

FACTORES CONTROLANTES DE LA DISTRIBUCIÓN DE HIDROCARBUROS EN EL FLANCO SUROESTE DE LA SUBCUENCA DE LOMAS DE OLMEDO. CUENCA CRETÁCICA, NOROESTE DE ARGENTINA.

Andrés Boll, Consultor, andresboll@hotmail.com.ar

Víctor Linari, President Petroleum S.A., victor.linari@presidentpc.com

Palabras claves: Grupo Salta. Flanco Sur. Sistema de Santa Bárbara. Sísmica 2D & 3D. Estratigrafía. Tectónica. Sistema Petrolero.

Abstract: *Controlling factors of hydrocarbons distribution in the southwest flank of the Lomas de Olmedo Sub-basin. Cretaceous Basin, Northwestern Argentina.*

This article proposes that most -if not all- of the oil fields in the southwest sector of the Lomas de Olmedo Sub-basin, have an early structural control ("paleo-structures"). That characteristic is clearly recognizable in 3D seismic, however, it is difficult to map with 2D seismic or wells data alone.

Timing of oil generation-expulsion in relation to the migration pathways and available traps is a key process of the Yacoraite-Yacoraite (!) petroleum system. This is evidenced in the distribution of the oil fields in relation to the structural configuration of the Yacoraite Fm, prior to the main phase of the Andean Orogeny (Pliocene-Recent).

This Andean orogeny is responsible for the uplift of the Sierra de Santa Bárbara and the reactivation (tectonic inversion) of many sub-surface structures, especially towards the west of the analyzed sector. Rather than contributing to the preservation of hydrocarbon accumulations, it has affected them, possibly making them re-migrate, which has been inefficient according to the information available so far. An example of this would be the great anticline of Lomas de Olmedo that proved unproductive.

There is still no precise data on the moment of expulsion of the hydrocarbon; however, it is clear that the generation pod of the Yacoraite Fm coincides with the depocenter of the Salta Gr. and with the greater initial thicknesses of the Cenozoic deposits, independently of the current structure. Thus, the critical moment would be located towards the late Miocene or early Pliocene, before the main Andean compressive phase was activated.

The so-called early structuring comprises extensional movements occurred during the accumulation of the Yacoraite and Olmedo formations as well as a series of events with subtle and active compressive characteristics during the accumulation of the Santa Bárbara Subgroup (Paleocene - Eocene) and the pre-orogenic Cenozoic.

INTRODUCCION

El Flanco Sur de la Subcuenca de Lomas de Olmedo ha tenido escasa actividad petrolera en las últimas tres décadas, respecto a la que desplegó YPF en los 80' y 90'. Aquel esfuerzo permitió perforar la mayoría de las estructuras positivas definidas con sísmica 2D, con objetivo principal en la Fm Yacoraite. Y si bien se registraron algunos descubrimientos, intensamente desarrollados con pozos, la conclusión final de los resultados fue pobre y de escasa expectativa respecto al potencial de la región. Por lo tanto, cuando YPF cierra la Administración del Norte a principios de los 90', la consideraba como una región madura.

Posteriormente los bloques fueron licitados y varias compañías petroleras realizaron adquisiciones sísmicas 3D, centradas sobre varios de los yacimientos, como Dos Puntitas, Pozo Escondido-Pozo Escondido Este, Martínez del Tineo y Puesto Climaco. Luego, fueron perforados algunos pozos de desarrollo cuyos resultados no lograron modificar la visión de madurez que se tenía de los yacimientos.

¿Existe potencial remanente en este sector de la cuenca y zonas aledañas? Una manera de abordar esta pregunta, obviamente pasa por una exhaustiva revisión de los datos disponibles, una comprensión de los éxitos y fracasos, un análisis crítico del sistema petrolero, etc. A esto se suma la ventaja actual de contar con sísmica 3D en algunos yacimientos y la posibilidad de trabajar con estaciones de trabajo, donde se integra la información de superficie, pozos, sísmica, producciones, presiones, etc. Así, en la figura 1, se delimita el área de estudio y la distribución de la información básica utilizada.

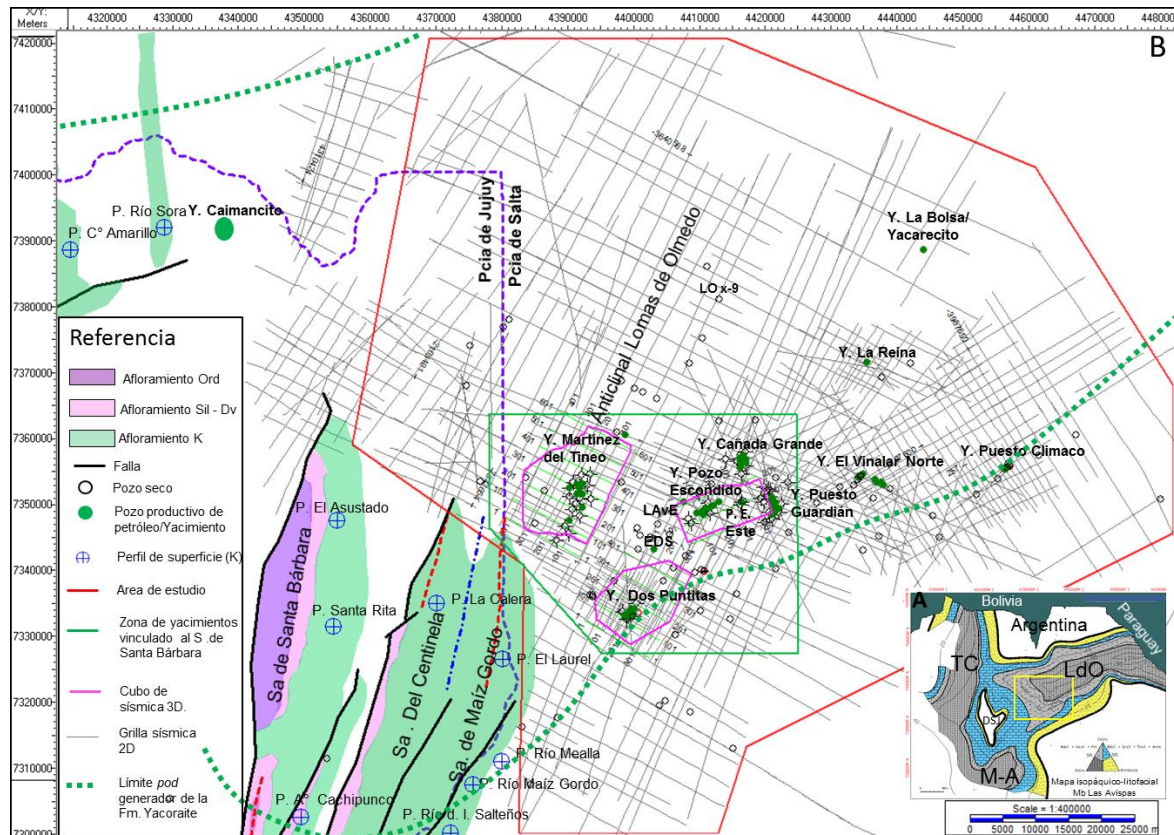


Fig 1: A: Ubicación regional del área de estudio (recuadro amarillo) sobre un mapa isopáquico litofacial del Mb Las Avispas de la Fm Yacoraite, Cuenca Cretácica del Noroeste de Argentina (Gómez Omil y Boll 1999). LdO: Subcuenca de Lomas de Olmedo. TC: Subcuenca de Tres Cruces. M-A: Subcuenca de Metan-Alemania. B: Área de estudio. Polígono rojo delimita la malla sísmica 2D interpretada e integrada con tres cubos de sísmica 3D (fucsia). Afloramientos cretácicos del Sistema de Santa Bárbara al suroeste y de la Sierra de Calilegua al noroeste, en color verde pálido. Y: yacimiento.

La revisión fue focalizada en dos tareas principales, la primera, en generar un armazón estratigráfico de detalle del intervalo de mayor interés prospectivo, correspondiente al Mb Las Avispas y tramo superior del Mb Puesto Guardián, de la Fm Yacoraite (Fig 2), mediante datos de pozos y perfiles de superficie cercanos (Fig 1).

La segunda, en interpretar la sísmica 2D y 3D en la versión PSTM disponible dentro del área de estudio, a nivel de las principales discontinuidades y/o discordancias que limitan e intercalan en el Gr Salta (Fig. 2).

Ambas tareas generaron algunas novedades a las que se dará particular atención a fin de justificar su posible importancia y, por ende, se remitirá al lector interesado a la valiosa y muy extensa información previa de esta región y de la cuenca en general, dada la imposibilidad de cubrir la misma en este artículo. Entre otros, se destacan los siguientes

autores: Bianucci *et al.* (1980), Bianucci *et al.* (1981), Bianucci y Homovc (1982), Bianucci *et al.* (1982), Boll y Hernández (1985), Uliana y Biddle (1988), Boll *et al.* (1989), Gómez Omil *et al.* (1989), Uliana *et al.* (1989), Hernández y Disalvo (1992), Bianucci (1999), Gómez Omil y Boll (1999), Uliana *et al.* (1999), Hernández *et al.* (1999), Disalvo *et al.* (2002), Disalvo *et al.* (2005), Gómez Omil y Boll (2005), Hernández *et al.* (2008), Vergani *et al.* (2008), DeCelles y Horton (2003), Starck (2011), DeCelles *et al.* (2011) y Horton (2018).

MARCO REGIONAL

El área de estudio abarca gran parte de lo que se denominó Flanco Sur de la Subcuenca de Lomas de Olmedo, en la jerga petrolera (Fig 1). En realidad la zona se ubica bien al oeste de este flanco, con cada vez más influencia de la Dorsal Salto-Jujeña hacia el poniente, desde el punto de vista sedimentario-estratigráfico (Boll *et al.* 1989; Gómez Omil *et al.* 1999) y con cada vez más influencia del Sistema de Santa Bárbara (Rolleri 1976; Kley y Monaldi 2002; DeCelles *et al.* 2011; Horton 2018), desde el control estructural.

El Sistema de Santa Bárbara comprende una serie de amplios anticlinales con vergencia hacia el oeste, en cuyos núcleos afloran rocas eopaleozoicas, cubiertas en discordancia angular por depósitos cretácicos y paleógenos del Gr Salta y, estas a su vez, en relación discordante suavemente angular, por depósitos sinorogénicos del Neógeno (Figs 1 y 2). Su génesis estuvo controlada por la inversión tectónica del *rift* cretácico, donde las fallas maestras extensionales que posibilitaron la acumulación de los espesos depósitos continentales del SGr Pirgua, fueron invertidas por la compresión occidental Andina (Bianucci *et al.* 1982). Al tener la mayoría de estas fallas una configuración suavemente lítrica en profundidad e inclinación hacia el este, habrían actuado como bajo-corrimientos de lámina gruesa en la inversión, lo que requiere de una falla de suela profunda en el basamento que los habría vinculado con la Cordillera Oriental, hacia el oeste (Kley y Monaldi 2002).

Resulta clave en el análisis petrolero, definir la edad y la naturaleza de esta actividad tectónica, tema que ha sido abordado por muchos investigadores (Hernández *et al.* 1999; Kley y Monaldi 2002; Hongn *et al.* 2007; Rosario *et al.* 2008; Starck 2011; DeCelles *et al.* 2011; Horton 2018; entre otros). No es objeto de este trabajo entrar en ese análisis; pero si atender estas nuevas líneas de investigación en relación a los principales rasgos estratigráficos y estructurales que se observan en la zona de estudio.

Es interesante destacar que los rasgos estructurales que muestra el Sistema de Santa Bárbara en superficie son similares a las que se reconocen en el subsuelo en la información sísmica, por ello la dificultosa integración de datos resulta de gran utilidad (Fig 1). Estas características se diluyen hacia el naciente, donde comienza a predominar la impronta del *rift* cretácico y tienden a desaparecer los efectos compresivos.

CONSIDERACIONES ESTRATIGRÁFICAS

El Gr Salta alcanza espesores superiores a los 4900 m en el depocentro de Lomas de Olmedo (Boll *et al.* 1989), de los cuales 2300 m son estimados por sísmica y corresponden al SGr Pirgua, 410 m al SGr Balbuena y 2200 m al SGr Santa Bárbara (Fig 2). Los depósitos de los subgrupos Balbuena y Santa Bárbara, mayormente carbonáticos, clásticos finos y evaporíticos, presentan una marcada ciclicidad, indicativa de muy escaso espacio de acomodación sujeto a variaciones periódicas y de alta frecuencia del nivel de base (Boll y Hernández 1985; Boll *et al.* 1989; Boll 1991; Hernández y Disalvo 1992; Hernández *et al.* 2008). Esta característica sedimentaria permite realizar excelente correlaciones estratigráficas entre perfiles de superficie y entre pozos, mediante formatos

eléctricos (Forgotson 1957), a nivel de PAC's (Goodwin y Anderson 1985), parasecuencias y juegos de parasecuencias (Van Wagoner *et al.* 1987).

El SGr Pirgua, por el contrario, por ser depósitos de *rift* tiene una organización interna más compleja, sin embargo, se logran individualizar unidades tectosedimentarias -UTS- (Megías 1982), identificables en afloramientos y en datos sísmicos.

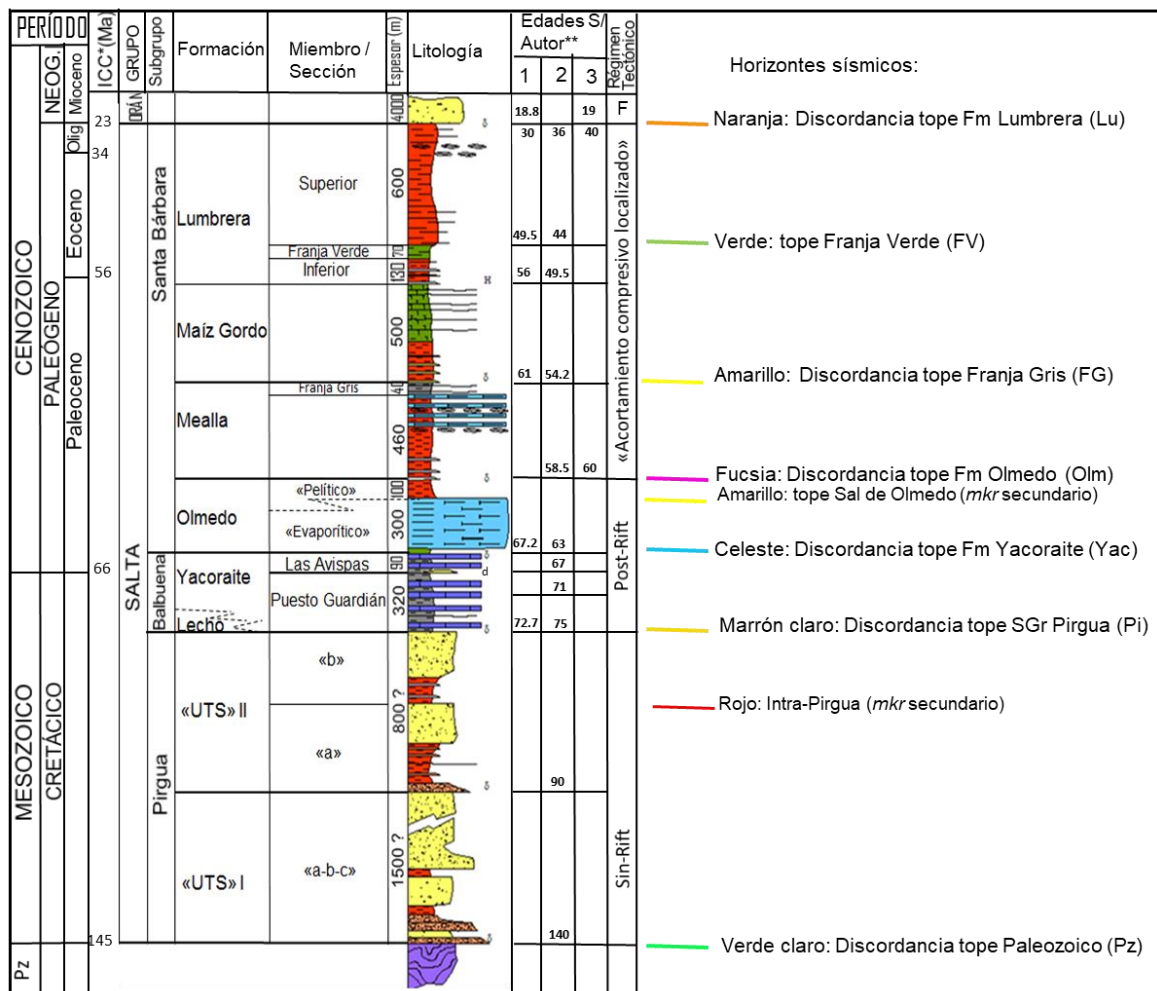


Fig 2: Izquierda: Columna estratigráfica del Gr Salta, correspondiente al pozo LO x-9 de la Subcuenca de Lomas de Olmedo (Modif. Gómez Omil y Boll 1999), ver ubicación en figura 1. * ICC (2017). ** Edades en Ma, referencia de los autores: 1- Starck (2008); 2- Boll *et al.* (1989) y Hernández *et al.* (2008); 3- DeCelles *et al.* (2011). d: Discordancias y/o paraconcordancias (línea más gruesa). H: Hiatos. F: Cuenca de antepaís (*Foreland*). Derecha: referencia de los colores de los horizontes sísmicos utilizados en las secciones sísmicas 2D & 3D. mkr: marker.

