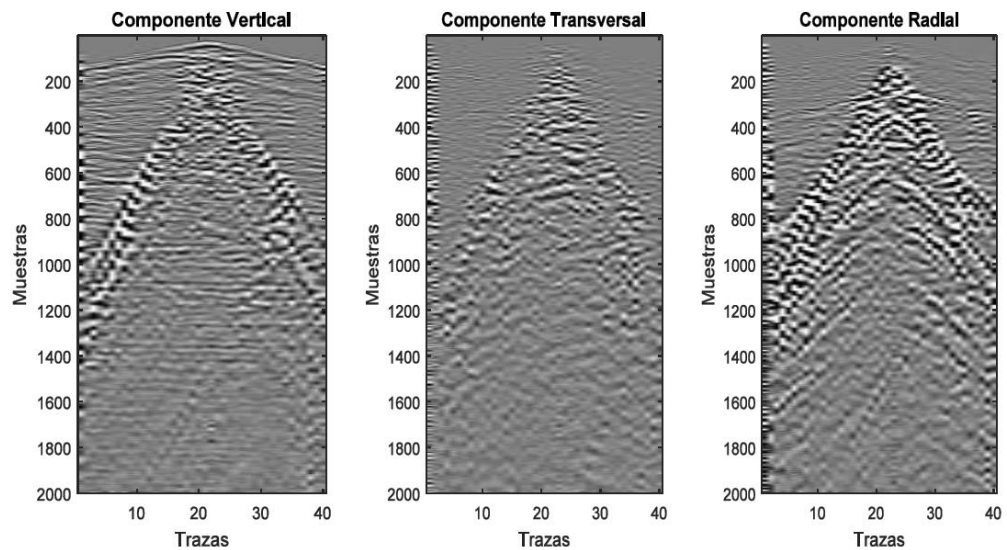


Figura 16. Segundo conjunto de datos sísmicos multicomponente reales.



En ambos conjuntos de datos se pueden observar ondas superficiales, ondas de cuerpo, y también una gran cantidad de ondas parasitas debido a la no homogeneidad del medio.

3.2.1. Descomposición en valores singulares en múltiples estaciones.

Del análisis del registro de tres componentes se calcularon los siguientes parámetros de polarización: grado de linealidad, *lin* (2.4); el ángulo de inclinación de la elipse en el plano de los componentes vertical-radial, ϕ (2.3); y el ángulo de inclinación de la elipse en el plano de los componentes vertical-transversal, θ (2.2). Estos parámetros se presentan en la Figura 17 para el primer conjunto de datos y en la Figura 18 para el segundo conjunto de datos. Posteriormente en la Figura 19 y Figura 20 se presentan los resultados obtenidos en la traza **8** de los dos registros de datos sísmicos.

Según los resultados mostrados en la Figura 17 y Figura 18, aunque haya ruido presente en los datos, aún es posible identificar las diferentes polarizaciones de las ondas sísmicas. Por otro lado, los parámetros de inclinación no presentan resultados claros; aunque es posible identificar cierta correlación con los datos de linealidad en las gráficas de inclinación (DV-DR) de la Figura 17 y Figura 18, sin embargo, el impacto de las ondas parasitas hace que los resultados no sean claros de ver. Finalmente, en las gráficas azimut (DV-DT) de la Figura 17 y Figura 18 los resultados obtenidos no son claros y no es posible encontrar correlación alguna con los demás resultados.

Figura 17. Resultados de las pruebas realizadas con el primer conjunto de datos.

