

CARACTERIZACIÓN DE FRACTURAS NATURALES MEDIANTE ATRIBUTOS SÍSMICOS, IMÁGENES DE POZO Y MICROSÍSMICA. FORMACIÓN VACA MUERTA. YACIMIENTO EL TRAPIAL

Ezequiel Lombardo¹

1: Chevron Argentina. ezlo@chevron.com

Palabras clave: Cuenca Neuquina, Vaca Muerta, Fracturas naturales, atributos sísmicos, microsísmica

ABSTRACT

The Neuquén Basin structure is the result of multiple tectonic episodes, which goes from the initial extensional regime (rift stage) during the Early Jurassic, to the successive compressional episodes that affected the region up to the present day. In addition, the El Trapial structure has extra complexity because of the intrusion of two magmatic centers in the region (Cerro Bayo de la Sierra Negra and Cerro Bayo de Huantraico Laccoliths), which uplifted and compartmentalized the stratigraphic sequence. The Vaca Muerta Formation has a record of these tectonic episodes, which are represented in the area by natural fracture families and igneous intrusions. This work presents a natural fracture characterization for the Quintuco-Vaca Muerta sequence through integration of regional seismic and structure data in addition to acoustic, Wellbore image logs, core data and microseismic. Based on this analysis, families of open and closed natural fractures with a main orientation NNW, NNE, and ENE were recognized. The distribution of these fracture families varies laterally and vertically within the block, distinguishing two zones with different structural characteristics: a southern zone with a high density of natural fractures and high structural complexity, and a northern zone where the density of fractures is markedly lower. From an industry perspective, it is Well known that natural fractures play a key role during the Well completion, having an impact on the hydraulic fracture geometry and Well productivity. These fracture planes behave as high permeability pathways, which may increase the reservoir in place storage and enhance the stimulated rock volume (SRV: Stimulated rock volume). From this point of view, the natural fracture families recognized in the area have shown different behaviors against the completion treatment, being the ENE family the most likely to be reactivated. Based on these aspects, a proper natural fracture characterization is key to optimizing the hydraulic fracture design, Well spacing and orientation, as Well as to define areas with the highest productive potential.

INTRODUCCIÓN

La presencia de fracturas naturales juega un importante rol en la explotación de un yacimiento de hidrocarburos, ya que las mismas pueden incrementar la permeabilidad de un reservorio, la capacidad de almacenamiento de hidrocarburos, e interactuar con el crecimiento de las fracturas hidráulicas (ejerciendo control sobre su geometría y eficiencia).

La presencia de fracturas naturales en la Formación Vaca Muerta en la zona de interés ha sido estudiada mediante diversos enfoques y herramientas: coronas, imágenes de pozos (acústicas y microresistivas) en pozos verticales y horizontales, atributos sísmicos estructurales, microsísmica, y su integración en un contexto regional.

La productividad de un pozo es el resultado de numerosas variables actuando al mismo tiempo, que van desde condiciones estáticas y dinámicas del reservorio, a cuestiones netamente operativas. No obstante, caracterizar esta red de fracturas naturales es clave para acotar variables e intentar explicar (al menos en parte) variaciones en la productividad de los pozos, geometría de las fracturas hidráulicas, mitigar riesgos (tal como influjos o pérdidas de lodo), y planear un diseño de desarrollo eficiente.

El presente trabajo resume los métodos utilizados para caracterizar las fracturas naturales presentes en la Formación Vaca Muerta en el bloque El Trapial y expone los resultados de dicha caracterización (Fig. 1).



Figura 1. Mapa de ubicación del bloque El Trapial y principales complejos ígneos en el área.

CONTEXTO GEOLÓGICO

El bloque El Trapial se ubica en el norte de la provincia del Neuquén, entre la faja plegada y corrida (estructura de Pampa Tril) hacia el oeste y el volcán Auca Mahuida al este. Ubicado además al sur del río Colorado y al norte del lineamiento Cortaderas (Ramos, 1978).

Desde el punto de vista estructural, el bloque está afectado en la región norte por el complejo volcánico Cerro Bayo de la Sierra Negra (también llamado Cerro Bayo-Trapial) el cual genera una estructura de domo que afecta toda columna estratigráfica, incluyendo parte de las volcanitas del sinclinal de Huantraico y de la Sierra Negra (Formación Palaoco). Este complejo tiene un área de influencia de ~8 km de radio e incluye diques radiales y filones capa (Formación Pichi Tril – edades de 18 a 15 Ma, Kay y Copeland, 2006).

Hacia el oeste se encuentra el sinclinal de Huantraico que pliega a las volcanitas de la secuencia Filo Morado (que incluyen a los flujos de la Formación Palaoco de la Sierra Negra y de la Sierra de Huantraico; Kay y Copeland, 2006) cuyas edades van del Oligoceno Superior al Mioceno inferior (36 a 23 Ma; Ramos y Barbieri, 1988; Kay y Copeland, 2006). Esta estructura es paralela a la estructura de Pampa Tril (ubicada al oeste) y constituye el frente de la zona triangular del frente orogénico andino a estas latitudes (Cristallini, *et al.* 2013).

Hacia el suroeste del bloque se encuentran los diques radiales de la Formación Desfiladero Negro (25 y 18 Ma.), que pertenecen al complejo ígneo Huantraico cuya área de influencia alcanza los 24 km de radio. Si bien estos diques se disponen de forma radial al centro volcánico de Huantraico, en la región sur de El Trapial tiene una expresión marcadamente E-W.

Las fracturas naturales analizadas se desarrollan dentro del intervalo Quintuco-Vaca Muerta. Vallejo *et al.* (2016) describieron a esta secuencia en el bloque El Trapial como una unidad comprendida por dos intervalos con patrones de apilamiento sísmico característicos (Fig. 2): (1) Una sección inferior rica en contenido orgánico total (subdividida de tope a base en los niveles denominados Bonarda, Malbec, Merlot, Cabernet, Tannat) de aproximadamente 350 m de espesor, conformada por reflectores paralelos y sub-horizontales (apilamiento de *bottomset* y *toe-sets* correspondientes a facies distales). (2) Y una sección superior (Quintuco-Torrentés-Sirah) de espesores mínimos de 160 m, que muestra un arreglo progradante de los reflectores sísmicos (*foresets* más proximales).

Desde el punto de vista litológico la Formación Vaca Muerta dentro del bloque está constituida mayoritariamente por una secuencia de Fangolitas siliciclásticas, Margas y Fangolitas calcáreas. Y de forma minoritaria tobas, concreciones y beefs.

METODOLOGÍA

Se caracterizaron las fracturas naturales presentes en la Formación Vaca Muerta en el Bloque El Trapial a partir del estudio e integración de diversos métodos: análisis de coronas, imágenes de pozo, microsísmica, y atributos sísmicos.

Análisis de fracturas naturales en coronas (verticales): Del estudio sobre coronas de la Formación Vaca Muerta en El Trapial se reconocieron más de 360 fracturas de diferentes tipos:

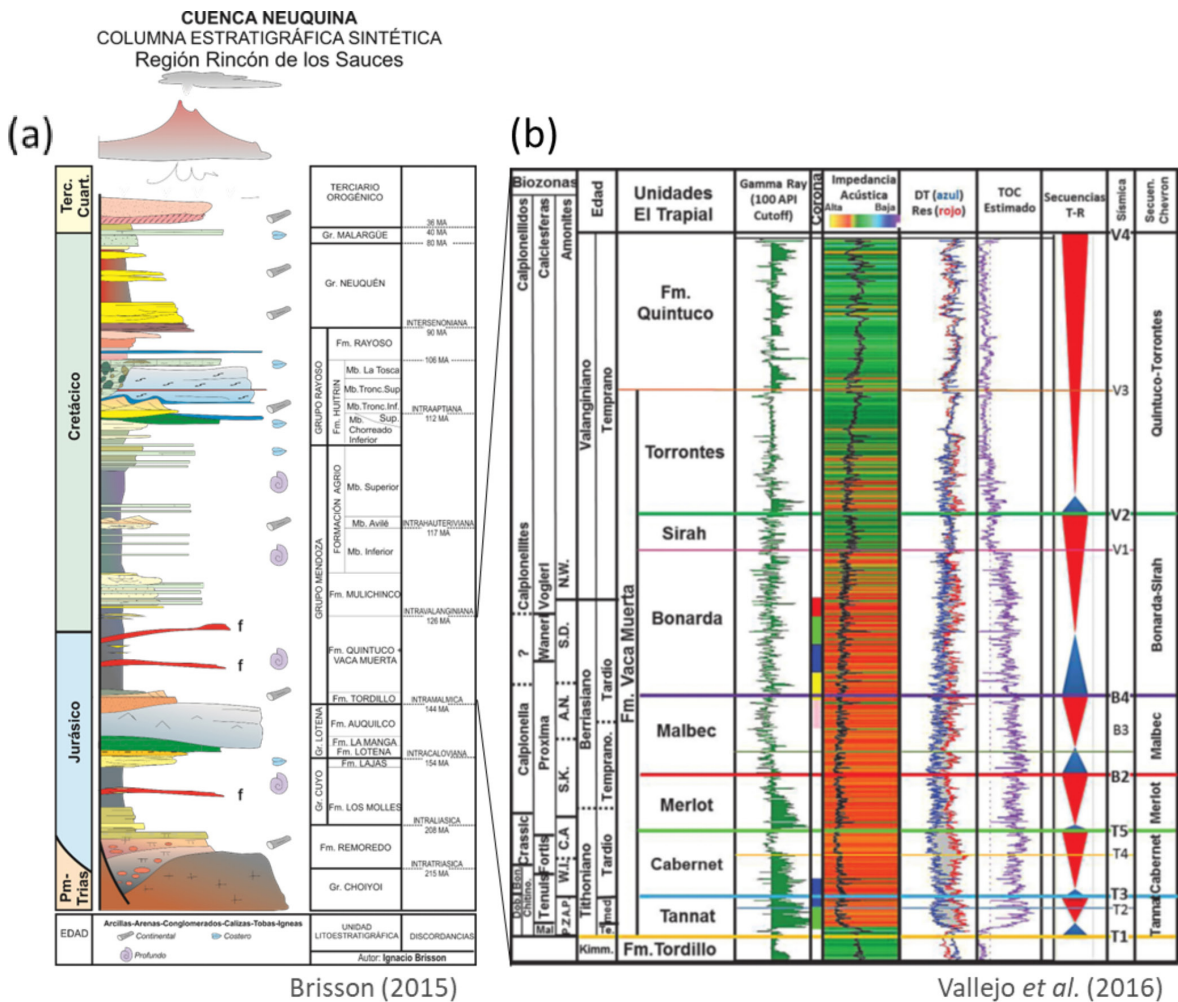


Figura 2. (a) Columnas Estratigráficas para la región Rincón de los Sauces (Brisson, 2015) (b) Perfil tipo de El Trapial, mostrando el sistema Quintuco-Vaca Muerta con la zonación bioestratigráfica, los perfiles característicos, la correlación entre las unidades litoestratigráficas de El Trapial, los horizontes sísmicos interpretados en la Transecta y las secuencias estratigráficas definidas por Chevron (Vallejo *et al.* 2016)