En la Fm Yacoraite la correlación de detalle se focalizó en el tramo de interés petrolero, motivo que a su vez limitó de la profundidad final de los pozos, generalmente acotado por la desaparición de manifestaciones de hidrocarburos que habitualmente ocurría en el tramo superior del Mb Puesto Guardián, salvo en la zona del yacimiento Martínez del Tineo, donde el halo de petróleo se ubica en la transición de las formaciones Lecho-Yacoraite. Esta técnica de correlación fue iniciada por YPF durante el desarrollo de los descubrimientos. Un buen ejemplo se registra en el pozo CGr-13 (Cañada Grande) donde se identificaron una serie de arenas de sencilla correlación en el ámbito del yacimiento; pero dada la discontinuidad de las mismas, resultó más complicada su realización entre

yacimientos. Sin embargo, al adoptar el criterio de correlacionar parasecuencias y juegos de parasecuencias, esta tarea se simplificó (Boll *et al.* 1989; Boll 1991; Hernández y Disalvo 1992) y pudo extenderse por toda la Cuenca Cretácica (Figs 3 y 4).

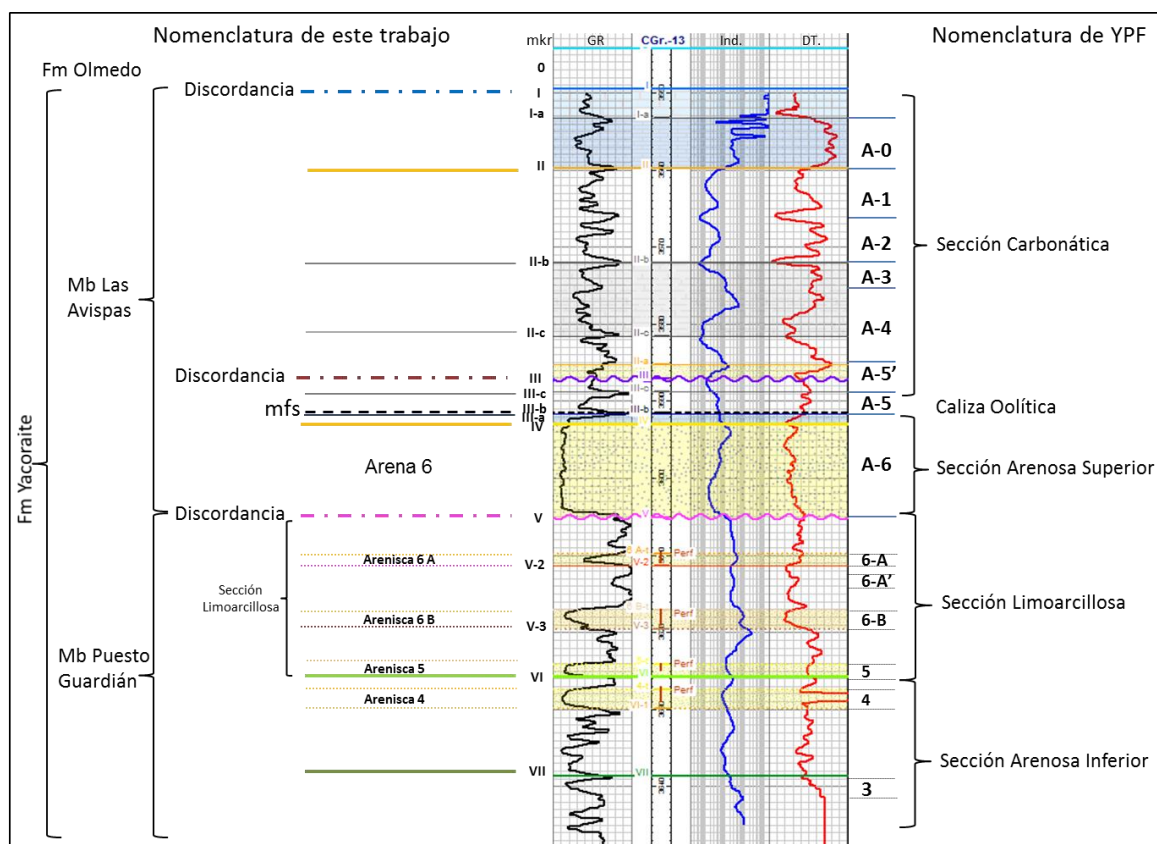


Fig 3: En el Flanco Sur de la Subcuenca de Lomas de Olmedo los principales reservorios productivos de la Fm Yacoraite se ubican en el tercio inferior del Mb Las Avispas y, en menor medida, en el tramo superior del Mb Puesto Guardián. Para identificar estos reservorios YPF utilizó la nomenclatura de la derecha, centrada en la identificación de arenas. En este trabajo se utiliza la nomenclatura de la izquierda fundamentada en la correlación de las principales discontinuidades a nivel de parasecuencias y/o juegos de parasecuencias. *mkr*: marker.

Esta metodología permitió precisar el armazón estratigráfico y el modelo deposicional de la Fm Yacoraite. Y, a partir allí, la distribución de las areniscas con capacidad reservorio, como la Arena 6, 6-A, 6-B, 5, 4, A-5', etc., la distribución de las facies carbonáticas de mayor energía, del intervalo III-b / III, y la distribución de las pelitas generadoras, correspondientes en general a los ciclos de mayor inundación, como es el intervalo III-a / III-b, del tramo inferior del Mb Las Avispas (Fig 3). Además, permitió definir una serie de discordancias erosivas, como las que limitan en base y techo al SGr Balbuena y otras internas de la Fm Yacoraite. La discordancia basal del SGr Balbuena se reconoce claramente en la sísmica, como también en afloramientos y pozos, particularmente cuando el inicio de la unidad corresponde a una inundación (Boll *et al.* 1989; Starck 2011). Más complejo resulta cuando engranan lateralmente las facies subácueas de la Fm Yacoraite con facies eólicas de la Fm Lecho (Fig 2) hacia los bordes con aportes clásticos, quedando el límite entre los subgrupos Pirgua y Balbuena en una discontinuidad entre arenas de similares características. El tope del SGr Balbuena identificado como el *marker* (*mkr*) "I" (Figs 3 y 4) corresponde hacia los bordes de cuenca a una discordancia erosiva, con truncación de varias parasecuencias, con desarrollo de relieves kársticos y

con marcado arreglo de *onlap* de las unidades suprayacentes del SGr Santa Bárbara (Boll *et al.* 1989). En cambio hacia el depocentro corresponde a una paraconcordancia, identificable mediante la correlación de los juegos de parasecuencias y por la superposición, en forma neta, de un paquete de pelitas gris verdosas perteneciente a la Fm Olmedo (Figs 2 y 4).

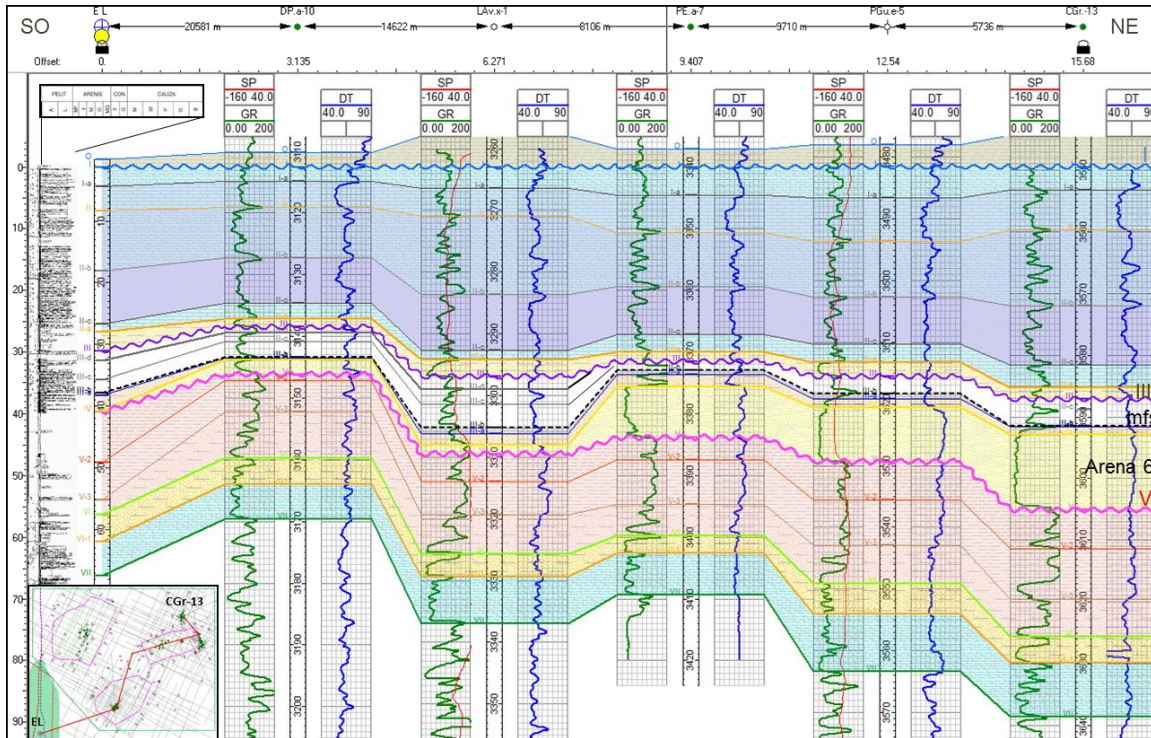


Fig 4: Corte estratigráfico del Mb Las Avispas y tramo superior del Mb Puesto Guardián, nivelado al tope de la Fm Yacoraite, entre el perfil de superficie El Laurel y el pozo CGr-13 (Cañada Grande). Abarca pozos representativos de los yacimientos Dos Puntitas (DP), Pozo Escondido (PE) y Puesto Guardián (PGu). Ver nomenclatura en la Fig 3. Este intervalo corresponde al objetivo de los pozos, dado que los niveles reservorios más profundos resultaban acuíferos o no comerciales. Se destacan tres discordancias erosivas, *mkr* V: base del Mb Las Avispas, trunca a la Sección Limoarcillosa y sobre él suprayacen facies eólicas (Arena 6) o facies indicativas de una transgresión instantánea. *Mkr* III: discordancia intra-Las Avispas, también trunca intervalos infrayacentes. Intervalo V / III: delimita el prisma sedimentario más importante de la Fm Yacoraite del Flanco Sur, al albergar los principales reservorios clásticos y carbonáticos y las principales secciones generadores de la cuenca, particularmente en el intervalo III-a / III-b (*mfs*). *Mkr* I: discordancia tope Fm Yacoraite, erosiva en bordes de cuenca y paraconcordante hacia el depocentro, identificable por la superposición de un delgado prisma de pelitas verdes (I / 0), previo a la inundación lacustre de la Fm Olmedo. Este intervalo I / 0 conforma un cortejo de nivel bajo restringido y localizado, que justifica su inclusión en la Fm Olmedo, en un análisis secuencial.

Esta interpretación permite, por un lado, descartar la presencia de facies generadoras en la Fm Olmedo y, por otro, resaltar la importancia de la discordancia (*mkr* "I"), quizás atribuible a la fase pre-Olmédica (Bianucci *et al.* 1980), que demarca un notable cambio de facies y espesores de las unidades limitantes. Así, mientras que en la Fm Yacoraite predominan facies carbonáticas fosilíferas con influencia marina y marcada tabularidad, en la Fm Olmedo se destaca el desarrollo de profundos y localizados hemigrábenes rellenos con facies evaporíticas de hasta 400 m de espesor, cubiertas por facies pelíticas de ambiente lacustre y nulo contenido orgánico. Esto evidencia que a partir de la Fm

Olmedo se produjo una clara desconexión oceánica, más probablemente con el Pacífico, que si resulta verosímil para la Fm Yacoraite (Boll *et al.* 1989; Uliana *et al.* 1999).

Estos hemigrábenes rellenos con sal son exclusivos de la Subcuenca de Lomas de Olmedo e implicarían una reactivación extensional del *rift*, dado que las fallas maestras que las limitan lo fueron también para el SGr Pirgua (Fig 2).

En la Fm Yacoraite se identifica además dos discordancias que afectan su arreglo interno. La primera, correspondiente al *mkr* "V" (Figs 3 y 4), define la base del Mb Las Avispas y trunca suavemente algunos intervalos de la Sección Limoarcillosa infrayacentes (Fig 4). Esto evidenciaría una posible reactivación tectónica de las fallas del *rift*, según se interpreta por los marcados cambios de espesor de la Sección Limoarcillosa, respecto a los espesores del Mb Las Avispas (Figs 5 A y B). Inmediatamente por encima de esta discordancia se desarrollan cuerpos de arena eólica: "A-6" (Figs 3 y 4), con estratificación entrecruzada diagonal, como evidencian muchos perfiles de buzamiento y coronas de pozo. Esta Arena 6 es el reservorio excluyente del Flanco Sur, dado que la mayoría de los yacimientos producen de este intervalo de hasta 13 m de espesor, con buenas propiedades petrofísicas, salvo cuando sufre severos procesos diagenéticos por anhidritización. Su origen eólico explicaría su distribución restringida y localizada (Figs 5 C y D) y, su preservación, por la gran inundación posterior, identificada como *mkr* "III-b" (Figs 3 y 4) e interpretada como un *maximum flooding surface* (*mfs*). A este evento se asocian los mejores valores de COT de la Fm Yacoraite, a nivel cuencal. Una observación adicional, respecto a la distribución de la Arena 6, es que podría estar controlada por las fallas del *rift*, al ubicarse preferencialmente en el hundimiento norte del bloque Chaguaral-Dos Puntitas (Figs 5C y D). Por encima, se depositaron las mejores secuencias elementales de inundación-somerización, integradas por ciclos de facies completas, entre las que se destacan calizas de alta energía del tipo packstone/grainstone oolíticos y fosilíferos, que rematan con boundstone algáceos y brechas intraclásticas de exposición subaérea. Estas facies se desarrollan en bancos gruesos a muy gruesos, reuniendo las mejores condiciones petrofísicas primarias de los reservorios carbonáticos de la cuenca. Estos ciclos tienden a compensar rápidamente las ondulaciones constructivas remanentes de las dunas eólicas, previamente aplanadas por proceso de retrabajo del intervalo arenoso carbonático IV / III-a (Figs 3 y 4).

A continuación trunca la segunda discordancia, identificada como *mkr* "III" (Figs 3 y 4), que en algunos pozos prácticamente alcanza a erosionar hasta el tope de la Arena 6 (Fig 4). Asociado a esta discordancia erosiva se desarrolla por encima una arena calcárea de poco espesor, con pobres propiedades petrofísicas y sin producción (Fig 4).

Los dos tercios superiores del Mb Las Avispas, denominada Sección Carbonática por YPF (Fig 2), queda comprendido en el intervalo III / I, con suave engrosamiento hacia el centro de cuenca (Fig 3). En él predominan facies carbonáticas de baja energía, tipo mudstone/wackestone, con finas intercalaciones o lentes de packstone/grainstone litoclástico-oolíticos y boundstone algáceos, en general de baja porosidad y finos niveles de limoarcilitas calcáreas gris verdosas claras a rojizas, que en ocasiones alcanzan a superar el metro de espesor, conformando niveles guías entre juegos de parasecuencias. Estos paquetes pelíticos, con mayor influencia subaérea, representan los principales *markers* de este intervalo ("II-c", "II-b"; II, "I-a"; ver figuras 3 y 4). El intervalo III / I presenta regulares valores de COT hacia posiciones internas de cuenca y solo ocasionalmente ofrece producciones de petróleo de interés.

