

PREDICCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE *BEEFS* EN LA FORMACIÓN VACA MUERTA. UN ANÁLISIS INTEGRADO

Juan Pablo Palacio¹, Damián Emmanuel Hryb¹, Federico González Tomassini¹

1: YPF S.A., juan.p.palacio@ypf.com, damian.hryb@ypf.com, federico.gonzalez@ypf.com

Keywords: *Beef*, Formación Vaca Muerta, *Shale*

ABSTRACT

A prediction of *beef* distribution in the Vaca Muerta Formation. An integrated analysis

Beefs refer to bed parallel natural fractures, commonly calcite-filled. Their presence is frequent in shale oil/gas reservoirs. In the last years, this type of natural fractures has been a topic of discussion on how they impact to the hydraulic fracture, and consequently in wells productivity and project economics.

This study presents a detailed characterization of beefs observed in the Vaca Muerta cores; and an analysis of their relationship with other rock properties. The aim is to predict and identify zones with high or low intensity of these structures. The integration of the natural fracture and sedimentological description from cores illustrates that the beef intensity has a clear relation with the sedimentological facies and its stacking pattern. The facies associations with high total organic carbon (TOC) and low calcite content display the high beef intensity (8 beef/meter) and it decreases to the facies association with low TOC and high calcite content (1 beef/meter). This pattern is observed in all the wells analyzed, independently of its position in the basin. We also observed an increase of beef thickness to the west of the Neuquén Basin, where rock maturity and deformation are high.

On the basis of the beef intensity, it is possible to identify zones with high beef intensity that can be correlated between wells and it follows a stratigraphic correlation. In consequence it is possible to predict the beef intensity in the Vaca Muerta Formation on different positions in the basin, based on the stratigraphic context and the relationships obtained with the core description. This data is used with the petrophysical and geomechanical studies to select the best landing zones for horizontal wells in the Vaca Muerta Formation.

INTRODUCCIÓN

Se denominan *beefs* a las fracturas naturales paralelas a la laminación, generalmente rellenas de calcita fibrosa, cuya presencia es frecuente en los reservorios no convencionales de tipo *shale* oil/gas (Cobbold *et al.* 2013, Wang 2016, Lejay *et al.* 2017). En los últimos tiempos este tipo de fracturas naturales han sido motivo de discusión en cuanto a la manera que afectan el crecimiento de la fractura hidráulica, y consecuentemente, en la productividad de pozos y economicidad de proyectos. Los *beefs* constituyen heterogeneidades dentro de la Formación Vaca Muerta, y como tales generan un contraste de propiedades mecánicas. Esto es de notable importancia ya que podría

impactar directamente en el crecimiento de la fractura hidráulica, disminuyendo la eficiencia o generando puntos de desconexión o desvíos (Warpinski y Teufel, 1987, Teufel y Clark, 1984, Smith *et al.*, 2001, Suarez-Rivera *et al.* 2013, Sagasti *et al.*, 2014)

El objetivo de este trabajo es realizar un estudio de detalle de los *beefs* sobre la base de su descripción en testigos coronas de la Formación Vaca Muerta en el área. De esta manera se intenta arribar a un modelo que permita predecir e identificar tempranamente zonas con mayor o menor intensidad de este tipo de fracturas naturales.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se enmarca en la cuenca Neuquina, al norte de la dorsal de Huincul, en la zona en donde se está llevando adelante la delineación y el desarrollo de la Formación Vaca Muerta como objetivo No Convencional (Fig. 1).

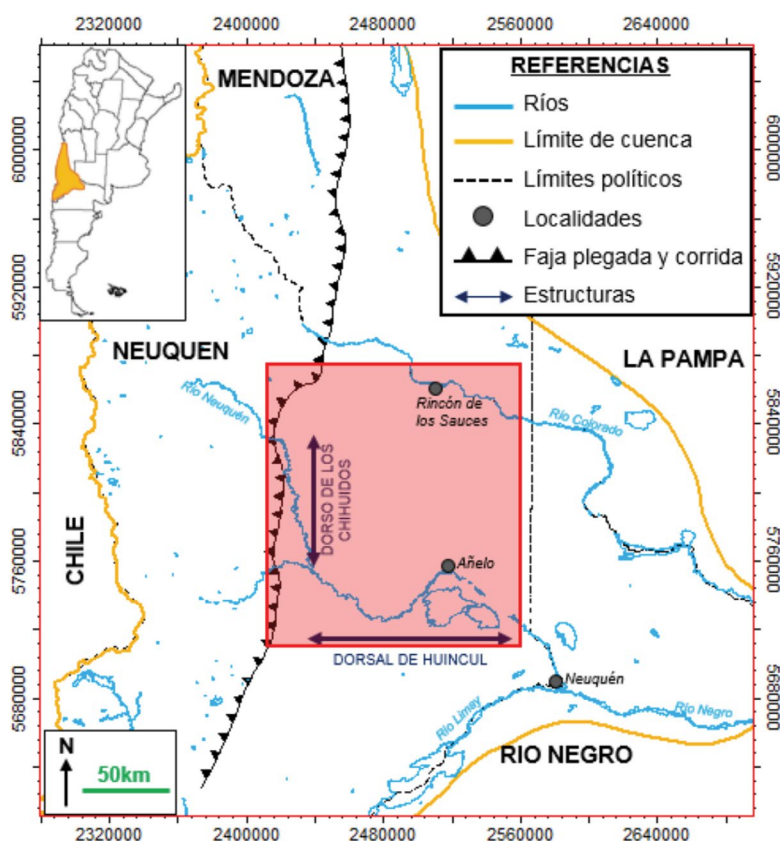


Figura 1. Ubicación del área de estudio dentro de la cuenca Neuquina (cuadro rojo).

