

CARACTERIZACIÓN DE LAS FRACTURAS NATURALES DE LAS FORMACIONES VACA MUERTA Y MULICHINCO EN LA ESTRUCTURA DE FILO MORADO, CUENCA NEUQUINA, ARGENTINA

Julián Fantín¹, René Manceda¹, Belén Palacio², Ramiro López², Karina Mykietiuik², Rosina Barberis²

1: YPF S.A. julian.fantin@ypf.com, rmanceda@ypf.com

2: YPF S.A.

Palabras clave: Fracturas naturales, estructuras complejas, campo de esfuerzos, análisis geomecánico, zonas de mayor intensidad de fracturación

ABSTRACT

Characterization of Natural Fractures of Vaca Muerta and Mulichinco Formations in filo Morado structure, Neuquén Basin, Argentina

Filo Morado is a structurally complex mature field, located in the Fold and Thrust belt of the Neuquén Province, which has been produced from fractured traditional reservoirs, Mb. Troncoso Inferior and Mb. Avilé. This study focuses on deeper units, below the currently developed ones, which are naturally fractured tight sands from Mulichinco and Vaca Muerta Formations. Filo Morado structure is characterized by a complex structure with several faults, which experienced a complex tectonic evolution through the rotation of the main horizontal stress over time.

A geomechanical approach using progressive 3D models according to the different tectonic phases was carried out. This model allowed analyzing the effect of remote stresses on fault planes which create local stress fields. These interactions caused the generation of different fracture *sets*, orientations and main intensity fractured zones. In this mechanical model we used a homogeneous half-elastic space with a linear elastic and isotropic behavior characterized by two constants, Poisson's ratio and Young's Modulus. The stress tensor computed on Vaca Muerta and Mulichinco formations observation grids was combined with a Coulomb failure criterion and maximum Coulomb shear stress to create maps of both the probable secondary fault strike and location, calibrated with boreholes images data.

Besides the Filo Morado field, this approach can be used as a new tool for the identification of new plays and targets in analogous structurally complex zones.

INTRODUCCIÓN

Modelado de Fracturas Naturales

El modelado de fracturas naturales necesita de metodologías interdisciplinarias debido a la complejidad del origen y subsecuentes reactivaciones fundamentalmente en ambientes tectónicos muy complejos, como lo es la estructura de Filo Morado. La generación de un modelo o DFN

(*discrete fracture network*) en esta estructura debe contemplar no solamente las fracturas generadas durante las diferentes etapas de la deformación sino también a las fracturas debido a carga litostática previa a los eventos compresivos. La generación de fracturas en cada evento y la reactivación de los *sets* de los eventos sucesivos ante un nuevo campo de esfuerzos, construye una red de fracturas compleja y de la cual se debería identificar, no sólo las propiedades inherentes como orientación, calidad e intensidad por enumerar algunas, sino las diferentes familias de fracturas de acuerdo a su origen y las posibles áreas de influencia dentro de una estructura particular. La complejidad que presentan estos sistemas implica el uso de métodos adicionales a los convencionales para caracterizar detalladamente un modelo de fracturas naturales. La observación de la diagénesis de cementos en el espacio de fracturas, la relación espacial entre las diferentes escalas y la intensidad de fracturación son los elementos indispensables para planificar proyectos de exploración y desarrollo.

En este trabajo se aplica una metodología geomecánica analizando el estilo estructural para definir los elementos estructurales (fallas) que están interactuando con un campo de esfuerzos remoto y que generan campos de esfuerzos locales, que son responsables del origen de los *sets* de fracturas. El objetivo final será tener un mapa donde se definan zonas con mayor intensidad de fracturas en las Fms Vaca Muerta y Mulichinco.

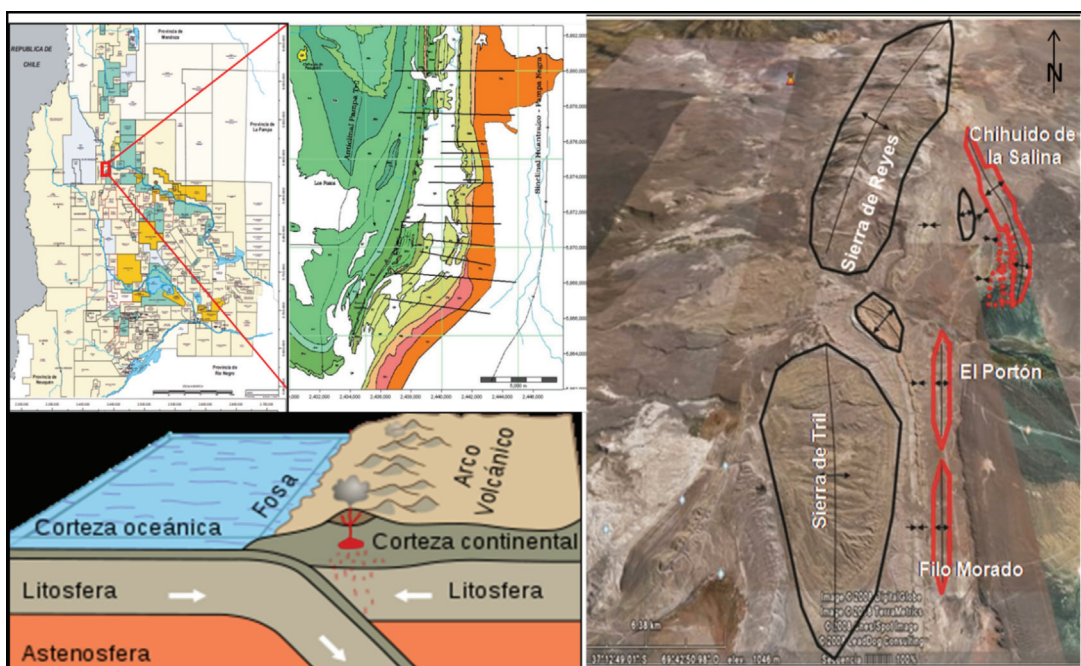


Figura 1. Abajo izquierda: Marco tectónico regional. Arriba izquierda: Mapa geológico. Derecha: imagen de superficie de la zona de estudio.

Ubicación

El yacimiento Filo Morado está ubicado al noroeste de la Provincia de Neuquén, forma parte

del frente de corrimientos de la Faja Plegada y Corrida de la Cordillera de los Andes. Corresponde a una estructura de tipo anticlinal de segundo orden de piel fina, con un nivel de despegue ubicado en la base de la Fm Vaca Muerta. Posee unos 8,5 km de largo y un ancho no mayor a 2 km y se emplaza a una profundidad entre 1500 m y 2800 m. Junto a Chihuido de la Salina y El Portón constituyen un conjunto de yacimientos de ambientes compresivos asociados a estructuras anticlinales complejas (Figura 1).

Metodología de trabajo

Si bien la zona de estudio posee sísmica 3D, la alta complejidad estructural no permitió una buena imagen sísmica de la zona del anticlinal de Filo Morado por lo que se descartó su uso para la construcción de un modelo estructural. El mismo se realizó únicamente con datos obtenidos

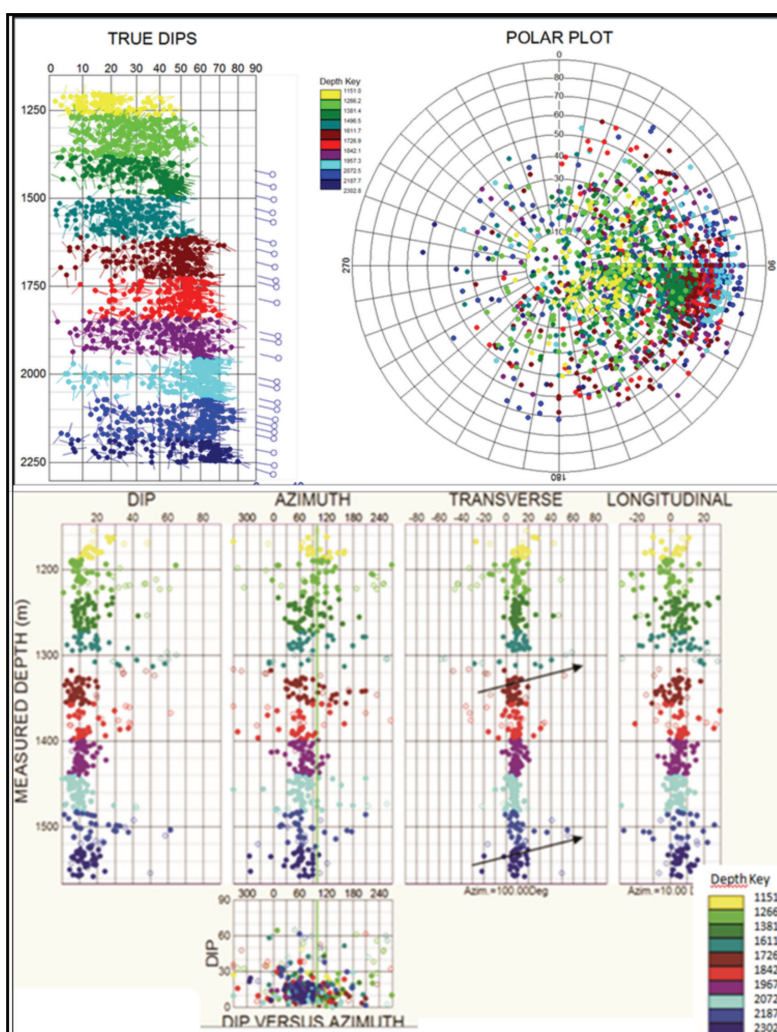


Figura 2. Arriba: Gráfico columnar y polar de un pozo de Filo Morado. Abajo: interpretación de los datos de pozos en un gráfico tipo SCAT. Las flechas indican el sentido de la vergencia de las fallas que en este caso son inversas.

de los pozos que atraviesan la estructura. Se realizó una digitalización de datos de *dipmeters* e imágenes de pozo y con ellos se generaron gráficos para analizar los datos que surgieron de los pozos, con técnicas tradicionales como el análisis de datos de *dipmeter* en gráficos de profundidad vs inclinación y en gráficos polares, además se utilizaron también técnicas de análisis SCAT (Bengston, 1981). Esta técnica consiste en la generación de gráficos que separan los datos de inclinación y azimut en función de la profundidad para construir una nueva columna en la dirección exactamente transversal a la estructura, con ayuda de un gráfico *dip* versus profundidad. Esta nueva columna aparente transversal permite un mejor análisis de los elementos estructurales. En el caso de las fallas, se las puede ubicar con mayor precisión y además verificar su sentido de desplazamiento (Figura 2).

