



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA



PARA LA OBTENCIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL DE GEÓLOGA

***FILTRADO GEOESTADÍSTICO DE ERRORES DE MEDICIÓN
CASO ESTUDIO CON DATOS PROVENIENTES DE SÍSMICA DE REFLEXIÓN,
CALLOVO-OXFORDIANO***

Autora: Danitza Aburto Mardones

Profesor Guía:

Dra. Verónica Oliveros Clavijo

Profesores Comisión:

Dra. Fernanda Álvarez Amado

MsC. Liubow González Martínez

Resumen

En el marco de las investigaciones llevadas a cabo por la ANDRA, las que buscan evaluar la factibilidad de crear un vertedero de desechos radiactivos en la formación arcillosa del Callovo-Oxfordiano, esta tesis concierne a la cartografía de la geometría de la formación. La geometría es estudiada a través de la variable tiempo, registrada a lo largo de perfiles sísmicos, orientados según dos direcciones principales. En las intersecciones de los perfiles, los valores registrados de la variable de interés son diferentes. El bajo número de intersecciones, no permite un estudio detallado del comportamiento espacial de dichas diferencias, ellas son analizadas a través del pseudo-variograma cruzado. El análisis variográfico permite elegir un modelo coherente para el conjunto de los perfiles. Este modelo permite la corrección de las mediciones entregando una base de datos corregida para la futura estimación de la geometría de la zona de interés.

Palabras Claves: Filtrado geoestadístico, sísmica de reflexión, pseudo-variograma cruzado.

Agradecimientos

Mis agradecimientos van dirigidos a la ANDRA, al Centro de Geoestadística de la École des Mines de Paris, a Jean Luc Mari, a Hélène Beucher, a Dominique Vassiladis, a Verónica Oliveros, a Liubow González, a Fernanda Álvarez, a Carolina Rojas y a todos quienes de diferentes formas pero con mucha dedicación y cariño me apoyaron para llevar a cabo este estudio.

Dedicación

Esta tesis la dedico a los cuatro soles que alumbran y le dan calidez a mi corazón.

1. Introducción

Hace unos cincuenta años que la utilización de las propiedades radioactivas del uranio para producir electricidad es común y, por lo tanto, como en cualquier proceso industrial, se presenta el problema de gestión de los residuos. Es necesario prever el futuro de los residuos radioactivos, ya que presentan un peligro serio tanto para el ser humano como para el medio ambiente.

En esta perspectiva nació la Agencia Nacional para la Gestión de los Residuos Radioactivos (ANDRA), un establecimiento público francés de carácter industrial y comercial creado por la ley del 30 de diciembre de 1991, cuya misión es encargarse de todos los residuos

radioactivos producidos en el pasado y los que lo serán de aquí al fin del programa nuclear. Los distintos residuos radioactivos están ordenados según su nocividad, los menos nocivos son almacenados en superficie y vigilados constantemente. En cuanto a los de alta radioactividad y por lo tanto más nocivos, se consideró almacenarlos en profundidad. Esto llevó a la ANDRA a construir, el 2000, un laboratorio subterráneo de investigación para evaluar la posibilidad de ese almacenamiento. Ese sitio está ubicado en la comuna de Bure (Meuse / Haute-Marne, Francia), en la formación arcillosa del Callovo-Oxfordiano (Jurásico), a una profundidad de unos 500 m.

El laboratorio de Bure se dedica a varias investigaciones *in situ* para evaluar la factibilidad del almacenamiento de residuos radioactivos. El resultado de algunas de estas investigaciones permitió acotar el área de interés a unos 250km² llamada zona de transposición. El objetivo de la ANDRA es caracterizar la geometría de esta zona de transposición y la variabilidad interna de la misma, a partir de datos provenientes de sísmica de reflexión y pozos geofísicos.

Toda medición tiene siempre un error asociado, debido tanto a la naturaleza de la medición como también a la naturaleza geológica del sector en estudio. La hipótesis de trabajo consiste en tratar una variable como la descomposición de ésta en dos: la variable que representa la característica a evaluar y un error asociado a la naturaleza de la medición. El estudio de esta nueva variable a través de la herramienta geoestadística pseudo-variograma cruzado, permite filtrar el error asociado.

1.1 Objetivo General

Filtrado geoestadístico del error de medición asociado a la variable tiempo sísmico, variable que representa las profundidades de las interfaces del Callovo-Oxfordiano.

1.2 Objetivo Específico

Análisis exploratorio de la variable residuo.

1.3 Localización de la zona de estudio

La zona de estudio se sitúa a unos 230 km al Este de Paris (**Figura 1**), en la región de Meuse/Haute-Marne, a una profundidad de unos 500 m. La superficie llega casi a 250 km² y se extiende hacia el norte a partir del laboratorio subterráneo.



Figura 1: Localización del laboratorio de Bure.

2. Marco Geológico y Definición del Problema

La formación del “Callovo-Oxfordiano” comprende todas las series de arcillolitas del Calloviano y del Oxfordiano inferior. Descansa en la formación caliza del Dogger y está cubierta por la formación caliza del Oxfordiano. El contraste geológico entre esas formaciones es visible en la sísmica. Esos contrastes localizan los horizontes que limitan la zona de estudio, llamadas horizonte S0 para el límite inferior (correspondiendo a la frontera Dogger-Calloviano) y horizonte S2 para el límite superior (correspondiendo a la frontera Oxfordiano inferior - Oxfordiano medio). Un marcador intermedio en la unidad SOS2, llamado S1, también se estudia para ser utilizado posteriormente en el estudio de las propiedades internas de los estratos.

2.1 Geología del Calloviano-Oxfordiano

La zona de estudio pertenece al borde N.NE de la cuenca parisina. El interés para esta tesis se centra en una pequeña porción de tiempo en lo que cubre la evolución de la cuenca: la que pertenece al periodo jurásico, entre el Calloviano medio y el Oxfordiano inferior (ambos incluidos).