El SGr Santa Bárbara fue analizado con información sísmica (Fig 1), mediante la propagación de un conjunto de horizontes fácilmente reconocibles y aproximadamente coincidentes con las principales discontinuidades y/o discordancias erosivas que afectan al subgrupo, en general coincidentes con las unidades formales conocidas (Fig 2). Estas

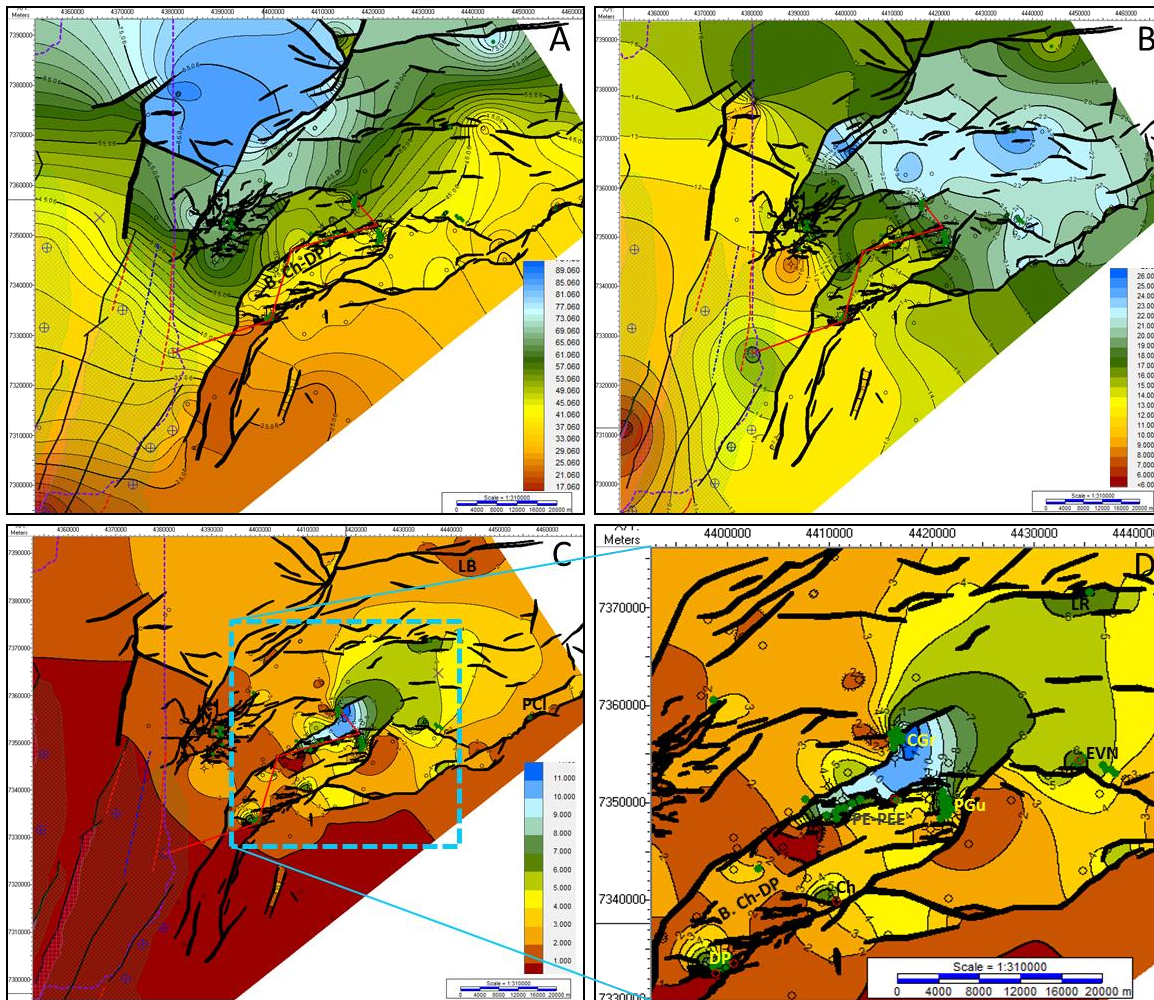


Fig 5: Mapas de espesor. Datos de pozos y perfiles de superficie. A- Espesor del Mb Las Avispas con polígonos de falla (sísmica) del tope de la Fm Yacoraite. B-Espesor de la Sección Limoarcillosa (ver Figs 3 y 4) con los mismos polígonos de falla. La diferencia de espesores entre ambas atribuye a la discordancia erosiva “V” (ver Fig 4). C- Espesor de la Arena 6 (diferencia entre los *mkrs* V y IV), facies eólicas de distribución muy localizada y probablemente controlada por las fallas del *rift* cretácico. D- Detalle (recuadro celeste en C), el mayor espesor y continuidad de la Arena 6 se produce en el hundimiento norte del bloque Chaguaral–Dos Puntitas (B Ch-DP), en la zona de los yacimientos PE-PEE, PGu y CGr. En El Vinalar Norte (EVN), Puesto Climaco (PCI), Dos Puntitas (DP), La Reina (LR), Chaguaral (Ch) los espesores son menores y los cuerpos tienen menor extensión. Traza roja: ubicación corte estratigráfico de la figura 4.

discontinuidades tienen carácter regional y se las reconoce en las distintas subcuencas del Gr Salta (Boll *et al.* 1989; Hernández y Disalvo 1992). Por lo tanto, permiten generar un armazón cronoestratigráfico ajustado con dataciones puntuales y distantes entre sí; pero en principio consistentes, en opinión de distintos autores (Fig 2).

El SGr Santa Bárbara no ha presentado producción ni interés exploratorio en la zona de trabajo, pero sí más al noroeste en el Yacimiento Caimancito (Fig 1). Constituye básicamente una roca sello por su composición litológica predominantemente pelítica, carbonática, y evaporítica (Fig 2). Sin embargo, a través del análisis de sus discordancias internas y de los espesores involucrados entre ellas, resulta una herramienta clave para la identificación de estructuras “tempranas compresivas”, (ver análisis estructural).

La deformación que afectó al SGr Santa Bárbara, hasta la discordancia erosiva que lo deslinda del Gr Orán, históricamente ha sido considerada como correspondiente a un régimen de subsidencia termal (*post-rift*). Sin embargo, se verifica un régimen compresivo o al menos se registran una serie de eventos compresivos en el ámbito de influencia del Sistema de Santa Bárbara, que se disipa paulatinamente hacia el naciente, donde continúa prevaleciendo un régimen de subsidencia termal. Básicamente se reconocen tres fases compresivas principales: pre-Mealla, pre-Maíz Gordo y pre-Orán. En función de estas evidencias el régimen de *post-rift* se extendería hasta la Fm Olmedo, inclusive, dada la reactivación extensional de la fase pre-Olmedo (Bianucci et al. 1980, Starck 2011) y, a partir de la fase pre-Mealla, se propone para el ámbito de influencia del hundimiento norte del Sistema de Santa Bárbara, el inicio de un régimen compresivo o una serie de fases compresivas puntuales localizadas, que habrían comenzado hace aproximadamente 60 Ma (Fig 2). Distintos autores han propuesto actividad compresiva temprana durante la depositación del SGr Santa Bárbara (Starck y Vergani 1996; Hong et al. 2007; Starck 2011; DeCelles et al. 2011; Horton 2018), basados en observaciones sedimentológicas y estratigráficas en superficie. En este trabajo las evidencias de acortamiento orogénico se sustentan con información sísmica 3D y 2D que muestra inversiones tectónicas incipientes en varias fallas del *rift* cretácico relacionadas al Sistema de Santa Bárbara.

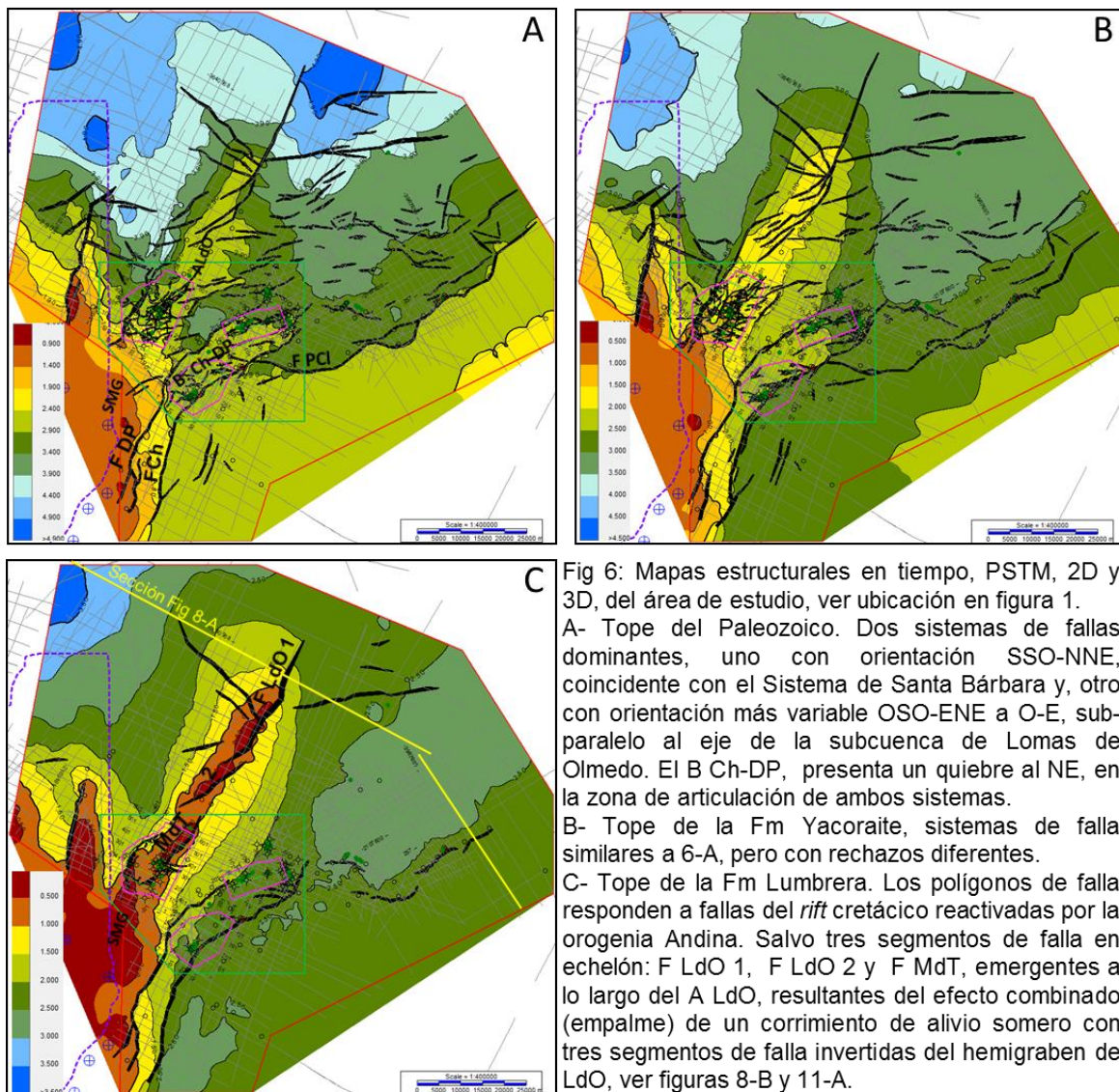
Completan la columna estratigráfica los depósitos sinorogénicos neógenos del Gr Orán, cuyo arreglo interno de sus reflectores sísmicos muestran un marcado paralelismo desde la discordancia del tope de la Fm Lumbreira hasta la zona sin información cercana a la superficie. Esto indica condiciones de relativa estabilidad tectónica durante su acumulación, recién alterada por el avance de la orogenia Andina reciente.

Para estos depósitos se toma como referencia cercana, los afloramientos de la zona del yacimiento Caimancito (Fig 1), donde Rosario et al. (2008) describen más de 5000m del Gr Orán, en el arroyo Agua Negra. Ellos asignan al intervalo inferior compuesto por facies finas, sin discordancias, correspondiente a las formaciones Río Seco-Anta, 2000 m de espesor y una edad comprendida entre los 17 a 10 Ma. Por encima, describen en concordancia 1780 m de facies finas de la Fm Agua Negra, acumulados según estos autores entre los 9 a 3.5 Ma. Luego, mediante una discordancia angular erosiva, describen conglomerados polimícticos con clastos del Gr Salta, de la Fm Piquete o Fm Jujuy, cuyo inicio dataron en 3.5 Ma, con un espesor parcial superior a los 1000 m. Estos últimos depósitos sinorogénicos se atribuyen a la fase Andina, a la que se hará referencia en este trabajo como principal responsable de la configuración estructural actual, mientras que las unidades neógenas infrayacentes, se consideran para el área de estudio, como relativamente tabulares, sin afectación tectónica. Con ese criterio, esta columna puede ser extrapolada al depocentro de Lomas de Olmedo, garantizando un soterramiento suficiente pre-orogenia Andina, para que la Fm Yacoraite haya transitado la ventana de generación de petróleo y probablemente haya ingresado en la de gas en algunos sectores.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL

En el área de estudio (Fig 1), se interpretaron sobre sísmica 2D y 3D PSTM las principales superficies de discontinuidad del Gr Salta (ver *markers* en la figura 2). Luego, a partir de los mapas estructurales (Figs 6-A-B y C) y de espesor (Figs 7-A-B y C) de las unidades más representativas, con apoyo de secciones sísmicas verticales (Fig 8-A y B), se analiza el marco regional, en cuanto a la configuración estructural actual, características del *rift* cretácico, sistemas de fallas principales, evolución estructural, régimen tectónico, etc. Luego, se focaliza el análisis en la zona de los yacimientos y en cada uno de los yacimientos en particular, por disponer de información más detallada. En paralelo, se describen elementos y procesos del sistema petrolero.

La estructura actual de la base y techo del Gr Salta (Figs 6-A y C) difieren en la menor influencia del *rift* hacia arriba, mientras que la del tope de la Fm Yacoraite (Fig 6-B) se asemeja más a la estructura del sustrato, por estar afectada por un fallamiento similar, pero con rechazos diferentes. Entre ellas, tienen en común la notable estructuración Andina producto de una inversión cada vez más intensa de las fallas hacia el suroeste, particularmente aquellas que se orientan en dirección SSO-NNE, normales a la compresión y responsables de la emergencia en superficie del Sistema de Santa Bárbara (Fig 1). Sin embargo, esta deformación resultó tardía respecto al pico de generación y migración. Por lo tanto, es necesario analizar la deformación previa, particularmente la evolución del *rift* cretácico en su tránsito hacia un régimen compresivo, cuya etapa inicial debió ocurrir durante el Paleógeno (Fig 2).



El *rift* cretácico, en este sector SO de la Subcuenca de Lomas de Olmedo, presentaba además del marcado espesamiento escalonado hacia eje de la misma, un estrechamiento y levantamiento en dirección SSO (Fig 7-A). Este arreglo respondía a la convergencia de dos sistemas de falla dominantes, el primero y más importante, con rumbo SSO-NNE,

coincidente con el actual Sistema de Santa Bárbara (Fig 6-A), y el segundo menos definido, se alineaba con el eje de la subcuenca, en un entorno OSO-ENE a O-E.

