

EXPLORACIÓN EN EL ÁREA MESETA CERÓN CHICO, CUENCA DEL GOLFO SAN JORGE

Cecilia Zarpellón¹, Lisandro Millo¹, Augusto Brennan¹, Marcos Cohen¹

1: Pan American Energy SC. czarpellon@pan-energy.com, lmillo@pan-energy.com,
abrennan@pan-energy.com, mcohen@pan-energy.com

Palabras clave: Cuenca del Golfo San Jorge, Meseta Cerón Chico, sísmica, no convencional, sobrepresión

ABSTRACT

Meseta Cerón Chico exploration area is located in Santa Cruz province, in Golfo San Jorge Basin. It has an area of 1,217 km².

Several 2D seismic recording campaigns were carried out and 11 exploratory wells were drilled before Pan American Energy began operations in 2017. All these wells were abandoned under name of "Dry exploratory well"

In 2018, an 810 km² 3D seismic acquisition and processing was shot plus a 2,188 km 2D reprocessing comprising 87 legacy seismic lines.

In addition to the background knowledge of Golfo San Jorge basin especially in Cerro Dragón area the PAE.SC.MCCh.x-1001 well was drilled in 2019. The total depth was 4,800 metres becoming the third deepest well in the basin. The main targets were Comodoro Rivadavia and Mina del Carmen formations.

The reservoirs found in Mina del Carmen Fm. showed low porosities and permeabilities.

The well was completed in 2021 involving a 10-stage hydraulic stimulation that involved the pumping of 23,509 sand sacks managing high temperature and pressure conditions.

The first results obtained during the flowback tested 20,000 m³/day of gas. Currently the well is on production under evaluation.

The results obtained in this well allowed the conversion of the exploration permit for the block to an unconventional one.

INTRODUCCIÓN

El área de exploración Meseta Cerón Chico, se encuentra ubicada en el sector central costa adentro de la Cuenca del Golfo San Jorge, provincia de Santa Cruz, Argentina. Limita al Norte con el área de Cerro Dragón, al Sur con Cañadón de la Escondida - Las Heras, al Este con Gran Bajo Oriental y al Oeste con Los Perales - Las Mesetas.

Cuenta con una superficie de 1.217 km² y es operado por Pan American Energy con una participación del 100% (Fig. 1).

El inicio de la concesión data de noviembre de 2017. El permiso otorgado por el Instituto de Energía de Santa Cruz fue para explorar reservorios convencionales y fue modificado en el año 2021 a un permiso de exploración no convencional en función de los reservorios encontrados y evaluados en el pozo PAE.SC.MCCh.x-1001. De esta manera la duración para cada período exploratorio pasó de 3 a 4 años y la finalización del primer periodo exploratorio se postergó para agosto de 2022.

Los compromisos asumidos en unidades de trabajo para este primer periodo exploratorio fueron cumplidos en exceso por parte de Pan American Energy con un incremental de 71%. Los mismos hacen referencia principalmente a la registración y procesamiento de 810 km² de sísmica 3D y a la perforación, entubación y terminación tipo no convencional del pozo PAE.SC.MCCh.x-1001, cuya profundidad alcanzada fue de 4.800 metros, siendo así el tercer pozo más profundo de la cuenca. Trabajos adicionales fueron ejecutados durante este período, como por ejemplo un reprocesamiento de 87 líneas sísmicas 2D equivalentes a 2.188 km previamente registradas por otras compañías dentro del bloque.

En función de los resultados obtenidos por este primer pozo exploratorio y sumado a distintos estudios se ha decidido pasar al segundo período exploratorio que vencerá en agosto de 2026. Por el momento el área no tiene reservas certificadas.

En este trabajo se hará una breve descripción de las tareas y estudios realizados en el bloque desde el inicio de la concesión hasta la actualidad.

Marco geológico regional

El área Meseta Cerón Chico se localiza sobre el eje de la cuenca del Golfo San Jorge. El sector central Este se ubica en el centro de cuenca, mientras que los sectores Norte y Sur forman parte de los Flancos Norte y Sur respectivamente (Fig. 1).

