



Universidad Nacional de La Plata
Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas

Tesis de Grado en Geofísica

IMPLEMENTACIÓN DEL ATRIBUTO *SKEWNESS*
LOCAL PARA LA CORRECCIÓN DE FASE DE
REGISTROS SÍSMICOS

Elisa Lo

Director: Dr. Julián L. Gómez
Codirector: Geof. Gabriel R. Gelpi

Firma y aclaración del Director:

Firma y aclaración de uno de los Jurados:

Juan Ignacio
Sabbione

LA PLATA, ARGENTINA

2022

Esta tesis fue defendida el día 11 de marzo de 2022. El jurado examinador estuvo conformado por la Prof. Dra. Patricia M. Gauzellino, el Prof. Dr. Juan I. Sabbione y el Dr. Julián L. Gómez.

La tesis obtuvo una calificación de diez (10).

*Este trabajo va dedicado a todos aquellos que confiaron en mi. En especial
a mi mamá y a mi querido Julio Esteban.*

Agradecimientos

A mi familia por brindarme todas las herramientas para que pueda desarrollar mis estudios, por acompañarme y por preocuparse siempre por mí.

A Julio por la compañía, el cariño y el aguante incondicional en todo momento. A mis amigos por bancarme y acompañarme siempre. A Eleonora por permitirme fotografiarla y por hacer que estos años fueran enriquecedores.

A mi director, Julián L. Gómez, por estar siempre disponible para cualquier pregunta o inquietud, por su infinita colaboración en este trabajo y por ser parte de mi última etapa como estudiante. A mi codirector, Gabriel R. Gelpi, por su ayuda, apoyo y buena predisposición.

A los profesores Patricia M. Gauzellino y Juan I. Sabbione, por sus valiosos comentarios y su excelente predisposición en la revisión del trabajo de tesis.

Índice general

1. Introducción	6
2. Marco Teórico	8
3. Método de <i>Skewness Local</i>	16
4. Aplicación en datos sintéticos	21
5. Aplicación en dato de campo	28
6. Discusión breve	33
7. Conclusiones	34

Capítulo 1

Introducción

El objetivo de esta tesis es implementar un método de corrección a fase cero para señales sísmicas. La fase es una característica importante de las señales sísmicas y la corrección a fase cero es un procedimiento rutinario que se aplica a los registros sísmicos como un paso previo a la interpretación (Brown, 2011). Para la interpretación sísmica, es a veces propicio trabajar con trazas con amplitudes máximas o mínimas centradas sobre los horizontes de interés. Esto permite, por ejemplo, una mejor estimación de los tiempos de reflexión y espaciamiento entre horizontes sísmicos (Schoenberger, 1974). La corrección a fase cero persigue simplificar la tarea de los intérpretes, de manera similar al método de la reducción al polo en los métodos potenciales de prospección.

La interpretación de datos de reflexión sísmica involucra rutinariamente la implementación de numerosos atributos sísmicos para comprender la región de estudio (Roden et al., 2015; Paton y Henderson, 2015).

Los atributos sísmicos son medidas cuantitativas de una característica de interés del dato utilizadas para facilitar la interpretación sísmica (Chopra y Marfurt, 2005). Por ejemplo, cuantificar cambios en la amplitud, fase, buzamiento o continuidad de reflectores. En esta tesis agrupamos los atributos sísmicos en tres categorías: globales, instantáneos y locales.

Los atributos globales miden las características de la señal de forma global. Ejemplos de ellos son el promedio, la varianza, la curtosis y el coeficiente de correlación. Los atributos instantáneos miden características de la señal sísmica muestra a muestra. Ejemplos de ellos son la envolvente, la fase instantánea y la frecuencia instantánea (Chopra y Marfurt, 2005).

El atributo que utilizaremos en este trabajo es un atributo local. Los atributos locales devuelven una señal de la misma longitud del dato de

entrada (de manera similar a los atributos instantáneos) y estiman para cada muestra de la traza sísmica una característica que es común a una vecindad de la muestra (Fomel, 2007a). Ejemplos de atributos locales son frecuencia local, similaridad local, coeficiente de correlación local, curtosis local y *skewness* local (Fomel, 2007a; Fomel y van der Baan, 2014).

En esta tesis utilizaremos en particular el atributo local sísmico *skewness* local (SL) propuesto por Fomel y van der Baan (2014). El *skewness* es una medida del grado de asimetría en una distribución. Este atributo se maximiza cuando la fase local de la traza sísmica es próxima a cero. Como tal, este atributo no representa un método para estimar la fase de la ondícula, si no para hacer la corrección a fase cero de la traza sísmica completa. Una vez desarrollada la metodología, utilizaremos ejemplos sintéticos y datos de campo para mostrar el alcance del atributo propuesto. En las aplicaciones se discutirán los beneficios y las desventajas del método.

La motivación de esta tesis es implementar un método fundamental en la cadena de tareas del procesamiento de señales sísmicas como lo es la corrección de fase, ya que luego facilita la interpretación. Por ejemplo, si corregimos por SL el cambio de fase de un registro sísmico que se observa con un buzamiento sobre el horizonte de interés, se centra en el horizonte facilitando la interpretación. Además, el método de SL es una alternativa al uso de ventanas y cuenta con resultados reproducibles. Es una buena experiencia leer un artículo científico, poder programar el método y obtener resultados que concuerdan con el artículo.

Esta Tesis ha sido estructurada en seis capítulos. El capítulo 1 introduce brevemente el tema de estudio y especifica los objetivos perseguidos. El capítulo 2 presenta el marco teórico y el capítulo 3 describe y ejemplifica el método del atributo sísmico local de *skewness*. A continuación, el capítulo 4 presenta la aplicación del método a un dato sintético y el capítulo 5 presenta la aplicación del método a un dato real. Finalmente, el capítulo 6 presenta las conclusiones del trabajo.

Capítulo 2

Marco Teórico

Curtosis

Uno de los atributos globales que puede indicar que una determinada señal tiene fase cero es la curtosis (Wiggins, 1978; Levy y Oldenburg, 1987; White, 1988). La curtosis se define como

$$\phi[\mathbf{s}] = \frac{N \sum_{n=1}^N s_n^4}{(\sum_{n=1}^N s_n^2)^2}, \quad (2.1)$$

donde $\mathbf{s} = (s_1, s_2, \dots, s_N)^\top$ representa un vector de amplitudes sísmicas dentro de una ventana de tamaño N .

El coeficiente de correlación entre dos secuencias a_n y b_n se define como

$$\gamma[\mathbf{a}, \mathbf{b}] = \frac{\sum_{n=1}^N a_n b_n}{\sqrt{\sum_{n=1}^N a_n^2 \sum_{n=1}^N b_n^2}}. \quad (2.2)$$

Por lo tanto, la correlación de a_n con una constante es

$$\gamma[\mathbf{a}, \mathbf{1}] = \frac{\sum_{n=1}^N a_n}{\sqrt{N \sum_{n=1}^N a_n^2}}. \quad (2.3)$$

Por lo tanto, según las ecuaciones 2.1 y 2.3, es posible describir la curtosis a partir del coeficiente de correlación por medio de la relación $\phi[\mathbf{s}] = 1/\gamma^2[\mathbf{s}^2, \mathbf{1}]$ (Fomel, 2007a). Es decir, a mayor correlación de s^2 con una constante, menor curtosis.

La curtosis representa una medida que determina el grado de concentración que presentan los valores de una variable alrededor de la zona central de la distribución. Una señal de fase cero tiene la energía concentrada en el origen más que cualquier otra señal equivalente con igual espectro de amplitud. Entonces, la distribución de los coeficientes de una señal de fase cero tenderá a estar más concentrada en el origen. Además,

las señales de fase cero tienen baja correlación con una constante (Figura 2.1). Por lo tanto, es esperable que la curtosis del operador de fase cero sea mayor que la curtosis de cualquier otro operador equivalente (Velis, 2021). La maximización de la curtosis nos permite entonces estimar si una señal es de fase cero.

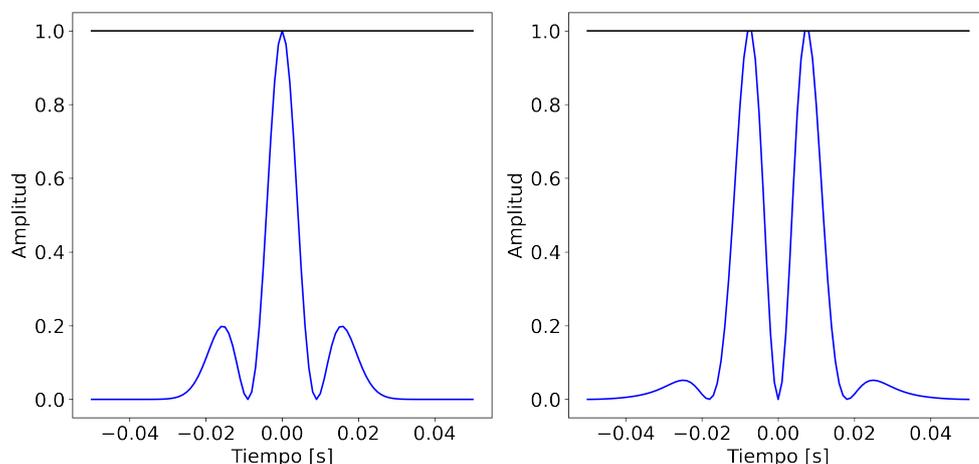


Figura 2.1: Izquierda: Comparación de la ondícula Ricker de fase 0° al cuadrado (azul) con una constante (negro). El coeficiente de correlación entre ambas es $\gamma = 0.51$. Derecha: Comparación de la ondícula Ricker de fase 90° al cuadrado (azul) con una constante (negro). El coeficiente de correlación entre ambas es $\gamma = 0.58$. La ondícula de fase 90° tiene una mayor correlación con una constante y por lo tanto, tiene menor curtosis.

Skewness

Otro de los atributos que puede medir la fase aparente de las señales sísmicas es el *skewness* global (Bulmer, 1979). El *skewness* global (SG) de una secuencia s se define como

$$\kappa[\mathbf{s}] = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N s_n^3}{\left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N s_n^2\right)^{3/2}}. \quad (2.4)$$

El SG es utilizado en estadística para medir la asimetría de distribuciones.

A partir de desarrollos algebraicos simples, podemos representar el cuadrado del SG como (Fomel y van der Baan, 2014)

$$\kappa^2[\mathbf{s}] = \frac{\left(\sum_{n=1}^N s_n^2 \cdot s_n\right)^2}{\sum_{n=1}^N s_n^4 \sum_{n=1}^N s_n^2} \frac{\sum_{n=1}^N s_n^4 \sum_{n=1}^N 1^2}{\left(\sum_{n=1}^N s_n^2\right)^2} = \frac{\gamma^2[\mathbf{s}^2, \mathbf{s}]}{\gamma^2[\mathbf{s}^2, \mathbf{1}]} \quad (2.5)$$

Es decir, podemos describir el SG a partir del coeficiente de correlación. Las señales de fase cero suelen tener una mayor correlación con su

cuadrado (Figura 2.2) y una menor correlación con una constante (Figura 2.1). Como consecuencia, tienen un *skewness* mayor.