Una de las características de ese período es su anegamiento progresivo por el mar, junto con la desaparición de la mayoría de las plataformas carbonatadas. Al complejo esquema de distribución de las plataformas ancianas sucede un colmo progresivo a partir del NE hacia el SW y una sedimentación dominante arcillosa (Ref. Informe de ANDRA, versión de trabajo, 2009). Ese cambio se interpreta en general como el resultado de un ciclo transgresivo de segunda clase (Guillocheau, 1991), pero muchos autores le atribuyen un origen climático con una modificación del ciclo del carbono (Dromart y otros., 2003).

La formación sedimentaria del Callovo-Oxfordiano está encajada entre las formaciones calizas Edel Dogger (abajo) y las del Oxfordiano (arriba). Es una formación compuesta esencialmente de arcillolita. La arcillolita corresponde a una roca sedimentaria compuesta por lo menos de 60 % de partículas de tamaño inferior a $4 \mu\text{m}$, con una composición mineralógica a predominancia de minerales arcillosos y una gran cantidad de cuarzos y de carbonatos.

Globalmente, los cuerpos sedimentarios son progradantes del NE hacia el SW, ya que los cuerpos adelgazan hacia el SW. Las evoluciones/variaciones del nivel marino que tienen por consecuencia variaciones verticales, de la composición mineralógica, o de la textura, permitieron dividir la formación en tres secuencias de sedimentos bien diferenciados (ANDRA, 2005). En general, en las tres secuencias, los aportes silicoclásticos finos vienen del noreste de la zona de transposición.

La Figura 2 muestra un corte vertical esquemático del Callovo-Oxfordiano con los contactos de las formaciones calizas del Dogger (abajo) y del Oxfordiano (arriba). Dentro del Callovo-Oxfordiano aparecen los límites de las tres secuencias verticales descritas arriba: S0, S1 y S2.

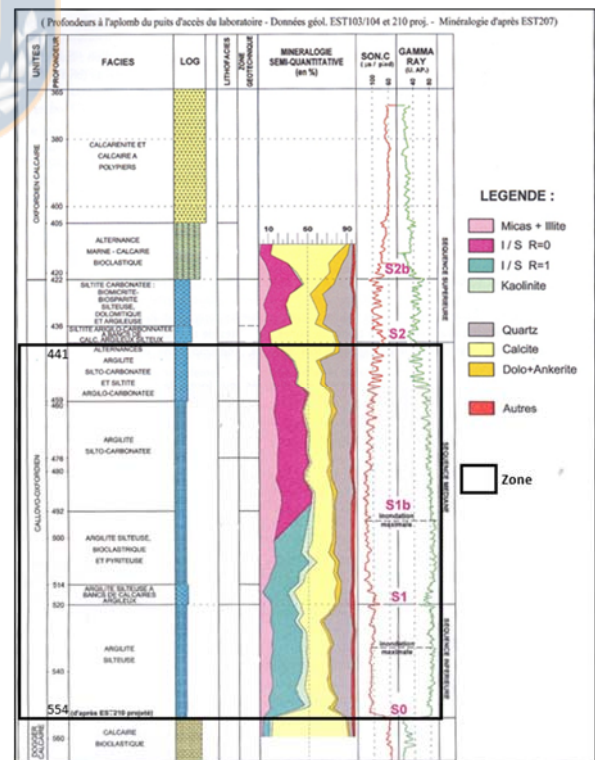


Figura 2: Variaciones verticales litológicas y mineralógicas del Callovo-Oxfordiano.

Variabilidad vertical

Las variaciones verticales se deben a las variaciones del nivel marino relativo durante el Callovo-Oxfordiano. Son esas variaciones que permitieron diferenciar las tres secuencias descritas antes.

Los procesos sedimentarios inducen variaciones verticales en las proporciones relativas de los tres minerales principales que constituyen la arcillolita: cuarzo, carbonatos y minerales arcillosos. En general, las bases de secuencias son más carbonatadas, los de máxima inundación más arcillosos; los porcentajes de cuarzo, en forma de limos, tienen una evolución diferente.

Las propiedades mecánicas de las arcillolitas varían según su composición mineralógica, resultando más sensibles a las variaciones de los porcentajes en carbonatos y en limos. Es en las zonas más ricas en arcillas (máximo de inundación de la secuencia mediana), que presenta un comportamiento más homogéneo, donde debería implantarse el almacenamiento de desechos.

Variabilidad lateral

Las condiciones paleogeográficas y/o climáticas permitieron que se depositen partículas finas para formar cuerpos sedimentarios ampliamente repartidos en un fondo marino relativamente plano. Resulta una variabilidad lateral débil en la zona de transposición. La presencia de unos episodios a sedimentación condensada y de posibles hiatos no modifica las propiedades intrínsecas de la formación.

2.2 Contexto teórico de la naturaleza de los datos

Sísmica mediante reflexión 2D

La sísmica descansa en el mismo principio que la radio, la televisión o los anillos que el pescador hace en el agua al tirar su anzuelo. Estos fenómenos se explican mediante la teoría de propagación de ondas (Mari y otros, 1998).

Para tener una imagen del subsuelo a partir del método sísmico, hay que disponer de los elementos siguientes (MARI y otros, 2001):

- Una fuente; es decir, un dispositivo emisor capaz de provocar una deformación en el medio (subsuelo). Las fuentes sísmicas usadas para crear un sismo artificial son el explosivo, las caídas de peso y los vibradores.