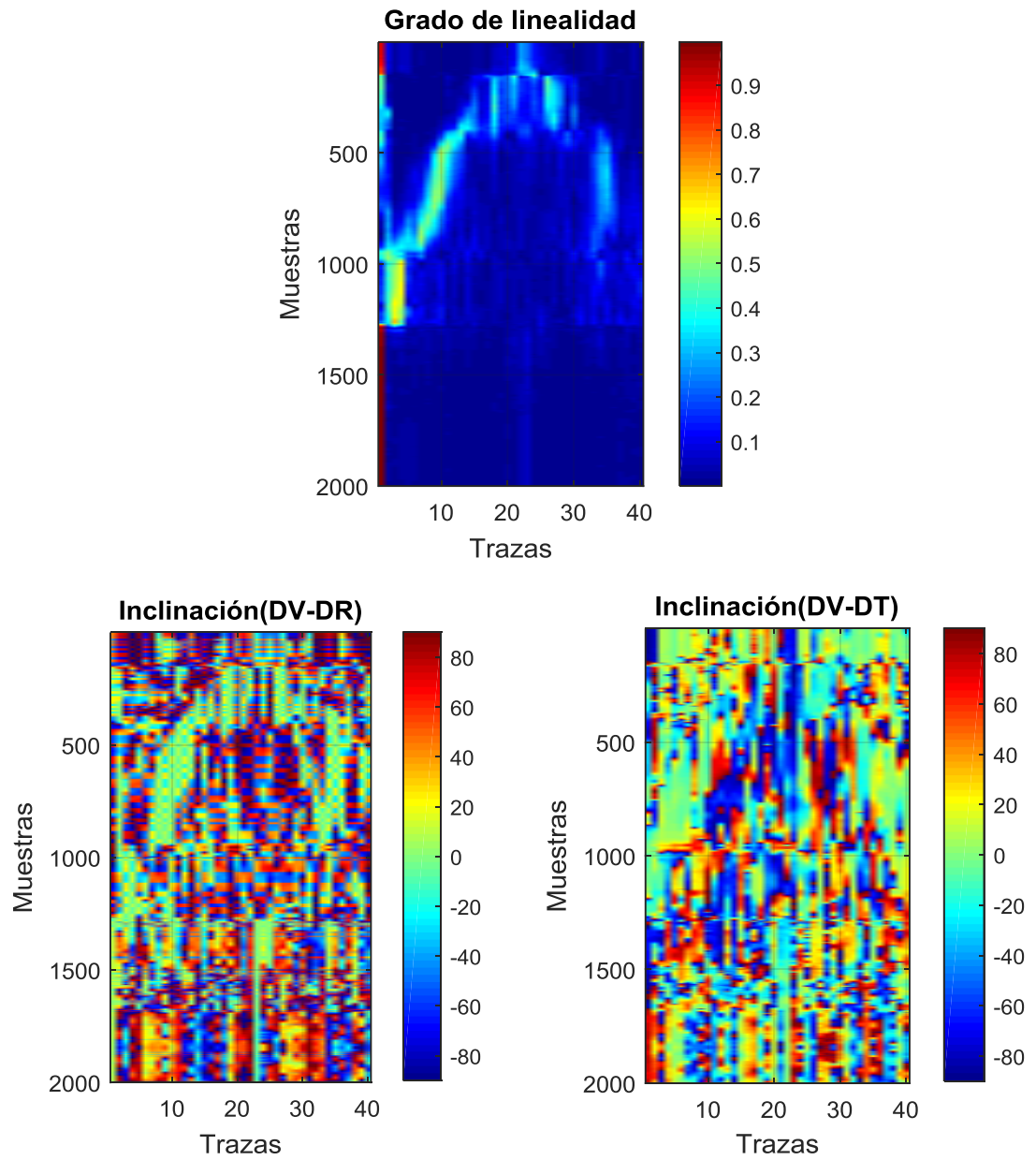


Figura 18. Resultados de las pruebas realizadas con el segundo conjunto de datos.

