XVI SIMPOSIO INTERNACIONAL SELPER 2014

La Geoinformación al Servicio de la Sociedad

Memorias

Sociedad Latinoamericana en Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial Capítulo Colombia

30 AÑOS

Medellín, Colombia
29 de Septiembre al 3 de Octubre de 2014

ANÁLISIS COMPARATIVO DE MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN ESPACIAL UTILIZANDO DATOS DE SÍSMICA DE REFLEXIÓN POST-STACK

Mauricio Fernando Rocha Salamanca
Geólogo
Candidato a Magister Ciencias de la Información y las Comunicaciones con Énfasis en Geomática
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad de Ingeniería
Bogotá D.C., Colombia
mrocha73@gmail.com

Diana Margarita Gómez Martínez
Ingeniera Topográfica
Especialista en SIG
Analista de Procesamiento de Datos Sísmicos
dimargom.ing@gmail.com

Resumen

La sísmica de reflexión es uno de las herramientas más importantes en la actividad de exploración de hidrocarburos ya que nos permite obtener una imagen de las estructuras del subsuelo. El tipo de diseño de adquisición de datos sísmicos mas apropiado para obtener un muestreo simétrico es el diseño 3D, que se ve afectado por los vacíos de información generados por las restricciones ambientales por tal razón se hace necesario recurrir a la tecnología de interpolación espacial. Se realizaron análisis comparativos de tres tipos de métodos de interpolación espacial (IDW y KRIGING) utilizando datos X, Y, Z de un programa sísmico 3D localizada en la cuenca del Valle Medio del Magdalena Colombia, obteniéndose mejores resultados con el método KRIGING.

Palabras Clave: Diseño Sísmico 3D, Interpolación Espacial, Geoestadística, IDW, KRIGING.

Abstract

The reflection seismic is one of the most important tools to hydrocarbon exploration and allows us to obtain an image of subsurface structures. The type of design seismic data acquisition for most appropriate symmetrical sampling is 3D design, which is affected by data gaps generated by environmental restrictions, for this reason it is necessary to use spatial interpolation technology. Comparative analyzes were performed in three types of spatial interpolation methods (IDW and KRIGING) using data X, Y and Z of a 3D seismic program in VMM Basin, Colombia obtaining better results with kriging.

Keywords: Seismic 3D Desing, Spatial Interpolation, Geostatistics, IDW, KRIGING.

I. INTRODUCCIÓN

En la industria petrolera, a lo largo de las últimas 7 décadas, el método sísmico de reflexión ha sido la técnica más utilizada en la búsqueda de hidrocarburos. Mediante el procesamiento de datos de sísmica de reflexión es posible obtener una imagen del subsuelo geológico o la estructura de la corteza en profundidad. Cuando una onda sísmica longitudinal o primaria (onda P), encuentra un cambio en las propiedades elásticas del material, como es el caso de una interface entre dos capas geológicas, parte de la energía continúa en el mismo medio (onda incidente), parte se refleja (ondas reflejadas) y el resto se transmite al otro medio (ondas refractadas) con cambios en la dirección de propagación, en la velocidad y en el modo de vibración como se muestra en la figura 1. [*1*]

Los pasos usados en el procesamiento de estas ondas reflejadas dependen de las condiciones de exploración, es decir, en que ambiente la adquisición fue realizada, ya sea dentro del continente o fuera de él, en las montañas o cerca de un río, etc. Sin embargo, los parámetros usados tienen el mismo objetivo, el cual es mejorar la resolución sísmica que incluye la corrección de la amplitud, frecuencia y fase de la onda sísmica, teniendo en cuenta el tiempo de viaje de la señal y suprimiendo el ruido de los datos, este puede ser de dos tipos: coherente donde conocemos su velocidad y frecuencia (ej. múltiples, llegadas directas, etc.) e incoherente donde no se conocen

sus propiedades (ej. viento), todo con el fin de obtener la mejor imagen del subsuelo. [*2*]