- Un receptor, llamado geófono. Es el dispositivo capaz de registrar esas deformaciones por las variaciones de desplazamiento de las partículas. Un geófono se compone de una bobina suspendida a un resorte. Cuando el geófono vibra por los movimientos del suelo, la bobina produce una fuerza electromotriz y por ende una señal eléctrica proporcional a la velocidad de desplazamiento de las partículas del suelo.
- Un laboratorio de registro numérico.

El método sísmico consiste en someter al subsuelo a la energía producida por un sismo artificial por medio de un dispositivo emisor desde la superficie, luego en registrar la respuesta del subsuelo a esa energía sobre dispositivos receptores compuestos de trazas. Una traza sísmica puede ser un geófono o captor único o un conjunto de geófonos formando una antena receptora. El dispositivo emisor puede ser compuesto de una o varias fuentes. El conjunto de las trazas producidas por el mismo sismo forma una grabación sísmica. Cada grabación sísmica se compone de muestras, es digitalizada y luego memorizada en un soporte magnético al nivel del laboratorio de grabación. Los dispositivos emisor y receptor forman un tiro sísmico. Un perfil sísmico es un conjunto de tiros (Mari y otros, 2001).

La energía emitida por la fuente se distribuye entre ondas de volumen y ondas de superficie. La sísmica de reflexión usada en este trabajo se interesa sobre todo en las ondas reflejadas primarias (ondas P), que suben a la superficie después de la reflexión con la interfase que separa dos capas o formaciones distintas.

La **Figura 3** muestra el principio de la sísmica de reflexión. El subsuelo está representado por dos formaciones geológicas llamadas horizonte I y horizonte II. La fuente se sitúa al centro del dispositivo receptor. Las ondas reflejadas en el interfaz de los horizontes son materializadas por sus rayos que vuelven a la superficie.

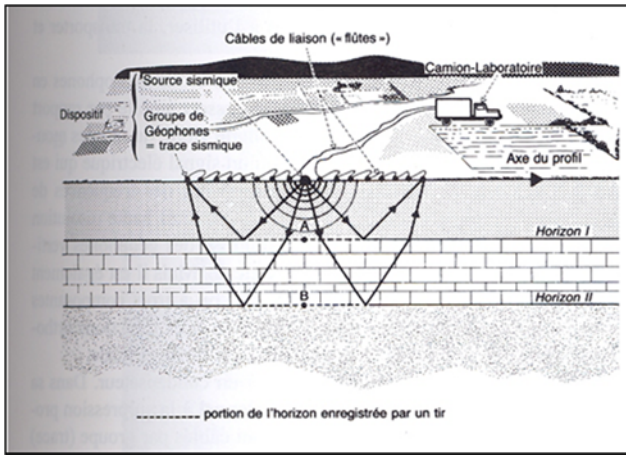


Figura 3: Principio del método sísmico y adquisición de los datos (Fuente: documento IFP, 1998).

El dispositivo emisor-receptor en la **Figura 3** representa un tiro sísmico. Éste “aclara” la porción de la interfase representada como una línea punteada. Cada punto de la interfase “aclaramado” se llama *punto espejo*. Para tener una imagen continua de la interfase, se desplaza el dispositivo emisor-receptor formando una serie de tiros sísmicos a lo largo del perfil.

Un punto espejo de la interfase puede estar “aclaramado” por distintos tiros, como lo es el caso para una adquisición en cobertura múltiple. Ese tipo de adquisición es la más eficiente en sísmica mediante reflexión.

La adquisición de los datos está seguida por varias etapas que no se presentarán aquí, ya que el objetivo es brindar algunas definiciones y nociones básicas de la sísmica de reflexión que permitirán al lector entender los datos usados en el resto del trabajo.

Entonces, la imagen obtenida después del tratamiento es una sección sísmica (**Figura 4**). El eje horizontal de la sección representa las abscisas geográficas de los puntos a lo largo del perfil de adquisición y el eje vertical representa el tiempo de llegada de la onda. Los eventos sísmicos que aparecen en esta sección corresponden a llegadas de ondas reflejadas de incidencia normal en las interfaces o marcadores sísmicos (MARI y otros, 1998).



Figura 4: Sección sísmica (Fuente: MARI y otros, 1998).

2.3 Alcances y simplificaciones

Las tres superficies, involucradas en la zona de interés, se consideran a partir de los tiempos registrados para los horizontes: S0, S1 y S2, a lo largo de los perfiles sísmicos de la campaña 2007. El comportamiento no estacionario de los tres horizontes se reveló después de un primer análisis exploratorio de los datos (Aburto, 2012). Esos tres horizontes muestran una fuerte correlación entre ellos principalmente por la no estacionaridad.

Considerando que la parte no estacionaria se debe a la inclinación de la capa y que la cantidad de los datos permite una buena estimación de la deriva asociada a la inclinación, se decidió trabajar únicamente con la parte estacionaria de los datos, para simplificar el tratamiento de éstos.

Dada la fuerte correlación entre las tres superficies, se presentarán sólo los análisis para la superficie S0.

El procedimiento seleccionado se basa en la teoría del krigeage universal que propone la descomposición de la variable de interés no-estacionaria llamada $Z(x)$, como la suma de un término de deriva $m(x)$ y de un residuo $R(x)$, como detallado en la Ecuación 1.

Ecuación 1

$$Z(x) = m(x) + R(x)$$

Teóricamente, ya que la deriva es el término no estacionario que corresponde a la esperanza de la variable Z , el residuo, término estacionario, es de esperanza nula (Chilès y Delfiner, 1999).

La deriva fue estimada a partir de los datos dentro de la zona de transposición, por el método de los mínimos cuadrados, y fue representada por un polinomio de grado 1, función bien adaptada a la estructura monoclonal de la capa. Para la deriva estimada (horizonte

S0), se calculó un residuo, mediante la sustracción de la deriva estimada al registro de tiempo del horizonte.

