

ANÁLISIS MICROTTECTÓNICO COMPARATIVO ENTRE LAS FACIES PRODUCTIVAS DE LA FORMACIÓN QUINTUCO Y LAS SEDIMENTITAS AFLORANTES DE LA FORMACIÓN PICÚN LEUFÚ CON ÉNFASIS EN LOS RESERVORIOS DEL DISTRITO LOMA LA LATA

Magdalena Tettamanti¹, Micaela García¹, Leandro D'Elia¹ y Ramiro López²

1: Centro de Investigaciones Geológicas (CONICET-UNLP)

mtettamanti@cig.unlp.edu.ar, mgarcia@cig.unlp.edu.ar, ldelia@cig.unlp.edu.ar

2: YPF, Macacha Güemes, 515, CABA. ramiro.lopez@ypf.com

Palabras clave: Fracturas naturales, Reservorios naturalmente fracturados, Análogos de afloramiento

ABSTRACT

Outcrop analogs play a central role on the understanding of subsurface reservoir architectures. The comparison between subsurface and outcrops data, allows to determine conceptual schemes and modelling reservoir parameters, in order to decrease the risk during the oil fields exploration and development stages. Considering that, we analysed the fracture systems of the Quintuco Formation in cores of Loma La Lata oil field, as well as in the target facies that crop out in a key place of the Agrio Fold and Thrust Belt (Sierra de la Vaca Muerta; SVM) and in the Huincul Arch (Picún Leufú Anticline; APL). The fracture systems were analysed by means of traditional methods, combined with scanlines and areal stations approaching. This study determined that the fracture network is characterized by compaction bands (BC), deformational zones, stilolytes, and aperture and shear discrete fractures. The compaction bands are better represented in shales, whereas deformational zones and stilolytes are restricted to carbonate rocks. Some of those fracture types were recognized in the outcrops of Sierra de la Vaca Muerta (stilolytes, compaction bands, deformational zones, and aperture and shear fractures) and Picún Leufú Anticline (aperture and shear fractures) in rocks of the similar characteristic than the ones found in subsurface. The results obtained allow to correlate aspects of the fractures network in both systems and therefore predict their timing of deformation. These analogies lead to a better characterization of the naturally fractured reservoir.

INTRODUCCIÓN

El distrito Loma La Lata, constituye un área productora de primer orden en la Cuenca Neuquina, conformando uno de los mayores yacimientos de petróleo y gas de la Argentina (Legarreta *et al.* 2008), el cual se encuentra ubicado en el área central de la cuenca en el llamado Engolfamiento Neuquino. Uno de los reservorios principales lo constituye la Formación Quintuco, de edad

Cretácico inferior, cuyo mecanismo de entrapamiento es estratigráfico y estructural, asociado a un sistema de fisuramiento natural (Maretto 2005). Los análisis petrofísicos indican que el grado de movilidad de los fluidos en la matriz es nulo y que la conectividad principal proviene de fracturas o zonas fisuradas, aunque existen evidencias de porosidad primaria en algunas facies carbonáticas (Olmos *et al.* 2002; Hechem 2011). Los estudios sobre los sistemas de fracturas y las características de la fracturación de esta unidad son limitados y no contemplan estudios integrales que permitan discernir los diferentes sistemas de fracturas, sus particularidades y su participación en el reservorio.

El estudio de los reservorios naturalmente fracturados (Nelson 2001), al igual que la caracterización de otros tipos de reservorio, depende de un análisis diagnóstico a partir de multiaproximaciones centradas en primer lugar, en la observación de testigos corona, perfiles de pozos, estudios petrográficos, análisis de inclusiones fluidas, entre otros. La definición del medio poroso fracturado presenta desafíos como la determinación de la distribución de fracturas en subsuelo, su conectividad y el grado en que éstas influyen sobre la porosidad matricial del reservorio, entre otros. La identificación de estos parámetros en subsuelo enfrenta dificultades tanto por la limitada capacidad de muestreo de coronas y perfiles de pozo, como por la baja resolución de los atributos sísmicos. No obstante, el modelado conceptual y/o numérico de los sistemas de fracturas naturales (i.e., *Discrete Fracture Network Model*) necesario para disminuir la incertidumbre y los riesgos durante el desarrollo de los yacimientos, depende de la aproximación de estos parámetros para su validación. En este sentido, el conocimiento conceptual estructural y microtectónico de un afloramiento análogo en el que se puedan determinar estos parámetros, constituyen una herramienta fundamental para el análisis de este tipo de reservorios (Howell *et al.* 2014). El objetivo de este trabajo es analizar las fracturas naturales de la Fm. Quintuco del yacimiento Loma La Lata y de sus unidades equivalentes (i.e., Fm. Picún Leufú) aflorantes en diferentes sectores de la Cuenca Neuquina. El escenario complejo que caracteriza a la Cuenca Neuquina en términos paleogeográfico y tectónico, alertan sobre los diferentes controles tectónicos, estratigráficos y diagenéticos que, lateral y verticalmente, afectan a las unidades del relleno. De esta forma, definir tanto el universo de procesos y variables de fracturación, como las potenciales analogías que permitan disminuir la incertidumbre durante el desarrollo del *play* Quintuco, llevó al análisis de sucesiones sedimentarias equivalentes en diferentes dominios morfoestructurales: (I) Sierra de la Vaca Muerta y (II) ámbito de la Dorsal de Huincul. Mediante esta aproximación se pretende explicar las generalidades del desarrollo de las fracturas y de las rocas en las que se propagan, condicionadas por diferentes eventos tectónicos y diagenéticos del intervalo productivo de la Fm. Quintuco.

MARCO GEOLÓGICO

La evolución tectónica de la Cuenca Neuquina determina el desarrollo de una cuenca polifásica con dominios que presentan diferente configuración tectónica, historia de subsidencia y

patrones de relleno sedimentario. En términos estructurales, los yacimientos Loma La Lata – Loma Campana, se encuentran dentro del dominio correspondiente al Engolfamiento Neuquino (Fig. 1). La paleoconfiguración de esta región morfoestructural se caracteriza por presentar estructuras extensionales con componentes de rumbo de edad principalmente Cretácica. En este sector el registro sedimentario es muy completo y aportan un gran espesor a la columna sedimentaria, ya que los procesos erosivos y las discordancias tectónicas no afectaron en gran medida a los depósitos sedimentarios (Casadio y Montagna 2015; Domínguez *et al.* 2020). Los afloramientos correlativos a los niveles carbonáticos de Fm. Quintuco, se encuentran bien expuestos en la Faja Plegada del Agrio, dentro del anticlinal que conforma a la Sierra de la Vaca Muerta y en el ámbito de la subcuenca de Picún Leufú en el anticlinal de igual topónimo (Fig. 1). La región morfoestructural de la Faja Plegada del Agrio se encuentra en el centro-oeste de la provincia de Neuquén la cual se caracteriza por relieves estructurales de dirección predominante N-S, los cuales se formaron durante el Cretácico tardío y fueron reactivados en el Terciario (Zapata y Folguera 2005; Zamora Valcarce *et al.* 2011; Lebinson *et al.* 2015; Giacosa 2020). La Sierra de la Vaca Muerta está ubicada entre el río Agrio y el arroyo Covunco. Esta estructura anticlinal, es la expresión austral de la Faja Plegada y Corrida del Agrio con una notable influencia de la Dorsal de Huincul que genera pliegues de rumbo ENE a NE (Leanza *et al.* 2001). Esta zona constituyó uno de los principales depocentros de la Cuenca Neuquina, generando una columna sedimentaria con la mayor resolución estratigráfica

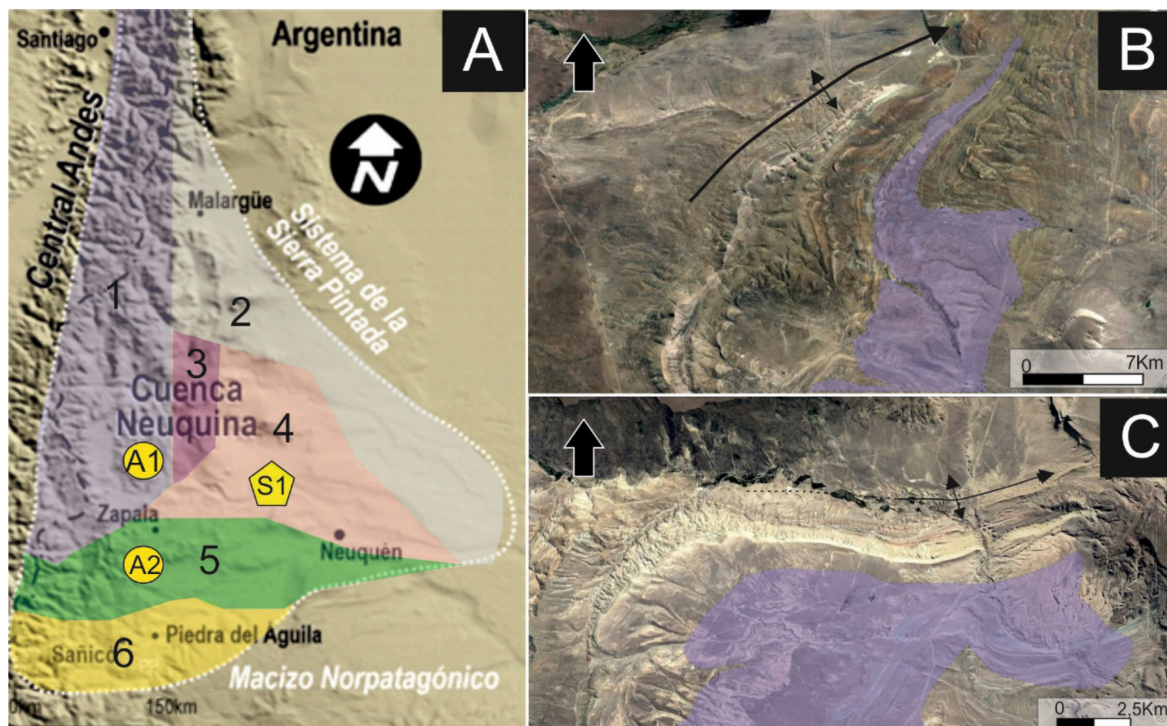


Figura 1. A) Mapa regional de la Cuenca Neuquina donde se indican las zonas estudiadas, Yacimiento Loma La Lata (S1), Sierra de la Vaca muerta (A1) y Anticlinal de Picún Leufú (A2) y zonas morfoestructurales tomado de Casadio y Montagna (2015), siendo: 1) Faja Plegada, 2) Plataforma nororiental, 3) Alto de los Chihuidos, 4) Región del Engolfamiento, 5) Dorsal de Huincul, 6) Sur de la dorsal. B) Imagen satelital de la Sierra de la Vaca Muerta, en violeta se indican los afloramientos la Fm. Picún Leufú. C) Imagen satelital del Anticlinal de Picún Leufú, en violeta los afloramientos de la Fm. Picún Leufú.

