

MODELO MINERALÓGICO UTILIZANDO RESTRICCIONES GEOLÓGICAS BASADO EN FUNCIONES PROBABILÍSTICAS. CASO DE ESTUDIO EN LA FORMACIÓN VACA MUERTA, ARGENTINA

Guillermo Crespo¹, Hao Zhang¹, Nora Alarcón¹, Diego T. Licitra², Carlos Hernández³

1: Baker Hughes a GE Company, guillermo.crespo@bhge.com, jerome.zhang@bhge.com, nora.alarcon@bhge.com

2: YPF, diego.licitra@ypf.com

3: Chevron LC YPF-CVX JV, carlos.a.hernandez@set.ypf.com

Palabras clave: **modelado estocástico, ambientes deposicionales, relación hierro/azufre**

ABSTRACT

Improved Mineralogy Modeling Using Geological Constraints Based on Probability Functions – A Case Study from Vaca Muerta Formation, Argentina.

Determination of mineral rock composition is an important part of formation evaluation in unconventional shale reservoirs. Two types of models are used for mineralogy modeling—deterministic and stochastic. Both models apply mathematical representations of the logging tool responses; however, stochastic modeling has become more popular due to its consideration of random distributions in the predictor and target variables. Stochastic mineralogy modeling algorithms usually produce solutions by minimizing a function reflecting the differences between the measured and modeled responses. However, due to the non-uniqueness inherent in inversion methods, the solution may not provide petrophysically meaningful results. To avoid producing compromised results, a method that incorporates geological constraints is proposed, in order to represent the geological and/or physical relations between the unknown parameters (inversion variables), leading to a meaningful mineralogy model.

The proposed algorithm incorporates probability functions aiming to generate mineralogical solutions representing geologically and petrophysically sound results. The weight assigned to the penalties in the cost function depends on the probability function assigned to the constraints. A model is presented using the proposed algorithm: a pyrite-anhydrite constraint based on the iron and sulfur ratio.

A field example from an Argentina well in the Vaca Muerta unconventional formation was processed using the proposed algorithm. The results using the proposed methodology show an excellent agreement with the available core measurements. These results demonstrate that the proposed method is an effective tool for improving integrated formation evaluation in challenging logging environments especially in unconventional reservoirs with complex mineralogy.

INTRODUCCIÓN

Los yacimientos no convencionales ricos en materia orgánica se han convertido en recursos de hidrocarburos cada vez más importantes en todo el mundo debido al rápido agotamiento de los yacimientos convencionales, y también debido al desarrollo de la tecnología de perforación

horizontal y fracturación hidráulica. Es de extrema relevancia estimar con precisión la composición mineral, la porosidad, el COT y su incertidumbre en estos yacimientos no convencionales ya que estas propiedades son esenciales para determinar las reservas de hidrocarburos y las zonas favorables para la locación de pozos y sus fracturas hidráulicas. Muchos factores pueden afectar el modelo petrofísico, incluyendo su compleja composición en fase sólida, estructura de poros y tipos de kerógeno. Siempre hay cierta incertidumbre en las propiedades estimadas porque los errores de medición se propagan no linealmente a errores en las propiedades finales. Los modelos determinísticos de inversión no siempre son eficientes o confiables para cuantificar la incertidumbre de las propiedades estimadas. Por otro lado, el método de inversión estocástica utiliza varios registros de pozos para estimar las concentraciones de minerales y fluidos junto con su incertidumbre, por lo que se considera la probabilidad posterior de cada propiedad. En los modelos de inversión estocástica, las composiciones minerales se estiman minimizando una función que refleja las diferencias entre las respuestas medidas y modeladas. Sin embargo, otra fuente de incertidumbre puede provenir de los modelos numéricos adoptados en la interpretación. En el caso de yacimientos no convencionales, sólo se puede incluir en el modelo de inversión un número limitado de minerales y de sus propiedades. Las rocas madre pueden contener más tipos de minerales o variaciones del mismo mineral debido a la heterogeneidad dominante, lo que es casi imposible de modelar. Para evitar producir resultados comprometidos en modelos de inversión estocásticos, se propone un método que incorpora restricciones geológicas que representa las relaciones geológicas entre los parámetros desconocidos para un modelo de mineralogía más significativo.

Algunos trabajos discutieron la aplicación de restricciones geológicas rígidas en la modelación litológica estocástica (Doverton 1994; Mayer y Sibbit 1980; Mezzatezta *et al.*, 1988; Mitchell y Nelson 1988; Rodriguez *et al.* 1988).

En estos documentos se examinaron varios tipos de restricciones rígidas:

1. **Restricciones matemáticas:** El tipo general de esta clase de restricción es:

$$f_j(x) \geq 0,$$

donde $f_j(x)$ es una función que involucra las incógnitas (por ejemplo, fracciones de volumen de litología, porosidad, etc.) o algunas constantes de perfiles elegidas por el usuario. Otros ejemplos son:

$$\begin{aligned} & y \quad 0 \leq V_{ma,j} \leq 1 \\ & \quad 0 \leq \emptyset \leq 1, \end{aligned}$$

limitando todas las fracciones de volumen de matrix $-V_{ma}$ - y porosidad $-\emptyset$ - entre 0 y 1.