abiertas, cerradas, parcialmente cerradas, y fracturas en echelon. La mayoría de las fracturas abiertas y cerradas son del tipo vertical a subvertical. Se encuentran abiertas o bien rellenas parcial o totalmente con calcita (Vallejo *et al.* 2016). La orientación principal de las fracturas, en su mayoría son paralelas al esfuerzo horizontal máximo (SH max) (Cuervo *et al.* 2014).

Análisis de fracturas naturales en perfiles de imagen en pozos verticales (WBI): Se analizaron 5 perfiles de imágenes de pozos verticales (acústicas y resistivas), así también como 2 imágenes de pozos horizontales registradas LWD (*Logging while drilling*).

En la Figura 3 se presentan los resultados del análisis de las orientaciones de los planos de fracturas naturales identificadas en los pozos verticales para el intervalo Quintuco – Vaca Muerta:

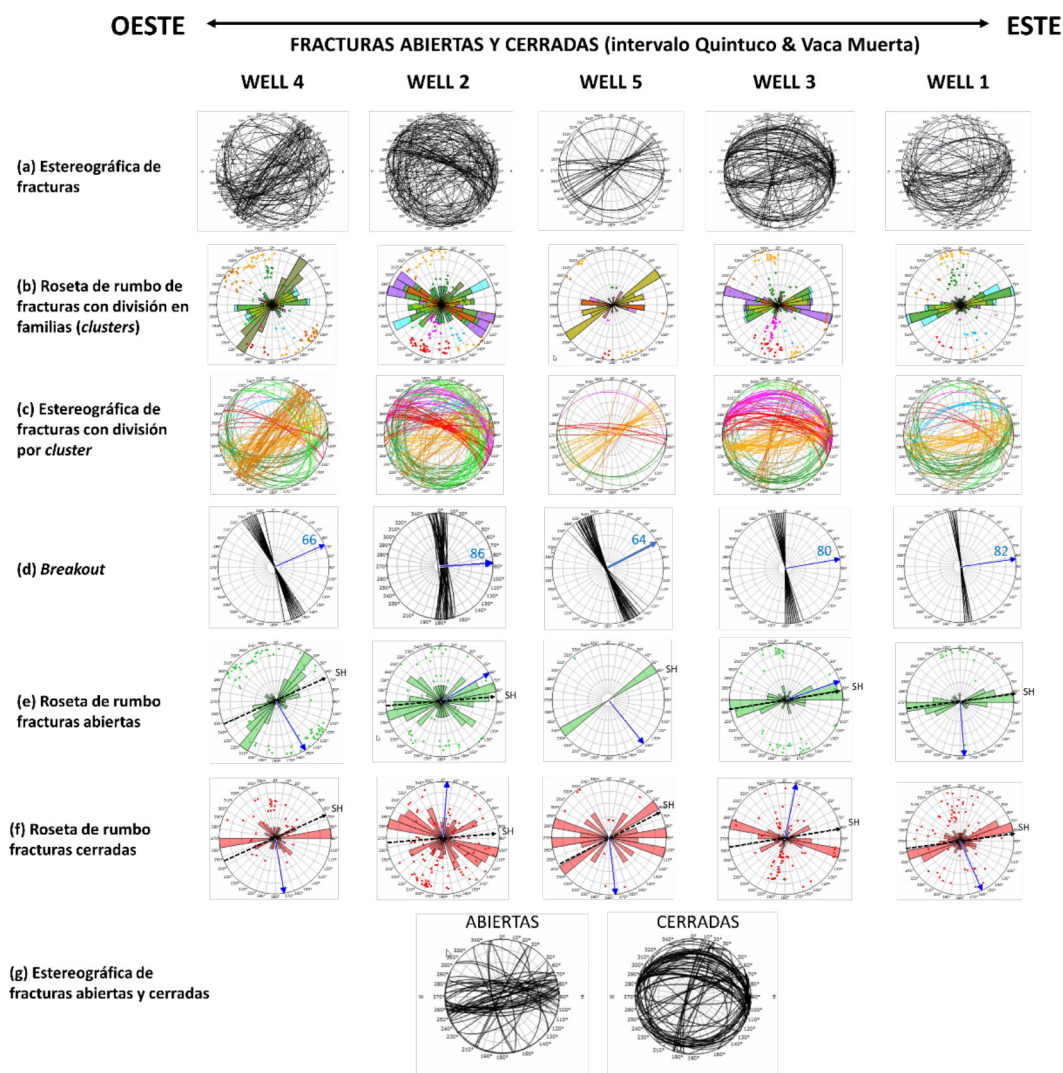


Figura 3. (a) Proyección estereográfica de los planos de fracturas naturales (abiertas y cerradas) presentes en el intervalo Quintuco & Vaca Muerta. (b) Grafico de roseta representando la distribución del rumbo de los planos de fracturas naturales graficados en el punto anterior y divididos por familias (*clusters*). (c) Proyección estereográfica de los planos de fracturas naturales divididas por familias (*clusters*). (d) orientación de los Breakouts, la flecha azul indica la dirección interpretada del estrés horizontal máximo. (e) Roseta mostrando la distribución de las fracturas abiertas. (f) Roseta mostrando la distribución de las fracturas cerradas. (g) Estereográfica de la distribución de planos de fracturas abiertas y cerradas para todos los pozos juntos.

Las imágenes de pozo permitieron identificar fracturas naturales abiertas y cerradas, las cuales se agruparon en familias (*clusters*) según su orientación e inclinación (Fig. 3c y 4). El Well 5 presenta una evidente disminución en cantidad de fracturas naturales en comparación con el resto de los pozos, esto se interpreta como consecuencia de las altas densidades de lodo utilizadas durante la perforación (16.6 lb/g). Estos lodos de alta densidad absorben en mayor medida la señal acústica emitida por la herramienta y reduce la resolución de estos perfiles.

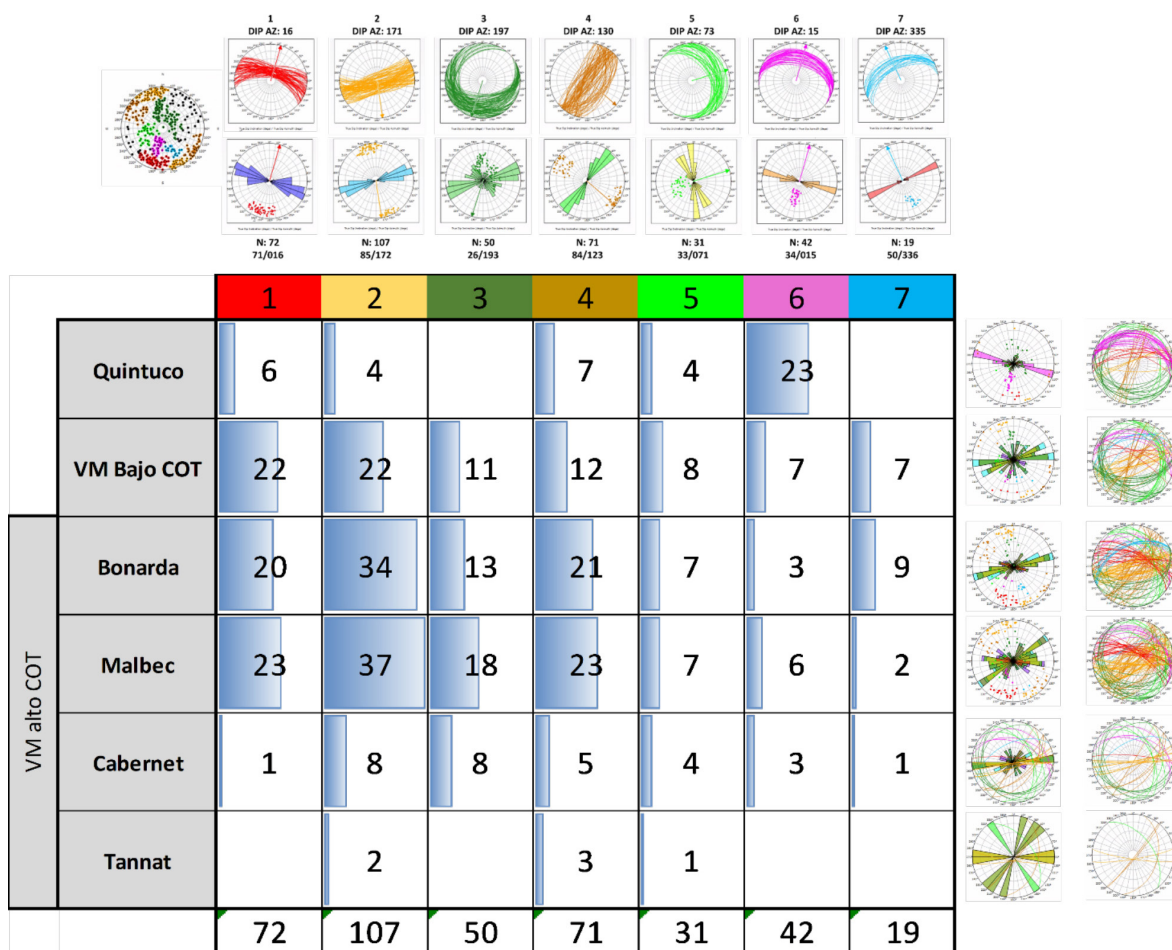


Figura 4. Eje horizontal: División de las fracturas naturales en familias (*clusters*) según su rumbo e inclinación para todos los pozos en el intervalo Quintuco & Vaca Muerta y análisis de cantidad de fracturas por intervalo de interés. Eje vertical: Fracturas naturales por intervalo.