La columna estratigráfica presente en el área es similar a la descrita por Cohen *et al.* (2022) para el área vecina de Cerro Dragón. Desde el punto de vista exploratorio, las unidades estratigráficas más relevantes corresponden a la Fm. Pozo D-129, por su rol como roca madre y potencial reservorio, y a las formaciones Mina del Carmen y Comodoro Rivadavia como posibles reservorios (Fig. 2).

De acuerdo con los mapas de estrés termal presentados por Sylwan *et al.* (2008), dentro del área la base de la Fm. Pozo D-129 se encuentra íntegramente en ventana de generación de gas mientras que el techo se encuentra en ventana de petróleo para los sectores más someros y de gas para los más profundos.

El estilo estructural predominante es extensional y está representado por sistemas de falla directas de orientación ONO-ESE, con fallas principales que involucran el basamento e inclinan hacia al Sur en el sector Norte del área y hacia el Norte en el sector Sur. Subordinados a estas fallas principales se desarrollan sistemas de fallas sintéticas y antitéticas que afectan principalmente a la

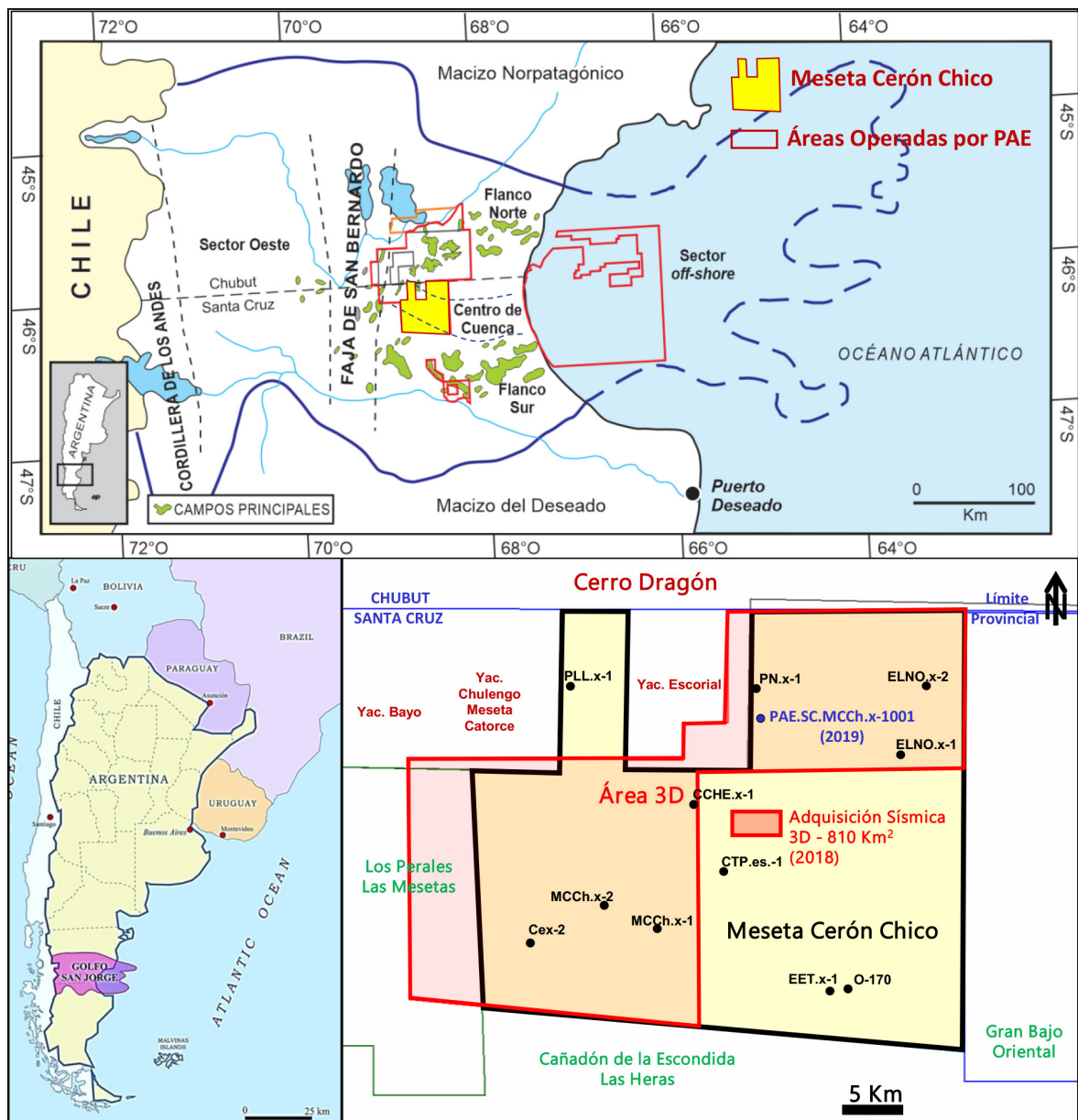


Figura 1. Ubicación del área exploratoria Meseta Cerón Chico, Cuenca del Golfo San Jorge. Adquisición Sísmica 3D. Ubicación de los 11 pozos existentes y el pozo exploratorio PAE.SC.MCCh.x-1001.

columna cretácica y terciaria (Fig. 3).

Hacia el sector Oeste se observa una pendiente monoclin al Este que corresponde al flanco oriental de las estructuras compresivas asociadas a la faja plegada y corrida de San Bernardo ubicadas aún más al Oeste, fuera del área (Fig. 4).