El análisis de los errores que se muestra en esta tesis se realizó sobre el residuo calculado.

Un segundo análisis exploratorio, esta vez sobre el residuo (Aburto, 2012), arrojó una leve anisotropía en su comportamiento. Del análisis de la anisotropía en conjunto con el número de pares se determinó trabajar con un variograma omnidireccional, de manera de concentrar el foco únicamente en el estudio de los errores.

En resumen, el análisis de los errores presentado en este trabajo se realizó únicamente para la superficie S0, sobre el residuo de dicha superficie, dándole un tratamiento isotrópico a éste, y en consecuencia estudiándolo a través de variogramas omnidireccionales.

3. Metodología

3.1 Base de Datos

Los datos usados en este estudio fueron adquiridos por la sociedad DMT GmbH & Co. KG durante la campaña de 2007.

La **Figura 5** es una vista en planta de los perfiles. El polígono en rojo delimita el perímetro de la zona de estudio llamada *zona de transposición*.

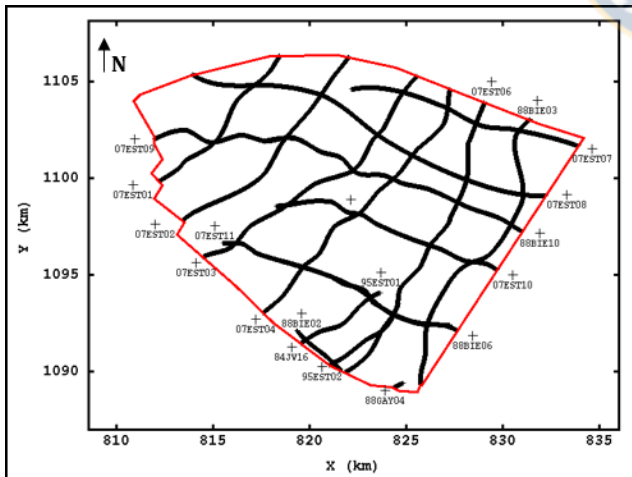


Figura 5: Localización de los datos (negro) y zona de transposición (rojo).

La variable de interés es el tiempo sísmico (en milisegundos) registrado durante la identificación de los horizontes que marcan contrastes geológicos.

Los datos fueron recibidos en forma de textos y los cálculos posteriores fueron realizados principalmente con el software *Isatis*, y en algunos casos (por ejemplo, el

cálculo de pseudo-variogramas cruzados) con el programa *R*.

3.2 Muestreo

Considerando el trazado de los perfiles, los tiempos de registros sísmicos de los marcadores están repartidos preferencialmente siguiendo las dos direcciones principales: entre N30°E y N50°E para una dirección y hacia N70°W para la segunda (ver **Figura 5**). El espacio entre los perfiles subparalelos varía entre 2 y 3 km. Cada perfil sísmico se compone de miles de CDP (**Common Depth Point**) distanciados de 12.5 m.

3.3 Análisis exploratorio de los residuos

Se realizó un análisis exploratorio de la variable residuo. Para estudiar los valores de ésta en las intersecciones de los perfiles, los valores pertenecientes a los perfiles orientados hacia el noroeste fueron proyectados en cada uno de los perfiles orientados hacia el noreste a una distancia máxima de 7 m. El resultado de este estudio permitió identificar la presencia de errores y en consecuencia estudiar la hipótesis planteada.

3.4 Formulación de una hipótesis

La hipótesis de trabajo es: *la variable medida en los perfiles puede ser descompuesta como la suma de la variable que se intenta caracterizar (el residuo), más un error de medición, diferente para cada perfil. Los errores no están correlacionados con el residuo.*

Sea Y_i la variable medida a lo largo de un perfil cualquiera (i), definida como:

Ecuación 2

$$Y_i(x) = R(x) + \varepsilon_i(x)$$

Donde:

- Y_i : es la medida real asociada al perfil i.
- R : es el residuo que queremos caracterizar.
- ε_i : es el error de medida asociado al perfil i.

Esa descomposición lleva a los variogramas teóricos siguientes:

Variograma teórico a lo largo de los perfiles

Con la hipótesis formulada, el variograma a lo largo de los perfiles entrega el variograma del residuo más el variograma del error, como lo muestra la Ecuación 3.

Ecuación 3

$$\gamma_{Y_i}(h) = \frac{1}{2} E[Y_i(x) - Y_i(x+h)]^2$$

$$\rightarrow = \frac{1}{2} E[R(x) - \varepsilon_i(x) - R(x+h) - \varepsilon_i(x+h)]^2$$

$$\boxed{\gamma_{Y_i}(h) = \gamma_R(h) + \gamma_{\varepsilon_i}(h)}$$

Donde:

- $\gamma_{Y_i}(h)$: es el variograma del perfil Y_i .
- $\gamma_R(h)$: es el variograma del residuo.
- $\gamma_{\varepsilon_i}(h)$: es el variograma del error asociado al perfil i .

Pseudo-variograma cruzado teórico

El pseudo-variograma cruzado considera los pares de datos que pertenecen a perfiles diferentes.

El pseudo-variograma cruzado teórico entrega la suma del variograma del residuo y el pseudo-variograma cruzado de los errores (Ecuación 4).

Ecuación 4

$$\Psi_{Y_i, Y_j} = \frac{1}{2} E[Y_i(x) - Y_j(x+h)]^2$$

$$\rightarrow = \frac{1}{2} E[R(x) + \varepsilon_i(x) - R(x+h) - \varepsilon_j(x+h)]^2$$

$$\rightarrow = \gamma_R(h) + \frac{1}{2} E[\varepsilon_i(x) - \varepsilon_j(x+h)]^2 \quad \text{Ya que } R \text{ no se correlaciona con los errores.}$$

Luego, bajo la hipótesis de media nula de los errores y de no correlación entre ellos:

$$\boxed{\Psi_{Y_i, Y_j} = \gamma_R(h) + \frac{1}{2} \text{var}(\varepsilon_i) + \frac{1}{2} \text{var}(\varepsilon_j)}$$

Donde:

- Ψ_{Y_i, Y_j} : es el pseudo-variograma cruzado entre el perfil i y el perfil j .
- $\gamma_R(h)$: es el variograma del residuo.