2. **Restricciones físicas:** Estas restricciones representan relaciones físicas aproximadas entre

las incógnitas. Un ejemplo de restricciones físicas podría ser si algunos minerales poco comunes para un ambiente de depositación marino (por ejemplo, sal, yeso, carbón, etc.) son encontrados cuando un conjunto de condiciones son satisfechas por los perfiles. De esta forma, una señal correspondiente será usada para asignar todas las fracciones de volumen a ese mineral específico.

3. Restricciones locales: Estas limitaciones suelen provenir de un conocimiento a priori de los resultados probables o de los datos básicos existentes. Los petrofísicos y geocientistas pueden utilizar este tipo de restricción para imponer un contenido máximo de arcilla, un rango de porosidad efectiva, una fracción mínima de minerales de la matriz, etc.

4. Limitaciones de continuidad: Las restricciones de continuidad se utilizan en base al hecho de que las fracciones de volumen resueltas no pueden tener mejor resolución vertical que los registros de entrada. Por lo tanto, los resultados por profundidad pueden verse limitados por los resultados adyacentes para evitar demasiada discontinuidad en las fracciones de volumen calculadas.

Sin embargo, ninguna de estas restricciones geológicas rígidas mencionadas anteriormente se aplica en la modelación de mineralogía estocástica. En el caso de yacimientos no convencionales, en los que las condiciones anóxicas son las dominantes, y siendo ellas las características a identificar, la adopción del modelo mineral y sus resultados son clave para su precisa resolución. La Fm Vaca Muerta, en el bloque Loma Campana de la Cuenca Neuquina, es un reservorio que presenta estas características. En este estudio se propone un método de restricción geológica para caracterizar las relaciones geológicas o físicas entre las incógnitas en el modelado de mineralogía estocástica.

Metodología

Se propone un método de restricción geológica para caracterizar las relaciones geológicas o físicas entre las incógnitas en el modelado estocástico de mineralogía. Se han aplicado funciones de restricción de probabilidad para mejorar el modelo mineral que representa resultados geológicamente más sólidos.

Esta metodología se aplica utilizando el algoritmo propuesto para la restricción pirita-anhidrita, basado en la relación hierro y azufre.

Los programas de modelado estocástico generalmente resuelven las soluciones de mineralogía que generan mínimos errores. Pero la solución puede no tener ningún sentido geológico, mientras que otra solución con un error ligeramente mayor puede representar las propiedades reales de la formación. Este error ligeramente mayor es compensado por su resultado más sólido desde el punto de vista geológico. Se necesita un método de restricción geológica en el modelo de mineralogía para representar las relaciones geológicas o físicas como parte de sus incógnitas.

Con el fin de proporcionar orientación geológica a la solución, se han propuesto funciones de restricción de probabilidad para mejorar los resultados en el modelado estocástico.

La siguiente ecuación (Ec. 1) se utiliza para restringir la fracción mineral individual $F_{min,i}$ a una constante c :

$$F_{min,i} \times Prob. \times peso = c \times Prob. \times peso \quad (Ec. 1)$$

La ponderación restrictiva de la función de peso depende totalmente de la función de probabilidad utilizada y de la ponderación definida por el usuario asignada a la restricción. La constante c se traduce a 0 porque los programas estocásticos normalmente asignan algunos minerales individuales con una fracción en exceso que necesita ser restringida. Entonces la ecuación (Ec 2) se convierte en:

$$F_{min,i} \times Prob. \times peso = 0 \quad (Ec. 2)$$

El algoritmo propuesto se aplicó en este trabajo a la restricción pirita-anhidrita, basada en la relación hierro y azufre. Ejemplo de la función de probabilidad para esta restricción se muestra en la Fig 1.

Las funciones de probabilidad de los minerales pueden ser ajustadas por los puntos de transición y sus pendientes. El punto de transición controla el punto de desplazamiento para una probabilidad del 50% que puede moverse a lo largo del eje x, y a su vez, la pendiente controla la inclinación de la transición entre la probabilidad de 0 y 100%.