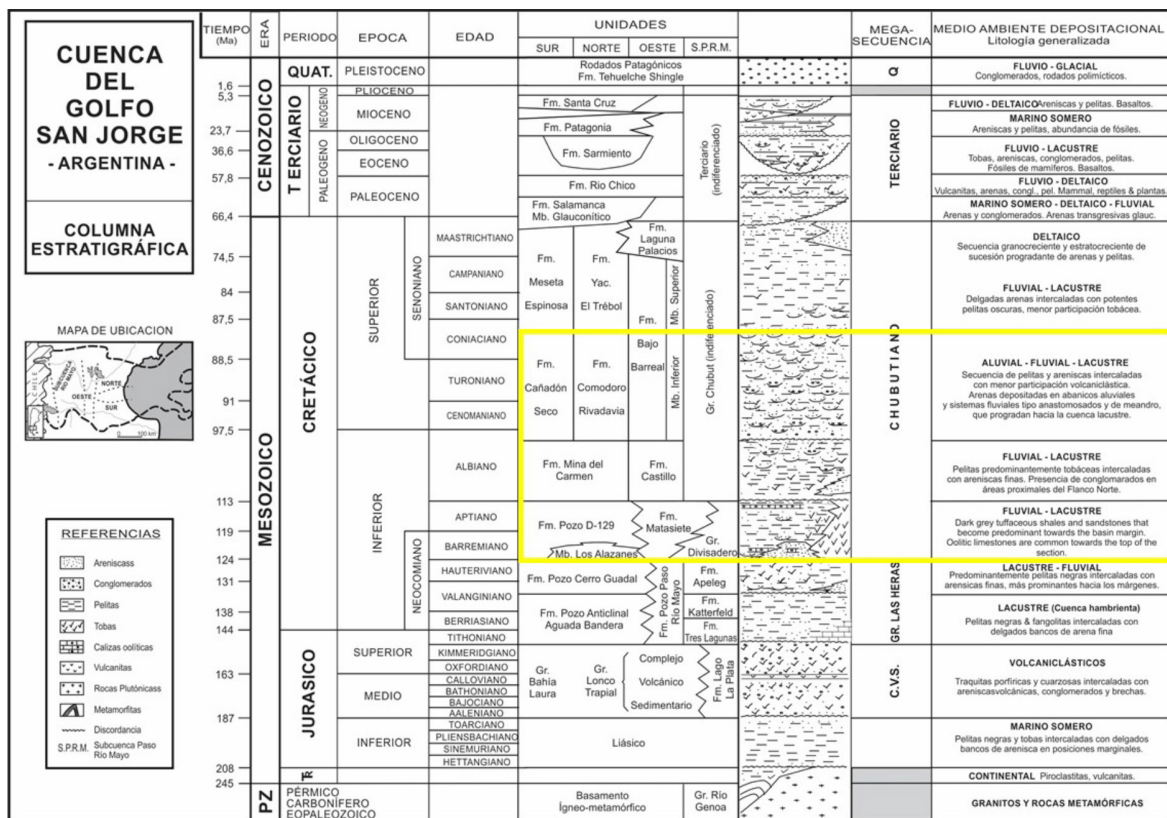


Figura 2. Columna estratigráfica de la cuenca del Golfo San Jorge. Modificado de Sylwan *et al.*, 2011. Unidades estratigráficas más relevantes para la zona de estudio.

INFORMACIÓN SÍSMICA Y DE POZO

Registración sísmica 3D

El diseño de la sísmica 3D se realizó enfocado en toda la columna productiva conocida y en desarrollo del área de Cerro Dragón, estas son las formaciones: Comodoro Rivadavia, Mina del Carmen y Pozo D-129. Se priorizó la utilización de largos *offsets* para garantizar un amplio rango de ángulos en los objetivos mencionados teniendo en cuenta que estos se encuentran a una mayor profundidad que en su vecina Cerro Dragón por encontrarse parte en el centro de cuenca (Fig. 3). Por esta razón, de toda la superficie del bloque exploratorio Meseta Cerón Chico se definieron dos zonas con mayor interés y plausibles de un desarrollo, estas fueron próximas a los yacimientos de Chulengo Meseta Catorce y Escorial (Fig. 1). Las áreas finales para ambos proyectos sísmicos a los que llamamos Meseta Cerón y Puesto Nuevo fueron 535 km² y 275 km² respectivamente (Fig. 5). Si bien al comienzo se planificaron como dos proyectos independientes, de ahí deriva la utilización de dos nombres, una vez iniciada la registración se decidió unirlos para tener continuidad en la nueva sísmica registrada y un mejor amarre con el área de Cerro Dragón,