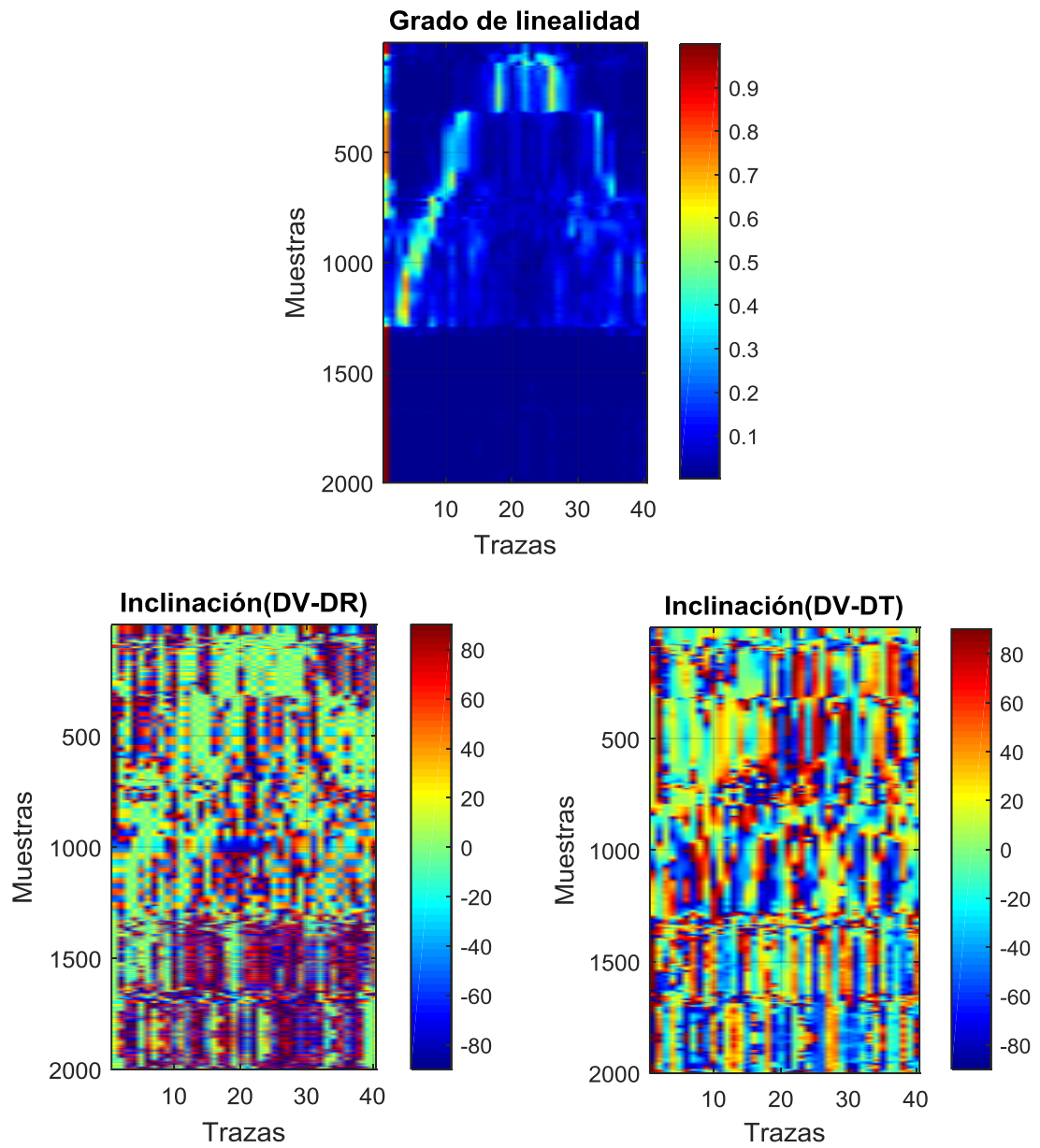


Figura 19. Ondas y parámetros de polarización de la traza 8 en el primer conjunto de datos reales.

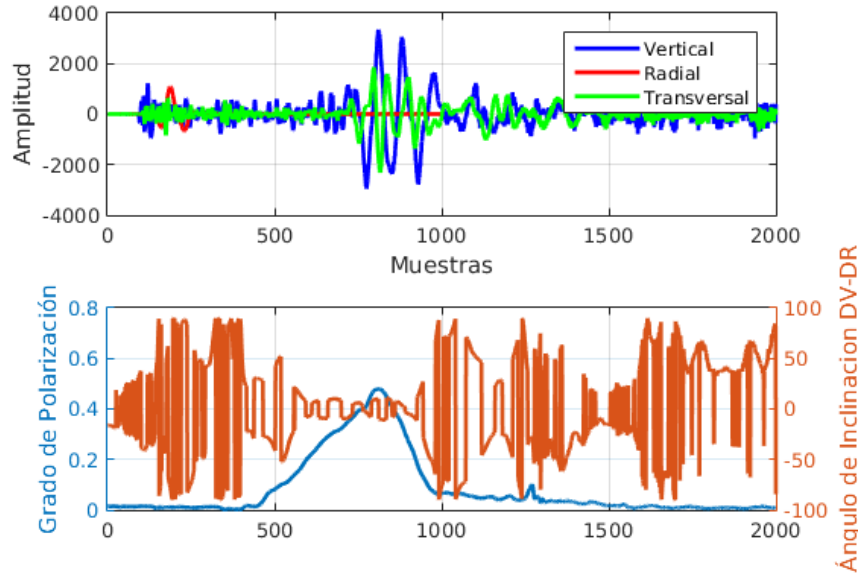
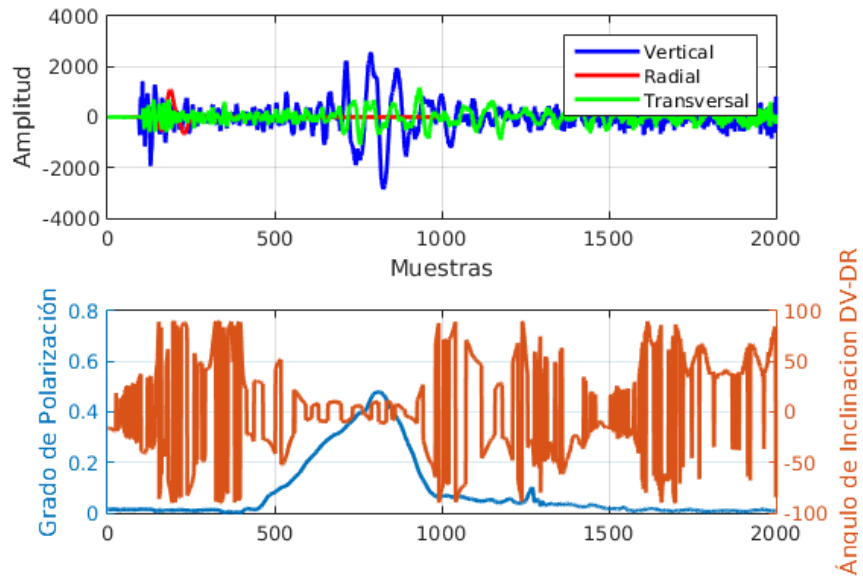


Figura 20. Ondas y parámetros de polarización de la traza 8 en el segundo conjunto de datos reales.