expuesta desde el Jurásico al Mioceno (Casadio y Montagna 2015; Dominguez *et al.* 2020). Por su parte, la subcuenca de Picún Leufú se encuentra en la zona sur de la Cuenca Neuquina aflorando dentro de un anticlinal W-E de carácter regional, el cual es la expresión superficial de la Dorsal de Huincul. Esta región morfoestructural es una zona de deformación de intraplaca de características compresivas ocurrida en el Mesozoico con dos reactivaciones Terciarias (Mosquera *et al.* 2011; Giacosa 2020). En este caso, la inversión tectónica ocurrida durante el Jurásico superior y el Cretácico, provocó una reducción de la columna estratigráfica dejando superficies de no depositación o de erosión y una condensación en las unidades suprayacentes a la Formación Picún Leufú (Casadio y Montagna 2015).

La Fm. Quintuco es una unidad mixta carbonática-silicoclástica perteneciente a la mesosecuencia inferior del Grupo Mendoza, de edad Tithoniano a Valanginiano desarrollada en conjunto con la Formación Vaca Muerta, dejando el registro de una rampa mixta durante el evento transgresivo del Jurásico tardío-Cretácico temprano (Legarreta y Giulisano 1989; Leanza *et al.* 2011; Schwartz *et al.* 2006; Olivo *et al.* 2016; Dominguez *et al.* 2020; Fig. 2 a). Esta unidad se encuentra aflorando con buenas exposiciones en la Sierra de la Vaca Muerta y en la subcuenca de Picún Leufú, y a su vez, se encuentra presente en el subsuelo del Distrito petrolero de Loma La Lata y Loma Campana (Carozzi *et al.* 1993; Fig. 1). La unidad fue inicialmente definida por Waver (1913) como Fm. Quintuco para identificar a las rocas que se encuentran suprayacentes de forma concordante y transicional a la Fm. Vaca Muerta, hasta la disconformidad intravalanginiana. Actualmente, el termino quedó restringido a su uso en subsuelo y en superficie únicamente para las rocas silicoclásticas superiores que componen el tramo estratigráfico (Olivo *et al.* 2016), dejando excluidas las rocas carbonáticas a las que se denomina como Fm. Picún Leufú (Leanza 1973). En lo que respecta al subsuelo, la unidad es interpretada dentro del tramo abarcado por las Formaciones Quintuco-Vaca Muerta en el ámbito de Loma La Lata-Loma Campana y teniendo en cuenta consideraciones sismoestratigráficas, perfiles eléctricos y principales niveles reservorios, puede subdividirse en 3 zonas (Fig. 2b). La zona 1 corresponde a la sección inferior y comprende hasta el marker denominado internamente PreQ (Maretto *et al.* 2002), este intervalo es progradante y muestra una somerización hacia depósitos proximales de plataforma interna, con mayor contenido calcáreo y arenoso en algunas zonas. Por encima del PreQ, la Zona 2 es conocida como Quintuco Medio, en la que se observa el pasaje de geometrías progradacionales a agradacionales con patrones de apilamiento plano paralelos. Sobre estos reflectores se observan zonas de alta amplitud, asociadas a acumulaciones carbonáticas, cuyas litofacies predominantes son grainstones y packstones oolíticos y oolítico-esqueletales, asociadas a barras carbonáticas de alta energía (Nivel Q). Por último, la zona 3 corresponde a la sección superior de la Fm. Quintuco, la cual comienza con litofacies de fangolitas calcáreas limosas que gradan a grainstones y packstones oolíticos con estilolitas subhorizontales rellenas de materia orgánica, las cuales presentan interés hidrocarburífero. En este último intervalo se localiza el conocido Nivel J, que es responsable de innumerables manifestaciones hidrocarburíferas, principalmente en el

sector NO del yacimiento. Con respecto a las características que definen los niveles productivos, estudios previos indican que la porosidad de los niveles productivos estaría dada por fracturas de compactación (estilolitas) y/o porosidad matricial (móldica, intergranular e intragranular), según se observó en muestra de mano y cortes petrográficos de los testigos corona correspondientes a niveles de calizas (Marlats *et al.* 2017).

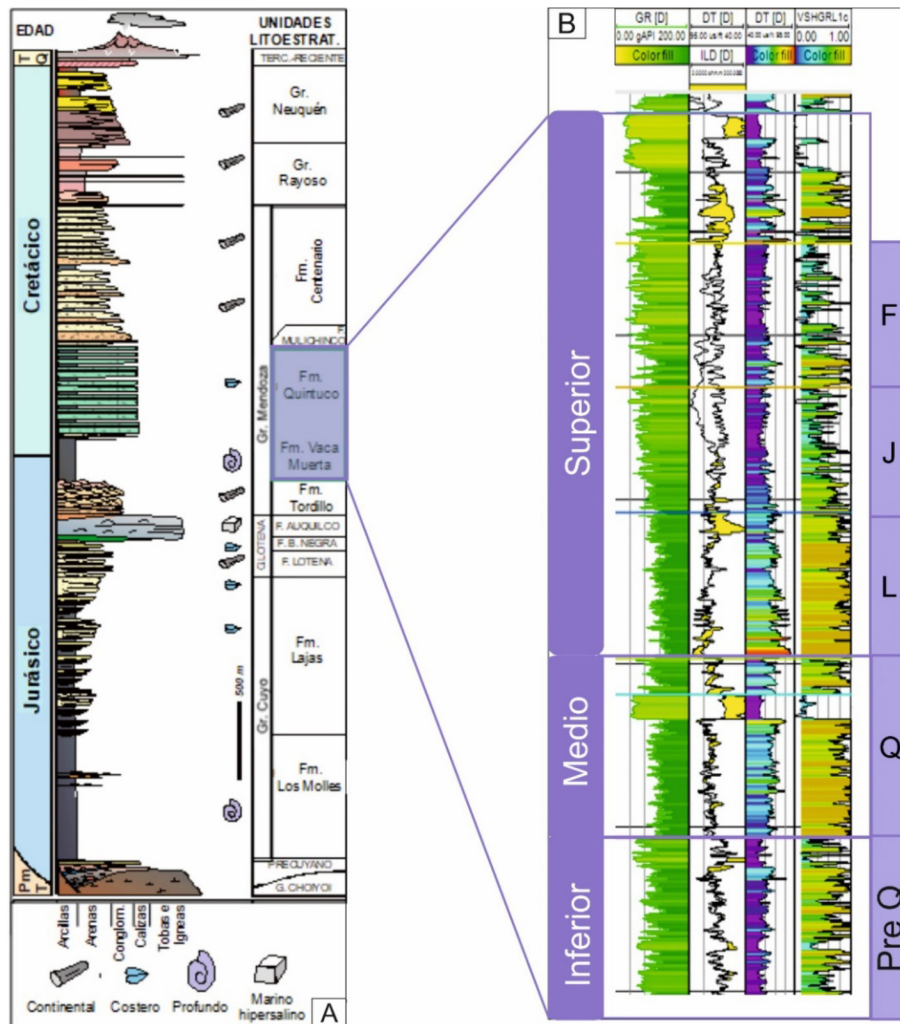


Figura 2. A) Columna estratigráfica de la Cuenca Neuquina tomado de Brisson y Veiga (1999), Modificado de Maretto et al (2002). B) Perfil eléctrico y zonas productivas en el ámbito del Yacimiento Loma La Lata modificado de Santangelo (2020).

METODOLOGÍA

El análisis de fracturas naturales (FN) se llevó a cabo en escala meso y microscópica tanto en subsuelo como en superficie de manera comparativa. Con el objetivo de obtener analogías entre ambos sistemas se predefinieron parámetros y variables a comparar y se utilizaron las mismas

metodologías para las diferentes áreas. Para la recolección de datos en escala mesoscópica en subsuelo, se realizó una medición directa y sistemática de FN mediante scanlines paralelos al eje de corona, en dos testigos corona de pozos verticales del Distrito Loma La Lata (LLL), en el miembro medio de la Fm. Quintuco (miembro Q en pozos 1 y 2) con un total de 17,48 m en el pozo 1 y 35,99 m en el pozo 2. Durante el relevamiento se midieron parámetros como la inclinación, la altura, la longitud, el espaciado, las terminaciones, el modo de desplazamiento, la apertura cinemática, la porosidad visual apreciada y el tipo de relleno. Este método cuenta con dos limitaciones, por un lado, no es posible conocer la orientación de los planos medidos debido a que los pozos no cuentan con ese dato, y por otro lado, las terminaciones descriptas y la longitud de las fracturas se encuentran limitadas al tamaño del testigo. Teniendo en cuenta estas restricciones, se recolectaron datos de 451 FN en el pozo 1 y 2433 FN en el pozo 2.

