

## ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN TECTÓNICA Y MAGMÁTICA Y SU INFLUENCIA EN LOS RESERVORIOS FRACTURADOS ÍGNEOS DEL SECTOR SUR MENDOCINO DE LA CUENCA NEUQUINA

Bárbara Lapcak<sup>1,3</sup>, Lucrecia Frayssinet<sup>1,2</sup>, Juan B. Spacapan<sup>2</sup>, Gerardo N. Páez<sup>1,3</sup>, Olivier Galland<sup>4</sup>

1: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas. (CONICET). barbaralapcak@gmail.com, gerardo.paez.unlp@gmail.com

2: YPF-Tecnología(Y-TEC). lucrecia.frayssinet@ypftecnologia.com, juan.b.spacapan@ypftecnologia.com

3: Instituto de Recursos Minerales (INREMI)

4: The NJORD Centre, Department of Geosciences, University of Oslo. olivier.galland@geo.uio.no

Palabras clave: Filones Capa, Estructura, Fracturas, Sistema Petrolero

### ABSTRACT

The existence of intrusive complexes in sedimentary basins has been documented in different parts of the world. Many times, they intrude in rocks rich in organic matter, which can result in maturation, as well as generating fluid migration pathways, hydrocarbon traps or act as naturally fractured reservoirs.

The main goal of this work is to understand the temporal relationship between deformation and emplacement of the igneous rocks. The study was carried out in the southern part of Mendoza Province (north of Neuquen basin), more strictly in Loma Alta structure where there are igneous intrusions located in the Neuquén Group and Agrio - Vaca Muerta Formations. The structure is characterized by the Loma Alta anticline and the Vaca Muerta triangular zone. The identification and modeling of intrusives was carried out using seismic and borehole data. Structural sections were made in order to observe the growth of the anticline structure of Loma Alta and together with the radiometric ages of the intrusives, it was concluded that the maximum deformation of the area is coincident with the intrusion of the igneous bodies. Then, using the thin sections of the samples, the existence of two types of joints was determined: cooling joints and tectonic joints, which are important because they can function as fractured igneous reservoirs or as fluid migration pathways and subsequent loading of reservoirs.

### INTRODUCCIÓN

La existencia de complejos intrusivos en cuencas sedimentarias ha sido documentada en distintas partes del mundo (Magee *et al.* 2016). Este trabajo tiene como objetivo complementar el estudio realizado por Spacapan *et al.* 2018, haciendo hincapié en la relación temporal entre la estructura de Loma Alta y la intrusión de los cuerpos ígneos. Para ello además de hacer un estudio

detallado de la evolución tectónica y se utilizó la datación Ar-Ar de un cuerpo ígneo intruído en la base de la Formación Agrio.

Los complejos ígneos intrusivos tienen una influencia importante en la temperatura de la cuenca y en el flujo de fluidos tanto durante el emplazamiento de los mismos como durante el relleno y subsidencia de la cuenca (Senger *et al.* 2017). Además, tienen otros efectos en los sistemas petroleros (e.g. Delpino y Bermúdez 2009; Farooqui *et al.* 2009; Schutter 2003; Senger *et al.* 2017). Por ejemplo, si son emplazados en rocas ricas en materia orgánica, el impacto térmico producido puede generar la maduración de la misma (e.g. Aarnes *et al.* 2010, Spacapan *et al.* 2017, 2018; Svensen *et al.* 2017; Sydnes *et al.* 2018). También, la concentración de esfuerzos y sobrepresión de los fluidos generada durante el emplazamiento producen la fracturación de la roca de caja y posterior migración de fluidos (e.g. Cartwright *et al.* 2007; Delpino *et al.* 2014; Rateau *et al.* 2013), el emplazamiento de intrusivos de tipo *saucer shaped sill* pueden generar el domamiento de la roca de caja generando estructuras (e.g. Galland, 2012; Montanari *et al.* 2017; Schmiedel *et al.* 2019) que pueden funcionar como trampas de hidrocarburos (e.g. Orchuela *et al.* 2003; Jackson *et al.* 2013; Schmiedel *et al.* 2017). Por último, los intrusivos pueden fracturarse por procesos primarios de enfriamiento y efectos tectónicos secundarios y conformar reservorios ígneos en sí mismos (e.g. Rodríguez Monreal *et al.* 2009; Witte *et al.* 2012; Spacapan *et al.* 2020; Rabbel *et al.* 2021).

Para el presente trabajo se escogió un sector de la cuenca neuquina surmendocina donde existen intrusiones ígneas tanto en rocas generadoras, como la Formación Vaca Muerta y Agrio del Grupo Mendoza, y en rocas sedimentarias continentales del Grupo Neuquén (Fig. 1a).

El objetivo del trabajo es analizar las interrelaciones entre los procesos de deformación regional y el emplazamiento de los complejos de intrusivos presentes en el subsuelo del Valle Río Grande. La posible sincronidad entre los eventos de emplazamiento magmático y los eventos compresivos regionales resulta de particular interés, ya que estos últimos habrían facilitado la circulación de fluidos y la posterior carga de los reservorios fracturados de origen ígneo, ubicados en las Formaciones Vaca Muerta y Agrio y en el Grupo Neuquén.

## MARCO GEOLÓGICO

El área de estudio, conocida como Valle del Río Grande (Fig. 1a), se encuentra ubicada en el sur de la provincia de Mendoza entre los 36°S y 36,5°, ocupando la porción septentrional de la Cuenca Neuquina. Se trata de una depresión morfológica de orientación N-S, limitando al oeste con la Sierra Azul y al este con las Sierra de Palauco.

Forma parte de la Cordillera Principal (Yrigoyen, 1972) y su estratigrafía incluye un basamento permo-triásico constituido por plutonitas y volcanitas del Grupo Choiyoi, cubierto por depósitos sedimentarios jurásicos, cretácicos y paleógenos preorogénicos y niveles neógenos sinorogénicos (Legarreta *et al.* 1993; Legarreta y Uliana, 1999).

Este sector se caracteriza por presentar un estilo estructural que combina anticlinales con participación de basamento (en algunos casos relacionados a inversión tectónica), que resuelven los acortamientos en estructuras de cubierta mediante el desarrollo de zonas triangulares y fajas diapíricas (Ploszkiewicz y Gorroño 1988, Kozłowski *et al.* 1993, Manceda y Figueroa 1995).

La zona de estudio está representada por la estructura Loma Alta forma parte del sector central de la Cordillera Principal, y pertenece a la denominada Faja Plegada y Corrida de Malargüe. La misma se encuentra deformada a partir de corrimientos y retrocorrimientos, tanto de piel fina como de piel gruesa, de rumbo N-S a NNE-SSO, y fallas inversas de alto ángulo y rumbo NO-SE a NNO-SSE.

La deformación comenzó a partir de la inversión tectónica del *rift* mesozoico, generada por los movimientos compresivos terciarios.

## ESTRATIGRAFÍA

La historia geológica general de la cuenca se puede resumir en tres estadios principales (Howell *et al.* 2005; Vergani, 2005): un primer estadio de *rift* o *synrift* (Triásico tardío-Jurásico temprano), un estadio de subsidencia termal (*sag*) o *postrift* (Jurásico temprano tardío- Cretácico temprano) y un último estadio de antepaís (Cretácico tardío-Neógeno) asociado al levantamiento de la Cordillera de los Andes.

En el caso de la zona de estudio, la cuenca se originó como un graben aislado durante el Triásico tardío conformando la subcuenca de Valle Río Grande, la cual fue rellenada en un inicio por depósitos continentales y volcánoclasticos de *synrift* del Ciclo Precuyano (Carbone *et al.* 2011). Durante la etapa de *sag*, tiene lugar la primera ingresión marina (Grupo Cuyo) desarrollada en un ambiente de retroarco con la depositación de las pelitas de la Formación Los Molles, seguida por las areniscas y pelitas de la Formación Lajas. Luego se deposita el Grupo Lotena durante el Jurásico medio tardío- Jurásico tardío, con las rocas marinas de la Formación Lotena continuando con las calizas de la Formación La Manga y las evaporitas de la Formación Auquillo. En el Jurásico tardío, tiene lugar la discontinuidad Araucaniana y por encima de ella se deposita la Formación Tordillo, con sedimentos fluviales y lacustres. Entre el Jurásico tardío y el Cretácico temprano se deposita el Grupo Mendoza, comenzando con las pelitas bituminosas de la Formación Vaca Muerta de edad Tithoniana-Valanginiana, las calizas de la Formación Chachao, de edad Valanginiana media y los depósitos marinos de la Formación Agrio, de edad Valanginiana tardía-Barremiana temprana. Luego el ambiente pasó a ser marino restringido, depositándose el yeso de la Formación Huitrín y los sedimentos continentales fluviales y lacustres de la Formación Rayoso (Vergani *et al.* 1995).