3.2.2. Matriz espectral multicomponente. A diferencia del método de la SVD en múltiples estaciones, los parámetros de polarización no son calculados a partir de los tres componentes, debido a que los parámetros a calcular son la relación de amplitud y la diferencia de fase entre dos componentes, en datos sísmicos de tres componentes es necesario calcular los parámetros para cada pareja de componentes: vertical-transversal, vertical-radial, y transversal-radial. En estas pruebas se calcularon los parámetros de polarización a partir de la matriz generada por el primer vector propio (2.15). Los parámetros de polarización de cada pareja de componentes del primer conjunto de datos sísmicos se presentan desde la Figura 21 hasta Figura 23, mientras que los del segundo conjunto de datos se presentan desde la Figura 24 hasta la Figura 26. Posteriormente en la Figura 27 y Figura 28 se presentan los resultados obtenidos en el plano DV-DR en la traza 8 de los registros de datos sísmicos.

Figura 21. Parámetros de polarización del primer conjunto de datos en el plano DV-DT.

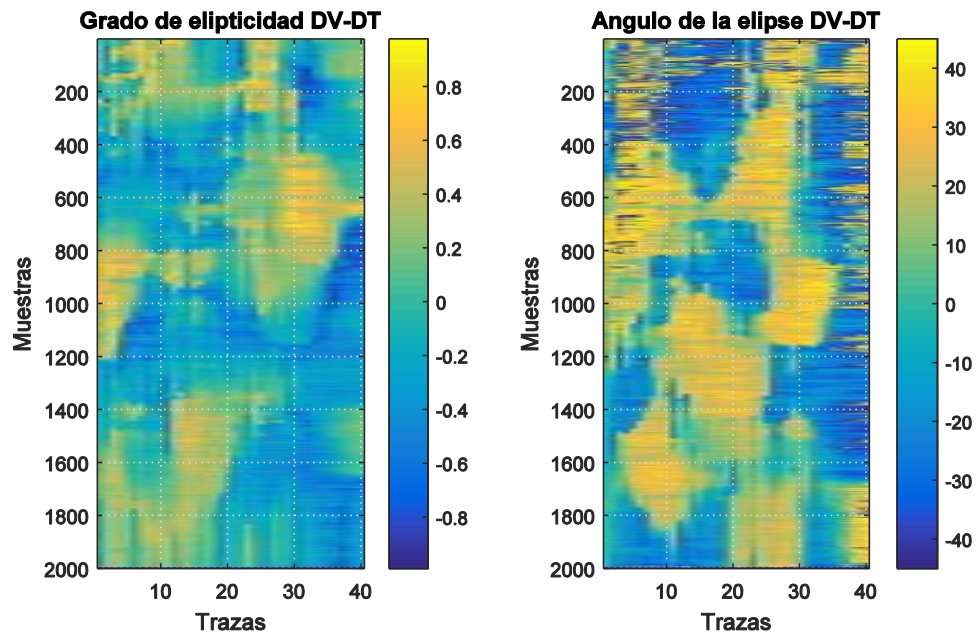


Figura 22. Parámetros de polarización del primer conjunto de datos en el plano DV-DR.

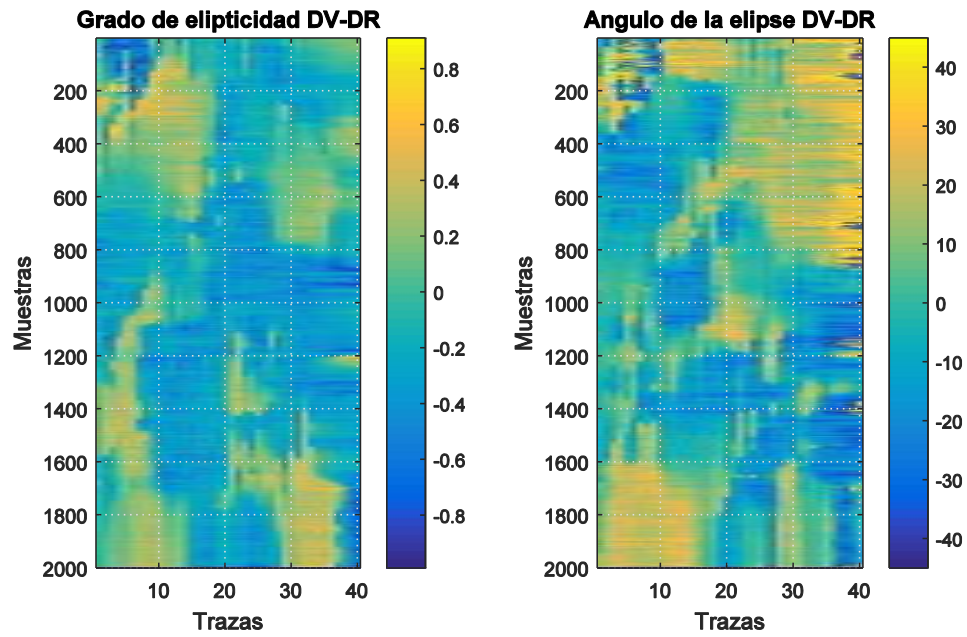


Figura 23. Parámetros de polarización del primer conjunto de datos en el plano DT-DR.