Para tener un buen producto de procesamiento de datos sísmicos es necesario tener un muestreo espacial optimo en superficie que proporcione mejores muestras de la onda longitudinal que queremos procesar. Una de las formas de obtención de buen muestreo espacial son los registros de datos sísmicos 3D, como se muestra en la figura 2 [*3*], que consiste en un arreglo simétrico, tanto de los puntos fuentes de la onda sísmica (SHOTPOINTS) como de los puntos de recepción de la misma (RECEIVERS). La sísmica de reflexión tridimensional no solo puede incrementar la precisión de las imágenes de las estructuras del subsuelo sino que puede dar información muy precisa del origen y formación de las capas estratigráficas.

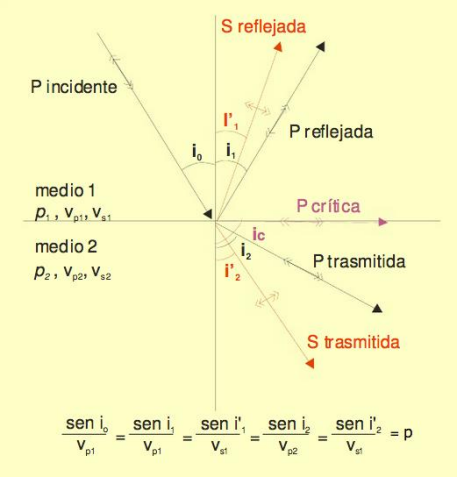

Figura 1: Conversión de una onda longitudinal incidente P. Las ondas sísmicas que viajan por subsuelo se reflejan y se refractan siguiendo la ley de Snell. La cantidad de energía de las ondas incidentes se reparte entre las ondas reflejadas, las refractadas y la absorción natural del terreno. [*1*]

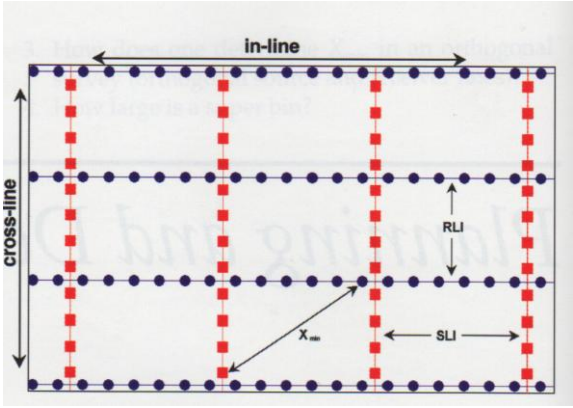

Figura 2: Diseño de Adquisición de Sísmica 3D. En Rojo los puntos de muestreo de Fuentes y en Azul los puntos de muestreo de Recepción [*3*]

Los intervalos básicos entre la ubicación de puntos fuentes Δx_s y puntos $\Delta\ x_r$ de recepción están dados por la siguiente fórmula: [*4*]

$$\Delta x_s \leq\ \Delta\ x_r \leq\ \frac{Vel_{min}}{2f_{max}} \tag{1}$$

es decir que si queremos muestrear ondas longitudinales con una velocidad mínima de 2500 m/s con frecuencias máximas de 75 Hz los intervalos Δx_s y $\Delta\ x_r$ deben ser menores o iguales a 33.33 m. [*4*]

Obtener un muestreo espacial regular es a menudo más costoso o difícil de lograr por la gran cantidad de datos que se deben recolectar, pero es de vital importancia para lograr una buena resolución sísmica. Intervalos demasiado grandes en el muestreo espacial pueden generar problemas en la calidad de la imagen sísmica del subsuelo. Una alternativa para minimizar este problema es la interpolación de información sísmica. [*5*]