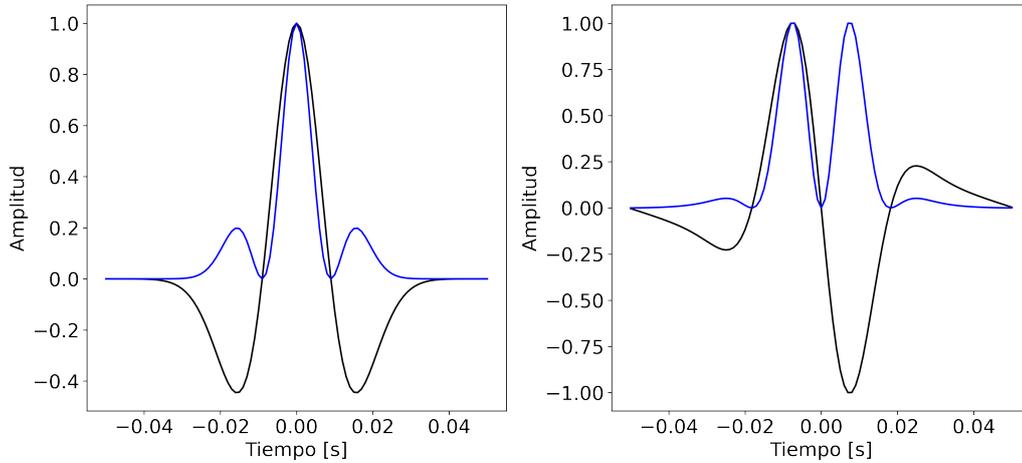


Figura 2.2: Izquierda: Ondícula de Ricker de fase 0° (negro) (El SG es $\kappa = 1.41$) comparada con su cuadrado (azul). El coeficiente de correlación entre ambas es $\gamma = 0.64$. Derecha: Ondícula de Ricker de fase 90° (negro) (El SG es $\kappa = 0$) comparada con su cuadrado (azul). El coeficiente de correlación entre ambas es $\gamma = 0$. La ondícula de Ricker de fase 0° tiene una mayor correlación con su cuadrado y por lo tanto, tiene mayor *skewness*.

El atributo SG está relacionado con la asimetría del dato de entrada. Para ilustrar este concepto, notemos que una ondícula de fase 0° (Figura 2.3) genera una distribución de amplitudes más asimétrica que una de fase 90° (Figura 2.4). Por lo tanto, una ondícula simétrica tiene un *skewness* de menor valor absoluto que una asimétrica. Los métodos basados en SG para corregir la fase pueden detectar la fase apropiada de una señal aplicando una serie de rotaciones de fase constantes y luego evaluando el ángulo que produce el máximo SG.

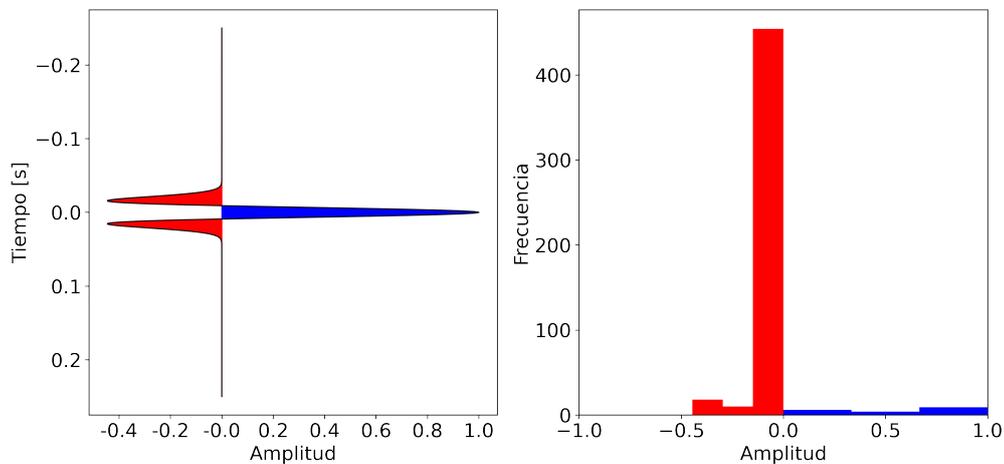


Figura 2.3: Izquierda: Ondícula de Ricker de fase 0° . Derecha: histograma de amplitudes. El SG es $\kappa = 3.13$.

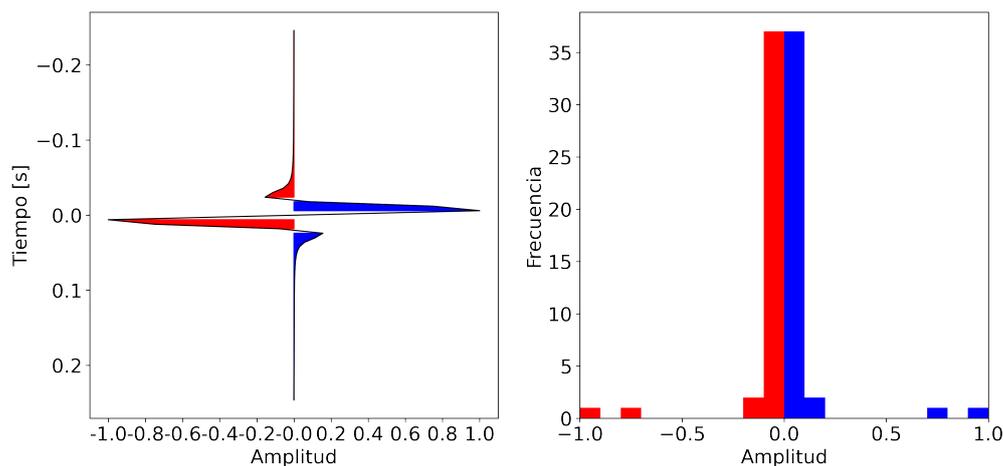


Figura 2.4: Izquierda: Ondícula de Ricker de fase 90° . Derecha: histograma de amplitudes. El SG es $\kappa = -1.34$.

Ambigüedad

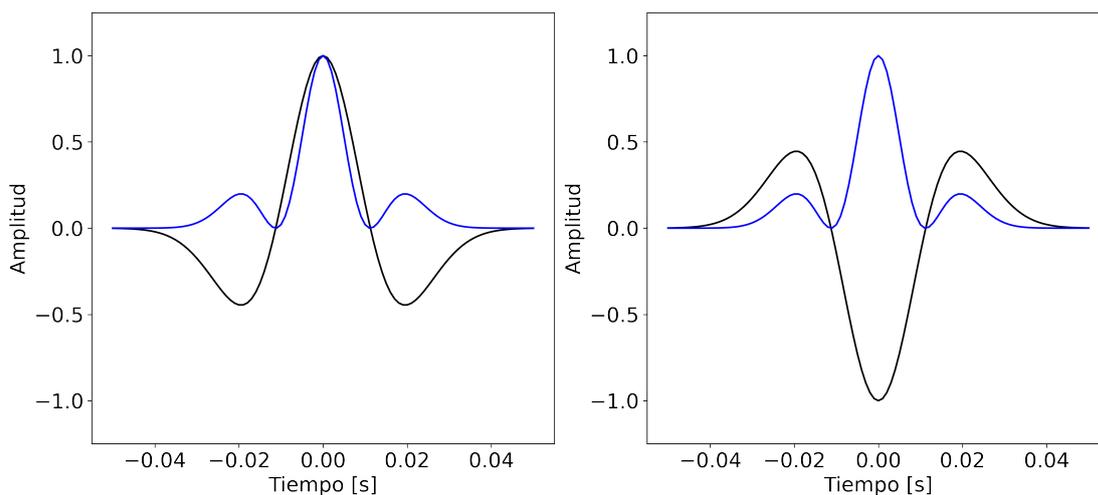


Figura 2.5: Izquierda: Ondícula de Ricker de fase 0° (El SG es $\kappa = 1.40$) y su cuadrado (El SG es $\kappa = 1.98$). Derecha: Ondícula de Ricker de fase 180° (El SG es $\kappa = -1.40$) y su cuadrado (El SG es $\kappa = 1.98$).

Notemos que si bien una ondícula de Ricker de fase 0° y una de 180° generan SG diferentes, si elevamos al cuadrado la señal, ambas tienen el mismo valor de *skewness* global (Figura 2.5). Esto introduce una ambigüedad en el resultado final de la fase que vamos a detectar. La ambigüedad reside en el signo, donde no podemos distinguir el caso de fase 0° del de fase 180° . Como consecuencia, cuando procesamos secciones sísmicas para corregir los cambios de fase, los saltos en la fase se observan como rotaciones indeseadas de 180° en las trazas. La ambigüedad presente al considerar un método basado en el cuadrado del *skewness* conduce en

las aplicaciones del método a tener que considerar una traza de referencia para observar si existen saltos de 180° en los resultados.

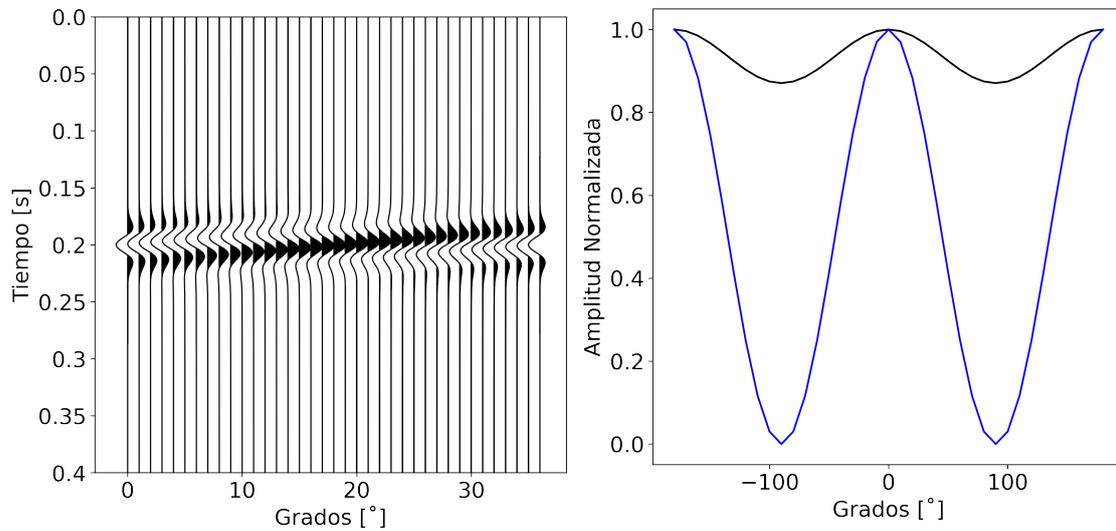


Figura 2.6: Izquierda: Ondícula de Ricker rotada en distintas fases. Derecha: *Skewness* (azul) y *kurtosis* (negro) como funciones de los ángulos de rotación de fase. Ambos atributos concuerdan en la elección de la señal a 0° y 180° . Notar que el *skewness* presenta un rango dinámico mayor.

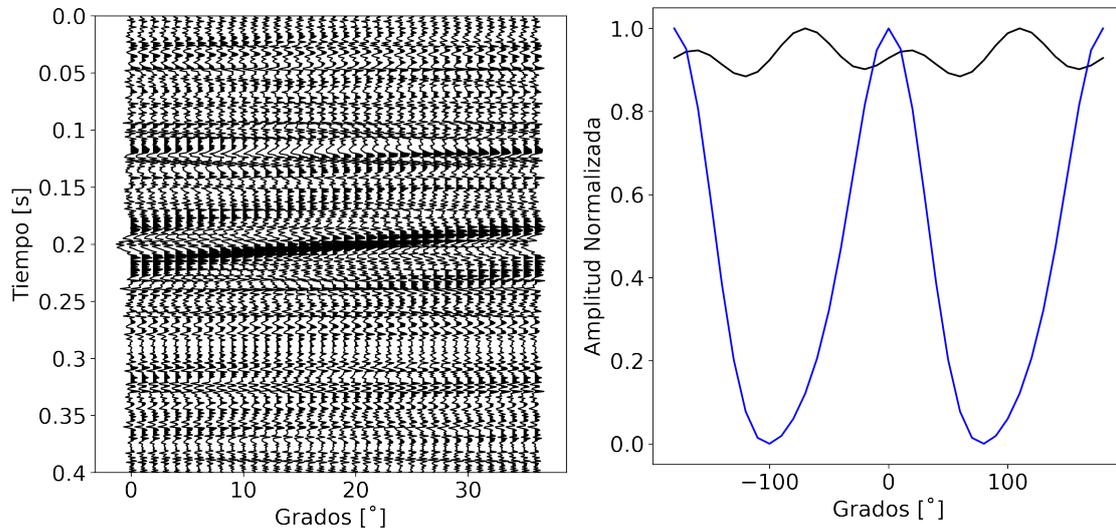


Figura 2.7: Izquierda: Ondícula de Ricker con ruido aleatorio rotada en distintas fases. Derecha: *Skewness* (azul) y *kurtosis* (negro) como funciones de los ángulos de rotación de fase. Notar que al presentar un rango dinámico mayor, en presencia de ruido los máximos del SG son más fáciles de detectar que los máximos de la *kurtosis*.

