

ANÁLISIS MULTIESCALAR DE FRACTURAS NATURALES EN AFLORAMIENTO Y SU UTILIZACIÓN COMO ANÁLOGO EN LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO 3D DE SUBSUELO, EL CASO DE CERRO GRANITO Y YACIMIENTO CAMPAMENTO 1, CUENCA NEUQUINA

Ramiro López¹, Micaela García², Leandro D'Elia², Andrés Bilmes³, Nayibe Otalora¹, Magdalena Tettamanti²,
Gabriela Buchanan¹, Damián Hryb¹, Hernán De Simone¹, Aldo Montagna¹, Rodolfo Corbera¹

1: YPF S.A. ramiro.lopez@ypf.com, notalora@ypf.com, gabriela.buchanan@ypf.com, damian.hryb@ypf.com,
hernan.desimone@ypf.com, aldo.montagna@ypf.com, rodolfo.l.corbera@ypf.com

2: Centro de Investigaciones Geológicas. CONICET-UNLP. mgarcia@cig.museo.unlp.edu.ar,
leandro.delia@gmail.com, mtettamanti@cig.museo.unlp.edu.ar

3: Instituto Patagónico de Geología y Paleontología. CONICET. andresbilmes@gmail.com

Palabras clave: Fracturas Naturales, Basamento, Análogo de Afloramiento, Análogo virtual, DFN

ABSTRACT

The Campamento 1 field is in the Neuquén Basin. The area has been producing hydrocarbons for several decades, which are hosted in the crystalline basement of the basin. The understanding of the play allows to interpret that storage is mainly in altered zones and natural fractures, while the later ones also generate the necessary permeability for its exploitation.

The present work shows the effort carried out with the purpose of generating an understanding of the fractured system for building a subsurface model in order to optimize the last stages of the field development, and at the same time, can be used for the development of nearby fields with similar characteristics.

In the case of this field, the outcrop known as Cerro Granito was interpreted as a valid analog, based on lithology, tectonic evolution, deformation, diagenesis and the distance between them.

In the field work, the rocks, their alterations and degrees of deformation were characterized, as well as the types of natural fractures, their orientations, fillings and dimensions. Systematic and statistically representative data of the main **sets** were collected through **scanlines**. At the same time, detailed images were acquired by using Drones that allowed the realization of virtual outcrop models.

Once in the office, the fractured systems were mapped on a 3D virtual outcrop and compared with the results obtained in the field.

The parameters thus obtained were compared with those obtained after subsurface cores and borehole images and included as constraints in the Discrete Fracture Model of the reservoir.

INTRODUCCIÓN

El Yacimiento Campamento 1, ubicado en la región morfoestructural de la Dorsal de Huincul (Fig. 1), a partir de 2012 incorporó al basamento permo-triásico granítico/granodiorítico fracturado de

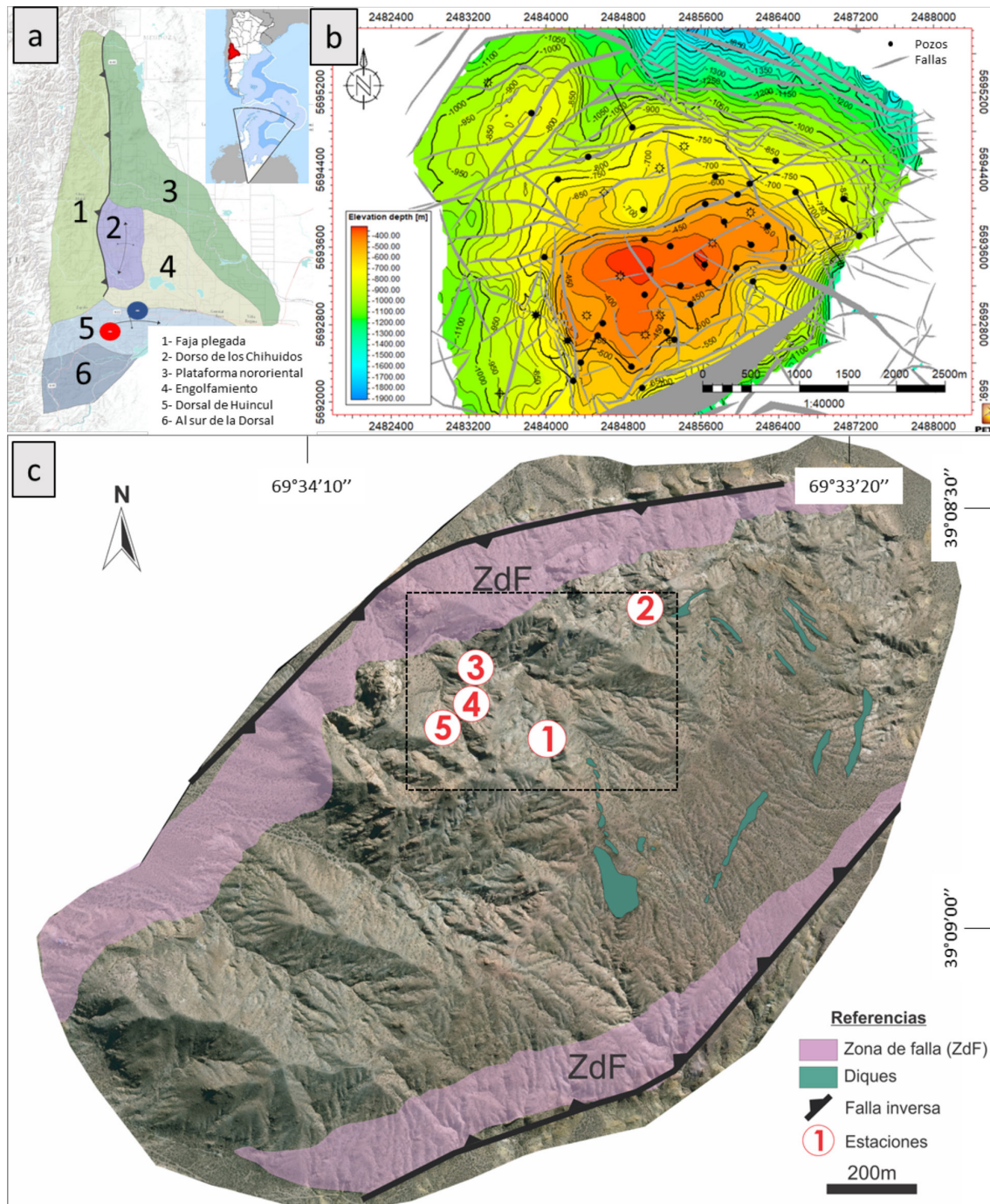


Figura 1. a: Ubicación de Campamento 1 (marca azul en mapa de referencia) y afloramiento Cerro Granito (marca roja en mapa de referencia); b: Mapa estructural al tope del Basamento; c: Mapeo general sobre imagen satelital. El rectángulo punteado indica la ubicación de la Fig. 5a.

la Cuenca Neuquina como objetivo principal de desarrollo, llevando en pocos meses la producción a niveles récords históricos. El reservorio presenta una compleja caracterización debido al carácter subsísmico de las fracturas y la escasa resolución lateral de la información de pozo, agravado por la baja recuperación de corona de los niveles punzados. La descripción mesoscópica de detalle de testigos corona realizada por García (2020), reconoció la presencia de 3 tipos distintos de tectonitas (unidades de roca con un estilo de deformación característico; ver Fig. 2): milonitas, cataclasitas y brechas, además de lo que se considera como roca primaria (sin deformación pervasiva). La presencia de estas tectonitas dio lugar al análisis conceptual del impacto de las mismas en el estudio de las imágenes de pozo. Por un lado, no todos los planos identificados como fracturas naturales en las imágenes de pozo lo serían, ya que algunas de ellas podrían corresponder a fajas miloníticas. Por otro lado, la presencia de brechas no puede identificarse fácilmente en las imágenes de pozo, por lo tanto, se estarían perdiendo potenciales elementos que colaboran al sistema poroso-permeable. El análisis petrográfico (LCV, 2007 & 2013) y de microscopio electrónico de barrido (Ukar, 2021) realizado sobre testigos corona evidenció la presencia de porosidad tanto en las fracturas naturales, producto de espacio poral dentro del cemento sin-cinemático, como en la roca de caja, originada en este último caso producto de la alteración de cristales.

Con la finalidad de generar un modelo de subsuelo representativo del sistema fracturado se desarrolló un análisis de las Fracturas Naturales que dio lugar a un modelo conceptual y al mismo tiempo arrojó los parámetros necesarios para la realización de un modelo 3D de Fracturas Naturales (Discrete Fracture Network o DFN). El objetivo de este modelo fue entender las posibilidades remanentes en el área, así como la estrategia para el desarrollo de campos similares que tiene la compañía.

El presente trabajo se centra en el análisis del afloramiento análogo y la aplicación de las conclusiones y parámetros obtenidos sobre éste en el modelado de subsuelo.

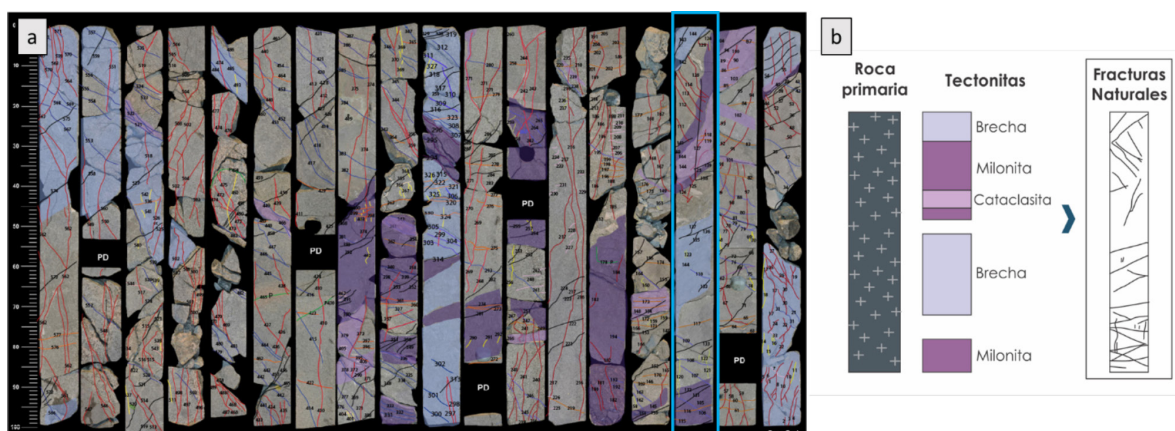


Figura 2. Descripción detallada de testigos corona, tomado de García (2020). a: Distribución de las tectonitas (en coloraciones violáceas) y de las fracturas discretas (diferenciadas con color negro y azul los sets de bajo ángulo y en rojo los de alto ángulo) identificadas en la corona. El recuadro celeste indica el tramo de corona representado en la Fig. b. b: ejemplo del análisis de la corona donde se identificó la roca primaria, las tectonitas y las fracturas discretas.