A fines del Cretácico, el régimen comenzó a ser compresivo, produciéndose la inversión de las fallas normales del Triásico y la reactivación de fallas de basamento dando lugar a la formación de la Faja Plegada y Corrida de Malargüe (Kozłowski *et al.* 1993; Manceda y Figueroa 1995; Giambiagi *et al.* 2005; Folguera *et al.* 2006). Se depositaron niveles continentales del Grupo

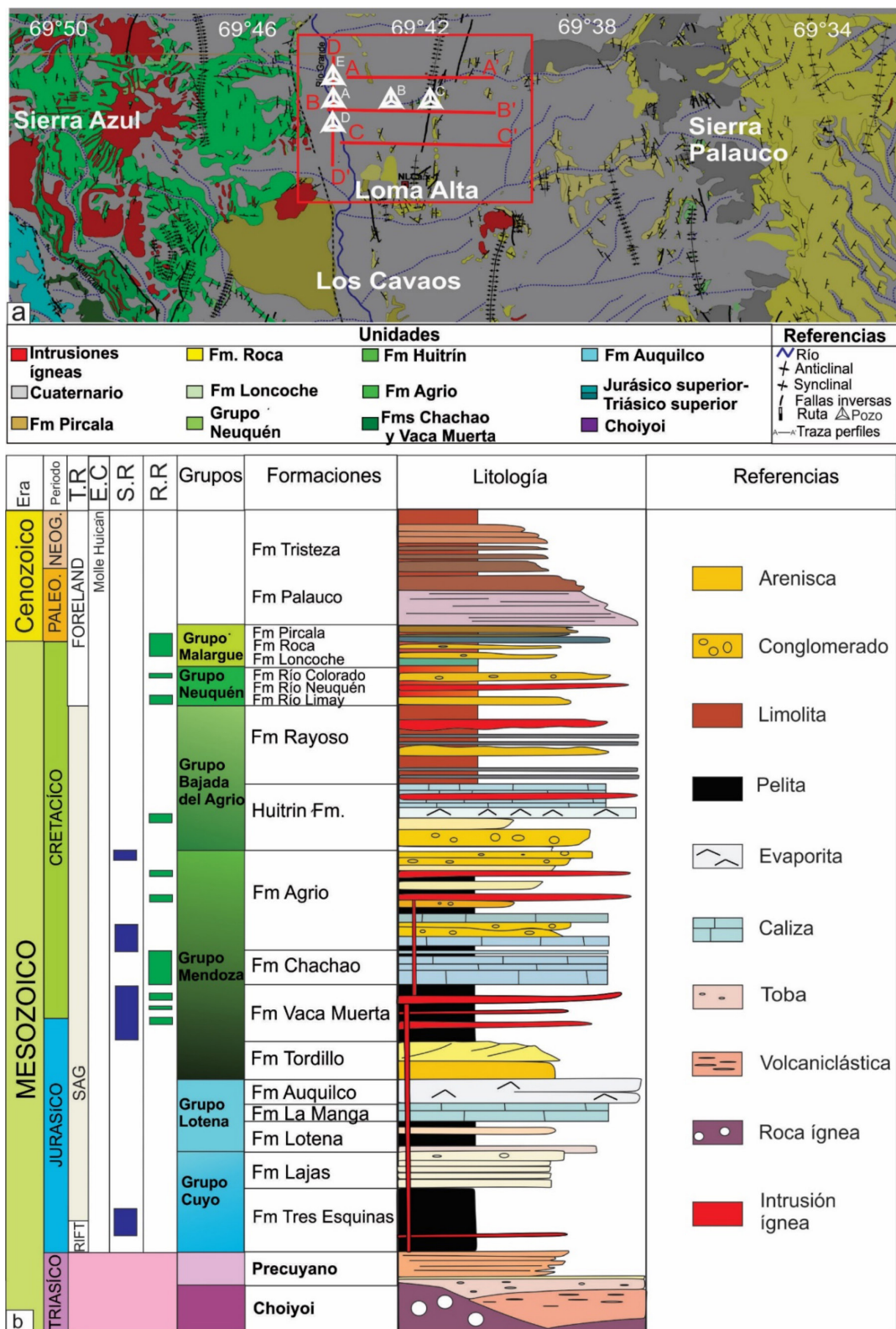


Figura 1 (a) Mapa geológico de Valle de Río Grande mostrando la ubicación de la zona de estudio (rectángulo rojo). (b) Columna estratigráfica de la Cuenca Neuquina en el sur de la provincia de Mendoza. Los *sills* (en rojo) fueron emplazados principalmente en las rocas madres de la cuenca, como son Vaca Muerta y Agrio, siendo importantes también en el Grupo Neuquén. Modificado de Spacapan *et al.* (2020).

Neuquén y subsecuentemente los depósitos marinos del Grupo Malargüe, asociados a la ingresión Atlántica, depositados por encima de la discordancia Intracampaniana (Fig. 1b).

La principal etapa de levantamiento tectónico ocurrió durante el Mioceno Medio, cuando se formaron los anticlinales de Loma Alta, Malargüe, Los Cavaos, Palauco y Ranquil Co. El levantamiento de la Sierra Azul comenzó hacia fines del Cretácico (Folguera *et al.* 2015), siendo más importante en el Mioceno medio (Silvestro y Atencio, 2009).

Este periodo se caracteriza por la formación de cuencas sinorogénicas asociadas a ciclos tectonovolcano-sedimentarios (Combina y Nullo 2011), de los cuales se reconocen dos ciclos principales: el ciclo eruptivo Molle de edad Oligoceno Tardío- Mioceno medio y el ciclo eruptivo Huincán de edad Mioceno tardío- Plioceno. Se caracterizan por un volcanismo de gran extensión e intrusiones magmáticas en la secuencia sedimentaria (Combina y Nullo 2011; Kay *et al.* 2006).

## SISTEMA PETROLERO

Los primeros descubrimientos de acumulaciones de petróleo en cuerpos ígneos en el área de Valle Río Grande fueron reportados por Perea *et al.* (1984). Luego, Schiuma (1994) describió estos reservorios ígneos como intrusiones tabulares andesíticas emplazadas concordantemente en la roca huésped, siendo en general pelitas de las Formaciones Vaca Muerta y Agrio.

Las principales rocas madre de la cuenca Neuquina son las Formaciones Vaca Muerta de edad Tithoniana y la Formación Agrio, de edad Valanginiana-Barremiana.

En el área de estudio, el emplazamiento de las intrusiones magmáticas en dichas formaciones promovió el aumento de maduración de las mismas (Rodríguez Monreal *et al.* 2009; Alberdi-Genolet *et al.* 2013; Spacapan *et al.* 2018) y además constituyen los principales reservorios fracturados (Schiuma, 1994; Witte *et al.* 2012). Se caracterizan por presentar fracturas verticales y horizontales producidas como resultado del enfriamiento de estos cuerpos (Bermúdez y Delpino 2008; Witte *et al.* 2012; Rabbell *et al.* 2021). Durante los últimos estadios del enfriamiento, los fluidos hidrotermales circulan a través de estas fracturas permitiendo que ciertos minerales precipiten como venas y vetillas con relleno hidrotermal (principalmente carbonatos o ceolitas). La actividad tectónica posterior reactiva estas fracturas y genera nuevas, produciendo un aumento en la transmisibilidad de los fluidos y la capacidad de reservorio de los *sills* (Witte *et al.* 2012).

## TIPOS DE FRACTURAS EN LAS INTRUSIONES ÍGNEAS

Existen dos tipos principales de fracturas en las intrusiones ígneas en la zona de estudio: las fracturas generadas por el enfriamiento del cuerpo ígneo y aquellas generadas por eventos tectónicos posteriores (Spacapan *et al.* 2020). Las primeras se generan por la caída del stress térmico y están asociadas al primer pulso de migración de los hidrocarburos. Estas fracturas se

encuentran, además, cementadas por ceolitas en forma de agregados fibrosos radiales o aciculares y calcita tardía, que cristaliza rellenando el espacio poral disponible entre las ceolitas. Por otro lado, el segundo grupo de fracturas, responden a eventos tectónicos posteriores y favorecen pulsos secundarios de migración de fluidos y carga del reservorio ígneo. Estas, están rellenas únicamente por un pulso de cemento de calcita (Spacapan *et al.* 2020).

## METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

Para analizar los procesos de deformación regional y su vinculación con el emplazamiento de una serie de complejos de intrusivos identificados en la zona de estudio, se utilizó información proveniente de pozos y sísmica cedidos por YPF SA. Para esto se contó con sísmica 3D junto con legajos y perfiles de 6 pozos, llamados pozo A, B, C, D y E. Los pozos A, B y C ubicados a lo largo de una transecta E-W y los pozos E, A y D en una transecta N-S (Fig. 1a).

Además, fueron brindados cortes delgados de los intrusivos para poder analizarlos al microscopio óptico junto con las fracturas y cementos. Por último, se contó, también, con edades radiométricas de  $^{39}\text{Ar}$ - $^{40}\text{Ar}$  en biotitas de los cuerpos ígneos, con el fin de poder vincular la edad de emplazamiento con la edad de la deformación principal registrada de la zona.

Para analizar la evolución tectónica de la zona, se utilizó el software MOVE 2017. Este permitió, en primer lugar, hacer una interpretación sísmica de las principales unidades e intrusivos presentes, controlada luego con la información proveniente de los pozos (Fig. 2). Una vez trazados los principales horizontes de las formaciones y las fallas, se utilizó la herramienta del programa: Move on Fault 2D, la cual permite generar modelos “hacia adelante” o “*forward models*”, teniendo en cuenta los distintos rechazos de las fallas. En este trabajo se usaron tres modelos: el modelo de *Fold bent fold* (para el caso de la falla que genera la estructura de Loma Alta, con un rechazo de 600 m), *Simple shear* (para la falla de Vaca Muerta, con un rechazo de 100 m) y *Trishear* (para la falla de basamento).

Mediante la aplicación de este modelo se obtuvieron tres secciones estructurales, para diferentes periodos de tiempo: una sección previa a la estructuración en la zona, otra cuando se originó el anticlinal de Loma Alta, y por último una sección donde se observa la zona triangular de Vaca Muerta, la falla de basamento que levanta las unidades del bloque este y la intrusión de los cuerpos ígneos.

Otro de los objetivos del presente trabajo fue el de modelar los intrusivos principales para caracterizar su geometría. Para ello, se utilizó el *software* PETREL, en el cual se cargó la sísmica 3D y la información de los pozos (principalmente fueron usados los perfiles de resistividad y rayos *gamma*). En primera instancia, se modelaron los intrusivos del Grupo Neuquén y los intrusivos de las Formaciones Agrio y Vaca Muerta, dibujando el horizonte en cada una de las secciones x-line, teniendo en cuenta que los intrusivos se caracterizan por tener alta reflectividad en la sísmica. En los

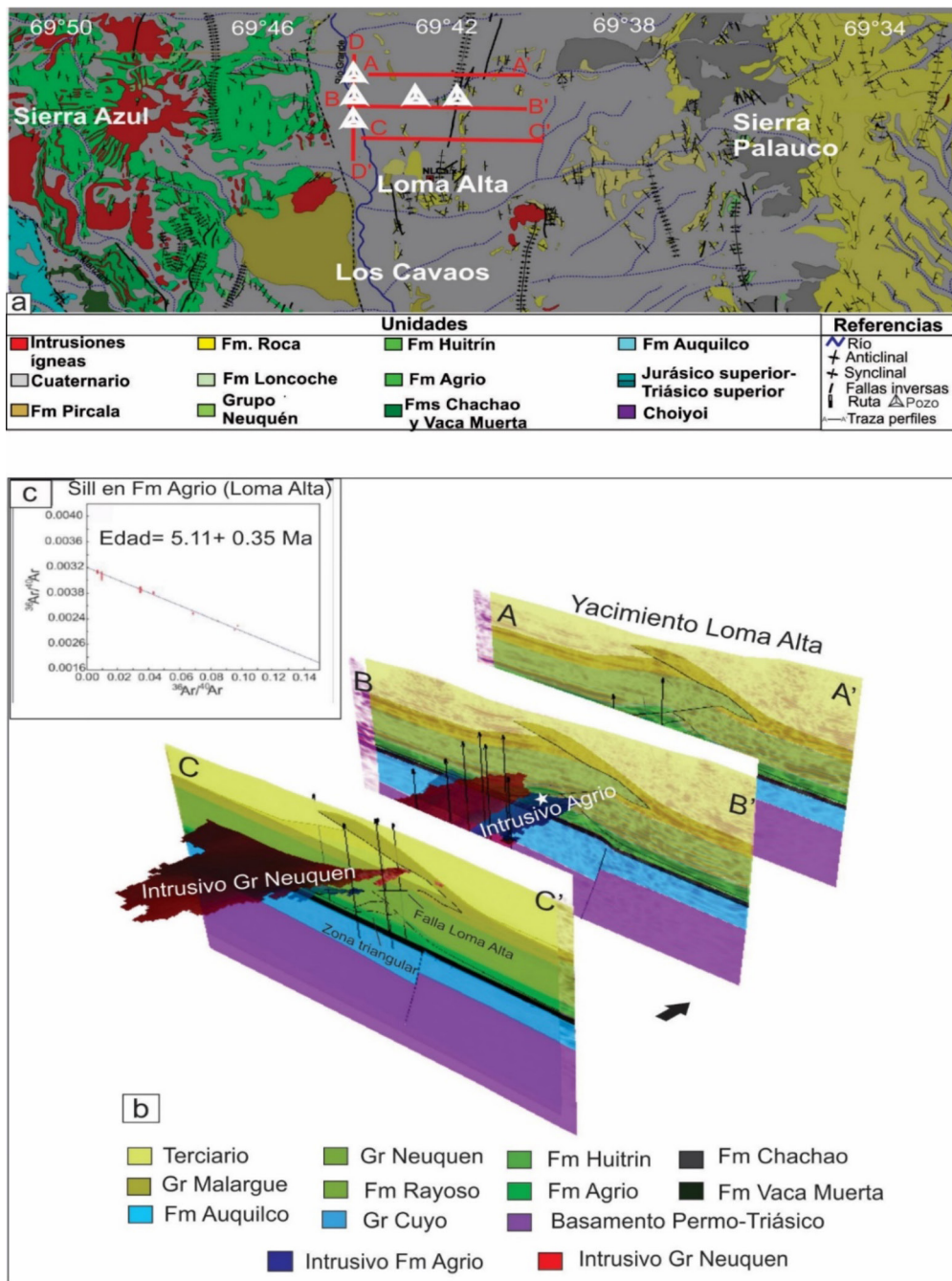


Figura 2. (a) Ubicación de secciones en el mapa geológico de la zona (b) Imagen 3D donde se muestra la estructura de la zona en tres secciones de orientación E-W y los intrusivos del Grupo Neuquén y de la Formación Agrio. (c) Edad Ar-Ar obtenida del sill presente en la base de la Formación Agrio.

perfiles de pozos, los *sills*, muestran bajos valores de rayos *gamma* y muy altos valores de resistividad, que se acentúan por el contraste con la roca de caja (Spacapan *et al.* 2018). Para corroborar la geometría modelada a partir de la sísmica, con los perfiles de resistividad y rayos *gamma* de 3 pozos se hizo una correlación donde se puede observar la morfología y espesor de los mismos.

Por último, se analizaron los cortes delgados de los intrusivos, al microscopio óptico, con el fin de determinar los tipos de fracturas presentes, sus relaciones de corte y cementos. Para ello se realizó un mosaico fotográfico de los cortes delgados y se los analizó microscópicamente utilizando un microscopio petrográfico.

## RESULTADOS

A partir de la interpretación de la sísmica y la información de los pozos se obtuvo una imagen 3D donde se observa la estructuración de la zona y la geometría de los intrusivos presentes (Fig. 2a). En la Figura 2b se presenta la edad del intrusivo en la base de la Formación Agrio, que dio  $5.11 \pm 0.35$  Ma.

## EVOLUCIÓN ESTRUCTURAL

En las 3 secciones estructurales transversales realizadas (Fig. 7), se puede observar la evolución estructural de la zona de estudio desde 10 Ma hasta el Mioceno-Plioceno, donde ocurrió la intrusión de los cuerpos ígneos.

Los perfiles interpretados tienen una orientación W-E y las estructuras fueron construidas considerando los rechazos de cada una de las fallas, utilizando la metodología descripta. El nivel de despegue modelado para la estructura de Loma Alta corresponde a las pelitas de la Formación Agrio, mientras que, para la zona triangular de Vaca Muerta, el nivel de despegue lo constituye el yeso de la Formación Auquilco. Los espesores considerados fueron los obtenidos a partir de la información de los pozos.

Como puede observarse en la Figura 2, se trata de una estructuración de piel gruesa con participación de basamento y una vergencia general hacia el Este, donde se destaca una zona triangular de doble vergencia.