$\text{var}(\varepsilon_i)$ y $\text{var}(\varepsilon_j)$: es la varianza del error asociada al perfil i y j , respectivamente.

Se estudiaron en consecuencia, los variogramas experimentales presentados precedentemente en forma teórica. Se realizó el modelamiento de estos variogramas experimentales a través de funciones matemáticas autorizadas.

3.5 Filtrado de los errores

La utilización de la hipótesis, presentada, en la construcción del sistema de kriging arroja el siguiente sistema de ecuaciones (ABURTO, 2012):

Ecuación 5

$$\sum_{\beta=1}^{n(i)} \lambda_{\beta}^i \gamma_R[(x_{\alpha}^i), (x_{\beta}^i)] + \sum_{j \neq i} \sum_{\delta=1}^{n(j)} \lambda_{\delta}^j \{ \gamma_R[(x_{\alpha}^i), (x_{\delta}^j)] + \text{var}(\varepsilon) \}$$

$$+ \mu = \gamma_R[(x_{\alpha}^i), (x_0)]$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{\alpha=1}^{n(i)} \lambda_{\alpha}^i = 1$$

Dónde,

- γ_R : es el variograma del residuo.
- $\text{var}(\varepsilon)$: es la varianza del error cuando un par tiene al mismo perfil i .
- λ_{α}^i et λ_{δ}^j : son los pesos atribuidos a los datos en la estimación a un punto localizado en x_0 .
- μ : es el ponderador de lagrange.

La varianza del error de estimación queda de la forma:

Ecuación 6

$$\text{Var}[R^* - R] = \sum_{i=1}^m \sum_{\alpha=1}^{n(i)} \lambda_{\alpha}^i \gamma_R[(x_{\alpha}^i), (x_0)] + \text{var}(\varepsilon) - \mu$$

Con el sistema de ecuaciones de kriging y la elección de una vecindad de búsqueda se procedió a realizar la estimación de los residuos filtrando el error, entregando una varianza del error asociado a este procedimiento.

En cada punto de datos el valor estimado del residuo subyacente resulta de la Ecuación 7:

Ecuación 7

$$R^* = \sum_{i=1}^m \sum_{\alpha=1}^{n(i)} \lambda_{\alpha}^i Y_i(x_{\alpha}^i)$$

Dónde:

- R^* : es el residuo estimado.
- $Y_i(x_{\alpha}^i)$: es la parte estacionaria de la variable medida a los puntos de datos x_{α} a lo largo de los perfiles i .
- λ_{α}^i : son los pesos atribuidos a los datos provenientes de los perfiles i usados en la estimación.

4. Resultados

4.1 Análisis exploratorio de los residuos

El mapa del residuo (**Figura 6**) muestra una distribución geográfica más o menos homogénea, con una leve anisotropía hacia el Noreste, la cual fue despreciada.

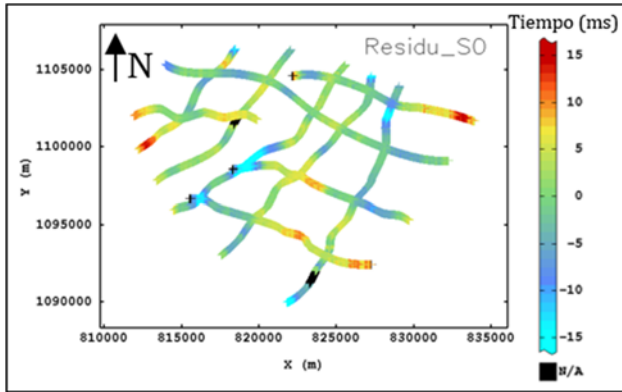


Figura 6: Representación (por código de color) del residuo calculado para el horizonte S0.

La proyección de los valores de los residuos desde los perfiles orientados al NE hacia los perfiles orientados al NW, arrojó un total de 16 muestras. La **Figura 7** ilustra un mapa de los perfiles con las diferencias de los valores de los residuos del horizonte S0 en las intersecciones.

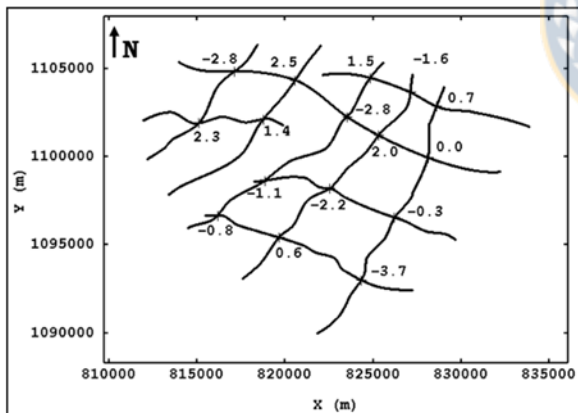


Figura 7: Diferencias entre residuo del horizonte S0 en las intersecciones de perfiles.

Las diferencias de los residuos del horizonte S0 varían entre 3.7 y -2.5 ms, con una media de -0.3 ms.

4.2 Variogramas experimentales

La **Figura 8** muestra los variogramas omnidireccionales para las pequeñas distancias; en naranja el variograma promedio, en línea continua el variograma a lo largo de los perfiles y en punteado el pseudo-variograma cruzado. El variograma promedio tiene un comportamiento similar al calculado a lo largo

de los perfiles, por la mayor proporción de pares para el variograma a lo largo de los perfiles, en comparación con el pseudo-variograma cruzado.