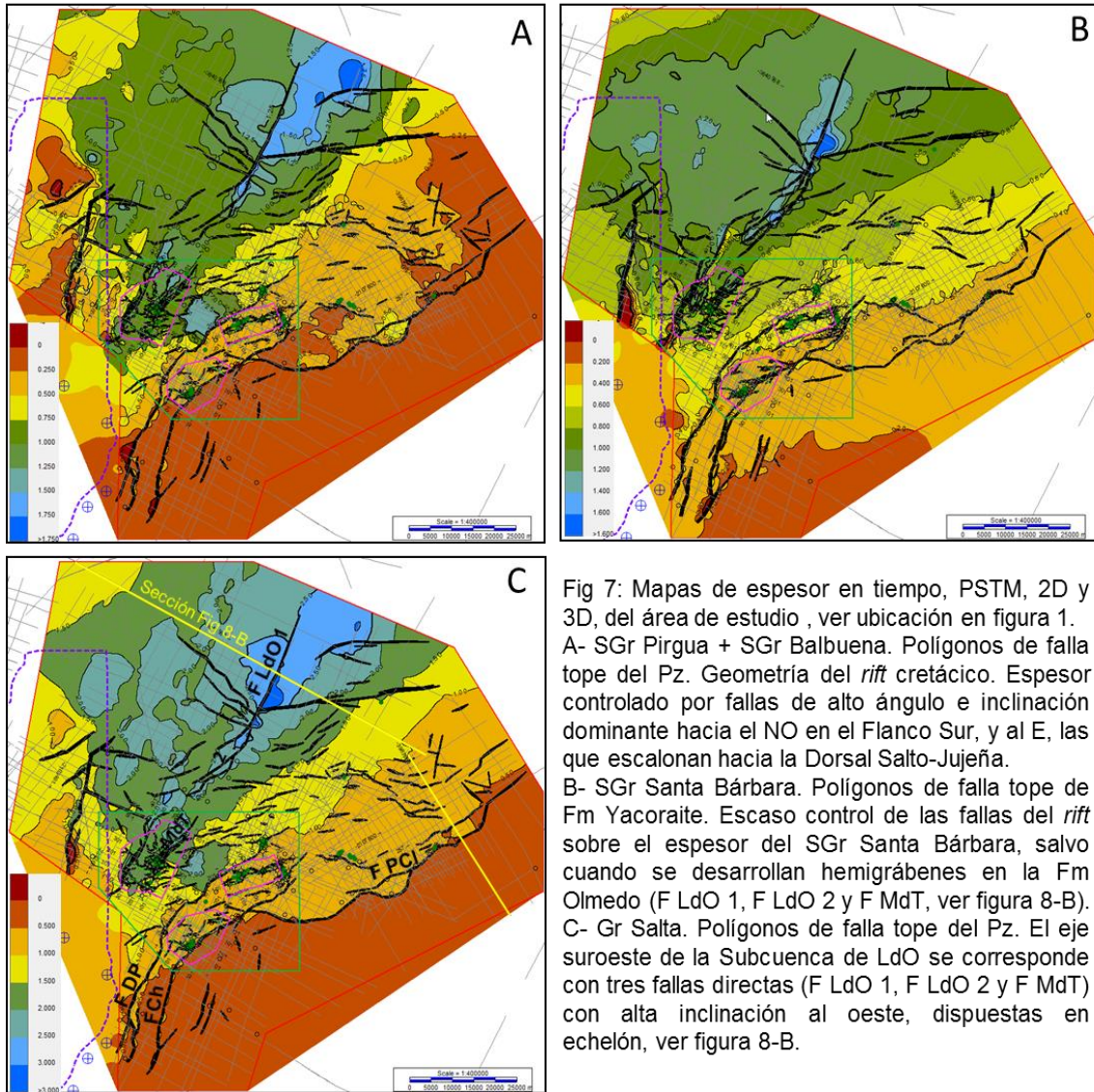


Fig 7: Mapas de espesor en tiempo, PSTM, 2D y 3D, del área de estudio, ver ubicación en figura 1. A- SGr Pirgua + SGr Balbuena. Polígonos de falla tope del Pz. Geometría del *rift* cretácico. Espesor controlado por fallas de alto ángulo e inclinación dominante hacia el NO en el Flanco Sur, y al E, las que escalonan hacia la Dorsal Salto-Jujeña. B- SGr Santa Bárbara. Polígonos de falla tope de Fm Yacoraite. Escaso control de las fallas del *rift* sobre el espesor del SGr Santa Bárbara, salvo cuando se desarrollan hemigrábenes en la Fm Olmedo (F LdO 1, F LdO 2 y F MdT, ver figura 8-B). C- Gr Salta. Polígonos de falla tope del Pz. El eje suroeste de la Subcuenca de LdO se corresponde con tres fallas directas (F LdO 1, F LdO 2 y F MdT) con alta inclinación al oeste, dispuestas en echelón, ver figura 8-B.

A este arreglo se sumaban los cambios de inclinación de las fallas directas de alto ángulo que limitaban los bloques, con probable comportamiento lístrico en profundidad. Dichas inclinaciones resultaban predominantes hacia el noroeste, sobre el Flanco Sur y, hacia el naciente, en dirección a la Dorsal Salto-Jujeña (Fig 1-A). El escalón más profundo quedaba limitado por tres fallas, dispuestas en echelón, con alta inclinación al oeste, correspondientes al primer sistema, denominadas Lomas de Olmedo 1 (F LdO 1), Lomas de Olmedo 2 (F LdO 2) y Martínez del Tineo (F MdT), ver figura 7-C.

Por el contrario, el espesor en tiempo del SGr Santa Bárbara (Fig 7-B), muestra escaso control por parte de las fallas de *rift* cretácico, más aún, si se incorpora la Fm Olmedo al SGr Balbuena. Es decir, considerando el prisma sedimentario base Fm Mealla-tope Fm Lumbrera, esta influencia resulta mínima, como se observa en la sección sísmica horizontalizada de la figura 8-A. Además, en esta línea regional transversal a la Subcuenca de Lomas de Olmedo, se demuestra que los depósitos sinorogénicos

suprayacientes del Gr Orán, mantienen una geometría relativamente tabular o con un suave engrosamiento, similar al intervalo infrayacente.

Esto confirma, para la definición del sistema petrolero, que la Fm Yacoraite estuvo soterrada más de 4 segundos (TWT) en el ámbito del depocentro de Lomas de Olmedo (D LdO) es decir más de 5000 m, espesor consistente con el medido por Rosario et al. (2008) en el perfil del Arroyo Agua Negra, previo al inicio de la orogenia Andina (Fig 8-A). Lo cual garantiza la madurez térmica de la unidad generadora y define el momento crítico.

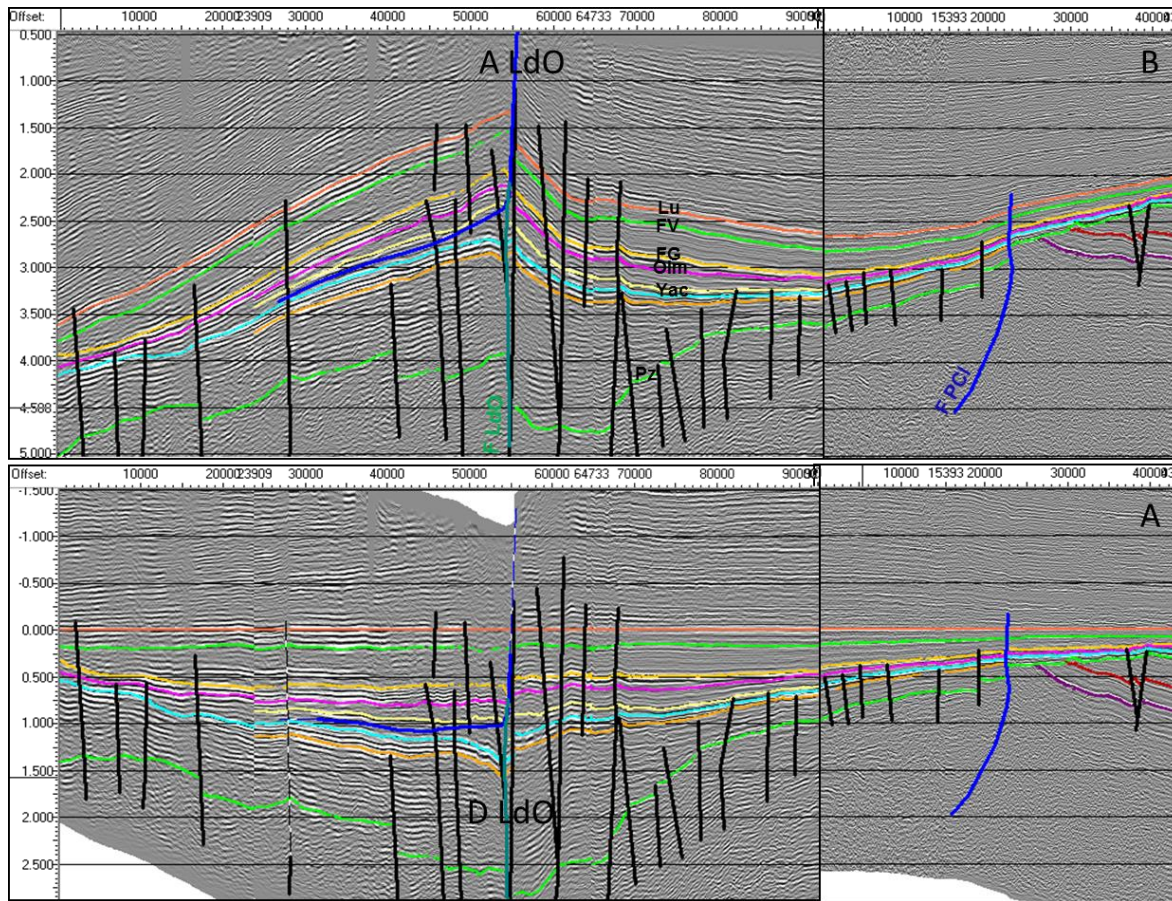


Fig 8: Sección arbitraria 2D, PSTM, NO-SO (ubicación Figs 6 y 7-C). Referencia horizontes: ver Fig 2. Notar la inversión (B) del depocentro de Lomas de Olmedo (A), muy reciente según indican los reflectores neógenos por encima del mkr Lu. Esta inversión estructural provocada por la orogenia Andina (Plioceno), determina el momento crítico del sistema petrolero Yacoraite-Yacoraite (!).

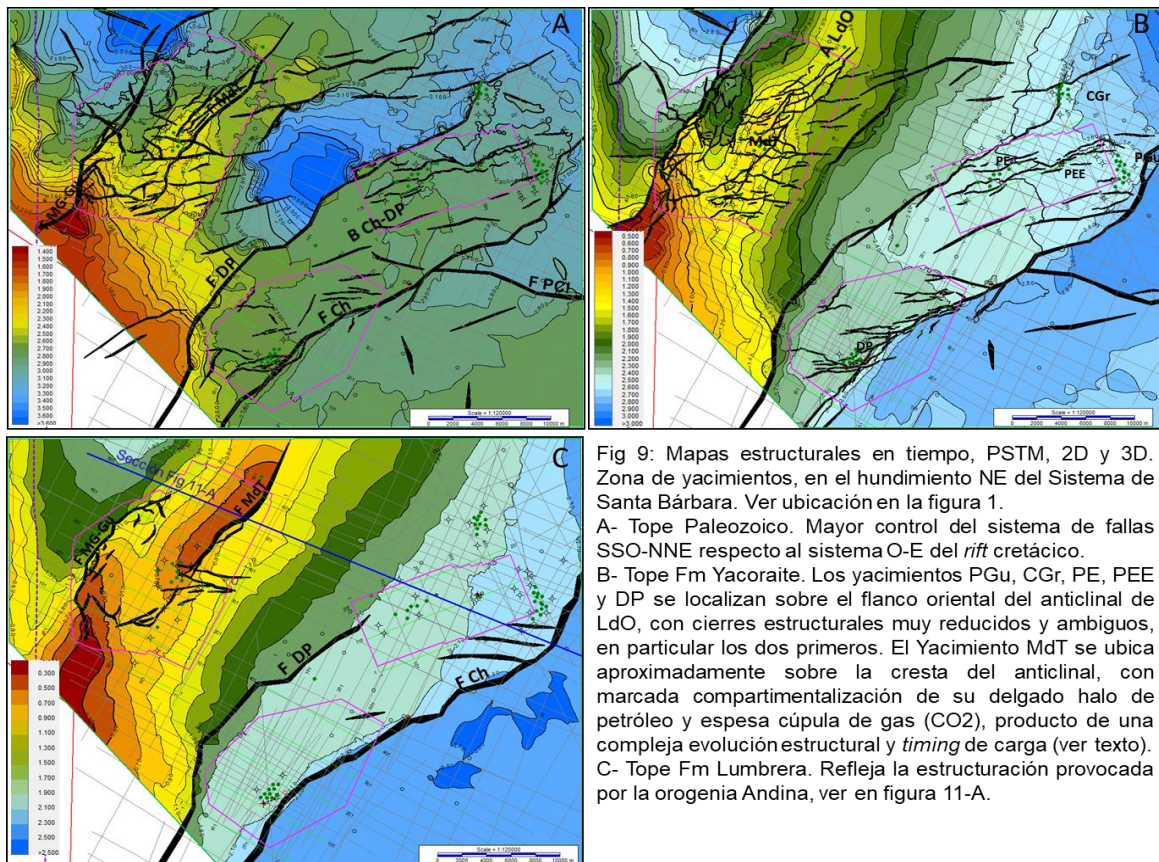
Este comportamiento estratigráfico, junto a las características sedimentológicas de estos depósitos cenozoicos, han sido analizados por DeCelles *et al.* (2011), quienes postulan para el noroeste argentino y Bolivia, desde el Paleoceno hasta el Plioceno y de oeste (límite con Chile) a este, el desarrollo y expansión de la faja orogénica Andina asociada a la onda de flexión de su cuenca de antepaís. Es decir, plantean la instauración de un régimen compresivo durante la depositación del SGr Santa Bárbara.

En el área de estudio, esta influencia compresiva desde el oeste, comenzó a manifestarse desde la base de la Fm Mealla y en función a la orientación de los dos sistemas de fallas del *rift* y de sus inclinaciones, estas fallas fueron luego invertidas en mayor o menor grado, como bajo-corrimientos, como es el caso de las fallas de las sierras occidentales del Sistema de Santa Bárbara o como corrimientos de lámina gruesa, como las fallas LdO 1, LdO 2, MdT, Dos Puntitas (F DP) y Chaguaral (F Ch), al comenzar a predominar el

régimen compresivo sobre el extensivo en el Paleógeno y, más intensamente, con la orogenia Andina en el Plioceno (Fig 8-B).

La zona de intersección de estos dos sistemas de falla, coincide con el hundimiento norte del Sistema de Santa Bárbara y con el cambio de rumbo del bloque Chaguaral-Dos Puntitas (B Ch-DP), a la altura del primer escalón del Flanco Sur, correspondiente a la falla directa de Puesto Climaco (F PCI). Esta zona de interferencia favoreció el desarrollo de estructuras tempranas con cierre en cuatro direcciones (“paleo-estructuras”); donde se concentran los principales yacimientos de petróleo del Flanco Sur (Fig 6-B).

Al mismo tiempo, a partir de esa zona de yacimientos (Fig 1), las fallas maestras del rift cretácico comienzan a sufrir una inversión (Andina) cada vez más intensa hacia el O y SSO (Figs 9 y 10), afectando con mayores rechazos el tope del Gr Salta (Figs 6-C y 9-C); salvo el caso de las fallas invertidas LdO 1, LdO 2 y MdT (Fig 6-C) que incrementan esos rechazos hacia el norte, al converger con un corrimiento somero con despegue en la sal de Olmedo. Este corrimiento sería producto del apretamiento reciente del sinclinal situado al oeste (Figs 8-B y 11-A). Como se ha mencionado con anterioridad y a pesar de su magnitud, estas estructuras no contribuyen a la eficiencia del sistema petrolero, por resultar tardías respecto a la carga.



El cambio de régimen tectónico a partir de la base de la Fm Mealla, se verifica claramente en esta zona de yacimientos en el mapa de espesor en tiempo del intervalo tope Yacoraite-tope Franja Gris (Fig 10-C), producto de dos efectos contrapuestos. Por un lado, en relación a la base de la Fm Olmedo, se verifican fuertes eventos extensionales en las fallas Guayacán (Gu) y Martínez del Tineo (MdT), generando estrechos y profundos hemigrábenes rellenos con sal (fase pre-Olmédica). Mientras, por otro lado, el tope de la

Fm Olmedo muestra truncación erosiva sobre el bloque colgante de las fallas Dos Puntitas (DP) y Chaguaral (Ch), indicativo de una inversión incipiente (fase pre-Mealla) ver figura 11-B. Este régimen compresivo debió continuar hasta el final del SGr Santa Bárbara, probablemente de manera episódica, según indican las suaves discordancias erosivas pre-Maíz Gordo y pre-Orán.