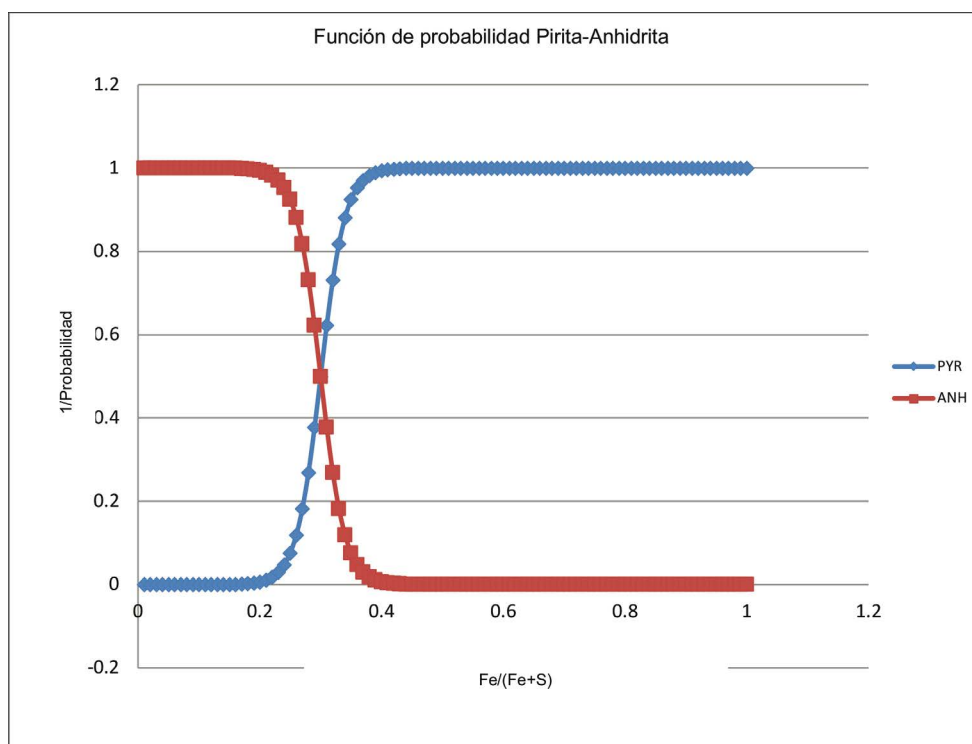


Figura 1. Funciones de probabilidad para la restricción pirita-anhidrita basada en la relación $Fe/(Fe+S)$.

La Fig. 2 muestra un ejemplo de los resultados mineralógicos antes y después de aplicar las restricciones geológicas de pirita-anhidrita para un pozo *shale-gas*. La anhidrita, que es menos probable que exista en este ambiente rico en materia orgánica, es presentada en la columna izquierda antes de usar la restricción geológica. Luego de aplicar esta restricción, la anhidrita fue reemplazada por pirita, lo que ahora tiene sentido geológico para este pozo. El modelo final de mineralogía coincide bien con las mediciones de DRX de las muestras de corona que se muestran en la pista central de la figura.

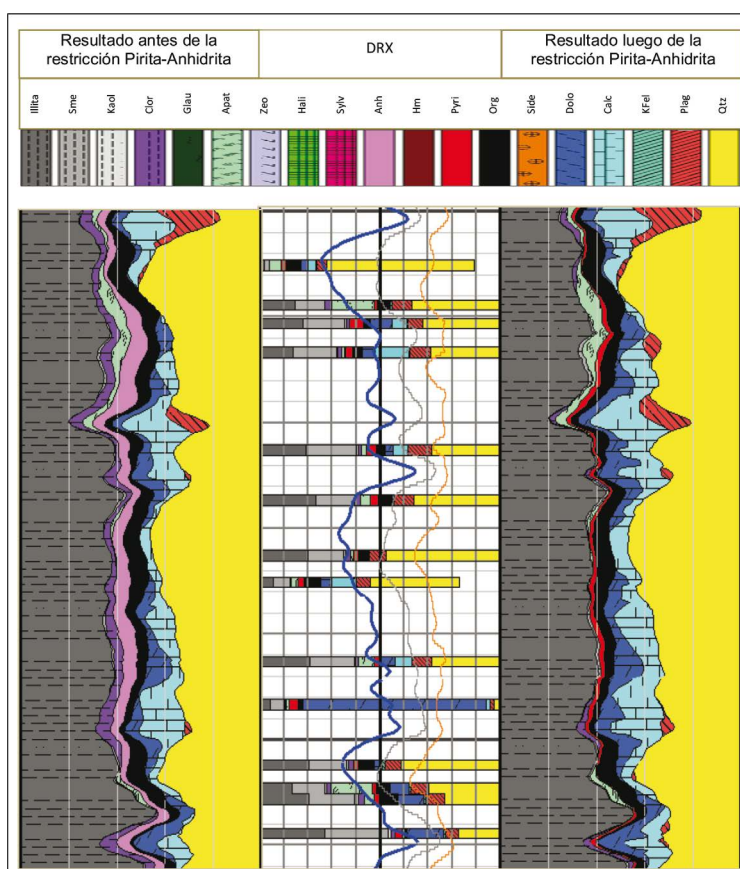


Figura 2. Comparación de los resultados de mineralogía antes y después de aplicar la restricción geológica pirita-anhidrita basada en la relación $Fe/(Fe+S)$ para un pozo *shale-gas*. La anhidrita (mineral color rosa sólido), que es menos probable que exista en este ambiente rico en orgánicos, fue mostrada en lugar de la pirita (color rojo sólido) en los resultados de DRX de testigos corona antes de usar la restricción geológica. Luego de aplicar esta restricción, la anhidrita fue reemplazada por pirita (mineral color rojo sólido), lo cual tiene sentido geológico en esta sección del pozo, coincidiendo los resultados con aquellos de corona.

ESTUDIO DE CASO

Ubicación y Marco Geológico

El presente caso de estudio se aplicó sobre el pozo “A”, ubicado en el sector oeste del bloque de concesión Loma Campana (LC). Dicho bloque está comprendido en la Cuenca Neuquina,

dentro la región morfoestructural denominada Engolfamiento Neuquino (Fig. 3.a). Las referencias geográficas más importantes son el río Neuquén y los lagos Mari Menuco y Barreales hacia el sur, siendo la localidad próxima más importante la ciudad de Neuquén, que está distanciada 90 km hacia el SE. Otro dato de referencia importante es la localidad de Añelo que se encuentra en la zona centro-sur del bloque.