Luego del análisis de los datos, se construyó una nueva columna transversal a la estructura en donde se migraron los datos a un Az 100°, donde se puede apreciar las fallas inversas desplazándose al este.

Este análisis de los *dipmeter* de los sondeos junto a escasos datos de sismica resultó en la generación de 12 secciones estructurales transversales a la estructura principal. A partir de ellas se construyó un modelo estructural, el cual se centró en el estudio detallado de las unidades más profundas de la estructura, como son la Fm Mulichinco y la Fm Quintuco-Vaca Muerta. A continuación se muestra el estilo estructural interpretado, que presenta una marcada vergencia de las fallas hacia el antepaís (Figura 3). Si bien la deformación del Grupo Rayoso no se muestra, el acortamiento que presenta esta unidad está acorde con los acortamientos del Grupo Mendoza que constituye la parte activa de esta deformación de cuña.

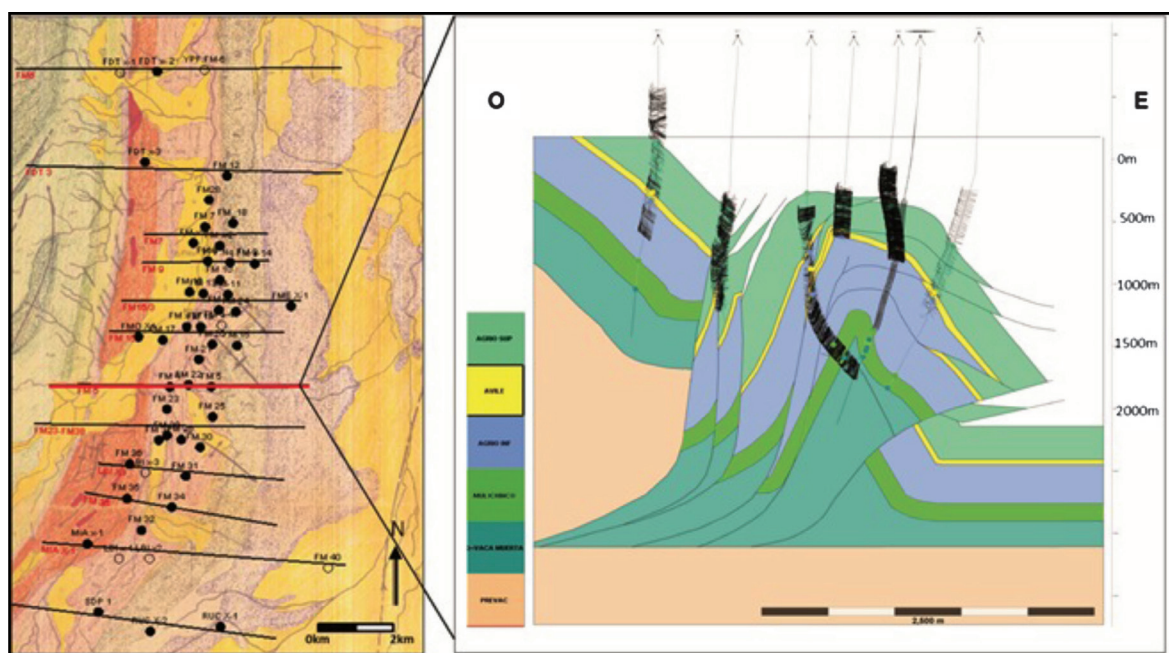


Figura 3. Izquierda: mapa geológico del Yacimiento Filo Morado. Derecha: sección estructural tipo de Filo Morado.

Una vez generado el modelo estructural se extrajeron las diferentes superficies 3D para ser trabajadas en el modelado geomecánico de fracturas, en donde luego fueron analizadas según sus características reológicas y los diferentes esfuerzos a los que fueron sometidos a lo largo de los tiempos geológicos.

EVOLUCIÓN TECTONOESTRATIGRÁFICA

El análisis de la evolución de la faja plegada neuquina cumple un rol muy importante en la generación de las familias de fracturas en las estructuras y en esa evolución hay dos factores preponderantes que son, el tiempo de la deformación y la orientación de los esfuerzos remotos que permiten establecer los parámetros de entrada para la modelización. A lo largo de los tiempos geológicos, el margen occidental de la placa sudamericana ha pasado por eventos de *rift*, *postrift*, inversión y tectónica andina que han generado numerosas variaciones en la orientación de los vectores de convergencia de las placas. Para conocer el sistema de fracturas naturales existente en

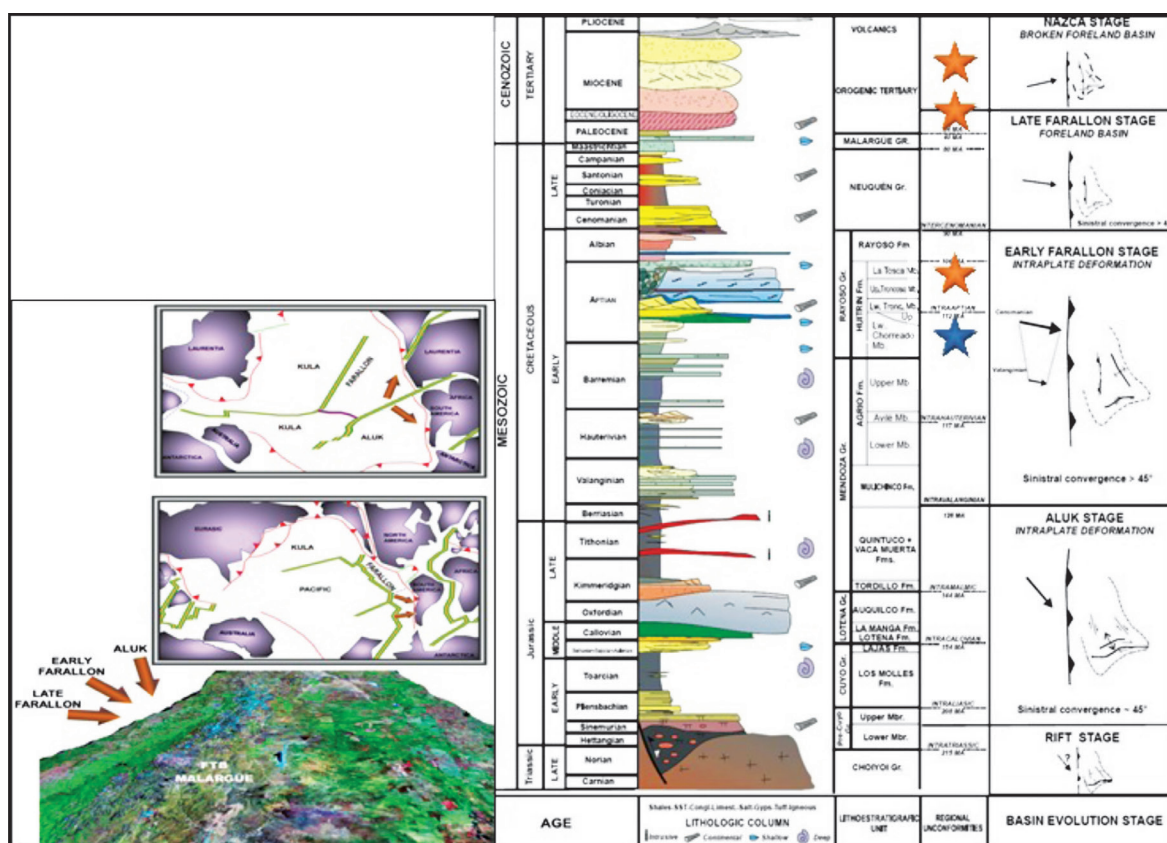


Figura 4. Izquierda: la reconstrucción tectónica muestra los cambios de la dirección de esfuerzos a través de su evolución cinemática. Derecha: Carta Estratigráfica y Evolución Tectónica, las estrellas indican los principales elementos estructurales considerados en el modelado de la red de fracturas naturales en el presente estudio. En naranja se indican los eventos compresivos y en azul se consideraron los efectos de deformación por carga litostática (Mosquera y Ramos, 2005).

una determinada área, es necesario evaluar tanto las generadas por eventos tectónicos, como por ejemplo las asociadas a pliegues y fallas, como las que se deben a carga litostática, presencia de sobrepresión y períodos de exhumación (Marret & Laubach, 2001).

En la zona en estudio, esta variación de eventos a lo largo de su historia ha generado diferentes juegos de fracturas. A continuación se muestra una columna estratigráfica donde se incluyen los principales eventos deformacionales (Figura 4).

Edades de deformación

En la zona de estudio hay numerosas evidencias que indican que la deformación se inició en el Cretácico Tardío, al menos en la Faja Plegada de Agrio, caracterizada por una deformación sin participación del basamento y la Cordillera del Viento donde se observa al Grupo Choiyoi involucrado en la formación de la estructura. Estas evidencias corresponden a estudios de lavas andesíticas y tobas de la Fm Cayanta rellenando sinclinales con una edad K-Ar Eocena ($39 \pm 9,1$ Ma) y que se apoyan discordantemente sobre unidades del Albiano (Llambías y Rapela, 1989). Asociados a estos depósitos hay rocas extrusivas e intrusivas del Eoceno que se emplazan en pliegues ya formados para esa época (Llambías y Rapela, 1989) como las intrusiones cerca de Collipilli, Cerro del Diablo, Cerro Caycayen y filones capa en el Cerro Mayal. Un elemento a destacar son los diques de bitumen que se desarrollaron con una dirección Noreste entre el Cretácico Tardío y Paleoceno (Cobbold, Diraison y Rossello, 1999). Datos adicionales de trazas de fisión de apatita y depósitos sinorogénicos permiten definir una fase compresiva entre los 50-70 Ma, la segunda durante el Mioceno, y otras dos a los 11 y 6 Ma (Zamora *et al.*, 2009).