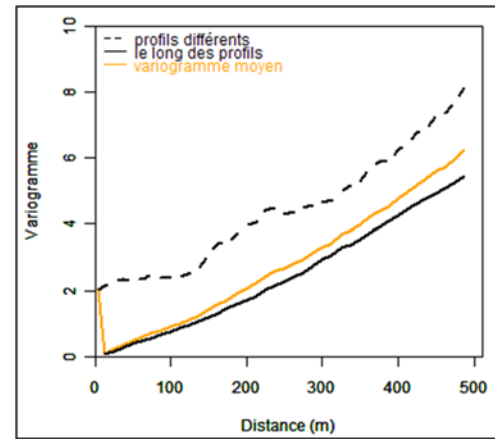


Figura 8: Variogramas omnidireccionales del residuo del horizonte S0 a pequeñas distancias. Pseudo-variograma cruzado (punteado), variograma a lo largo de los perfiles (línea continua) y variograma promedio (naranja). Parámetros de cálculo: 40 pasos de 12.5 m, tolerancia en distancia de 50 % del paso.

Los variogramas omnidireccionales para distancias más grandes (**Figura 9**) muestran irregularidades en el pseudo-variograma cruzado también presentes en el variograma promedio. Sin embargo, la tendencia general del variograma a lo largo de los perfiles y del pseudo-variograma cruzado es coherente con la observación hecha a pequeñas distancias; es decir, que el comportamiento del pseudo-variograma cruzado es similar al del variograma a lo largo de los perfiles con un desplazamiento constante.

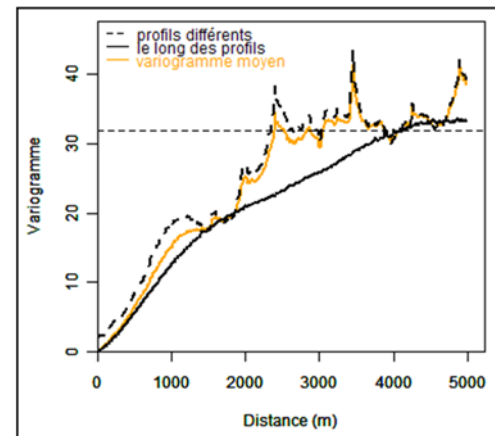


Figura 9: Variogramas omnidireccionales del residuo del horizonte S0 a grandes distancias. Pseudo-variograma cruzado (punteado), variograma a lo largo de los perfiles (línea continua) y variograma promedio (naranja). Parámetros de cálculo: 400 pasos de 12.5 m, tolerancia en distancia de 50 % del paso.

El cálculo de los variogramas con un paso más amplio (**Figura 10**) hace más visible la diferencia entre el

variograma a lo largo de los perfiles y le pseudo-variograma cruzado. La representación del número de pares muestra que, para distancias inferiores a 1000 m, el variograma a lo largo de los perfiles está calculado con más pares que el pseudo-variograma cruzado. Pasado esa distancia, el número de pares usados para el pseudo-variograma cruzado es ampliamente superior al de los pares usados para el variograma a lo largo de los perfiles. El ajuste será entonces un compromiso entre los dos variogramas.

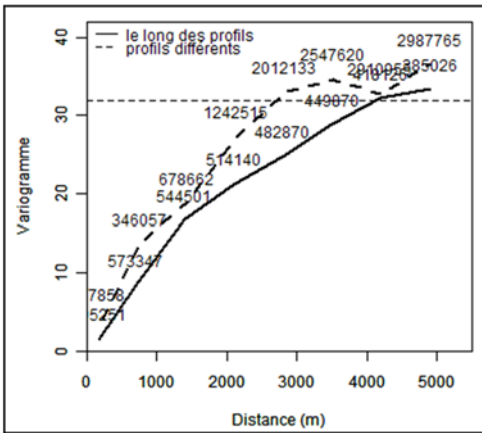


Figura 10: Variogramas omnidireccionales del residuo del horizonte S0 a grandes distancias. Pseudo-variograma cruzado (punteado), variograma a lo largo de los perfiles (línea continua). Parámetros de cálculo: 8 paso de 700 m, tolerancia en distancia de 50 % del paso.

4.3 Modelo variográfico

El variograma experimental a lo largo de los perfiles se ajustó con una estructura cúbica y una estructura esférica, según muestra la Ecuación 8

Ecuación 8

$$\gamma_R(h) = C_1 Cub(a_1) + C_2 Sph(a_2)$$

Donde:

- $\gamma_R(h)$: es el variograma del residuo (ya que el variograma de los errores es igual a cero a las distancias analizadas).
- C_1 et C_2 , corresponde a la meseta de las estructuras 1 y 2.
- a_1 et a_2 , son los alcances de las estructuras 1 y 2.
- Cub et sph son los modelos teóricos elegidos, definidos según la Ecuación 9 y la Ecuación 10:

Ecuación 9

$$Cub = C \times \frac{h^2}{a^2} \left[7 - \frac{h}{a} \left(\frac{35}{4} - \frac{h^2}{a^2} \left(\frac{7}{2} - \frac{3h^2}{4a^2} \right) \right) \right] si h \leq a$$

$$Cub = C \sin$$

Ecuación 10

$$Sph = C \left[\frac{3|h|}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{|h|^3}{a^3} \right) \right] si h \leq a$$

$$Sph = C \sin$$

Entonces, a partir de la definición de los parámetros y de las estructuras usadas para el ajuste, la **Tabla 1** entrega los valores de los parámetros usados para el ajuste del variograma experimental a lo largo de los perfiles.

Tabla 1: Valores de los parámetros (alcance y meseta) elegidos para el ajuste del variograma del residuo del horizonte S0.