Existe un consenso generalizado en señalar que la deformación compresiva en la región se habría iniciado hacia fines del Cretácico, así como también la existencia de una segunda etapa de compresión que habría ocurrido durante el Mioceno (Groeber 1929; Cobbold y Rossello 2003; Ramos y Kay 2006; Folguera *et al.* 2006).

## MODELADO DE INTRUSIVOS

A partir de la interpretación sísmica y de la información de los perfiles de pozos, se ha modelado e identificado un intrusivo en el Grupo Neuquén con forma de “palangana” o *saucer-shaped sill* (Fig. 3 y Fig. 5a). Por otra parte, en las Formaciones Agrio y Vaca Muerta fueron reconocidos varios intrusivos, sin embargo, se modelaron solo dos de ellos, pues presentaban los mayores

espesores. Los mismos, son mayormente concordantes con la estratificación y presentan forma tabular por lo que fueron clasificados como filones capas o *sills* (Fig. 4). Además de las diferencias en cuanto a la geometría de los cuerpos, puede destacarse también el mayor espesor del intrusivo del Grupo Neuquén.

En la Figura 5 se puede ver, además, la correlación entre los pozos D, A y E, realizada utilizando los perfiles de rayos *gamma* y resistividad. A partir de la correlación, se comprobó la geometría, en la sección *inline*, de los intrusivos modelados, con espesores de 40-50 m para el intrusivo del Grupo Neuquén, que disminuye hacia el N, y con espesores menores, de 15-20 m, para los intrusivos de las Formaciones Agrio y Vaca Muerta, que mantienen un espesor relativamente constante.

Tanto en la Figura 3b como en la Figura 4b, puede observarse la relación que existe entre los intrusivos estudiados y la estructuración del área, donde se nota que los intrusivos siguen la geometría general de la estructura, y en su mayoría se encuentran en el bloque colgante de la misma.

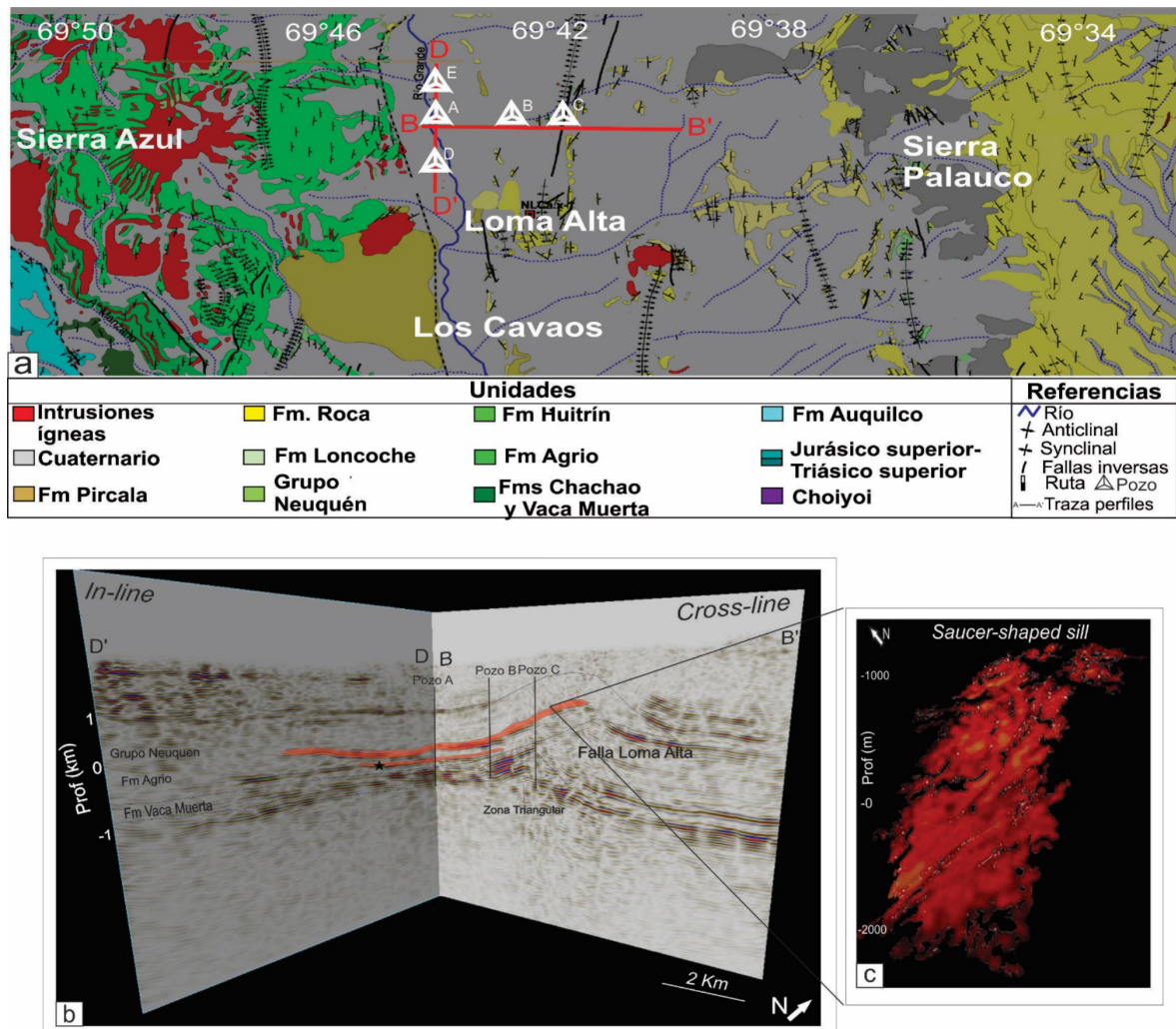


Figura 3. (a) Ubicación de secciones ortogonales y pozos. (b) Secciones ortogonales a lo largo del cubo sísmico 3D del área de estudio mostrando el intrusivo estudiado en el Grupo Neuquén y el intrusivo identificado en la base de la Formación Agrio. (c) Modelado 3D del saucer-shaped sill presente en el Grupo Neuquén.

