

CARACTERIZACION ESTADISTICA DE LAS FACIES RESERVORIO DE LA FORMACION LA MANGA, CUENCA NEUQUINA, ARGENTINA.

Claudio E. Haring ⁽¹⁾ , Roberto H. Varadé ⁽¹⁾ , David Curia ⁽²⁾ , Claudio Larriestra ⁽²⁾

(1) YPF SA.

(2) Larriestra, Curia y Asociados

RESUMEN

El sector objeto de este análisis abarca la porción suroccidental del yacimiento Puesto Molina, Cuenca Neuquina. El objetivo central del presente estudio fue predecir la continuidad lateral de las facies reservorio de la Fm. La Manga, hacia posiciones estructurales favorables para el entrapamiento de hidrocarburos.

La unidad La Manga esta compuesta fundamentalmente por carbonatos y areniscas carbonáticas de plataforma, donde la ocurrencia de facies reservorio se asocia a la presencia de niveles fracturados, con desarrollo de porosidad secundaria por disolución (Haring y Crivaro, 1997).

La zona evaluada cuenta con seis pozos que alcanzaron estos niveles con un registro básico de perfiles, imágenes resistivas, descripción de recortes de perforación y coronas, datos petrofísicos y una cobertura de sísmica 3D de aproximadamente 100 Km².

Dada la gran discontinuidad del dato de pozo o preciso (buena resolución vertical), se planteó la posibilidad de utilizar la continuidad del dato sísmico o impreciso (mala resolución vertical pero buen control lateral), para “guiar” la delimitación areal de las facies reservorio.

El método que se puede considerar clásico para realizar esta tarea de integración de datos de diferentes orígenes y resolución, es la interpolación por cokriging (Hohm, 1991; Wackernagel 1998), sin embargo la escasa cantidad de datos precisos (de pozo), hace que con este método los errores de estimación sean muy elevados respecto de los valores estimados, incluso cerca de los puntos de control.

Por esta razón se aplicó un conjunto de técnicas de la estadística multivariada (Johnson y Wichern, 1998) con el objetivo de relacionar anomalías en la información de atributos sísmicos con caracterizaciones petrofísicas realizadas en los pozos profundos del área.

Se aplicaron técnicas de Análisis de Agrupamiento supervisado y no supervisado y Análisis Discriminante . Las mismas fueron aplicadas al conjunto de los atributos extraídos en una ventana relacionada al tiempo de ida y vuelta de un reflector interpretado como característico del reservorio. De esta manera, se definió la muestra multivariada y se realizaron mapas que ilustran la distribución de anomalías sísmicas con el objetivo de describir su relación con la ocurrencia de las facies reservorio.

Paralelamente se aplicaron técnicas de *simulación estocástica condicional* (Doyen y Guidish, 1991) sobre líneas arbitrarias extraídas del cubo 3D. Estas fueron seleccionadas de modo de simular la sección entre los pozos existentes.

En todos los casos se trabajó con simulación gaussiana condicional. Se calcularon 100 simulaciones, todas equiprobables y con ellas se calcularon los promedios y las probabilidades de eventos significativos desde el punto de vista de la caracterización de reservorio. Cabe señalar que, a pesar del muy bajo grado de correlación existente entre los datos utilizados en la simulación, las distintas presentaciones generadas conservan la tendencia del dato sísmico y, además se ha verificado el ajuste por validación cruzada.

El estudio estadístico multivariado permitió concluir que las facies favorables tienden a desmejorar en el sentido en que mejoran las condiciones estructurales. Esto se basa en la relación de las características petrofísicas observadas y en el modelo multivariado realizado a partir de la sísmica, los resultados de la simulación condicional y la posterior comprobación por los pozos perforados en el área.

INTRODUCCION

La distribución areal de una propiedad, en términos generales, se puede descomponer en una "TENDENCIA" mas un "RESIDUAL". La importancia de esta descomposición radica en que se puede analizar separadamente el comportamiento regional de una variable distribuida árealmente de su comportamiento local. Esto último se puede considerar información de alta frecuencia mas ruido. *La distinción entre el contenido de información y el ruido del residual requiere la aplicación de técnicas de deconvolución apropiadas.* Existen dos técnicas de filtrado para descomponer la información en "TENDENCIA" y "RESIDUAL", una de ellas es cuadrados mínimos, cuya ventaja es la convergencia regional y la estimación del error, mientras que su desventaja es que requiere un conocimiento previo profundo del comportamiento de la TENDENCIA. La otra metodología es la aplicación de promedios móviles, cuya ventaja principal es la simple implementación y que no requiere de un modelo previo del REGIONAL, mientras que la desventaja mas significativa es que la estimación se debe realizar por prueba y error.