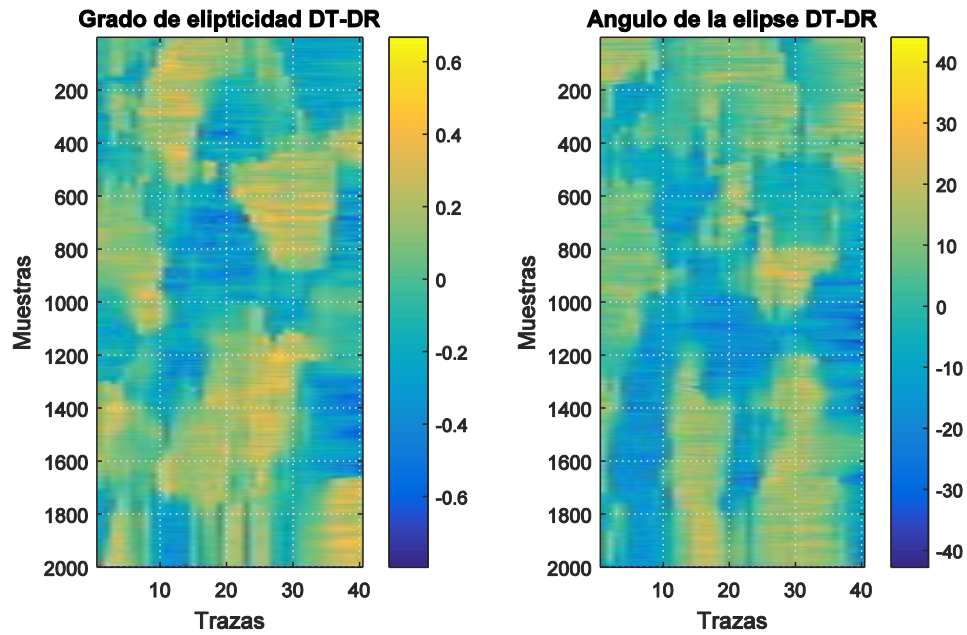


Figura 24. Parámetros de polarización del segundo conjunto de datos en el plano DV-DT.

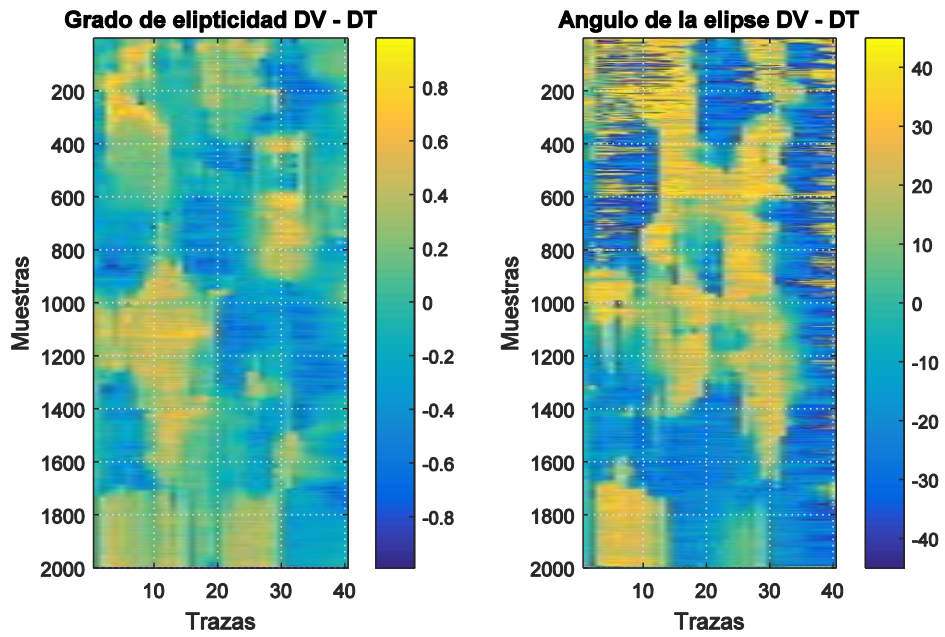


Figura 25. Parámetros de polarización del segundo conjunto de datos en el plano DV-DR.