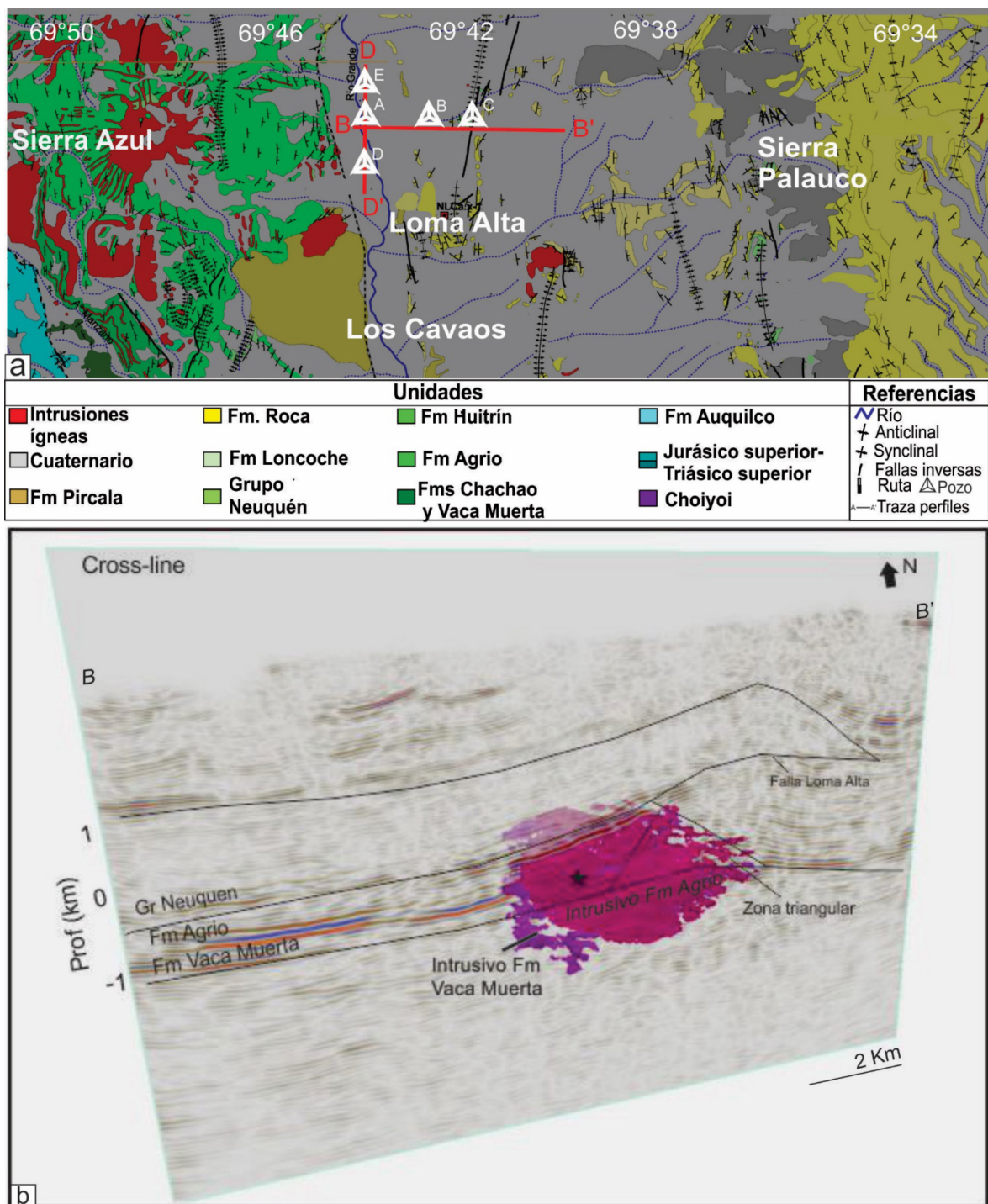


Figura 4. (a) Ubicación de línea sísmica. (b) Línea sísmica cross-line con orientación E-W mostrando la morfología en 3D del intrusivo presente en la base de la Formación Agrio (Fig. 3) y un intrusivo en Formación Vaca Muerta. Nótese la morfología tabular concordante con las capas sedimentarias de ambos cuerpos.

Por último y a partir del análisis de los cortes delgados de los intrusivos, se determinó que se tratan de filones de composición andesítica. Una de las muestras analizada (Fig. 6b) presenta una

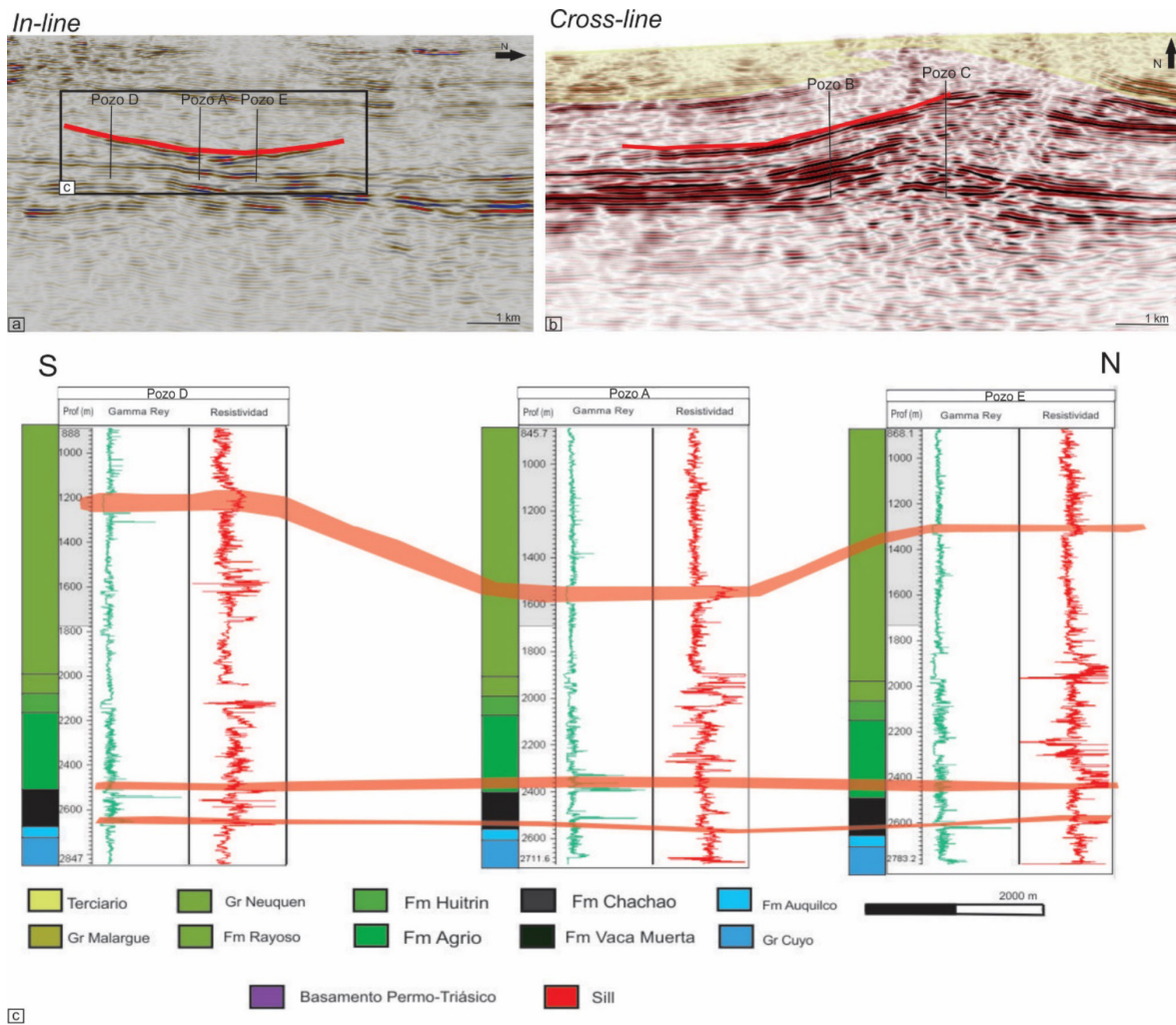


Figura 5. (a) Imagen sísmica in-line, donde se observa la geometría de “palangana” del intrusivo del Grupo Neuquén. (b) Imagen sísmica cross-line, donde se observa cómo el intrusivo copia la forma de la estructura anticlinal. (c) Correlación de los pozos D, A y E a partir de los perfiles de rayos *gamma* y resistividad, en una transecta N-S que muestra la geometría y continuidad de los intrusivos estudiados.

fractura generada durante el enfriamiento del cuerpo ígneo, donde se reconoce un relleno parcial de ceolitas y calcita tardía y que constituye la porosidad primaria del filón.

Mientras que en otra de las muestras analizadas (Fig. 6c) fue posible observar la relación de corte entre dos fracturas. En este caso, la fractura por enfriamiento se halla cortada y desplazada por una fractura tectónica, la cual presenta únicamente cemento de calcita y está asociada a la porosidad secundaria del filón, de manera similar a lo planteado por Bermúdez y Delpino, 2008. Los eventos tectónicos pueden producir nuevas fracturas o reactivar las fracturas columnares incrementando la porosidad secundaria y promoviendo la migración de hidrocarburos desde o hacia el intrusivo (Witte *et al.* 2012).

A continuación, en la figura 6a se puede observar estructuración actual de la zona de estudio con sus principales estructuras e intrusivos y en las figuras 6b y 6c las fracturas presentes.