Se dividieron las fracturas en un total de 7 *clusters*, entre los que se distinguieron fracturas de alto ángulo (*clusters* 1, 2 y 4), y fracturas de bajo ángulo (*clusters* 3, 5, 6 y 7). En términos generales, las fracturas mejor representadas en las imágenes de pozo resultaron ser las del grupo de alto ángulo, con un total de 250 planos de fracturas en contraposición con 140 planos de bajo ángulo para la totalidad de los pozos.

Dentro de la población de fracturas de alto ángulo, el desarrollo del *cluster* 2 (*dip* azimuth 85°/172°) es el principal, y tiene una orientación general ENE, aunque con algunas variaciones de rumbo a lo largo del bloque. Esta dirección es consistente con la orientación del campo de estrés regional actuante en el área y sus variaciones podrían responder a perturbaciones locales del mismo, expresadas en la orientación de los berakouts interpretados en las imágenes de pozo (Fig. 3d). El *cluster* 4 (*dip* azimuth 84°/123°) y 1 (*dip* azimuth 71°/016°) le siguen en importancia, el primero con un rumbo NNE y muy desarrollado en el pozo Well 4, y el segundo de rumbo ONO con un mayor desarrollo hacia el sector central y occidental del bloque (pozos Well 2, 3 y 4).

Dentro de la población de fracturas de bajo ángulo, el *cluster* 3 (*dip* azimuth $26^{\circ}/193^{\circ}$) es el de mayor desarrollo, está presente en todos los pozos y niveles estratigráficos del intervalo analizado y presenta una marcada variación de rumbo entre pozos, rasgo que será interpretada en detalle más adelante. Los *clusters* 6 (*dip* azimuth $34^{\circ}/015^{\circ}$) y 7 (*dip* azimuth $50^{\circ}/336^{\circ}$) podrían agruparse en un único grupo, y poseen una disposición aparentemente antitética al *cluster* 3. Finalmente, el *cluster* 5 (*dip* azimuth $33^{\circ}/071^{\circ}$), también de limitada importancia, está presente principalmente en los pozos Well 5 y 3.

Adicionalmente se reconocen variaciones verticales en cuanto a la intensidad de las fracturas. Los intervalos más intensamente fracturados corresponden al Bonarda y Malbec, mientras que el nivel con menos ocurrencia de fracturas es el Tannat (Fig. 4).

Por último, se observa que aquellos *clusters* de fracturas cuyo rumbo es coincidente con la dirección del estrés horizontal máximo tienen una tendencia a presentarse como fracturas abiertas. Por el contrario, aquellos *clusters* cuyo rumbo difiere de esta orientación, tienden a presentarse como fracturas cerradas (Fig. 3e, 3f y 3g)

Análisis de fracturas naturales en perfiles de imagen en pozos horizontales (LWD):
Dos pozos horizontales han sido registrados con imagen de pozo acústica y microresistiva LWD (*Logging While Drilling*). Vallejo *et al.* (2020) describieron los resultados de la adquisición de dichas imágenes. Ambos pozos exhibieron fracturas naturales a lo largo de las ramas horizontales (Fig. 5). Sin embargo, la cantidad de fracturas detectadas fue menor a lo esperado, nuevamente se interpreta que es consecuencia de las altas densidades de lodo utilizadas durante la perforación (16.6 lb/g).

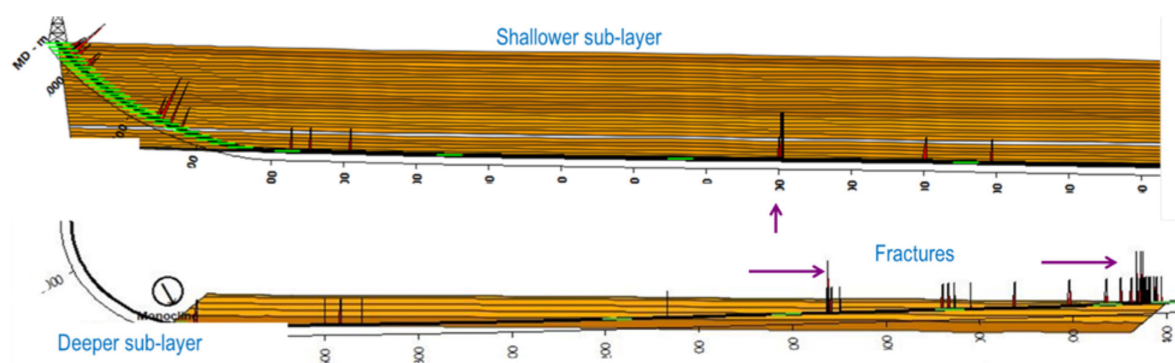


Figura 5. Fracturas naturales en las ramas laterales (tomado de Vallejo *et al.* 2020). La curva negra representa la densidad de fracturas por metro.

En estos perfiles se han identificado fracturas naturales abiertas y parcialmente abiertas (Fig. 6) con una orientación consistente con los *clusters* identificados en los pozos verticales. Se reconocieron principalmente fracturas verticales de rumbo ENE correspondientes al *cluster* 2. Y ocasionalmente fracturas verticales de rumbo NNO y NNE (Fig. 6). Este resultado es esperable

considerando que el azimut de los pozos horizontales es de 350° (ramas norte) y 170° (las ramas sur), por lo que el pozo se dispone perpendicularmente a las fracturas de rumbo ENE.

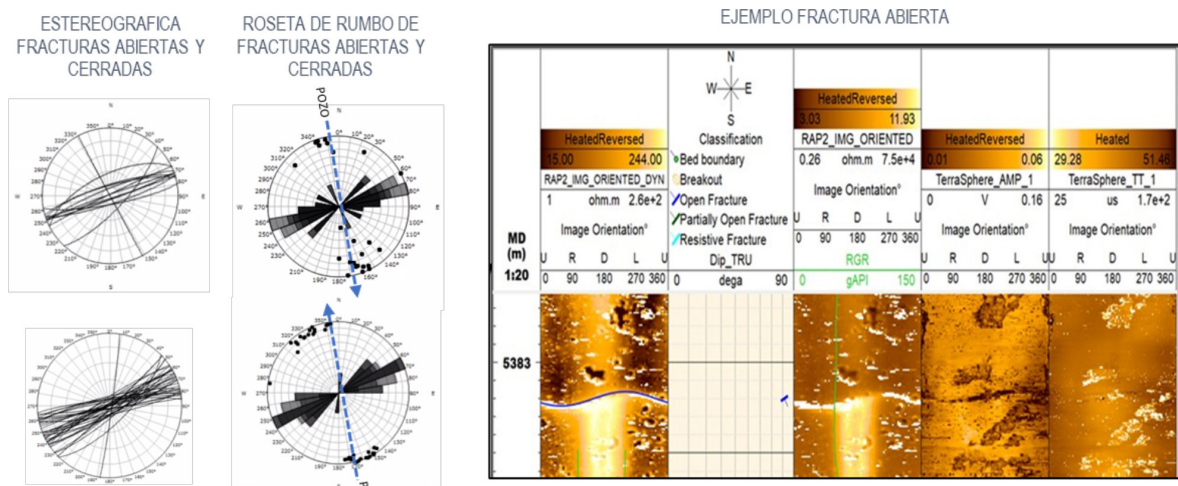


Figura 6. Fracturas naturales identificadas en perfil de imagen LWD en pozos horizontales. De izquierda a derecha: estereografía con todos los planos de fracturas identificadas en los pozos horizontales, roseta del rumbo de las fracturas abiertas, roseta del rumbo de las fracturas parcialmente abiertas. Ejemplo de fractura abierta en un perfil de imagen de pozo adquirido en el pozo Well 3.

Análisis de atributos sísmicos: Con el objetivo de identificar en el subsuelo las familias de fracturas identificadas a escala de pozo, se exploraron una serie de atributos sísmicos estructurales buscando resaltar discontinuidades menores en la señal sísmica, y que pudieran estar relacionadas con dichas fracturas.

El atributo con mejor desempeño resultó ser el “*Ant-tracking*”, el cual se utiliza para extraer planos de fracturas naturales a partir de un volumen sísmico procesado (usualmente varianza). Este algoritmo detecta bordes o discontinuidades en el volumen sísmico y los resalta emulando un camino de hormigas (Othman, *et al.* 2016). Este atributo permitió resaltar rasgos sísmicos coincidentes con los patrones de fracturas observados.

En la Figura 7a se observa una sección vertical del volumen sísmico mostrando el atributo *Ant-tracking*. En esta sección (que incluye el intervalo Mulichinco a Vaca Muerta) se observa claramente la presencia de rasgos de variada orientación e inclinación, así como también variaciones en la densidad de estas anomalías (tanto vertical como lateralmente)

Con el objetivo de analizar en detalle las características de cada intervalo, se dividió la sección vertical por unidad estratigráfica. Para el caso de la Formación Vaca Muerta se subdividió en secciones menores según los intervalos geonavegados (Bonarda, Malbec, Cabernet y Tannat; según Vallejo *et al.* 2016). Para cada nivel se caracterizó la variación espacial del atributo en un mapa de “energía” (sumatoria del atributo dentro del intervalo analizado) (Fig. 7b, 8 y 9).