La interpolación es un procedimiento matemático de ajuste de una función a puntos no muestreados, basándose en valores obtenidos en puntos muestreados. Las estimaciones de casi todos los métodos de interpolación espacial se pueden representar como medias ponderadas de los datos incluidos en la muestra. Todos ellos comparten la misma fórmula general de estimación, de la siguiente manera [*6*]:

$$\hat{z}(x_0)\ =\ \sum_{i=1}^{n} \lambda_i z(x_i) \tag{2}$$

donde $\hat{z}$ es el valor estimado de un atributo en el punto de interés (x_0), z es el valor observado en el punto de muestra (x_i), λi es el peso asignado al punto muestreado y n representa el número de puntos de muestra usados para la estimación. El atributo z suele denominarse la variable primaria. [*7*]

La importancia de los métodos de interpolación aplicados a datos sísmicos de reflexión es el de estimar valores no muestreados en una determinada región. Diferentes métodos de interpolación espacial han sido utilizados con frecuencia para la estimación de diversas variables. Aun no existe en la literatura un método que tenga un mejor desempeño frente a los demás. Distintos métodos ofrecen diferentes desempeños, de acuerdo a las características iniciales, es así que se debe determinar el mejor método para cada situación espacial. [*8*]

Por lo expuesto anteriormente, el objetivo del articulo es analizar y comparar métodos de interpolación espacial, determinando el método que tenga un desempeño adecuado para los datos de sísmica de reflexión para una región determinada. Se propone comparar algunos métodos de interpolación espacial con la finalidad de obtener información de coordenadas X,Y,Z en un volumen de sísmica 3D con procesamiento Post-Apilado del área de la cuenca del Valle Medio del Magdalena.

II. DATOS Y MÉTODOS

A. Muestreo Espacial en Datos Sísmicos de Reflexión

Para un diseño de sísmica de tipo 3D los arreglos de los puntos fuente deben ser necesariamente idénticos a los arreglos de los puntos de recepción para obtener resultados óptimos en el procesamiento de la información, esto introduce el concepto de muestreo simétrico como pre-requisito para la adquisición de los datos sísmicos. [*9*]

En este tipo de sísmica el problema de muestreo espacial aumenta dramáticamente ya que el diseño de esta forma de adquisición de datos no proporciona una cobertura regular puesto que la ubicación de los puntos fuentes y de los puntos de recepción y sus intervalos de espaciamiento no son lo suficientemente pequeños por costo y logística, igualmente las restricciones ambientales ocasionan la imposibilidad de ubicar estos puntos de muestreo. [*10*] [*11*]

En los últimos años la interpolación espacial de datos sísmicos se ha hecho muy popular para mejorar el muestreo simétrico de la información, para lograr esto se han aplicado diferentes métodos en distintos dominios (Interpolación 5D), que son aplicados dependiendo del área y la forma de los datos adquiridos. [*5*] [*12*] [*13*]

Obtener el mejor muestreo simétrico en un diseño de sísmica 3D permitirá un procesamiento óptimo de la información y tiene en cuenta un criterio que siempre se pasa por alto llamado la continuidad espacial. [*9*]

B. Interpolación Espacial

La interpolación espacial se puede definir como el procedimiento para la estimación de valores de propiedades o atributos en lugares donde no han sido muestreados a partir de datos obtenidos dentro de un área específica. [*7*]

El proceso de interpolación está compuesto por los siguientes pasos: [*14*]

- Establecer las entidades espaciales y sus atributos relacionados.
- Establecer el atributo espacial que se quiere estimar por la interpolación.
- Establecer la escala de medición de los datos adquiridos.
- Establecer la relación entre los datos observados y la técnica de interpolación (función matemática).

C. Métodos de Interpolación Espacial

Numerosos métodos han sido desarrollados para la interpolación espacial para diversas disciplinas y existen diferentes términos para distinguirlos.