Para el relevamiento de campo se realizó un análisis estructural y microtectónico del tramo estratigráfico equivalente a la Fm. Quintuco (Fm. Picún Leufú) en dos regiones de la cuenca: en el extremo sur de la Faja Plegada del Agrio en la Sierra de la Vaca Muerta (SVM), y en la proyección superficial de la Dorsal de Huincul en el Anticlinal de Picún Leufú (APL). Sobre los afloramientos se parametrizaron los sistemas de fracturas naturales mediante el levantamiento sistemático de orientaciones de las FN con $N > 30$ para cada uno de los *sets* reconocidos. Las orientaciones de los diferentes *sets* y el mapeo de campo fueron relevados con brújula tipo Brunton, imágenes satelitales y Tablet (Samsung A10) a través del soporte digital de la aplicación libre *Fieldmove*TM versión 1.5.2 de Petroleum Experts y los datos fueron proyectados en el software especializado Steronet (Almendinger *et al.* 2013). En total se realizaron 5 *scanlines* y 3 estaciones areales (circulares) según el objetivo (Fig. 3). Los *scanlines* unidimensionales son efectivos en áreas con buenos afloramientos para obtener datos de fracturas de poco espaciado, mientras que el método de estaciones areales, permite obtener las relaciones espaciales de los *sets* de fracturas en afloramientos reducidos eliminando sesgos de orientaciones (Mauldon *et al.* 2001; Rhorbaugh *et al.* 2002; Correa Luna *et al.* 2020). Las mediciones a través de scanlines, se llevaron a cabo en el flanco sur del APL, donde las facies de *grainstones* peloidales de la Fm. Picún Lufú se encuentran bien expuestas y la inclinación de la capa no supera los 10°. De este modo, se obtuvieron datos de espaciado, apertura cinemática, rellenos, porosidad, longitud y terminaciones, tanto de segmentos como de largo total de 592 FN. Por otro lado, en el área de SVM, el levantamiento se llevó a cabo a través de estaciones areales, recolectando datos en el flanco sureste del anticlinal, sobre capas de *floatstones* bioclásticos de la Fm. Picún Leufú. En este procedimiento se obtuvieron datos de 547 FN en las que se realizaron mediciones directas de los mismos parámetros que en el área APL.

En simultaneo con la recolección de datos de mesoescala, se seleccionaron muestras tanto en corona como en superficie para realizar análisis petrográfico de los rellenos, porosidad y timing de estructuras, las cuales fueron descriptas en microscopio óptico de polarización binocular ZEISS Axiolab 5, y fotografiadas mediante una cámara fotográfica digital Axiocam 208 color acoplada

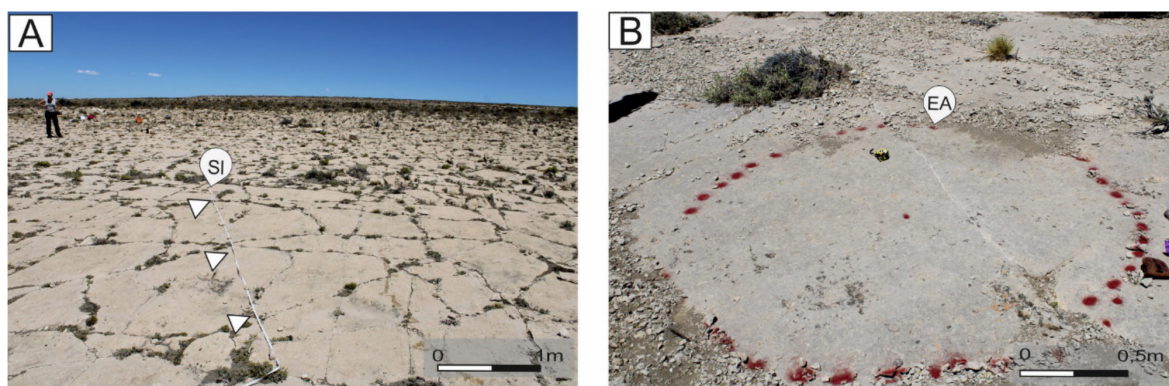


Figura 3. A) Foto de campo donde se observa un Scanline (SI) perpendicular al *set* de fracturas que se desea medir. B) Fotografía de campo donde se observa una estación areal (EA) circular de radio de 1 m.

al microscopio en el Laboratorio de Microscopía del Centro de Investigaciones Geológicas de La Plata (CONICET-UNLP). Por otra parte, en complemento al muestreo de FN, se levantó un perfil sedimentario por cada área estudiada (LLL, APL y SVM), con el objetivo de caracterizar a la roca de caja y analizar la distribución de las FN. En ambos perfiles de superficie el levantamiento se realizó con cinta métrica y brújula (Tucker 2003), y se describieron de las facies utilizando la clasificación de Dunham (1962) para rocas carbonáticas. Por último, con los datos de las mediciones de fracturas se calcularon valores de abundancia, por un lado, lineales o P10 para todos los perfiles verticales (LLL, APL y SVM) y las scanlines del anticlinal de Picún Leufú y por otro, areales o P20 en las estaciones areales proyectadas en Sierra de la Vaca Muerta.

ANÁLISIS DE FRACTURAS NATURALES

Las fracturas naturales son discontinuidades mecánicas limitadas por dos superficies planares y con un desplazamiento relativo causado por deformación frágil (Schultz y Fossen 2008). En este texto, se incluye en este término a las fracturas discretas de apertura y cizalla, estilolitas, zonas de deformación y bandas de compactación. En términos generales, el tramo estratigráfico analizado tanto en subsuelo como en superficie, está compuesto por una sucesión mixta carbonática-silicoclástica en el que los niveles carbónaticos están integrados por *Mudstones*, *Wakestones*, *Packstones*, *Grainstones*, *Floatstones*, *Rudstones* y *Boundstones*, con componentes aloquímicos de tipo ooides, peloides y bioclásticos y las rocas silicoclásticas varían entre pelitas con laminación horizontal, areniscas muy finas a medias con estratificación entrecruzada o en artesas (Fig. 6, 9 y 12).

Análisis de subsuelo

En el subsuelo del distrito Loma La Lata se describieron testigos coronas de 2 pozos verticales sin orientación correspondientes a los niveles intermedios (Q) de la Fm. Quintuco. El sistema de

fracturas está compuesto por 4 *sets* de fracturas discretas (FC-FA1-FA2-BPV), 1 *set* de bandas de compactación (BC), 1 *set* de estilolitas (S) y un *set* de zonas de deformación (ZD; Fig. 4).

Set	Modo	Inclinación	Longitud	Apertura cinemática	Porosidad	Tipo de relleno	Terminación	Cinemática	Intensidad (Fn/m)
FA1	I	aleatoria	5cm	0,0025cm	-	Cal	Gradual/ Abrupta en bicolastos	-	0,32
FA2	I	subhorizontal/ Subvertical	10/ 100 cm	0,015cm	2%	Cal	Gradual	-	1,29
FC	II	30°	-	-	-	-	-	Inversa	0,22
BPV	I	paralela a la estratificación	1cm	0,015cm	-	Cal	Gradual	-	-
BC	IV	subhorizontal/ Subvertical	10cm	0,015cm	-	Molienda /bitumen	Gradual	-	21,56
S	IV	subhorizontal/ Subvertical	5cm	0,012cm	-	Bitumen/ óxidos	Gradual/ Abrupta en bicolastos/ Acoplada a ZDL o Stl	-	2,95
ZD	IV/II	0-30°	10cm	0,015cm	5%	Bitumen/ óxidos	Gradual/ estilolitizado	Inversa	0,355

Figura 4. Descripción de atributos del sistema de fracturas naturales observadas en coronas del yacimiento Loma La Lata, donde se hace referencia a los *sets* de fracturas discretas de apertura y orientación aleatoria (FA1), fracturas discretas de apertura (FA2), fracturas discretas de cizalla (FC), fracturas paralelas a la estratificación (BPV), bandas de compactación (BC), estilolitas (S) y zonas de deformación (ZD).

Dentro de las fracturas discretas, el *set* FC corresponde a estructuras de cizalla (Fig. 5 A) con superficies escalonadas y estriados que indican un rake de 80°. Por otro lado, se reconocieron fracturas tensionales clasificadas según sus características en los *sets* FA1, FA2 y BPV (Fig. 5 D y E). El *set* FA2 se desarrolla de manera uniforme en las diferentes rocas analizadas con inclinaciones subhorizontales y subverticales, mientras que las fracturas denominadas FA1, están dispuestas únicamente y de manera aleatoria en la matriz pelítica de los *floatstones* (Fig. 5 F y G) y están rellenas por calcita granular. Por otro lado, el *set* BPV (*Bed Parallel Veins*), está compuesto por fracturas paralelas a la estratificación que se desarrolla en los bordes de las zonas de deformación o bien en los bordes de bioclastos y presentan dos tipos de morfologías de relleno, con fibras perpendiculares (Fig. 5 F) a las paredes u oblicuas a las mismas (Fig 5 G).

Dentro de las estructuras de cierre se identificaron bandas de compactación (BC) y estilolitas (S). Las primeras se caracterizan por presentar evidencias de reducción del volumen a través de procesos físicos, dejando material molido y disminución del tamaño de los espacios porales y concentración de bitumen. Las mismas presentan inclinaciones subhorizontales y subverticales (Fig. 5 B y C).

Estas estructuras son las de mayor abundancia dentro de los perfiles de subsuelo analizados y están íntimamente relacionadas a las litologías silicoclásticas (pelíticas o heterolíticas; Fig. 4). En cuanto a las estilolitas (S), se identificaron zonas de sutura y disolución por presión con inclinaciones verticales y subhorizontales (Fig. 4 H, I y J), las mismas están limitadas a las litologías carbonáticas.