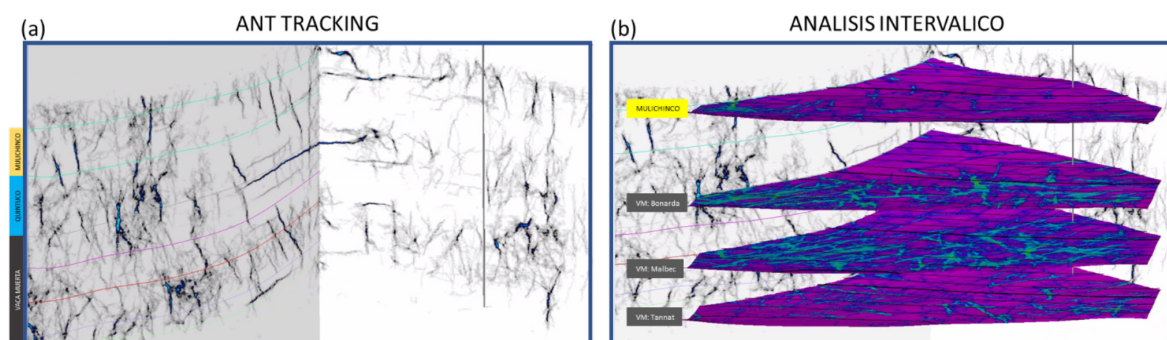


Figura 7. (a) Sección vertical del volumen del atributo Ant-Tracking; (b) Mapas por intervalo (sumatoria del atributo Ant-Tracking).

Este primer análisis permitió reconocer patrones con variaciones laterales y verticales (Fig. 8). A escala de bloque se reconocen al menos dos regiones con un carácter sísmico propio. La zona “SUR” del bloque, dentro de la cual se observa una alta intensidad del atributo y un patrón de lineaciones complejo, y una zona “NORTE” donde la intensidad es marcadamente menor, y se reconocen lineaciones con una orientación predominantemente NE.

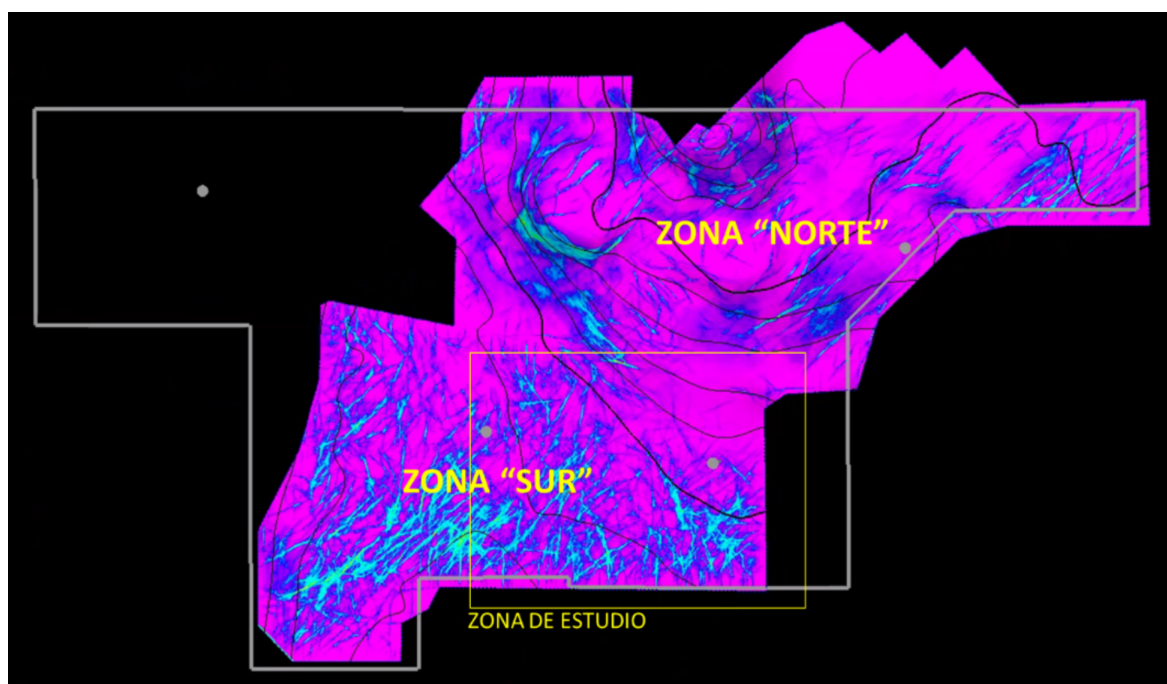


Figura 8. Sumatoria del atributo ant-tracking para el intervalo Bonarda).

Dichas anomalías fueron extraídas como planos 3D (*fault patches*) que permitieron realizar un análisis estadístico detallado de las orientaciones, inclinaciones, densidades, tamaños y distribución de estos planos. A modo de ejemplo, la Figura 9 muestra la consistencia entre las anomalías observadas en el atributo y los planos extraídos a partir de las mismas.

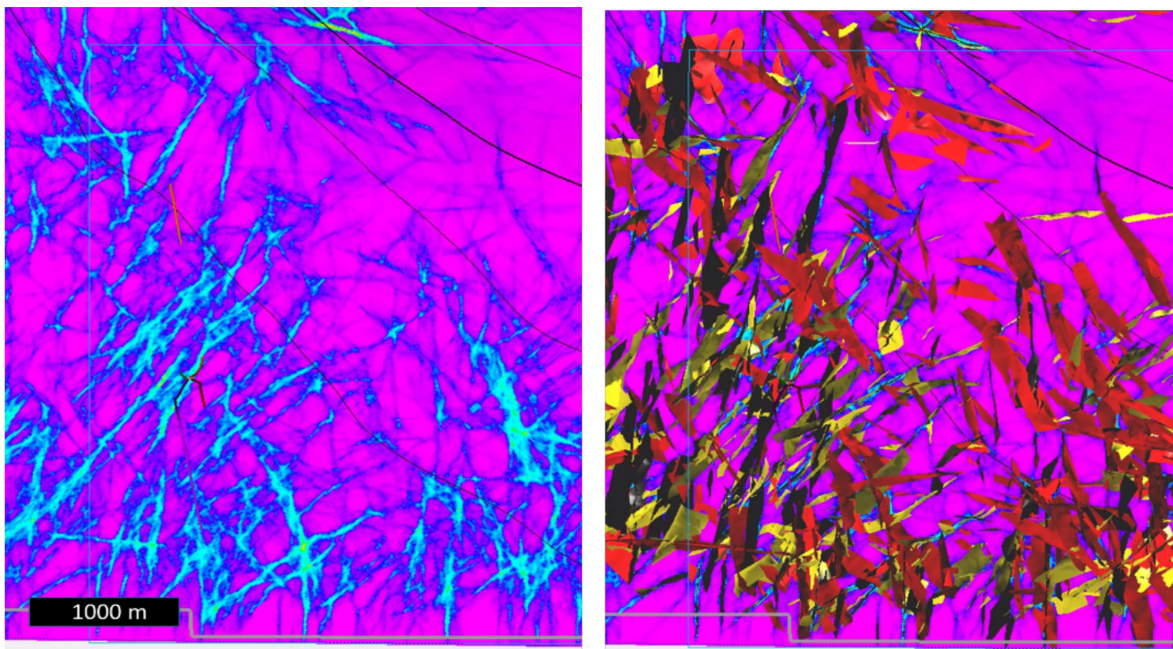


Figura 9. Extracción de planos (*Fault patch*).

Un análisis de los patrones observados en la “zona de estudio” permitió identificar claramente la presencia de 3 orientaciones principales (Fig. 10):

- **Dirección NE a ENE (amarillo):** rasgos cortos, algo equidistantes, de alta densidad de ocurrencia. Estos rasgos parecerían interrumpirse en la mayoría de los casos contra los rasgos transversales.
- **Dirección NNO a NO (rojo):** rasgos largos y continuos. Perpendiculares a la dirección del estrés máximo.
- **Dirección NNE (negro):** rasgos largos y algo discontinuos. Poco frecuentes.

La coincidencia de las direcciones observadas en el atributo sísmico con las direcciones observadas en las imágenes de pozos (principalmente con los *clusters* más números) sugiere que existe una relación entre dichas anomalías y rasgos estructurales del subsuelo (plano de fracturas o redes de fracturas naturales). La orientación NE a ENE del atributo sísmico (que a su vez es la más frecuente) es consistente con la familia de fracturas naturales más numerosa identificada en las imágenes de pozo (*cluster 2*). Mientras que las anomalías de rumbo NNO a NO podrían correlacionarse con la familia de fracturas naturales de los *clusters* 1, 5 y 6. Por último, la dirección NNE se correspondería mayormente con el *cluster 4*.

Se interpreta que el rasgo estructural sísmico está detectando zonas de mayor densidad de fracturas naturales, o bien planos de fractura mayores. Mientras que las imágenes de pozo pueden estar registrando tanto los planos mayores, como fracturas menores que son invisibles a la sísmica. Pero en todos los casos es esperable que las fracturas de gran escala tengan consistencia (en cuanto a la orientación e inclinación) con las fracturas de menor escala.