Estructura	Alcance a (m)	Meseta C (ms ²)
Cúbica	3000	7
Esférica	4000	24

Una constante igual a **3,8** (ms²) fue añadida a esas estructuras para alcanzar una curva final de ajuste del pseudo-variograma cruzado.

La **Figura 11** muestra las curvas de los variogramas experimentales (en negro) y las curvas que da el modelo (en rojo).

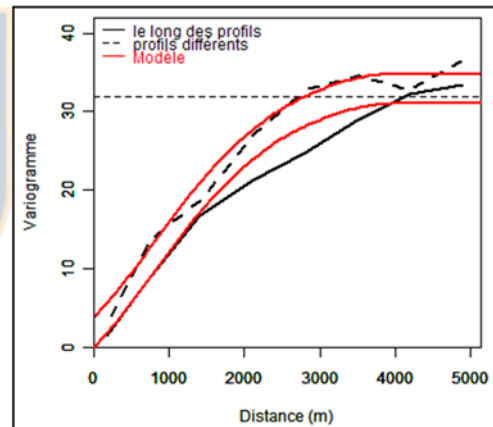


Figura 11: Curvas de los variogramas experimentales (en negro) y del modelo (en rojo) de ajustamiento, caso del horizonte S0. Parámetros de cálculo de los variogramas experimentales: 8 pasos de 700 m, tolerancia en distancia de 50 % del paso.

4.4 Filtrado de los errores

El filtrado de los errores se realizó con los modelos variográficos precedentemente detallados, y una vecindad de búsqueda isotrópica con radio igual al alcance máximo entregado por el modelo del variograma del residuo. Esta elipse fue dividida en ocho sectores angulares con un óptimo de 40 muestras por sector. El mínimo de muestras para estimar fue de 50 muestras, exigiendo que tomara a lo menos 30 muestras por perfil, de manera de asegurar una estimación con muestras pertenecientes a diferentes perfiles.

Para ilustrar el efecto del filtrado de los datos, la **Figura 12** muestra en paralelo las diferencias de los residuos en el cruce de los perfiles, antes y después del filtrado.

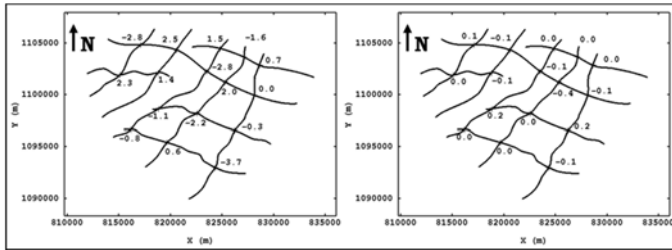


Figura 12: Diferencia de los valores de residuos de la superficie S0 en la intersección de los perfiles. Izquierda: antes de filtrado. Derecha: después de filtrado, a partir de la hipótesis de errores constantes.

5. Discusión

5.1 Intersección de los perfiles

Las diferencias de los valores de los residuos observadas en la intersección de los perfiles sugieren la existencia de errores de medición.

Considerando que en cada intersección existen dos valores de registros, cada valor se puede considerar como una medida de dos variables diferentes. No es posible trabajar de manera clásica con el variograma cruzado, debido al bajo número de intersecciones. El uso del pseudo-variograma cruzado (Rivoirard, 1997) permite el estudio de dos o más variables heterotópicas (localizados en lugares distintos), fue la herramienta más adaptada para elucidar las diferencias de los valores en las intersecciones.

Durante el análisis variográfico, se notó algo similar a una constante en las estructuras del pseudo-variograma cruzado y del variograma a lo largo de los perfiles. Los modelos variográficos presentados, son casi idénticos, la única diferencia es la adición de una constante igual a **3,8** (ms^2) para el pseudo-variograma cruzado. Según la hipótesis y los variogramas teóricos presentados antes, esos resultados sugieren una hipótesis adicional: el variograma de los errores es igual a cero (Ecuación 11) a la escala de trabajo. Un variograma de error nulo significa que a esa escala, los errores pueden ser considerados como constantes en cada perfil. El pseudo-variograma cruzado (Ecuación 12) permanece inalterado con esa hipótesis adicional.

Ecuación 11

$$\gamma_{Y_i}(h) = \gamma_R(h)$$

Ecuación 12

$$\Psi_{Y_i, Y_j} = \gamma_R(h) + \frac{1}{2} \text{var}(\varepsilon_i) + \frac{1}{2} \text{var}(\varepsilon_j)$$

Donde:

- $\gamma_{Y_i}(h)$: es el variograma a lo largo de los perfiles.
- Ψ_{Y_i, Y_j} : es el pseudo-variograma cruzado entre el perfil i y el perfil j.
- $\gamma_R(h)$: es el variograma del residuo.
- $\text{var}(\varepsilon_i)$: es la varianza del error.

El ajuste correcto de las curvas teóricas a los datos experimentales del variograma a lo largo de los perfiles y del pseudo-variograma cruzado (**Figura 11**), considerando los errores constantes a la escala analizada, permite validar la hipótesis: “la variable medida en los perfiles puede ser descompuesta como la suma de la variable que se intenta caracterizar (el residuo), más un error de medida, diferente para cada perfil. Los errores no están correlacionados con el residuo”.

En este caso, el variograma a lo largo de los perfiles y el pseudo-variograma cruzado dan la estructura del residuo. La constante adicional observada en el pseudo-variograma cruzado experimental corresponde a la suma de las semi-varianzas de los errores.