MARCO GEOLÓGICO

La Cuenca Neuquina presenta, en la región central (39°S), un rasgo estructural de primer orden denominado Dorsal de Huincul (Fig. 1) que se extiende por más de 200 km en dirección OSO-ENE y que está conformado por grábenes y hemigrábenes desarrollados durante el Triásico Superior-Jurásico Inferior con orientaciones OSO-ENE y E-O que fueron tanto invertidos como afectados por fallas inversas, principalmente durante el Jurásico Superior y Cretácico (Silvestro y Zubiri, 2008; Pángaro *et al.*, 2009; Mosquera *et al.* 2011). Dentro de este ámbito geológico se encuentra el bloque de explotación “Octógono fiscal” bajo concesión de YPF, en proximidad a las ciudades de Cutral Co-Plaza Huincul en el que se incorporó al basamento plutónico fracturado como objetivo principal de desarrollo, llevando en pocos meses la producción a récords históricos. La estructura del yacimiento consiste en un anticlinal por propagación de falla de orientación NE (Fig. 1b) que involucra al basamento permo-triásico (256 a 310 Ma) compuesto por granitos y granodioritas correspondientes a la Formación Huechulafquen (Turner, 1965, Fig. 3). Estas rocas corresponden a granitoides post-orogénicos (Schiuma y Llabrás, 2008) con diferentes grados de alteración asociados a un metamorfismo de bajo grado por soterramiento asistido por fluidos y una fuerte fracturación producto de distintos procesos tectónicos como fallamiento y plegamiento desarrollados desde estadios iniciales de la cuenca con reiteradas reactivaciones hasta la actualidad (Velo *et al.*, 2014). Esta configuración define un sistema poroso permeable que responde a procesos de alteración y fracturación, identificables también en otros yacimientos a todas las escalas de observación, tanto en afloramientos como en imágenes de pozo y coronas (Sisinni *et al.* 2011). La roca madre del sistema petrolero de esta región es la Formación Los Molles, en contacto directo con las rocas de basamento, pudiendo existir una segunda migración de hidrocarburos proveniente de la Formación Vaca Muerta (Velo *et al.* 2014). La roca sello está a su vez constituida por la Formación Los Molles.

Este reservorio naturalmente fracturado (*sensu* Nelson 2001) presenta una compleja caracterización debido al carácter subsísmico de las fracturas y la escasa resolución lateral de la información de pozo, agravado por la baja recuperación de corona de los niveles punzados. La utilización de análogos de afloramientos constituye una estrategia cada vez más utilizada en el estudio de modelado de yacimientos tendientes a disminuir la incertidumbre en la adquisición de datos de subsuelo. Estos análisis favorecen la obtención extendida de datos y la observación a escalas que no son alcanzadas por la resolución de los métodos sísmicos. De esta manera, se define a los afloramientos del Cerro Granito, localizados a 50 km del yacimiento y también sujeto a un pliegue por propagación de falla (que pone en contacto a las rocas del basamento con la roca madre), como un análogo de reservorio plausible de correlacionar, debido a las similitudes litológicas, estructurales, y a la cercanía entre ambos.

METODOLOGÍA

Este trabajo se desarrolló en dos partes: el análisis sobre el afloramiento análogo en el Cerro Granito y el modelado 3D de fracturas naturales en el Yacimiento Campamento 1.

El trabajo sobre el análogo se enfocó inicialmente en el mapeo general de la estructura y de las unidades presentes del Cerro Granito y en la revisión de afloramientos con potencial para la confección de *scanlines* (Fig. 4). Posteriormente se avanzó en un trabajo de detalle que consistió en la descripción y registro sistemático de las fracturas a lo largo de *Scanlines* y en la adquisición de datos para el desarrollo de modelos virtuales de afloramientos (Bilmes *et al.* 2022).

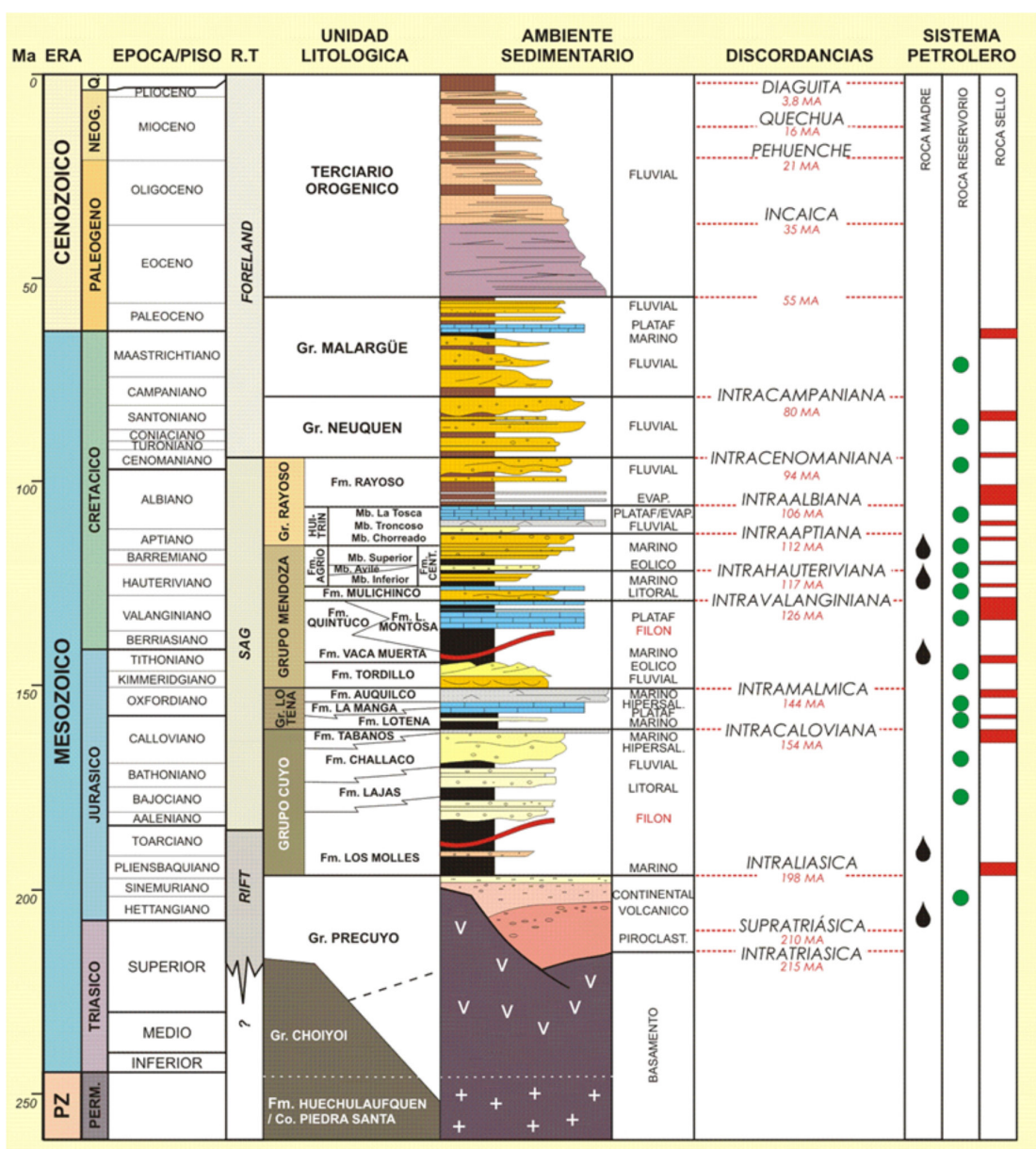


Figura 3. Columna estratigráfica modificada de Brisson (2015)

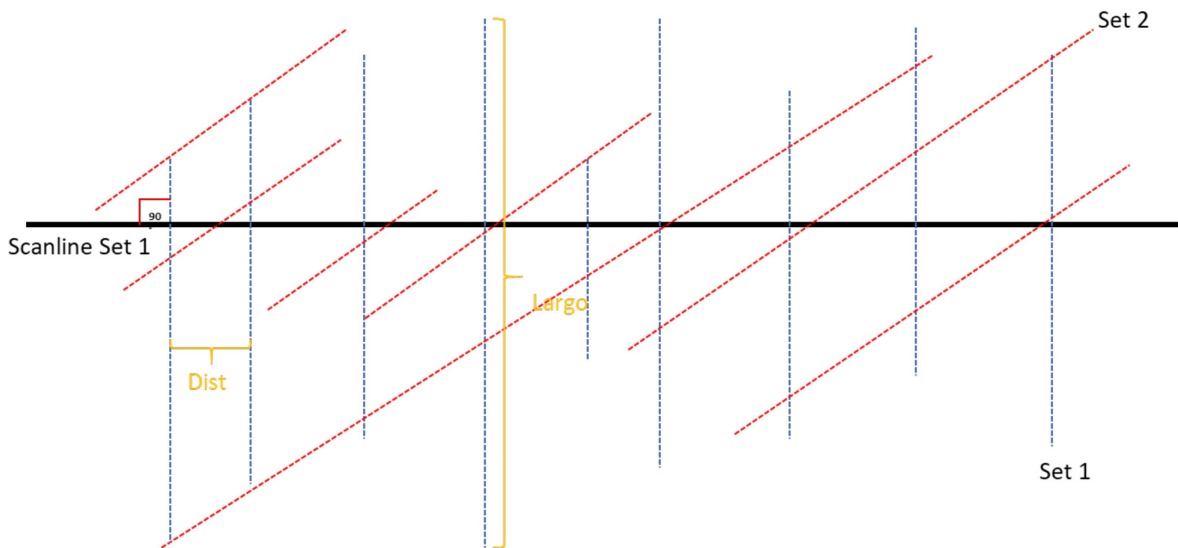


Figura 4. Esquema representativo de un scanline. En el mismo sólo se colectarán las fracturas correspondientes al *Set 1*.