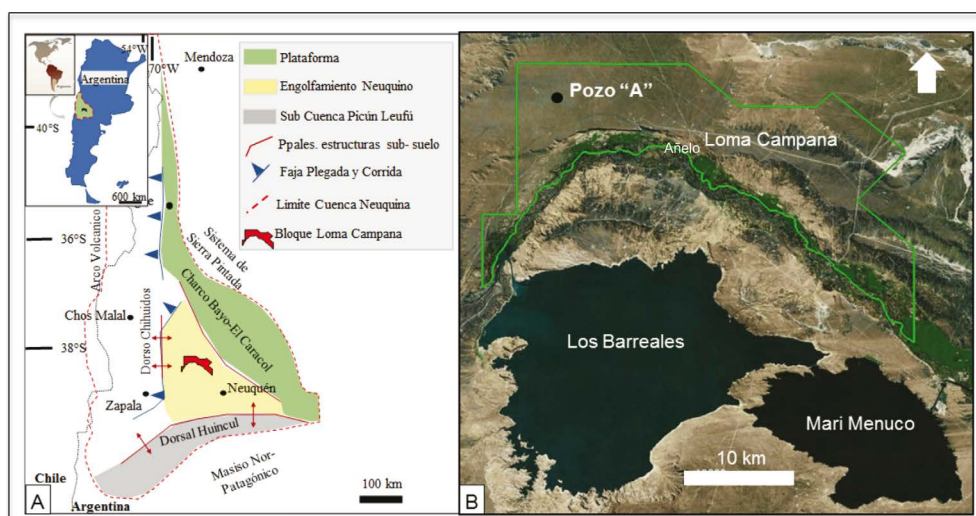


Figura 3. Mapa de Ubicación. A) Loma Campana dentro de la Cuenca Neuquina. B) Bloque de Loma Campana y ubicación del pozo "A"

Estructura

Loma Campana está ubicada en el sector central de la Cuenca Neuquina, sobre el flanco norte del anticlinal de Sauzal Bonito siendo la estructura, a escala yacimiento, un monoclin al de suave buzamiento hacia el NNE, donde se reconocen cuatro sistemas de fallas. Estos cuatro sistemas comprenden: fallas inversas de dirección NE, fallas normales en echelón de dirección NO y buzamiento al NE, fallas de rumbo con dirección ENE y fallas de basamento de dirección general ONO, (Licitra *et al.* 2015).

Las principales fallas de Loma Campana están genéticamente relacionadas a estructuras extensionales asociadas a la etapa de *rift* de la Cuenca Neuquina (Triásico-Jurásico) que generó hemigrábenes de rumbo NO-SE y que luego se reactivaron durante el Jurásico-Cretácico (Cristallini *et al.* 2009).

Estratigrafía

El modelo estratigráfico propuesto para el sistema Vaca Muerta-Quintuco (Tithoniano-Berriasiano) es un modelo mixto carbonático-silicoclástico con orientación SE-NO (Mitchum & Uliana 1982). Dicho sistema, presenta facies finas de fangolitas que están caracterizadas por alto

contenido de materia orgánica (COT) que se corresponden con depósitos de ambiente marino distal y de centro de cuenca de la Fm. Vaca Muerta y otra facies carbonáticas de la Fm Quintuco que representan depósitos de ambiente proximal de plataforma externa.