En la Figura 2.6 se observa una familia de ondículas de Ricker, la cual es generada por la rotación de fase entre -180° a $+180^\circ$ de una ondícula de fase cero. Ambos atributos concuerdan en que sus máximos señalan el

dato a fase cero (Figura 2.6). Sin embargo, el *skewness* exhibe un rango dinámico mayor que la curtosis, lo que lo hace más adecuado para elegir las rotaciones de fase óptimas en situaciones con baja relación señal ruido (SNR) como se ilustra en la Figura 2.7. Esta propiedad es importante al momento de aplicar el atributo en registros de campo, los cuales generalmente están contaminados con un nivel de ruido apreciable. En la Figura 2.7 vemos que en el caso de la curtosis con ruido, no es posible diferenciar los máximos de las amplitudes generadas.

En la Figura 2.8 ilustramos un ejemplo de una traza sísmica sintética donde existe más de un evento sísmico. Como observamos, el atributo SG no corrige adecuadamente la traza a fase cero. A pesar que el atributo SG es capaz de detectar las rotaciones de fase necesarias para la corrección a fase cero de la traza sísmica, SG requiere que la ventana de análisis contenga un sólo evento por vez para obtener estimaciones acertadas.

Una forma de resolver este problema es mediante el uso de ventanas. En la práctica, el intérprete o el encargado del procesamiento debe tomar una decisión sobre el tipo y ancho de la ventana, tal que no existan muchos eventos por ventana para estimar una rotación aceptable de la traza sísmica por segmentos. Este método de corrección a fase cero se denomina *skewness* global por ventanas (SGW).

Skewness local

Otra alternativa es una corrección sin la necesidad de usar ventanas, tal como hace el atributo del *skewness* local (SL). El SL obtiene una medida de la rotación de fase para cada muestra de una traza que tiene un carácter local, este método se describe en detalle en el siguiente capítulo. Observemos en la Figura 2.8 que SG arroja un valor de 70° , luego la corrección que debemos aplicar es de -70° . El resultado de SG es justamente el promedio de las rotaciones de fase de las tres ondículas. Interpretamos entonces que SG estima un valor promediado con el cual corregir la traza sísmica en su totalidad. Es decir, corregir por SG genera un error por exceso y por defecto de 50° para las ondículas de los extremos, mientras que la ondícula central se corrige de forma adecuada. Si bien esto no se aprecia visualmente, la fase estimada por SL es mucho más precisa que la obtenida por SG; de hecho, tiene un RMS 33% menor. El SL permite corregir una traza con más de una reflexión de manera satisfactoria y sin el uso de ventanas.

Corrección de fase por transformada de Hilbert

El proceso que utilizaremos para hacer la corrección de fase de una traza sísmica según una función es a través de la transformada generalizada de Hilbert.

$$HG[s] = \cos(\theta) s + \sin(\theta) H\{s\} \quad (2.6)$$

Siendo θ la función de la corrección de fase, s la señal digital y $H\{s\}$ la aproximación de la transformada de Hilbert de s .

En el caso del SG tenemos $\theta = \theta_0$, una función constante para la corrección angular. En el caso del SL tenemos una función del tiempo $\theta = \theta(t)$ que es discretizada en θ_n para cada muestra n al tiempo t_n de la traza sísmica digital s .

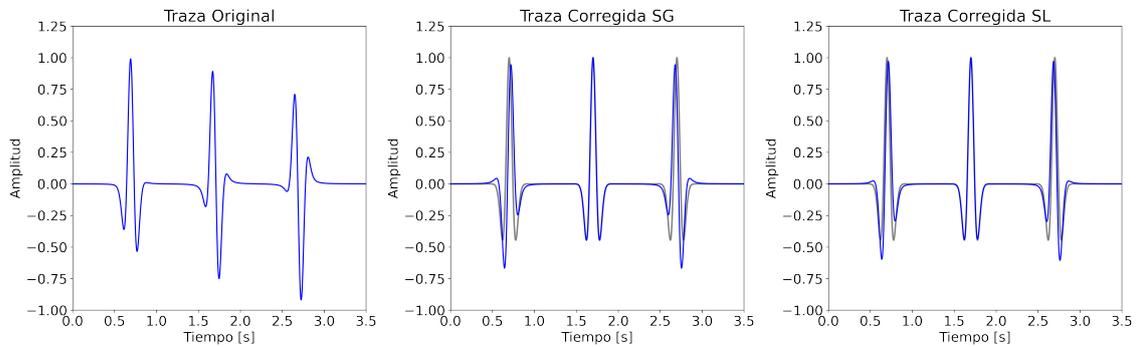


Figura 2.8: Izquierda: Traza sísmica con tres ondículas de Ricker con rotación de fase de 20° , 70° y 120° de izquierda a derecha. Centro: Traza sísmica corregida con SG (azul) y traza sísmica de fase cero (gris). El SG es $\kappa = -70^\circ$. El RMS entre ambas trazas es 0.12. Derecha: Traza sísmica corregida con SL (azul) y traza sísmica de fase cero (gris). El RMS entre ambas trazas es 0.08. La traza sísmica de fase cero se muestra en gris. Según el RMS, SL conduce a un resultado más próximo al óptimo.

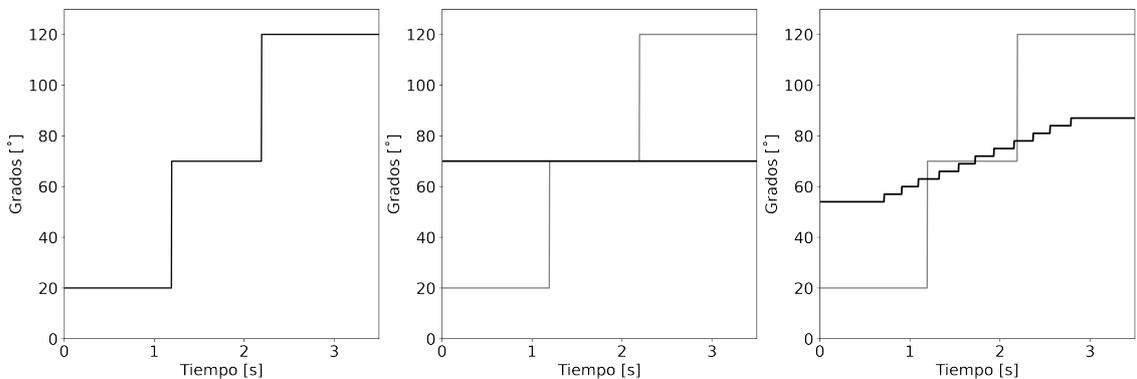


Figura 2.9: Izquierda: Corrección de fase ideal. Centro: Corrección de fase mediante SG (negro) y corrección de fase ideal (gris). Derecha: Corrección de fase mediante SL (negro) y corrección de fase ideal (gris).

Como describimos anteriormente, el método SL hace una corrección más acertada que SG en el ejemplo de la Figura 2.8, tal como lo prueba el RMS. Esto resulta de la detección de las trayectorias que se muestran en la Figura 2.9. Como vemos, el atributo SL no indica las fases de las ondículas involucradas. Es decir, $\theta(t)$ no representa la fase de la ondícula viajera a cada tiempo t . SL estima los ángulos $\theta(t)$ a los cuales rotar la traza en cada muestra para que la distribución de las amplitudes de la traza corregida sea lo más asimétrica posible. En cada muestra en tiempo, SL busca la rotación que maximiza a $|\kappa|$. La maximización se realiza generando un conjunto de rotaciones de la traza de entrada con un intervalo $\Delta\theta$ constante y buscando el $|\kappa|$ máximo para cada muestra en la familia de trazas resultantes.

En el capítulo siguiente describimos el algoritmo que nos permite obtener el atributo sísmico de *skewness* local.

Capítulo 3

Método de *Skewness* Local

La técnica de los atributos locales propuesta por [Fomel \(2007a\)](#) extiende atributos globales a atributos locales. Para ello se emplea una formulación de mínimos cuadrados regularizados. La idea es obtener una función no estacionaria de la rotación, $\theta = \theta(t)$ con la cual corregir la traza sísmica.

Como vimos en la ecuación 2.5 del capítulo anterior, es posible describir el *skewness* global (SG) en función del coeficiente de correlación global γ . Como señalan [Fomel y van der Baan \(2014\)](#), el cuadrado del coeficiente de correlación global se puede interpretar como el producto entre las soluciones a dos problemas de minimización por mínimos cuadrados:

$$\mathbf{a}\gamma_1 = \mathbf{b} \quad (3.1)$$

y

$$\mathbf{b}\gamma_2 = \mathbf{a} \quad (3.2)$$

Es decir,

$$\gamma^2 = \gamma_1\gamma_2, \quad (3.3)$$

siendo $\gamma_1 = (\mathbf{a}^T \mathbf{a})^{-1}(\mathbf{a}^T \mathbf{b})$ y $\gamma_2 = (\mathbf{b}^T \mathbf{b})^{-1}(\mathbf{b}^T \mathbf{a})$.

\mathbf{a} y \mathbf{b} son notaciones vectoriales de las series de tiempo $a(t)$ y $b(t)$. Si reemplazamos el coeficiente de correlación γ por un vector \mathbf{c} , podemos definir al cuadrado del atributo de correlación local (CL) como el producto componente a componente (producto de Hadamard), el cual denotamos con el símbolo \circ , de dos vectores \mathbf{c}_1 y \mathbf{c}_2 tales que $\mathbf{c} = \sqrt{\mathbf{c}_1 \circ \mathbf{c}_2}$. La operación de tomar la raíz cuadrada debe pensarse aquí muestra a muestra.

Los vectores \mathbf{c}_1 y \mathbf{c}_2 son las soluciones de dos problemas de minimización:

$$\mathbf{c}_1 = \arg \min_{\mathbf{c}_1} \|\mathbf{A} - \mathbf{C}_1 \mathbf{B}\|_2^2 \quad (3.4)$$

y

$$\mathbf{c}_2 = \arg \min_{\mathbf{c}_2} \|\mathbf{B} - \mathbf{C}_2 \mathbf{A}\|_2^2, \quad (3.5)$$

donde si N es la longitud de la señal de entrada, $\mathbf{A} = \text{diag}(\mathbf{a})$, $\mathbf{B} = \text{diag}(\mathbf{b})$, $\mathbf{C}_1 = \text{diag}(\mathbf{c}_1)$ y $\mathbf{C}_2 = \text{diag}(\mathbf{c}_2)$ son matrices diagonales de $N \times N$ compuestas por los elementos de los vectores columna $N \times 1$ \mathbf{a} , \mathbf{b} , \mathbf{c}_1 y \mathbf{c}_2 , respectivamente.