METODOLOGÍA

Se realizó la descripción de testigos coronas, desde un punto de vista sedimentológico y de fracturas naturales. La integración de ambas descripciones y su análisis en conjunto sentaron las bases para este trabajo. Fueron descriptos más de 1000 metros de coronas de la Formación Vaca Muerta, distribuidos a lo largo de toda la cuenca Neuquina y cubriendo las distintas zonas de fluidos.

Fracturas Naturales

La descripción de fracturas naturales se llevó a cabo siguiendo la metodología propuesta por Gale *et al.* (2014) que toma en cuenta la profundidad, espesor, largo, apertura, tipo de cemento, terminaciones, inclinación, intensidad y espaciamiento (Fig. 2).

Sedimentología

La descripción sedimentológica fue realizada capa a capa y complementada con descripción de cortes delgados y estudios de COT (carbono orgánico total), XRD (difracción de rayos-X) y MEB (microscopio electrónico de barrido). Para la interpretación de las asociaciones de facies se adoptó la propuesta de Schlager (2005) y para la interpretación estratigráfico - secuencial se utilizó el esquema de Bohacs y Lazar (2010) y Gonzalez Tomassini *et al.* (2016).

Como resultado de la descripción sedimentológica de la corona se identificaron 5 asociaciones de facies que de mayor a menor contenido de Carbono Orgánico Total (COT) y de menor a mayor contenido de Carbonato de Calcio (CaCO_3) se ordenan así: Fangolita silicoclástica, Fangolita calcárea rica en materia orgánica, Fangolita calcárea, Híbridos (Fangolita calcárea-carbonatos) y Carbonatos (Fig. 3).

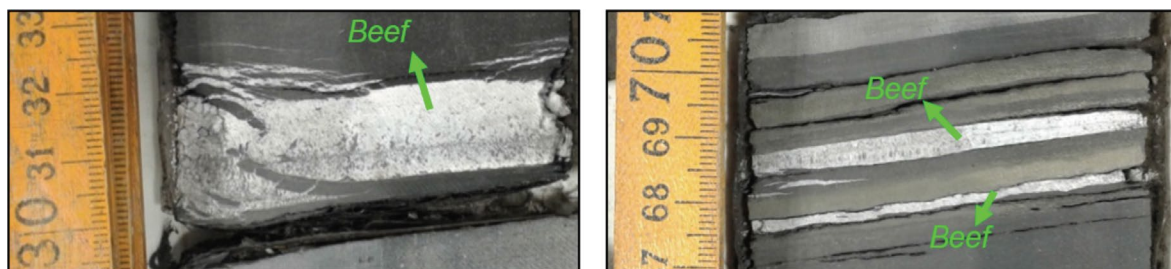


Figura 2. Detalle de los beefs observados en las coronas. Con una flecha verde se indica su ubicación.

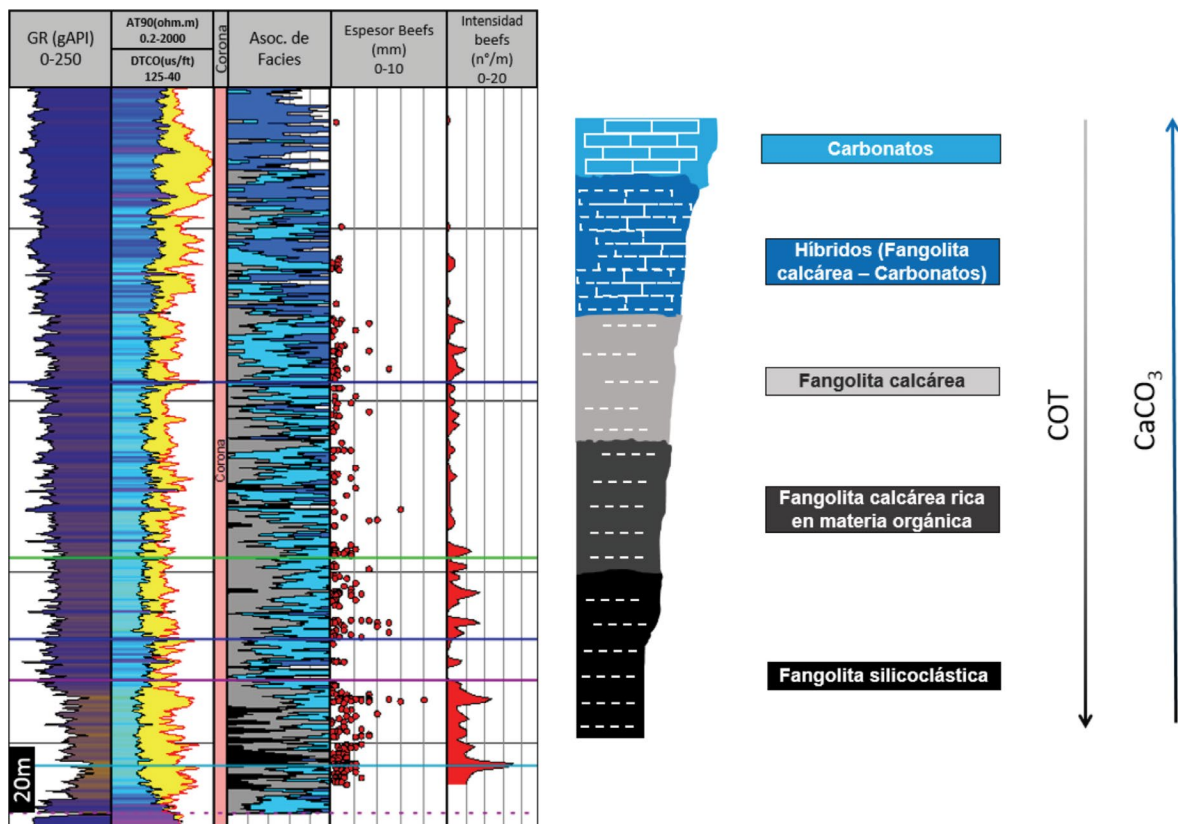


Figura 3. Descripción integral de coronas. A la izquierda se observa la descripción de la corona de un pozo, tanto sedimentológica como de *beefs*. A la derecha, las asociaciones de facies interpretadas.