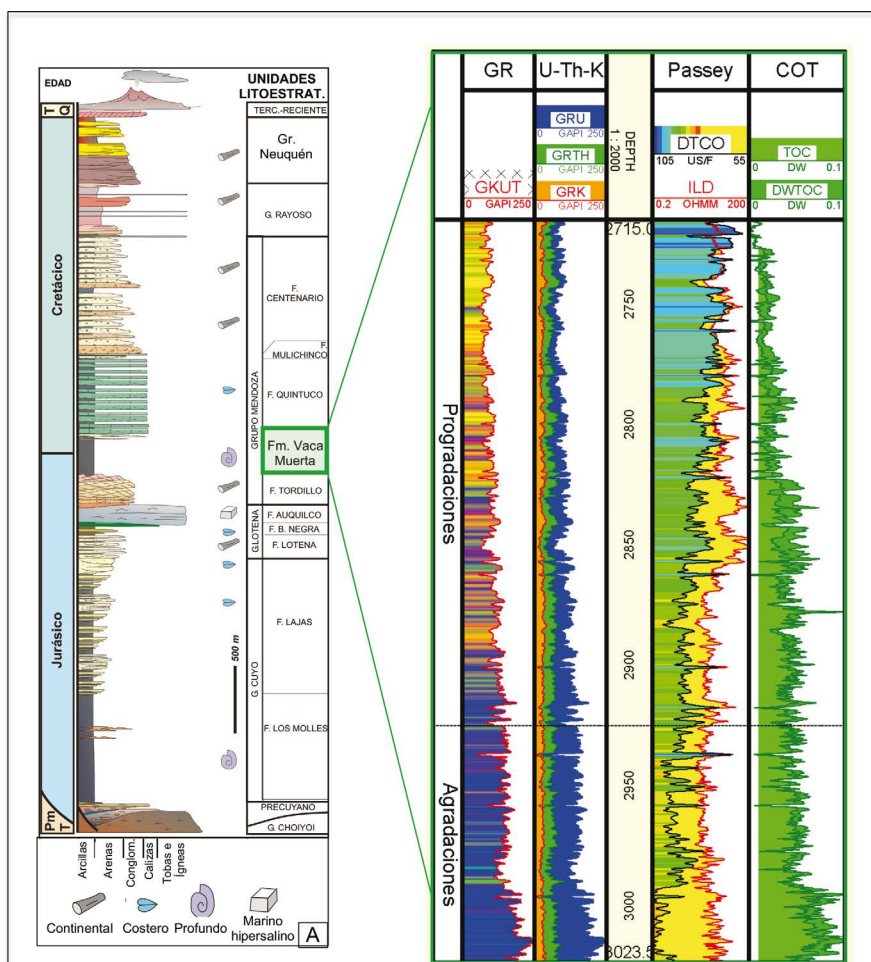


Figura 4. Columna estratigráfica diferenciando niveles progradacionales y agradacionales de Fm Vaca Muerta. Primeros dos track valores GR Espectral, tercero cruce Passey y cuarto TOC.

A escala yacimiento se definió un esquema estratigráfico equivalente a lo expuesto en la “Piedra Rosetta” de la Fm. Vaca Muerta (Desjardins *et al.* 2016), que consta de dos ciclos agradacionales y hasta seis ciclos progradacionales (Fig. 4). El primer ciclo inicia con una transgresión basal que suprayace a las areniscas eólicas de la Fm Catriel e informalmente es denominado “La Cocina”, y está compuesto por litofacies de fangolitas con alto contenido de COT (6-8%), espesores variables entre 30 y 40 metros y porosidades totales promedio de 12% (Vittore *et al.* 2016). El segundo ciclo agradacional, denominado “Orgánico”, presenta litofacies de fangolitas con mayor contenido de calcio, COT 4-6% y porosidades promedio de 10%.

Suprayacente a los ciclos agradacionales, el sistema se vuelve marcadamente progradacional con mayor desarrollo hacia el NO. A lo largo del campo se han identificado hasta 6 ciclos progradacionales entre los topes de las formaciones Vaca Muerta y Catriel, conformadas por litofacies carbonáticas de tipo *mudstones*, *wackestones* con foraminíferos y radiolarios, packstones y menor participación de litofacies finas de fangolitas en comparación con los niveles agradacionales.

Dentro de un esquema conceptual (Vittore *et al.* 2016, Fig. 5), tanto los niveles agradacionales como las progradaciones localizadas en los *foresets* y *bottomsets* de las clinoformas (sensu Desjardins *et al.* 2016; Reijenstein *et al.* 2017) tienen valores de COT > 2% mientras que, hacia los topsets el contenido de COT tiene valores menores al 2%. Esta zona con contenido bajo de COT se denomina informalmente Vaca Muerta inorgánico y grada hacia las facies carbonáticas de la Fm Quintuco.

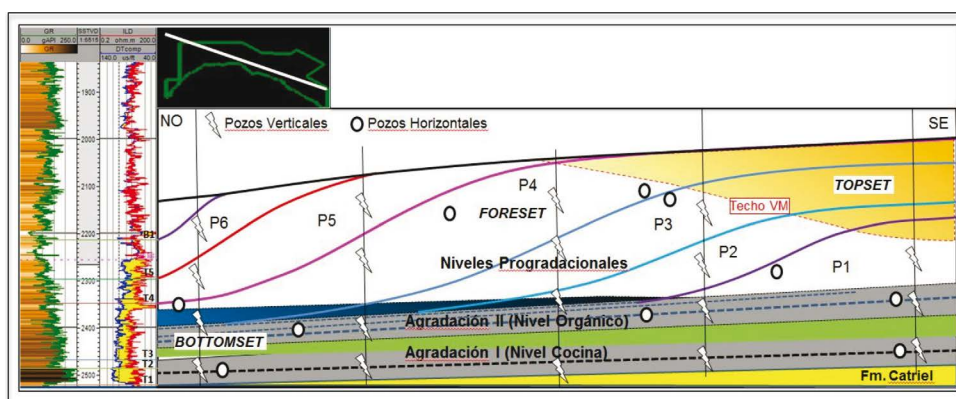


Figura 5. Esquema conceptual O-E con variación regional de los espesores de Fm. Vaca Muerta, niveles de navegación y nomenclatura.

RESULTADOS

Las secciones de “La cocina” y “orgánico” de la Fm Vaca Muerta en el pozo A, han sido muy buenos ejemplos para aplicar esta metodología, ya que son representativos de ambiente anóxico, donde la relación de materia orgánica y pirita es clave. La determinación y discriminación de estos componentes es fundamental, por lo que la correcta definición de una asociación mineralógica se hace indispensable. Como se explicó en la metodología, el método estocástico, ante la presencia de elementos como S, Ca y Fe, puede arrojar diferentes soluciones, no representativas del ambiente de depositación. La Fig 6 representa esta situación, en la que el método muestra la solución matemáticamente correcta, la cual, ante presencia de fracciones en peso de Ca, S, y Fe determina como resultado la presencia de anhidrita.