Por ejemplo, si $\mathbf{a} = [a_1, \dots, a_N]$, $\mathbf{A} = \text{diag}(\mathbf{a}) = \begin{bmatrix} a_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & a_N \end{bmatrix}$

Los minimizadores de las expresiones 3.4 y 3.5 pueden ser descritos en términos de *shaping regularization* de Fomel (2007b) como

$$\mathbf{c}_1 = [\lambda_1^2 \mathbf{I} + \mathbf{S}(\mathbf{A}^T \mathbf{A} - \lambda_1^2 \mathbf{I})]^{-1} \mathbf{S}(\mathbf{A}^T \mathbf{b}), \quad (3.6)$$

y

$$\mathbf{c}_2 = [\lambda_2^2 \mathbf{I} + \mathbf{S}(\mathbf{B}^T \mathbf{B} - \lambda_2^2 \mathbf{I})]^{-1} \mathbf{S}(\mathbf{B}^T \mathbf{a}); \quad (3.7)$$

donde \mathbf{I} es la matriz identidad de $N \times N$, $\lambda_1 = \|\mathbf{A}^T \mathbf{A}\|_2$ es la norma L_2 de $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ en la ecuación 3.6 y $\lambda_2 = \|\mathbf{B}^T \mathbf{B}\|_2$ es la norma L_2 de $\mathbf{B}^T \mathbf{B}$ en la ecuación 3.7. Escalando por la energía de \mathbf{A} y \mathbf{B} para determinar λ_1 y λ_2 permite tener mayor velocidad de convergencia cuando utilizamos métodos iterativos en la inversión (Fomel, 2007a), tal como el algoritmo de gradientes conjugados (Trefethen y Bau III, 1997).

El operador \mathbf{S} es un filtro de suavizado introducido por Fomel (2007b) en su método de regularización. En esta Tesis representamos a \mathbf{S} por medio de un filtro pasa bajos triangular (Claerbout y Abma, 1992). El único parámetro que necesitamos especificar para \mathbf{S} es el radio de suavizado, M , que puede ser diferente en las direcciones vertical (M_x) y horizontal (M_y). Para generar el filtro triangular, calculamos convoluciones lineales de funciones cajones (*boxcar*) hasta obtener el largo adecuado $N = 2M + 1$ y luego normalizamos para que la suma de los coeficientes sea siempre la unidad: $\sum_j s_j = 1$ (Figura 3.1).

Notemos que en el caso donde $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$ y $\mathbf{S} = \mathbf{I}$, la solución de la regularización conforme dadas en la expresiones 3.6 y 3.7 es la solución

de mínimos cuadrados a las ecuaciones normales.

Filtros triangulares de suavizado

En las siguientes figuras ilustramos la obtención y la aplicación del filtro triangular en 1D y 2D. Podemos observar en las figuras 3.2 y 3.3 que a medida que aumentamos la longitud del filtro, aumenta el suavizado de la señal.

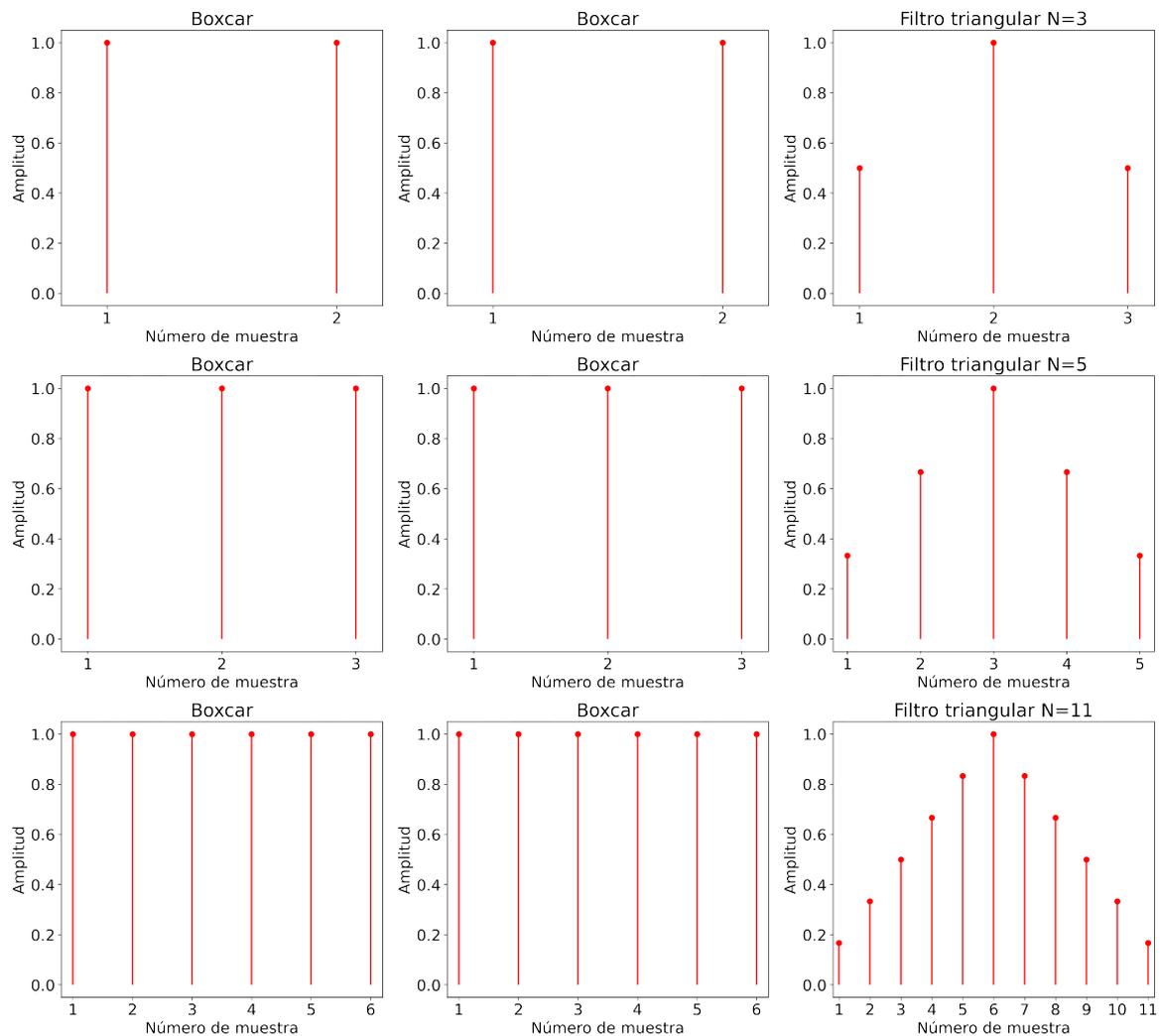


Figura 3.1: Primera fila: Convolución entre dos *boxcar* de dos muestras (Columna 1 y 2) resultan en un filtro triangular de tres muestras (Columna 3). Segunda fila: Convolución entre dos *boxcar* de tres muestras (Columna 1 y 2) resultan en un filtro triangular de cinco muestras (Columna 3). Tercera fila: Convolución entre dos *boxcar* de seis muestras (Columna 1 y 2) resultan en un filtro triangular de once muestras (Columna 3). Las Figuras 3.2 y 3.3 ilustran el efecto del suavizado en 1D y 2D, respectivamente.

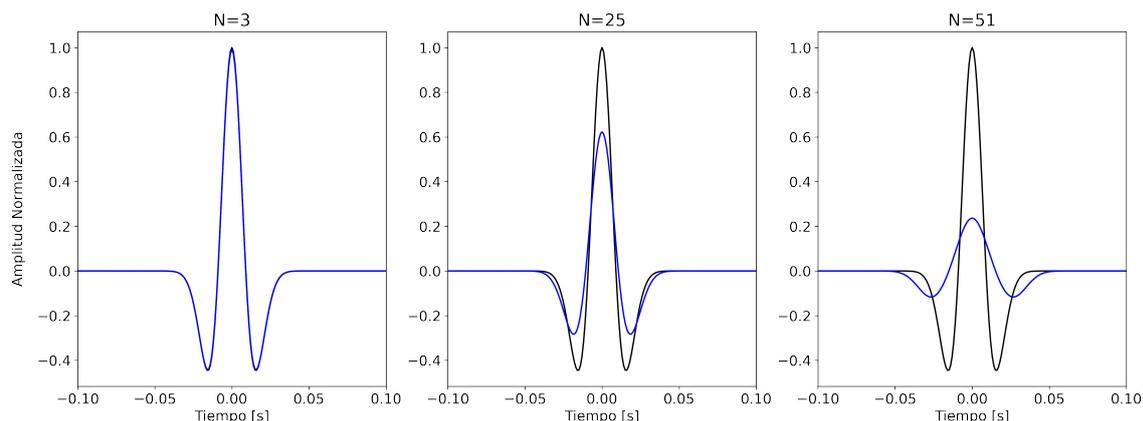


Figura 3.2: De izquierda a derecha: Ondícula de Ricker (negro) comparada con ondícula de Ricker suavizada por filtro triangular para $N = 3, 25$ y 51 (azul).

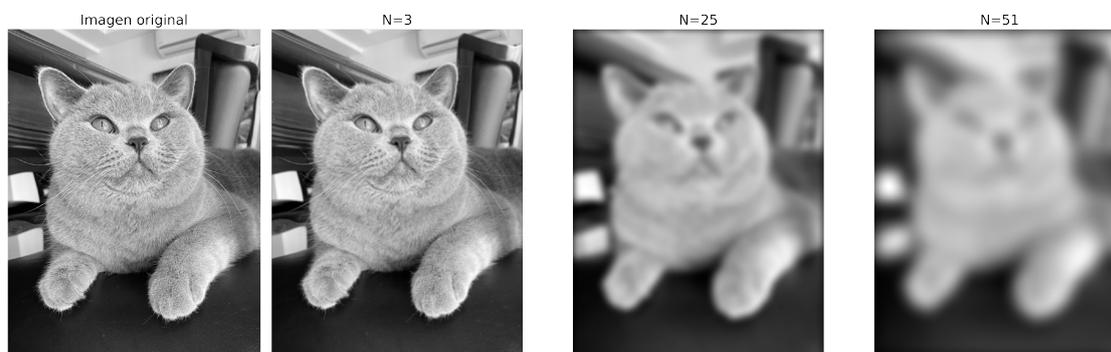


Figura 3.3: De izquierda a derecha: Imagen original (543×413) e imágenes suavizadas por un filtro triangular 2D de largos $N = 3, 25$ y 51 en cada dirección. A medida que aumenta el largo del filtro triangular, disminuye el contenido de altas frecuencias en la imagen.

Atributo skewness local

Como se mencionó en la Introducción, aplicamos el atributo SL para la detección y corrección de fase en trazas sísmicas. El atributo SL se obtiene a partir del CL de la siguiente manera

$$\kappa_L = c[s^2, s]/c[s^2, 1]. \quad (3.8)$$

Para aplicar el método de SL tomamos la traza sísmica y generamos un mapa del atributo local en función del ángulo de rotación de fase (que llamamos “*scan* del atributo”). A partir del *scan*, detectamos el máximo SL en cada rotación para determinar la fase a corregir, obteniendo la discretización de $\theta(t)$ para cada muestra en tiempo de la señal analizada: θ_n . Una vez determinada θ_n , corregimos la traza original muestra a muestra

y finalmente obtenemos la traza corregida. Si usamos el inverso del atributo debemos sumar un desfase constante de 90° luego de seleccionar la trayectoria.

A modo de ilustrar la utilidad de la corrección a fase cero de un registro sísmico, consideremos el caso donde tenemos un contraste de impedancia entre dos medios y las trazas sísmicas tienen una rotación de fase lineal en la dirección del número de traza (Figura 4.2). Este efecto en el cambio de la fase se observa con un buzamiento sobre el horizonte de interés, que está localizado en 0.2 s. Al corregir este efecto por medio del SL, obtenemos una imagen sísmica propicia para su posterior interpretación.