Fue el trabajo de mapeo el que permitió seleccionar áreas con pavimentos rocosos donde podían discriminarse claramente los *sets* de fracturas, con el objetivo de realizar un relevamiento sistemático sobre las mismas.

Este trabajo consistió en la descripción y registro sistemático de un conjunto de características de las fracturas a lo largo de *scanlines* (línea perpendicular al rumbo principal del *set* de fracturas, Fig. 4). Para cada una de las fracturas atravesadas por el *scanline*, se describió, entre otras características, su distancia al origen del *scanline*, su apertura cinemática, su largo, sus terminaciones, el porcentaje de cementación y las evidencias de cizalla existentes. La distancia al origen permitirá calcular el espaciamiento entre fracturas contiguas y estimar

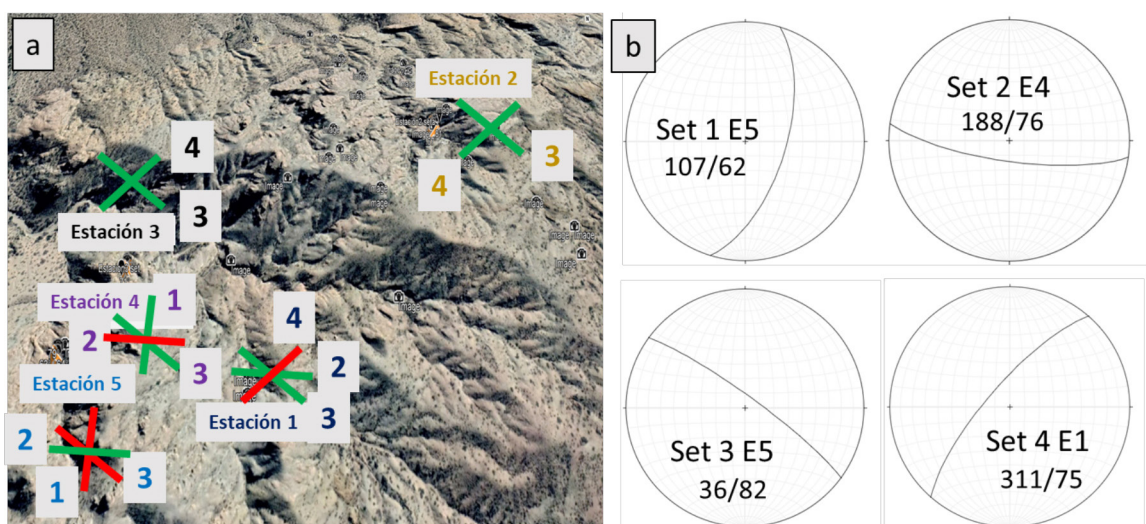


Figura 5. a: Detalle del área donde se relevaron las fracturas naturales (ver ubicación en Fig. 1c). Se indica la orientación y el nombre de los principales *sets* de fracturas observados en cada estación. En rojo los *sets* que fueron levantados mediante *scanlines* en el campo. B: Redes estereográficas (hemisferio inferior) con la orientación promedio (en Rbz) de los *sets* relevados mediante *scanlines*. E: Estación.

la intensidad y distribución espacial de las mismas. La apertura cinemática, o distancia perpendicular entre paredes contiguas de roca, brindará una idea de la dilatación del sistema, que, combinado con el porcentaje de cementación, permitirá estimar con un cierto grado de incertidumbre, la porosidad del sistema fracturado. El largo de las distintas fracturas se tomará como referencia de la geometría de las fracturas al momento de realizar el modelado de subsuelo, ya que es uno de los elementos que no puede determinarse con imágenes de pozo, testigos corona ni sísmica. La forma en que las fracturas terminan sea esta contra otra fractura, contra faja milonítica, o gradual dentro de la roca de caja, permitirá reconocer la existencia de relaciones de corte y por lo tanto la edad relativa de los *sets* de fracturas. Finalmente, las evidencias de cizalla permiten discriminar entre los distintos modos de fractura (Sorkhabi, 2014) siendo esto uno de los principales elementos, en conjunto con el estudio del cemento de fracturas, para determinar la génesis y guiar el modelado de las fracturas en subsuelo, de acuerdo con lo indicado por Phillips *et al.* (2014), López *et al.* (2017) y Hryb *et al.* (2018).

		Orientación Set1: 107/62			Largo total Scanline: 13,44 mts					
		N° fractura	Distancia al origen (m)	Espaciado	Apertura cinemática (mm)	Apertura sigmoide (mm)	Tipo cemento	% de relleno	Largo del segmento (m)	Largo fractura total (m)
SET 1	n	140	140	140	130	26	140	140	140	140
	promedio			0,095	0,186	2,715	Calcita	99,9%	0,354	8,579
	max			0,840	0,950	7,000		100,0%	2,300	12,670
	min			0,002	0,050	0,050		90,0%	0,030	0,400
		Orientación Set2: 188/76			Largo total Scanline: 3,14 mts					
		N° fractura	Distancia al origen (m)	Espaciado	Apertura cinemática (mm)	Apertura sigmoide (mm)	Tipo cemento	% de relleno	Largo del segmento (m)	Largo fractura total (m)
SET 2	n	127	127	127	121	27	127	127	127	127
	promedio			0,025	0,274	2,062	Calcita	100%	0,436	13,597
	max			0,12	2,65	10		100%	8	21,6
	min			0,002	0,05	0,215		100%	0,06	9,35
		Orientación Set3: 36/82			Largo total Scanline: 3 mts					
		N° fractura	Distancia al origen (m)	Espaciado	Apertura cinemática (mm)	Apertura sigmoide (mm)	Tipo cemento	% de relleno	Largo del segmento (m)	Largo fractura total (m)
SET 3	n	145	145	145	134	42	145	145	145	145
	promedio			0,021	0,6	4	Calcita	100%	0	11
	max			0,100	8	30		100%	3,920	19,200
	min			0,002	0,050	0,500		90%	0,050	6,400
		Orientación Set4: 311/75			Largo total Scanline: 10,296 mts					
		N° fractura	Distancia al origen (m)	Espaciado	Apertura cinemática (mm)	Apertura sigmoide (mm)	Tipo cemento	% de relleno	Largo del segmento (m)	Largo fractura total (m)
SET 4	n	124	124	124	124	123	46	124	124	124
	promedio			0,08	0,53	4,93	Calcita	95%	0,63	10,63
	max			0,48	7	100		100%	6,3	17,7
	min			0,002	0	0		10%	0,1	5,5

Figura 6. Tablas que resumen las principales características colectadas en los *scanlines*, organizadas por *set*. Se indica la cantidad de fracturas (n) y los promedios, máximos y mínimos cuando el parámetro lo permite. Para cada *set* se indica su orientación promedio y el largo total del *scanline*.

En el afloramiento se trabajó sobre 5 estaciones en las cuales se caracterizó al sistema de fracturas (Fig. 5a). Allí se reconocieron un total de 4 *sets* de fracturas principales: *Set* 1 (NNE), *Set* 2 (WNW), *Set* 3 (NW-SE) y *Set* 4 (NE-SW). Para el relevamiento sistemático de parámetros de fracturas sobre *scanlines* se trabajó sobre las estaciones 1, 4 y 5, ya que eran las que mejor grado de exposición presentaban. En ellas se levantó 1 *scanline* representativo para cada uno de los *sets*. Es importante aclarar que en este caso, en afloramiento, los *sets* de fracturas fueron discriminadas en base a su rumbo, ya que la inclinación de los planos la mayoría de las veces no pudo ser medido.

Los datos colectados en campo fueron tratados en forma estadística para el análisis de las características más arriba mencionadas utilizando metodologías estandarizadas (Barton and Zoback 1992, Gale *et al.* 2014 y Marret *et al.* 2018) o sus modificaciones. A modo de ejemplo, se presentan las estadísticas individuales y comparativas obtenidas para los *sets* relevados en campo (Fig. 6).

Vale aclarar que no en todas las fracturas relevadas en un *scanline* pudieron evaluarse todos los parámetros, así, por ejemplo, para el *set* 1, el *scanline* atravesó 140 fracturas, pero solo sobre 130 pudo medirse la apertura cinemática, y en 26 casos las fracturas presentaban sigmoides sobre los cuales pudo medirse la apertura.

Los afloramientos de los pavimentos sobre los que se realizaron los *scanlines* fueron relevados con el fin de construir Afloramientos Virtuales utilizando la técnica *Structure from Motion–Multi-View Stereo* (SfM-MVS; Furukawa y Ponce, 2007; Carrivick *et al.*, 2016). Para la construcción de los mismos se utilizó el procedimiento detallado en Bilmes *et al.* (2019) que combina el



Figura 7. Modelo virtual de pavimento registrado mediante drones. Las escalas verticales tienen 5 m.

relevamiento de imágenes con vehículos aéreos no tripulados (VANT o drones) y cámaras de mano con la adquisición de puntos de control/validación utilizando GPS diferencial y datos de rumbo/inclinación medidos en el afloramiento (Fig. 7).