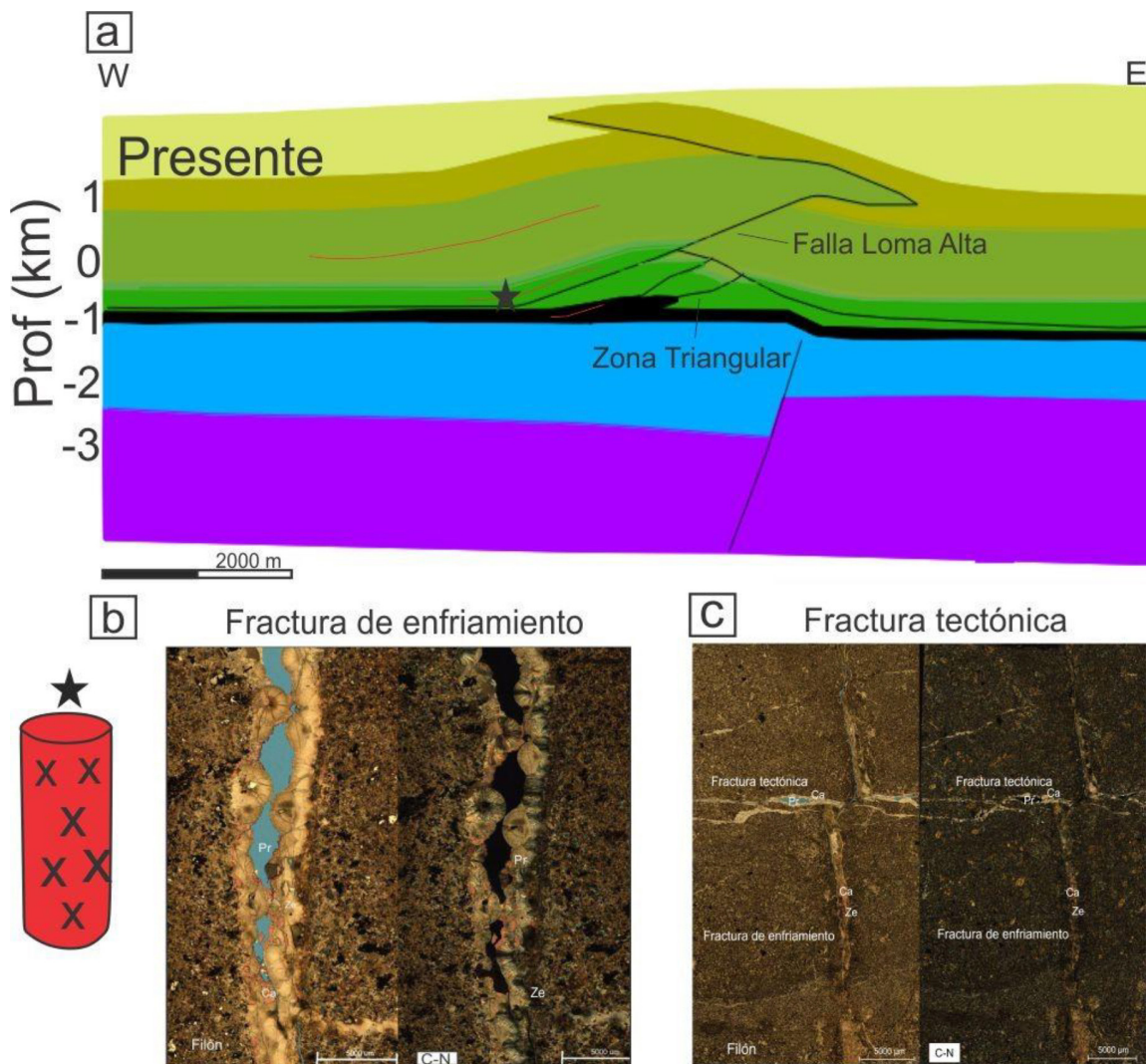


Figura 6. (a) Sección estructural E-W. Fotografías al microscopio petrográfico un filón presente en la Fm Agrio, mostrando los dos tipos de fracturas reconocidas en este trabajo. (b) Fractura de enfriamiento con relleno de ceolitas y calcita tardía (c) Fractura tectónica con relleno de calcita cortando la fractura de enfriamiento.

## CONCLUSIONES

Del análisis realizado, en primer lugar, es posible concluir que existen dos geometrías contrastantes de intrusivos en la zona del anticlinal de Loma Alta. Por un lado, un intrusivo con geometría de “palangana” o *saucer-shaped sill* en el Grupo Neuquén, y dos intrusivos tabulares concordantes a la estratificación clasificados como filones capa o *sills*, en las Formaciones Agrio y Vaca Muerta. Estos intrusivos están asociados a otros, formando “*clusters sills*”, los cuales se ubican en las zonas más deformadas (Spacapan *et al.* 2020).

Otra cuestión a resaltar es la coincidencia entre la geometría de los intrusivos y la geometría de la estructura Loma Alta. Los intrusivos parecen seguir la forma del anticlinal (Fig. 7). Esto es

fácilmente observable en la sección crossline (perpendicular a la estructura principal), mientras que en la sección *inline*, se destaca la geometría de los intrusivos (descrita anteriormente). En la Figura 7, también pueden observarse las fracturas presentes en el filón de la Formación Agrio, en cada estadio de la evolución tectónica. Los intrusivos del Grupo Neuquén y de la Formación Agrio se hallan en el bloque colgante de la estructura, mientras que el de la Formación Vaca Muerta lo hace en la zona triangular homónima. Debido a la complejidad de la geometría de los intrusivos asociados a las fajas plegadas y corridas, podría sugerirse una nueva clasificación partiendo de la realizada por Planke *et al.* 2005, combinando la geometría de *saucer shaped sill* con la geometría del anticlinal (Fig. 8b).

Según Folguera *et al.* 2015 la exhumación de la región andina entre los 35°30' y 37° de latitud sur, ocurrió en dos etapas, siendo más importante la segunda etapa de edad Miocena (Fig. 8a). Por otro lado, las edades de emplazamiento de los intrusivos de la zona son en su mayoría Miocenas (Zanella *et al.* 2015) y el intrusivo de la base de la Formación Agrio, datado en este trabajo, de edad de 5.11 +/- 0.35 Ma, se ubica en el límite Mioceno-Plioceno.

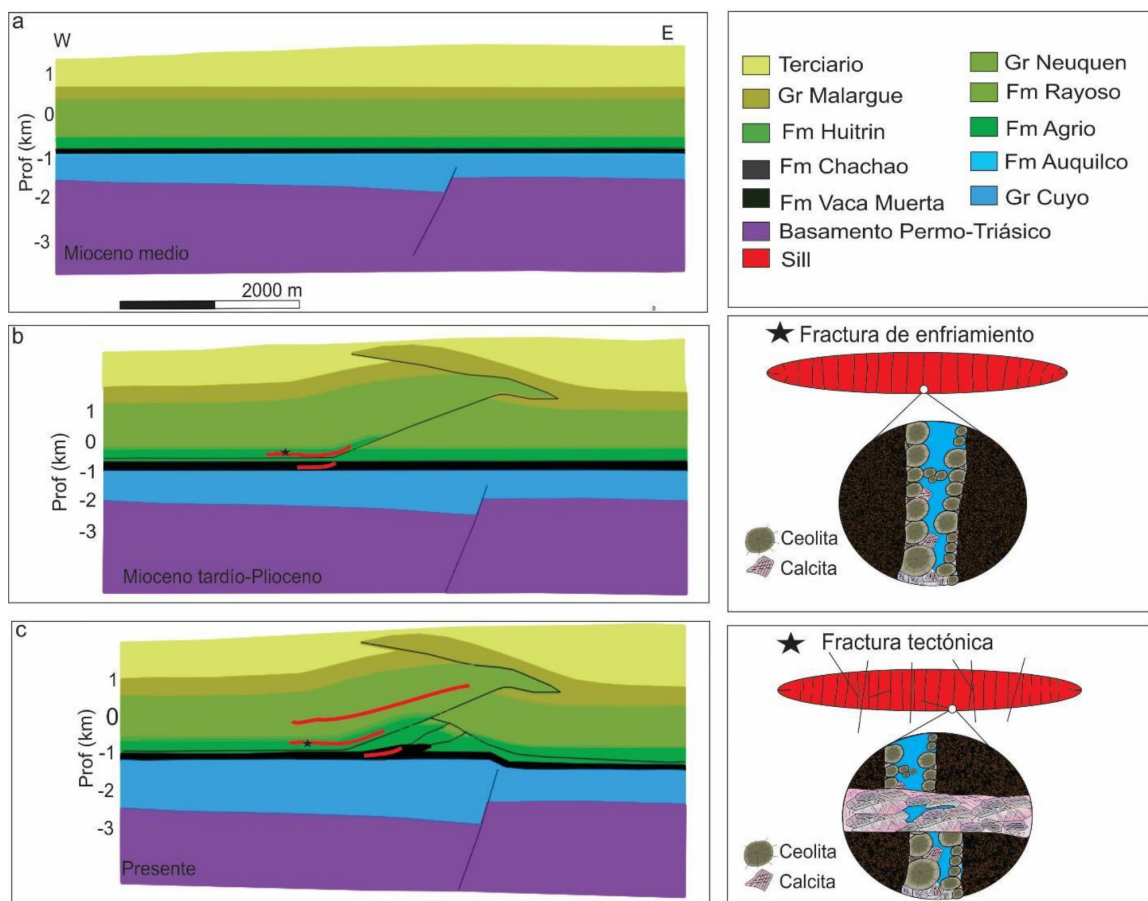


Figura 7. (a) Evolución estructural desde el Mioceno medio hasta el presente. (a) Estructuración en el Mioceno medio. (b) Estructuración en el Mioceno tardío- Plioceno con el intrusivo de la base de la Formación Agrio y el intrusivo de la Formación Vaca Muerta y el esquema donde se observa el fracturamiento por enfriamiento. (c) Estructuración actual con los intrusivos presentes y fracturamiento tectónico posterior.

A partir de estas dataciones podemos concluir que el magma pudo aprovechar las fallas como vías de migración e intruirse en parte contemporáneamente a la generación de la estructuración, o inmediatamente posterior a la misma, como es en el caso de estudio (Fig. 8a).