Estos métodos se dividen en tres categorías: los métodos no geoestadísticos, métodos geoestadísticos y los métodos combinados. En geoestadística, los métodos que son capaces de utilizar la información secundaria, se refieren a menudo como "multi-variable", mientras que los métodos que no utilizan la información secundaria se llaman "univariados ". Aquí hay que señalar que por lo general multivariante se refiere a más de una variable de respuesta, a pesar del hecho de que en algunas referencias también se refieren a más de una variable explicativa. [*7*]

También pueden categorizarse bajo diferentes criterios, los más importantes son: [*7*]

- Local o global, es decir si se utilizan datos de mediciones locales (pocas muestras) o globales (conjunto de muestras) para la interpolación.
- Exacto o aproximado, en el primero los valores de los datos de entrada a la interpolación deben ser los mismos que en el resultado final de la interpolación, los interpoladores aproximados pueden arrojar valores iguales o estar muy cercano a los valores de entrada al a interpolación.
- Gradual o abrupto, los interpoladores graduales se distinguen por la continuidad de la superficie que producen, mientras que los abruptos producen superficies no tan suavizadas.
- Determinístico o estocástico, para el primero se asume que el comportamiento de los atributos a interpolar puede ser descrita por una función matemática, mientras que los interpoladores estocásticos incorporan el concepto de aleatoriedad, es decir el comportamiento del atributo a interpolar se puede describir por funciones aleatorias.

En este articulo se analizaron los métodos más conocidos de interpoladores espaciales que se muestran a continuación:

1) Método de Interpolación IDW (Inverse Distance Weighted): esta basado en la distancia inversa ponderada que calcula los valores de un atributo en puntos no muestreados usando una combinación lineal de los valores en puntos de la muestra ponderada (peso) por una función inversa de la distancia, es decir el peso es inversamente proporcional a la distancia. Cuanto más cerca esta el punto muestreado al punto a estimar, mayor será la influencia sobre el valor de medición de la posición que hay que resolver. Este método puede ser expresado en la siguiente ecuación: *[7] [*15*] [*16*] [*17*]*

$$\hat{z} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{(d_i)^p} z(x_i)}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{(d_i)^p}} \tag{3}$$

donde $\hat{z}$ es el valor a ser estimado, $z(x_i)$ son las diferentes muestras de entrada usadas para la interpolación, (d_i) es la distancia desde el punto muestreado al punto a interpolar y p es el valor

ponderado de la distancia. Este tipo de método es determinístico, local, exacto y gradual

2) Método de Interpolación Kriging Ordinario: es un método analítico, donde la función de interpolación depende de la autocorrelación espacial de la variable, que se representa en variogramas. Utiliza datos tabulares y su posición geográfica para el cálculo de las interpolaciones. Utilizando el principio de la primera ley geográfica de Tobler, que dice que las unidades de análisis más próximas entre si son mas similares que las unidades más lejanas, el kriging utiliza funciones matemáticas para añadir más peso en las posiciones más cercanas a los puntos de muestreo y menores pesos en posiciones más distantes, y así crear nuevos puntos interpolados basados en estas combinaciones lineares de datos. Además está basado en optimizar funciones usando autocorrelación espacial. Puede definirse por la siguiente ecuación: *[7] [15] [16] [17]*

$$\hat{z}(x_0) - \mu = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \left[z(x_i) - \mu(x_0) \right] \tag{5}$$

donde $\hat{z}$ *es el valor a ser estimado,* μ es una media estacionaria conocida, supone que es constante sobre todo el dominio y se calculó como el promedio de los datos. El parámetro λ_i es el peso Kriging; n es el número de puntos de muestra usados para hacer la estimación y depende del tamaño de la ventana de búsqueda y $\mu(x_0)$ es la media de las muestras dentro de la ventana de búsqueda. Este tipo de interpolador tiene caracteristicas estocasticas, locales, gradual y exacto. *[18] [19]*

D. Área de Estudio

El área de estudio cubre aproximadamente 45 km2 y esta localizada al sureste del municipio de Puerto Nare, en el Departamento de Antioquia, el terreno es plano a semi-plano con un rango de elevaciones que van desde 130 m a 185 m sobre el nivel del mar. La geología superficial consta de rocas sedimentarias de origen fluvial generadas por la influencia del Río Magdalena, y hace parte del bloque Remanso 3D como se muestra en la figura 3. [*20*]