Una vez construidos los afloramientos virtuales se combinaron los mismos con observaciones y datos de campo utilizando el *software* VRGS® obteniendo como producto final un Afloramiento Virtual Integrado, donde se realizó el mapeo de las fracturas naturales siguiendo una metodología similar a la llevada adelante en el campo. Una de las ventajas que tiene el trabajo sobre el afloramiento virtual integrado, es que puede realizarse el mapeo manual de todas las fracturas correspondientes a un *set*, luego trazar el *scanline* perpendicular al promedio de planos mapeados y eventualmente quitar del mismo los planos que no corresponden al *set*. Por otro lado, esta aproximación metodológica permite que si la superficie sobre la que se mapean las fracturas tiene diferencias en altura (i.e, mapeo de fracturas sobre un plano inclinado) puedan determinarse con bastante certidumbre la inclinación de los planos, y en consecuencia poder diferenciar *sets* con rumbo similar, pero con magnitud de inclinación distinta. De los *scanlines* realizados sobre los modelos virtuales se pudieron extraer los siguientes parámetros: rumbo, inclinación, espaciado y largo de fracturas.

Para la segunda parte de este trabajo se avanzó en el modelado de 3D de fracturas naturales en el Yacimiento Campamento 1. El modelado de fracturas naturales fue confeccionado en base al modelo conceptual desarrollado combinando las interpretaciones de información de subsuelo y de campo, en línea con lo sugerido por López *et al.* (2018). Así fue como una vez definido el modelo conceptual se pasó a la confección del modelado numérico de las fracturas naturales.

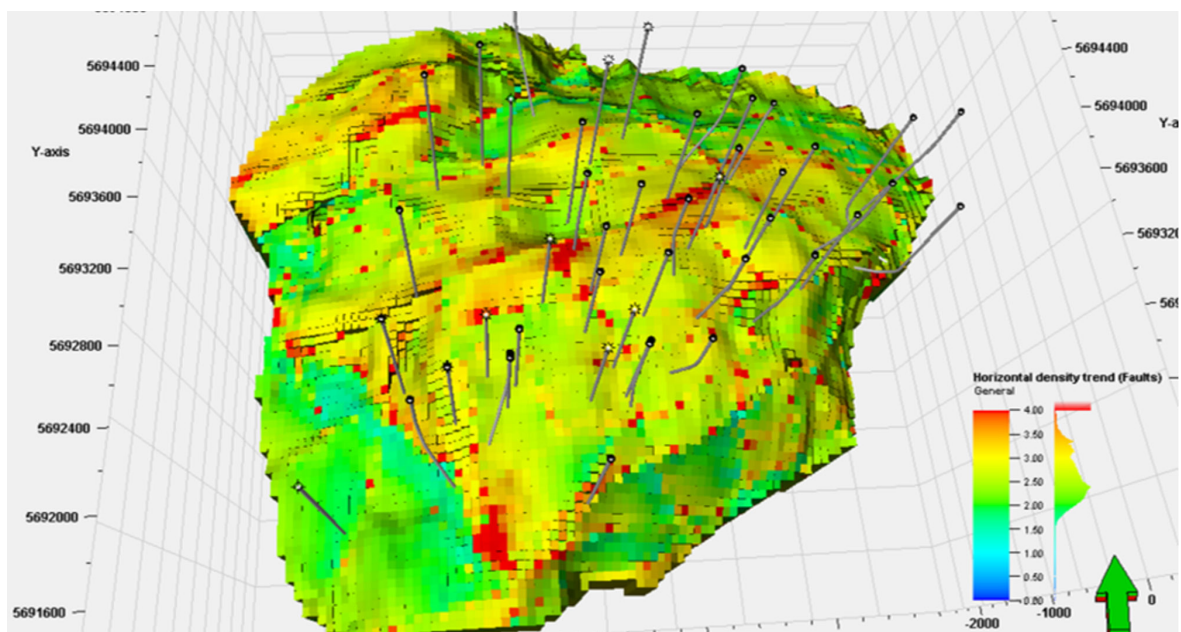


Figura 8. Ejemplo de escenario de tendencia de intensidad de fracturas naturales con cizalla generada a través del modelado mecánico. Los colores cálidos indican mayor intensidad de fracturas naturales.

Se optó por seguir la metodología de modelado desarrollada por Maerten *et al.* (2016), la cual considera el sistema de fallas y los eventos tectónicos ocurridos en el área a lo largo de la historia geológica para generar escenarios de deformación (Fig. 8), los cuales son calibrados con la información de fracturas naturales de subsuelo proveniente de la interpretación de las imágenes de pozo, cuando esta última está disponible. En este sentido, para la realización de este modelo se utilizó la interpretación sísmica que se detalla en Otalora *et al.* (2022) y las interpretaciones de las imágenes de pozo realizadas por Otalora (2021). Los eventos tectónicos considerados como potenciales generadores del sistema de fracturas y el campo de paleo-esfuerzos asociado a cada uno de éstos fueron los determinados por Manceda (2021) en base a la interpretación sísmica del área y a dataciones previamente realizadas (Stipanivic y Linares, 1969).

RESULTADOS

Durante el mapeo del afloramiento, se reconocieron al sureste y al noroeste áreas con roca brechada y capas de unidades suprayacentes que se interpretaron como zonas de fallas (ZdF) relacionadas al corrimiento principal y a su *back-thrust* asociado, respectivamente (Fig. 1c). Hacia el centro de la estructura también se detectaron fajas de cataclasitas y milonitas. Por fuera de éstas la roca de caja se presentaba sin deformación penetrativa, aunque con sistemas de fracturas naturales con zonas de mayor o menor intensidad de fracturación.

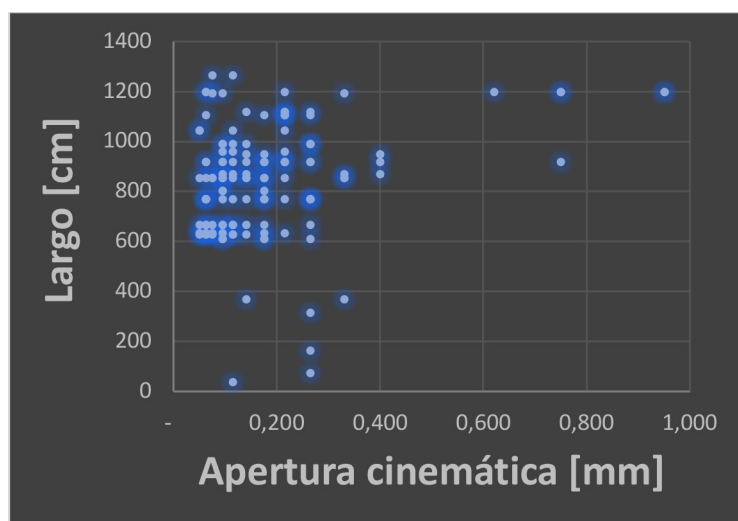


Figura 9. Relación apertura cinemática versus largo de fractura para el caso del *set* 1 en estación 5.

Mediante el análisis estadístico de los parámetros de fractura relevados en campo y en afloramiento virtual integrado se pudo llegar a un entendimiento que se pudo aplicar a posteriori al modelo de subsuelo. A continuación, se sintetizan las principales observaciones realizadas, utilizando en cada caso un ejemplo representativo de alguno de los *sets* evaluados.

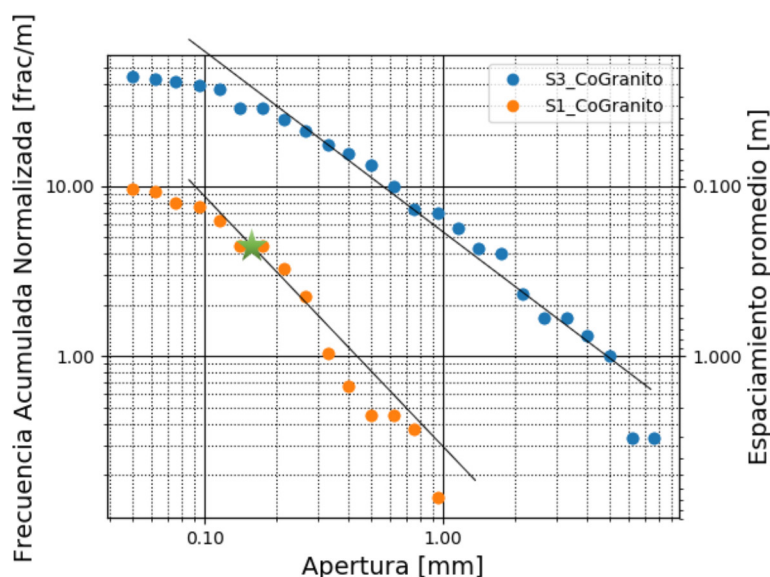


Figura 10. Gráfico de Frecuencia acumulada de Apertura cinemática para los sets 1 y 3. La estrella verde es el Emergent threshold (ver explicación en el texto)

En líneas generales, las fracturas observadas en el campo presentaban evidencias de cizalla como sigmoides (Fig. 6), estrías o terminaciones en cola de caballo, por lo cual podrían asignarse a los modos II/III (Sorkhabi, 2014).

En cuanto a la relación largo versus apertura cinemática de fracturas, puede observarse en la Fig. 9 que existe una importante dispersión. Este comportamiento es típico de las fracturas con cizalla (modo II) o multiepisódicas, como las reconocidas en el campo. De todos modos, puede reconocerse que las fracturas con mayores aperturas son también las que presentan mayor longitud.

En relación con la distribución de las aperturas, se utilizaron los gráficos de frecuencia acumulada (*log-log*). Como puede verse en la Fig. 10, el gráfico muestra un buen desarrollo del sector central de la distribución siguiendo una línea recta, motivo por el cual se puede considerar que las aperturas siguen una distribución *Power law*.

Un punto muy importante que pudo reconocerse gracias al trabajo de campo consistió en la determinación de un valor de *Emergent threshold* (Laubach 2003), o tamaño de apertura a partir del cual las fracturas comienzan a tener porosidad, de 0.175 mm para el set 1.

Este parámetro es de aplicación directa ya que permite identificar la población de fracturas con mayor potencial a impactar en el almacenaje y flujo de hidrocarburos.