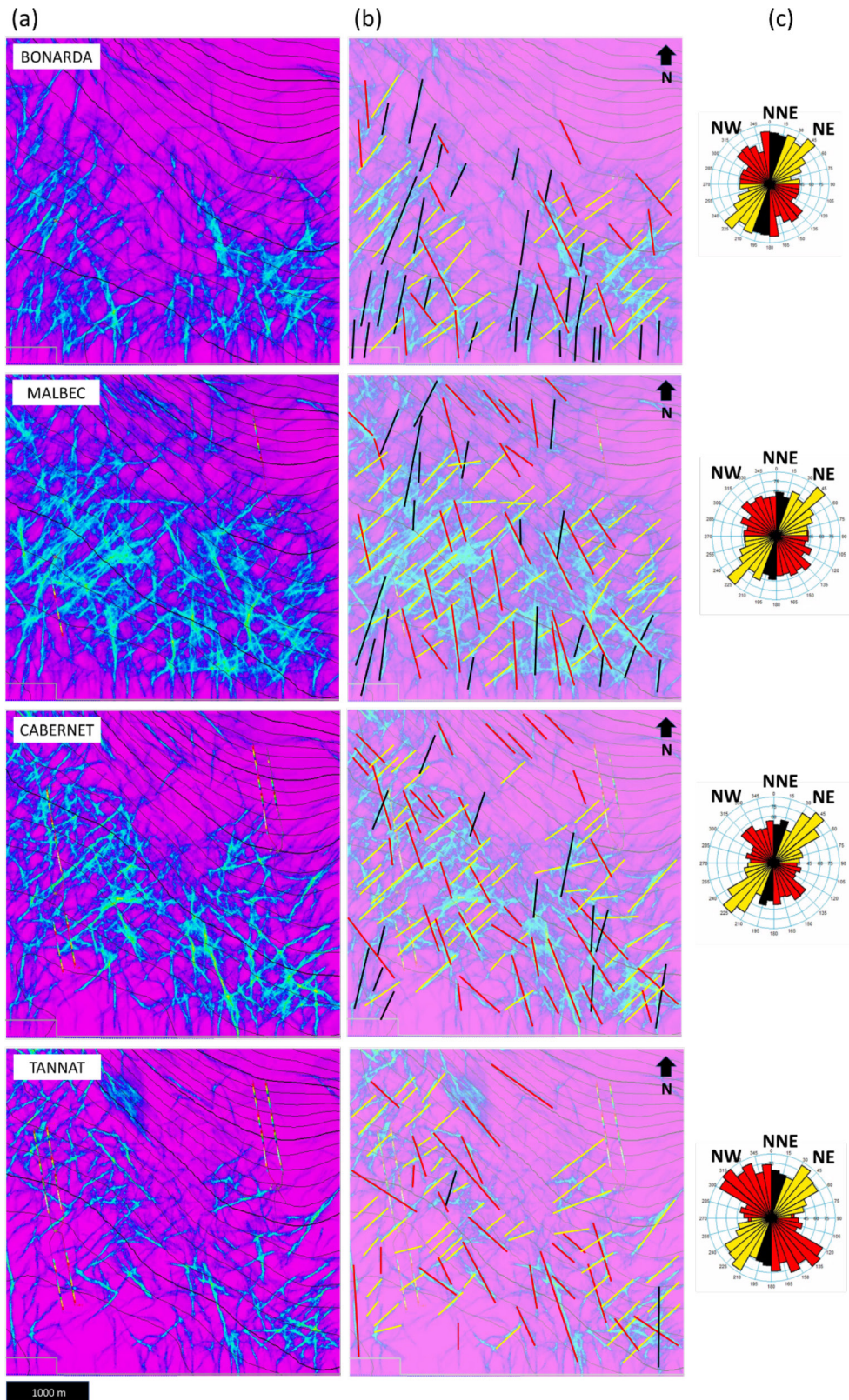


Figura 10. Mapas de ant-tracking por intervalo. (a) mapas sin interpretación; (b) mapas con las familias de fracturas interpretadas; (c) rosetas con la distribución de los planos (fault patches) extraídos para cada intervalo; (d) orientación promedio de cada familia y dirección del estrés horizontal máximo.

La variación vertical en el atributo sísmico también es consistente con la variación vertical de la densidad de fracturas naturales observadas. En la Figura 11 se muestra relación entre las fracturas naturales obtenidas a partir de las imágenes de un pozo vertical (*track* 1, 2, 3, 6 y 7) en comparación con el atributo sísmico *ant-tracking* a lo largo de la trayectoria del pozo (*track* 4 y 5). En el *track* 8 se muestra el carácter del atributo en planta en las inmediaciones del pozo para cada nivel.

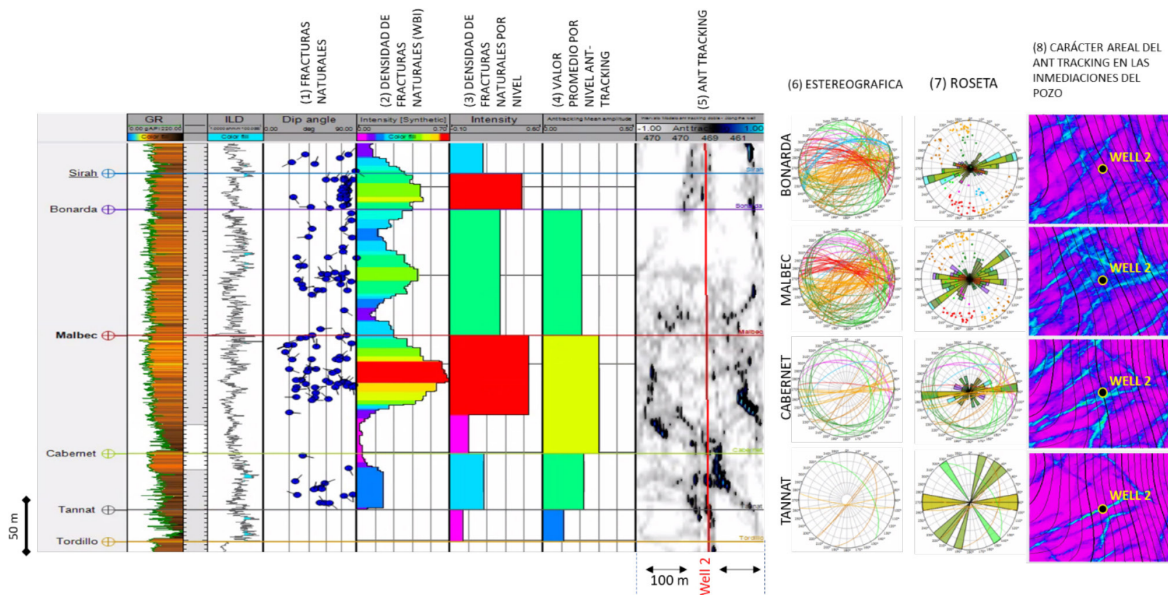


Figura 11. Calibración con perfiles de imagen de pozo en el pozo "Well 2".

El ajuste entre el atributo sísmico y las imágenes de pozo también se analizó a lo largo de las trayectorias de los pozos horizontales. En la Figura 13 se muestra los planos de fracturas obtenidos a partir del atributo sísmico y los planos de fracturas naturales interpretados en los pozos horizontales. Para ello se realizó un recorte del atributo sísmico alrededor de la trayectoria del pozo y se extrajeron los planos de discontinuidades (*fault patches*). Notar que presencia de la familia de fracturas verticales con dirección NE a ENE (*cluster 2*) prevalece sobre las demás a lo largo de la trayectoria de los pozos horizontales. Tal como se mencionó anteriormente, esta observación es esperable, considerando que la dicha familia de fracturas posee la mayor densidad de ocurrencia y su orientación es perpendicular a la trayectoria de los pozos horizontales.

Microsísmica: La zona de estudio cuenta con un registro microsísmico. Los resultados de esta adquisición (Fig. 13) permitieron validar que los rasgos observados en el atributo de *ant-tracking* son consistentes con planos de fracturas naturales preexistentes. En la Figura 13 se presenta el atributo sísmico para 3 intervalos (1: Quintuco a Vaca Muerta con bajo COT; 2: Vaca Muerta bajo COT a Vaca Muerta alto COT; 3: Vaca Muerta alto COT a Tordillo) con sus respectivos eventos microsísmicos superpuestos (puntos negros). Los eventos microsísmicos se alinearon