Esta figura presenta, en la pista 3, los resultados de difracción de rayos X de testigos corona que muestran discrepancia distintiva en la asociación mineral con el resultado de la mineralogía luego de aplicado el método estocástico, sin restricciones geológicas por hierro y azufre. A los fines de visualización, en el gráfico se seleccionaron aquellas profundidades donde se presentan los testigos corona.

Relacionado a esta misma instancia, en la tabla 1 se observan los valores promedios de los minerales de azufre, tanto como resultado del método de optimización, como por difracción de rayos X (DRX) en testigos coronas. Esta tabla muestra las discrepancias en los valores de concentración de anhidrita/pirita para ambos casos, no siendo representativo del ambiente anóxico de las secciones analizadas.

Mineral	Concentración promedio (%)	
	Método Optimización	DRX (Laboratorio)
Anhidrita	3.11	0.35
Pirita	1.32	2.06

Tabla 1. Resultados promedio de los valores de concentración de minerales de S, a partir del método de optimización sin aplicar la restricción geológica, junto a resultados de DRX de testigos corona.

La Fig. 7 muestra los resultados luego de aplicado el método estocástico, utilizando la restricción geológica por hierro y azufre. Se puede observar, la correspondencia entre los resultados presentados de la mineralogía entre las pistas 3 (testigos corona) y 4 (método optimización), donde la manifestación de anhidrita es inexistente, y la pirita es el mineral de azufre presente, correspondiente a la asociación de ambiente deposicional, como se observa en la tabla 2:

Mineral	Concentración promedio (%)	
	Método Optimización	DRX (Laboratorio)
Anhidrita	0.006	0.35
Pirita	2.01	2.06

Tabla 2. Resultados promedio de los valores de concentración de minerales de S, a partir del método de optimización aplicando la restricción geológica, junto a resultados de DRX de testigos corona.

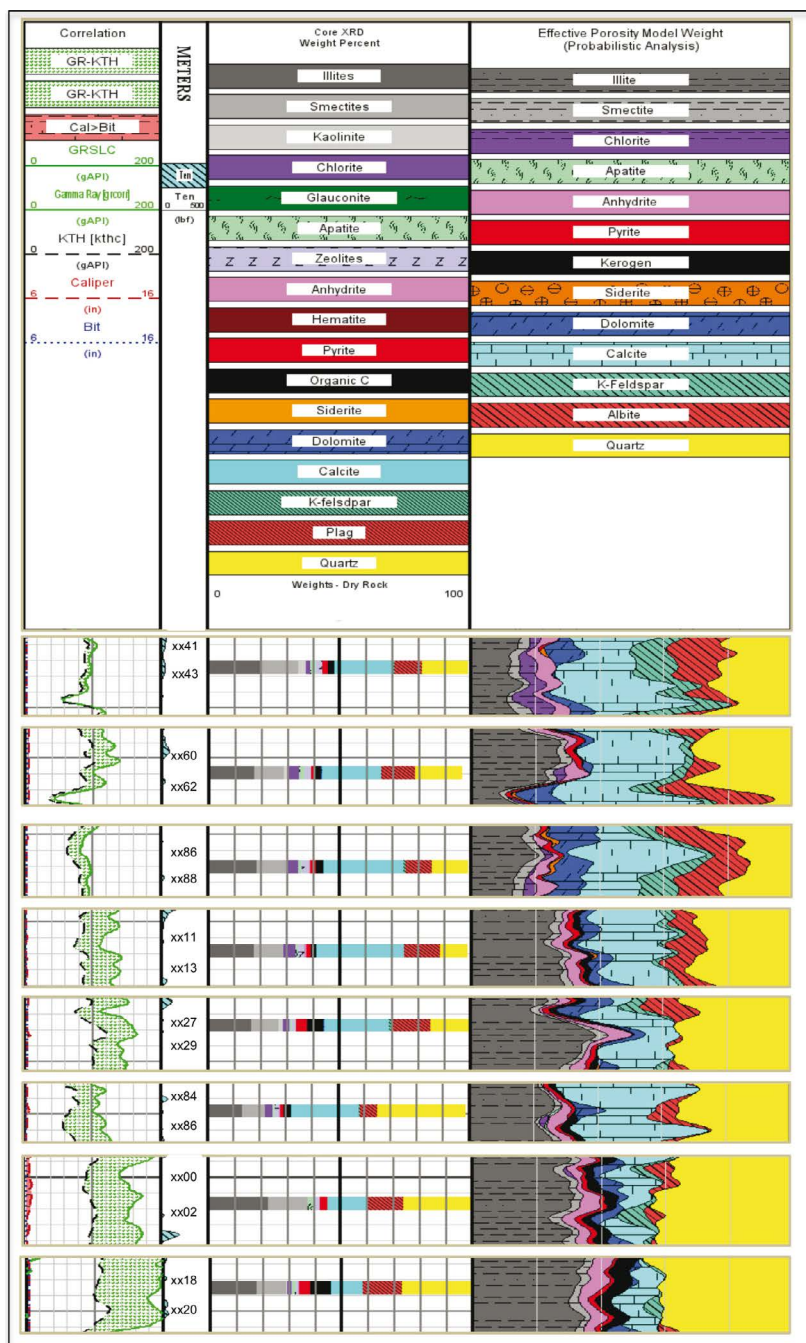


Figura 6. Comparación de resultados de DRX de muestras de corona y método de optimización sin aplicar el modelo de restricción geológica en el pozo A. Se utilizaron secciones del intervalo total para su mejor visualización.