ANÁLISIS ESTRUCTURAL GEOMECÁNICO DE FILO MORADO

Considerando los diferentes cambios de orientación del esfuerzo regional que actuaron en las distintas etapas de la evolución de la zona de estudio y los diferentes enterramientos a los cuales fueron sometidas las Fms Mulichinco y Vaca Muerta; se estimaron diferentes parámetros elásticos para modelar las varias etapas. Estos parámetros se tomaron como eventos discretos, aunque en realidad fue un proceso continuo de deformación con un particular arreglo de rotación de los esfuerzos. La estimación de los parámetros elásticos para la Fm Vaca Muerta, está basada en los estudios geomecánicos del sondeo CHSN-623 a 30 km de Filo Morado, cuyos parámetros elásticos, el Módulo de Young y Coeficiente de Poisson, fueron calculados satisfactoriamente con valores promedios de $1,47 \times 10^6$ psi para el Módulo de Young y de 0,216 para el Coeficiente de Poisson.

Los parámetros utilizados en cada etapa, las profundidades de soterramiento y la orientación del esfuerzo máximo horizontal, se resumen a continuación (Figura 5).

FORMACIÓN	EVENTO	MÓDULO DE YOUNG (PSI)	COEFICIENTE DE POISSON	PRESIÓN PORAL (Pa)	PROFUNDIDAD	ORIENTACIÓN DEL ESFUERZO
MULICHINCO	PRE-ESTRUCTURA	4.2e10	0.25	2.8e7	2350 m	N340°
MULICHINCO	COMPRESIÓN INICIAL CRETÁCICA	4.2 e10	0.25	2.8e7	2350m	N290°
MULICHINCO	COMPRESIÓN PRINCIPAL Terciaria Media	4.9e10	0.24	1.9e7	2850	N265°
MULICHINCO	COMPRESIÓN FINAL Terciaria Superior	2.5e10	0.23	1.5e7	2250	N°260
VACA MUERTA	PRE-ESTRUCTURA	1.01e10	0.21	2.6e7	2500 m	N340°
VACA MUERTA	COMPRESIÓN INICIAL CRETÁCICA	1.01 e 10	0.21	2.6e7	2500m	N290°
VACA MUERTA	COMPRESIÓN PRINCIPAL Terciaria Media	1.7e10	0.22	3.5e7	3000 m	N265°
VACA MUERTA	COMPRESIÓN FINAL Terciaria Superior	1e10	0.21	1.8e7	2400	N260°

Figura 5. Análisis Geomecánico 3D - Parámetros elásticos al Tope de las Fms Vaca Muerta y Mulichinco.

Dichos parámetros son usados como datos de entrada en el programa Poly3D (Thomas, 1993) para la realización del modelado de la orientación y densidad de fracturas para eventos discretos de la evolución de la estructura de Filo Morado. El análisis de las propiedades de fractura se visualiza en superficies de la unidad de interés de acuerdo al estado cinemático de la estructura y aplicando esfuerzos remotos con la orientación dada en la Figura 5 e intensidades que representan el régimen compresional o tensional para cada estadio

Evolución de la Estructura: Fracturas por Carga Litostática- Pre-Estructura- Fm Vaca Muerta

Durante este estadio se hace un análisis de las posibles fracturas que fueron generadas como consecuencia de la carga litostática. Las características geomecánicas, para la ocurrencia de fracturas de este tipo en una cuenca tan compleja como la Cuenca Neuquina, se manifiestan con etapas de Subsistencia Vertical (Sv) dominante cuando los esfuerzos compresivos están atenuados.

La condición inicial del sistema, parte de un modelo pre-deformación, donde las diferentes capas se encuentran en su posición original, además se supone algún tipo de lineamiento previo que ha existido en la zona. El modelo supuesto pre-deformacional se esboza en la Figura 6. Durante esta etapa se considera un esfuerzo vertical dominante y un esfuerzo máximo horizontal orientado al Az 340°, por lo que los planos de fracturas litostática serían verticales y orientados según ese azimut con suaves desvíos. En la Figura 6 se muestra la orientación de estos planos en

una superficie afectada por esfuerzos verticales, sobre la que se grafica la propiedad “Máxima densidad de cizalla de Coulomb” (MCSS) la cual indica las áreas de mayores posibilidades de encontrar fracturas (Crider & Polar, 1998; Stein *et al.*, 1992, King, 1994) y que, en este caso se encuentra encima de la zona de falla de basamento.

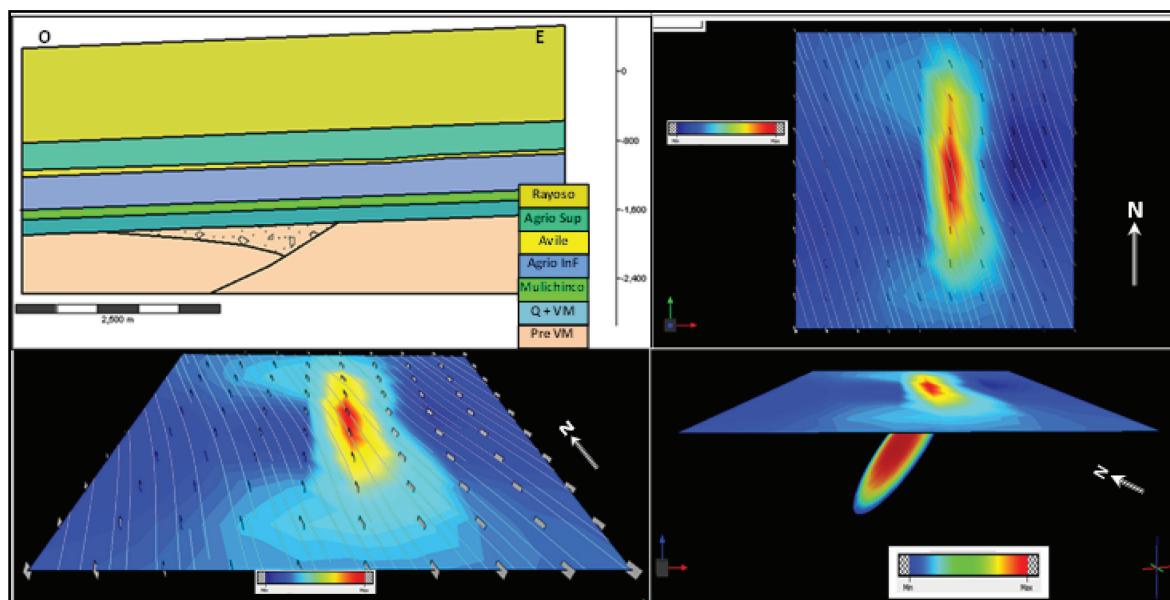


Figura 6. Arriba izquierda: modelo inicial pre-deformacional de Filo Morado. Arriba derecha y abajo diferentes vistas del tope de la Fm Vaca Muerta, donde se distingue el plano inclinado que representa la falla de basamento, el mapa de contornos se refiere al atributo de máxima cizalla de Coulomb y la orientación de los planos de fracturas.

Contracción Inicial Cretácico Medio - Superior

Hacia fines del Cretácico se produce en esta zona la primera etapa de deformación, con la cual comienzan a levantarse las estructuras y se forman las primeras escamas que se levantan hacia la zona oeste. Los juegos de fractura que se habrían formado durante esta etapa se ubicarán preferentemente en las escamas occidentales a la estructura actual de Filo Morado, afectándola sólo parcialmente en algunas zonas.

Las superficies de fallas que se levantan al interactuar con el esfuerzo regional producen una gran diversidad de orientaciones en las fracturas, ya que se forman esfuerzos locales que generan a su vez una mayor cantidad de fracturas. En la Figura 7 se observa que durante esta etapa en la lámina occidental hay preponderancia de generaciones de juegos de fracturas con orientación Norte-Sur para la Fm Vaca Muerta y variable para la Fm Mulichinco, mientras que en las láminas frontales predominan las orientaciones Este-Oeste para ambas unidades.