El análisis de las terminaciones arrojó que el 75% de las fracturas terminaban contra fajas miloníticas o fajas miloníticas brechadas (porciones en colores verdes en Fig. 11), permitiendo concluir que las fracturas naturales son posteriores a las milonitas observadas en campo las cuales funcionan como barrera mecánica para el crecimiento de éstas. Las relaciones de corte entre los distintos sets no arrojaron conclusión definitiva, lo cual puede deberse a que la muestra

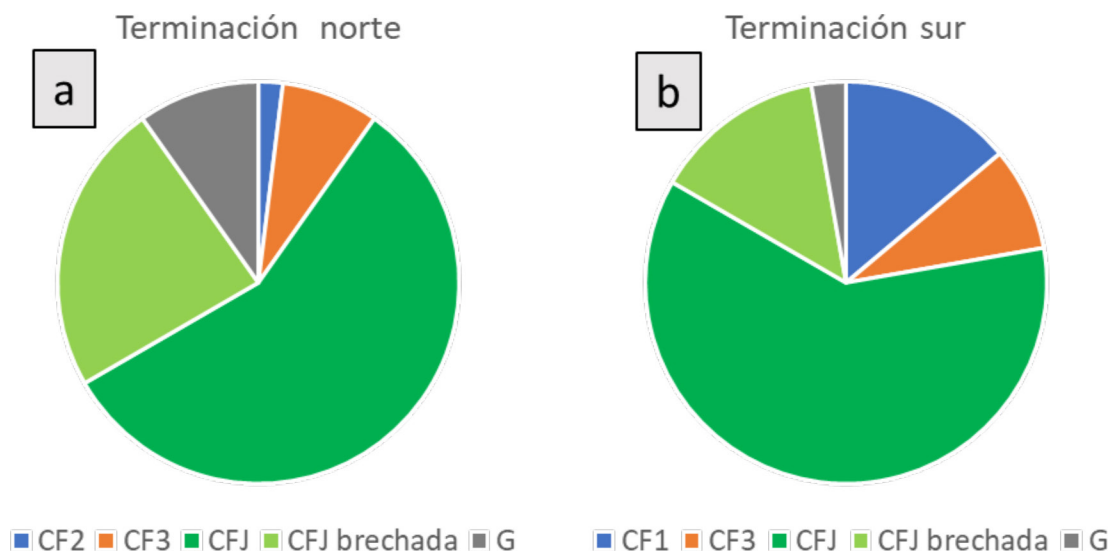


Figura 11. Gráfico de torta de las terminaciones de las fracturas para el set 1 en la estación 5. a: terminaciones de las fracturas hacia el norte, b: terminaciones de las fracturas hacia el sur. CF1: terminación contra set 1; CF2: terminación contra set 2; CF3: terminación contra set 3; CFJ: terminación contra Faja milonítica; CFJ brechada: terminación contra Faja milonítica brechada; G: terminación gradual dentro de la roca de caja.

no fue suficientemente representativa para este parámetro, o que las fracturas son relativamente contemporáneas y por eso se cortan unas contra otras.

Mediante el registro de la distancia al origen, pudo calcularse la intensidad de las fracturas (fract/m) a lo largo del scanline. Considerando la cantidad de fracturas del scanline y el largo de este se obtiene una intensidad de 10,4 fract/m para el set 1, 40,4 fract/m para set 2, 48,3 fract/m para el set 3 y 12 fract/m para el set 4. Esto puede graficarse como se ejemplifica para los sets 1 y 3 en la Fig. 12.

En la Fig. 12 puede visualizarse que la presencia de fracturas a lo largo del scanline muestra una alternancia de zonas con mayor y menor intensidad de fracturas (línea azul).

Con la intención de evaluar si esta observación era indicación de una distribución de fracturas organizada en corredores (*clusters*) o era consecuencia de una distribución al azar de las fracturas, se utilizaron los gráficos *Normalized Correlation Count* (Marret *et al.* 2018; Fig. 13).

En líneas generales, estos gráficos analizan la distancia entre fracturas contiguas, medida sobre el scanline. La curva azul en Fig. 13 representa los datos de entrada y se construye contando la cantidad de pares de fracturas contiguas (eje Y) para un ancho de ventana determinada (eje x).

En este gráfico también se representan una distribución aleatoria para el mismo conjunto de fracturas (curva verde en Fig. 13), modelada a partir de 100 realizaciones de corrida Monte Carlo, y sus márgenes de error del 95% (curvas negras continuas en Fig. 13).

En última instancia, el carácter aleatorio o clusterizado de la distribución de fracturas naturales en el espacio va a estar indicada por cómo la curva azul (dato de entrada) interactúe con las curvas negras. Es así que, si la curva azul se ubica dentro del rango determinado por las

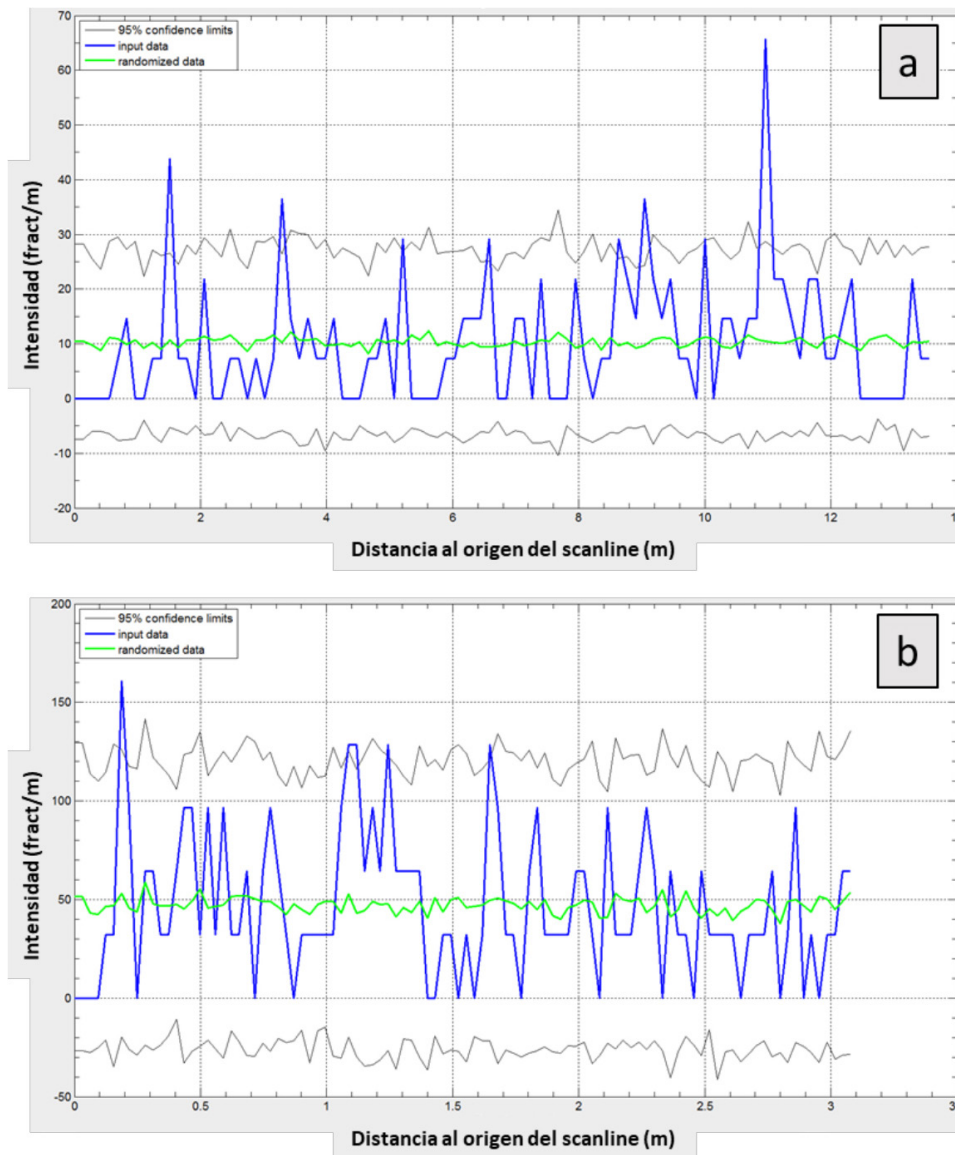


Figura 12. Intensidad de fracturas por Scanline. En el eje de las x, la distancia al origen del Scanline en m, en el eje y, la intensidad de fracturas en fract/m. a: set 1; b: set 3.

curvas negras, la distribución de las fracturas puede interpretarse como aleatoria, mientras que, si la curva azul se ubica por fuera del rango de estas curvas, la población puede interpretarse como clusterizada.

En este trabajo se muestran los ejemplos de los *sets* 1 y 3 (Fig. 13). Dado que la cantidad de datos colectados en el campo para cada *set* ronda el límite necesario para la visualización de su comportamiento, se ha trazado una línea negra punteada para facilitar la lectura e interpretación del gráfico, la cual resume la tendencia de la población.