Modelo mineralógico utilizando restricciones geológicas basado en funciones probabilísticas.
Caso de estudio en la Formación Vaca Muerta, Argentina

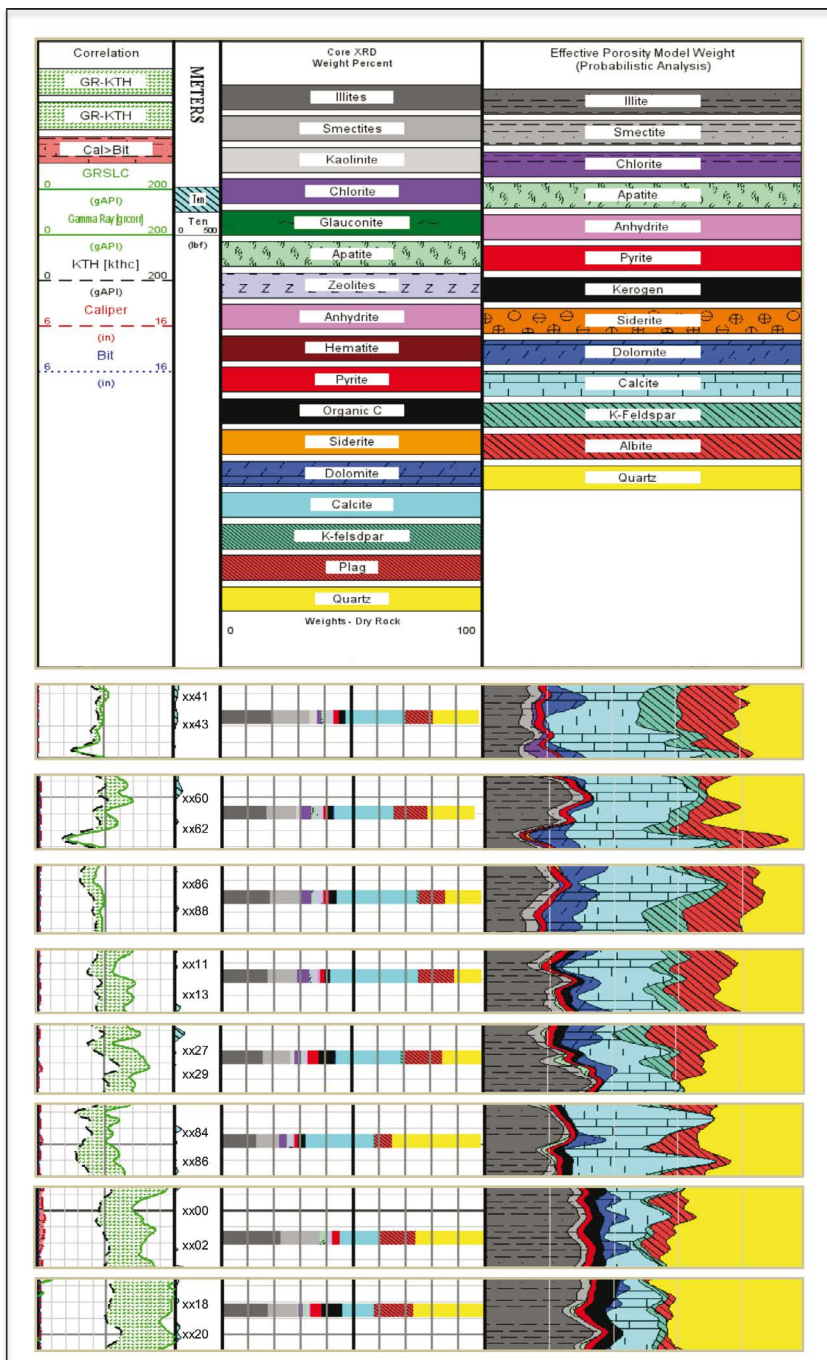


Figura 7. Comparación de resultados de DRX de muestras de corona y método de optimización luego de aplicar el modelo de restricción geológica en el pozo A. Se utilizaron secciones del intervalo total para su mejor visualización.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se han aplicado funciones probabilísticas para mejorar el modelo mineral que representa resultados geológicamente más sólidos. El peso de penalización de la función de relaciones depende de la función probabilística asignada a la restricción utilizada. Se presentó un modelo usando el algoritmo propuesto: una restricción pirita/anhidrita basada en la relación hierro/azufre.