DISCUSIÓN

Relación entre intensidad de *beefs* y facies

A partir de la integración de las dos descripciones se observó la existencia de una clara relación entre los *beefs* y las facies sedimentarias en donde se encontraban. Se calculó para cada una de las asociaciones de facies la intensidad de fracturamiento de *beef*, es decir cantidad de *beef*/metro y se graficó en distintos histogramas, uno para cada pozo (Fig. 4).

Analizando los gráficos se observa que las facies más orgánicas son las que mayor intensidad de *beefs* poseen (8 *beef*/metro aproximadamente), y decrece la intensidad hacia las facies de menor COT y mayor CaCO₃ (1 *beef*/metro). Este patrón se observa sistemáticamente para todos los pozos sin importar la posición relativa de los mismos en la cuenca, es decir, los pozos ubicados en el oeste poseen la misma relación con las facies que los pozos ubicados en el este, a varios kilómetros de distancia.

La figura 5 corresponde a una correlación de pozos en sentido O-E. En la misma está representada la intensidad de *beefs* calculada a partir de las descripciones en coronas (cuarta columna). Se observa en ciertos intervalos picos de alta intensidad de *beefs*, que se pueden identificar

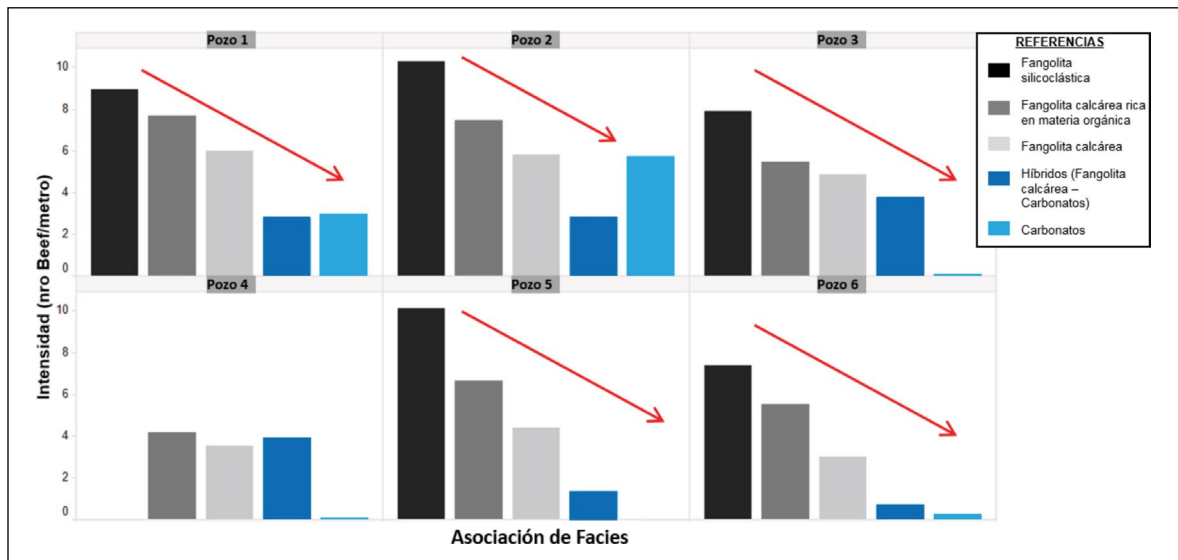


Figura 4. Intensidad de beefs vs asociaciones de facies. El eje (X) representa las asociaciones de facies ordenadas de mayor a menor contenido de COT y de menor a mayor contenido de CaCO_3 . En el eje (Y) está graficada la intensidad de *beef*.

y correlacionar entre pozos (algunos de ellos ubicados a una distancia considerable entre sí). Sobre la base de la correlación estratigráfica y el análisis estratigráfico-secuencial, se puede observar que estos picos de alta intensidad de *beef* coinciden con superficies de máxima inundación en los que cambia el patrón de apilamiento de facies. En los intervalos transgresivos del sistema en donde se hacen presentes las facies con mayor contenido orgánico, se observan altos valores de intensidad de *beef*, observándose un pico de máxima intensidad en las superficies de máxima inundación. A