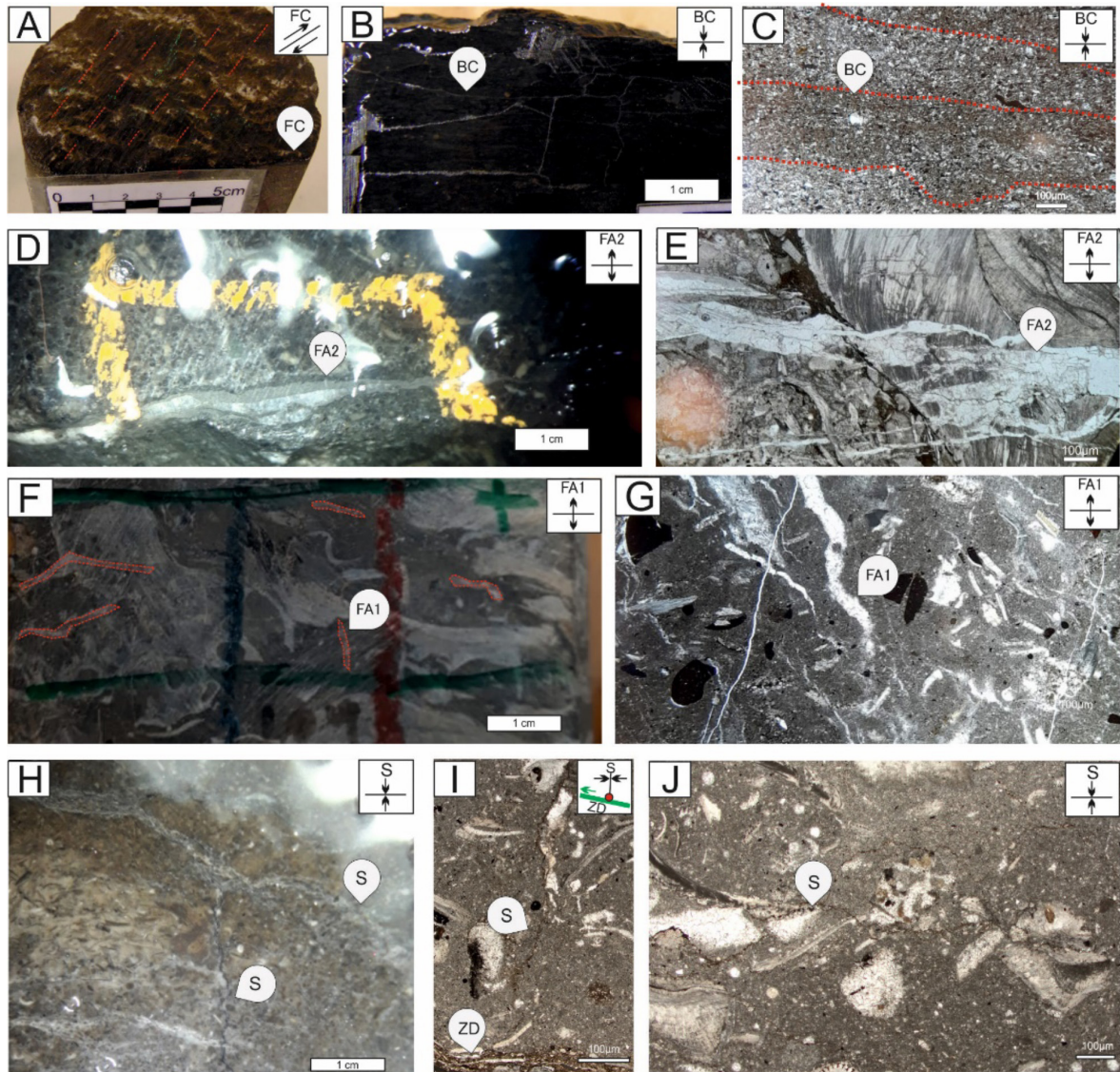


Figura 5. Fracturas naturales observadas en coronas del Distrito Loma La Lata en niveles medios de la Fm. Quintuco (Nivel Q). A) Fractura discreta de cizalla (FC) donde se observa el plano y el estriado. B) Bandas de compactación (BC) en pelitas. C) Microfotografía de bandas de compactación (BC). D) Fractura discreta de apertura (FA2). E) Microfotografía de fractura discreta de apertura (FA2) donde se observa el relleno calcítico granular. F) Fracturas de aperturas (FA2) de distribución aleatoria dentro de la matriz de Floatstones. G) Microforografías de FA2, donde se observa el relleno de calcita granular y las terminaciones graduales. H) Estilolitas (S) verticales que terminan de manera abrupta en estilolitas horizontales. I) Microfotografía de estilolitas verticales que terminan abruptas en zonas de deformación (ZD). J) Microfotografía de estilolitas horizontales.

Por último, las zonas de deformación ZD son estructuras mixtas de cierre y cizalla que se conforman por material molido, clastos orientados con disolución por presión y suturas y

concentraciones de bitumen. En los bordes y centro se observan fracturas con relleno de calcita fibrosa (BPV; Fig. 5).

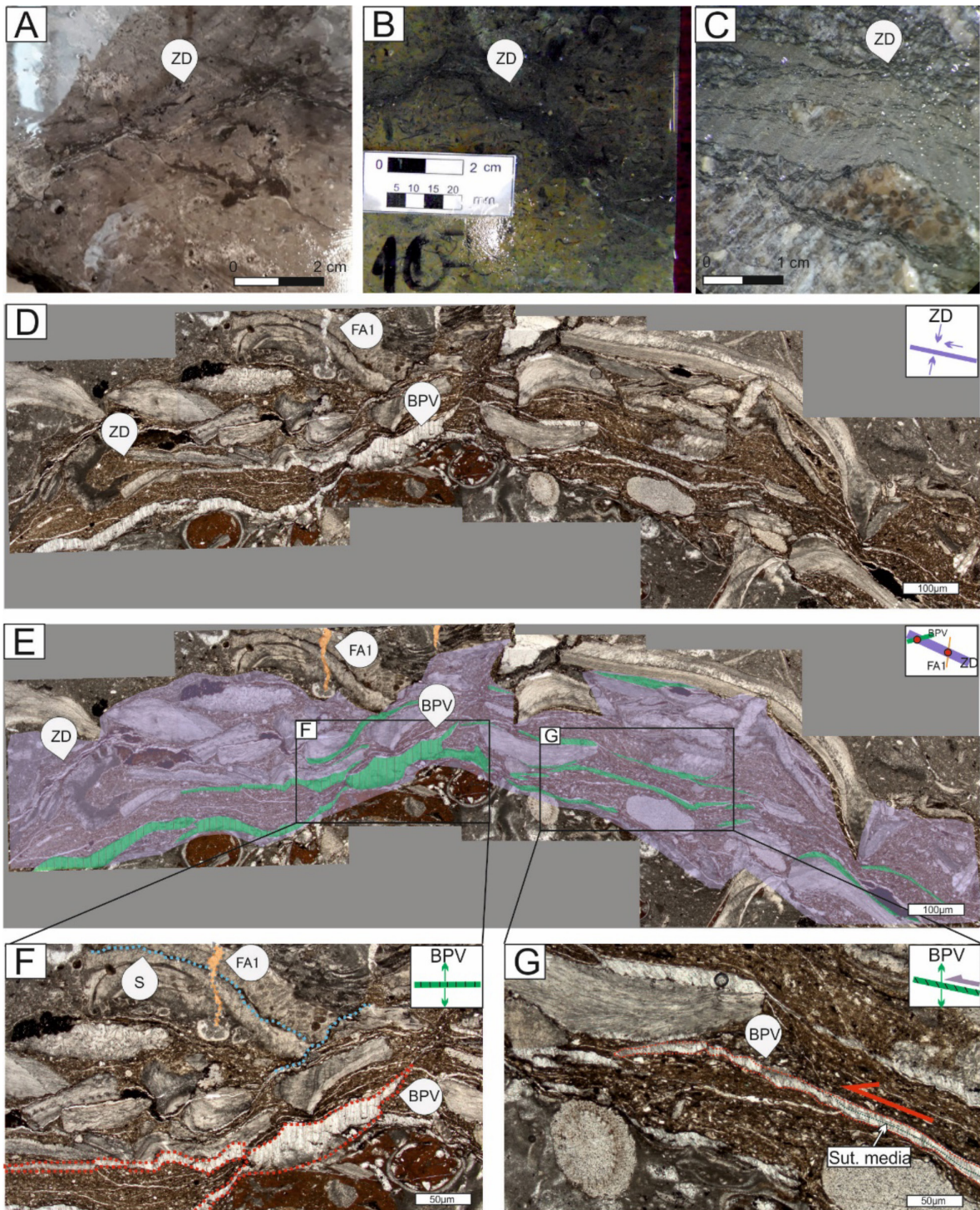


Figura 6. Zonas de deformación descriptas coronas del Distrito Loma La Lata dentro en los niveles medios de la Fm. Quintuco (Nivel Q). A, B y C) Zonas de deformación (ZD) a mesoescala. D) Mosaico de microfotografías de ZD con BPV y FA1. E) Mosaico de microfotografías de ZD con interpretación. F) Microfotografía de detalle en ZD, donde se aprecian la estructura fibrosa perpendicular a las paredes en las BPV. G) Microfotografía de detalle en ZD, donde se aprecian la estructura fibrosa oblicua a las paredes en las BPV y su interpretación cinemática.