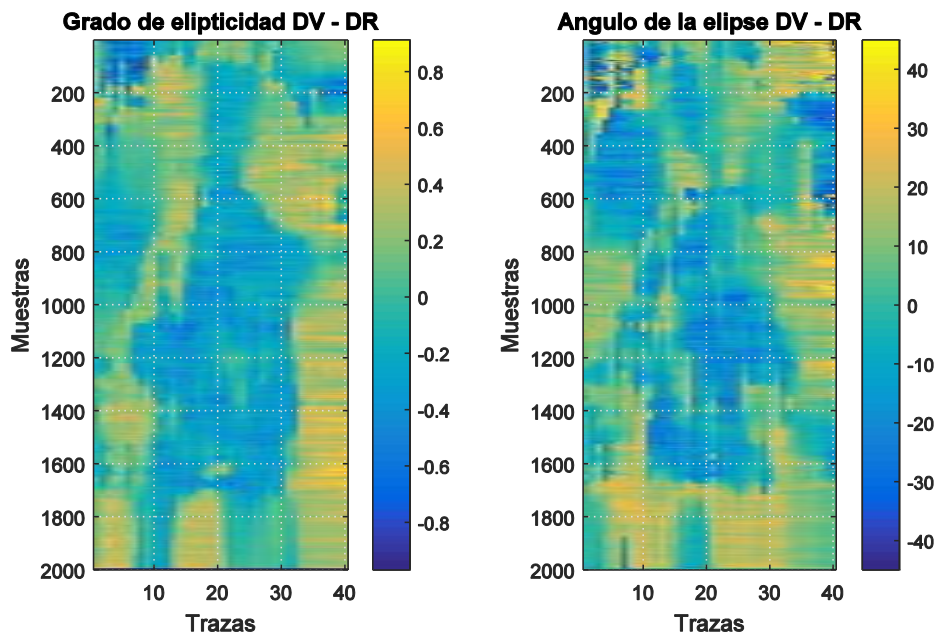


Figura 26. Parámetros de polarización del segundo conjunto de datos en el plano DT-DR.

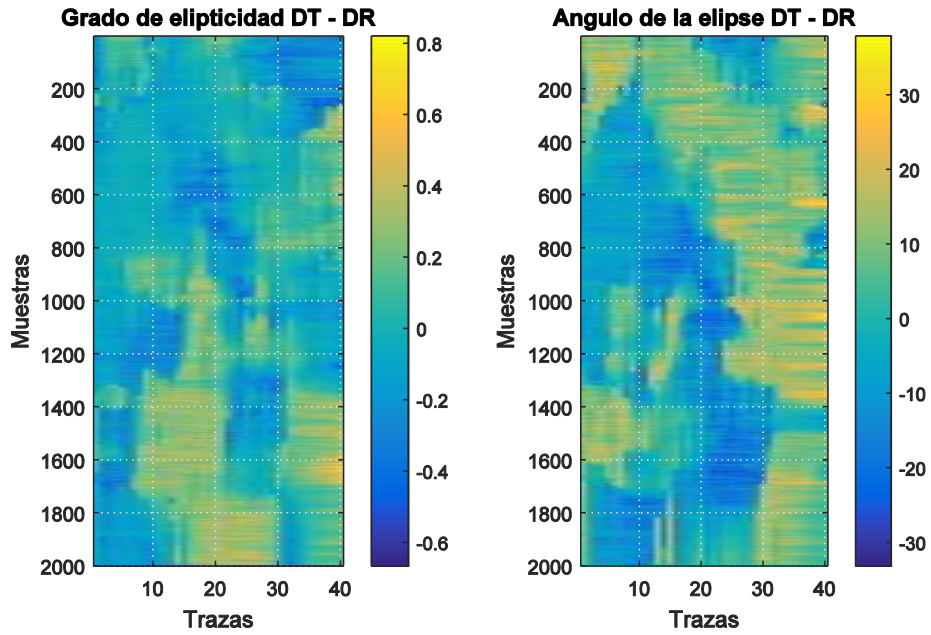


Figura 27. Ondas y parámetros de polarización de la traza 8 en el primer conjunto de datos reales.

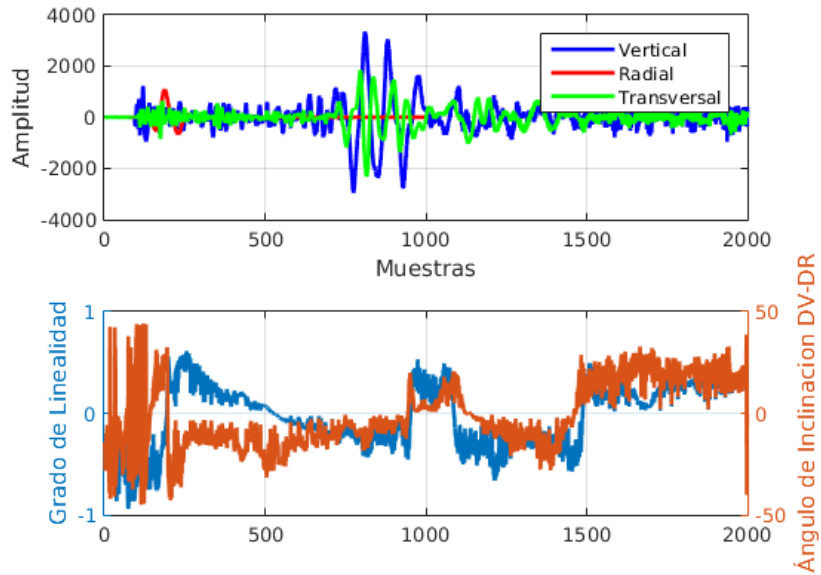
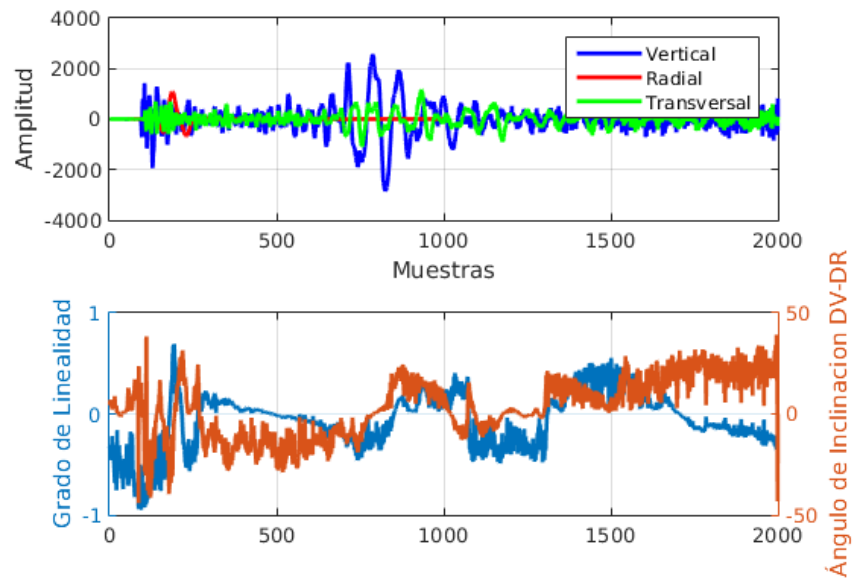