Este algoritmo se aplicó en las secciones de “la cocina” y “orgánico” de la Formación Vaca Muerta en un pozo en el bloque Loma Campana para la correcta determinación de la asociación mineralógica de ambiente anóxico que los caracteriza.

Se observó que antes de aplicada la restricción geológica la concentración de anhidrita en la sección analizada es 3.1%, mientras que el contenido de pirita es de 1.3%. Este resultado muestra una cantidad significativa de anhidrita, cuya existencia es menos posible en ambientes anóxicos. Luego de aplicada esta restricción, el contenido de anhidrita es reemplazado por pirita, lo que es representativo de este ambiente deposicional. Luego de utilizar la restricción geológica, el modelo mineralógico se corresponde con los resultados de DRX de testigos corona.

Los resultados prometedores de este estudio demostraron que el método propuesto es una herramienta efectiva para mejorar la evaluación de formaciones integrada en condiciones ambientales exigentes, especialmente en reservorios no convencionales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer la gestión de YPF S.A., que desinteresadamente nos permitieron utilizar los datos de este caso y a Baker Hughes a GE Company, por el permiso para publicar este artículo.

REFERENCIAS CITADAS

- | | |
|--|---|
| <p>Cristallini, E. R., Tomezzoli, G., Pando, C., Gazzera, J., Martínez, J., Quiroga, J., Bühler, M., Bechis, F., Barredo, S. y Zambrano, O. 2009. “Controles Precuyanos en la estructura de la Cuenca Neuquina”, Revista de la Asociación Geológica Argentina 65: 48-64.</p> <p>Desjardins, P., Fantín, M., González Tomassini, F., Reijenstein, H., Sattler, F., Domínguez, R., Kietzmann, D., Leanza, H.A., Bande, A., Benoit,</p> | <p>S., Borgnia, M., Vittore, F., Gil, G., Simo T. y Minisini, D. 2016. “Capítulo 2: Estratigrafía Sísmica Regional. En: González, <i>et al.</i> 2016, Trancha Regional de la Formación Vaca Muerta”. Publicación especial del IAPG, p. 5-22. Buenos Aires.</p> <p>Doverton, J.H. 1994. “Geologic log analysis using computer methods. AAPG computer applications in geology”, No. 2. AAPG, Tulsa.</p> |
|--|---|

- Licitra, D.T., Lovrinovich E., Vittore F., Quiroga J., Oviedo P., Montoya V., Shannon C., Monti L., 2015. "Sweet Spots in Vaca Muerta: Integration of Subsurface and Production Data in Loma Campana Shale Development, Argentina". URTeC: 2153944. Unconventional Resources Technology Conference, 20-22 July, San Antonio, Texas, USA.
- Mayer, C. and Sibbit, A. 1980. "GLOBAL, a new approach to computer-processed log interpretation". In SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- Mezzatesta, A., Rodriguez, E. and Frost, E. 1988. "OPTIMA: a statistical approach to well log analysis". *Geobyte*; (United States), 3(3).
- Mitchell, W.K. and Nelson, R.J., 1988. "A practical approach to statistical log analysis". In SPWLA 29th Annual Logging Symposium. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts.
- Mitchum, R. M. y Uliana, M.A., 1982. "Estratigrafía sísmica de las Formaciones Loma Montosa, Quintuco y Vaca Muerta, Jurásico Superior y Cretácico Inferior de la Cuenca Neuquina, Argentina", 1º Congreso Nacional de Hidrocarburos, Petróleo y Gas, Actas p. 439-484, Buenos Aires, Argentina.
- Reijenstein. H. M., Domínguez R.F., Bande A., Vallejo M.D., Notta R., Guerberoff D., Lanusse Noguera, I., Köhler, G., Borgnia. M., Benoit, S., Leanza, H. A., Gómez Rivarola, L. Weger R., González Tomassini, F., Kietzmann, D., Rodríguez Schelotto M. L., Desjardins, P., Marchal, D., Martínez A., Vittore F., Fantín M., Depine, G., Sattler, F., Rosemblat, A., 2017b. "Transecta Sísmica Regional del Sistema Vaca Muerta – Quintuco: Interpretación de facies sísmicas basada en impedancia acústica y litofacies dominantes", XX Congreso Geológico Argentino, San Miguel de Tucumán
- Reijenstein. H. M., Iván Lanusse Noguera, I., Oviedo, P., Licitra, D., Sotelo, D., Vittore, F., Quiroga, J. González Tomassini, F., 2017a. "¿Deslizamientos en Vaca Muerta? Observaciones e integración de datos sísmicos, pozos y coronas en el Yacimiento Loma Campana, Cuenca Neuquina, Argentina", XX Congreso Geológico Argentino, San Miguel de Tucumán.
- Rodriguez, E., Tetzlaff, D.M., Mezzatesta, A. and Frost, E., 1988. "Estimating rock properties by statistical methods. In International Meeting on Petroleum Engineering". Society of Petroleum Engineers.
- Vittore, F., Quiroga J., Foster, M. y Sagasti, G. 2016. "Capítulo 8: Loma Campana. En: Gonzalez *et al.* Transecta Regional de la Formación Vaca Muerta". Publicación especial del IAPG, p. 83-93. Buenos Aires.