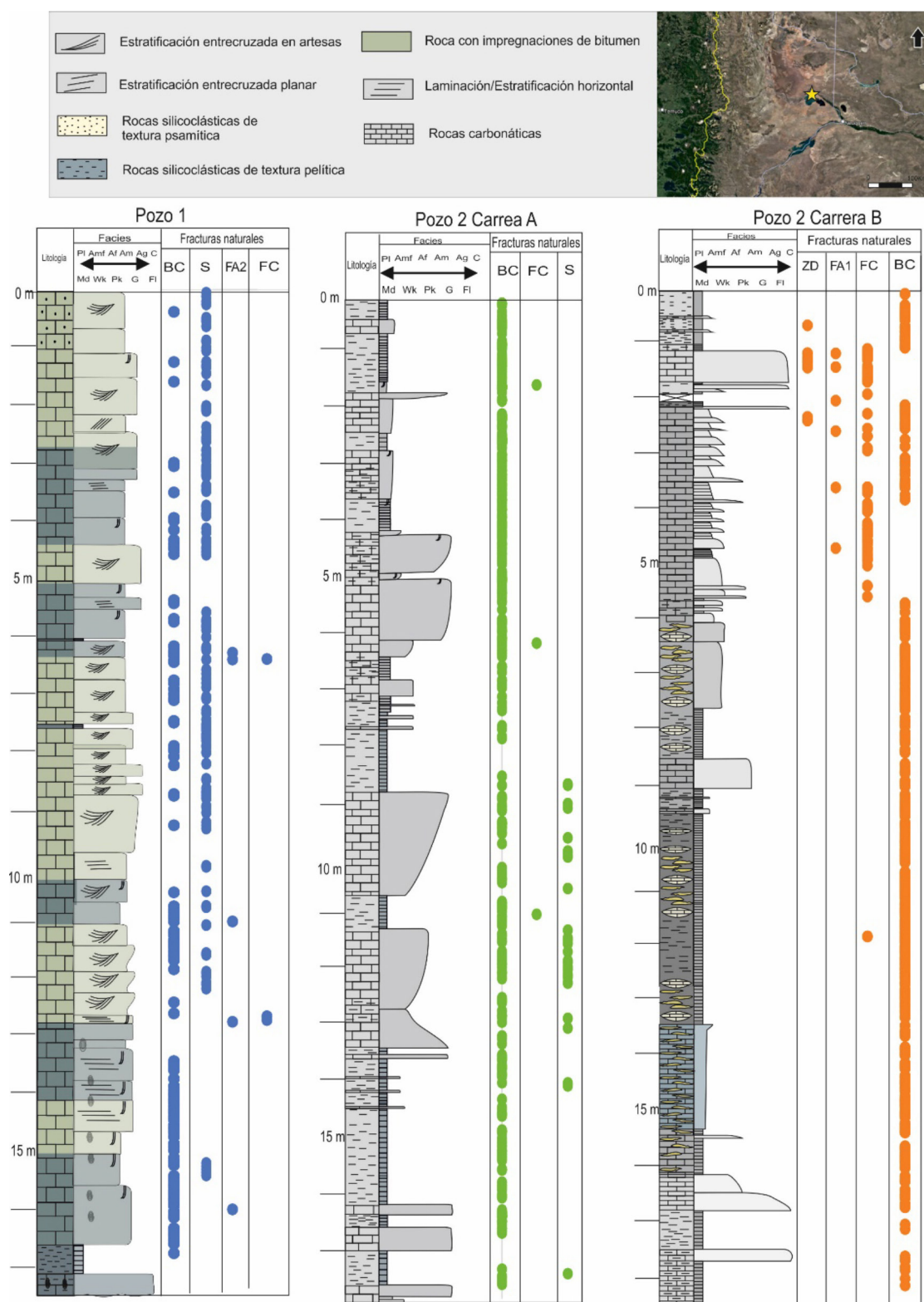


Figura 7. Perfiles *selley* de los testigos coronas de los pozos 1 y 2, junto con la distribución de fracturas naturales.

En cuanto a la relación de corte entre las fracturas existentes, las bandas de compactación (BC) horizontales y verticales presentan terminaciones de corte mutuo (Fig. 5 B) y simultáneamente, y se encuentran superpuestas a las estilolitas (S) subhorizontales. Dentro del grupo de estilolitas (S) las verticales terminan de manera abrupta contra las horizontales y contra las zonas de deformación (ZD; Fig. 5 H e I). Por otro lado, las FA1 y BPV cortan a las ZD (Fig. 6). El resto de las fracturas FC y FA2 no presentan relaciones de corte visibles en las coronas analizadas.

El desarrollo de algunas estructuras tensionales (FA1), de cierre (S y BC) y mixtas (ZD), está íntimamente relacionado a la litología. Los diagramas de distribución (Fig. 7), indican que los niveles pelíticos-heterolíticos acumulan la mayor proporción de bandas de compactación, mientras que en las litologías carbonáticas la deformación se acomoda mayoritariamente a través de estilolitas o como zonas de deformación en la matriz de los *Floatstones*. Por otro lado, la propagación de fracturas tensionales (FA1), se restringe a niveles donde la matriz y los bioclastos presentan gran contraste mecánico.

Análisis de superficie

En comparación a las fracturas naturales identificadas en subsuelo, los afloramientos del flanco sureste del anticlinal de la Sierra de la Vaca Muerta presentan fracturas naturales con similares características (Fig. 8) como son las fracturas discretas (FC y FA2), zonas de deformación (ZD) y estilolitas (S).

Set	Modo	Orientación	Apertura o ancho cinemático	Porosidad	Relleno	Terminación	Intensidad (Fn/m2)
FA2	I	N50°	0,05cm	-	Cal	Gradual/ Echelón	5,07
FC	II	N15°/ N65°/ N290°	1,5cm	5-10%	Cal/ molienda	Gradual/Splay/ echelón/ abruptas a FN	3,95
ZD	IV-II	aleatoria	0,01cm	-	Molienda/ óxidos/ Mat. Org.	Gradual/ abrupta a bioclastos	-
S	IV	NW subverticales u horizontales	0,001cm	-	Oxidos/ Mat. Org./ Py	Gradual/ abrupta a bioclastos	13,42

Figura 8. Descripción de atributos del sistema de fracturas naturales de la Sierra de la Vaca Muerta donde se hace referencia a los sets de fracturas discretas de apertura (FA2), fracturas discretas de cizalla (FC), estilolitas (S) y zonas de deformación (ZD).

Las zonas de deformación (ZD) descritas en la Sierra de la Vaca Muerta al igual que las reconocidas en el subsuelo de Loma La Lata, son estructuras mixtas de cierre y cizalla que presentan orientaciones aleatorias y morfologías irregulares, concentradas en la matriz de los *Floatstones*. En estas estructuras son comunes las acumulaciones de material molido, óxidos y materia orgánica (Fig. 9 A y B).

En cuanto a las estructuras de cierre, se reconocieron estilolitas (S; Fig. 8 C y D) con predominio NW e inclinaciones subverticales o bien paralelas a la estratificación. Estas estructuras (S) son las de mayor abundancia dentro del análisis realizado (Fig. 8).

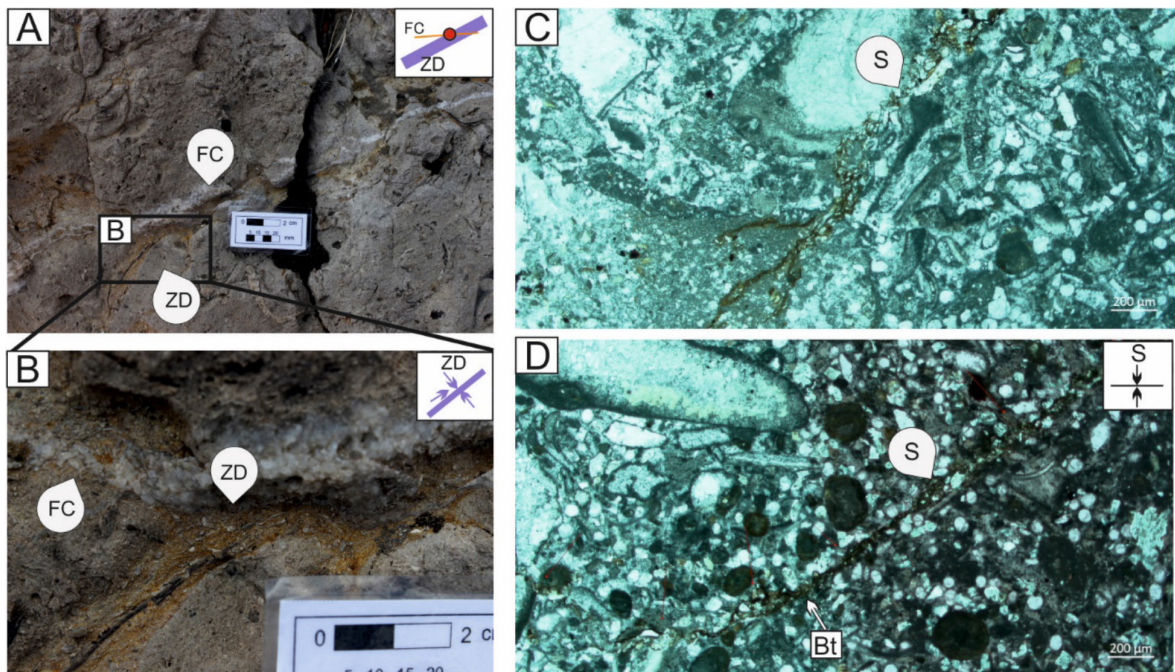


Figura 9. Zonas de deformación (ZD) y estilolitas (S) descritas en la Sierra de la Vaca Muerta. A) Foto de afloramiento con ZD y una FC aprovechando los planos de debilidad. B) Imagen de detalle de DC y relación con FC. C) Microfotografía de S, donde se pueden apreciar bioclastos con disolución por presión. D) Microfotografía de S, donde se pueden apreciar el relleno compuesto por bitumen (Bt).

Por otro lado, las fracturas discretas presentan características de cizalla (FC) con orientaciones NNE, ENE y NW y tensionales (FA2) con orientación NE, las cuales se encuentran desarrolladas en todas las litologías descritas en los perfiles analizados, presentando mayor intensidad en las unidades silicoclásticas (Fig. 10).