Figura 28. Ondas y parámetros de polarización de la traza 8 en el segundo conjunto de datos reales.



4. CONCLUSIONES

- Se implementaron dos métodos de análisis de polarización, y en base a los resultados obtenidos se puede concluir que el método de la SVD en múltiples estaciones identifico mejor la presencia de ondas superficiales, lo cual puede ser de utilidad en una aplicación de filtrado por medio de su grado de polarización.
- Una posible forma de mejorar los parámetros de inclinación en el método de la descomposición en valores singulares en múltiples estaciones es realizar un filtrado utilizando el parámetro del grado de elipticidad, para eliminar señales parasitas.
- El método de la SVD en múltiples estaciones presenta fortalezas a la hora de identificar el tipo de polarización de la onda, lo cual es útil si se desea hacer un filtrado de ondas sísmicas para eliminar ondas si su nivel de elipticidad no es el deseado.
- Aunque con los datos sintéticos se obtuvieron respuestas visualmente aceptables, los resultados con los datos reales fueron insatisfactorios debido a la influencia de las ondas parasitas en los datos y a la limitación para el cálculo del ángulo de la elipse de polarización.
- Aunque los resultados obtenidos con el método de la matriz espectral multicomponente a primera vista no son satisfactorios, esto solo significa que la forma de obtener los parámetros de polarización tal cual se presentan en la literatura, Paulus [9], no es adecuada para el análisis de datos multicomponente. Otra posible forma de obtener los parámetros de polarización, podría ser calcularlos a partir de los valores y vectores propios de la matriz espectral de igual forma que se hace en el método clásico [3], y no calcularlos a partir de los valores que se encuentran en la matriz.

CITAS

- [1] M. Brooks, P. Kearey, and I. Hill, *An Introduction to Geophysical Exploration*, 3rd ed. Blackwell Science, 2002.
- [2] W. Lowrie, *Fundamentals of Geophysical*. Cambridge University Press, 2007.
- [3] E. a. Flinn, "Signal analysis using rectilinearity and direction of particle motion," *Proc. IEEE*, vol. 53, no. 12, pp. 1874–1876, 1965.
- [4] V. C. Klema and A. J. Laub, "The singular value decomposition: Its computation and some applications," *Autom. Control. IEEE Trans.*, vol. 25, no. 2, pp. 164–176, 1980.
- [5] R. M. Rene, P. M. Forsyth, K. Y. Kim, D. J. Murray, J. K. Waltersu, and J. D. Westerman, "Multicomponent selsmlc studies using complex trace analysis," vol. 51, no. 6, pp. 1235–1251, 1986.
- [6] M. Kulesh, M. S. Diallo, M. Holschneider, K. Kurennaya, F. Krüger, M. Ohrnberger, and F. Scherbaum, "Polarization analysis in the wavelet domain based on the adaptive covariance method," *Geophys. J. Int.*, vol. 170, no. 2, pp. 667–678, 2007.
- [7] W. Lowrie, *Fundamentals of Geophysics*, Second., no. 1. New York: Cambridge University Press, 2007.
- [8] M.~Born and E.~Wolf, "Principles of Optics," 1999.
- [9] C. Paulus, "Filtrage de données sismiques multicomposantes et estimation de la polarisation," Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2006.
- [10] M. R. Gadallah and R. L. Fisher, *Applied Seismology*. PennWell Corporation, 2005.
- [11] K. D. Koper and V. L. Hawley, "Frequency dependent polarization analysis of ambient seismic noise recorded at a broadband seismometer in the central United States," *Earthq. Sci.*, vol. 23, no. 5, pp. 439–447, 2010.
- [12] O. Tiapkina, M. Lando, Y. Tyapkin, and B. Link, "Single-station SVD-based polarization filtering of ground roll," *Geophysics*, vol. 77, no. 2, pp. v41–v59, 2012.
- [13] J. E. Vidale, "Complex polarization analysis of particle motion," *Bssa*, vol. 76, no. 5, pp. 1393–1405, 1986.
- [14] Y.-Y. Tan, C. He, Y.-D. Wang, and Z. Zhao, "Ground roll attenuation using a time-frequency dependent polarization filter based on the S transform," *Appl. Geophys.*, vol. 10, no. 3, pp. 279–294, 2013.
- [15] D. W. Tufts and R. Kumaresan, "Singular Value Decomposition and Improved Frequency Estimation Using Linear Prediction," *IEEE Trans. Acoust.*, vol. 30, no. 4, pp. 671–675, 1982.
- [16] A. Jurkevics, "Polarization analysis of three-component array data," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 78, no. 5, pp. 1725–1743, 1988.
- [17] O. Tiapkina, M. Landro, Y. Tyapkin, and B. Link, "Single-station SVD-based polarization filtering of ground roll: Perfection and investigation of limitations and pitfalls," *Geophysics*, vol. 77, no. 2, p. V41, 2012.
- [18] K. De Meersman, M. Van Der Baan, and J.-M. Kendall, "Signal extraction and