Finalmente, es importante estudiar el tiempo en el cual se intruyeron los cuerpos ígneos y su relación con la estructuración del área, al momento de evaluar el potencial hidrocarburífero del sistema petrolero presente. Esto es debido a que, dichos cuerpos pueden aumentar la madurez térmica de las rocas madre, como también generar vías de migración e incluso constituir reservorios en sí mismos.

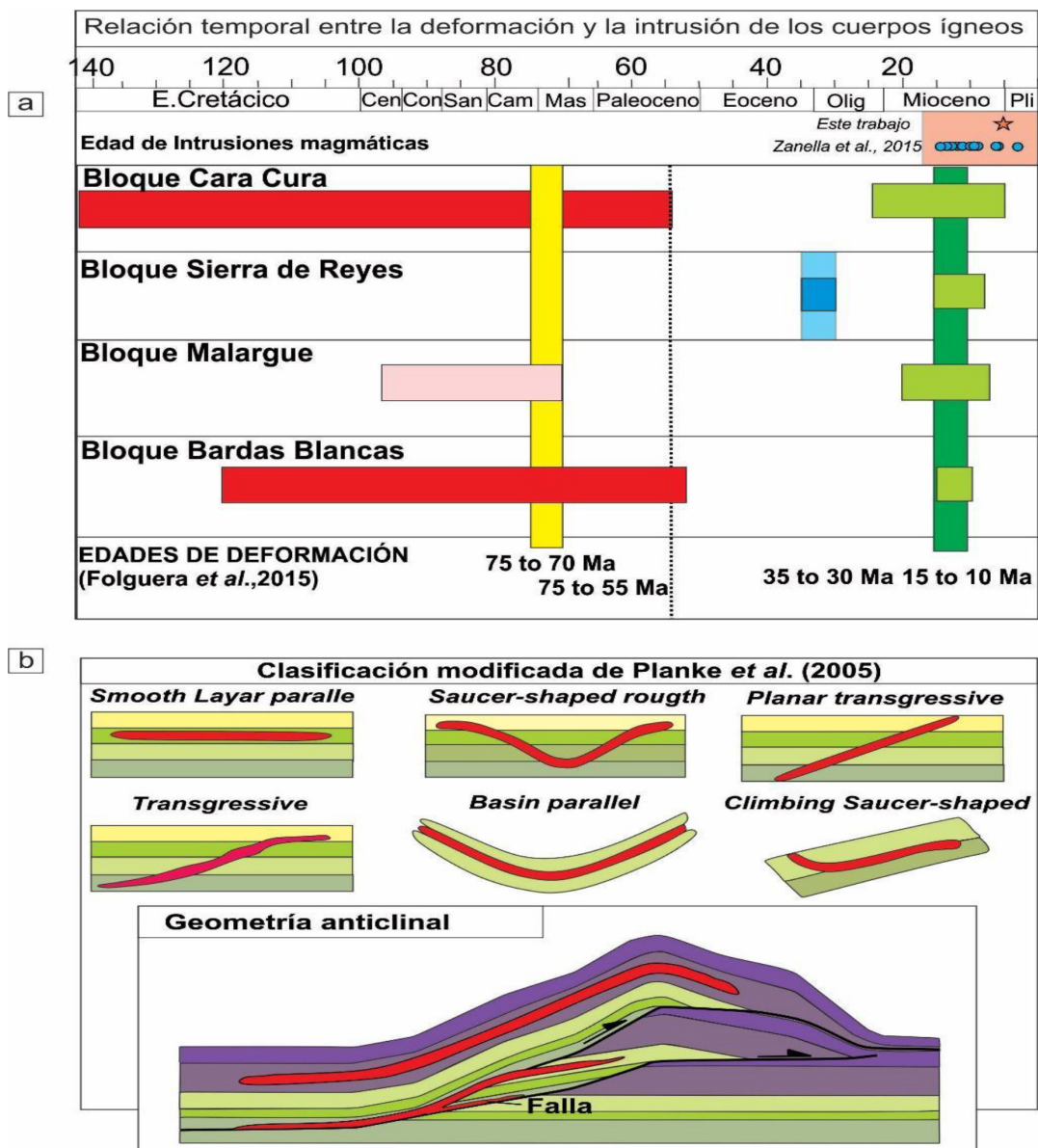


Figura 8. (a) Relación temporal entre la deformación del sector sur mendocino y la edad de intrusión de los cuerpos ígneos. (b) Clasificación según la geometría de los intrusivos y su relación con la roca de caja modificada a partir de Planke et al. (2005). La imagen inferior muestra el caso de estudio de este trabajo en el anticlinal de Loma Alta.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha podido realizarse gracias a la información brindada por YPF SA y los equipos y personal de Y-TEC, quienes generosamente apoyan la realización del doctorado de la Lic. Lapcak.

## REFERENCIAS CITADAS

- Aarnes, I., Svensen, H., Connolly, J.A. y Podladchikov, Y.Y. 2010. How contact metamorphism can trigger global climate changes: modeling gas generation around igneous *sills* in sedimentary basins. *Geochimica et Cosmochimica* 74: 7179-7195.
- Alberdi-Genolet, M., Cavallaro, A., Hernandez, N., Crosta, D., Martinez, L., 2013. Magmatic events and sour crude oils in the Malargüe area of the Neuquén Basin, Argentina. *Mar. Pet. Geol.* 43, 48-62.
- Bermúdez, A., and D. H. Delpino, 2008, Concentric and radial joint systems within basic sills and their associated porosity enhancement, Neuquén Basin, Argentina: London, The Geological Society, Special Publication 302, p. 185-198.
- Carbone, O., Franzese, J., Limeres, M., Delpino, D., Martínez, R., 2011. El Ciclo Precuyano (Triásico Tardío-Jurásico Temprano) en la Cuenca Neuquina. *Relatorio Geología y Recursos Naturales de la provincia del Neuquén*, Buenos Aires, pp. 63e76.
- Cartwright, J., Huuse, M. y Aplin, A. 2007. Seal bypass systems. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin* 91: 1141-1166.
- Cobbold, P., and E. Rossello, 2003, Aptian to recent compressional deformation, foothills of the Neuquén Basin, Argentina: *Marine and Petroleum Geology*, v.20, p. 429-443.
- Combina, A. y Nullo, F. 2011. Ciclos tectónicos, volcánicos y sedimentarios del Cenozoico del sur de Mendoza-Argentina (35°-37 °S y 69° 30 'W). *Andean Geology* 38: 198-218.
- Delpino, D.H. y Bermúdez, A.M. 2009. Petroleum systems including unconventional reservoirs in intrusive igneous rocks (sills and laccoliths). *The Leading Edge* 28: 804-811.
- Delpino, D.H., Bermúdez, A.M., Vitulli, N. y Loscerbo, C. 2014. Sistema de petróleo no convencional relacionado con lacolitos eocenos de intraplaca. Área Altiplanicie del Payún, Cuenca Neuquina. IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Trabajos Técnicos, Actas 1: 223-242, Mendoza.
- Farooqui, M.Y., Hou, H., Li, G., Machin, N., Neville, T., Pal, A., Shrivastva, C., Wang, Y., Yang, F., Ying, C., Zhao, J. y Yang, X. 2009. Evaluación de yacimientos volcánicos. *Oilfield Review* 21: 36-47.
- Folguera, A., Zapata, T., Ramos, V.A., 2006. Late Cenozoic extension and the evolution of the Neuquén Andes. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.* 407, 267-285.
- Folguera A., Bottesi, G., Duddy, I., Martín-González, F., Orts, D., Sagripanti, L., Rojas Vera, E.A. y Ramos, V.A. 2015. Exhumation of the Neuquén Basin in the southern Central Andes (Malargüe fold and thrust belt) from field data and low-tem-