La relación de corte observada en esta área indica que, las fracturas discretas FC y FA2, cortan y se superponen a las estructuras de cierre o mixtas (S y ZD; Fig. 9 A y B). Por otro lado, dentro de las fracturas discretas, las de cizalla (FC) aprovechan planos de debilidad, generan relevos y desplazan a las fracturas tensionales (FA2; Fig. 11).



Figura 10. A) Mapa de ubicación del área SVM. B) Imagen panorámica del perfil levantado. C) Perfil sedimentario de la Fm. Picún Leufú con la medición de P10 o intensidad de Fn/m en cada unidad descripta dentro de la Sierra de la Vaca Muerta

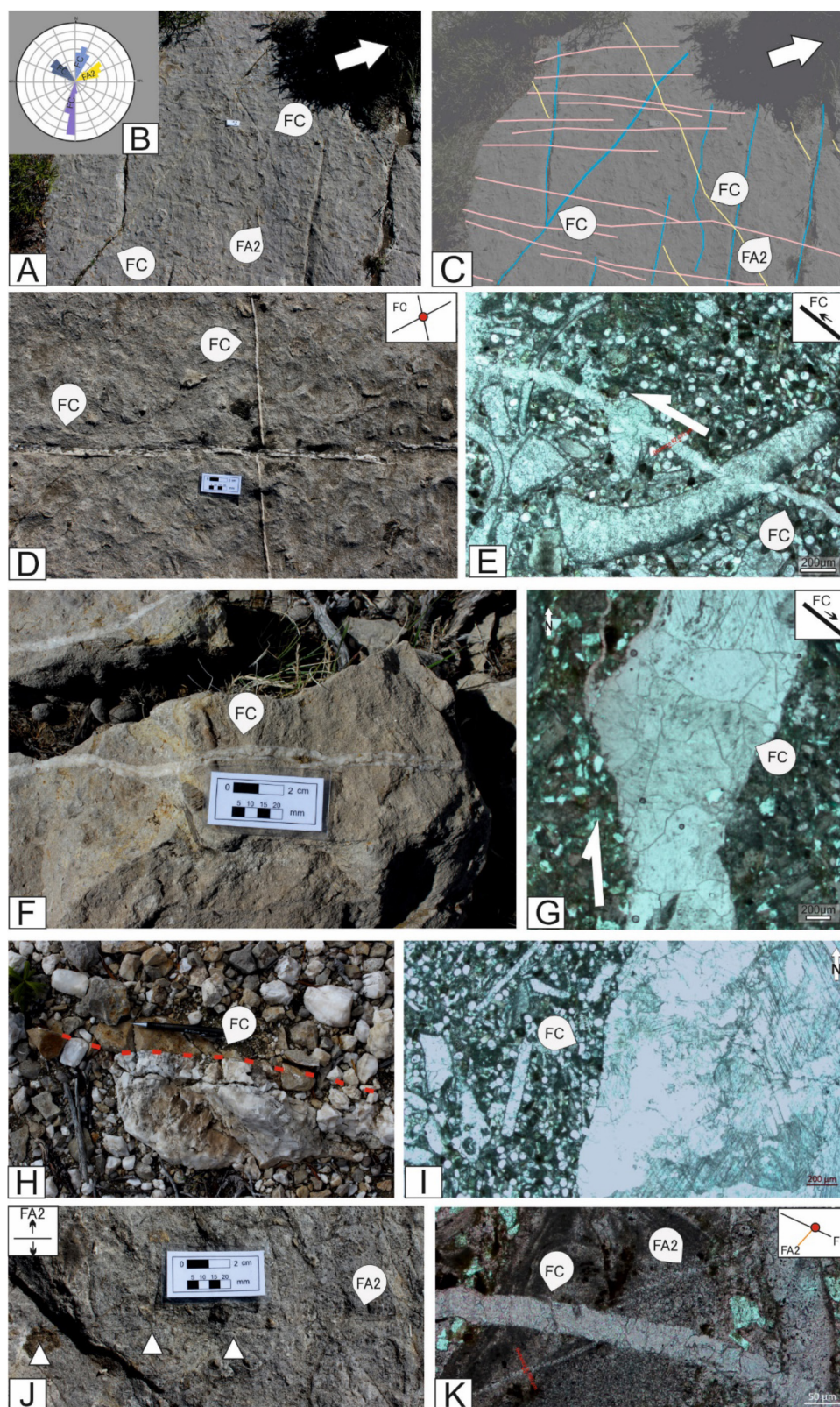


Figura 11. Fracturas discretas y sus orientaciones, además se aprecian las relaciones de corte entre las FC y FA2.

Set	Modo	Orientación	Apertura o ancho cinemático	Porosidad	Relleno	Terminación	Intensidad (Fn/m)
FC	II	N69°/N330° /N88°/N355°	0,05cm	-	Cal	Gradual/ Abrupta a FN	3,45
FA2	I	N12°	0,0075cm	10%	Cal/ Mat. Org.	Gradual/ Echelón/ Splay	8,45

Figura 12. descripción de atributos del sistema de fracturas naturales del flanco sur del Anticlinal de Picún Leufú donde se hace referencia a los *sets* de fracturas discretas de cizalla (FC) y fracturas discretas de apertura (FA2).

A diferencia de las similitudes en cuanto a las estructuras encontradas en el Yacimiento Loma La Lata y la Sierra de la Vaca Muerta, en el flanco sur del anticlinal de Picún Leufú solo están presentes *sets* de fracturas discretas subverticales (Fig. 12) de cizalla (FC) y tensionales (FA2),

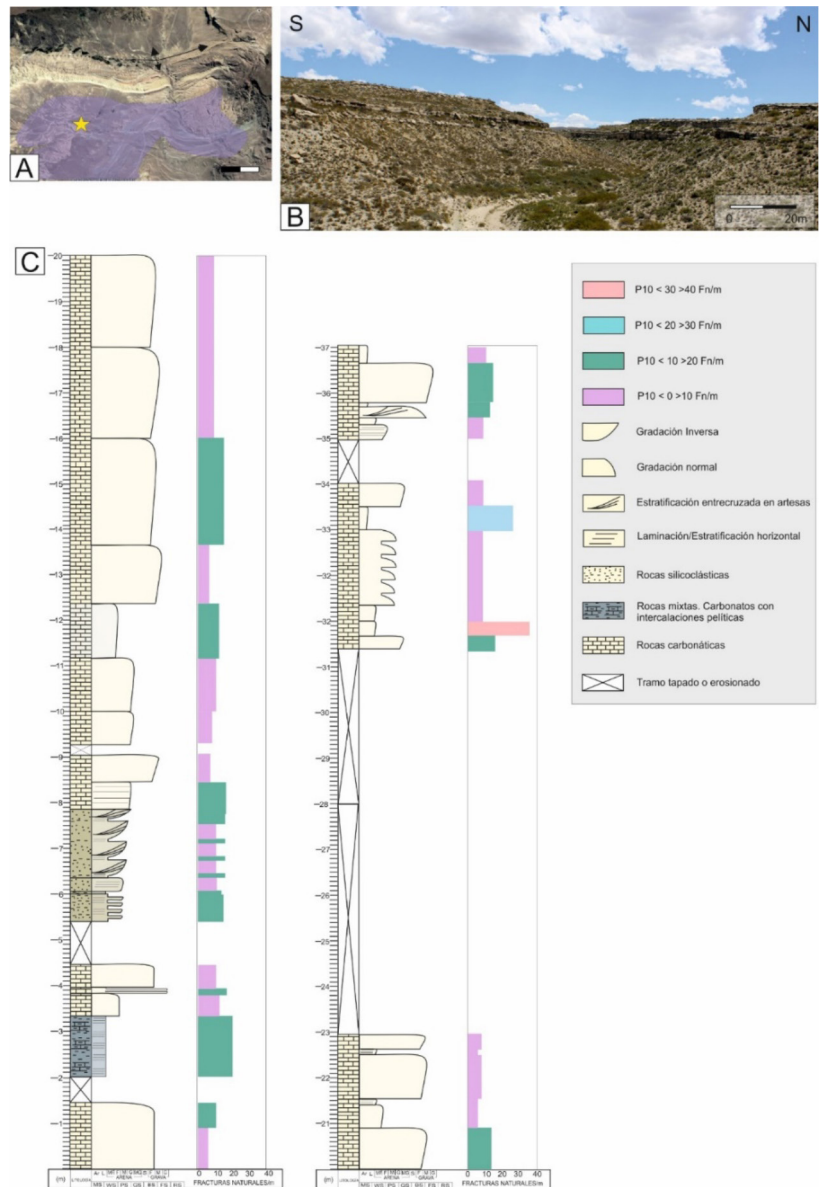


Figura 13. A) Mapa de ubicación del área APL. B) Imagen panorámica del perfil levantado. C) Perfil sedimentario de la Fm. Picún Leufú con la medición de P10 o intensidad de Fn/m en cada unidad descripta dentro del anticlinal de Picún Leufú.

las cuales se encuentran mayoritariamente desarrolladas en los niveles silicoclásticos de textura pelítica (Fig. 13).

Las fracturas discretas de cizalla (FC) presentan 4 dominios de orientaciones NE, NW, E-W y N-S, mientras que el *set* FA2, corresponde a fracturas de apertura de orientación NNE, siendo este último, es el *set* de mayor abundancia (P10) dentro del sistema de fracturas analizado.

En cuanto a las relaciones de corte en el área del anticlinal de Picún Leufú (Fig.14), se ha observado que las fracturas de cizalla (FC) generan desplazamientos, aprovechan planos de debilidad y relevos sobre las fracturas tensionales (FA2).