- automated polarization analysis of multicomponent array data,” *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 96, no. 6, pp. 2415–2430, 2006.
- [19] A. Roueff, J. Chanussot, and J. I. Mars, “Estimation of polarization parameters using time--frequency representations and its application to waves separation,” *Signal Processing*, vol. 86, no. 12, pp. 3714–3731, 2006.
- [20] X. Lil and S. Crampin, “Complex component analysis of shear-wave splitting : theory,” *Geophys. J. Int.*, pp. 597–604, 1991.
- [21] I. B. Morozov and S. B. Smithson, “Instantaneous polarization attributes and directional filtering,” *Geophysics*, vol. 61, no. 3, pp. 872–881, 1996.
- [22] M. S. Diallo, M. Kulesh, M. Holschneider, and F. Scherbaum, “Instantaneous polarization attributes in the time--frequency domain and wavefield separation,” *Geophys. Prospect.*, vol. 53, no. 5, pp. 723–731, 2005.
- [23] M. S. Diallo, M. Kulesh, M. Holschneider, K. Kurennaya, and F. Scherbaum, “Instantaneous polarization attributes based on an adaptive approximate covariance method,” *Geophysics*, vol. 71, no. 5, pp. V99–V104, 2006.
- [24] G. G. Drijkoningen and T.-D. F. of Applied Earth Sciences, *Seismic Data Acquisition*. Delft University of Technology, 1996.
- [25] K. De Meersman, M. van der Baan, and J.-M. Kendall, “Signal Extraction and Automated Polarization Analysis of Multicomponent Array Data,” *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 96, no. 6, pp. 2415–2430, 2006.
- [26] G. L. Pavlis, “Multi-wavelet Analysis of Three-Component Seismic Arrays: Application to Measure Effective Anisotropy at Pifion Flats, California,” no. June, pp. 693–705, 1999.
- [27] E. A. Robinson, “Predictive decomposition of time series with application to seismic exploration,” *Geophysics*, vol. 32, no. 3, pp. 418–484, 1967.
- [28] A. Al-Hasanat, A. Mesleh, M. Krishan, A. Sharadqh, A. Al-Qaisi, W. L. Woo, and S. S. Dlay, “Blind separation of multicomponent seismic wavefield using SVD of reduced dimension spectral matrix,” *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, 2016.
- [29] B. D. Rao and K. V. S. Hari, “Weighted subspace methods and spatial smoothing: analysis and comparison,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 41, no. 2, pp. 788–803, 1993.
- [30] J. Virieux, “P-SV wave propagation in heterogeneous media: Velocity-stress finite-difference method,” *Geophysics*, vol. 51, no. 4, pp. 889–901, 1986.

BIBLIOGRAFÍA

DE MEERSMAN, Kristof; VAN DER BAAN, M. and KENDALL, M. "Signal Extraction and Automated Polarization Analysis of Multicomponent Array Data," *Bull. Seismol. Soc. Am.* [en línea] 2006, vol. 96, no. 6, pp. 2415–2430.

FLINN, E. a. Signal analysis using rectilinearity and direction of particle motion. *Proc. IEEE* [en línea] 1965, vol. 53, no. 12, pp. 1874–1876.

KLEMA, Virginia C and LAUB, Alan J. The singular value decomposition: Its computation and some applications," *Autom. Control. IEEE Trans* .[en línea] 1980, vol. 25, no. 2, pp. 164–176.

VIDALE, John E. "Complex polarization analysis of particle motion," *Bssa*, [en línea] 1986, vol. 76, no. 5, pp. 1393–1405.