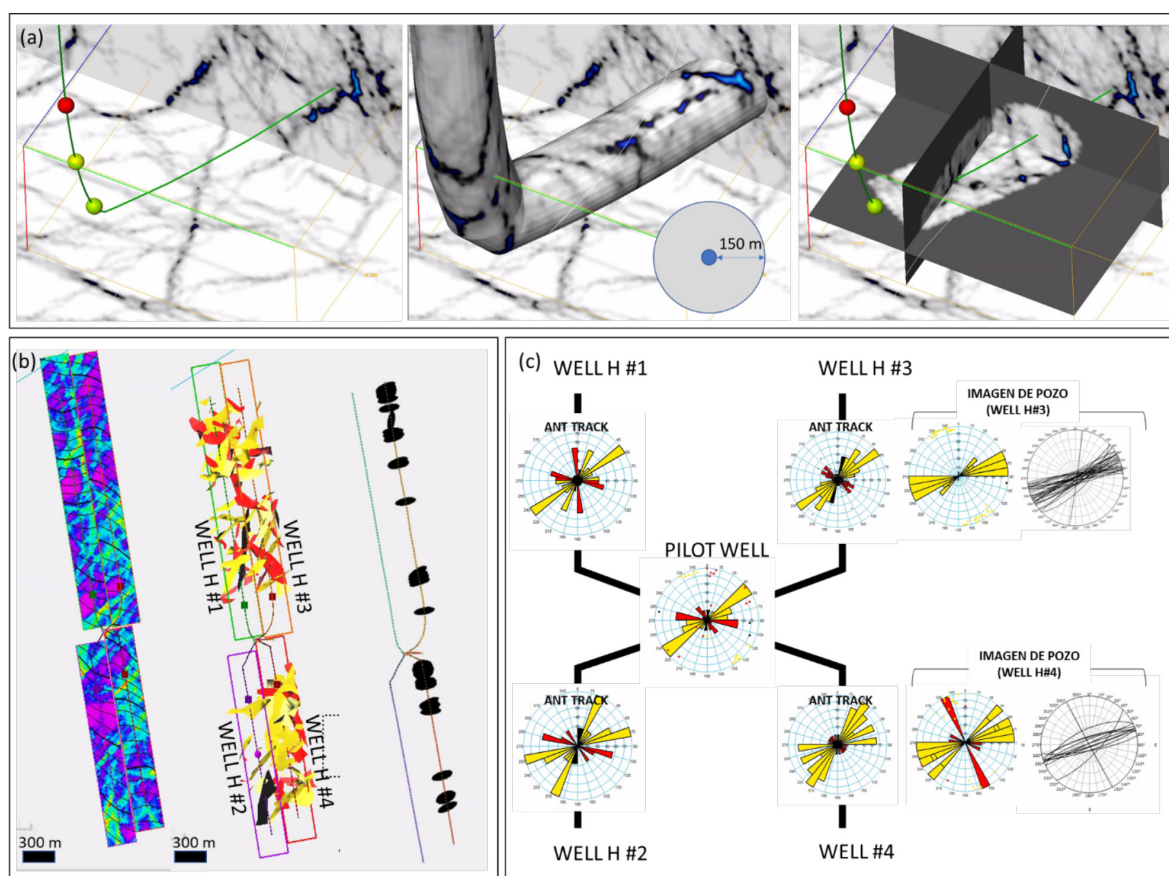


Figura 12. Calibración del atributo sísmico con las fracturas observadas en la imagen de pozo en las ramas horizontales: (a) Vista 3D de la trayectoria del pozo “Well 1” mostrando esquemáticamente el proceso de generación de un volumen alrededor de la trayectoria del pozo. (b) mapa de ant tracking, extracción de fault patch y fracturas naturales representadas como discos sobre la trayectoria los pozos horizontales. (c) Roseta de las fracturas interpretadas a partir del atributo ant tracking y las fracturas interpretadas a partir de la imagen de pozo.

preferentemente en una orientación 70° - 250° coincidiendo con la orientación de las anomalías observadas en el mapa y con la orientación de las fracturas naturales de orientación NE a ENE. Cabe mencionar que la dirección del estrés horizontal máximo (SHMAX) actual en la región va de 64° a 86° (estimado mediante el análisis de breakouts en imágenes de pozos verticales), por lo que las fracturas de orientación NE a ENE serían las más propensas a ser estimuladas por una fractura hidráulica, tal como se observa en la Figura 13. Este control estructural se hace más evidente en los intervalos superiores (a y b de la Fig.13), y es menos marcado en el nivel donde se encuentra navegado el pozo. En este mismo sentido, es importante destacar que la orientación NNO parece ser “invisible” a la Microsísmica. Este hecho es consistente nuevamente con la dirección del estrés horizontal máximo, ya que estos planos estarían soportando un mayor estrés normal, y por ende, no serían propensos a ser estimulados por la fractura hidráulica. Un caso intermedio es el de las fracturas de orientación NNE, las cuales fueron parcialmente reactivadas tal como se ve en el Intervalo Quintuco de la Figura 13 (flecha amarilla).

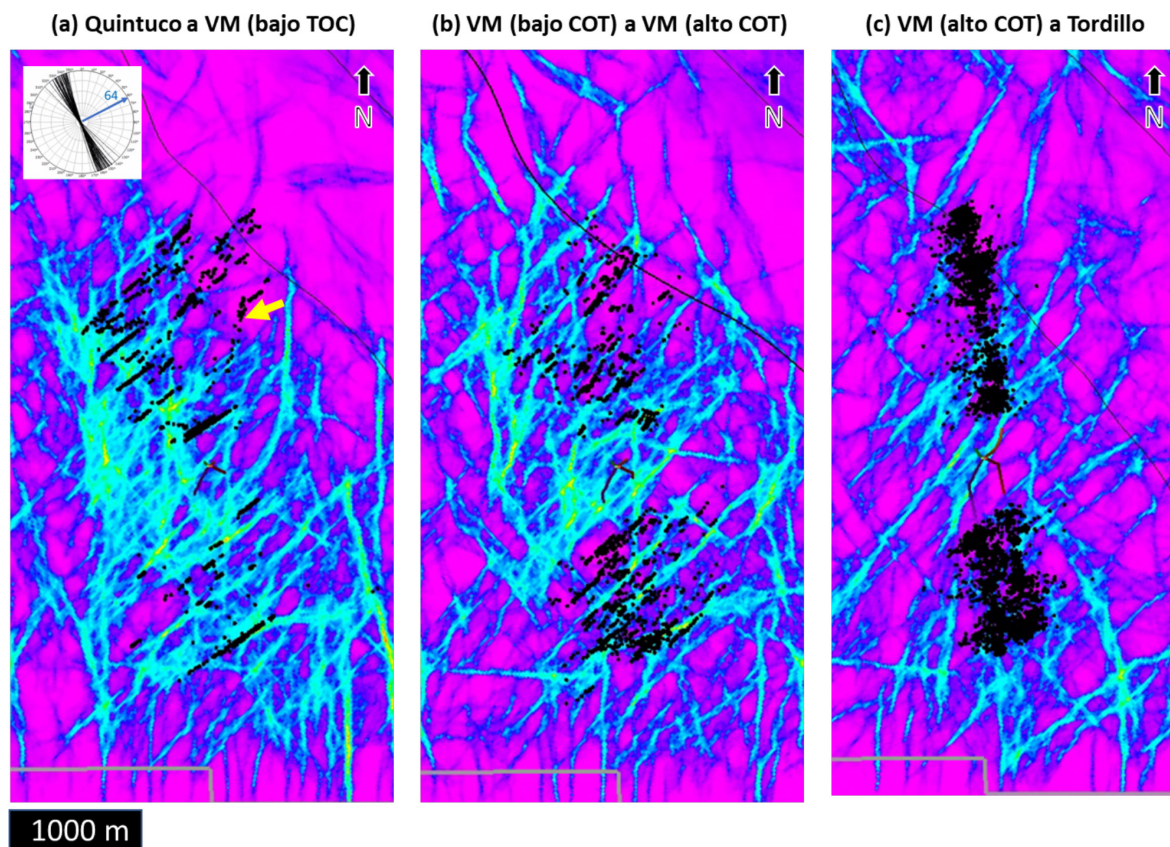


Figura 13. Eventos de microsísmica (puntos negros) sobreimpuestos sobre mapas de atributo sísmico *ant-tracking* para los intervalos: (a) Quintuco a Vaca Muerta con bajo COT; (b) Vaca Muerta con bajo COT a Vaca Muerta con alto COT ($>2\%$ w/w); (c) Vaca Muerta con alto COT a Tordillo. La flecha amarilla en la Figura (a) destaca los eventos microsísmicos alineados con la orientación NNE.

Fallas: Las fallas que afectan el Sistema Quintuco-Vaca Muerta en el sector norte del bloque están principalmente relacionadas a la intrusión del complejo volcánico Cerro Bayo de la Sierra Negra (Fig. 14), el cual está caracterizado por la presencia de diques, filones capa y fallas normales radiales y fallas circulares inversas (Valenzuela *et al.* 2011). La caracterización de estas no será abordada en el presente trabajo.

En el sector sur, se reconocen hacia la base de la formación Vaca Muerta (tope de Tordillo) dos fallas inversas (Fig. 14c) con escaso rechazo vertical. La falla occidental pierde continuidad dentro de la formación Vaca Muerta, mientras que la oriental alcanza el tope de la formación Mulichinco (Fig. 14a). Marchal *et al.* (2020) hacen referencia a esta orientación como una orientación restringida dentro de la población de fallas inversas, y más frecuente en la región central (Engolfamiento). Cristallini (2013) propone dos alternativas para estas estructuras: (1) mecanismo de inversión tectónica que invirtió fallas normales profundas y/o (2) Fallas conjugadas inversas como respuesta al evento de compresión Ándico.