La aplicación de este método en el presente proyecto es la siguiente:

- Se tomaron las muestras de los atributos en cada 'bin' del registro de sísmica 3D de PUESTO MOLINA, en una ventana de 20 ms (5 ms por encima y 15 ms por debajo) respecto del horizonte interpretado como relacionado a la zona reservorio de la Formación LA MANGA. Estos datos constituyen nuestra muestra multivariada.
- La FIGURA N°1 muestra la distribución de la tendencia del isócrono donde se observa que la zona de interés se ubica en el flanco de la estructura
- La FIGURA N° 2 muestra la distribución del residual 'positivo'. En este mapa la zona de interés CERRO LOS MELLIZOS está en el margen de los residuos positivos.
- La FIGURA N° 3 muestra la distribución de la tendencia de la amplitud mínima con una ventana de 1500x1500 bins. Lo notable es el desarrollo de una anomalía situada en el contexto del pozo Epu.x-1; esta zona se extiende con rumbo NO-SE e involucra los pozos de PUESTO MOLINA profundos.
- La FIGURA N° 4 muestra la distribución del residual. En este mapa se observa que la anomalía anterior es un residuo negativo, mientras que la zona de interés CERRO LOS MELLIZOS está en el margen de una anomalía, de menor magnitud, que la del pozo Epu.x-1.

ESTADISTICA MULTIVARIADA. SU APLICACIÓN A LA DESCRIPCIÓN DE RESERVORIOS COMO VÍNCULO DE INTEGRACIÓN ENTRE DATOS SÍSMICOS Y PETROFÍSICOS

La estadística multivariada estudia muestras caracterizadas por n variables. Son muchos los ejemplos de este tipo de muestras en las ciencias de la tierra, en el presente estudio los distintos atributos de un horizonte sísmico constituyen, para cada punto de explosión, una muestra multivariada.

Los métodos multivariados son muy poderosos, estos permiten investigar relaciones (entre variables y/o entre muestras), difíciles de visualizar con otras técnicas. Sin embargo son métodos complicados, tanto teórica como metodologicamente. Al presente, el tratamiento de datos multivariados se basa en hipótesis rigurosas que no se verifican en todos los casos, pero al relajar estas hipótesis y trabajar en entornos mas generales comienzan las complicaciones teóricas y computacionales. De hecho, un método muy aplicado como el análisis de agrupamiento ('CLUSTER ANALYSIS'), no tiene una base de sustentación teórica rigurosa ni pruebas de hipótesis establecidas.

Uno de los métodos de la estadística mutivariada mas utilizados es el análisis discriminante ('DISCRIMINANT ANALYSIS'). En estadística mutivariada existe una diferencia conceptual importante entre *discriminación y clasificación*.

ANALISIS DISCRIMINANTE

La función de discriminación lineal transforma un conjunto original de muestras multivariadas en un peso simple unidimensional. Este peso, o variable transformada, representa la posición de la muestra sobre la línea definida por la función de discriminación. Resumiendo, consiste en transformar un problema multidimensional en otro unidimensional.

La aplicación de este método en el presente proyecto es la siguiente:

- Se tomaron las muestras de los atributos sísmicos como en el caso anterior.
- Se definieron dos grupos: a) zonas con condiciones de reservorio favorables y b) zonas con condiciones de reservorio desfavorables o sin facies porosas. Para definir el primer grupo se tomaron las muestras cercanas al pozo Epu.x-1, o con *'buen reservorio desde el punto de vista petrofísico'*, y para el segundo las muestras cercanas al pozo PM.x-3 considerado con facies desfavorables.
- Con las muestras asociadas a la definición de los grupos se calculó la función discriminante.
- Se evaluó esta función discriminante sobre cada muestra de la zona cubierta por el 3D y se calculó la probabilidad de pertenecer a uno u otro grupo.
- La FIGURA N° 5 muestra los resultados del análisis discriminante, observándose las zonas con condiciones similares al pozo Epu.x-1.

ANALISIS DE AGRUPAMIENTO

A diferencia de la discriminación, la clasificación está desarrollada en la variabilidad interna de la muestra, es decir no depende de la definición previa de grupos homogéneos. El número de grupos de un procedimiento de clasificación es producto del mismo análisis y la interpretación del significado geológico de estos grupos (si existe!) es tarea del profesional.