Figura 3. Área de Estudio [*20*]

Se tienen como datos de entrada los puntos de muestreo de fuentes y de puntos de recepción realizados en el proyecto sísmico Garibay 3D como se muestra en la figura 4:

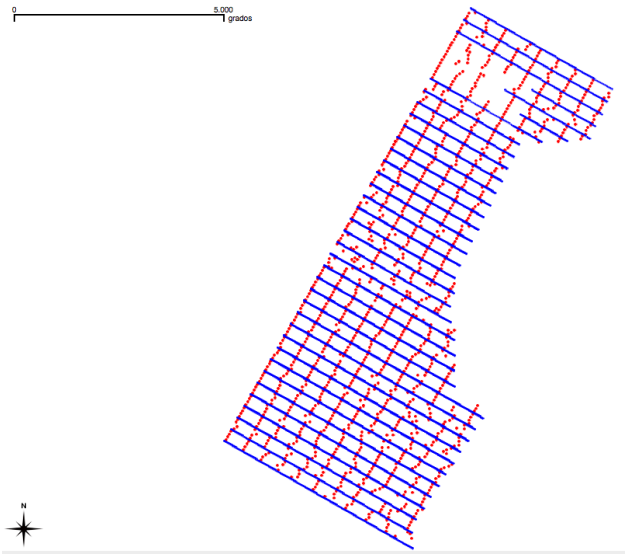

Figura 4: Diseño Sísmico Remanso 3D (Puntos Fuente en Rojo, Puntos de Recepción en Azul) Fuente: Autor

Como se puede ver en la figura 4 la distribución de los puntos recolectados no presenta una distribución espacial simétrica y se tiene un área de falta de información en la parte norte del diseño por la imposibilidad de localizar puntos de muestreo.

Para el procesamiento de los datos sísmicos se hace necesario tener la información que abarque todo el área de estudio del modelo de elevaciones, para esto se realizaron

III. RESULTADOS

En la figura 5 se ilustran los dos mapas temáticos de amplitudes generados mediante los métodos de interpolación espacial anteriormente descritos y comparándolos con el mapa de los datos de entrada. Los método IDW y KRIGING eliminaron los valores más altos y más bajos, produciendo un suavizado generalizado.

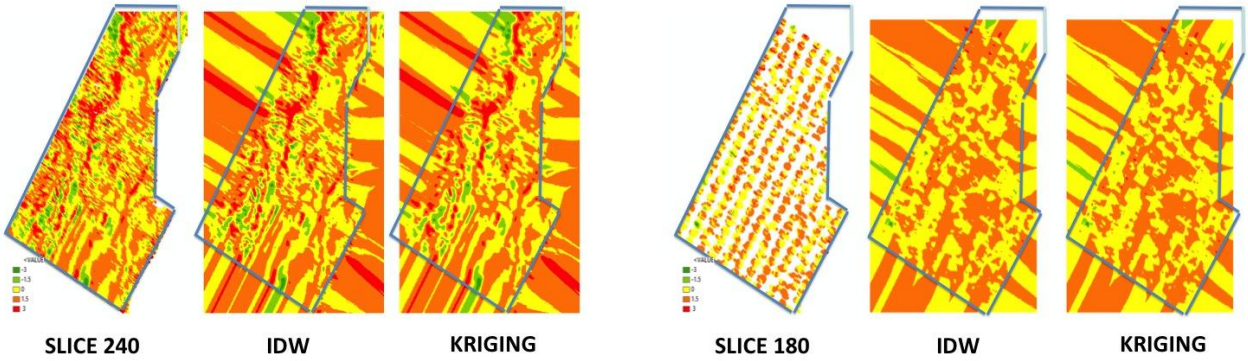

Figura 5: Mapas Temáticos con los Resultados Obtenidos con los Diferentes Métodos de Interpolación Espacial. Fuente: Autor