La interpretación de la curva azul para la Fig. 13 puede subdividirse en 3 partes: un primer tramo caracterizado por picos y valles apretados, donde los picos sobrepasan la curva negra

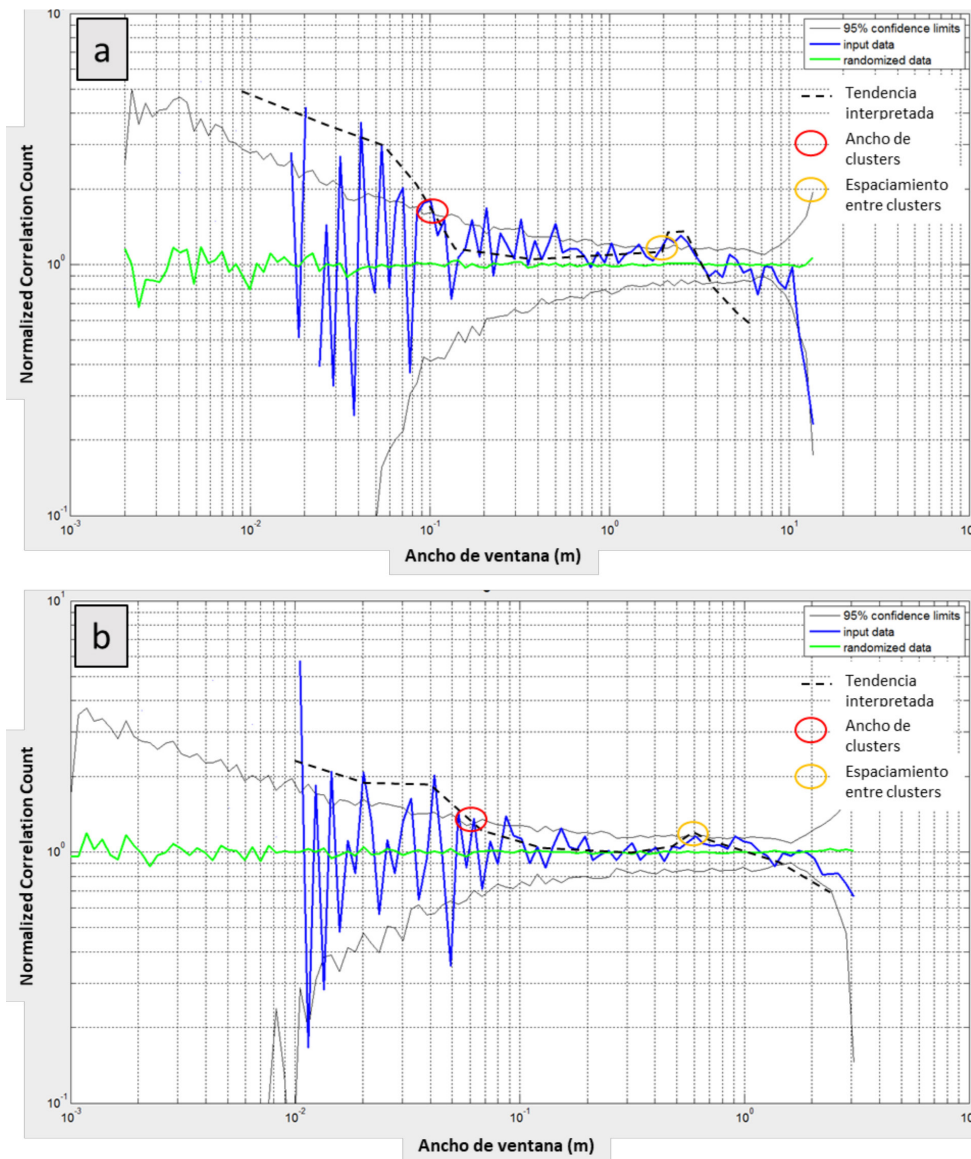


Figura 13. Gráficos Normalized Correlation Count (NCC) para análisis de clusterización de *sets*. a: *set* 1, b: *set* 3. Ver discusión en el texto

continua, lo cual indicaría un cierto grado de clusterización. Luego, segundo tramo donde la curva azul se encuentra dentro del rango determinado por las 2 curvas negras, indicando un intervalo espacial para el cual no hay clusters de fracturas. El límite entre esos 2 tramos es el punto donde la curva azul y la negra continua superior se cruzan (elipse roja), motivo por el cual se considera a ese punto como el ancho del *cluster*. Finalmente hay un tercer tramo que comienza cuando la curva azul vuelve a cortar la curva negra continua superior, punto que se interpreta como indicador del espaciamiento entre clusters.

De esta forma puede interpretarse que para el *set* 1, los clústeres tendrían un tamaño aproximado de 10 cm de ancho (elipse roja), con una repetición cada 2 m (elipse naranja),

mientras que para caso del *set* 3, aunque con señal de clusterización un poco más débil, los mismos tendrían unos 6 cm de ancho, repetidos cada 60 cm aproximadamente. Resulta interesante ahora volver a los gráficos de intensidad (Fig. 12) donde puede corroborarse la señal que indica la presencia, dimensiones y espaciamiento de estos *clústeres*.

El reconocimiento de la clusterización dentro del sistema de fracturas tiene implicancias directas en el entendimiento de la productividad y modelado del reservorio. Desde el punto de vista productivo, podría explicar la variación en productividad entre pozos verticales, ya que los mismos pueden estar contactando o no estos clústeres de acuerdo con la posición donde se encuentren. Desde el punto de vista del modelado, surge la posibilidad de la utilización de los clusters de fracturas como elementos donde ocurre el mayor flujo de fluidos dentro del reservorio, y podría considerarse al espacio entre clústeres como una matriz fracturada que aporta principalmente al almacenaje del hidrocarburo.

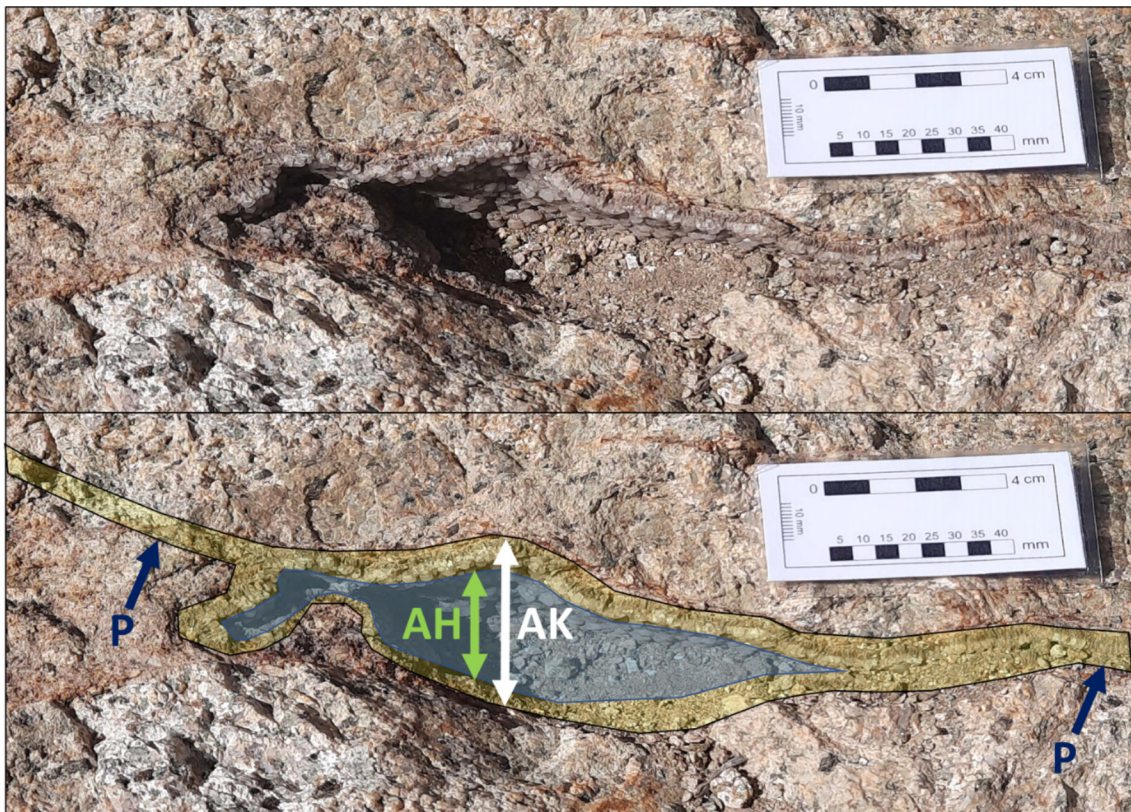


Figura 14. Foto de fractura grande con porosidad. AK: Apertura cinemática; AH: Apertura hidráulica; P: Puentes; en amarillo: superficie de fractura; en azul: porosidad. Porcentaje de cementación: 50%. Fractura perteneciente al *set* 4.

En relación con el potencial del sistema de fracturas naturales como almacenaje o conducto para el movimiento de hidrocarburos, y considerando la presencia de cemento como principal responsable de la apertura de las fracturas naturales en subsuelo (Laubach *et al.* 2004), se utilizó la combinación de los parámetros apertura cinemática y porcentaje de cementación para su

análisis (Fig. 14). En términos generales, las fracturas presentaban un rango de cementación entre el 40% y 100% estando algunos de los *sets* completamente cementados. El caso observado con mayor potencial fue el *set* 4 (RBZ 311/75), el cual posee en promedio un 5% de porosidad dentro de las fracturas.

Por otro lado, en el mapeo de fracturas naturales realizado sobre el afloramiento virtual se trazaron *Scanlines* con un doble propósito. Como primer punto, se realizó un análisis comparativo de los resultados obtenidos con los *scanlines* levantados en el campo, y una vez validada la representatividad del trabajo, sobre el análogo virtual se realizó una mayor cantidad de *scanlines*, con el fin de aumentar el peso estadístico a las observaciones realizadas (Fig. 15).