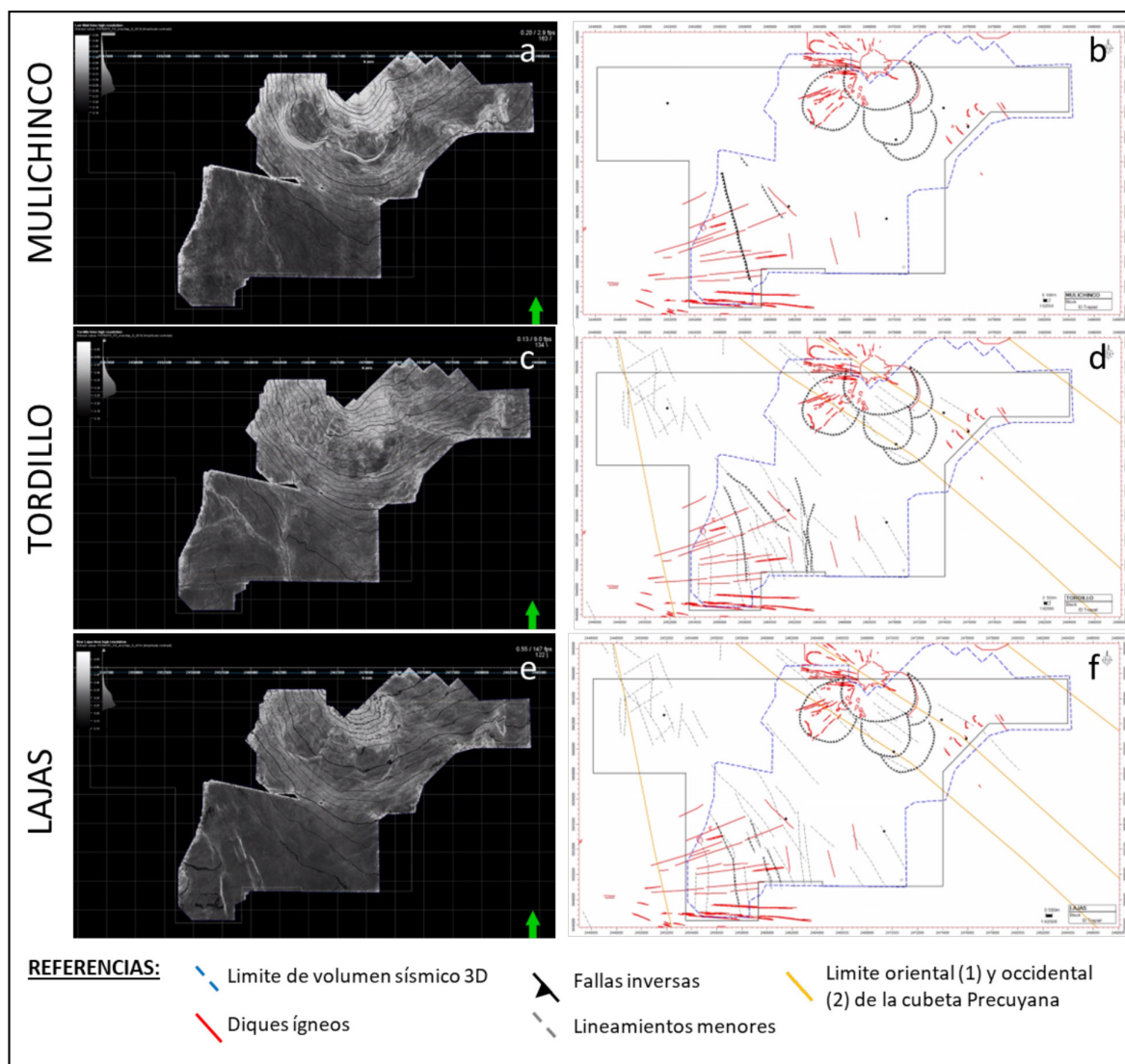


Figura 14. Izquierda: contraste de amplitud para los horizontes sísmicos correspondientes a los intervalos (a) Mulichinco, (c) Tordillo y (e) Lajas. Derecha: Interpretación de los principales rasgos estructurales para los mismos intervalos en cuestión.

Interpretación en un contexto regional:

La estructura actual de la Cuenca Neuquina es el resultado de sucesivas fases de deformación que van desde la apertura (rift) en el Triásico Tardío - Cretácico Temprano, pasando por múltiples episodios de compresión e inversión tectónica durante el Mesozoico y Cenozoico (Vergani, 1995; Mosquera & Ramos, 2005). Las principales orientaciones de fracturas naturales interpretadas en el presente trabajo tienen consistencia con el contexto regional descrito por Cristallini *et al.* (2001, 2009), Pangaro *et al.* (2011), Marchal *et al.* (2020), entre otros.

Cristallini *et al.* (2009) describieron los controles de las estructuras profundas Precuanas sobre la secuencia sedimentaria suprayacentes. Los autores interpretan la existencia de dos

poblaciones de fallas Precuyanas bien definidas (la población NO y ONO) generadas durante el periodo de apertura de la cuenca Neuquina. Sin embargo, esta orientación de fallas no está circunscripta únicamente al basamento Precuyano, sino que se reconoce en la secuencia estratigráfica suprayacente, afectando incluso a las formaciones que representarían el relleno de Sag de la cuenca. Los autores interpretan que una vez finalizado el período extensional Precuyano, y la cuenca entra en un estadio de subsidencia térmica generalizada, este basamento desparejo habría provocado un efecto de subsidencia irregular por compactación diferencial del relleno de las cubetas o hemigrábenes. Este efecto produciría un estiramiento y subsidencia de las capas suprayacente fracturándose en los sectores de máxima tensión. Este fallamiento se propaga hacia arriba incluso en sectores que han sido claramente sometidos a compresión cretácico-terciaria.

Otra interpretación a esta orientación de fallas fue provista por Pangaro *et al.* (2011) quienes vincularon esta orientación con reactivación de fallas de rumbo dextrales. Aunque este carácter estructural tendría su límite oriental en el lineamiento cortaderas, al sur del bloque El Trapial.

Cristallini *et al.* (2001) volvieron a identificar dos patrones de fracturas naturales (NNO y ENE) en el bloque Puesto Hernández (Rincón de los Sauces) cercano al bloque El Trapial.

Diversos autores reconocen la presencia de las familias de fallas con orientación NNE, pero las limitan a la región de los bloques Río Neuquén / Lindero Atravesado (Berdini *et al.* 2002) y los bloques San Roque / Sierra Chata (Gangui y Grausem, 2014). El presente trabajo aporta una nueva locación en el sector norte de la cuenca donde se reconoce esta orientación.

En un trabajo de consultoría interno, Cristallini *et al.* (2013) identificaron una estructura de “cubeta triangular” Precuyana con su ápice hacia el NO, cuyos límites se muestran en el mapa de la Figura 15. Su borde occidental tiene dirección NNO, mientras que su borde oriental tiene dirección NO. Esta estructura habría ejercido un control sobre las estructuras presentes en el relleno de esta.

CONCLUSIONES

Los rasgos estructurales referidos en el presente trabajo, así como las principales orientaciones de fracturas, y fallas interpretadas son compilados en la Figura 15. La transición entre el carácter sísmico complejo descrito en la zona “SUR”, hacia el carácter menos complejo de la zona “NORTE” parecería coincidir con el límite oriental de la estructura de cubeta profunda descrita por Cristallini *et al.* (2013). Dicha observación es también reconocida en la distribución de fracturas naturales interpretadas en los pozos con imágenes (rosetas Fig. 15b). Aquellos que se encuentran dentro de los márgenes de la cubeta presentan un patrón de fracturas naturales mucho más complejo que los que fueron perforados por encima de los hombros de esta estructura.

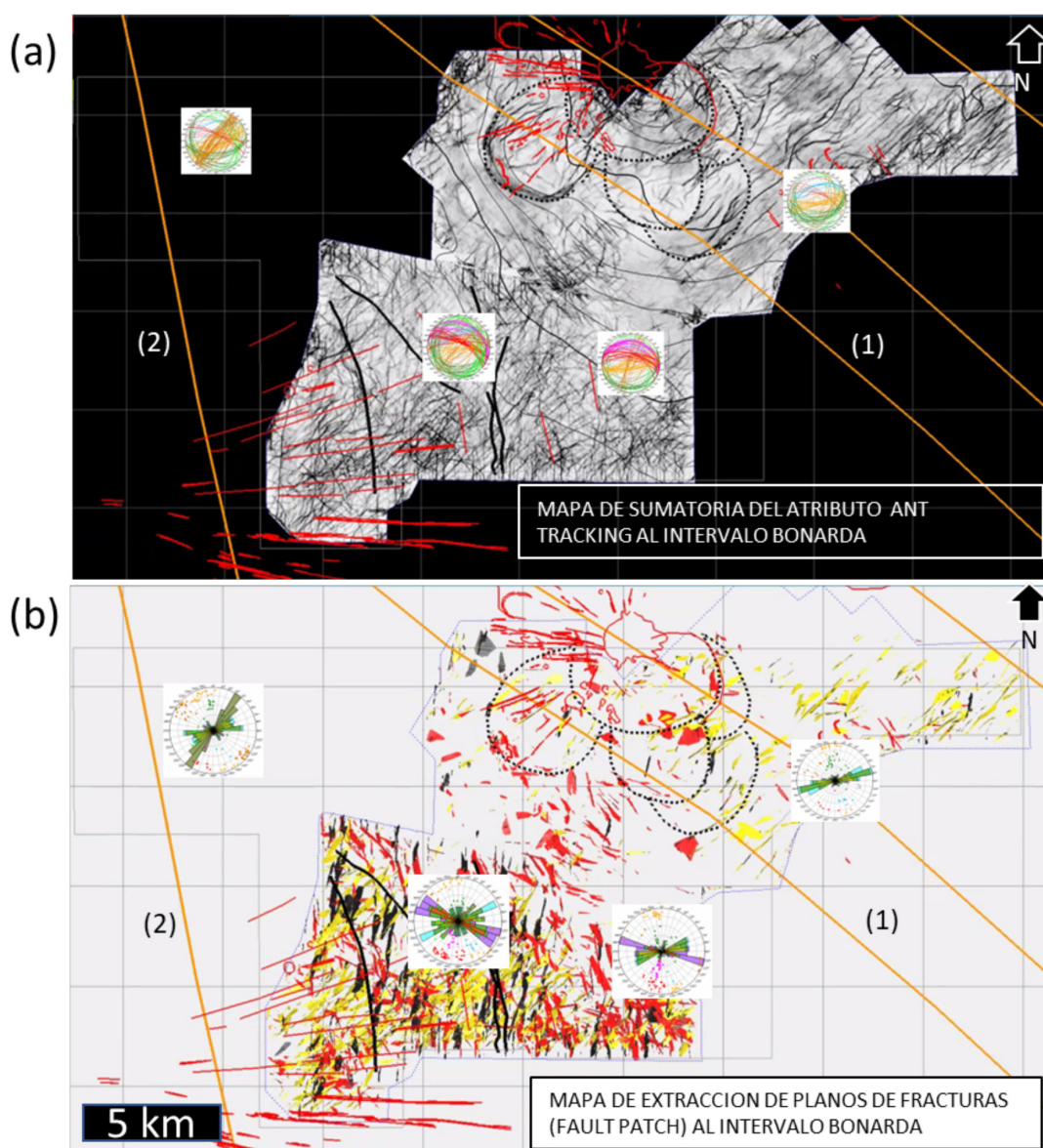


Figura 15. Límites de la cubeta Precuyana (1 y 2) interpretada por Cristallini *et al.*, (2013), diques ígneos y fallas principales sobreimpuestos sobre: (a) mapa del atributo ant tracking (intervalo Bonarda) y red estereográfica coloreadas por cluster; (b) Mapa de planos Fault Patch y rosetas del rumbo de los planos de fractura.