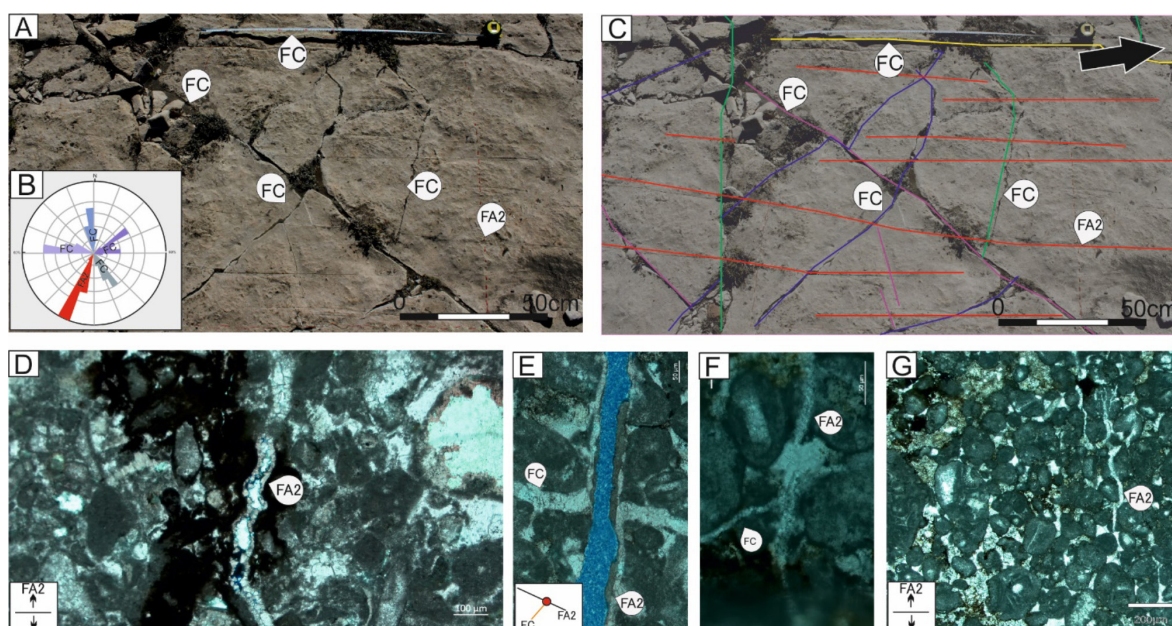


Figura 14. Fracturas discretas y sus orientaciones, además se aprecian las relaciones de corte entre las FC y FA2 en el Anticlinal de Picún Leufú.

SÍNTESIS DE RESULTADOS Y CONSIDERACIONES FINALES

El presente trabajo muestra la caracterización del sistema de fracturas naturales observado en las sedimentitas productoras de la Fm. Quintuco en el Yacimiento de Loma La Lata y la evaluación de las estructuras en potenciales análogos de superficie como la Sierra de la Vaca Muerta y el Anticlinal de Picún Leufú (Fig. 1). Los resultados indican que las fracturas naturales analizadas pueden ser clasificadas según su cinemática en tres grandes grupos: apertura, cierre y cizalla (Pollar y Aydin 1988; Schultz y Fossen 2008). En este sentido se identificaron fracturas de apertura Modo I, en las tres áreas analizadas, en todos los casos con rellenos calcíticos (FA1) mientras que los *sets* FA2 y BPV, de disposición (sub)horizontal, se reconocieron solo en subsuelo. Es importante destacar que FA2 y BPV se encuentran restringidas a la matriz de los floatstones o a estructuras preexistentes (i.e., ZD). A

su vez, en el Yacimiento Loma La Lata y en la Sierra de la Vaca Muerta también se han descripto fracturas de cierre o Modo IV (BC y S). Estas estructuras, según indican los valores de intensidad medidos en perfiles verticales, son las más abundantes en subsuelo y en el afloramiento de la Sierra de la Vaca Muerta, y en ambos casos presentan rellenos o impregnaciones de bitumen lo que imprime mayor grado de importancia para su análisis. En cuanto a la distribución de las bandas de compactación (BC), es importante destacar que tienen mayor presencia y son las estructuras más frecuentes en facies pelíticas-heterolíticas, mientras que las estilolitas están limitadas a las litologías carbonáticas. Junto con las estructuras de cierre (Modo IV), se describieron en el ámbito de Loma La Lata y en la Sierra de la Vaca Muerta estructuras mixtas de cierre y cizalla que presentan un conjunto de cualidades que complejizan el análisis cinemático como molienda, reducción de espacios porales, disolución por presión, desplazamiento de clastos y fracturas subsidiarias. Estas estructuras se clasifican como zonas de deformación (ZD), y las mismas no presentan un plano definido si no que corresponden a una zona en donde se concentran múltiples planos de deslizamiento y compactación (Schultz y Fossen 2008). En ambos casos es característico el relleno y la acumulación de resistatos compuestos por materia orgánica, óxidos y otros componentes insolubles tamaño arcilla. Por último, en los tres sectores analizados se describieron fracturas de cizalla (FC; Modo II), en donde, sobre la base de sus orientaciones espaciales y relaciones de corte, indicarían que su génesis se encuentra vinculada a esfuerzos locales y desarrollada de forma sincrónica con las estructuras tensionales FA2.

El análisis integrado de los tipos de estructuras y las relaciones de corte permite establecer un patrón comparable en los diferentes sectores de la cuenca analizados (Fig. 15). Las relaciones descriptas en el apartado previo indican que tanto las estilolitas horizontales, como las zonas de deformación, tienen una génesis previa a las bandas de compactación. Estas estructuras, según su orientación, se podrían haber generado por compactación por carga litostática. Por otro lado, existe una notable vinculación espacial y genética entre las zonas de deformación y las BPV, siendo estas últimas posteriores a la deformación de las ZD. Al igual que las BPV, las FA1 en ocasiones se encuentran superpuestas a las ZD indicando una génesis posterior. En el caso de las estilolitas verticales, su relación espacial con otras estructuras, indica que serían póstumas a las ZD y S horizontales y que su génesis puede estar vinculada a deformación tectónica. Por último, si bien en el yacimiento Loma La Lata, no existen evidencias permitan definir una relación de corte entre las fracturas discretas FA2, FC y las estructuras de cierre (BC y S) y mixtas (ZD), en los afloramientos de la sierra de la Vaca Muerta, se pudo observar que las fracturas discretas son póstumas a las S y ZD. Este análisis indica que las estructuras asociadas a compactación están relacionadas a los sectores de la cuenca con mayor espesor total acumulado o relacionadas a la historia de soterramiento. La ausencia de estructuras que indiquen compactación en la Dorsal de Huincul se explica por la presencia de secciones condensadas, las cuales tuvieron un impacto menor durante la diagénesis de soterramiento. Este indicio puede ser un punto de correlación que

valide al área del yacimiento Loma La Lata y la Sierra de la Vaca Muerta para analogar los sistemas de fracturas subsuelo-superficie.

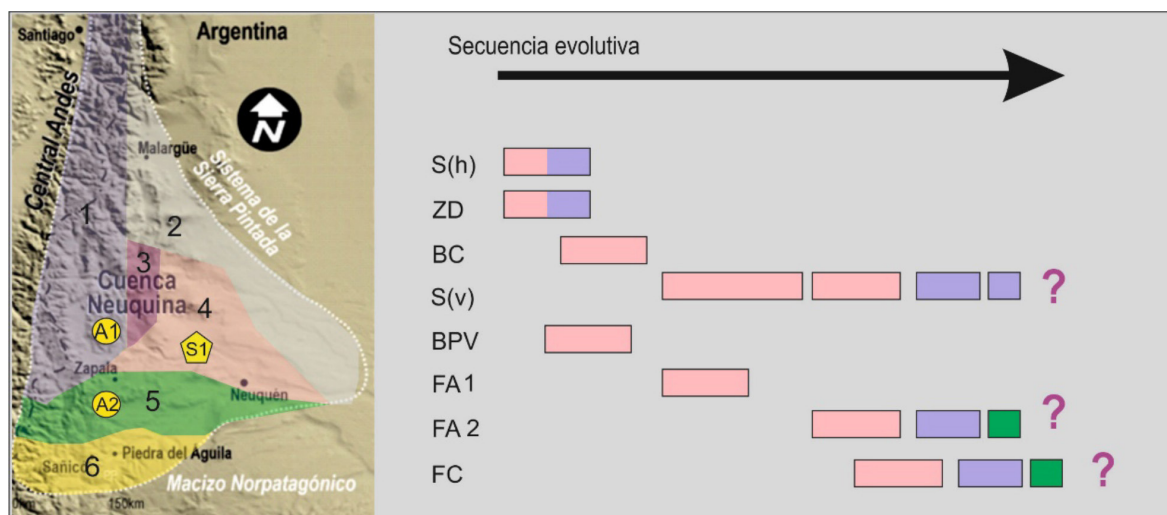


Figura 15. Diagrama temporal propuesto para el timing de las fracturas reconocidas indicando con colores las áreas de la Cuenca Neuquina donde se han reconocido según dominios morfoestructurales: rosa para el Engolfamiento Neuquino, violeta para la Faja Plegada y verde para la Dorsal de Huincul.

Por último, es importante destacar que las estructuras estudiadas no se encuentran dispuestas aleatoriamente dentro de las rocas analizadas y que tanto en los sistemas de subsuelo como de afloramiento se han encontrado correlaciones litológicas y de intensidad de fracturas. Trabajos futuros estarán dirigidos al desarrollo de un modelo litomecánico con el objetivo de evaluar los controles principales de la fracturación, como son: (i) composición y textura de la roca de caja (incluyendo tamaños de grano y porosidad), (i) estratigrafía, contraste mecánico y morfología de los cuerpos rocosos, y (iii) contexto tectónico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen los datos aportados por la compañía YPF junto con el financiamiento del CONICET a través del proyecto PICT-2020- SERIEA-00337. Así como también a los Licenciados Cintia Palacios, Lucas Mon, Gabriela Buchanan y Nayibe Otalora por la colaboración durante los trabajos de campo y/o laboratorio.