La hipótesis validada y su utilización en la construcción de un sistema de krigeage, cuyo objetivo es estimar la variable residuo, da como resultado un sistema de krigeage factorial Ecuación 13:

Ecuación 13

$$\sum_{\beta=1}^{n(i)} \lambda_{\beta}^i \gamma_R[(x_{\alpha}^i), (x_{\beta}^i)] + \sum_{j \neq i}^m \sum_{\delta=1}^{n(j)} \lambda_{\delta}^j \{ \gamma_R[(x_{\alpha}^i), (x_{\delta}^j)] + \text{var}(\varepsilon) \} + \mu = \gamma_R[(x_{\alpha}^i), (x_0)]$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{\alpha=1}^{n(i)} \lambda_{\alpha}^i = 1$$

El lado izquierdo del sistema muestra los datos de entrada que tienen un error asociado a la medición, mientras que en el lado derecho del sistema, la componente asociada al error no está presente, lo que implica el filtrado de esta componente en la variable de salida.

La visualización en planta de las diferencias de los valores de los residuos antes y después de su filtrado muestra el efecto positivo del procedimiento (**Figura 12**). Su disminución es bien visible en las intersecciones, pasando de una media de las diferencias de $-0,3$ ms a una de

0 ms, y de un rango de diferencias de $-2,5$ ms a $3,7$ ms, a uno que va de $-0,4$ ms a $0,2$ ms.

El uso del pseudo-variograma cruzado en este caso estudio demostró ser una herramienta adecuada para filtrar errores bajo la hipótesis planteada. Considerando que toda medición tiene siempre un error asociado, las herramientas geoestadísticas y el procedimiento planteado para este caso estudio, ofrece prometedores resultados para el estudio de otras variables de naturaleza diferente.

6. Conclusiones

Las diferencias de valores en las intersecciones de perfiles del mismo año fueron asociadas a errores de medición; esas diferencias fueron estudiadas en detalle con la herramienta pseudo-variograma cruzado.

El análisis de los mapas variográficos y los variogramas mostró que las profundidades de los horizontes medidas en tiempo presentan una no-estacionaridad en la dirección noroeste. Esa dirección es concordante con la estructura monoclinas de las capas.

Para la no-estacionaridad de los horizontes, se eligió la descomposición de la variable tiempo (medida que caracteriza cada horizonte) en la suma de una deriva y de un residuo. Las estimaciones deterministas de las derivas por mínimos cuadrados fueron asimiladas a un polígono de grado 1. El estudio geoestadístico fue hecho a partir de los residuos estacionarios.

Las diferencias de los valores de los residuos para la superficie S0 en las intersecciones de perfiles fueron ilustradas. El bajo número de intersecciones no permitía su estudio directamente. El uso del pseudo-variograma cruzado permitió analizar y explicar esas diferencias haciendo la hipótesis que cada perfil sísmico da una medida de la variable de interés más un error ligado a la medida independiente de un perfil al otro. La comparación de los variogramas experimentales, por una parte, el pseudo-variograma cruzado, que usa los pares perteneciendo a perfiles diferentes, y por otra parte, los variogramas a lo largo de los perfiles, basados en los pares que pertenecen a los mismos perfiles, permitió validar la hipótesis y construir un modelo. A partir de ese modelo, un filtraje de los residuos se realizó en los puntos de datos.

Los horizontes filtrados constituyen los nuevos datos para la cartografía (o estimación) de las superficies. La cartografía de superficies puede ser realizada con los

datos filtrados, en etapas sucesivas: la estimación de la superficie S0 seguida de las de los espesores S0S1 y S1S2.

7. Referencias

- ABURTO, D.** (2012). *Filtrage géostatistique de données géophysiques en vue de la cartographie de l'impédance d'une formation argileuse. Exemple du Callovo-Oxfordien de Meuse.* Thèse de Docteur de l'École des Mines de Paris, spécialité Géostatistique. Pp. 154.
- ANDRA** (2005). *Dossier 2005 Argile, synthèse. Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse.* Collection les rapports. 56-98.
- ANDRA** (2008). *LOT M18-3 : Campagne sismique 2D et activités connexes, interprétation et inversion des données sismiques 2D : Rapport final. Campagne de reconnaissance de la zone de transposition 2007-2008. Laboratoire de recherche souterrain de Meuse / Haute-Marne.* Identification : C.RP.OBEI.08.001.
- BOYER, S. et MARI, J.** (1994). *Sismique et diagraphies.* Publications de l'institut français du pétrole. École nationale supérieure du pétrole et des moteurs. Éditions TECHNIP. 71-97, 103-130, 147-148, 199.
- BOURGES, M., MARI, J. et DERAISME, D.** (2010). *Geostatistical filtering of refraction data. Methods and comparison of acquisition systems.* 72nd EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2010. Barcelona, Spain. 223 p.
- CHILES, J.P. et DELFINER, P.** (1999). *Geostatistics, modeling spatial uncertainty.* Wiley-Interscience Publication. 50-59.
- MARI, J.-L., GLANGEAUD, F. et COPPENS, F.** (2001). *Traitement du signal pour géologues et géophysiciens.* Volume 1 Prospection sismique. Éditions TECHNIP. 5-12.
- MATHERON, G.** (1969). *Cours de Géostatistique.* Les cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, fascicule 2, École des Mines de Paris. 3-10.
- MATHERON, G.** (1970). *La théorie des variables régionalisées, et ses applications.* Les cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, fascicule 5, École des Mines de Paris. 9-162.
- MATHERON, G.** (1978). *Estimer et choisir, essai sur la pratique des probabilités.* Centre de Géostatistique, École des Mines de Paris. 1-23.
- RIVOIRARD, J.** (1995). *Concepts et méthodes de la Géostatistique.* Cours C-158. Centre de Géostatistique. , Ecole de Mines de Paris.
- RIVOIRARD, J.** (2003). *Cours de géostatistique multivariante.* Cours C-172. Centre de Géostatistique, Ecole de Mines de Paris. 60 pp.