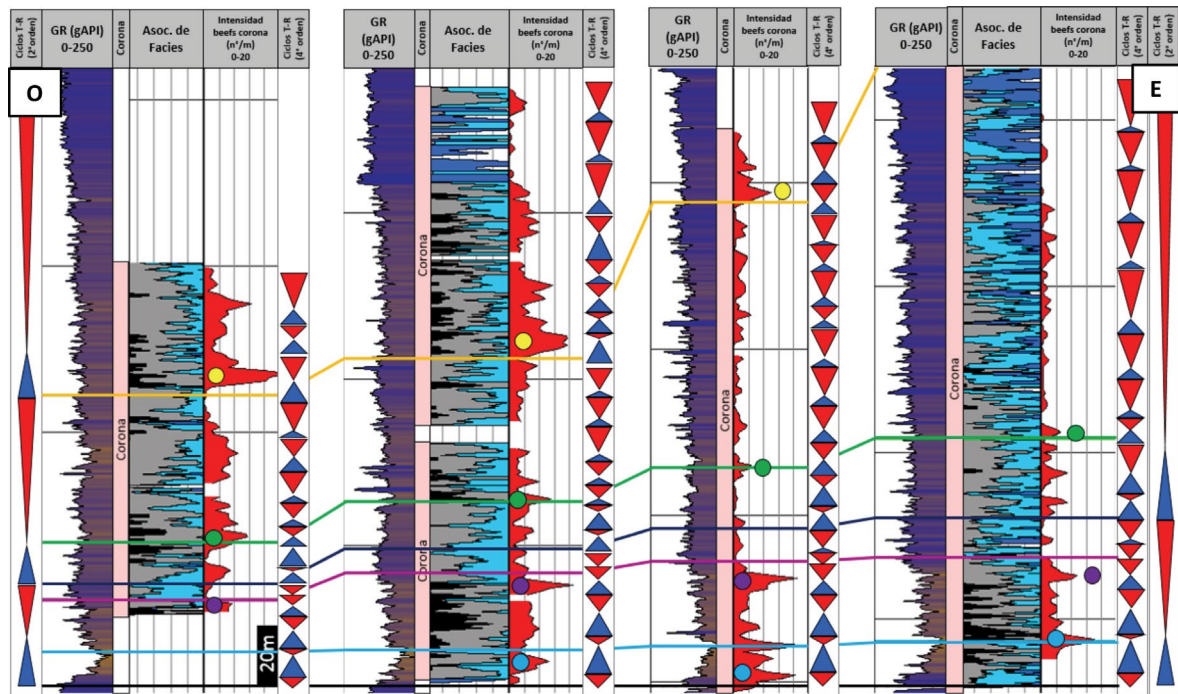


Figura 5. Correlación de pozos en sentido E-O. En círculos de colores se identifican los picos de intensidad de beefs que correlacionan entre pozos.

partir de este punto los valores de intensidad de *beef* decrecen a medida que el sistema progresa hacia facies con menor contenido orgánico y mayor contenido de CaCO_3 . Cuando ocurre una nueva transgresión en el sistema, vuelven a apreciarse altos valores de intensidad de *beef*, los cuales vuelven a decrecer cuando el sistema vuelve a progradar. Esto se observa a lo largo de todo el intervalo de la Formación Vaca Muerta en todos los pozos descritos. A su vez, en posiciones distales del sistema, en ambientes donde abundan las asociaciones de facies con mayor COT y menor CaCO_3 la intensidad de *beef* es alta. En cambio, para el mismo intervalo temporal, en posiciones proximales del sistema, donde son frecuentes asociaciones de facies con menor COT y mayor CaCO_3 , la intensidad de *beef* disminuye considerablemente.

Predicción de intensidad de *beefs*

Teniendo en cuenta que la intensidad de *beefs* presenta una estrecha relación con las facies en las que aparecen y su patrón de apilamiento, se creó un modelo regional poblando la intensidad de *beefs* de los datos de corona y propagando esta propiedad utilizando el mismo variograma con el cual se propagan las facies (Fig. 6). De esta manera se puede conocer de manera predictiva cuál es la respuesta esperada de intensidad de *beefs* en zonas donde no se cuenta con datos de corona.

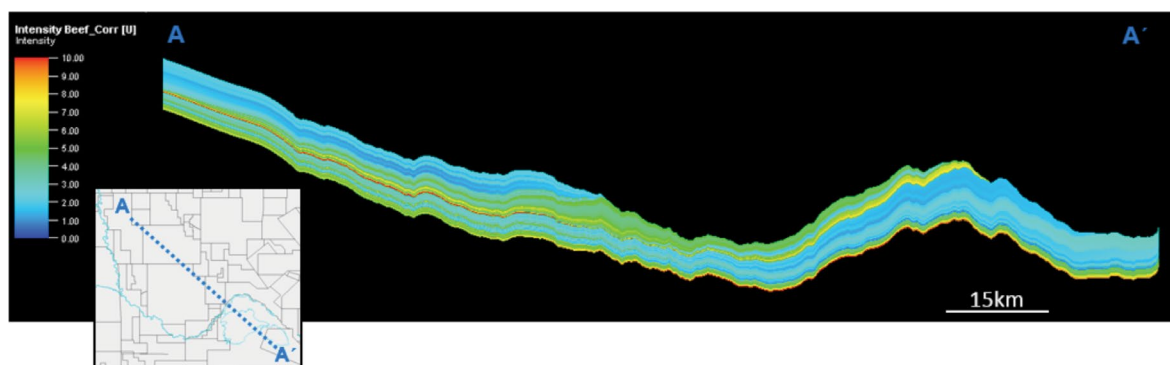


Figura 6. Modelo predictivo de intensidad de *beefs*

La figura 7 presenta una correlación de pozos en la que se ve el poblado del modelo de intensidad de *beefs*. Se observa que en los intervalos donde no existe dato de corona el modelo completa el perfil de intensidad, replicando los picos de intensidad que aparecen la descripción de otras coronas.

Espesor

Otra característica destacable de los *beefs* refiere a su espesor. En este trabajo se midieron valores que van desde menores a un milímetro hasta algunos centímetros (Fig. 8).