La resultante de los eventos extensionales y compresivos que afectaron al SGr Santa Bárbara durante el Paleógeno, se resumen en el mapa de espesor en tiempo de esta unidad (Fig 10-B), que expresa en forma aproximada la configuración estructural del tope de la Fm Yacoraite al final del Paleógeno y muy probablemente la imperante hasta la discordancia angular de la base de la Fm Piquete (Plioceno). Por lo tanto, es la que debió controlar las directrices de migración del petróleo generado y expulsado antes de la orogenia Andina (momento crítico), hacia las trampas entonces disponibles (Fig 10-B y 11-B), como sería el caso de los yacimientos Puesto Guardián (PGu), Cañada Grande (CGr), Pozo Escondido (PE), Pozo Escondido Este (PEE), Dos Puntitas (DP) y Martínez del Tineo (MdT). Todos correspondientes a estructuras paleógenas con cierres estructurales más amplios que los actuales (Fig 9-B) y con ubicaciones favorables respecto a las paleopendientes controlantes de la migración desde el *pod* generador

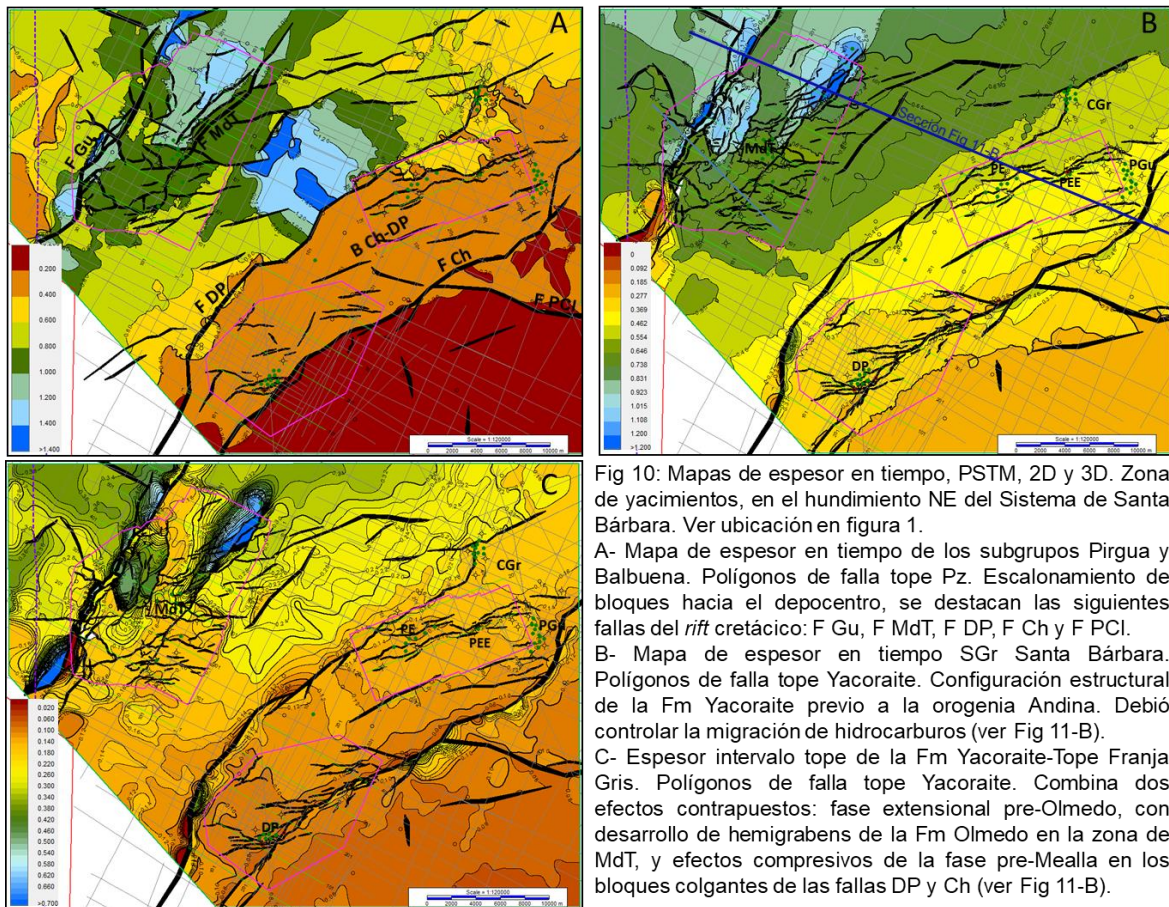


Fig 10: Mapas de espesor en tiempo, PSTM, 2D y 3D. Zona de yacimientos, en el hundimiento NE del Sistema de Santa Bárbara. Ver ubicación en figura 1.

A- Mapa de espesor en tiempo de los subgrupos Pirgua y Balbuena. Polígonos de falla tope Pz. Escalonamiento de bloques hacia el depocentro, se destacan las siguientes fallas del *rift* cretácico: F Gu, F MdT, F DP, F Ch y F PCI.

B- Mapa de espesor en tiempo SGr Santa Bárbara. Polígonos de falla tope Yacoraite. Configuración estructural de la Fm Yacoraite previo a la orogenia Andina. Debió controlar la migración de hidrocarburos (ver Fig 11-B).

C- Espesor intervalo tope de la Fm Yacoraite-Tope Franja Gris. Polígonos de falla tope Yacoraite. Combina dos efectos contrapuestos: fase extensional pre-Olmedo, con desarrollo de hemigrabens de la Fm Olmedo en la zona de MdT, y efectos compresivos de la fase pre-Mealla en los bloques colgantes de las fallas DP y Ch (ver Fig 11-B).

Esta interpretación explica, por otro lado, los resultados negativos de los diez pozos exploratorios Lomas de Olmedo (LO) perforados a lo largo y ancho del anticlinal homónimo, producto de la orogenia Andina, es decir, tardía respecto a la migración (Figs 6-B, 8-B y 11-A). Solo el pozo LO x-10, localizado al norte del yacimiento Martínez del Tineo (MdT), tuvo muy escasa producción de petróleo, probablemente remigrado. Los

demás fueron abandonados por improductivos, pero tuvieron manifestaciones de hidrocarburos, especialmente los del flanco oriental, evidenciando la existencia de generación, pero ausencia de trampas al momento de la expulsión.

Por todo esto, se interpreta que el petróleo generado en el depocentro de Lomas de Olmedo, debió migrar pendiente arriba hacia el sur y sureste, hasta encontrar las paleoestructuras de MdT, CGr, PGu, PE-PEE y DP, luego afectadas por la orogenia Andina y parcialmente preservadas hasta la actualidad (Fig 11-B y 11-A).

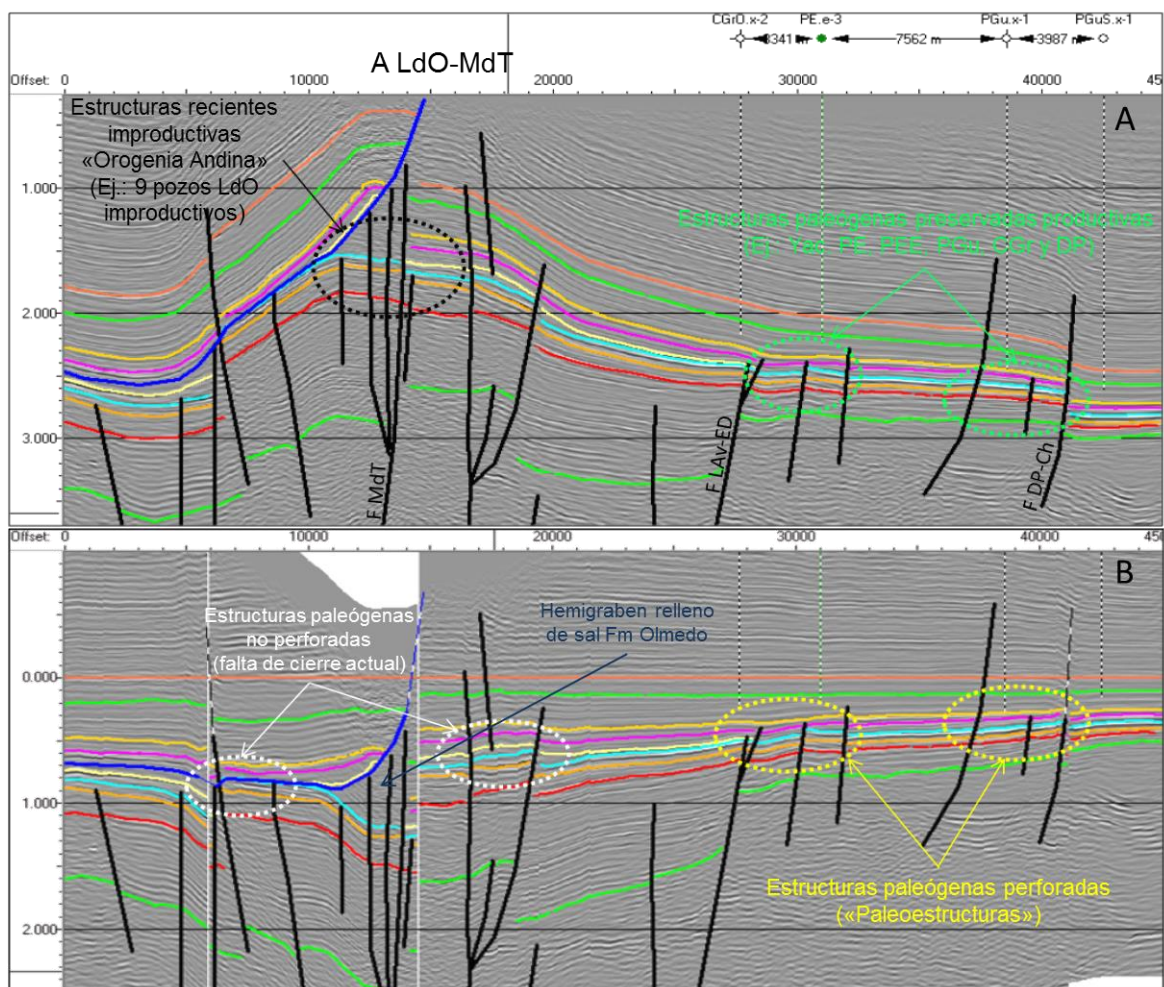
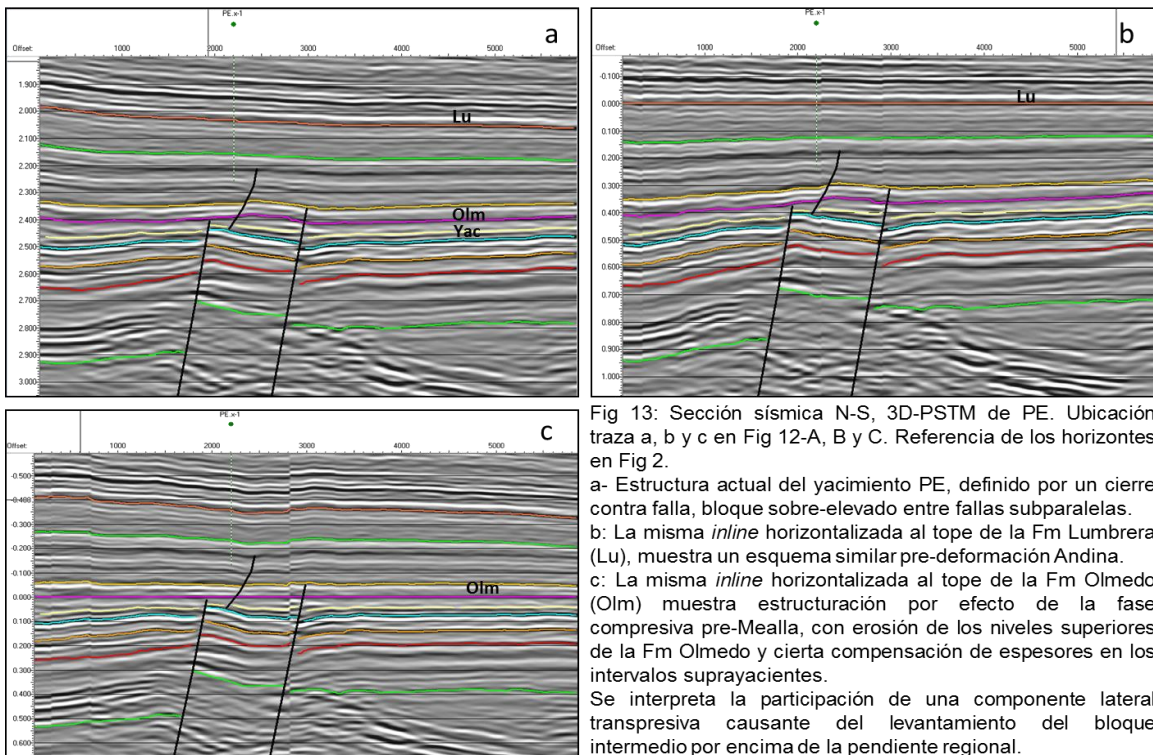
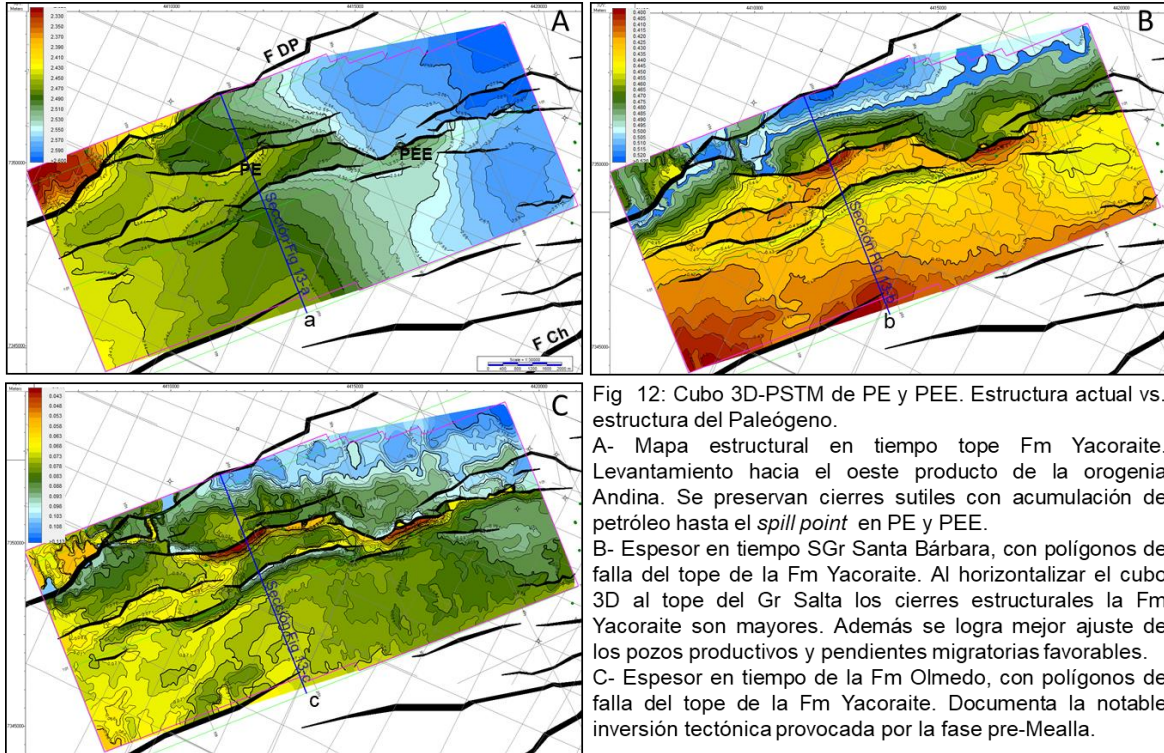


Fig 11: Sección sísmica 2D, PSTM (Traza azul Fig 9-C y 10-B). Referencia horizontes: ver Fig 2.

A- Estructura en tiempo del anticlinal de Lomas de Olmedo-Martínez del Tineo (LdO-MdT) y, hacia el este, parte de las estructuras de Pozo Escondido (PE) y Puesto Guardián (PGu). Al oeste, se destaca un corrimiento con despegue en la sal de Olmedo (línea azul) de alivio, por apretamiento del sinclinal, cuya emergencia estuvo controlada por las fallas maestras del hemigraben de LdO (Figs 6-C y 7-C). B- Sección horizontalizada al tope de la Fm Lumbrera. Notar fallas de basamento (rift) congeladas antes de alcanzar la Franja Gris, algunas cortan el tope de la Fm Lumbrera y muy pocas alcanzan la superficie. El corrimiento es posterior. Los yacimientos corresponden a estructuras paleógenas preservadas. La inversión del hemigraben de Lomas de Olmedo ocurrió con posterioridad a la generación, expulsión y migración del petróleo (momento crítico), lo cual explica su esterilidad, siempre y cuando no se superponga a estructuras paleógenas, como ocurre en el yacimiento Martínez del Tineo, situado al sur de esta sección.