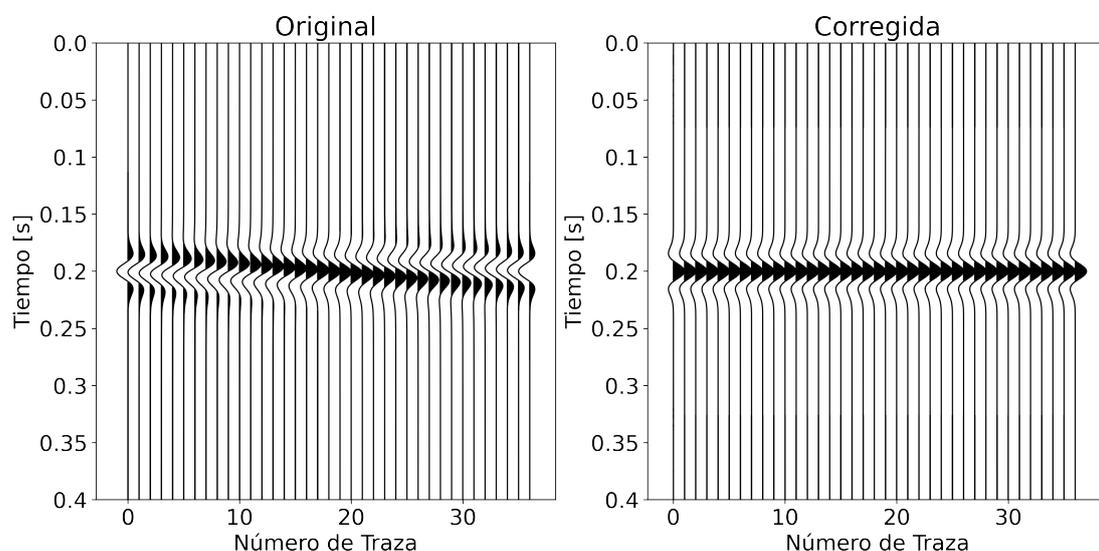


Figura 3.4: Izquierda: Registro sísmico original con una rotación de fase lineal en la dirección del número de traza. Derecha: Registro sísmico corregido a fase cero mediante la implementación del atributo sísmico *skewness local*.

Capítulo 4

Aplicación en datos sintéticos

Habiendo desarrollado la metodología, presentamos una serie de ejemplos sintéticos para ilustrar los alcances del SL. También ilustramos los efectos del ruido en la corrección de fase y comparamos los resultados con el método de *skewness* global (SG).

Los algoritmos se escribieron en lenguaje Python utilizando principalmente el paquete de cálculo numérico NumPy (Harris et al., 2020). Los códigos son aplicados dentro de Jupyter Notebooks (<https://jupyter.org/>). Las Jupyter Notebooks permiten un rápido análisis exploratorio de ideas y prototipos de métodos numéricos.

Sección sísmica sintética

En la Figura 4.1 mostramos la corrección por SL de una ondícula de Ricker de fase 90° . Detectando las fases correspondientes a los máximos del SL, obtenemos un resultado óptimo (en el sentido de un RMS despreciable). Si consideramos una sección sísmica formada por distintas rotaciones de una ondícula de Ricker rotada cada 10° , también obtenemos un muy buen resultado utilizando el algoritmo de SL (Figura 4.2). Estos ejemplos ilustran la correcta implementación computacional del método.

Al calcular la correlación local se consideraron dos alternativas. La inversa en el factor de la izquierda de la ecuación 3.6 y 3.7, se calculó mediante la pseudoinversa de Moore-Penrose y el algoritmo de los gradientes conjugados. Como no encontramos un beneficio de una sobre la otra, optamos por utilizar el método de inversión de gradientes conjugados. Como el SL consiste en un cociente de correlaciones locales, para codificarlo agregamos un parámetro ϵ a ajustar en el denominador

$$\mathbf{x} = 1/(\mathbf{c}[\mathbf{s}^2, \mathbf{1}] + \epsilon) \quad (4.1)$$

tal que el cociente no genere una división por cero. Ajustamos el parámetro ϵ hasta obtener un *scan* óptimo.

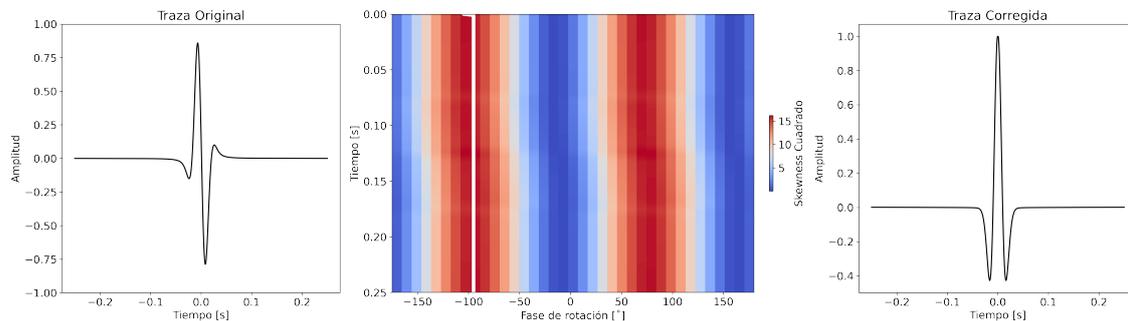


Figura 4.1: Izquierda: Ondícula de Ricker de fase 90° . Centro: *Scan* del atributo SL, donde se observan dos ramas posibles de máximos. Derecha: Ondícula de Ricker rotada a fase 0° a partir de tomar los máximos adecuados del SL en el *scan* (línea blanca).

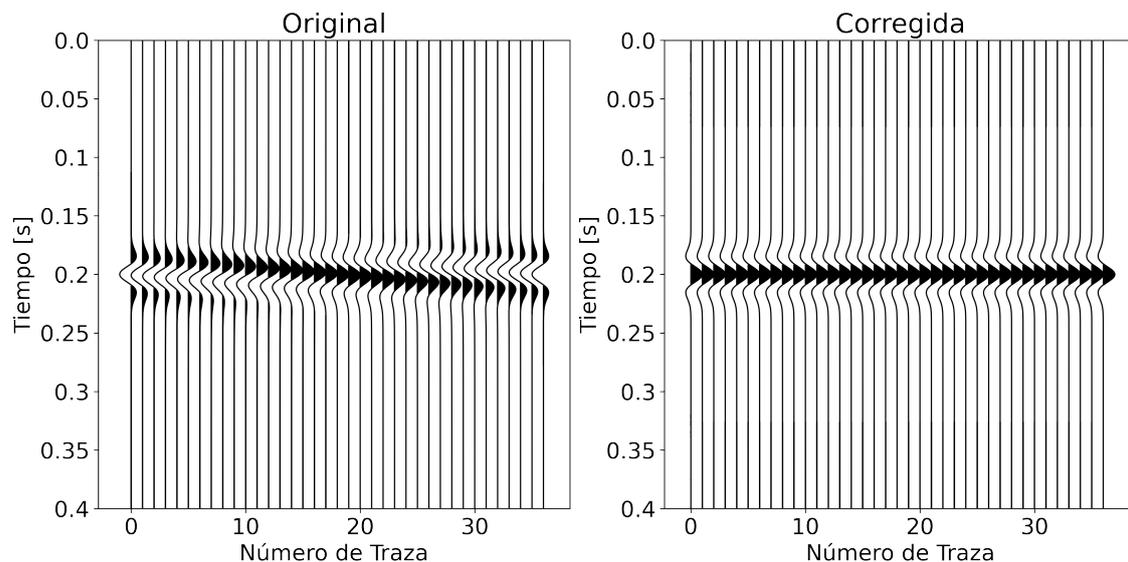


Figura 4.2: Izquierda: Sección de ondícula de Ricker rotada cada 10° . Derecha: Sección de ondícula de Ricker corregida por SL. El RMS respecto del resultado óptimo es 0.

Observemos que en el *scan* del atributo SL (Figura 4.1) los máximos de SL se presentan en dos ramas. Ambas ramas representan soluciones con un desfase constante de 180° , debido a que utilizamos el cuadrado del *skewness* como atributo local y esto genera ambigüedad. Para seleccionar la rama adecuada para la corrección, elegimos una traza de referencia y calculamos, traza por traza, el signo de la correlación con el resultado corregido. Es decir, calculamos el signo del coeficiente de correlación (ecuación 2.2) entre la traza de referencia en el dato original y cada traza corregida. Si el signo es negativo, esto implica que la fase fue rotada 180°

y debemos multiplicar por -1 , si el signo es positivo, debemos multiplicar por $+1$. La corrección por ambigüedad está dada por

$$\mathbf{t}_{corr} = \text{signo}(\gamma[\mathbf{t}_c, \mathbf{t}_r]) \mathbf{t}_c, \quad (4.2)$$

siendo \mathbf{t}_{corr} la traza corregida sin ambigüedad por SL, \mathbf{t}_c la traza corregida por SL con ambigüedad y \mathbf{t}_r la traza de referencia. Para este ejemplo, elegimos como traza de referencia la traza del medio, que fue generada por la ondícula de Ricker a fase cero ya que partimos de esta. Es decir, contamos con un dato extra de cómo es el reflector de interés y por esto elegimos la primera rama. Así, convenientemente, las amplitudes de las trazas corregidas serán consistentes en signo con las amplitudes en la traza de referencia. En la práctica el intérprete debe elegir la traza de referencia según el objetivo del trabajo y el conocimiento previo del área bajo estudio.

Para obtener la selección de la trayectoria óptima de los máximos en el *scan*, utilizamos un algoritmo de optimización dinámica derivado del método de *seam carving* (Avidan y Shamir, 2007), modificado por Gómez y Velis (2021) para aplicaciones sísmicas. El método detecta la trayectoria que maximiza la suma de los cuadrados del atributo SL, no permite que la trayectoria detectada sea discontinua y considera un solo valor del SL por muestra en tiempo.

Traza con rotación lineal de fase

Ilustramos el procedimiento propuesto de corrección a fase cero mediante SL en la Figura 4.3. La traza sintética de entrada contiene una serie de ondículas de Ricker con $f_0 = 20$ Hz, un intervalo de muestreo de $\Delta t = 4$ ms y una rotación lineal de la fase en tiempo. El ejemplo es el mismo que se analiza en el artículo científico de Fomel y van der Baan (2014).

Comenzamos con rotaciones de fase de diferentes ángulos, calculando cada vez el SL. El resultado se muestra en la Figura 4.3 (centro) y muestra una clara tendencia de alto *skewness*. Después de seleccionar la tendencia, y realizando la correspondiente rotación no estacionaria, obtenemos la traza corregida (Figura 4.3, derecha). El resultado coincide con el publicado por Fomel y van der Baan (2014), lo que indica que el artículo presenta resultados reproducibles a la comunidad de las geociencias.

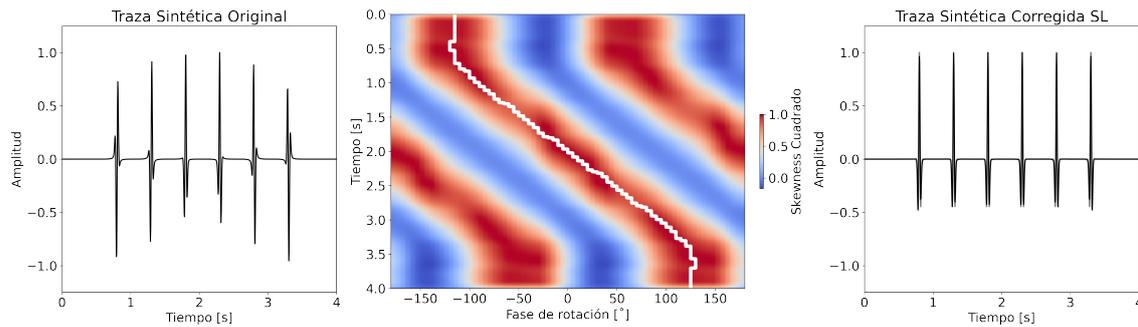


Figura 4.3: Izquierda: Traza sintética de entrada con eventos que poseen variaciones de fase. Centro: Scan del SL (color) y trayectoria de máximos (línea blanca). Derecha: Traza sintética corregida con las fases detectadas.