REFERENCIAS CITADAS

- Allmendinger, R.W., Cardozo, N.C. y Fisher, D., 2013. Structural Geology Algorithms: Vectors & Tensors. Cambridge University Press, Cambridge.
- Brisson, I. y R. Veiga, 1999. Gira de Campo. Cuenca Neuquina. Provincias de Neuquén y Mendoza. Repsol-YPF. Informe Inédito.

- Casadío, S. A. y Montagna, A., 2015. Estratigrafía de la Cuenca Neuquina. En Casadío S. A., Ponce, J.J., Montagna, A. y Carmona, N. (Eds.) Geología de la Cuenca Neuquina y sus sistemas petroleros: una mirada integradora desde los afloramientos al subsuelo 1ra ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Fundación YPF; Viedma: Universidad Nacional de Río Negro.
- Carozzi, A., Orchuela A. y Rodríguez Schelotto, M. L., 1993. Depositional models of the Lower Cretaceous Quintuco-Loma Montosa Formation, Neuquen Basin, Argentina. *Journal of Petroleum Geology*, 16(4), pp.412-450.
- Correa Luna, C., Yagupsky, D.L. y Likerman, J., 2020. Fracture Network análisis of Yacoraite Formation in the Tres Cruces sub-basin, northwestern Argentina. *Journal of South American Earth Science* 99, 102446, ISSN 0895-9811, doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102446.
- Domínguez, R. F., Leanza, H. A., Fantín, M., Marchal, D y Cristallini, E., 2020, Basin configuration during the Vaca Muerta times, in Daniel Minisini, Manuel Fantín, Iván Lanusse Noguera, and Héctor A. Leanza, eds., *Integrated geology of unconventional: The case of the Vaca Muerta plays, Argentina: AAPG Memoir 121*, pp. 141–162.
- Dunham, R.J., 1962. Classification of Carbonate Rocks According to Depositional Texture. En Ham, W.E., (Eds) *Classification of Carbonate Rocks*, AAPG, Tulsa, pp. 108-121.
- Giacosa, R. E. 2020. Discontinuidades estructurales en las sedimentitas de la Cuenca Neuquina. Fracturas, venas, vetas y bandas de deformación en la faja plegada del Agrio, dorsal de Huincul y dorso de Los Chihuidos, provincia de Neuquén. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Serie de Contribuciones Técnicas Geología N°7, 64 pp. Buenos Aires.
- Hechem, J., 2011. Yacimiento Loma La Lata. En Leanza, h., Arregui, C., Carbone O., Danieli J. y Vallés, J. (Eds) *Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino*, pp. 669-676 Neuquén, Argentina.
- Howell, J., Martinius, A. y Good, T., 2014. The application of outcrop analogues in geological modeling: a review, present status and future outlook. *Geological Society, London, Special Publications*. 387. 1-25. 10.1144/SP387.12.
- Leanza, H.A., 1973. Estudio sobre los cambios faciales de los estratos limítrofes Jurásico - Cretácicos entre Loncopué y Picún Leufú, provincia del Neuquén, República Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 28 (2), pp. 97-132, Buenos Aires, Argentina.
- Leanza, H.A., Hugo, C., Repol, D., González, R., y Danieli, J.C., 2001. Hoja Geológica 3969-I Zapala, escala 1:250.000, provincia de Neuquén. Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 275, pp. 1-133.
- Leanza, H. A., Kietzmann, D. A., Iglesia Llanos, M. P. y Kohan Martínez, M., 2020, Stratigraphic context: Cyclostratigraphy, magnetostratigraphy, and seismic stratigraphy, in Minisini D., Fantín M., Lanusse I.Noguera, y Leanza H. A., (Eds.), *Integrated geology of unconventional: The case of the Vaca Muerta play, Argentina: AAPG Memoir 121*, pp. 39–60.
- Lebinson, F., Turienzo, M., Sánchez, N., Araujo, V. y Dimieri, L.V., 2015- Geometría y cinemática de las estructuras tectónicas en el extremo septentrional de la faja plegada del Agrio, Cuenca Neuquina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 72 (3), pp. 299-313.

- Legarreta, L. y Gulisano, C.A., 1989. Análisis estratigráfico secuencial de la Cuenca Neuquina (Triásico superior-Terciario inferior). En *Cuencas Sedimentarias Argentinas*, Chebli, G.; Spalletti, L., (Eds). Serie Correlación Geológica, Universidad Nacional de Tucumán 6, pp. 221-243. Tucumán, Argentina.
- Legarreta, L., Villar, H. J., Cruz, C. E., Laffitte, G. A. y Varadé, R. 2008. Revisión integrada de los sistemas generadores, estilos de migración-entrapamiento y volumetría de hidrocarburos en los distritos productivos de la Cuenca Neuquina, Argentina. En VII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos (Simposio de Sistemas Petroleros de las Cuencas Andinas).
- Maretto, H., 2005. Trampas asociadas a las Formaciones Quintuco y Lotena. Yacimiento Loma La Lata. Cuenca Neuquina. En Kozlowski, E., Vergani, G. y Boll, A. (Eds) *Las trampas de hidrocarburos en las cuencas productivas de la Argentina*. 6° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG, pp. 271-288, Buenos Aires, Argentina.
- Maretto, H. M., Verzi H. J., y Fernández M. L., 2002. Modelo Prospectivo en carbonatos de la Formación Quintuco, IX Reunión Argentina de Sedimentología, Resúmenes, Córdoba, Argentina, 130 pp.
- Marlats, A., Vizioli, M., Vittore, F. y Licitra, D., 2017. Caracterización geológica y puesta en valor de la Fm. Quintuco. Incremento de reservas y producción adicional al Proyecto Vaca Muerta, en Yacimiento Loma Campana, Cuenca Neuquina. Trabajo técnico en VI Congreso de Producción y Desarrollo de Reservas del IAPG, octubre 2016 en Petrotecnia abril, 2017: 66-75.
- Mauldon, M., Dunne, W.M. y Rohrbaugh Jr., M.B., 2001. Circular scanlines and circular windows: new tools for characterizing the geometry of fracture traces. *J. Struct. Geol.* 23, pp. 247-258.
- Mosquera, A. y Ramos, V.A. 2006. Intraplate deformation in the Neuquén Embayment. In *Evolution of an Andean margin: A tectonic and magmatic view from the Andes to the Neuquén Basin (35°-39°S lat)* Kay, S.M. y Ramos, V.A. (Eds). Geological Society of America Special Paper 407, pp. 7-123.
- Mosquera, A., Silvestro, J., Ramos, V., Alarcón, M. y Zubiri, M., 2011. En Leanza, H., Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J.C. y Vallés, J. (Eds.), *Relatorio Geología y Recursos Naturales de la provincia de Neuquén*, XVIII Congreso Geológico Argentino, 34, pp. 385-398, Buenos Aires.
- Nelson, R., 2001. *Geologic Analysis of Naturally Fractured Reservoirs*, second ed. 2001. Gulf Professional Publishing Co., 332 pp.
- Olivo, M., Schwartz, E. y Veiga, G. D., 2016. Modelo de acumulación y evolución secuencial del intervalo cuspidal de la Formación Quintuco en su área tipo: implicancias para las reconstrucciones paleogeográficas del margen austral de la Cuenca Neuquina durante el Valanginiense. *Andean Geology* 43 (2), pp. 215-239.
- Olmos, M., H. Maretto., D. Lasalle., O. Carbone y C. Naidés, 2002. Los reservorios de la Fm. Quintuco. En Schiuma, M., Hinterwimmer, G. y Vergani, G. (Eds) *Rocas Reservorio de las cuencas productivas de la Argentina*. V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos: 359-382.
- Olson, J. E., Laubach, S. E., y Lander, R. H. 2009. Natural fracture characterization in tight gas sandstones: Integrating mechanics and diagenesis. En *boletín AAPG*, 93(11), 1535-1549

- Pollard, D. D., y Aydin A., 1988. Progress in understanding jointing over the past century: Geological Society of America Bulletin, v. 100, p. 1181-1204.
- Rohrbaugh Jr., M.B., Dunne, W.M. y Mauldon, M., 2002. Estimating fracture trace intensity, density, and mean length using circular scan lines and windows. En boletín AAPG 86 (12), 2089-2104.
- Santangelo, A. 2002. Base de datos coronas e imágenes de la Formación Quintuco. Informe interno inédito, YPF.
- Schwarz, E., Spalletti, L.A. y Howell, J.A. 2006. Sedimentary response to a tectonically induced sea level fall in a shallow backarc basin: the Mulichinco Formation (Lower Cretaceous), Neuquén Basin, Argentina. Sedimentology 53: 55-81.
- Schultz, R. y Fossen, H., 2008. Terminology for structural discontinuities. En boletín de AAPG 92. 853-867. 10.1306/02200807065.
- Tucker, M. E., 2003. Sedimentary Rocks in the Field, 3rd ed. The Geological Field Guide Series. ISBN 0 470 85123 6. Geological Magazine. 142. 226 - 226. 10.1017/S001675680536078X.
- Weaver C., 1931. Paleontology of the Jurassic and Cretaceous of west central Argentina. Memoir University Washington 1: 1-469. Seattle.
- Zamora Valcarce, G., Zapata, T. y Ramos, V., 2011. La faja plegada y corrida del Agrio. En Leanza, H., Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J.C. y Vallés, J. (Eds.), Relatorio Geología y Recursos Naturales de la provincia de Neuquén, XVIII Congreso Geológico Argentino, 32: 367-374, Buenos Aires.
- Zapata, T. y Folguera, A., 2005. Tectonic evolution of the Andean Fold and Thrust Belt of the southern Neuquén Basin, Argentina. En Veiga G.D., Spalletti, L.A., Howell, J.A. y Schwartz, E. (Eds.), The Neuquén Basin: A case study in sequence stratigraphy and basin dynamics. The Geological Society, Special Publication 252: 37-56.