A. Precisión de los interpoladores

Hay una gran cantidad de índices que se utilizan para evaluar la precisión de los métodos de interpolación, el error medio cuadrático es el estándar para evaluar los resultados de los métodos de interpolación ya que reflejan los errores de estimación general y la sensibilidad de la estimación y el efecto extremo de la utilización de las muestras, y pueden definirse por la siguiente formula: [*16*] [*17*]

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(Z_x - Z_i)^2} \quad (6)$$

donde Z_x es el valor estimado, Z_i es el valor real, N es el número de la muestra de los datos de inspección y R_{MSE} es el error medio cuadrático.

Se tomaron 5 muestras y se calcularon los errores medio cuadráticos para cada método de interpolación que se resumen en la tabla 1:

TABLE I. ERROR MEDIO CUADRATICO PARA CADA METODO DE INTERPOLACION DE 5 DIFERENTES MUESTRAS ALEATORIAS

X	Y	Z	IDW	RMSE	KRIGING	RMSE
933640	1156845	-1.688	-1.6854	0.1163	-1.6879	0.0045
934915	1158268	1.683	1.6709	0.5535	1.6782	0.2147
936448	1157880	1.641	1.6342	0.6315	1.6390	0.2326
937372	1156199	-1.659	-1.6560	0.6456	-1.6572	0.2461
936855	1158638	1.658	1.6559	0.6524	1.6592	0.2519

B. Discusión

El método de interpolación KRIGING obtuvo los valores más próximos a los reales. Estos resultados podrían estar relacionados a que este método resulta más apropiado en los casos en que exista con claridad una

variación espacial sistemática en la variable, la cual puede ser captada adecuadamente por una superficie relativamente simple. Y utilizar este procedimiento nos describe una tendencia global, por lo que produce resultados muy suavizados y normalmente muy adecuados.

Aunque el método IDW no obtuvo los valores más próximos a los reales no se puede descartar ya que presenta error medio cuadrático aceptables y produce superficie más suavizada que la KRIGING.

Cada método tiene sus ventajas y desventajas, que dependen en gran medida de las características del conjunto de puntos de datos. Es así que el KRIGING elimina los valores más altos y más bajos, de cara a obtener un menor error en la estimación. Este método ofrece una mayor consistencia estadística, un análisis más elaborado, una interpolación menos brusca, con aéreas de transición menos abruptas y con menores errores de predicción.

IV. Conclusiones

Los métodos de interpolación espacial KRIGING y IDW obtuvieron resultados con alto rendimiento ya que presentaron valores más cercanos a los datos reales y superficies mas coherentes con los modelos digitales del área.

Para la ubicación de los datos sísmicos del programa sísmico analizado el método de interpolación espacial KRIGING fue el que obtuvo los resultados estimados más próximos a los datos reales con cálculos de errores medios cuadráticos más bajos.

En resumen los resultados obtenidos nos pueden sugerir que los métodos de interpolación espacial IDW como el KRIGING se pueden utilizar para la interpolación de atributos de amplitudes en datos Post-Apilados en un volumen procesado de sísmica 3D.

Agradecimientos

Queremos agradecer a A NewNorth Consulting S.A.S y COMTROL S.A por permitir la publicación de estos datos y al apoyo recibido.

Referencias

[1] Maria Antonieta Gayá Florez, "Procesado de Sísmica de Reflexión Superficial en la Cuenca de Ainsa, Huesca (España)," Ingeniería Geofísica, Universidad Simón Bolivar, Caracas, Venezuela, Proyecto de Grado 2005.

[2] William A. Schneider, "3D Seismic: A Historical Note," in *Geophysics Reprint Series*, Bob A. Hardage, Ed. Tulsa, Oklahoma, USA: Society of Exploration Geophysicists, 2001, p. 857.