Si bien el análisis realizado hasta aquí incorpora la sísmica 3D, presenta la limitación de una malla sísmica 2D muy abierta. Por ello, se considera conveniente focalizar

brevemente sobre cada cubo 3D en particular, dado su aporte en la caracterización de algunos yacimientos del Flanco Sur, como así también, en el apuntalamiento de los factores controlantes de la distribución de la acumulación de los hidrocarburos, particularmente en el ámbito de influencia del Sistema de Santa Bárbara.



La sísmica 3D de los yacimientos Pozo Escondido (PE) y Pozo Escondido Este (PEE), permite analizar un tramo del sistema de fallas de orientación O-E que tiende a conectar con las fallas Dos Puntitas (F DP) y Chaguaral (F Ch) del sistema SSO-NNE, sin llegar a cubrir completamente dicha posible vinculación, no definida por la sísmica 2D (Figs 10 y 12).

Las estructuras de estos yacimientos para el tope de la Fm Yacoraite, están conformados por un conjunto de segmentos de falla subparalelos entre si, con alta inclinación hacia el norte, que en planta adoptan una disposición en echelón y que en conjunto, limitan un bloque sobreelevado y tilteado hacia el sur (Figs 12-A y 13-a). Todo el ámbito del cubo muestra a su vez, una suave pendiente hacia el naciente, producto del levantamiento Andino. Al horizontalizar al tope de la Fm Lumbrera, este efecto desaparece y se fortalece la estructura paleógena (Figs 12-B y 13-b). Particularmente se destaca que los cierres de las estructuras de PE y PEE son mayores, abarcando consistentemente los pozos productivos, cosa que no ocurre en la estructura actual de la Fm Yacoraite.

Una característica muy destacable de esta estructura O-E, es que al horizontalizar al tope de la Fm Olmedo (Fig 12-C) se registra aproximadamente la misma configuración. Esto permite plantear que la fase pre-Mealla es la responsable de generar este bloque sobre elevado y tilteado, muy probablemente por transpresión (Fig 13-C), con marcada erosión del tope de la Fm Olmedo en dicho bloque (Boll et al. 1989). Mientras que, la fase pre-Olmédica, no parece haber actuado, dado el paralelismo de los horizontes inferiores de la Fm Olmedo con el tope de la Fm Yacoraite. Las trampas de estos dos yacimientos están llenos hasta el *spill point*, resultando un claro ejemplo de pérdida de cierre y derrame por efecto del tilteo regional Andino y, por otro lado, de haber constituido trampas con ubicaciones favorables para la carga respecto a las directrices de migración existentes con anterioridad a dicha deformación (Fig 7-B). A estos factores se suma el buen desarrollo de la Arena 6, probablemente también relacionada a un posible control sedimentario por parte de las fallas del *rift*, antes descriptas (Figs 5-C y D).

Por su parte, la sísmica 3D de Dos Puntitas (DP), cubre un tramo de la falla invertida Chaguaral (F Ch), constituyendo un buen ejemplo del sistema de fallas NNE-SSO, con participación secundaria del sistema de fallas O-E (Fig 14). Ambos sistemas de falla se desarrollaron bajo un régimen extensional durante el *rift* cretácico, con fallas directas inclinando generalmente hacia el depocentro; pero que a partir del Paleógeno, más precisamente con la fase pre-Mealla, comenzaron a invertirse bajo un régimen compresivo hasta el presente, particularmente con la orogénia Andina (Plioceno). Producto de esta inversión se generó el anticlinal de Dos Puntitas, en cuya cresta se encuentra el yacimiento homónimo, con un llenado parcial de la estructura (Fig 14-A). Si se analiza la configuración estructural existente al final del Gr Salta, horizontalizando el 3D al tope de la Fm Lumbrera, se observa que ya existía un cierre para el yacimiento, conformado por un bloque colgante sobreelevado por efecto de la inversión de los dos sistemas de falla (Fig 14-B). El cierre de dicha trampa paleógena ajusta mejor con los pozos productivos, con un llenado hasta el *spill point*. Una estructura similar se logra al horizontalizar al tope de la Franja Gris (Fig 14-C), pero algo más suave, lo que evidencia que la actividad compresiva continuó. Esta evolución estructural acaecida durante el Paleógeno se aprecia muy bien en la sección sísmica transversal a la falla Chaguaral (Figs 15-a, b y c), donde se destaca la inversión de la Fm Yacoraite y la truncación erosiva del tope de la Fm Olmedo.

Esta inversión de la unidad objetivo, a lo largo de la F Ch (Figs 14-B y C), debió constituir una barrera importante para la migración del petróleo proveniente del noroeste, y el sistema de fallas O-E, un factor de entrapamiento complementario como ocurre en DP; con probabilidad de constituir trampas contra otras fallas similares, siempre y cuando la orogénia Andina no haya desnaturalizado los cierres originales.

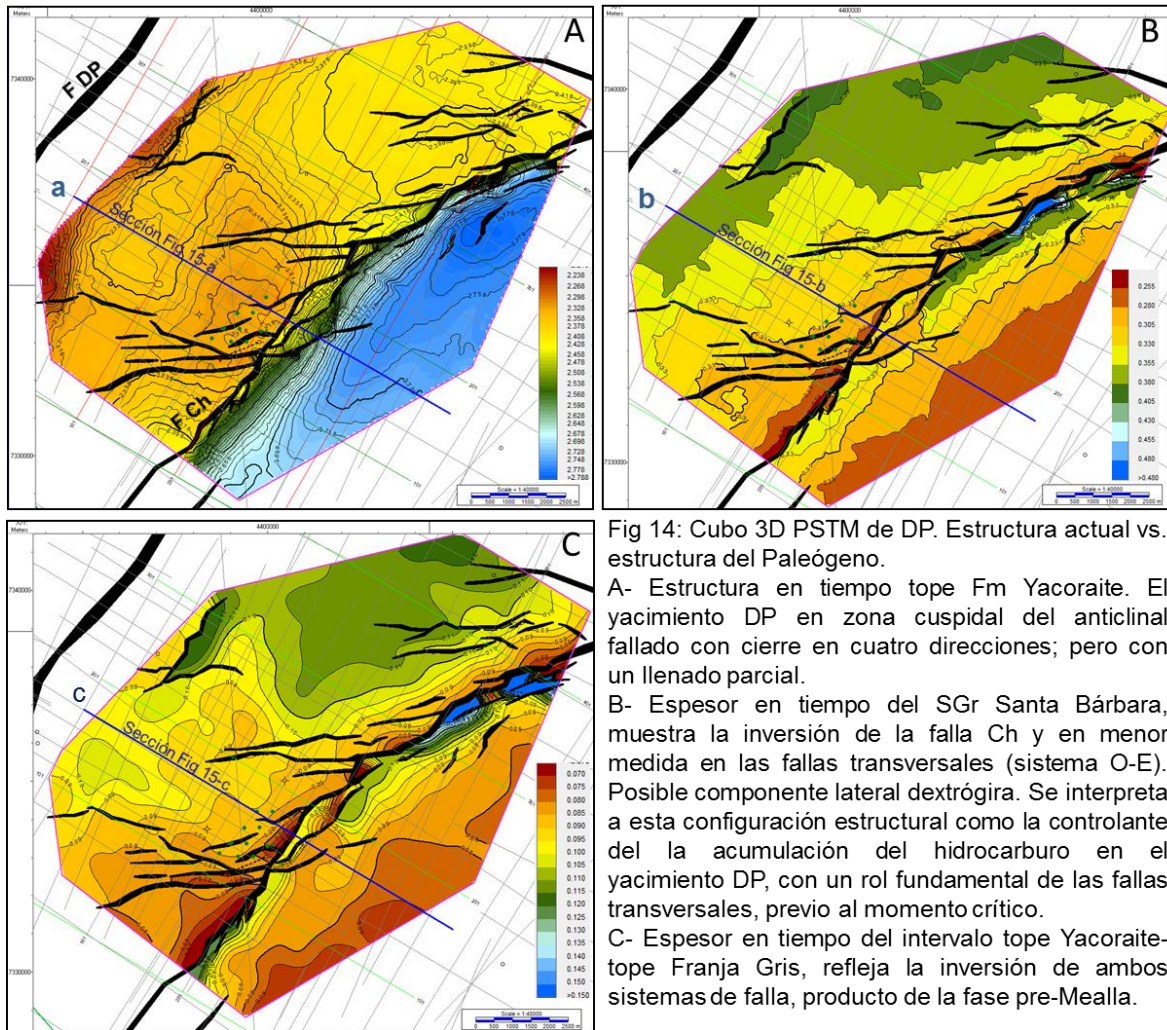


Fig 14: Cubo 3D PSTM de DP. Estructura actual vs. estructura del Paleógeno.

A- Estructura en tiempo tope Fm Yacoraite. El yacimiento DP en zona cuspidal del anticlinal fallado con cierre en cuatro direcciones; pero con un llenado parcial.

B- Espesor en tiempo del SGr Santa Bárbara, muestra la inversión de la falla Ch y en menor medida en las fallas transversales (sistema O-E). Posible componente lateral dextrógrira. Se interpreta a esta configuración estructural como la controlante del la acumulación del hidrocarburo en el yacimiento DP, con un rol fundamental de las fallas transversales, previo al momento crítico.

C- Espesor en tiempo del intervalo tope Yacoraite-tope Franja Gris, refleja la inversión de ambos sistemas de falla, producto de la fase pre-Mealla.

La sísmica 3D registrada sobre el yacimiento Martínez del Tineo (MdT), excede afortunadamente los límites de este yacimiento, aportando información valiosa sobre una parte del hundimiento norte del Sistema de Santa Bárbara, en el subsuelo (Figs 1 y 16). Aquí la orogenia Andina fue más intensa, con estructuras más apretadas, afectando por ello la imagen sísmica. Sin embargo, es posible reconocer los dos sistemas de falla principales que actuaron bajo un régimen extensivo durante el *rift* cretácico. Entre los de orientación SSO-NNE se destacan las fallas de Guayacán (F Gu), con alta inclinación hacia el este y la falla de Martínez del Tineo (F MdT), con inclinación de alto ángulo hacia el oeste, conformando una zona de transferencia antitética visto a escala regional (Fig 6-A). Ambos sistemas desarrollaron hemigrábenes para el SGr Pirgua y para la Fm Olmedo. El hemigraben relleno con sal de la Fm Olmedo es muy notorio en el caso de la falla MdT (Figs 16-B y C y 11-B). Mientras que los del sistema O-E, fueron menos importantes en cuanto a la magnitud de los rechazos de sus fallas extensionales y sus inclinaciones, también de alto ángulo, fueron predominantes hacia el norte. Este régimen extensivo afectó a ambos sistemas de falla hasta la depositación de la Fm Olmedo y finalizó con la primer fase compresiva pre-Mealla (Figs 16-C y 17-c), a partir de la cual se verifica una inversión de ambos sistemas, conformando una importante estructuración paleógena previa al momento crítico (Fig 16-B). La cual debió controlar la distribución de los hidrocarburos al ajustar mejor la productividad de los pozos que la de la

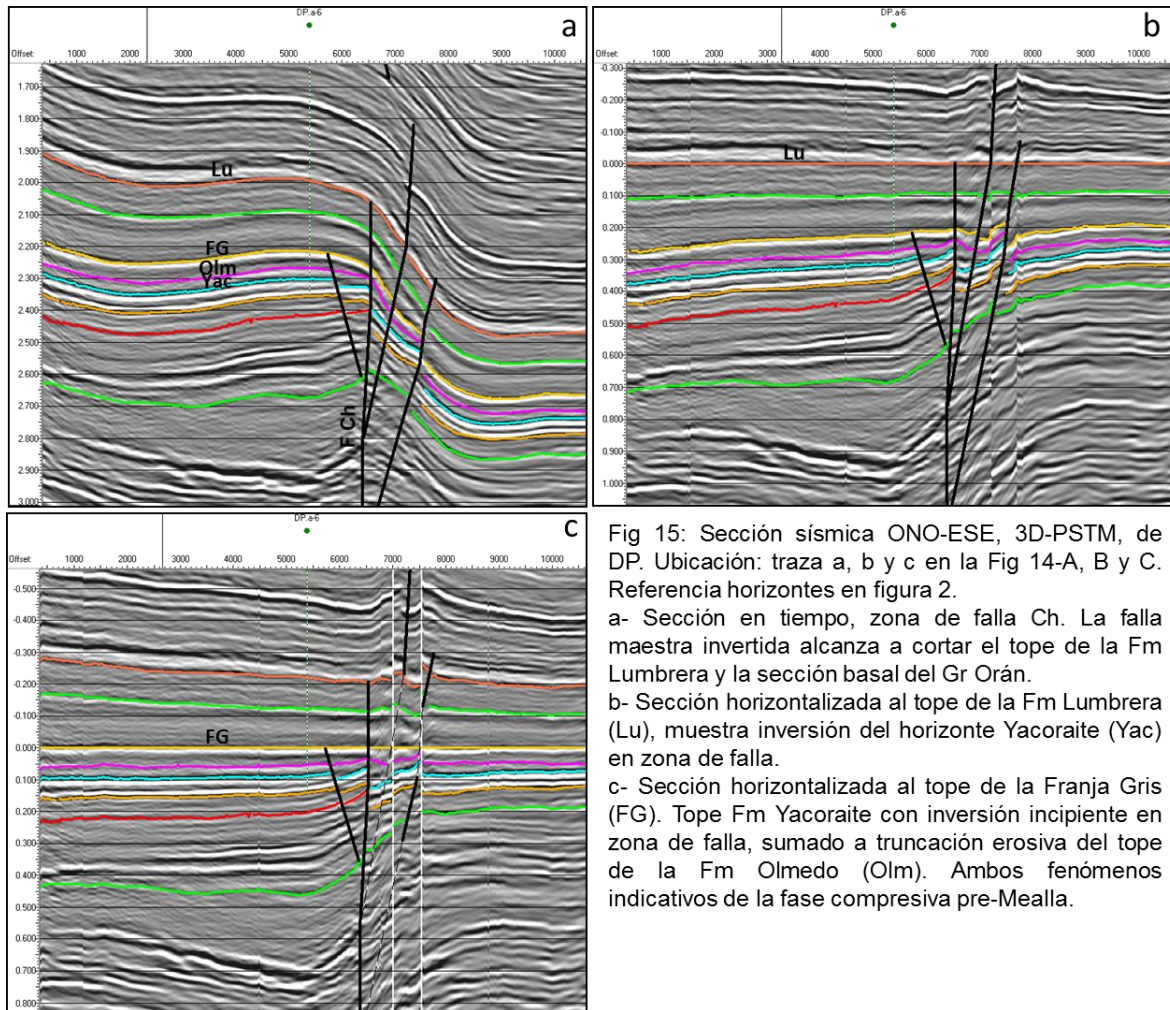


Fig 15: Sección sísmica ONO-ESE, 3D-PSTM, de DP. Ubicación: traza a, b y c en la Fig 14-A, B y C. Referencia horizontes en figura 2.
a- Sección en tiempo, zona de falla Ch. La falla maestra invertida alcanza a cortar el tope de la Fm Lumbrales y la sección basal del Gr Orán.
b- Sección horizontalizada al tope de la Fm Lumbrales (Lu), muestra inversión del horizonte Yacoraite (Yac) en zona de falla.
c- Sección horizontalizada al tope de la Franja Gris (FG). Tope Fm Yacoraite con inversión incipiente en zona de falla, sumado a truncación erosiva del tope de la Fm Olmedo (Olm). Ambos fenómenos indicativos de la fase compresiva pre-Mealla.

estructura actual de la Fm Yacoraite (Fig 16-A). Se debe aclarar sin embargo, que el Yacimiento de Martínez del Tineo tiene una importante cúpula de gas carbónico y un halo de petróleo delgado, del orden de los 35 m, determinando que la zona productiva de la mayoría de los pozos queda comprendida en la interface de las formaciones Lecho y Yacoraite. Además, dada la compartimentalización del yacimiento en varios bloques, como indican los diferentes contactos agua-petróleo y petróleo-gas, en cada uno de ellos, se deduce que las fallas debieron ser estancas o relativamente estancas para la mayor parte del SGr Balbuena. Una posible explicación sería que el petróleo llenó primero las trampas conformadas en el Paleógeno, luego con la orogenia Andina, el yacimiento fue transportado a la posición actual; y en el ínterin el SGr Balbuena fue fracturado y cargado con CO₂, quedando el halo petrolífero acotado por los respectivos *spill point* actuales. Finalmente, se realiza una breve descripción de las paleoestructuras que controlaron los yacimientos Cañada Grande (CGr), Puesto Guardián (PGu) y El Vinalar Norte (EVN), discernibles sobre líneas sísmicas 2D, PSTM, (Fig 18). En el caso de Puesto Guardián y Cañada Grande, los cierres estructurales actuales son mínimos (Figs 9-B y 18-A, B y C), aunque no se puede descartar una componente estratigráfica, por la lenticularidad y convexidad del reservorio eólico A 6 (Figs 3 y 4). Resulta en cambio, más sencillo explicar estas dos acumulaciones mediante las estructuras existentes en el Paleógeno (Figs 18-B' y C'), por haber sido mayores los cierres, por la pendiente regional favorable para la migración del petróleo desde el *pod* generador y porque las pequeñas estructuras