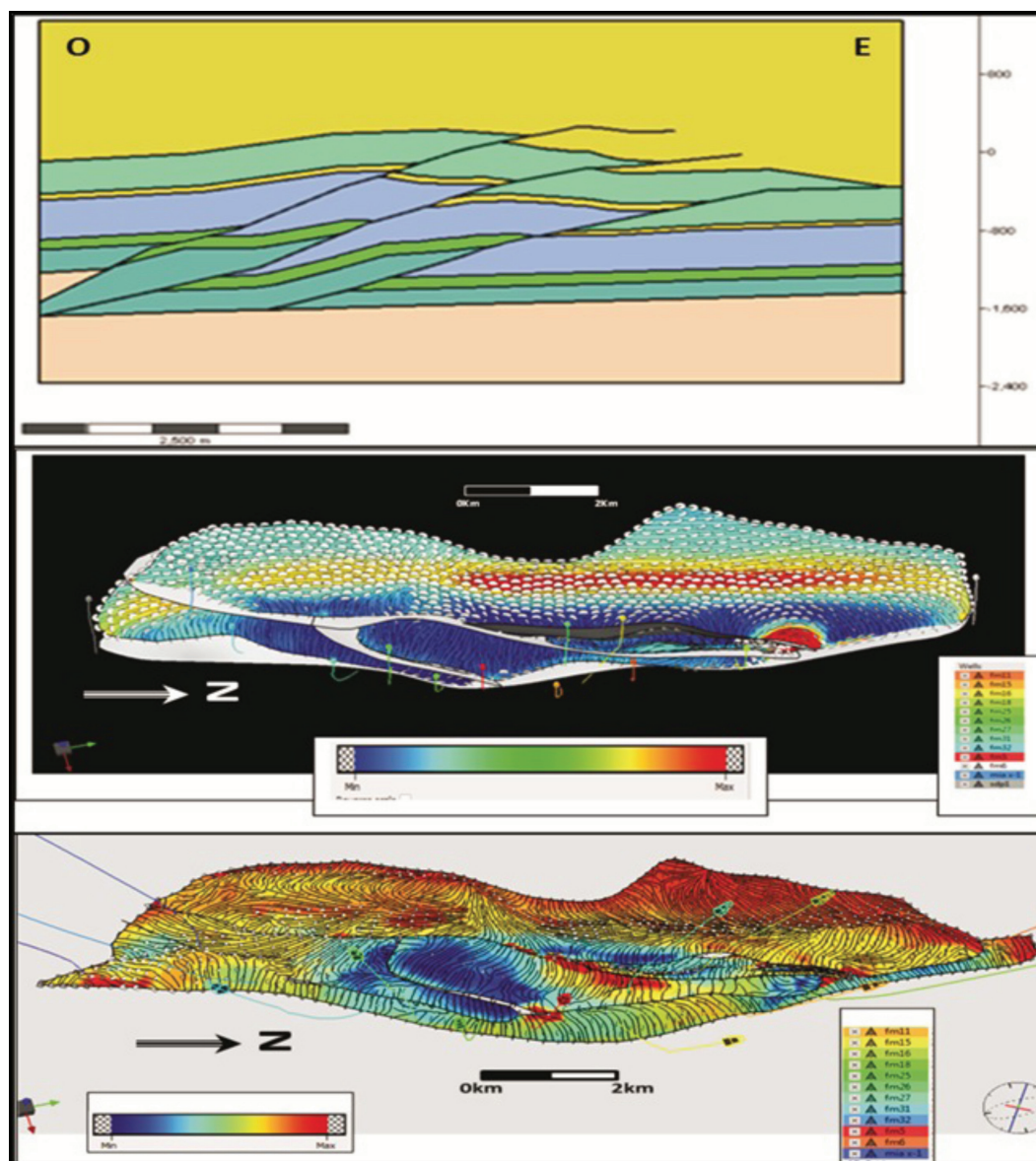


Figura 7. Arriba: modelo conceptual en el Cretácico Medio-Superior. Centro: superficie de la Fm Vaca Muerta con atributo MCSS y la orientación de fracturas sobreimpuestas. Abajo: superficie de la Fm Mulichinco con atributo MCSS.

Contracción Principal Mioceno Medio

La principal etapa de deformación para la región ocurrió durante el Terciario, y es la causante de la formación de las principales estructuras que se levantan actualmente. En esta etapa, en la zona de trabajo se suman nuevas escamas al frente de la estructura además de generar un pliegue de despegue en la Fm Vaca Muerta (Figura 8).

En la Figura 8 se remarca en trazas de color rojo que indican la orientación de los planos de fractura, donde predominan las orientaciones Norte-Sur en las zonas occidentales de cada escama

mientras que en la parte frontal-oriental, la dirección tiende a ser Este-Oeste luego de una zona de transición. Para la Fm Mulichinco se muestran zonas de menor densidad de fracturas hacia los extremos Norte y Sur de la lámina central, mientras en la zona central se concentra la mayor densidad de fracturas.

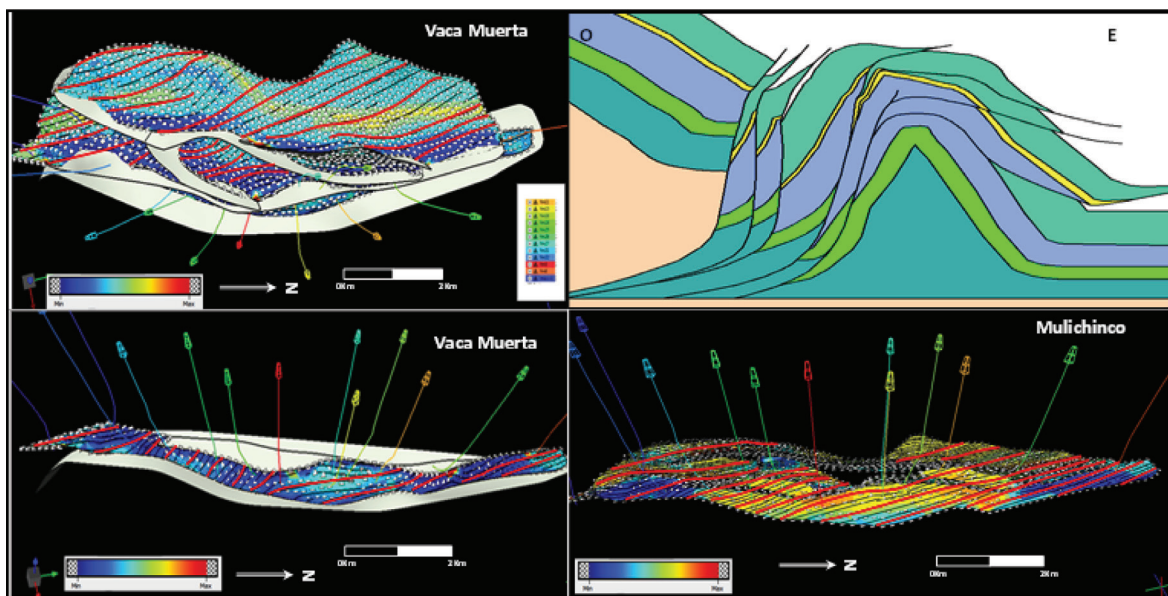


Figura 8. Modelo Conceptual y mapa de intensidad y orientación de fracturas para el Mioceno Medio. En rojo se resalta el rumbo medio de los planos de fracturas.

Otra de las propiedades analizadas en esta etapa para ambas formaciones fue la distribución del promedio de los esfuerzos horizontales y verticales o *mean stress*. Es importante resaltar esta propiedad, ya que en zonas tectónicamente activas el flujo de fluidos migra de zonas de mayores valores a zonas de menores valores del *mean stress*, con direcciones de migración perpendicular a los contornos de este esfuerzo promedio.

Una posibilidad de ubicación favorable de pozos se hace presente en los mínimos de este promedio y se podrían formar acumulaciones en el caso que las condiciones de sello sean óptimas. En la Figura 9 se muestra la respuesta de este atributo para la Fm Vaca Muerta durante el Mioceno Medio.

Contracción Final Mioceno Superior

Este es el último evento de magnitud que afectó la zona, donde se termina de generar la estructura tal cual la conocemos en la actualidad. Las superficies en esta etapa ya han pasado por los anteriores estados y en este último se le suman nuevos juegos de fracturas que son los que finalmente se observan en los pozos. Las mayores anomalías se presentan en la parte frontal y

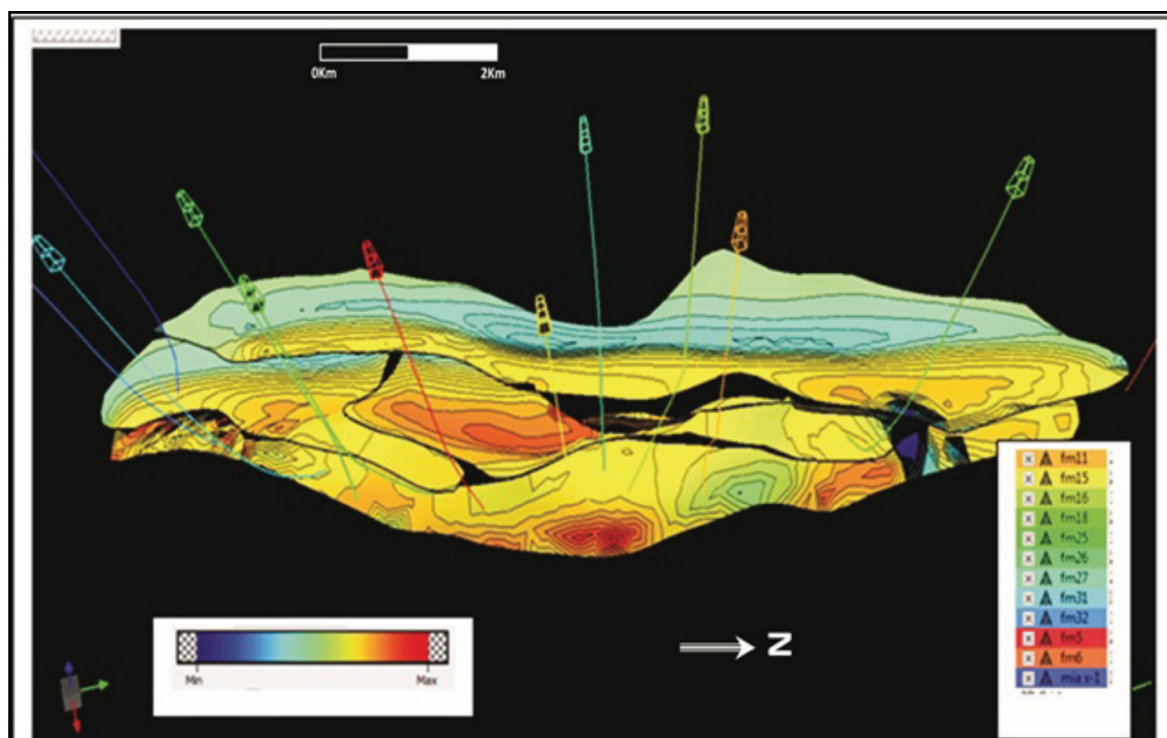


Figura 9. Mapa de contornos del promedio de los esfuerzos principales al tope de la Fm Vaca Muerta en el Mioceno Medio.

en los extremos, a su vez la lámina más afectada en este evento es la lámina más joven, donde se concentran los pozos del yacimiento Filo Morado. Las escamas más antiguas ya no están afectadas por estos nuevos eventos, aunque se encuentran fracturadas por las etapas previas. En la Figura 10 se muestra la Máxima Densidad de Cizalla de Coulomb para el tope de las Fms Vaca Muerta y Mulichinco luego del último evento deformacional.