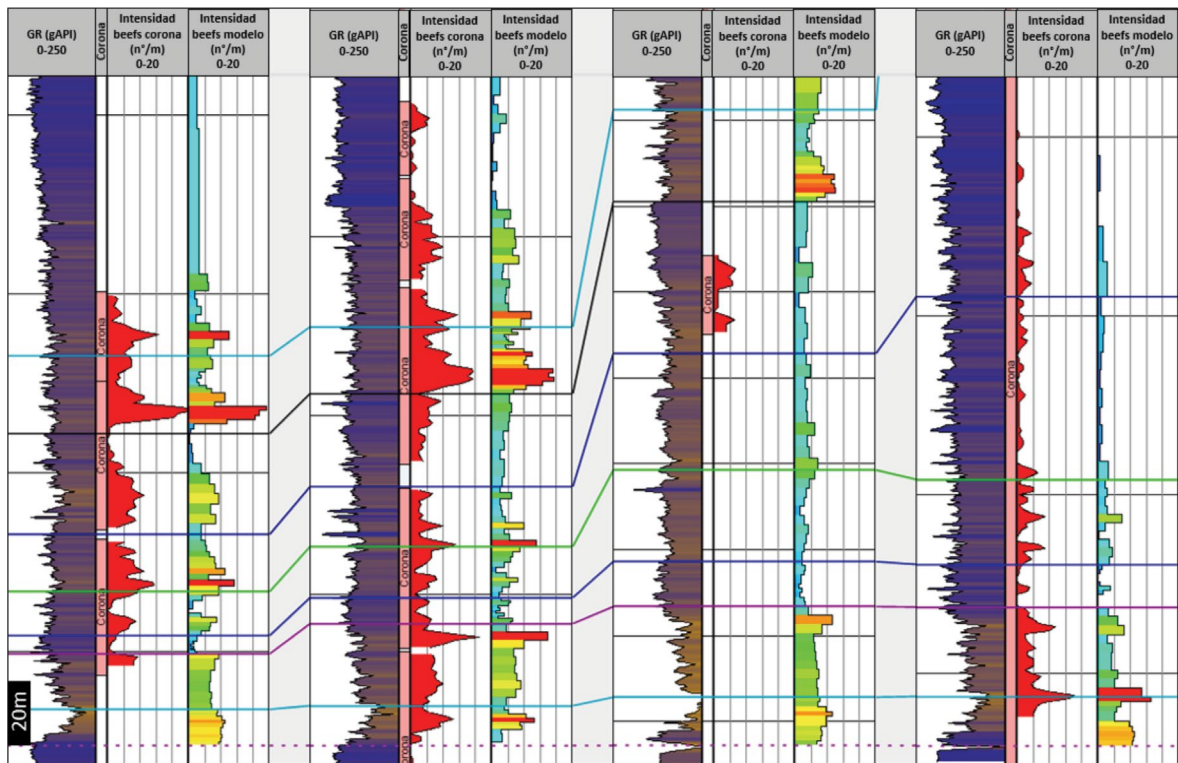


Figura 7. Correlación de pozos con el modelo de intensidad de *beefs*.

Al igual que con la intensidad, se contempló la posibilidad de encontrar una relación entre el espesor de los *beefs* y las facies. El resultado en este caso fue negativo. En los siguientes gráficos se observan histogramas de espesor promedio para cada facies y se visualiza la ausencia de un patrón claro entre pozos a diferencia de la clara relación que presenta la intensidad (Fig. 9).

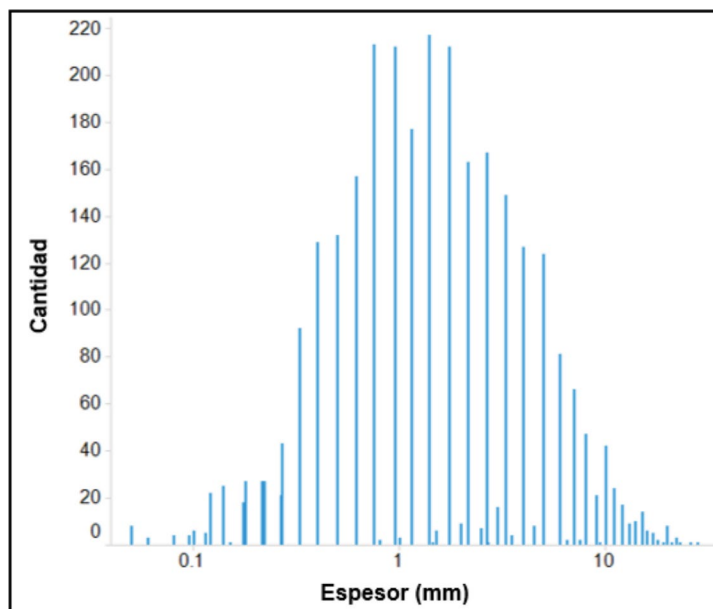


Figura 8. Distribución de espesores de *beefs* (escala logarítmica). El valor más probable se encuentra alrededor de 1 milímetro.