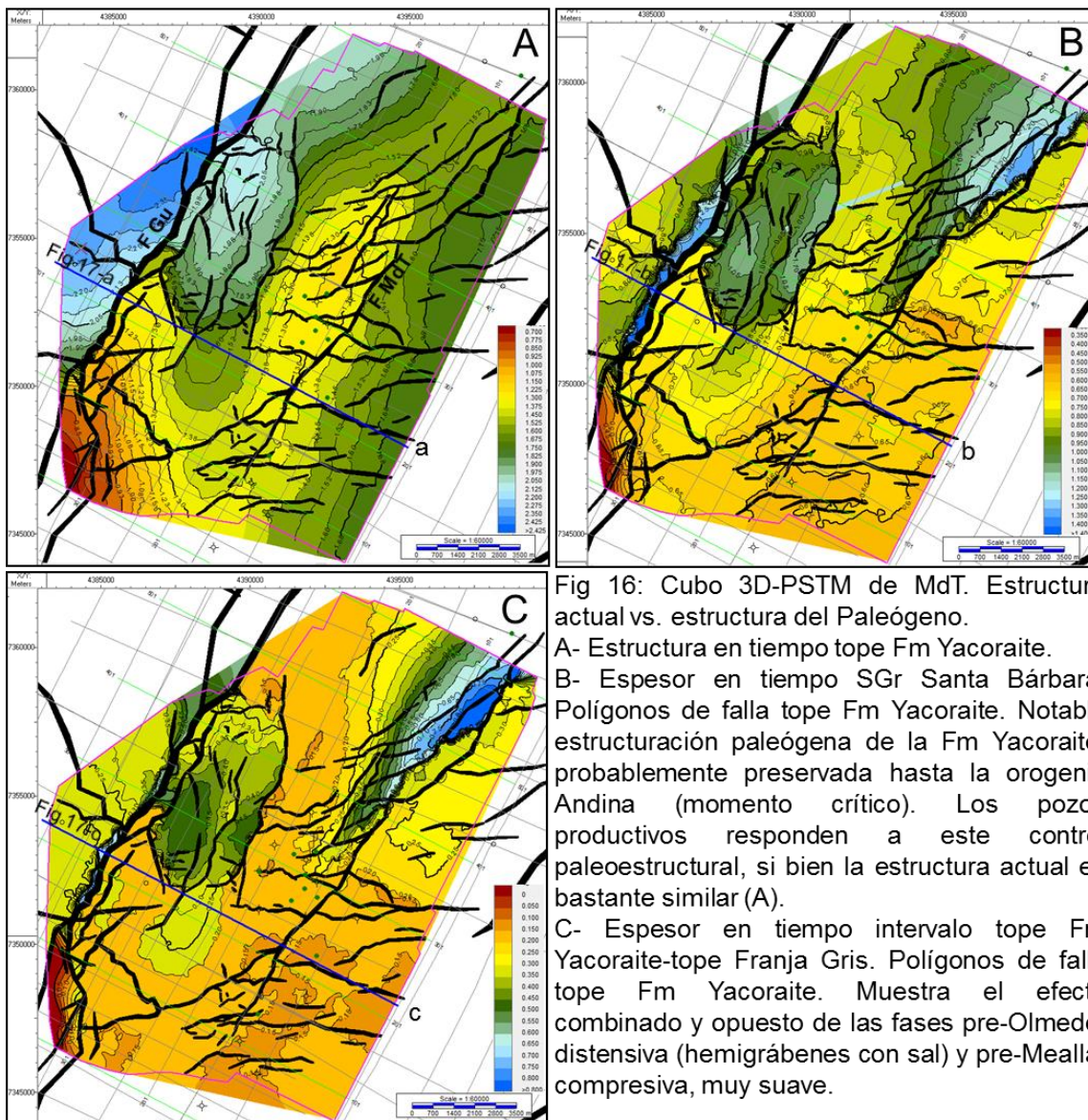


Fig 16: Cubo 3D-PSTM de MdT. Estructura actual vs. estructura del Paleógeno.

A- Estructura en tiempo tope Fm Yacoraite.
 B- Espesor en tiempo SGr Santa Bárbara. Polígonos de falla tope Fm Yacoraite. Notable estructuración paleógena de la Fm Yacoraite, probablemente preservada hasta la orogenia Andina (momento crítico). Los pozos productivos responden a este control paleoestructural, si bien la estructura actual es bastante similar (A).
 C- Espesor en tiempo intervalo tope Fm Yacoraite-tope Franja Gris. Polígonos de falla tope Fm Yacoraite. Muestra el efecto combinado y opuesto de las fases pre-Olmedo, distensiva (hemigrábenes con sal) y pre-Mealla, compresiva, muy suave.

actuales, remanentes de aquellas paleoestructuras, están llenas hasta el *spill point*. El yacimiento El Vinalar Norte (Fig 18-A), ubicado al este, en un ámbito donde habría predominado el régimen extensional (*sag*) sin inversión; pero con evidencias de componentes de rumbo dextrógiros durante el Paleógeno, la trampa corresponde a un *rollover* en bloque colgante, desarrollado durante la depositación del Gr Salta (Figs 18-D y D'). El llenado de la trampa es parcial, probablemente por no haber sufrido una disminución de su cierre estructural por la basculación regional Andina. Similares características tiene el yacimiento Puesto Climaco (PCI), situado más al este (Fig 1), donde el llenado del *rollover* es sólo de un tercio de su cierre. Otras estructuras productivas ubicadas hacia el noreste del área de estudio, cercanos al eje de la Subcuenca de Lomas de Olmedo, como La Reina y La Bolsa-Yacarecito (Figs 1 y 6), también fueron controladas por fallas invertidas del *rift* cretácico del sistema de fallas O-E. Corresponden a estructuras positivas transpresivas, desarrolladas durante las fases pre-Mealla, pre-Maíz Gordo y pre-Gr Orán, con cierre en cuatro direcciones y compartimentalizadas por un sistema de fallas subparalelas. Esto implica que los efectos

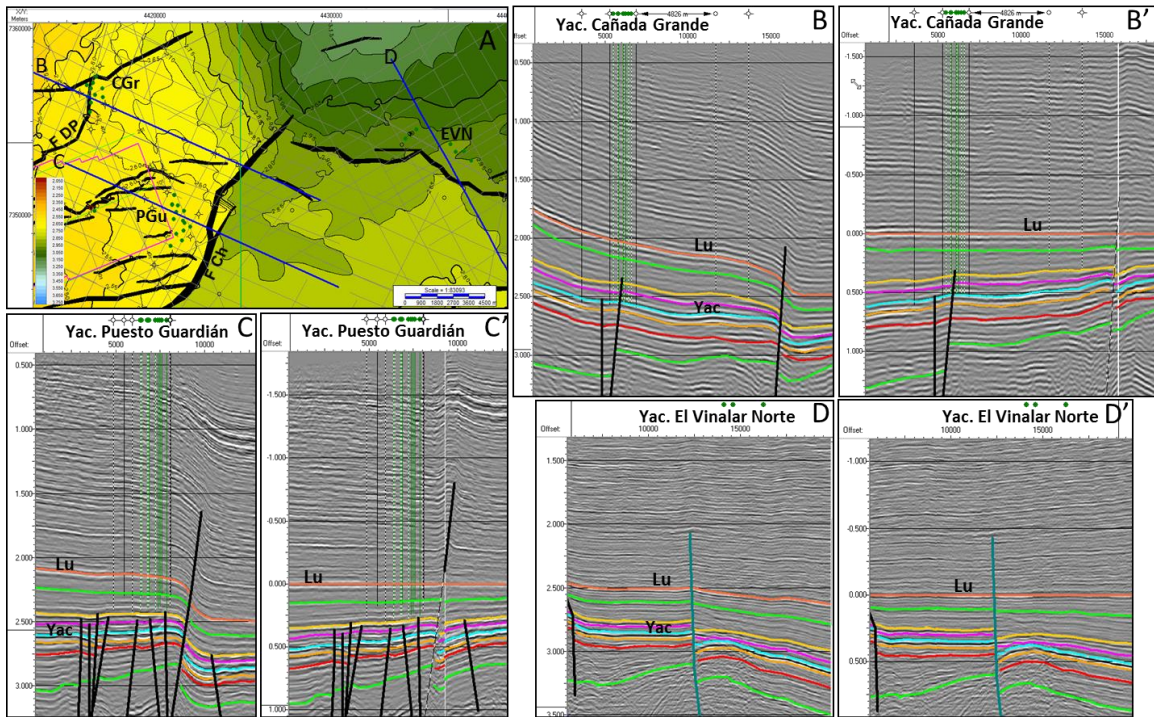
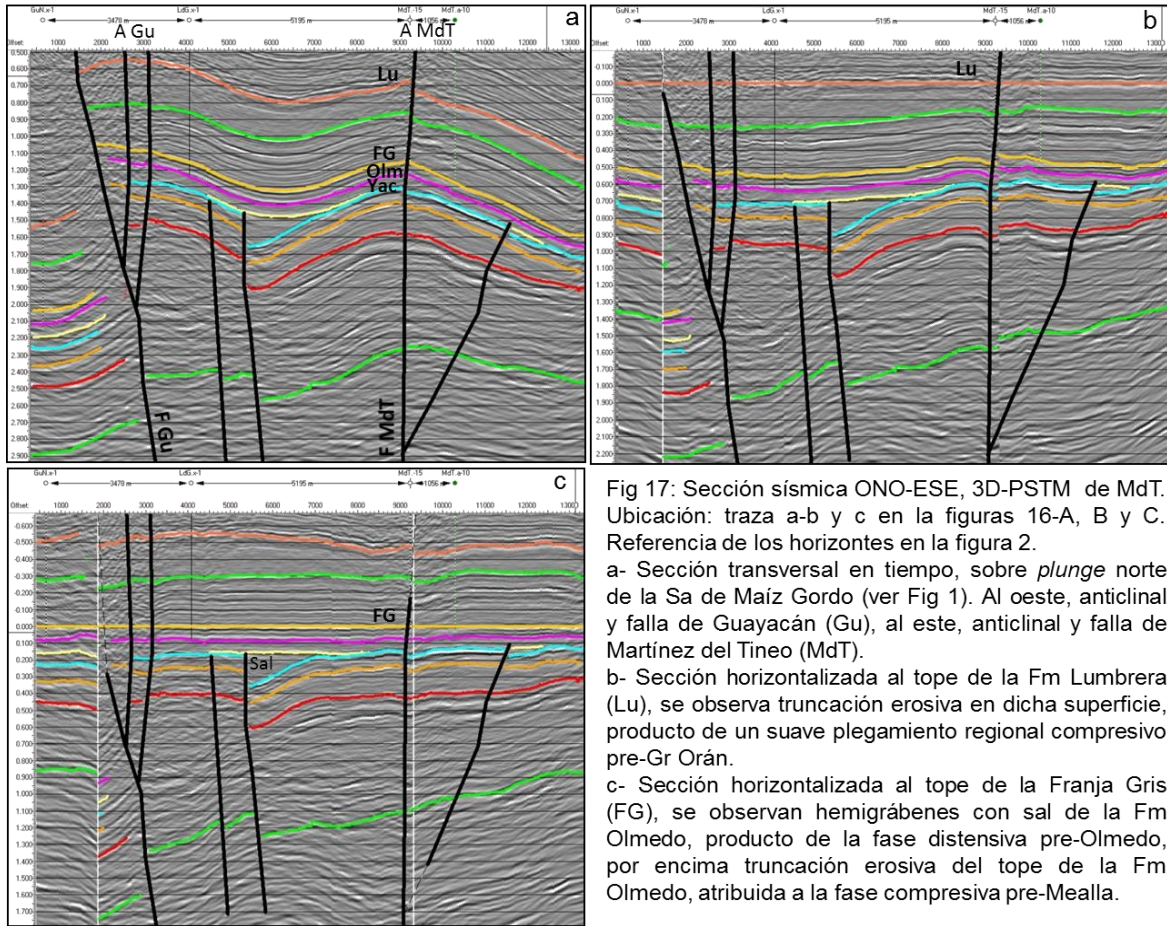


Fig 18: Control paleoestructural en los yacimientos Cañada Grande (CGr), Puesto Guardián (PGu) y El Vinalar Norte (EVN). A- Mapa estructural en tiempo tope Fm Yacoraite. Al comparar secciones sísmicas 2D PSTM de los yacimientos CGr y PG (B y C) con las mismas secciones horizontalizadas al tope de la Fm Lumbrera (B' y C') se observa que los cierres estructurales y las pendientes respecto al *pod* generador eran más favorables en el Paleógeno que con la estructura actual. Esto explica el llenado hasta el *spill point* de estos yacimientos. La estructura de EVN, a diferencia de las otras dos, no muestra inversión quedando la trampa conformada por un *rollover* en el bloque colgante, desarrollada principalmente durante la depositación del Gr Salta (D y D'). Al igual que Puesto Climaco, son estructuras con predominio de un régimen extensional.

de los esfuerzos compresivos paleógenos continuaron hacia el oriente, en función de la existencia de antiguas zonas de debilidad basamentales. En consecuencia, resulta ambiguo establecer un límite para la actividad compresiva en este sector de la Subcuenca de Lomas de Olmedo, donde el *rift* cretácico tiene una disposición dominante O-E.

SISTEMA PETROLERO

En el área de estudio el sistema petrolero se define como Yacoraite-Yacoraite (!) por ser la formación que contiene a las facies generadoras y los principales reservorios productivos (Gómez Omil y Boll, 1999).

Las mejores facies generadoras, con mayor contenido de Carbono Orgánico Total (COT), son pelitas gris oscuras a negras, relacionadas a los mayores episodios de inundación de la cuenca, generalmente delgados y con distribución regional, pero alejados de los bordes con aporte clástico. Es decir, depositadas en condiciones de cuenca hambrienta, con baja tasa de sedimentación y bajo condiciones reductoras. Esto favoreció la concentración y preservación del material orgánico, mayormente de origen algal amorfo, tipo II-(III), pro-petróleo. El ambiente deposicional sigue en discusión; pero en general los autores coinciden en que correspondió a un mar o un lago muy somero y extenso, sujeto a desecaciones periódicas, con muy probable conexión oceánica distante y restringida (Boll *et al.* 1989; Uliana *et al.* 1999; Starck 2011).

Para la zona de estudio las mejores secciones generadoras, definidas con datos geoquímicos de perfiles de superficie (Fig 1) y de pozos (Arias 1987, en Boll *et al.* 1989), se concentran en el depocentro de Lomas de Olmedo. Entre los mejores perfiles de superficie se destaca el del Cerro Amarillo con 11 m de pelitas generadoras en el Mb Las Avispas, con un rango de COT de 4 a 0.5%, mientras que en el Mb Puesto Guardián se discriminaron 30 m, con valores de COT de 2 a 0.4%. Entre los pozos, el YPF.St.MdT a-3 (Martínez del Tineo), que cuenta con una corona continua y completa de la Fm Yacoraite de 247,5 m de longitud, cuya descripción litológica de detalle y riguroso muestreo geoquímico, permitió identificar 38 m de pelitas con valores de COT entre 5 y 1% en el Mb Las Avispas y 80 m en el Mb Puesto Guardián, con valores entre 6 y 1.5%. Estos últimos resultan comparativamente altos respecto a los datos regionales y podrían tener algún problema de contaminación por petróleo migrado, por ser un yacimiento fisurado (Arias, com. verb.).