En lo que respecta al *mean stress* hay una variación de los máximos y mínimos entre el Mioceno Medio y el Mioceno Superior. El flujo de fluidos de máximos a mínimos sumado a la red de fracturas naturales, es una herramienta fundamental para el análisis de permeabilidad de una estructura, especialmente en aquellas tan complejas. La asociación de la red de fracturas naturales y la distribución del *mean stress* es importante para la definición del flujo de fluidos. Como se observa en la Figura 11 el flujo de fluidos para la zona central estaría controlada por la orientación de las fracturas que se encuentran longitudinalmente a lo largo de la lámina, y por lo tanto alimentada de las zonas de máximos desde la derecha de la figura. Hacia la parte sur de la estructura la orientación es Este-Oeste por lo que los fluidos tendrían un camino más corto hacia los mínimos. Obviamente la búsqueda de mínimos del *Mean stress* se debería realizar por encima del WOC para la Fm Vaca Muerta que por el momento no estaría bien establecido por la falta de datos.

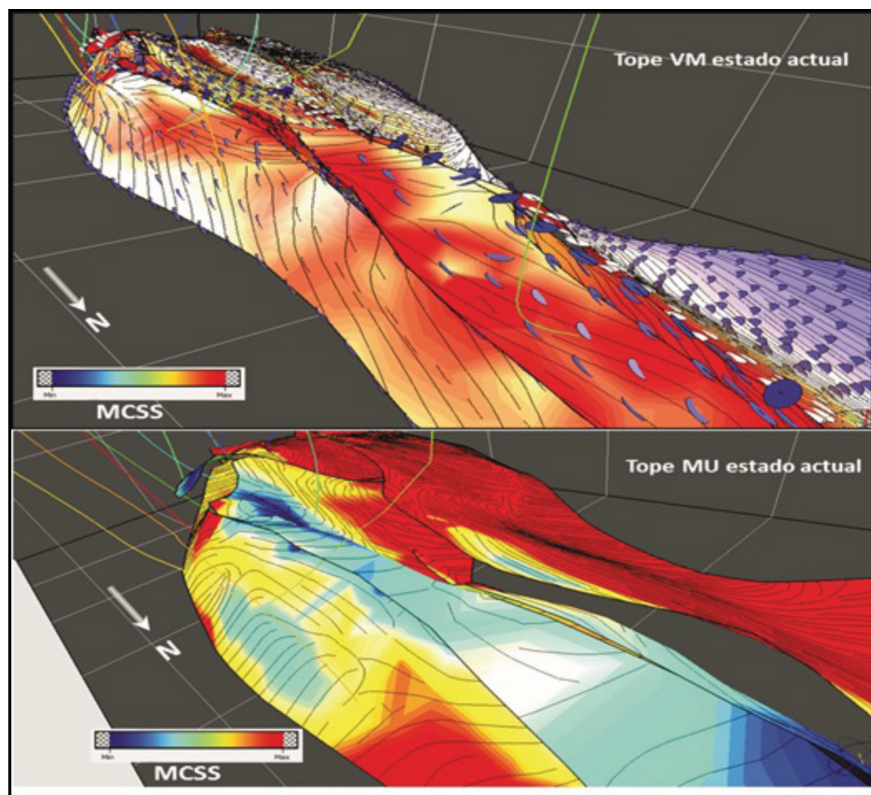


Figura 10. Arriba: Fm Vaca Muerta con atributo MCSS. Abajo: Fm Mulichinco con atributo MCSS.

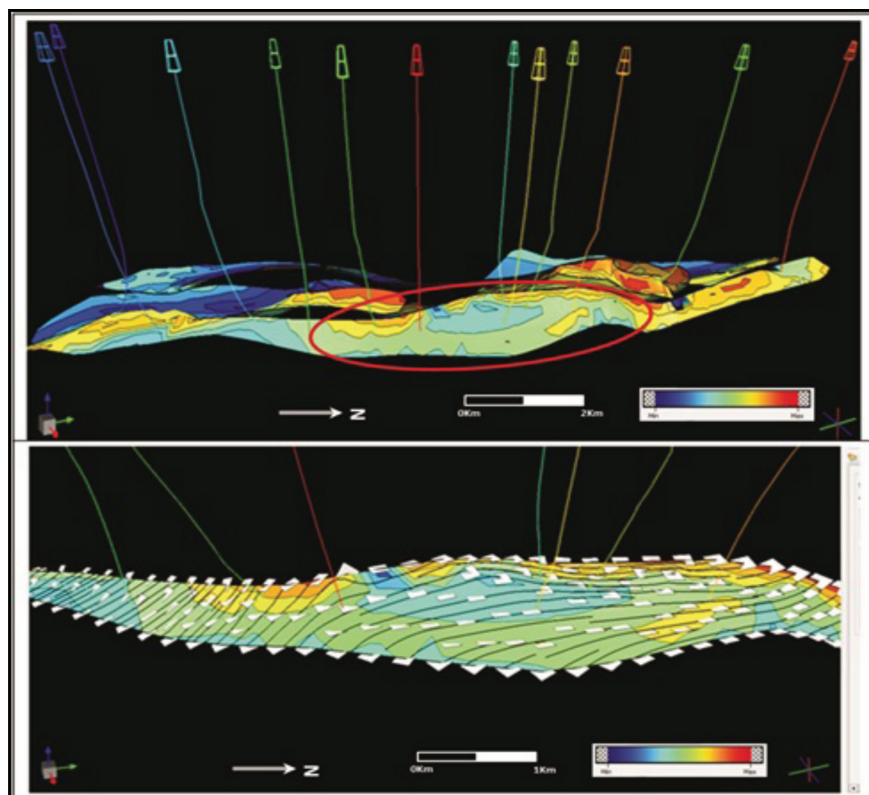


Figura 11. Arriba: distribución del Mean stress durante el Plioceno Superior. Abajo: detalle de las zonas de *Mean stress* y la orientación de fracturas.

ANÁLISIS DE IMÁGENES Y CORONAS

El modelo 3D de fracturas realizado fue ajustado con datos duros obtenidos de pozos de Filo Morado, con antecedentes de producción de las unidades en estudio. En total se analizaron datos de imágenes de 2 pozos y de 2 coronas de la Fm Vaca Muerta.

En las imágenes se tomaron las fracturas naturales interpretadas y se analizaron las orientaciones y la distribución vertical de las mismas. El objetivo del estudio es evaluar la densidad de fracturamiento en un pozo. Para ello debe tenerse en cuenta que todo conjunto de planos atravesados por un pozo posee un sesgo en su representación, vinculado esto con la relación angular en los planos y el pozo. Así es que planos que sean perpendiculares al pozo van a tener una mayor representatividad que planos paralelos o subparalelos al mismo, independientemente de la distribución espacial de cada uno de los *sets*. Por este motivo es de suma importancia conocer la distribución espacial de los planos de fractura, ya que con ellos se plantea el mejor escenario para dirigir los futuros pozos a perforarse. En la Figura 12 se muestra un modelo conceptual de diferentes *sets* de fracturas atravesados por un pozo.

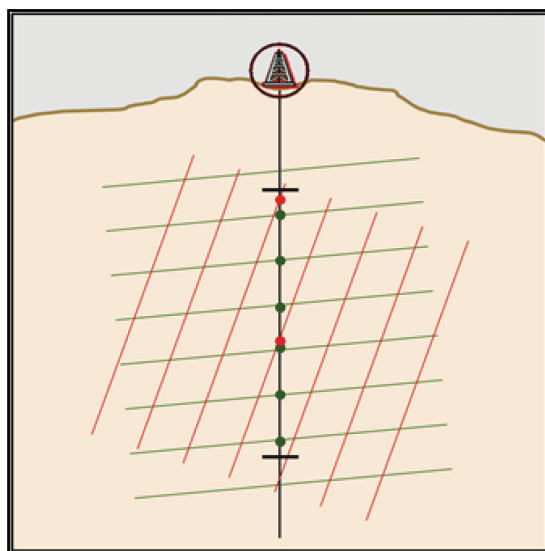


Figura 12. Modelo de dos *sets* de fracturas con el mismo espaciamiento y densidad atravesados por un pozo. En función de su orientación respecto al pozo, el *set* subhorizontal es intersectado más veces que el *set* subvertical. Para la corrección de este muestreo diferencial se aplica la corrección de Terzaghi (1965).

El pozo 1 analizado atraviesa la estructura de oeste a este, pasando la Fm Mulichinco en el flanco dorsal, Fm Vaca Muerta en el núcleo y nuevamente Fm Mulichinco en el flanco frontal. En la Figura 13 se observa la integración de los datos de este pozo donde los planos de fractura se visualizaron en un gráfico de inclinación y orientación vs. profundidad (*4° track*), mediante gráficos

de rosas y polares (5° track) y a través de curvas de intensidad (6° y 7° tracks).

En los gráficos de rosas se observa que cada uno de los flancos de la estructura posee una dirección preferencial de fracturación, lo mismo que en la zona del núcleo que muestra una combinación de datos de los 2 flancos. Esta distribución se explica por la interacción entre la variación de la orientación del esfuerzo remoto y las fallas actuantes en cada evento, lo cual genera campos de esfuerzos locales que son los causantes de los juegos de fracturas.

Otra de las características que se observa es que la distribución de fracturas en la vertical posee 2 intervalos con mayor cantidad de fracturas, ambos en la Fm Mulichinco, uno en cada flanco y representando sobre todo la zona superior de la formación.