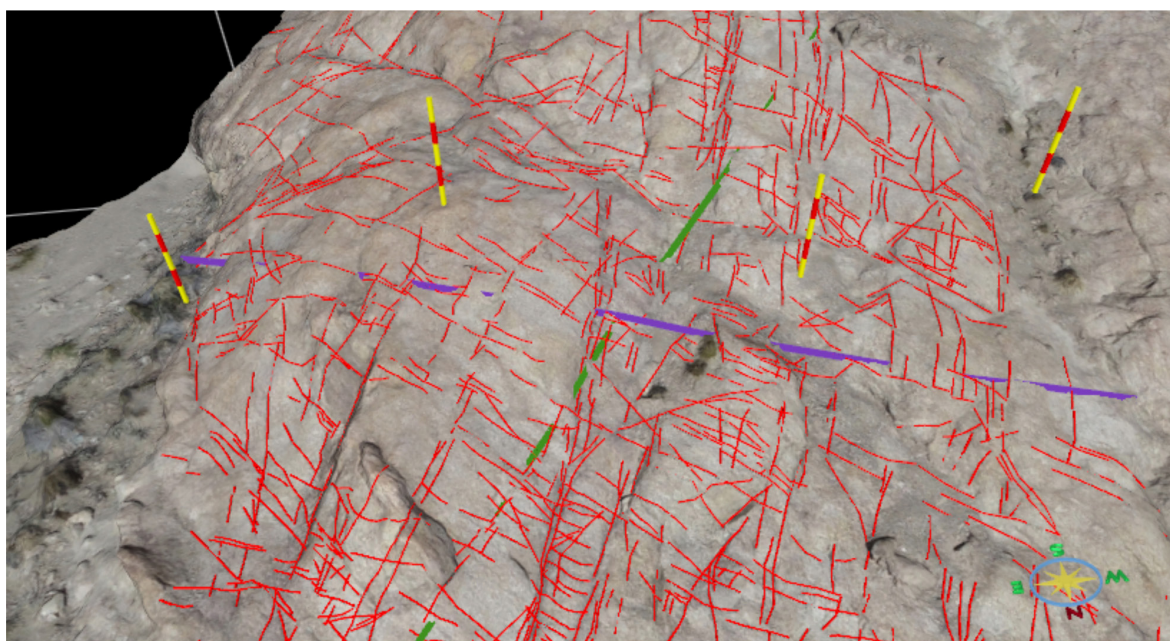


Figura 15. Fracturas mapeadas en afloramiento virtual. En verde y lila la traza de las *Scanlines*. Las escalas verticales tienen una altura de 5 metros.

De los *scanlines* obtenidos mediante el modelo virtual pudieron extraerse los datos de orientación, largos y distancia entre fracturas.

Utilizando estos datos se realizó una comparación cuantitativa entre las fracturas naturales observadas en campo y en afloramiento virtual para una misma traza de *scanline*, y se llegó a que el número de fracturas se reduce en un 60% en el modelo virtual. Esto se interpreta como producto del límite de resolución presente en el afloramiento virtual. Con el debido control de campo esto no debería considerarse relevante, ya que al ser un factor constante podría utilizarse un multiplicador al momento de calcular la intensidad real de determinada población.

Sobre los *scanlines* virtuales también se realizaron gráficos de intensidad de fracturas, los cuales se compararon con los realizados sobre los *scanlines* de campo (Fig. 16). Para que este

análisis fuera más sencillo se utilizaron las curvas de intensidad normalizada, por eso en ambos casos la curva de color verde está aproximadamente en 1. En la mencionada figura puede verse una correspondencia en la presencia de clústeres, lo que permite entender que los *scanlines* realizados mediante el afloramiento virtual, aunque tienen menos cantidad de fracturas, son igualmente representativos de la distribución espacial del sistema fracturado.

A partir del trabajo en campo, el análisis del afloramiento virtual, e integrando la información de subsuelo, se procedió a la realización del modelo DFN de fracturas naturales.

Existen distintos parámetros que son utilizados en la construcción del DFN, los principales son la intensidad, la distribución espacial, el largo, la orientación y la apertura (hidráulica).

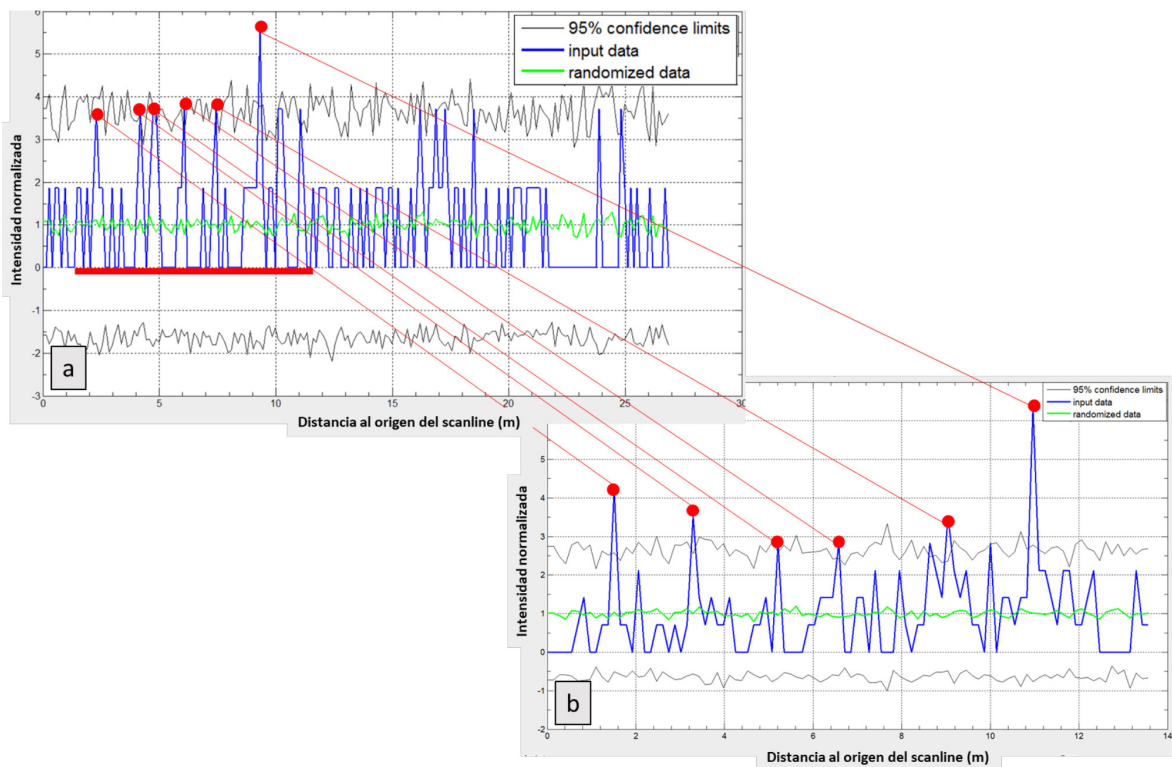


Figura 16. Comparativa de curva de intensidad entre *scanlines* en modelo virtual (a) y *scanline* de campo (b) para el caso del *set* 1 en estación 5.

La intensidad de fracturas naturales que se necesita para este fin es una intensidad volumétrica y por lo tanto debe ser representativa de todos los *sets* existentes. Los valores que se obtienen mediante las coronas o las imágenes de pozos son intensidades lineales (medidas a lo largo de una línea) por lo tanto son de representatividad relativa. Los *scanlines* medidos en campo o afloramiento virtual, si bien también son lineales, al poder realizarse de forma perpendicular a cada uno de los *sets* revisten una mayor representatividad. Más aún si consideramos que mediante los afloramientos virtuales puede hacerse una mayor cantidad de *scanlines* para así aumentar

la representatividad de las mediciones. Las intensidades así obtenidas fueron posteriormente utilizadas, en conjunto con las obtenidas en imágenes de pozo y coronas para calibrar las arrojadas mediante la simulación mediante modelado mecánico.

La distribución espacial es un elemento no puede ingresarse directamente en los modelos 3D de fracturas naturales, pero en el caso que fuera necesario incluir este parámetro dentro del modelado por detectarse un impacto en el desarrollo de un campo, puede realizarse un poblado considerando la clusterización detectada.

El largo de las fracturas naturales es un elemento que únicamente puede medirse en el campo o en el afloramiento virtual ya que no existen herramientas que puedan cuantificar este parámetro en el subsuelo.

La orientación es un parámetro que puede medirse tanto en subsuelo como en superficie, En subsuelo tiene la limitante de la representatividad que arrojan los pozos, mientras que en superficie, si bien pueden tomarse muchos datos, la extrapolación de las orientaciones puede no ser válida ya que la presencia de estructuras mayores que modifiquen los campos de esfuerzos locales pueden dar a variación en la orientación de los sistemas de fracturas que se generan, Así es que en el caso en cuestión, como se contaba con más de 30 pozos, éstos fueron quienes se utilizaron para calibrar el modelado mecánico realizado.

Finalmente, la apertura solo puede medirse mediante la visualización directa de la roca y por lo tanto solo puede hacerse a través de testigos corona o sobre afloramientos.

La Figura 17 es una tabla resumen donde pueden verse los distintos parámetros utilizados en el modelado y las fuentes de información donde estos pueden medirse, calcularse, estimarse o usarse para calibración, según el caso. Queda también expresado en esta tabla la importancia de contar con un análogo de campo válido ya que parámetros como intensidad, distribución espacial y largo son determinados casi exclusivamente a través de estos. La utilización de un

Parámetro de fractura	Imagen de pozo	Testigos Corona	Campo	Afloramiento virtual	Modelo mecánico
Intensidad lineal (sesgada)	Cálculo	Cálculo			
Intensidad lineal (sin sesgo)			Cálculo	Cálculo	
Intensidad volumétrica	Estimación	Estimación	Calibración	Calibración	Estimación
Distribución espacial			Cálculo	Cálculo	
Largo			Medición	Medición	
Orientación	Calibración				Estimación
Apertura		Estimación	Estimación		

Figura 17. Resumen de los principales parámetros utilizados en el modelado DFN.

análogo virtual permite validar las observaciones de campo y aumentar su peso estadístico dándole mayor robustez.

CONCLUSIONES

El trabajo sobre el análogo de campo metió reconocer fajas de alta deformación, milonitas, cataclasitas y brechas, que delimitaban zonas caracterizado por la presencia de fracturas naturales, bajo un esquema similar al que había sido descripto previamente sobre los testigos corona.

Dado que el objetivo del trabajo sobre el afloramiento y el modelo virtual era la caracterización del sistema fracturado, se realizaron *scanlines* en las zonas donde se podía ver al macizo rocoso con claridad. Allí se detectaron 4 *sets* principales en función de su orientación: *Set 1* (NNE), *Set 2* (WNW), *Set 3* (NW-SE) y *Set 4* (NE-SW). Para cada uno de ellos se realizó un *scanline* perpendicular a su orientación sobre el cual se colectó un mínimo de 100 fracturas naturales con cemento. Esta cantidad mínima de fracturas con cemento es lo que determina el largo de los *scanlines*.