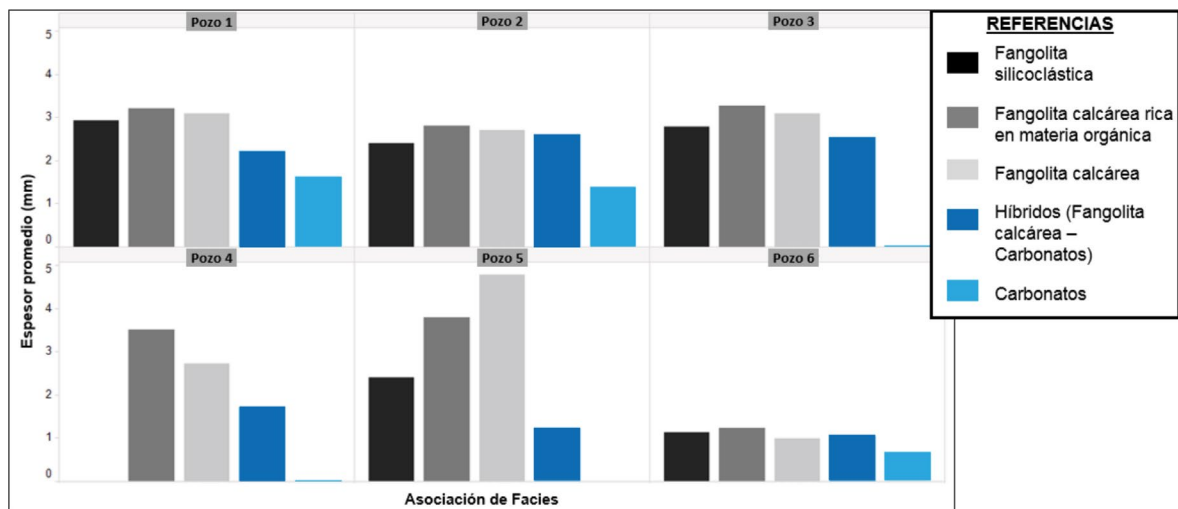


Figura 9. Distribución de espesores de *beefs* para cada asociación de facies.

Sin embargo, continuando con el análisis, se pudo observar que la mayor variación con respecto al espesor estaba controlada por disposición areal de los pozos. Se observó que los pozos ubicados hacia el este de la cuenca presentaban menores espesores de *beefs* que los encontrados en los pozos del oeste. En la figura 10 se observa como la línea de espesor medio de *beefs* va migrando hacia valores más altos en los pozos ubicados hacia el oeste de la cuenca.

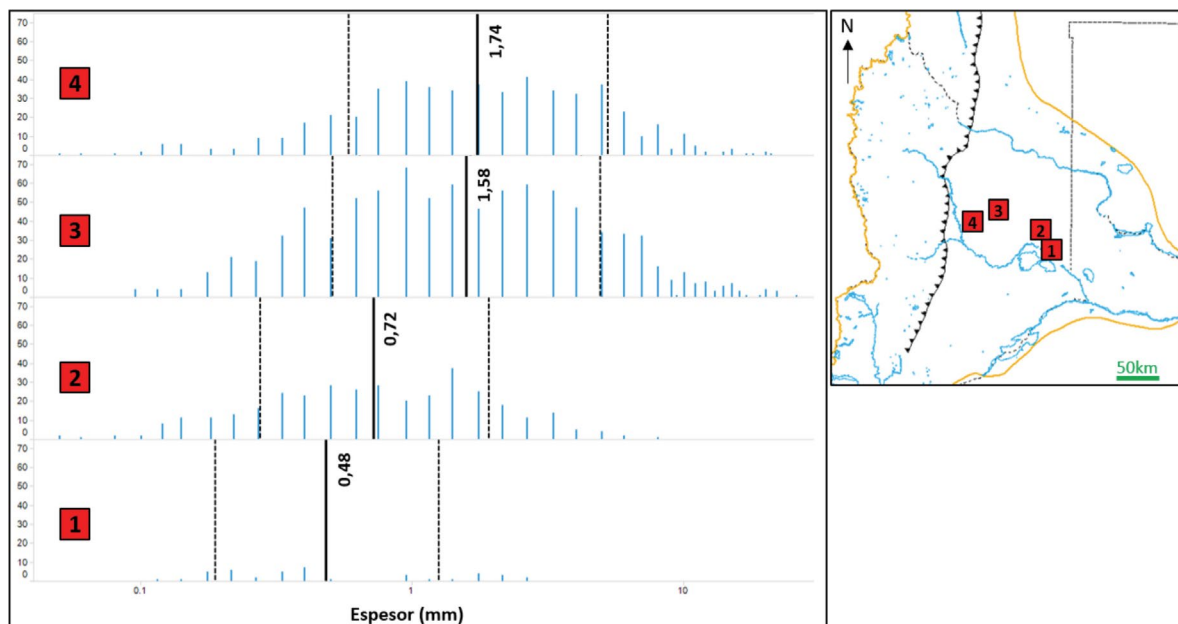


Figura 10. Histograma de espesores de *beefs*. Se encuentran graficados distintos pozos, puestos uno sobre el otro. En el mapa de la derecha se observa la ubicación de cada uno. La línea negra gruesa en los histogramas indica el espesor medio de *beefs* para cada pozo.

Se interpreta que en la zona de estudio esta variación en el espesor de los *beefs* podría estar asociada a la madurez del contenido orgánico de la roca y la concentración de la deformación en

la cuenca. Para visualizar estas propiedades, se cuantificó a la madurez de la roca con la reflectancia de la vitrinita (%Ro) y a la posición E-O de los pozos con la distancia a punto conocido, el límite de la faja plegada y corrida, para distinguir zonas de mayor (oeste) y menor (este) deformación. Se graficaron entonces estas propiedades en función del espesor promedio, obteniendo para ambos casos un buen ajuste (Fig. 11). Para dicho ajuste se tuvieron en cuenta sólo los pozos que poseen mayor cantidad de metros de corona. Sin embargo, aquellos pozos con pocos datos de corona también se ubican dentro del rango de ajuste. A partir de este resultado se tiene una aproximación al cálculo de espesores promedio en función de dos variables, lo que podría ser útil a la hora de hacer un modelo de fracturas naturales.