Clasificar es ubicar muestras en diferentes grupos, clases o 'clusters'. Este es un procedimiento altamente subjetivo que depende del 'conocimiento' y la experiencia del intérprete. Sin embargo cuando se tiene un gran número de muestras se requiere de procedimientos de automatización computacionales para utilizar todos los datos disponibles. El procedimiento de clasificación mas común es el análisis de agrupamiento o 'cluster analysis', se trata, en realidad, de un conjunto de diferentes procedimientos cuya base teórica (fundamentalmente las pruebas de hipótesis) no está definida. Sin embargo, desde la praxis ha resultado un método exitoso.

Una estrategia alternativa es el denominado Conglomerado de k-medias (k-means clustering). En la implementación de esta estrategia se debe suministrar a priori la cantidad de clases que se desea construir y, fundamentalmente, para comenzar la iteración se debe elegir una semilla de los centroides de cada grupo en el espacio de los atributos. Esta semilla se puede elegir al azar o por conocimiento previo del problema (en este último caso se tiene un método con supervisión externa). Entonces todas las muestras se clasifican en función de su distancia al centroide, luego se recalcula el mismo y se vuelve a iterar. El procedimiento puede terminar por convergencia o por superar un número máximo de iteraciones. Esta técnica es una situación intermedia entre el análisis discriminante y el análisis de agrupamiento clásico, la ventaja fundamental (sobre el primero) es la posibilidad de tomar como centroides a mas de dos pozos como hemos realizado en el análisis discriminante y presentar los resultados en solo un mapa.

Supongamos que tenemos un conjunto de objetos y deseamos clasificarlos. Los procedimientos de clasificación comienzan por establecer un coeficiente de semejanza (un criterio de distancia o correlación) entre cada par de muestras, luego se ordenan las muestras en función del criterio de semejanza elegido y se agrupan las que están por encima de un umbral. Este procedimiento se repite hasta obtener un determinado número de grupos.

La aplicación de este método en el presente proyecto es la siguiente:

- Se tomaron las muestras de los atributos sísmicos como en el caso anterior.
- Se estableció, a priori, que se definirían diez grupos.
- Se calcularon los coeficientes de semejanza para todos los pares de muestras posibles y se establecieron los 'clusters'.
- En la FIGURA N° 6 se muestran los resultados de la aplicación del Conglomerado de k-medias, usando como centroides los pozos EPU.x-1, PMo.x-2, PM.x-3 y PM.x-9bis. *Es importante observar la tendencia a agruparse en la misma clase las zonas de los pozos EPU.x-1, CLM.x-1 y PM.x-9bis. También son evidentes las mismas tres clases definidas con el análisis.*
- Se realizaron análisis de agrupamiento combinando subconjuntos de atributos y con los residuos correspondientes, en los cuales, en general se repite el mismo resultado.

SIMULACION ESTOCASTICA CONDICIONAL. INTEGRACION DE SECCIONES SISMICAS Y DATOS DE POZO

El tipo de simulación condicional que se aplicó es la Simulación Secuencial Gaussiana (SGS). Esta funciona de acuerdo al siguiente esquema:

- a) Por un camino aleatorio se selecciona un nodo del mapa o la sección.
- b) Mediante las técnicas de Kriging o Cokriging y sus variantes se estima la forma de la distribución estadística en ese punto, es decir, la media (o el valor esperado en ese punto) y la varianza asociada. La distribución es de tipo normal y queda definida por los parámetros mencionados. Luego se toma (por simulación) un valor dentro de esa distribución y ese dato simulado pasa a ser un punto dato mas que será tenido en cuenta en la estimación de los restantes nodos.
- c) El proceso se repite hasta que se genera la primer imagen estocástica de la sección, en una nueva simulación se seleccionan otros nodos y el proceso continúa hasta completar todos los nodos y realizar n imágenes estocásticas.
- d) Una vez concluidas las simulaciones se pueden generar tres tipos de secciones, a saber:
 - SECCION PROMEDIO: es el promedio de n simulaciones y equivale a una estimación convecional efectuada por Kriging o Cokriging (para n suficientemente grande).
 - SECCION DE PROBABILIDAD: es la frecuencia de cada 'bin' respecto a un evento prefijado.
 - SECCION INDICADORA cada bin es verdadero o falso(a un nivel de significación) respecto a un evento prefijado.