En la figura 4.4 ilustramos los histogramas de la traza sintética antes y después de SL. Vemos que la acción de SL sobre la traza es la de generar una traza con amplitudes distribuidas de forma de aumentar (en valor absoluto) el *skewness* del dato original al igual que observábamos en la Figura 2.3 y 2.4 para el caso de una ondícula de Ricker de fase 0° y de fase 90° .

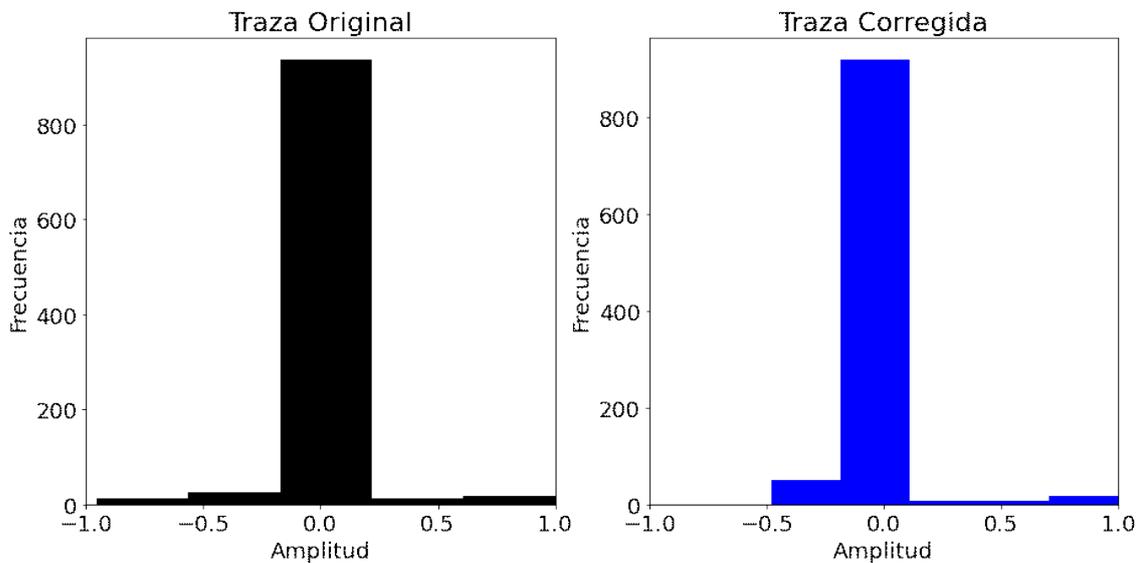


Figura 4.4: Izquierda: histograma de las amplitudes de la traza sintética antes de la corrección por SL. El SG es $\kappa = 0.63$. Derecha: histograma de las amplitudes de la traza sintética después de la corrección por SL. El SG es $\kappa = 3.35$.

Efecto del ruido

En la Figura 4.5 consideramos la presencia de ruido aleatorio aditivo con amplitudes en distintos porcentajes de la amplitud máxima de la señal sobre la traza sintética de la sección anterior. Podemos observar

que a medida que aumentamos la amplitud del ruido, las ramas que se corresponden a los máximos del *scan* del atributo pierden continuidad y precisión, resultando en una trayectoria que no puede corregir de manera eficiente la rotación impuesta al dato sintético. Esto resulta luego en una corrección inadecuada a fase cero.

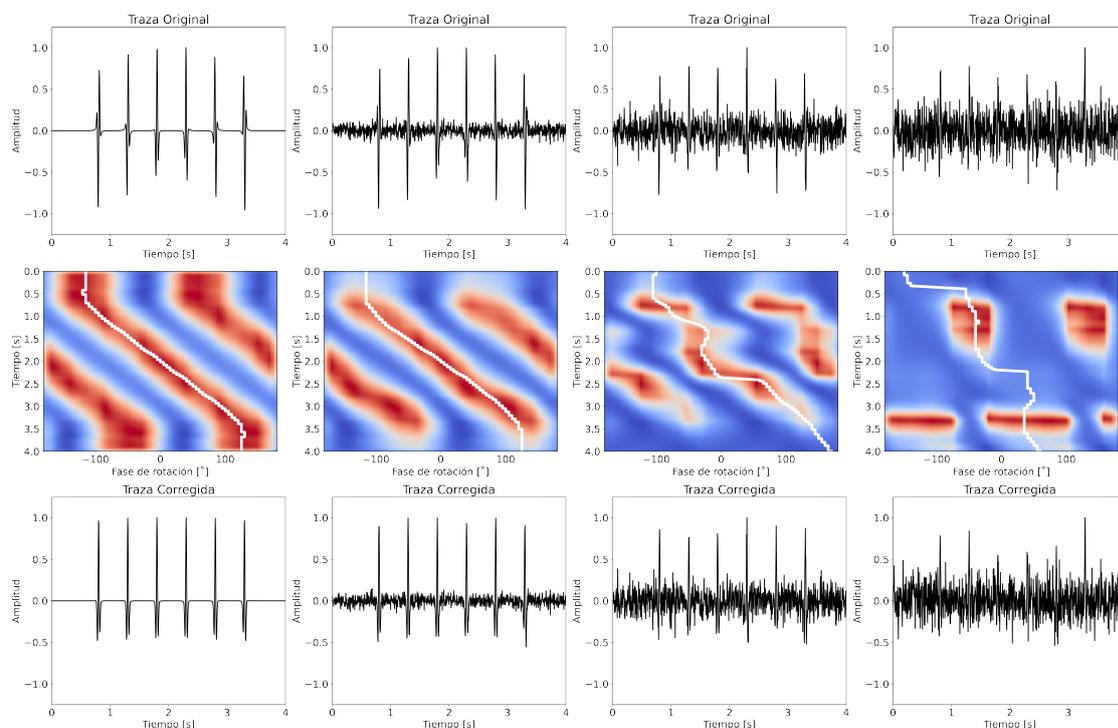


Figura 4.5: Primera fila: Traza sintética con presencia de ruido con amplitudes en porcentajes de la amplitud máxima de la señal de 0%, 5%, 15% y 30% (de izquierda a derecha). Segunda fila: *Scan* del SL (color) y trayectoria de máximos (línea blanca) correspondiente a cada traza sintética con ruido. Tercera fila: Traza sintética corregida mediante SL con las fases detectadas correspondiente a cada traza sintética con ruido. El RMS entre la traza sintética con presencia de ruido y la traza sintética corregida mediante SL es 0, 0.01, 0.03 y 0.07 respectivamente.

Si comparamos la fase ideal con la fase detectada por SL para cada traza ruidosa, observamos que la diferencia es mayor cuanto mayor porcentaje de ruido presente la traza, por lo tanto, el RMS también es mayor (Figura 4.6). También podemos ver que para la corrección de fase usando SL, existe un efecto de borde. El SL continúa la medición de forma suave y constante en las regiones con ausencia de información. En este caso, esta región es donde la amplitud es nula y la fase de la señal no está definida. Como el efecto de borde no coincide con ninguna señal de interés, no representa un problema.

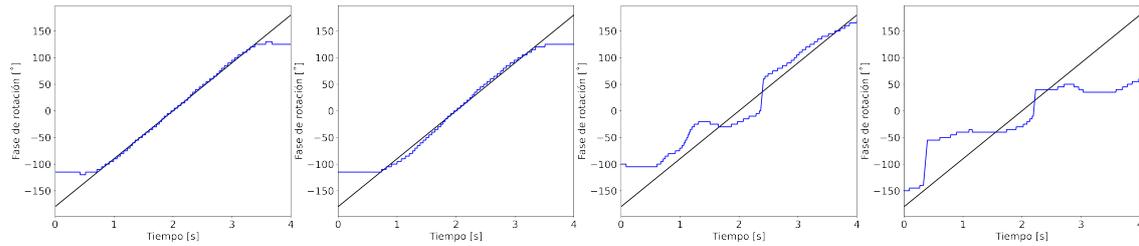


Figura 4.6: De izquierda a derecha: Comparación de la fase verdadera y la detectada por el SL de la traza sintética con presencia de ruido con amplitudes en porcentajes de la amplitud máxima de la señal de 0 %, 5 %, 15 % y 30 %.

Comparación con *skewness global*

En este último ejemplo, comparamos los resultados obtenidos con la corrección a fase cero dada por el atributo global SG.

Para el ejemplo de la traza sintética sin presencia de ruido, obtenemos $\theta = 0^\circ$, es decir, el resultado de la corrección mediante SG es igual a la traza original. Ilustramos en la Figura 4.7 los resultados obtenidos al corregir por SG y SL, podemos observar que en este ejemplo, estimar un valor promediado con el cual corregir la traza sísmica en su totalidad no es de gran utilidad práctica. La fase estimada por SL es mucho más precisa que la obtenida por SG. Observamos este resultado tanto en este ejemplo sintético como en el ejemplo de la traza sísmica con tres ondículas de Ricker rotadas del capítulo anterior (Figura 2.8). Nuevamente, podemos observar que para la corrección de fase usando SL, existe un efecto de borde (Figura 4.8).

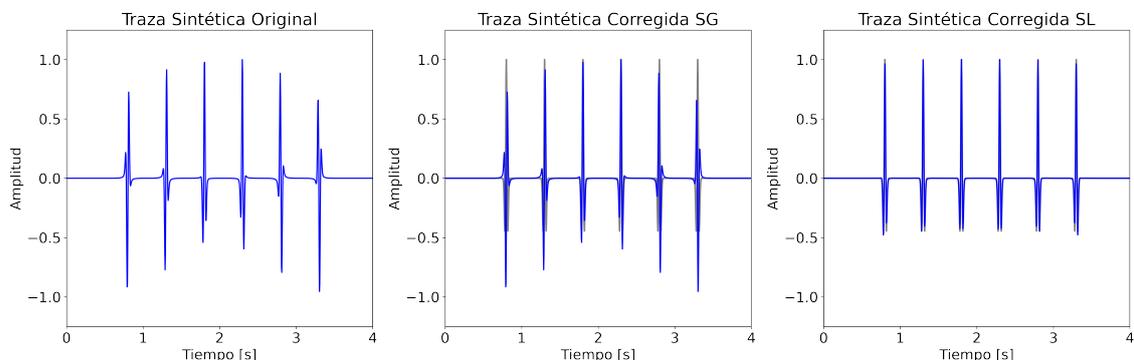


Figura 4.7: Izquierda: Traza sintética. Centro: Traza sintética corregida con SG (azul) comparada con traza sintética de fase cero ideal (gris). SG = 0° . El RMS entre ambas trazas es 0.04. Derecha: Traza sintética corregida con SL (azul) comparada con traza sintética de fase cero ideal (gris). El RMS entre ambas trazas es 0.

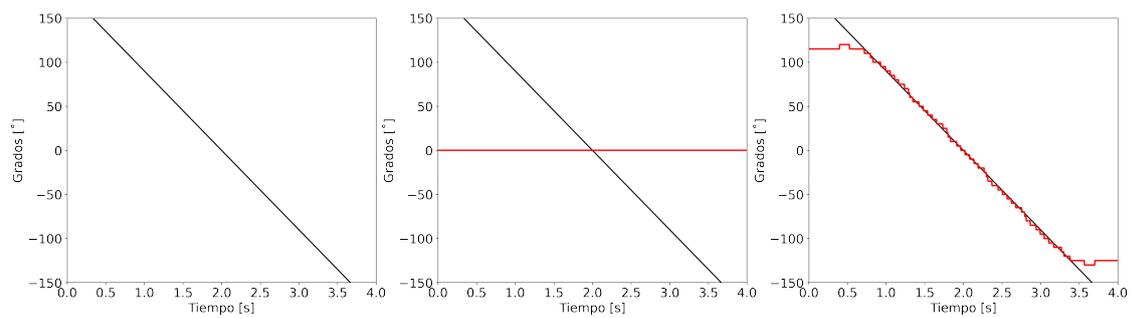


Figura 4.8: Izquierda: Corrección de fase ideal. Centro: Corrección de fase mediante SG (rojo) y corrección de fase ideal (negro). Derecha: Corrección de fase mediante SL (rojo) y corrección de fase ideal (negro).