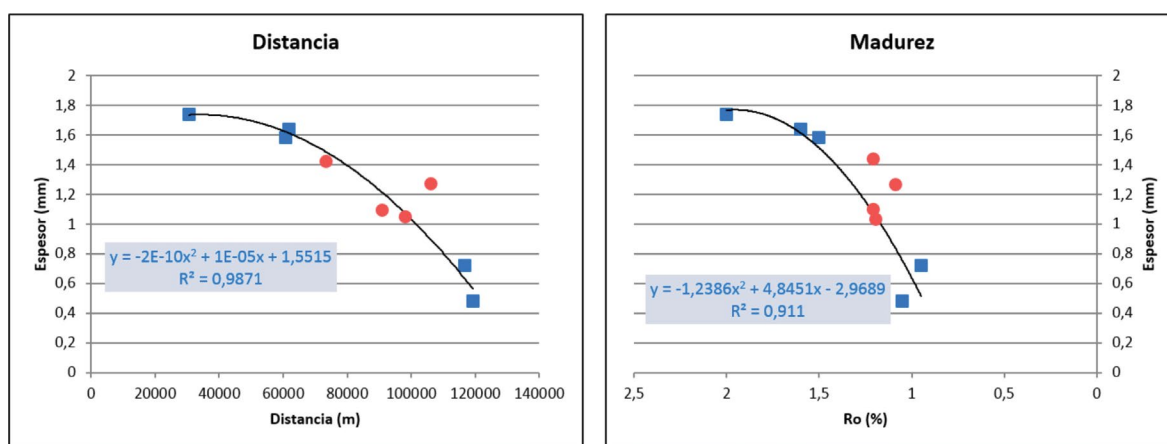


Figura 11. Distancia a la faja plegada y corrida (m) y madurez (%Ro) en función del espesor promedio de *beef* para cada pozo. Los pozos identificados en cuadrados azules son los que mayor dato de corona poseen y los utilizados para realizar la función de ajuste. Los círculos rojos corresponden a los pozos que menor dato de corona poseen y que no fueron incluidos en el cálculo de ajuste.

Una característica que podría reforzar la idea de la relación entre el espesor de *beef* y el aumento de la deformación hacia el oeste, es la inclinación de las fibras de calcita en el relleno de estas estructuras. Se observa tanto macroscópicamente como en cortes delgados, que las fibras de calcita sufren una inclinación desde la zona interior hacia la exterior del *beef*. Esto fue analizado ampliamente por Cobbold *et al.* (2013), Gale *et al.* (2014) y Ukar *et al.* (2017). Los *beefs* comienzan su apertura con fibras de calcitas prácticamente verticales y se van inclinando hacia las paredes externas a medida que aumenta la apertura. Cada intervalo de crecimiento con diferente inclinación se lo asocia a un nuevo pulso de generación (Fig. 12) y la inclinación sería consecuencia del efecto de *shear* o corte. Cada pulso estaría asociado a un evento tectónico compresivo. Los *beefs* ubicados en una posición más occidental de la cuenca, fueron expuestos a una mayor actividad tectónica, sufriendo mayor cantidad de pulsos de crecimiento y por ende alcanzando espesores mayores.

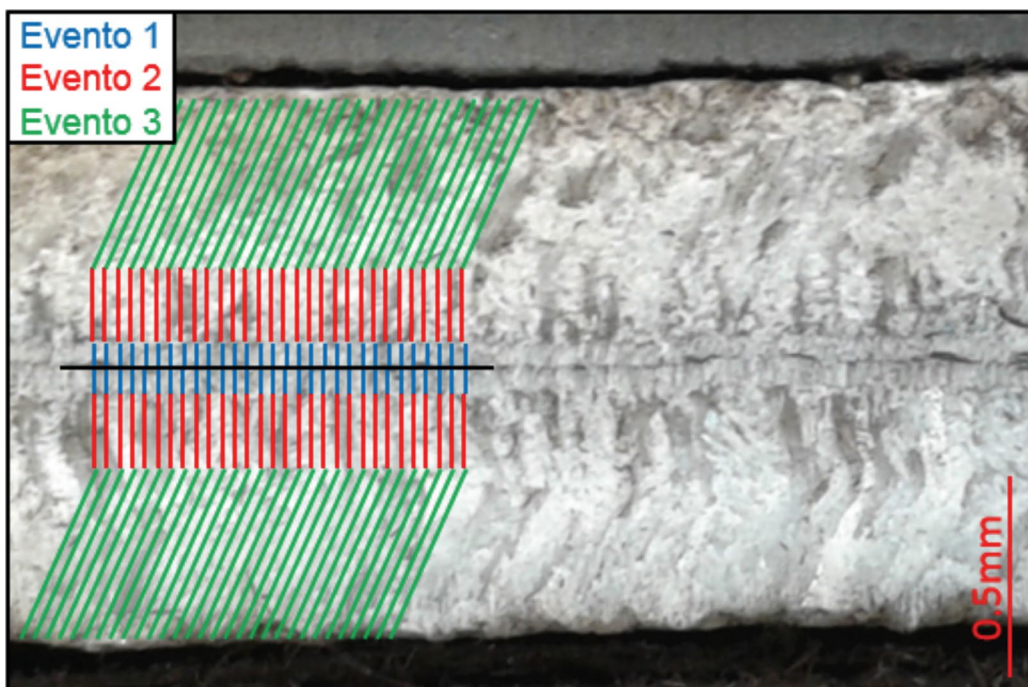


Figura 12. *Beef* en el que se identifican tres pulsos o eventos de crecimiento. Sobre el *beef* se ilustran los eventos de crecimiento a partir de su línea media, y la inclinación de las fibras de calcita hacia las paredes externas.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un estudio detallado de los *beefs* observados en coronas de la Formación Vaca Muerta, se analizó su relación con otras propiedades de la roca.

La asociación entre las facies sedimentarias y las fracturas naturales observadas en coronas permitió reconocer la relación existente entre los *beefs* y las facies depositacionales. En consecuencia, se observó que la intensidad de *beefs* se relaciona claramente con las facies sedimentarias y su patrón de apilamiento, siendo las asociaciones de facies con mayor contenido orgánico y menor contenido de carbonato de calcio las que mayor intensidad de fracturas poseen (8 *beef* por metro aproximadamente), disminuyendo progresivamente hacia las asociaciones de facies con menor contenido orgánico y mayor contenido de carbonato de calcio (1 *beef* por metro). Este patrón se observa en todos los pozos analizados independiente de su posición relativa en la cuenca.