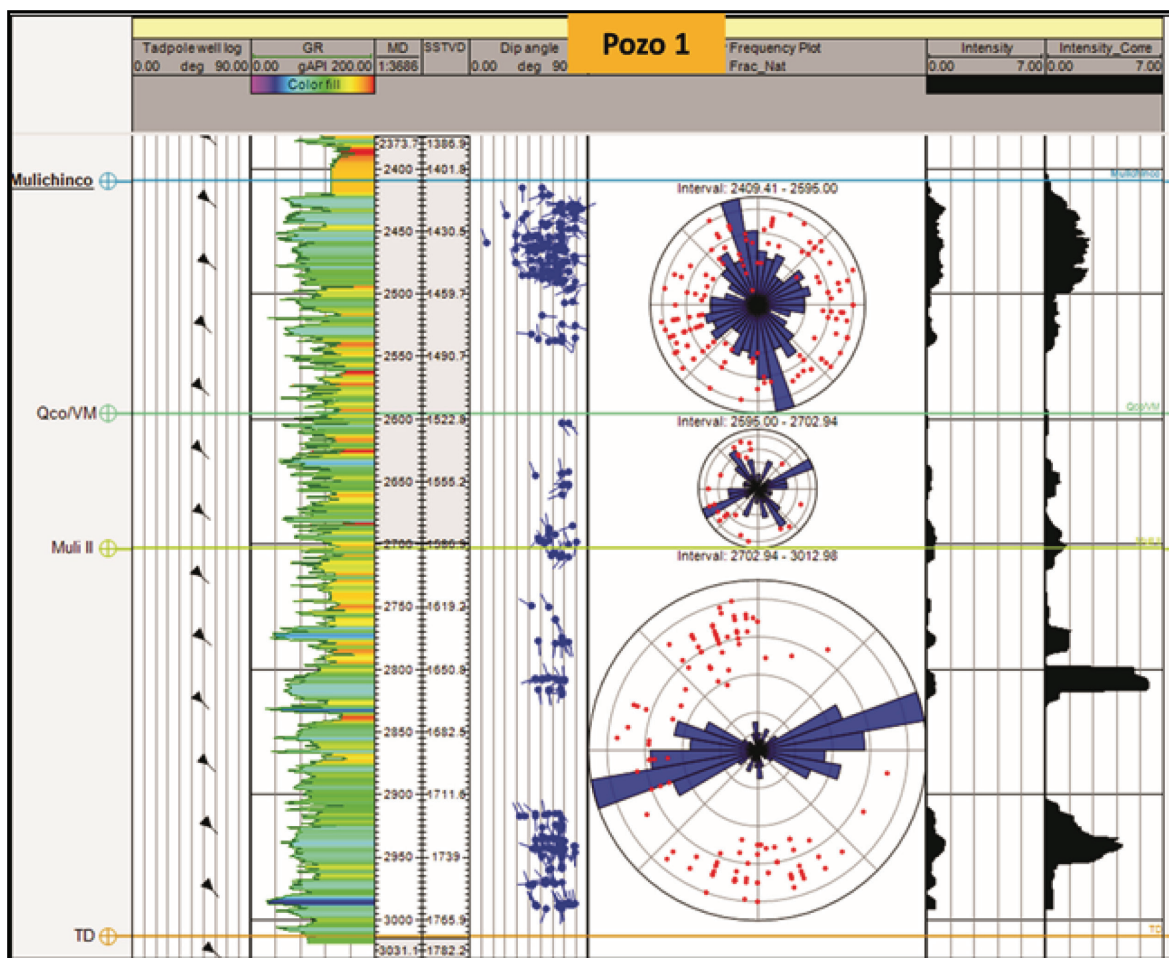


Figura 13. Fracturas naturales en la imagen de acústica del pozo 1.

El segundo pozo con imagen entra al pliegue por el flanco frontal de la estructura, y en el mismo se ve un patrón de fracturas O-E, muy similar al visto en el flanco frontal del pozo 1. En la Figura 14 se observa el set de fracturas visto en la imagen del pozo 2. Las 2 coronas examinadas en

este estudio pertenecen a la Fm Vaca Muerta, en total se analizaron 16 m. El objetivo principal fue analizar la apertura, longitud, rugosidad, terminación y presencia de cementos. Ambas coronas pertenecen a pozos que llegaron al núcleo de la estructura.

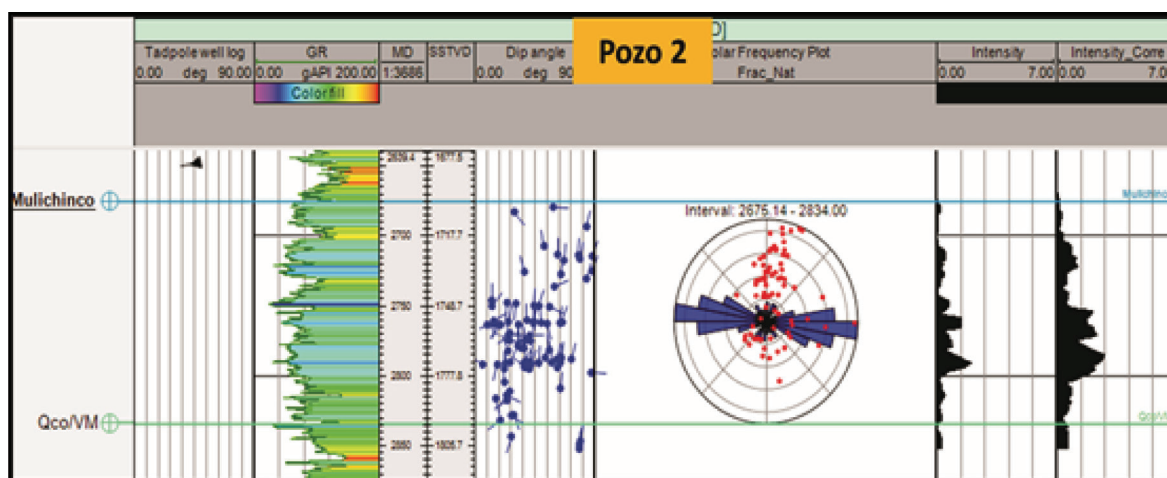


Figura 14. Fracturas naturales en la imagen de acústica del pozo 2.

La corona 1, no orientada, pertenece a un pozo ubicado en el extremo norte del pliegue. En total se analizaron 6,5 m y se caracteriza por deformación frágil y fracturas irregulares. La mayoría de las fisuras presentan cementación de calcita entre 80% y 100%. De acuerdo a la metodología de Laubach, Marret y Olson (1999) se tomó la línea central de la corona para medir las propiedades de las fracturas que se encuentran en esta posición y, corregida la angularidad, para obtener el espaciamiento. La apertura es una propiedad mecánica de la roca y de los esfuerzos actuantes que es independiente de los juegos presentes, por lo que se midieron todas las fracturas que se encontraban intersectadas por la línea central de la corona. Particularmente se midió la apertura cinemática, la apertura del espacio de fractura independientemente que se encuentre cementada o no, debido a que la cuantificación de los cementos se realiza con técnicas de catodoluminiscencia.

El análisis estadístico de las fracturas medidas en un gráfico de frecuencia acumulada (Fracturas/m) vs. apertura de fractura muestra un muy buen ajuste de la curva de correlación ($R^2 = 0,9774$) de acuerdo con una distribución de tipo Potencial o “*Powerlaw*”. Esto es consistente con lo indicado por Gale (2004) para la distribución apertura-tamaño de fracturas en rocas silicoclásticas y carbonáticas. En la Figura 15 se ve el espaciado correspondiente para cada “clase” de apertura (eje de las “y” a la derecha), con un mayor espaciamiento de fracturas a medida que aumenta el valor de apertura.

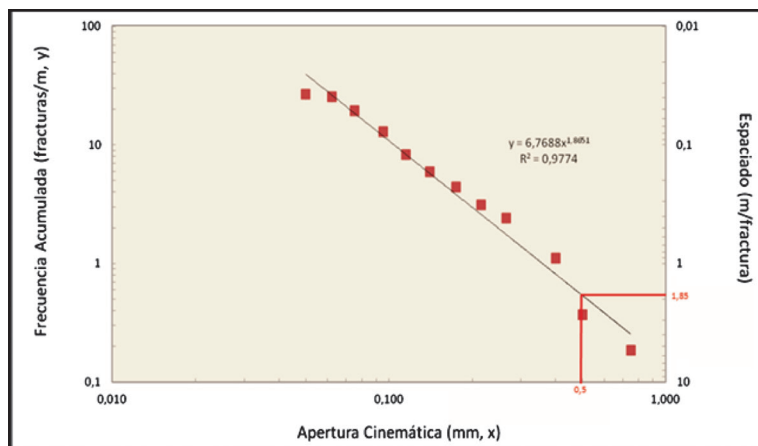


Figura 15. Análisis de la distribución fracturas según su apertura, corona 1.

En la corona 2 se analizaron 9,5 m. Esta corona corresponde al pozo 1, donde se analizó también la imagen, presenta fracturas en los planos de estratificación, sobre los que se reconocieron abundantes superficies con estrías y en algunos casos con crecimiento de cristales perpendiculares a los planos de estratificación (Beefs según Rodrigues *et al.*, 2009). El grado de cementación calcítica de las mismas es parcial. Esta magnitud de deformación se evidencia de manera clara en estos planos en la imagen de pozo acústica. En la Figura 16 se ve el intervalo con corona del pozo y el tramo que coinciden la imagen y la corona.