El primer paso en la investigación es encontrar algún atributo de traza que pueda correlacionar con algún dato de pozo o perfil, en especial alguno asociado a litología. En nuestro caso, como los conjuntos de registros son diferentes y de distinta calidad o generación, se aplicaron procesos de normalización previos. Las correlaciones esperadas en general serán bajas debido a la diferencia de resolución vertical entre los distintos tipos de datos, pero la existencia de una tendencia y la validación cruzada en puntos de control es suficiente para proseguir el análisis.

A continuación debe analizarse la variabilidad espacial de los datos petrofísicos y sísmicos, etapa obligatoria previa a la estimación por kriging o cokriging. Este análisis de los datos se realiza construyendo los semivariogramas experimentales, que luego se modelan con los teóricos. La diferencia en los rangos de los variogramas está asociado a la característica intrínseca de la mayoría de los fenómenos sedimentarios, es decir, alta variabilidad en sentido vertical y menor variabilidad relativa en sentido horizontal (a esta escala del análisis).

Posteriormente se debe proceder a elegir el algoritmo de integración de los datos petrofísicos y sísmicos para poder realizar la estimación sobre la cual se apoyará la simulación condicional. La técnica seleccionada en este caso para realizar esa primera estimación es el: **Collocated Cokriging¹**. A continuación se procede a la simulación condicional generándose, digamos 50 imágenes estocásticas de la sección. Cada una de estas imágenes es equiprobable y respeta los puntos de contacto entre los distintos tipos de datos. Luego se pueden calcular probabilidades de diferentes eventos de interés y analizar la distribución en la sección. El producto final de esta simulación es obtener secciones de propiedades petrofísicas (probabilísticas) en el espacio interpozos, para luego estimar zonas mas alejadas a los datos disponibles (o puntos de control). La FIGURA Nº 7 muestra el resultado de la simulación sobre una línea

¹ La implementación del Collocated Cokriging utiliza una aproximación bayesiana que permite construir una distribución Gaussiana a posteriori para la variable primaria en cada punto. La distribución Gaussiana a posteriori se calcula haciendo el producto del núcleo de la distribución Gaussiana (que se obtiene por kriging simple de la variable primaria) y una función de verosimilitud Gaussiana secundaria. Luego la estimación de Cokriging se puede obtener directamente del estimador de kriging sumando una función lineal de la variable secundaria. La ventaja de esta implementación es que no es necesario resolver el sistema de Cokriging (en general es un sistema lineal de gran dimensión que se resuelve iterativamente y requiere gran esfuerzo computacional).

arbitraria que une la posición de EPU.x-1 (zona con condiciones de reservorio favorables) con la zona de PM.x-3 (zona de condiciones de reservorio desfavorables).

CONCLUSIONES

La anomalía detectada con el análisis estadístico multivariado de atributos parece estar relacionada a las condiciones de reservorio favorables del sondeo EPU.x-1. Sin embargo en este sentido se pueden formular varias hipótesis distintas (que pueden explicar anomalías similares), a saber:

- Efecto de la fracturación: el rumbo de la anomalía es subparalelo al lineamiento estructural de la zona.
- Presencia en niveles superiores de una cúpula de CO₂.
- Variación en el espesor del yeso suprayacente a La Manga.
- Combinación o sumatoria de estos efectos.
- Comparando los resultados obtenidos en la simulación condicional, concluimos en que la facies definidas como potencial reservorio en la posición del pozo EPU.x-1 no presentan buena continuidad lateral hacia la posición de CLM.x-1, por otra parte, para el mismo nivel presenta continuidad entre las posiciones de los pozos EPU.x-1 y PM.x-9bis.

BIBLIOGRAFIA CITADA EN EL TEXTO

Crivaro D. y Haring C., 1997 "Caracterización de facies reservorio en la Fm La Manga, Cuenca Neuquina", Informe interno YPF SA.

Doyen P. y Guidish T., 1991 "Seismic Discrimination of Lithology and Porosity, A Monte Carlo Approach " in Reservoir Geophysics Edited by Robert Sheriff, SEG.

Hohn M., 1988 " Geostatistics and Petroleum Geology" Van Nostrand Reinhold.

Johnson R. y Wichern D., 1998 "Applied Multivariate Statistical Analysis" Prentice Hall.

Wackernagel H. 1998 "Multivariate Geostatistics" Springer