En cada *scanline* se describieron los principales parámetros necesarios para la caracterización de fracturas naturales que luego fueron procesados estadísticamente.

También en campo se adquirieron imágenes mediante drones que dieron lugar a un modelo virtual sobre el cual se trabajó con metodología de mapeo y análisis estadístico similar a la realizada en afloramiento.

Así pudo visualizarse una gran dispersión en la relación largo versus apertura la cual se interpreta como consecuencia de la presencia de sigmoides con grandes aperturas como consecuencia de un movimiento de rumbo paralelo a las fracturas,

La distribución de los valores de aperturas se analizó mediante los gráficos de frecuencia acumulada, los cuales permitieron interpretar una distribución *Power law*. En base a la apertura de las fracturas que presentaban porosidad, pudo determinarse un Emergent threshold de 0.175 mm para el *set 1*.

El análisis de las terminaciones de las fracturas permitió definir que éstas son posteriores a las milonitas, cataclasitas y brechas, pero no ha sido determinante para la relación temporal entre sistemas de fracturas.

Las intensidades de fracturas en los *scanlines* fueron de 10,4 fract/m para el *set 1*, 40,4 fract/m para *set 2*, 48,3 fract/m para el *set 3* y 12 fract/m para el *set 4*, muy superior a los promedios entre 10 y 15 fract/m detectados mediante el análisis de imágenes de pozo. Este contraste es aún mayor cuando se comprende que los promedios indicados para las imágenes de pozo se obtuvieron considerando al sistema fracturado en su conjunto.

Se realizó un análisis de clusterización de los *sets* y se detectaron clústeres del orden de los centímetros, que se repiten cada 50 cm a 1 m.

También se llevó adelante una estimación de la porosidad visual en las fracturas, a través del porcentaje de cementación que se observaba en las fracturas. El valor mayor lo obtuvo el *set* 4 con un 5% de porosidad.

Sobre el modelo virtual se mapearon fracturas y se comparó su distribución espacial con relación al mismo *scanline* colectado en campo. Si bien se detectó un 60% menos de fracturas, los patrones de clusterización quedaron bien representados mediante esta técnica.

Tanto las intensidades, los largos, las aperturas como el porcentaje de cementación fueron utilizados como inputs en el modelo DFN del subsuelo.

Finalmente se puede concluir que la adquisición de información mediante la utilización de un análogo de campo y su modelo virtual permite robustecer fuertemente el modelado en subsuelo de un reservorio fracturado cuando se trabajan de forma integrada.

Este trabajo también permite visualizar la necesidad de calibración del análogo virtual a través del trabajo de campo, fundamentalmente para evitar incluir en el análisis fracturas que hayan sido generadas durante las etapas de exhumación de la Formación que hoy se encuentra aflorante. De esta forma se puede garantizar que las fracturas vistas en afloramiento son factibles de hallarse en subsuelo.

Existen elementos, como el grado de clusterización, que pueden caracterizarse ya sea mediante información de subsuelo o considerando un afloramiento análogo, que, si bien no pueden incluirse directamente en los programas de modelado estático comerciales, pueden ayudar a comprender una distribución heterogénea de la producción en pozos cercanos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos a YPF S.A. por permitir publicación, a David Dodgers de VRGS® por la licencia demo y el soporte durante la realización del trabajo y a Daniel Yagupsky y Clara Correa Luna por los comentarios y sugerencias que enriquecieron el trabajo.

REFERENCIAS CITADAS

- | | |
|--|--|
| <p>Barton, C. A., & Zoback, M. D. 1992. Self-similar distribution and properties of macroscopic fractures at depth in crystalline rock in the Cajon Pass Scientific Drill Hole. <i>Journal of Geophysical Research: Solid Earth</i>, 97:4, 5181-5200.</p> <p>Bilmes, A., Elia, L. D., Lopez, L., Richiano, S., Varela, A., Alvarez, P. 2019. Digital outcrop modelling using “structure-from-motion” photogrammetry:</p> | <p>Acquisition strategies, validation and interpretations to different sedimentary environments. <i>Journal of South American Earth Sciences</i>, 96(July), 102325. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102325</p> <p>Bilmes, A., D’Elia, L, Lopez, R., Montagna, A., Varela, A., Hodgetts, D. 2022. Análogos de reservorio y viajes de campo mediante afloramientos virtuales.</p> |
|--|--|

- les integrados: desafíos y perspectivas futuras. CONEXPLO22
- Brisson I., 2015. Sistemas petroleros de la Cuenca Neuquina. En Ponce J., Montagna A., Carmona N. (Eds): Geología de la Cuenca Neuquina y sus sistemas petroleros. Una mirada integradora desde los afloramientos al subsuelo. Fundación YPF - Universidad Nacional de Río Negro, pp. 22-35. Buenos Aires, Argentina.
- Carrivick, J.L., Smith, M.W., Quincey, D.J., 2016. Structure from Motion in the Geosciences. John Wiley & Sons, pp. 197.
- Furukawa, Y., Ponce, J., 2007. Accurate, dense, and robust multi-view stereopsis. In: IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, <https://doi.org/10.1109/CVPR.2007.383246>.
- García, 2020 Descripción mesoscópica de Testigos Corona. Presentación interna. Inédito.
- Gale, J. F. W., S. E. Laubach, J. E. Olson, P. Eichhubl, and A. Fall, 2014, Natural fractures in shale: A review and new observations: AAPG Bulletin, v. 98, no. 11, p. 2165–2216.
- Hryb, D.E., Lopez, R.G. & Mancada, R. 2018. Tectonic History Validation in a Multi-Phase Deformation Basin Using Natural Fracture System, Vaca Muerta Fm., Argentina. DFNE 18–855.
- Laubach, S. E. 2003. Practical approaches to identifying sealed and open fractures. Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists, 87, 561-579.
- Laubach, Stephen E., Olson, Jon E., Gale, Julia F.W., 2004. Are open fractures necessarily aligned with maximum horizontal stress? Earth and Planetary Science Letters 222 (2004) 191 – 195.doi:10.1016/j.epsl.2004.02.019
- LCV, 2013. Estudio litológico y petrográfico de la corona Cto1-489. YPF. Informe inédito.
- LCV, 2007. Estudio litológico y petrográfico de la corona Cto1.a-483. YPF. Informe inédito.
- Lopez R., Ruiz R., Spacapan J., Hryb D., Mancada R., Santiago E., Montagna A., 2018. POR QUÉ Y CÓMO HACER UN MODELO CONCEPTUAL DE FRACTURAS NATURALES, EL EJEMPLO DE LA FM CUPÉN MAHUIDA. 10° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mendoza, Argentina.
- Maerten, L., F. Maerten, F. Lejri, and P. Gillespie, 2016, Geomechanical paleostress inversion using fracture data: Journal of Structural Geology, v. 89, p. 197–213
- Mancada, 2021. Análisis del timing de la estructuración del Yacimiento Campamento 1. YPF. Informe inédito.
- Marrett, R., Gale, J. F., Gómez, L. A., & Laubach, S. E. 2018. Correlation analysis of fracture arrangement in space. Journal of Structural Geology, 108, 16-33.
- Mosquera, A., Silvestro, J., Ramos, V. A., Alarcón, M., y Zubiri, M. 2011. La estructura de la Dorsal de Huincul. In Geología y recursos naturales de la provincia de Neuquén. Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino, Buenos Aires (pp. 385-397).
- Nelson, Ronald A, 2001. Geologic analysis of naturally fractured reservoirs, 2nd edn. Gulf Professional Publishing, Elsevier, Oxford, UK.
- Otalora, 2021. Reinterpretación de imágenes de pozo del Yac. Campamento 1. YPF. Informe inédito.
- Otalora N., Buchanan, G., Lopez, R., De Simone, H., García, M., y Corbera, R., 2022. Caracterización estática de un Reservorio Fracturado: Ejemplo de Basamento en el Yacimiento Campamento 1. 11° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mendoza, Argentina.

- Pángaro, F., Pereira, D. M., y Micucci, E. 2009. El sin-rift de la Dorsal de Huincul, Cuenca Neuquina: evolución y control sobre la estratigrafía y estructura del área. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 65(2), 265-277.
- Phillips, H., Joonnekindt, J. P. y Maerten, L., 2014. Natural Fracture Prediction for Discrete Fracture Modelling. 76th Conference & Exhibition 2014. Amsterdam
- Silvestro, J y M. Zubiri, 2008. Convergencia oblicua: modelo estructural alternativo para la dorsal Neuquina (39°s) – Neuquén, *Rev. Asoc. Geol. Argent.* v.63 n.1, Buenos Aires.
- Schiuma, M., y Llambias, E. J. 2008. New ages and chemical analysis on Lower Jurassic volcanism close to the dorsal de Huincul, Neuquen. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 63 (4), 644-652.
- Sissini, V., López, S., y Lavia, M. 2011. Yacimientos de gas no convencionales en el Ciclo Precuyano y en el basamento en el área de la Dorsal de Huincul en la Cuenca Neuquina. In VIII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, 693-710.
- Sorkhabi, Rasoul (2014) Fracture, Fracture Everywhere, Part II, *GeoExpro*, v. 11, no. 4 (September 2014), pp. 42-46.
- Stipanivic, P.N. y Linares, E. 1969. Edades radimétricas determinadas para la República Argentina y su significado geológico. *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias* 47: 51- 96, Córdoba.
- Turner, J. C. M. 1965. Estratigrafía de la comarca de Junín de los Andes. *Academia Nacional de Ciencias, Boletín*, 44, 5-51.
- Ukar, 2021 Análisis petrográfico de muestras de roca y fracturas en testigos corona del proyecto Campamento 1. YPF. Informe inédito.
- Velo, D.; Manceda, M.; Pioli, O.; Mallaviabarrena, F.; Creus, F., Ugarte, R.; Narrillos, D.; y Ciancio, L., 2014. “Caracterización del reservorio en el Basamento cristalino de la Cuenca Neuquina”, 9° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mendoza.