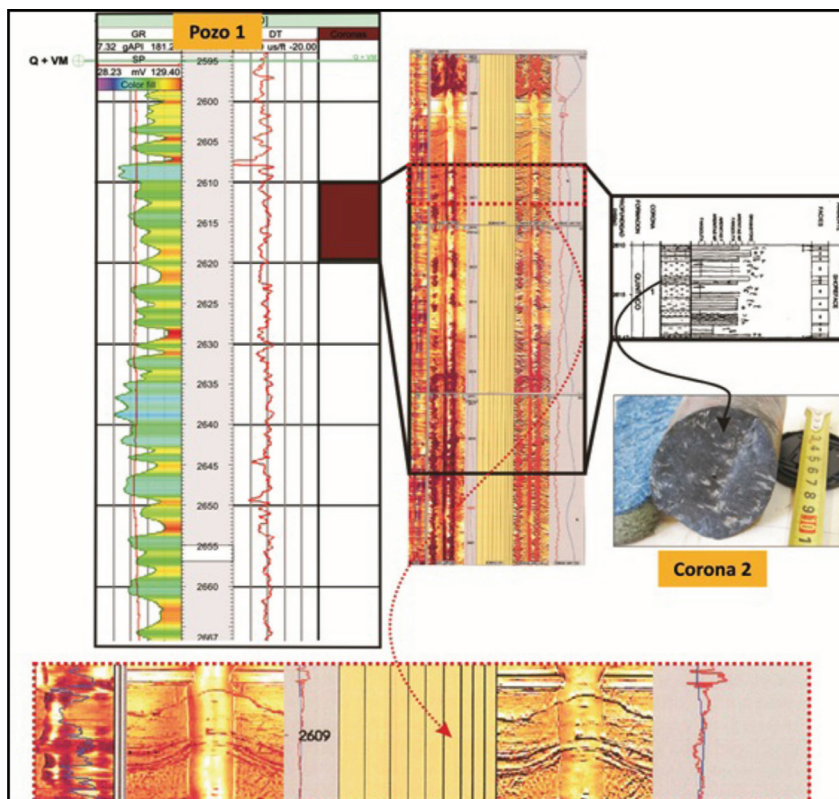


Figura 16. Ubicación en el perfil de la corona del pozo 1 comparado con la imagen del pozo.

En la corona 2 también se realizó el relevamiento sistemático de las principales propiedades de las fracturas. Al momento de analizar estadísticamente la distribución de las aperturas se reconocieron dos comportamientos distintos, como puede observarse en la Figura 17, uno de ellos identificado por cruces de color violeta y el otro por cruces verdes. Este último se observa para aperturas de 0,4 mm y mayores, cuyo mejor ajuste es a una distribución lineal en un espacio logarítmico o *Powerlaw*. Las aperturas menores muestran una desviación explicada por un submuestreo debido a la dificultosa visualización en coronas para este tamaño de aperturas (Pickering *et al.*, 1995). Esto podría llegar a corregirse con la utilización de microscopios electrónicos para analizar la apertura de las fracturas de escalas más pequeñas.

Al comparar los 2 gráficos obtenidos, uno de cada corona, y tomando como ejemplo un caso de una fractura de 0,5 mm de apertura, lo que se ve es que hay un espaciado de 1,85 m para la corona 1 y de 0,25 m para la corona 2.

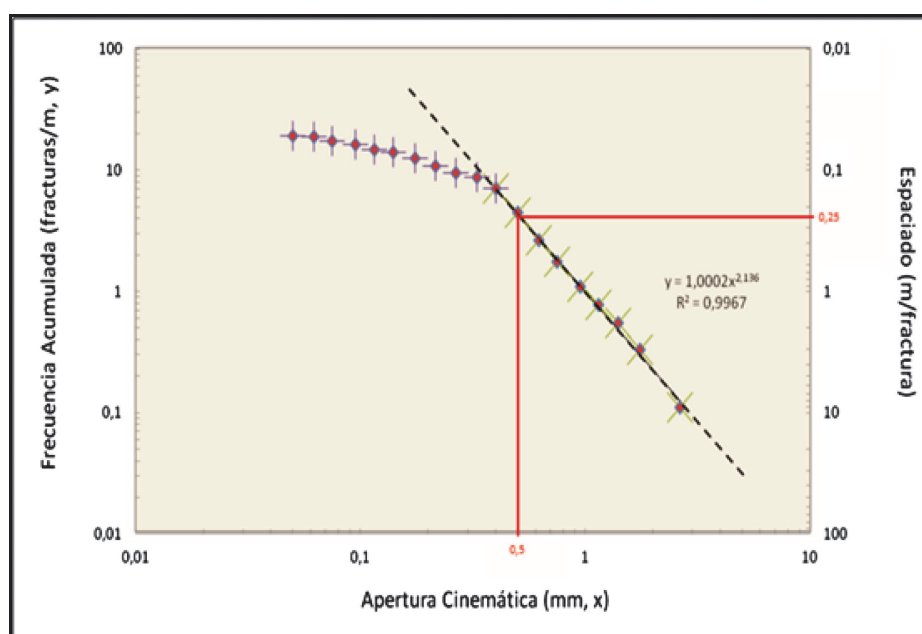


Figura 17. Análisis de la distribución fracturas según su apertura, corona 2.

Al comparar los datos duros con el modelo 3D se puede ver que en la parte central de la lámina frontal, donde se encuentra la corona 2, constituye el área de mayor densidad de fracturas, coincidiendo con la corona. El área de la corona 1 también constituye una zona de densidad importante pero menor que la parte central de la misma lámina frontal. La calibración de los datos de los pozos con el modelo es muy buena. En la Figura 17 se puede ver el buen ajuste entre el modelo y las coronas.

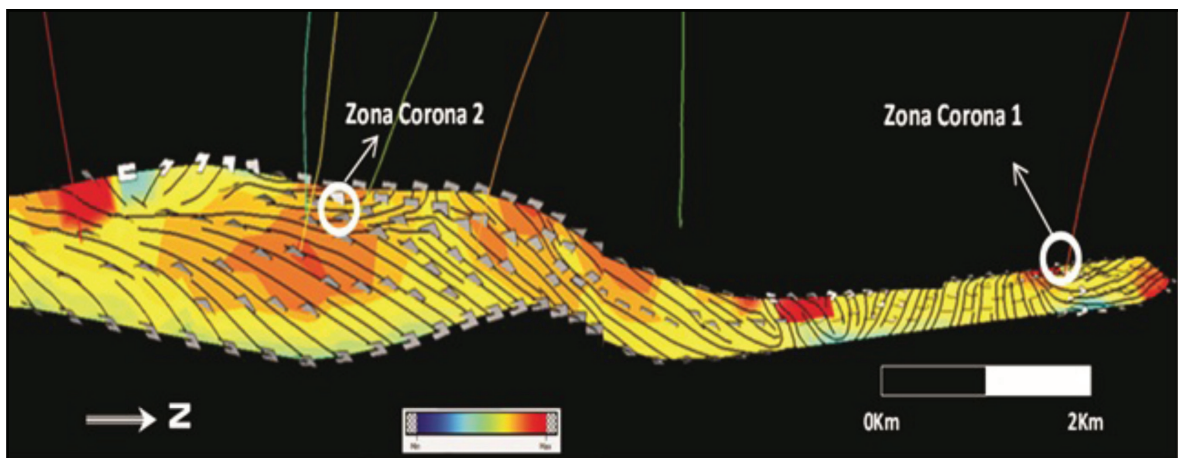


Figura 18. Ubicación de las coronas en el modelo 3D al tope de la Fm Vaca Muerta.

Analizando las imágenes y los datos de coronas, se puede ver que las orientaciones de las fracturas naturales reconocidas presentan una distribución estrechamente vinculada a la posición estructural sobre la cual fueron registradas. En la Figura 19 se muestra cómo es la orientación actual de los juegos de fractura según la posición estructural en el pliegue.

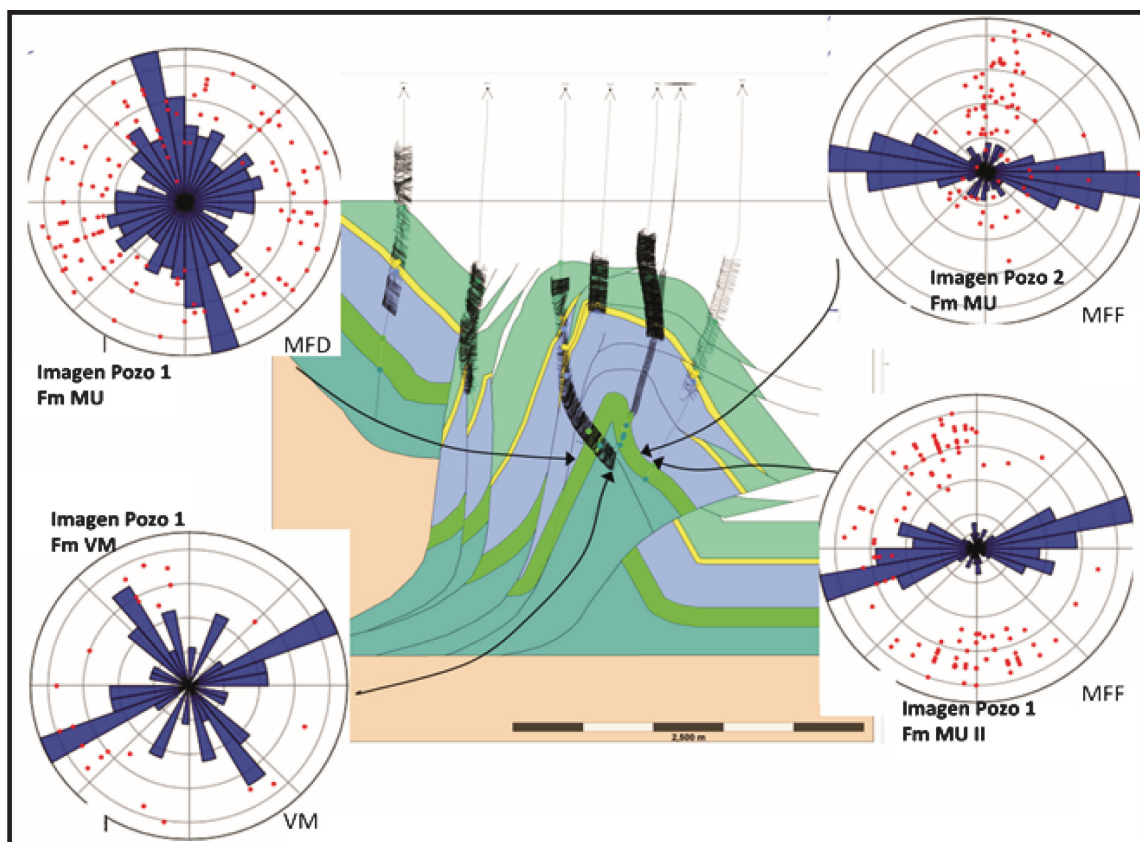


Figura 19. Esquema de la estructura con la orientación de las fracturas naturales, según el intervalo estratigráfico y la posición estructural registrada.