[3] Andreas Cordsen, *Planning Land 3D Seismic Surveys*, 2nd ed., Bob A. Hardage, Ed. Tulsa, Oklahoma, USA: Society of Exploration Geophysicits, 2005.

[4] Gijs J.O. Vermeer, *3D Seismic Survey Design*, Second ed., Graig J. Beasley, Ed. Tulsa, Oklahoma, USA: Society of Exploration Geophysicists, 2005.

[5] Daniel Trad, "Five-dimensional Interpolation: Recovering from Adquisition Constrains," *Geophysics*, vol. 74, no. 6, pp. 123-132, June 2009.

[6] G Webster and M.A. Oliver, *Geostatistics for Enviromental Scientist*. Chichester, England: John Wiley & Suns Ltd, 2001.

[7] Jin Li and Andrew D. Heap, *A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists*. Canberra, Australia: Geoscience Australia, 2008.

[8] Shu-Guang Liu, Xi Chen, Shu-Hong Peng, Ying-Lian Ma, and Jing Qian, "A Study of Two Data Grid Interpolation Algorithm Based on Surfer Software," *Proceedings of the Ninth International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, pp. 1045-1049, July 2010.

[9] Biondo L. Biondi, *3D Seismic Imaging*, 1st ed., Michael R. Cooper, Ed. Tulsa, Oklahoma, USA: Society of Exploration Geophysicists, 2006.

[10] Sergey Fomel, "Seismic Reflection Data Interpolation with Differential Offset and Shot Continuation," *Geophysics*, pp. 733-744, March-April 2003.

[11] Yang Liu and Sergey Fomel, "Seismic Data Interpolation Beyond Aliasing Using Regularized Nonstationary Autoregression," *Geophysics*, vol. 76, pp. 69-77, January-February 2011.

[12] Jon Downton, Lee Hunt, Daniel Trad, Scott Reynolds, and Scott Hadley, "5D Interpolation to improve AVO and AVAZ: a quantitative case history," *Canadian Journal of Exporation Geophysics*, vol. 37, no. 1, pp. 8-17, June 2012.

[13] Peter Cary and Mike Perz, "Footprint Attenuation with 5D Interpolation," *CSEG RECORDER*, pp. 29-33, November 2012.

[14] Shu-Qin Wang and Hong-Shuai Zhao, "Cubic-Spline Reconstruction of Irregular Seismic Data Using Linear Time Shift," in *Proceedings of the 2009 International Conference on Wavelet Analysis*, Baoding, 2009, pp. 448-453.

[15] N. et al Pirmodian, "Comparing of Interpolation Methods in Rice Cultivation Vulnerability Mapping due to Groundwater Quality in Guilan, North of Iran," in *2010 International Conference on Enviromental Engineering and Applications (ICEEA 2010)*, 2010, pp. 147-150.

[16] Guoliang et al Zou, "The Comparison and Study of Small Sample Data Spatial Interpolation Accuracy," in *2010 Sixth International Conference on Natural*

Computation (ICNC 2010), 2010, pp. 1897-1900.

[17] Hua Xu, Qiang Wu, Hongzhuan Lei, and Shiyong Li, "Study on Spatial Interpolation Method and Its Application," in *International Conference on Audio, Language and Image Processing*, Shanghai, 2012, pp. 1057-1061.

[18] Nengzhong Lei, Xinyuan Wang, and Jingang Jiang, "Comparison and Research of Kriging Interpolation Precisions for Different Terrrains and Sampling Data," *Hydrogeology & Geology-engineering*, no. 5, 2008.

[19] Baozheng Chen and Deli Cai, "Research of the Ordinary Kriging Interpolation Algorithm," *Geomatics & Space Geo-Information*, no. 6, 2009.

[20] NewNorth Consulting S.A., "Informe de Reprocesamiento Sísmico Remanso 3D," NewNorth Consulting S.A., Bogotá D.C., Informe Final 2013.