Respecto a las orientaciones de fracturas naturales descriptas en esta contribución, se presenta a continuación una interpretación en el contexto regional:

La familia de fracturas naturales de orientación NE a ENE (*cluster 2* en las imágenes de pozo) es la más frecuente dentro del bloque, son verticales y poseen un rumbo que se alinea con la dirección del estrés horizontal máximo (interpretado por la orientación de los breakouts en las imágenes de pozo). Esta orientación se presenta preferentemente como fracturas abiertas, hecho que es consistente con la orientación del campo de estrés actual. Por el mismo motivo es una orientación propensa a ser reactivada por la estimulación hidráulica durante la terminación

de los pozos horizontales. En el atributo sísmico se presentan como fracturas relativamente cortas, equidistantes, de alta densidad de ocurrencia. Su origen estaría vinculado al régimen tectónico actual (etapa de Nazca: convergencia Placa de Nazca y Sudamericana). Son frecuentes a lo largo de toda la secuencia estratigráfica analizada y están presentes en toda la extensión del bloque.

La familia de fracturas naturales verticales de rumbo NNE están representadas en las imágenes de pozo por el *cluster* 4. Estas fracturas también son verticales, y tienen un marcado desarrollo en el pozo Well 4. Notar que, en esta locación en particular, el rumbo NNE es radial al centro del complejo ígneo Cerro Bayo de Huantraico. Se interpreta que este set de fracturas habría sido desarrollado (o amplificado) por la intrusión de dicho cuerpo ígneo. Esta misma perturbación del campo de estrés regional habría sido la que dio origen a la intrusión de los diques radiales de la Formación Desfiladero Negro hacia el sur de Trapial. Esta orientación, aunque con menos desarrollo también está presente en los pozos dentro de la cubeta Precuyana. No obstante, su origen sería diferente y podría vincularse al mecanismo descrito por Cristallini *et al.* (2009) y ser una orientación heredada de las estructuras profundas del basamento como resultado de un proceso de subsidencia diferencial. Notar además la existencia de una falla inversa con el mismo rumbo en la base de la Formación Vaca Muerta que podría afianzar esta última hipótesis. En el atributo sísmico esta orientación es reconocida como rasgos largos y continuos. Y fueron parcialmente reactivadas mediante la estimulación hidráulica.

La familia de fracturas verticales de rumbo NO a NNO están representadas en las imágenes de pozo por el *cluster* 1. Para esta orientación se postulan dos hipótesis, al tratarse de fracturas verticales, y coincidentes con el ángulo de convergencia durante la etapa Farallón tardía (N100°E, Marchal *et al.*, 2020) podrían tratarse de fracturas tensionales paralelas a esta dirección de estrés. Mientras que la leve inclinación que presentan podría deberse basculamiento Mioceño durante la intrusión del complejo ígneo Cerro Bayo de la Sierra Negra. Otra alternativa, es relacionar esta dirección con la orientación NNO ampliamente descrita en la región (Cristallini *et al.* 2001 y 2009, Marchal, *et al.* 2020). En dicho caso, su origen sería nuevamente heredado de las estructuras profundas del basamento como producto de la subsidencia diferencial. En el atributo sísmico se caracterizan por ser familias de fracturas largas y continuas. Por su orientación con respecto al campo de estrés actual se presentan principalmente como fracturas cerradas, y no son propensas a ser reactivadas mediante la estimulación hidráulica (no se registraron eventos microsísmicos asociados a esta orientación).

Finalmente, las fracturas de bajo ángulo (representadas por los *clusters* 3, 5, 6 y 7) poseen un rumbo tangencial al complejo ígneo Cerro Bayo de la Sierra Negra (Fig. 15). Estas fracturas podrían ser el resultado de la perturbación compresiva asociadas a la intrusión de este cuerpo magmático. Esta última observación es una hipótesis y requiere de un mayor análisis para ser probada.

Esta caracterización de fracturas naturales ayudó a mitigar una incertidumbre clave al momento de evaluar el desempeño de los pozos horizontales (la DFN: *Discrete Fracture Network*), siendo un input principal en los modelos estáticos y dinámicos. Mejorando la comprensión de la relación entre las familias de fracturas naturales y los resultados de la estimulación hidráulica de los pozos. Y permitiendo un mayor entendimiento de las estructuras presentes en la Formación Vaca Muerta.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a Daniel Yagupsky, Denis Marchal, Ernesto Cristallini, y Manuel Fantin por sus valiosas sugerencias y aportes. Y a Chevron Argentina por autorizar la publicación del presente trabajo.

REFERENCIAS CITADAS

- Berdini, O., Arregui, C., and Pimentel Mendes, M., 2002. Evolución tecto-sedimentaria de la estructura Río Neuquén, Cuenca Neuquina: 15° Congreso Geológico Argentino, El Calafate, Argentina, 23–26 April, v.3, p. 187–192.
- Brisson, I., 2015. Columnas estratigráficas representativas de la Cuenca Neuquina. Trabajo inédito.
- Cristallini, E.O., Bottesi, G., Pérez, D., Tomezzoli, R., Cómeron, R., Varadé, R., Vitulli, N., Borsarski, G., Pioli, O., Zardo, E., Olea, G., Cortés, L., Ramirez, J., Mallimaci, D., Vernaes, G., y Grinberg, M., 2001. Fracturación regional en el norte de Neuquén y sur de Mendoza. V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Trabajos Técnicos, Actas en CD, 16 pp.
- Cristallini, E.O., Tomezzoli R.N., Pando, G., Gazzera, C., Martinez, J.M., Quiroga, J., Buhler, M., Bechis, F., Barredo, S., Zambrano, O., 2009. Controles Precuyanos En La Estructura De Cuenca Neuquina. Revista de la Asociación Geológica Argentina; vol. 65 p. 248 - 264.
- Cristallini, E.O., Likerman, J., Gallo L., Tomezzoli R., Fantin, M., Sotelo, D., 2013. Caracterización estructural y evolución tectónica del bloque El Trapial (Provincia del Neuquén). Chevron Argentina. Informe interno.
- Cuervo, S., Vallejo, D., y Crousse, L., 2014. Caracterización integrada petrofísica y geomecánica de la Formación Vaca Muerta en el área de El Trapial. En: Galeazzi, S., G. González, M. Santiago, D. García, L. Maschio, R. González y J. Ramírez Martínez (Eds.), IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Simposio de Recursos No Convencionales, 613-629, Mendoza.
- Gangui, A., and Grausem, M., 2014. Tectonismo y estilos estructurales en el Engolfamiento Neuquino: implicancias en la interpretación de las fracturas monitoreadas por microsísmica en la formación Vaca Muerta, in S. Galeazzi, G. González, M. Santiago, D. García, L. Maschio, R. González, and J. Ramírez Martínez, eds., Simposio de Recursos No Convencionales: 9° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos: IAPG, Mendoza, Argentina, 3–7 November, p. 341–364.

- Kay, S.M., and Copeland, P., 2006. Early to middle Miocene backarc magmas of the Neuquén Basin: Geochemical consequences of slab shallowing and the westward drift of South America, in Kay, S.M., and Ramos, V.A., eds., *Evolution of an Andean margin: A tectonic and magmatic view from the Andes to the Neuquén Basin (35°–39°S lat)*: Geological Society of America Special Paper 407, p. 185–213, doi: 10.1130/2006.2407(09).
- Marchal, D., Mancada, R., Dominguez, F. R., Satter, F., 2020. Structural Geology: Tectonic History, Macrostructures, Regional Fault Map, Fault Systems, Second-Order Structures, and Impact of the Inheritance. AAPG Memoir 121, p. 99–139.
- Mosquera, A., Ramos, V., 2005. Intraplate deformation in the Neuquén embayment: 16° Congreso Geológico Argentino, La Plata, Argentina, 20–23 September, p. 193–202.
- Othman, A.A.A., Mohamed, M.A.A., Mohamed, M.F., 2016. Improving fault tracing detection applying 3D ant *tracking* seismic attribute. IOSR Journal of Applied Geology and Geophysics (IOSR-JAGG) e-ISSN: 2321–0990, p-ISSN: 2321–0982. Volume 4, Issue 3 Ver. I (May. - Jun. 2016), PP 18–25
- Ramos, V.A., 1978. Estructura, en E.O. Roller, ed., *Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén*. VII° Congreso Geológico Argentino (Neuquén), Relatorio, p.99–118.
- Ramos, V.A., Barbieri, M., 1989. El volcanismo cenozoico de Huantraico: edad y relaciones isotópicas iniciales, provincia del Neuquén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 43, 210–223.
- Vallejo, M.D., González Tomassini, F., Fantín, M., Reijenstein, H., Cuervo, S., Crousse, L., 2016. Transecta Regional de la Formación Vaca Muerta Integración de sísmica, registros de pozos, coronas y afloramientos. Cap 19: El Trapial. IAPG.
- Vallejo, M.D., Villarroel N., Cuadros G., Shrivastava C., Brown R. L., Lombardo, E. F., Hernandez C. A., Chandia M., Delgado P. 2020. Assessing a New LWD Technology of Borehole Imaging for Unconventional Reservoirs: A Case Study from Vaca Muerta, Argentina. URTeC: 1537.
- Valenzuela, M. E., Cómeron, R., Masarik, M. C., and Vallejo, M. D., 2011. Yacimientos Chihuido de la Sierra Negra–Lomita–Lomita Norte y El Trapial in H. A. Leanza, C. Arregui, O. Carbone, J. C. Danieli, J. M. Vallés, eds., *Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén: Relatorio del 18° Congreso Geológico Argentino*, Neuquén, Argentina, 2–6 May, p. 677–687.
- Vergani, G., Tankard, A., Belotti, H., y Welsink, H., 1995. Tectonic Evolution and Paleogeography of the Neuquén basin, Argentina, in A. Tankard, R. Suarez, and H. Welsink, eds., *Petroleum Basins of South America*: AAPG Memoir 62, p. 383–402.