RESULTADOS PERFORACIÓN POZO PROFUNDO

En simultáneo a la realización de este modelo de fracturas se perforó un pozo de avanzada con objetivos profundos en Filo Morado. El mismo tenía como objetivo producir de la Fm Vaca Muerta a través de fracturas naturales. Como objetivo secundario se encontraba la Fm Mulichinco. El pozo fue ubicado en una zona donde el modelo predice una alta densidad de fracturas y en una de las regiones más altas estructuralmente, para minimizar el riesgo de la presencia de agua. La dirección de perforación también fue elegida para atravesar un mayor número de fracturas naturales. En la Figura 20 se muestra la zona de ingreso del pozo en la Fm Mulichinco.

El pozo resultó con numerosos problemas técnicos ya que no llegó al objetivo debido a que la Fm Mulichinco se encontró muy facturada, como se estaba buscando, pero con una muy baja presión poral, producto de la depletación del reservorio por la producción acumulada. A pesar de no llegar al objetivo, este resultado también da un buen ajuste con lo que se plantea en el modelo de fracturas, ya que la zona evidentemente está muy rota como se tenía previsto. A futuro se evaluará la realización un nuevo diseño de pozo para poder atravesar la Fm Mulichinco.

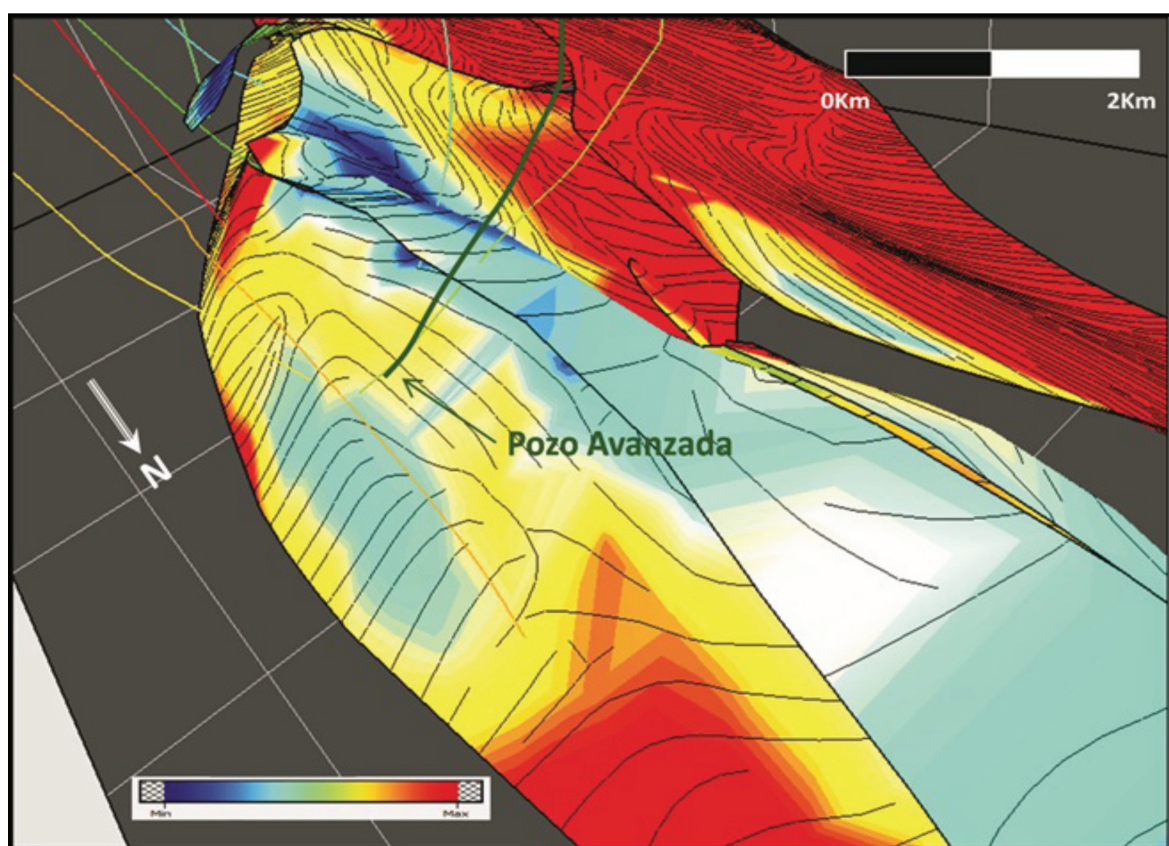


Figura 20. Ubicación del pozo nuevo en el modelo de fracturas, el mismo está localizado en un máximo del atributo MCSS.

CONCLUSIONES

Para reflejar el estado actual de las fracturas naturales deberá reproducirse cómo han estado en el pasado y cuál es la posición actual de las formaciones que están siendo estudiadas, con lo cual quedará reflejada la totalidad de los juegos de fracturas que se podrían haber originado.

A partir del análisis de datos de pozos se generó un nuevo modelo estructural. Este modelo, junto al estudio de la evolución tectónica de la región de Filo Morado permitió construir un modelo 3D de fracturas para las Fms Vaca Muerta y Mulichinco, con el cual se está evaluando la continuidad de la etapa de perforación de pozos al núcleo de una estructura compleja.

Los datos se reflejan en el estado final de ambas superficies e indican que la estructura posee un alto grado de fracturamiento, lo cual es coincidente con las altas acumuladas que tiene el Yacimiento Filo Morado, sobre todo en la Fm Mulichinco.

Finalizado el modelo y ajustado con datos de imágenes y coronas, se perforó un pozo de alto riesgo con objetivos profundos en la estructura, el cual comprobó una zona muy fisurada como mostraba el modelo, pero que al estar depletada hubo numerosas complicaciones y el pozo no pudo llegar al objetivo final.

AGRADECIMIENTOS

A YPF S.A. por autorizar la publicación de este trabajo y a los revisores del trabajo por sus valiosos comentarios.

REFERENCIAS CITADAS

- Bengston, C.A., 1981. Statistical Curvature Analysis Techniques for Structural Interpretation of Dip-meter Data. 312-332. AAPG Bulletin.
- Cobbold, P. R., Diraison, M. & Rossello, E. A. (1999). Bitumen veins and Eocene transpression, Neuquén Basin, Argentina. *Tectonophysics*, 314, 423-442.
- Crider, J. G., and D. D. Pollard, 1998, Fault linkage: 3D mechanical interaction between overlapping normal faults: *Journal of Geophysical Research*, v. 103, p. 24,373-24,391.
- Gale, J. (2004). Self-Organization of the Natural Model-I Fracture Apertures into Power-Law distributions. 6th North America Rock Mechanics Symposium. 13 p.
- King, G. C. P., R. S. Stein, and J. Lin, 1994, Static stress changes and the triggering of earthquakes: *Seismological Society of America Bulletin*, v. 84, p. 935- 953.
- Laubach, S., R. Marret and J. Olson. 1999. AAPG Fractured reservoir characterization and modeling school. Austin, Texas.

- Llambías, E. J. & Rapela, C. W. (1989). Las volcánicas de Collipilli, Neuquén (378S) y su relación con otras unidades paleógenas de la cordillera. *Asociación Geológica Argentina Revista*, 44, 224–236.
- Marrett, R. and S. E. Laubach, 2001, Burial, tectonic, and exhumational fracturing R. Marrett, ed., *Genesis and controls of reservoir-scale carbonate deformation*, Monterrey Salient, Mexico, University of Texas at Austin, Bureau of Economic Geology, Austin, Guidebook 28, p. 109– 122.
- Mosquera, A. y V.A. Ramos, (2005): Intraplate deformation in the Neuquén embayment. XVI Congreso Geológico Argentino. II: 193-202.
- Pickering, G., Bull, L.M., Sanderson, D.J., 1995. Sampling power-law distributions. *Tectonophysics* 248, 1-20.
- Rodrigues, N., Cobbold, P.R., Løseth, H., Ruffet, G., 2009. Widespread bedding parallel veins of fibrous calcite (“beef”) in a mature source rock (Vaca Muerta Fm., Neuquén Basin, Argentina): evidence for overpressure and horizontal compression. *Journal of the Geological Society*, London 166, 695e709, <http://dx.doi.org/10.1144/0016-76492008-111>
- Stein, R. S., G. C. P. King, and J. Lin, 1992, Change in failure stress on the southern San Andreas fault system caused by the 1992 Magnitude = 7.4 Landers earthquake: *Science*, v. 258, p. 1328–1332.
- Terzaghi, R.D., 1965 Sources of errors in joint surveys, *Geotechnique*. 15: 287-304.
- Thomas, A. L., (1993): Poly3D: a three-dimensional, polygonal-element, displacement discontinuity boundary element computer program with applications to fractures, faults, and cavities in the Earth’s crust [M.S. thesis]: Stanford University, California.
- Zamora Valcarce, G., Zapata, T., Ramos, V., Rodriguez, F., y L. Bernardo. Evolución Tectónica del frente Andino en Neuquén, 2009. *RAGA* 65 (1): 192 – 203.