Hacia el depocentro de Lomas de Olmedo también aumenta el soterramiento de la Fm Yacoraite debido al espesamiento del SGr Santa Bárbara y del Gr Orán, como demuestran las horizontalizaciones sísmicas previas a la orogenia Andina (Fig 8-B), con estimaciones de espesor de las rocas de sobrecarga superiores a los 5000 m, garantizando condiciones de generación en ventana de petróleo y gas para el ámbito del hemigraben de Lomas de Olmedo. Abonan esta conclusión puntos de control con soterramientos similares o menores, como es el caso de los pozos Yacarecito, La Bolsa, Valle Morado, Caimancito (Figs 1, 7-B y 8-B), con producción de hidrocarburos livianos y condensados, como así también lo sugieren modelados realizados en otros puntos de la

cuenca (Vergani et al. 2008). El límite del *pod* generador de la Fm Yacoraite de la figura 1 es tentativo, al ser delineado con puntos de control regionales (Gómez Omil y Boll, 1999). Respecto a los reservorios (Fig 3), la mayoría de los yacimientos del Flanco Sur producen de la Arena 6. En menor proporción, de reservorios carbonáticos del Mb Las Avispas, principalmente de las facies de alta energía del intervalo III-b / III y, en Pozo Escondido y Dos Puntitas, del intervalo III / I. También se registraron producciones menores de otras areniscas lenticulares del Mb Las Avispas y tramo superior del Mb Puesto Guardián. Un caso particular es el del yacimiento Martínez del Tineo, que produce de la interface Fm Lecho-Mb Puesto Guardián inferior, con porosidad dominante por fractura. En conclusión, rara vez los pozos fracasan por ausencia de reservorio.

Aceptando que las condiciones de generación expulsión estaban garantizadas previo al inicio de la orogenia Andina, estimado en 3.5 Ma, surge como incógnita las vías de migración dada la escasa cantidad y pobre calidad de los *carriers* que presenta la Fm Yacoraite en posiciones internas de cuenca, además de la gran cantidad de sellos internos que impiden la migración vertical. Sin embargo, dada la proximidad de los yacimientos a zonas de falla del *rift*, se presume que estos debieron haber jugado un papel importante por su gran extensión areal y limitado desarrollo vertical, como se puede verificar comparando las figuras 6-A y C. Y si bien, las fallas pueden afectar el tope de la Fm Lumbrera, no llegan mucho más allá dentro de facies predominantemente arcillosas. Otra posibilidad es que las migraciones hayan sido cortas, particularmente en el caso de producción en la Arena 6, al estar cubierta por el principal intervalo generador de la cuenca (mfs: III-a / III- b); pero esto implicaría quizás una roca madre limitada. El predominio de petróleos de aproximadamente 40° API en los principales yacimientos del Flanco Sur, de alguna manera avalan esta última hipótesis, dado el soterramiento y capacidad generadora que presenta la Fm Yacoraite en ese ámbito.

En función de estos antecedentes, el factor crítico del sistema petrolero, es el *timing* de la generación-expulsión-migración en relación a la evolución estructural de la cuenca, particularmente a la conformación de las trampas estructurales y a la existencia de directrices favorables de migración desde el *pod* generador hacia dichas trampas. De allí la importancia de las estructuras paleógenas, en general disponibles para la carga, en contraposición a las pliocenas, tardías respecto a la carga, ya que entre ambas no parece haber existido una tectónica capaz de generar trampas. Por esta razón, se ubica al momento crítico hacia los 3.5 Ma, al comienzo de la orogenia Andina, la cual afectó severamente la preservación las acumulaciones de petróleo conformadas hasta ese momento, posibilitando quizás remigraciones, en principio poco eficientes, por falta de llenado en las estructuras jóvenes.

Finalmente, una breve mención a las trampas estratigráficas, que siempre constituyeron un objetivo exploratorio y en el desarrollo de los yacimientos, particularmente la Arena 6, pero que por sus características, resultan difíciles de localizar, tanto mediante modelos sedimentarios como mediante interpretación sísmica. Lo mismo ocurre con los reservorios volcánicos y sub-volcánicos, aunque estos últimos han sido muy exitosos en otras posiciones de cuenca, como es el caso de Palmar Largo, en la provincia de Formosa.

CONCLUSIONES

- El Mb Las Avispas de la Fm Yacoraite, queda limitada por discordancias erosivas, *mks* V y I, relacionadas a sendas fases tectónicas extensivas que modificaron la paleogeografía de la cuenca. Entre ellas se identifica una nueva discordancia erosiva, *mkr* III, del mismo tipo, que limita el tercio inferior del Mb Las Avispas.
- El intervalo comprendido entre los *mks* V y III, contiene a la Arena 6, a las facies con mayor potencial generador de la Fm Yacoraite; a las facies carbonáticas de

mayor energía/porosidad y, consecuentemente, las mayores producciones del Flanco Sur.

- En el área de estudio, predominan dos sistemas de fallas principales del *rift* cretácico. Uno más importante SSO-NNE, con expresión superficial en el Sistema de Santa Bárbara, y otro con orientación variable O-E a OSO-ENE, consistente con el arrumbamiento regional de la Subcuenca de Lomas de Olmedo.
- Ambos sistemas se interfieren y controlan el hundimiento NE del Sistema de Santa Bárbara, donde se concentran los principales yacimientos del Flanco Sur.
- Dichos sistemas de falla, en el ámbito de influencia del Sistema de Santa Bárbara analizado, presentan evidencias de inversión compresiva a partir de la base de la Fm Mealla, en la base de la Fm Maíz Gordo y en el tope de la Fm Lumbrera, es decir entre los 60 y 40 Ma, hipotéticamente vinculados a un despegue profundo que podría conectar con el frente de la Cordillera Oriental.
- Esta estructuración compresiva paleógena quedó en general congelada a partir de la suave discordancia angular del tope de la Fm Lumbrera. A continuación, tras un hiato de más de 20 Ma, comenzó hacia los 19 Ma el Gr Orán, con más de 4000 m de depósitos relativamente tabulares, que rematan en una discordancia angular indicativa del inicio de la orogenia Andina, datada en 3.5 Ma.
- El límite oriental del ámbito de influencia del régimen compresivo paleógeno se ubicaría en la falla Chaguaral. Pero al perder esta falla rechazo hacia el norte, el límite se torna ambiguo, aunque los efectos de la dicha actividad se siguen manifestando por transpresión en una serie de fallas del sistema O-E (*rift*), como es el caso de las estructuras de La Bolsa/Yacarecito y La Reina.
- La Fm Yacoraite presenta en el depocentro de Lomas de Olmedo más de 100m de pelitas negras con COT entre 5 y 1%, pro-petróleo y un soterramiento superior a los 5000 m, previo al momento crítico (3.5 Ma). Esto implica que habría transitado la ventana de petróleo y, quizás, habría ingresado en la de gas, como indican los yacimientos profundos cercanos.
- Todos los yacimientos ubicados dentro de la zona de influencia del Sistema de Santa Bárbara, responden al control estructural paleógeno compresivo y episódico, generalmente expresado por una incipiente inversión de los dos sistemas de falla del *rift* cretácico, identificadas como “paleoestructuras”.
- En la zona oriental, sin evidencias de tectónicas compresivas paleógenas, ni de la orogenia Andina, las trampas responden a estructuras extensionales de la etapas de *post-rift* y *sag* de la cuenca. Generalmente son *rollovers* del bloque colgante, pobres en llenado y productividad.
- Si bien el control paleoestructural paleógeno ha sido descrito para el ámbito de influencia de Sistema de Santa Bárbara, más precisamente en su hundimiento noreste, donde aún puede constituir una herramienta válida de exploración y desarrollo, también se sugiere tenerlo en cuenta en otras regiones de la cuenca donde se hayan registrado regímenes compresivos tempranos.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a President Petroleum S.A. el habernos autorizado la publicación de este trabajo.

REFERENCIAS CITADAS

Bianucci, H., 1999. Estructura y evolución estructural del rift-relación con la estratigrafía. Subcuenca de Lomas de Olmedo (rama oriental). En: González Bonorino G., R. Omarini

and J. Viramonte (Eds.) Geología del Noroeste Argentino, Relatorio del 14º Congreso Geológico Argentino, Salta 1999, tomo 1, pp. 292–300, UNSA, Salta, Argentina.

Bianucci, H., J. Cerdán y O. Acevedo, 1980. Estructuración tectónica pre-Olmedo en un sector de la Subcuenca de Lomas de Olmedo. Informe inédito YPF, Buenos Aires.

Bianucci, H., O. Acevedo y J. Cerdán, 1981. Evolución tectosedimentaria del Grupo Salta en la Subcuenca de Lomas de Olmedo (Provincia de Salta y Formosa). VIII Cong. Geol. Arg. San Luis. Actas III: 159-172.

Bianucci, H. y Homovc, J. F., 1982. Tectogénesis de un sector de la cuenca del Subgrupo Pirgua. Noroeste Argentino. Actas Quinto Cong. Latinoam. de Geología, 1: 539-546.

Bianucci, H., J. Homovc y O. Acevedo, 1982. Inversión tectónica y plegamientos resultantes en la comarca Puesto Guardián-Dos Puntitas, Departamento Orán, Provincia de Salta. 1º Congreso Nacional de Hidrocarburos -Petróleo y Gas-, 23-30. Buenos Aires.

Boll A., y R. Hernández, 1985. Área Tres Cruces. Provincia de Jujuy. Análisis estratigráfico-estructural. Evaluación como objetivo exploratorio. Informe inédito YPF.

Boll A., R. Gómez Omil, y R. Hernández, 1989. Síntesis Estratigráfica del Grupo Salta. Informe inédito, YPF, Buenos Aires.

Boll, A., 1991. Identificación y correlación de secuencias somerizantes del Miembro Las Avispas (Formación Yacoraite), Noroeste Argentino. Décimo Congreso Geológico Argentino, Actas II, p. 153-156, San Juan.

DeCelles, P.G., and B. Horton, 2003. Early to middle tertiary foreland basin development and the history of Andean crustal shortening in Bolivia, Geol. Soc. Am. Bull., 115, 58–77.

DeCelles P.G., B. Carrapa, B. Horton, and G. Gehrels, 2011. Cenozoic foreland basin system in the central Andes of northwestern Argentina: Implications for Andean geodynamics and modes of deformation. Tectonics 30, TC6013

Disalvo, A., M. Rodríguez Schelotto, R. Gómez Omil, C. Hoffman, J. Benítez y S. Hurtado, 2002. Los reservorios de la Formación Yacoraite. En M. Schiuma, G. Hinterwimmer y G. Vergani (Eds.) Rocas Reservorio de las Cuencas productivas de la Argentina. V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mar del Plata, 717-738.

Disalvo, A., S. María, M. Muzzio, C. Hoffman y M. Arteaga, 2005. Trampas de Hidrocarburos en el oeste de la Provincia de Formosa. En: E. Kozlowski, G. Vergani y A. Boll (Eds.) Las Trampas de hidrocarburos en las cuencas productivas de Argentina. VI Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mar del Plata, 73-88.

Forgotson, P. 1957. Nature, usage and definition of marked defined vertically segregates rocks units. AAPG. Bull-V. 41 N° 9, pages.2108-2113.

Goodwin, P. and E. Anderson, 1985: Punctuated Aggradational Cycles: a general hypothesis of episodic stratigraphic accumulation. Journal of Geology, v. 93. Pag: 513-533.

Gómez Omil, R., A. Boll y R. Hernández, 1989. Cuenca Cretácico-Terciaria del Noroeste Argentino (Grupo Salta). En Chebli G. y L. Spalletti (Eds.) Cuencas Sedimentarias Argentinas. Universidad Nacional de Tucumán, Serie Correlación Geológica 6:43-64.

Gómez Omil, R. y A. Boll, 1999. Sistemas petroleros de la Cuenca Cretácica del Noroeste Argentino. En: Simposio de Sistemas Petroleros, IV Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mar del Plata, 101-126.

Gómez Omil, R. y A. Boll, 2005. Trampas del Flanco Sur de la Subcuenca de Lomas de Olmedo. En: E. Kozlowski, G. Vergani y A. Boll (Eds.) Las Trampas de hidrocarburos en las cuencas productivas de Argentina. VI Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mar del Plata, 37-46.

Hernández, R. y A. Disalvo, 1992. Estratigrafía del Grupo Salta y sus posibilidades exploratorias en Metán y Alemania. Informe Inédito YPF, 106p.

Hernández, R., C. Galli y J. Reynolds, 1999. Estratigrafía del Terciario del Noroeste Argentino. XIV Cong. Geol. Arg. Geología del Noroeste Argentino. Edit.: G. González Bonorino, R. Omarini y J. Viramonte. Tomo I. 316-328. Salta.

- Hernández, R., A. Disalvo, A. Boll, R. Gómez Omil y C. Galli, 1999. Estratigrafía Secuencial del Grupo Salta, con énfasis en las subcuencas de Metán-Alemanía, Noroeste Argentino. En: G. González Bonorino, R. Omarini y J. Viramonte (Eds.), Geología del Noroeste Argentino, Relatorio del XIV Congreso Geológico Argentino. I. 263-283.
- Hernández, R., R. Gómez Omil y A. Boll, 2008. Estratigrafía, tectónica y potencial petrolero del rift cretácico en la Provincia de Jujuy. En: B. Coira y E. Zappettini (Eds.): Geología de la Provincia de Jujuy, Relatorio del XVII Congreso Geológico Argentino. 207-232.
- Hongn, F., C. del Papa, C. Powell, I. Petrinovic, R. Mon and V. Deraco, 2007. Middle Eocene deformation and sedimentation in the Puna - Eastern Cordillera transition (23°-26° S): Control by preexisting heterogeneities on the pattern of initial Andean shortening. *Geology* 35:271-274.
- Horton, B., 2018. Tectonic regimes of the central and southern Andes: responses to variations in plate coupling during subduction. *Tectonics*, 37,402-429.
- ICC, 2017 International Chronostratigraphic Chart. International Commission on Stratigraphy.
- Kley, J and C. Monaldi, 2002, Tectonic inversion in the Santa Bárbara System of the central Andean foreland thrust belt, northwestern Argentina, *Tectonics*, 21(6), 1061.
- Megías, A. 1882. Introducción al análisis tectosedimentario, aplicación al estudio dinámico de cuencas. Quinto Cong. Latinoamericano de Geología. Argentina. Acta I: 385-402.
- Rolleri, E. 1976 Sistema de Santa Bárbara: Una nueva provincia geológica Argentina. Sexto Cong. Geol. Argentino, Asoc. Geológica Argentina, Bahía Blanca, Argentina, 1976.
- Rosario, J., J. Hernández, R. Hernández y T. Jordan, 2008. Evolución tectono-sedimentaria durante el Terciario en la Provincia de Jujuy. XVII Congreso Geológico Argentino. Relatorio. Asoc. Geol. Arg. Jujuy.
- Uliana, M.A. y K.T. Biddle, 1988. Mesozoic-Cenozoic paleogeographic and geodynamic evolution of southern South America. *Rev. Bras. de Geocien.*, v.18, p.172-190, Sao Paulo.
- Uliana M., K. Biddle y J. Cerdán, 1989. Mesozoic extension and the formation of Argentine Sedimentary Basins. En: Extensional Tectonics and Stratigraphy of the North Atlantic Margins, A.A.P.G., Memoir 46: 599–614. Tulsa.
- Uliana, M., L. Legarreta, G. Laffitte y H. Villar, 1999. Estratigrafía y geoquímica de las facies generadoras de hidrocarburos en las cuencas petrolíferas de Argentina. En: Simposio de Sistemas Petroleros, IV Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mar del Plata, 1-62.
- Starck, D. y G. D. Vergani, 1996. Desarrollo tecto-sedimentario del cenozoico en el sur de la Provincia de Salta. Argentina. Cong. Geol. Argentino. 8, 433-452.
- Starck, D., 2011. Cuenca Cretácica-Paleógena del noroeste Argentino. Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Simposio de Cuencas Argentinas (Vol. 8, pp407-453) Mar del Plata, Argentina. IAPG.
- Van Wagoner, j., R. Mitchum, H. Posamentier, y P. Vail, 1987. Seismic stratigraphic interpretation using Sequence Stratigraphy. En: A. Bally (Ed.) Atlas of Seismic Stratigraphy. AAPG, Studies in Geology 27, 1-14.
- Vergani, G., G. Laffitte, M. Iribarne y D. Apreda, 2008. Síntesis de las cuencas productivas de hidrocarburos en el Noroeste de Argentina, En Sistemas Petroleros de las Cuencas Andinas. En C. Cruz, J. Rodríguez, J. Hechem, y H. Villar (Eds.) VII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Pag.: 135-157 Mar del Plata, Argentina. IAPG.