Analizando las intensidades de los *beefs*, obtenidas a partir de la descripción de coronas, y dentro de un esquema estratigráfico, se puede observar la existencia de zonas con alta intensidad a lo largo de la columna estratigráfica y a su vez entre pozos. De esta manera, es posible determinar la intensidad de *beefs* esperada en la Formación Vaca Muerta para diferentes posiciones dentro del área de estudio sobre la base del esquema estratigráfico y a partir de los estudios litológicos de corona. Se creó así un modelo predictivo poblando los perfiles de intensidad de *beefs* y utilizando métodos de propagación de facies, que posteriormente será actualizado y alimentado con nuevos datos de coronas para obtener un modelo aún más robusto.

Paralelamente, se realizó un análisis de espesor de los *beefs* y su variación a lo largo de la cuenca. Comparando entre pozos, se observó un incremento de espesores promedio hacia el oeste de la cuenca, en zonas de mayor madurez de materia orgánica y mayor concentración de la deformación. Analizando la estructura interna de los *beefs* y la inclinación de sus fibras de calcita, se podría interpretar que los *beefs* encontrados en el sector occidental de la cuenca están sometidos a una mayor deformación tectónica que determinaron un número aún mayor de capas de crecimiento mineral y consecuentemente, un mayor espesor de *beef* que aquellos desarrollados en el sector oriental de la cuenca.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a YPF S.A por permitirnos presentar los resultados de este estudio. También queremos agradecer a Ramiro López, Guillermina Sagasti, Alberto Ortiz, Carolina Bernhardt, Jimena Rodriguez, Martin Foster y Felipe Lozano por sus valiosos comentarios y contribuciones.

REFERENCIAS

- Bohacs, K.M. y O.R., Lazar, 2010. Sequence Stratigraphy in fine-grained Rocks. en J.Schieber, , Lazar, O.R., y K.M. Bohacs, (eds.), Sedimentology and Stratigraphy of *Shales*: Expressions and correlation of Depositional Sequences in the Devonian of Tennessee, Kentucky, and Indiana. American Association of Petroleum Geologists.
- Cobbold, P.R., A., Zanella, N., Rodrigues, y H. Løseth, 2013. Bedding-parallel fibrous veins (*beef* and cone-in-cone): worldwide occurrence and possible significance in terms of fluid overpressure, hydrocarbon generation and mineralization: Marine and Petroleum Geology, v. 43, p. 1-20.
- Gale, J.F., S. E., Laubach, J. E. Olson, P., Eichhubl y A., Fall, 2014. Natural Fractures in *Shale*: A Review and New Observations. AAPG Bull. 98 (11): 2165–2216.
- Lejay, A., S., Larmier, P., Rutman y F., Gelin, 2017. The role of porosity in the development of parallel bedded calcite filled fractures (or *beef*) in the Vaca Muerta: an integrated analysis from high resolution core data. SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference (URTeC), Austin, Texas, USA, 24–26 Julio. URTeC-2668071-MS.
- Sagasti, G., M., Foster, D., Hryb, A., Ortiz y V, Lazari, 2014. Understanding geological heterogeneity to customize field development: An example from the Vaca Muerta unconventional play, Argentina. Unconventional Resources Technology Conference (URTeC), Denver, Colorado, USA, 25-27 Agosto. URTeC 1923357
- Schlager, W., 2005. Carbonate Sedimentology and Sequence Stratigraphy. SEPM Concepts in Sedimentology and Paleontology Series (Número 8, 200 p.).
- Smith, M. B., A. B., Bale, L. K., Britt, H. H., Klein, E., Siebrits y X., Dang, 2001. Layered modulus

- effects on fracture propagation, proppant placement, and fracture modeling. Society of Petroleum Engineers Annual Technical Conference and Exhibition, 30 Septiembre- 3 Octubre, Nueva Orleans, Louisiana. SPE-71654-MS.
- Suarez-Rivera, R., J., Burghardt, S., Stanchits, E., Edelman y A., Surdi, 2013. Understanding the effect of rock fabric on fracture complexity for improving completion design and well performance. EAGE International Petroleum Technology Conference, 26-28 Marzo, Beijing, China.
- Teufel, L. W. y Clark, J. A. (1984). Hydraulic Fracture Propagation in Layered Rock: Experimental Studies of Fracture Containment. Society of Petroleum Engineers, Journal of Petroleum Technology número 24. SPE-9878-PA.
- Tomassini, F. G., D. E., Hryb, G., Sagasti, J. L., Massafiero, y L. T., Smith, 2016. Why do we have to care about detailed reservoir characterization? We will break it all. Do we? SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference (URTeC), San Antonio, Texas, USA, 1-3 Agosto. URTeC-2460837.
- Ukar, E., R. G., Lopez, J.F., Gale, S. E., Laubach y R., Manceda, 2017. New type of kinematic indicator in bed-parallel veins, Late Jurassic–Early Cretaceous Vaca Muerta Formation, Argentina: EW shortening during Late Cretaceous vein opening. Journal of Structural Geology, número 104, páginas 31-47.
- Wang, Qiqi, 2016. Characterization of Bedding-Parallel Fractures in *Shale*. Universidad de Texas, Austin. Tesis Maestría, 324 p., inédito.
- Warpinski, N. R. y L. W., Teufel, 1987. Influence of Geologic Discontinuities on Hydraulic Fracture Propagation. Society of Petroleum Engineers, Journal of Petroleum Technology número 34. SPE-8932-PA.