Capítulo 5

Aplicación en dato de campo

Sección sísmica de Boonsville (Texas, USA)

Los datos de entrada para nuestro ejemplo de campo provienen de una sección sísmica del reservorio Boonsville de la cuenca de Fort Worth en Texas, EE. UU. (Hardage, 1996). El reservorio Boonsville es considerado como uno de los yacimientos de gas más grandes de los Estados Unidos (Alhakeem, 2013). La sísmica fue registrada como parte de un programa de recuperación secundaria de gas entre 1993 a 1996 (Alhakeem, 2013). La sección que analizaremos en este capítulo tiene una corrección de fase cero, pero ha dejado regiones con fase localizada variable (Fomel y van der Baan, 2010). La sección sísmica puede ser descargada de la siguiente dirección: <https://reproducibility.org/data/boonsville/>. El sector de la sísmica 3D de Boonsville no es de acceso público al día de la fecha.

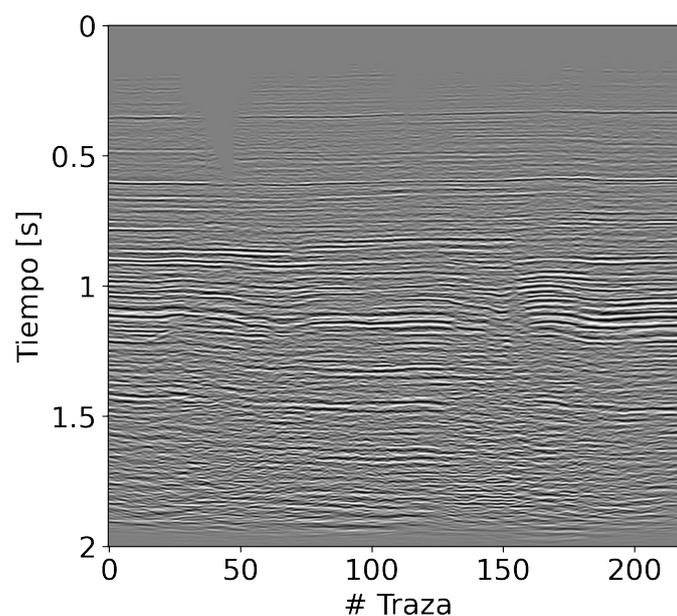


Figura 5.1: Sección sísmica de Boonsville.

Análisis sobre una traza

Consideramos la traza número 20 dentro de la sección sísmica de Boonsville y utilizamos la inversa del SL para corregir al igual que en el artículo científico [Fomel y van der Baan \(2014\)](#). Ilustramos el resultado de la corrección por SL en la Figura 5.2. Utilizamos la inversa del SL y no el SL directamente, ya que observando el *scan* del atributo en ambos casos, en el caso del SL inverso la trayectoria es más clara y continua (Figura 5.3). Como vimos previamente, debemos sumar un desfase constante de 90° luego de seleccionar la trayectoria.

Podemos observar en la figura 5.2 que una sólo traza no alcanza para visualizar el efecto de la corrección del conjunto de la sección. El método de SL muestra su potencial cuando analizamos la sección entera, donde el resultado del método es evidente.

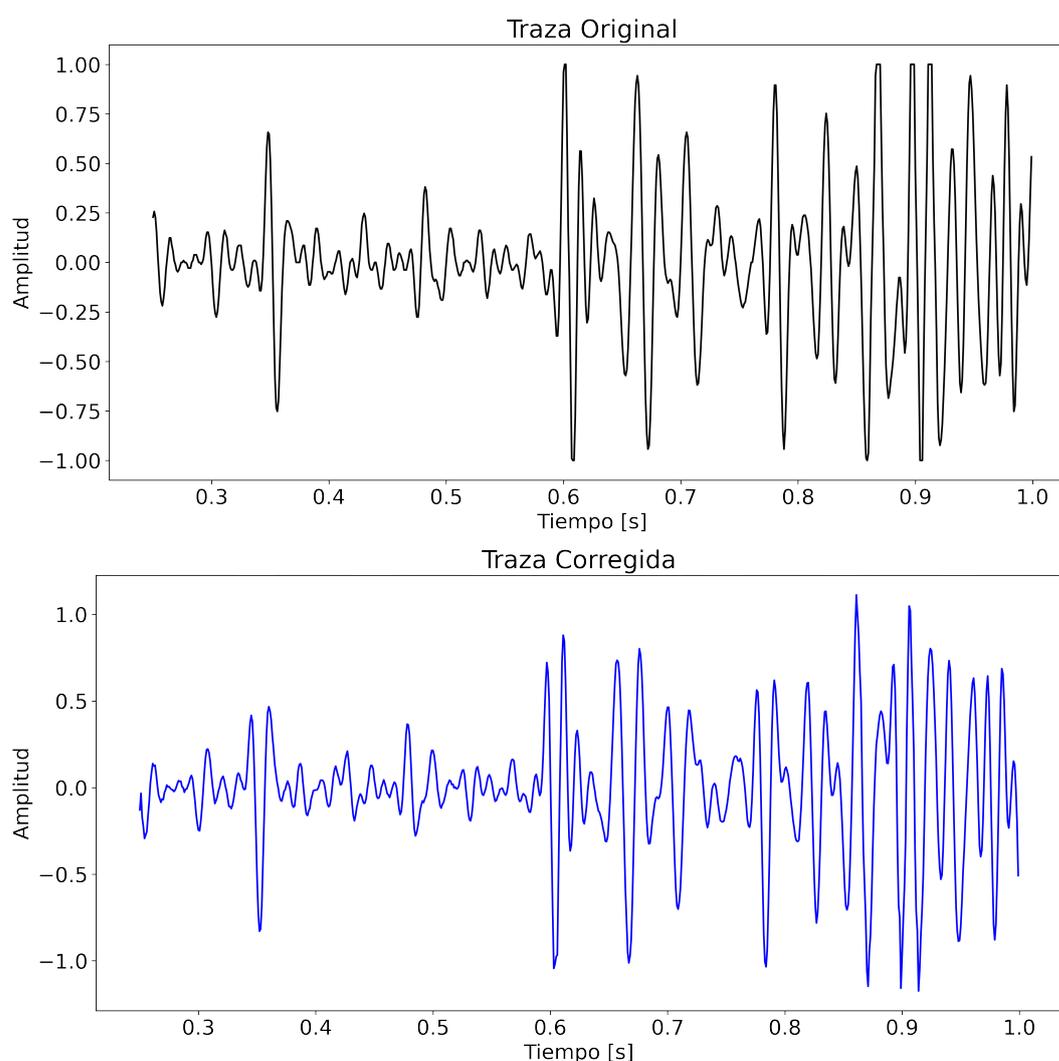


Figura 5.2: Traza número 20 de la sección sísmica de Boonsville (negro) comparada con la traza obtenida luego de la corrección con SL (azul).

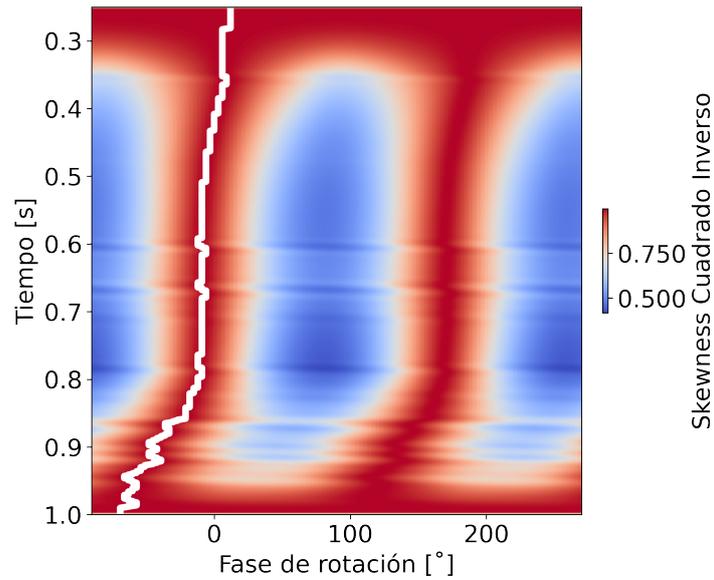


Figura 5.3: *Scan* del atributo de la traza número 20 de la sección sísmica de Boonsville.

Como vimos previamente, una ondícula de fase cero genera una distribución de amplitudes asimétrica. Una distribución asimétrica tiene un $|\kappa|$ menor que una distribución simétrica. Si calculamos y comparamos el *skewness* global de la traza número 20 antes y después de la corrección por SL, vemos que aumenta en valor absoluto el valor del *skewness* en las amplitudes (Figura 5.4).

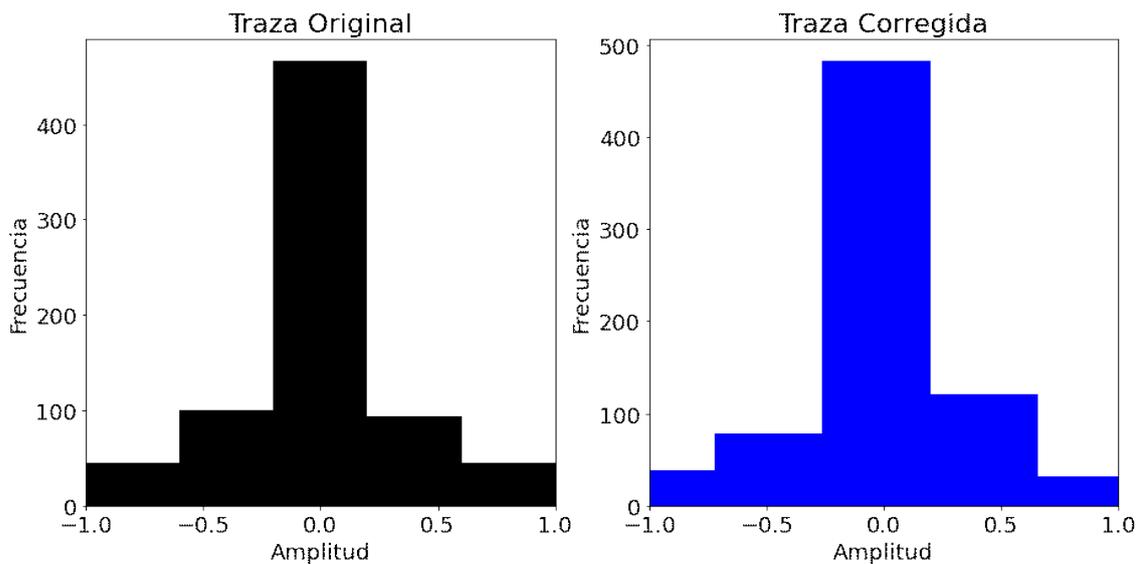


Figura 5.4: Izquierda: histograma de las amplitudes de la traza número 20 antes de la corrección por SL. El SG es $\kappa = 0.11$. Derecha: histograma de las amplitudes de la traza después de la corrección por SL. El SG es $\kappa = -0.42$.

Análisis de un sector

Nuestra secuencia de procesamiento es similar a la utilizada en la Figura 4.3. Analizamos el mismo sector del dato que es considerado por Fomel y van der Baan (2014). El dato comprende las primeras 26 trazas y los tiempos de 0.25 s a 1 s donde se destacan al menos tres reflectores en los tiempos 0.35, 0.60 y 0.78 s. Primero aplicamos rotaciones de fase con diferentes ángulos y calculamos el SL para cada rotación. A continuación, aplicamos el algoritmo de seam carving de programación dinámica adaptado de Avidan y Shamir (2007) para obtener la rotación de fase no estacionaria que maximiza el SL en cada muestra temporal. Finalmente, la corrección de fase se aplica a los datos, y el resultado se muestra en la Figura 5.5.