- perature thermochronology. *Journal of South American Earth Sciences* 64: 381-398.
- Galland, O., 2012. Experimental modelling of ground deformation associated with shallow magma intrusions. *Earth Planet. Sci. Lett.* 317-318, 145-156, 10.1016/j.epsl.2011.10.017.
- Giambiagi, L., Alvarez, P.P., Bechis, F., Tunik, M., 2005. Influencia de las estructuras de *rift* triásico-jurásicas sobre el estilo de deformación en las fajas plegadas y corridas de Aconcagua y Malargüe, Mendoza. *Rev. Asoc. Geol. Argent.* 60, 662-671.
- Groeber, P., 1929. Líneas fundamentales de la geología del Neuquén, sur de Mendoza y regiones adyacentes. Dirección Nacional de Minas, Geología e Hidrogeología. Publicación 58: 1-110. Buenos Aires.
- Howell, J.A., Schwarz, E., Spalletti, L.A., Veiga, G.D., 2005. The Neuquén basin: an overview. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 252, 1-14.
- Jackson, C.A., Schofield, N., Golenkov, B., 2013. Geometry and controls on the development of igneous sill-related forced folds: a 2-D seismic reflection case study from offshore southern Australia. *Geol. Soc. Am. Bull.* 125, 1874-1890.
- Kay, S., Burns, W., Copeland, P. y Mancilla, O., 2006. Upper Cretaceous to Holocene magmatism and transient Miocene shallowing of the Andean subduction zone under the northern Neuquén Basin". En Kay, S. y Ramos, V. A. (eds.): Late Cretaceous to Recent magmatism and tectonism of the Southern Andean margin at the latitude of the Neuquén Basin (36°- 39°S), Geological Society of America Special Paper 407: 19-60
- Kozłowski, E., Manceda, R. y Ramos, V.A. 1993 Estructura. En Ramos V. (ed.) Geología y Recursos Naturales de Mendoza. 12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso Nacional de Exploración de Hidrocarburos, Relatorio: 235-256, Mendoza.
- Legarreta, L., Gulisano, C. y Uliana, M., 1993. Las secuencias sedimentarias Jurásico-Cretácicas. En V. Ramos (Ed). Geología y Recursos Naturales de Mendoza. XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso Nacional de Exploración de Hidrocarburos (Mendoza). Relatorio I (9): 87-114. Buenos Aires.
- Magee, C., Muirhead, J.D., Karvelas, A., Holford, S. P., Jackson, C. A., Bastow, I. D., Schofield, N., Stevenson, C.T., McLean, C. y McCarthy, W. 2016. Lateral magma flow in mafic sill complexes. *Geosphere* 12: 809-841.
- Manceda, R. y Figueroa, D. 1995. Inversion of the Mesozoic Neuquén *rift* in the Malargüe fold and thrust belt, Mendoza, Argentina. En: Tankard, A.J., Suárez Soruco, R. y Welsink H.J. (eds.), Petroleum basins of South America. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 62: 369-382.
- Montanari, D., Bonini, M., Corti, G., Agostini, A., Del Ventisette, C., 2017. Forced folding above shallow magma intrusions: Insights on supercritical fluid flow from analogue modelling. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 345, 67-80, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.07.022>.
- Perea, D., Schluma, M., Viloso, J., 1984. Las rocas ígneas como reservorio de hidrocarburos. IX Congreso Geológico Argentino, pp. 20-38.
- Planke, S., Rasmussen, T., Rey, S.S., Myklebust, R., 2005. Seismic Characteristics and Distribution of Volcanic Intrusions and Hydrothermal Vent Complexes in the Vøring and Møre Basins, Geological Society, London, Petroleum Geology Conference Series. Geological Society of London, pp. 833-844.
- Płoszkiewicz, J.V. y Gorroño, R. 1988. Tectónica de inyección salina en la faja fallada y plegada del Sur de Mendoza. *Boletín de Informaciones Petroleras, Tercera Época*, 5: (30): 29-34.

- Rabbal, O., Palma, J.O., Mair, K., Galland, O., Spacapan, J.B., Senger, K., 2021. Fracture networks in shale-hosted igneous intrusions: Processes, distribution and implications for igneous petroleum systems. *J. Struct. Geol.* 150, 104403, <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104403>.
- Rateau, R., Schofield, N., Smith, M., 2013. The potential role of igneous intrusions on hydrocarbon migration, West of Shetland. *Pet. Geosci.* 19, 259–272.
- Rodríguez Monreal, F., Villar, H., Baudino, Delpino, D. y Zencich, S. 2009. Modeling an atypical petroleum system: A case study of hydrocarbon generation, migration and accumulation related to igneous intrusions in the Neuquén Basin, Argentina. *Marine and Petroleum Geology* 26: 590-60
- Schiuma, M. 1994. Intrusivos del valle del río Grande, provincia de Mendoza, su importancia como reservorios de hidrocarburos. Tesis doctoral, Universidad Nacional de La Plata (inédita), 118 p., La Plata.
- Schmiedel, T., Galland, O., Haug, Ø.T., Dumazer, G., Breitzkreuz, C., 2019. Coulomb failure of Earth's brittle crust controls growth, emplacement and shapes of igneous *sills*, saucer-shaped *sills* and laccoliths. *Earth Planet. Sci. Lett.* 510, 161-172, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.01.011>.
- Schutter, S.R. 2003. Hydrocarbon occurrence and exploration in and around igneous rocks. En: *Petford, N. y McCaffrey, K.J.W. (eds.), Hydrocarbons in Crystalline Rocks. Geological Society of London, Special Publications* 214: 7-33.
- Senger, K., Millett, J., Planke, S., Ogata, K., Eide, C.H., Festøy, M., Galland, O. y Jerram D. A. 2017. Effects of igneous intrusions on the petroleum system: a review. *First Break* 35: 47-56.
- Silvestro, J., Atencio, M., 2009. La cuenca cenozoica del río Grande y Palauco: edad, evolución y control estructural, faja plegada de Malargüe. *Rev. Asoc. Geol. Argent.* 65, 154–169.
- Spacapan, J.B., Palma, O., Manceda, R., Rocha, E., Galland, O., Leanza, H.A., Ruiz, R. y Labayén, I. 2017. Modelado de sistemas petroleros asociados a intrusiones ígneas en pelitas ricas en materia orgánica: el caso de las formaciones Vaca Muerta y Agrio en el sur de Mendoza, Argentina. 20° Congreso Geológico Argentino, Simposio 5: 155-162, San Miguel de Tucumán.
- Spacapan, J.B., Palma, O., Galland, O., Manceda, R., Rocha, E., D'Odorico, A. y Leanza, H.A. 2018. Thermal impact of igneous sill complexes on organic-rich formations and implications for petroleum system: a case study in the northern Neuquén Basin, Argentina. *Marine and Petroleum Geology* 91: 519-531
- Spacapan, Juan B., Remigio Ruiz, Rene Manceda, Alejandro D'Odorico, Emilio Rocha, Emilio Rojas Vera, Adrian Medialdea, Diego Cattaneo, Octavio Palma, Héctor A. Leanza, and Olivier Galland. 2020. Oil production from a sill complex within the Vaca Muerta Formation, in Daniel Minisini, Manuel Fantín, Iván Lanusse Noguera, and Héctor Leanza, eds., *Integrated geology of unconventional: The case of the Vaca Muerta play, Argentina: AAPG Memoir* 121, p. 529–554.
- Sydnés, M., Fjeldskaar, W., Løtveit, I. F., Grunna-leite, I., Cardozo, N. 2018. The importance of sill thickness and timing of sill emplacement on hydrocarbon maturation. *Marine and Petroleum Geology* 89, 500-514.
- Svensen, H.H., Iyer, K., Schmid, D.W., Mazzini, A., 2017. Modelling of gas generation following emplacement of an igneous sill below Lusi,

- East Java, Indonesia. Mar. Pet.Geol. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.07.007>.
- Sylwan, C., 2014, Source rock properties of Vaca Muerta Formation, Neuquina Basin, Argentina: 9° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mendoza, Argentina, 3-7 Nov, p. 365–386.
- Vergani, G., 2005. Control estructural de la sedimentación jurásica (Grupo Cuyo) en la Dorsal de Huinul, cuenca Neuquina, Argentina. Modelo de falla lítrica rampa-plano, invertida. Boletín de Informaciones Petroleras 1, 32–42.
- Vergani, G.D., Tankard, A.J., Belotti, H.J., Welsink, H.J., 1995. Tectonic Evolution and Paleogeography of the Neuquén Basin. (Argentina).
- Witte, J., Bonora, M., Carbone, C. y Oncken, O. 2012. Fracture evolution in oil producing *sills* of the Rio Grande Valley, northern Neuquén Basin, Argentina. American Association of Petroleum Geologists, Bulletin 96: 1253- 1277.
- Yrigoyen, M.R., 1979. Cordillera Principal. En J.C.M. Turner (ed.) Segundo Simposio Geología Regional, Academia Nacional de Ciencias 1: 651-694, Córdoba.
- Zanella, A., Cobbold, P.R., Ruffet, G. and Leanza, H.A., 2015. Geological evidence for fluid overpressure, hydraulic fracturing and strong heating during maturation and migration of hydrocarbons in Mesozoic rocks of the northern Neuquén Basin, Mendoza Province, Argentina. Journal of South American Earth Sciences, 62, 229–242.