En el procesamiento se suavizaron las trayectorias de los *scan* de cada traza entre sí para generar resultados continuos. Podemos observar en la Figura 5.5 que en el caso de no suavizar las trayectorias, se pierde continuidad de los eventos y dificulta la interpretación. Este detalle no es reportado en el artículo original del método y es importante considerarlo al aplicar el SL para obtener una corrección continua y sin saltos.

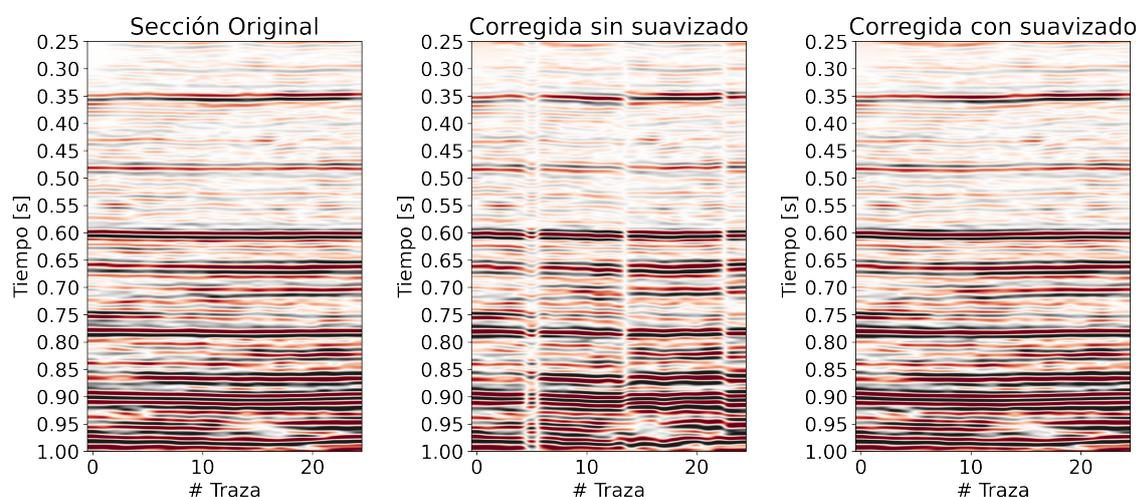


Figura 5.5: Izquierda: Sector de la sección sísmica de Boonsville que contiene 26 trazas. Centro: Sector de la sección sísmica de Boonsville corregida por SL sin suavizado en las trayectorias de las fases detectadas en el *scan* de cada traza entre sí. Derecha: Sector de la sección sísmica de Boonsville corregida por SL con suavizado en las trayectorias de las fases detectadas en el *scan* de cada traza entre sí. Observemos la mejora en la continuidad y la mayor visibilidad de los reflectores en los tiempos 0.35, 0.60 y 0.78 s posterior a la corrección.

Al realizar la corrección de fase dada por SL observamos mejoras en la delineación y continuidad de los eventos sísmicos principales. Estos

efectos pueden ser útiles para mejorar la interpretación estructural y para mejorar la relación entre datos sísmicos y registros de pozos, como señalan Fomel y van der Baan (2014).

Comparación con skewness global y skewness global por ventanas

La corrección de la sección de 26 trazas por SG se ilustra en la Figura 5.6. Podemos observar que los reflectores en los tiempos 0.35 y 0.78 s no cambiaron de forma significativa respecto a la sección original y el reflector en 0.6 s tiene una leve mejora en la continuidad. Obtuvimos un mejor resultado corrigiendo por SL ya que la mejora en la continuidad se observó en los tres reflectores. Para la corrección SG también suavizamos las fases detectadas entre sí para evitar saltos indeseados.

La corrección por SGW también se ilustra en la Figura 5.6, podemos observar que además de no mejorar la continuidad y visibilidad de los reflectores, distorciona la sección original dificultando aún más su interpretación.

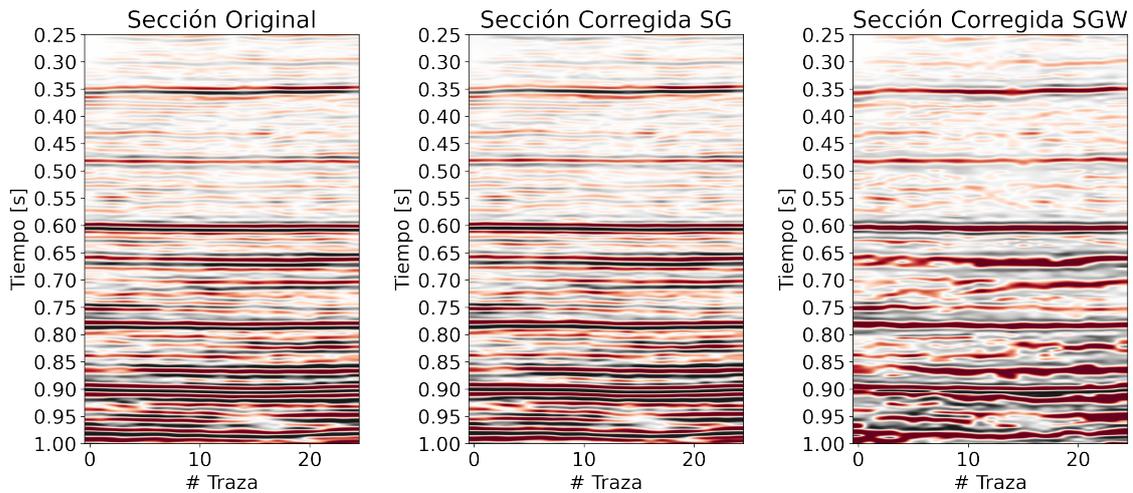


Figura 5.6: Izquierda: Sector de la sección sísmica de Boonsville que contiene 26 trazas. Centro: Sector de la sección sísmica de Boonsville corregida por SG. Derecha: Sector de la sección sísmica de Boonsville corregida por SGW.

Capítulo 6

Discusión breve

A partir de analizar los datos sintéticos, vemos que el método SL funciona muy bien para ejemplos simples como una ondícula de Ricker de fase 90° , una sección sísmica formada por distintas rotaciones de una ondícula de Ricker rotada cada 10° y una traza con rotación lineal de fase. A pesar de que el método SL corrige con menor eficiencia a medida que aumenta la amplitud del ruido, el RMS mantiene un valor bajo. Al comparar el método de SL con el SG, vemos que SL lleva a una mejor corrección de la imagen. Al analizar una sección real de mayor complejidad, observamos que el método SL sigue siendo efectivo y obtiene mejores resultados que SG. El mayor costo computacional de SL respecto a SG es compensado por sus mejores resultados. Los histogramas fueron herramientas útiles para ilustrar que $|\kappa|$ es efectivamente mayor y la distribución de amplitudes es más asimétrica luego de la corrección por SL, lo que sugiere que la traza corregida es más próxima a ser de fase cero localmente.

Capítulo 7

Conclusiones

Por medio de ejemplos sintéticos y datos de campo, corroboramos que el atributo sísmico *skewness* local (SL) es una alternativa eficiente para la corrección a fase cero para señales sísmicas. El SL posee un mayor rango dinámico que la curtosis local, genera resultados más precisos que el SG, logra mejorar la delineación y la continuidad de los reflectores en las secciones sísmicas y además, logra buenas correcciones en presencia de ruido aditivo.

Fue necesario reparar en ciertas características del método SL que no son reportadas adecuadamente en el artículo científico de [Fomel y van der Baan \(2014\)](#). Primero, cuando utilizamos el cuadrado del SL, existe una ambigüedad en el signo del *skewness* local. Esto se traduce a que no podemos distinguir el caso de una fase θ con el caso de una fase de $\theta + 180^\circ$. Por lo tanto, al procesar secciones sísmicas se observan saltos de las trazas, que de no ser apropiadamente corregidos, generan resultados inaceptables a los fines de la interpretación sísmica. Por último, fue necesario suavizar las trayectorias de los *scan* de cada traza entre sí para generar resultados continuos en el dato real considerado. Esto indica que el método involucra etapas de suavizado para dar lugar a resultados de interés. Para ello se requiere cierta experiencia previa en el uso del método SL.

Tres factores importantes sintetizan la aplicación del método SL. A saber: (1) la lectura del artículo científico original ([Fomel y van der Baan, 2014](#)) y de sus referencias más importantes; (2) la programación del código en un lenguaje de alto nivel; (3) la validación con datos sintéticos y registros de campo. Destacamos que trabajar con una publicación reproducible reduce mucho el camino a recorrer al momento de la aplicación tecnológica.

Bibliografía

- Alhakeem, A. A., 2013, 3D seismic data interpretation of Boonsville Field, Texas: Missouri University of Science and Technology.
- Avidan, S., y Shamir, A., 2007, Seam carving for content-aware image resizing: ACM Transactions on Graphics, **26**, no. 3, 1–9.
- Brown, A. R., 2011, Interpretation of three-dimensional seismic data: Society of Exploration Geophysicists and American Association of Petroleum.
- Bulmer, M. G., 1979, Principles of statistics: Courier Corporation.
- Chopra, S., y Marfurt, K. J., 2005, Seismic attributes: A historical perspective: Geophysics, **70**, no. 5, 3SO–28SO.
- Claerbout, J. F., y Abma, R., 1992, Earth soundings analysis: Processing versus inversion:, volumen 6 Blackwell Scientific Publications London.
- Fomel, S., y van der Baan, M., 2010, Local similarity with the envelope as a seismic phase detector: SEG Annual Meeting, pages 1555–1559.
- Fomel, S., y van der Baan, M., 2014, Local skewness attribute as a seismic phase detector: Interpretation, **2**, no. 1, SA49–SA56.
- Fomel, S., 2007a, Local seismic attributes: Geophysics, **72**, no. 3, A29–A33.
- 2007b, Shaping regularization in geophysical-estimation problems: Geophysics, **72**, no. 2, R29–R36.
- Gómez, J. L., y Velis, D. R., 2021, Seismic data resizing using seam carving: Seismic data resizing using seam carving:, 2021 XIX Workshop on Information Processing and Control (RPIC), 1–6.
- Hardage, B. A., 1996, Boonsville 3-D data set: The Leading Edge, **15**, no. 7, 835–837.

- Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., Wieser, E., Taylor, J., Berg, S., Smith, N. J., Kern, R., Picus, M., Hoyer, S., van Kerkwijk, M. H., Brett, M., Haldane, A., del Río, J. F., Wiebe, M., Peterson, P., Gérard-Marchant, P., Sheppard, K., Reddy, T., Weckesser, W., Abbasi, H., Gohlke, C., y Oliphant, T. E., Stanford Exploration Project Report 2020, Array programming with NumPy: Nature, **585**, no. 7825, 357–362.
- Levy, S., y Oldenburg, D., 1987, Automatic phase correction of common-midpoint stacked data: Geophysics, **52**, no. 1, 51–59.
- Paton, G. S., y Henderson, J., 2015, Visualization, interpretation, and cognitive cybernetics: Interpretation, **3**, no. 3, SX41–SX48.
- Roden, R., Smith, T., y Sacrey, D., 2015, Geologic pattern recognition from seismic attributes: Principal component analysis and self-organizing maps: Interpretation, **3**, no. 4, SAE59–SAE83.
- Schoenberger, M., 1974, Resolution comparison of minimum-phase and zero-phase signals: Geophysics, **39**, no. 6, 826–833.
- Trefethen, L. N., y Bau III, D., 1997, Numerical linear algebra:, volumen 50 SIAM.
- Velis, D. R., 2021, Métodos sísmicos de prospección:.
- White, R., 1988, Maximum kurtosis phase correction: Geophysical Journal International, **95**, no. 2, 371–389.
- Wiggins, R. A., 1978, Minimum entropy deconvolution: Geoexploration, **16**, no. 1-2, 21–35.