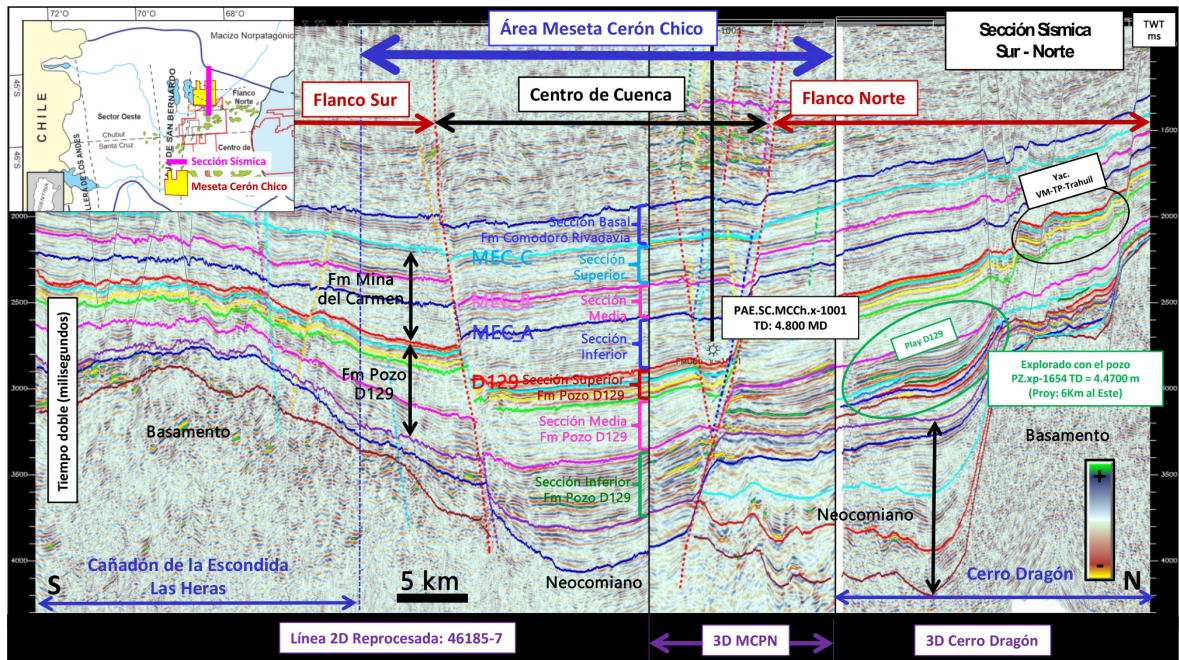


Figura 3. Sección Sismica Sur - Norte (80 km) donde pueden verse las zonas de Flanco Sur-Centro de Cuenca-Flanco Norte. Calidad de las líneas 2D reprocesadas (2019), sísmica 3D MCPN (Zona Puesto Nuevo) registrada en el 2018 y unión con el área de Cerro Dragón. Principales horizontes sísmicos interpretados. Intervalos estratigráficos definidos. Ubicación y columna investigada por pozo exploratorio PAE.SC.MCCh.x-1001.

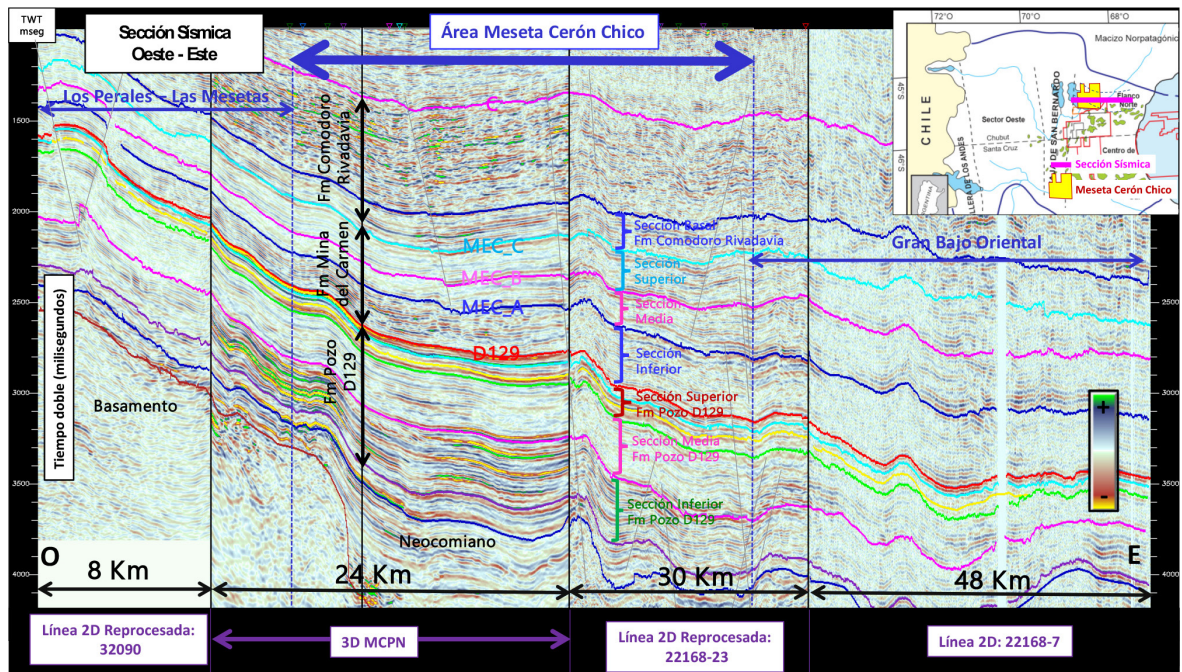


Figura 4. Sección Sismica Oeste - Este (110 km) donde puede verse la pendiente monoclinas y estructuras compresivas en el sector Oeste. Calidad de las líneas 2D reprocesadas (2019) versus originales, sísmica 3D MCPN (Zona Meseta Cerón) registrada en el 2018. Principales horizontes sísmicos interpretados. Intervalos estratigráficos definidos.

de esta manera fue que se le adicionó al proyecto el área identificada como “zona de puente” (Fig. 5).

Las líneas fuentes y receptoras se ubicaron ortogonalmente separadas entre si 350 metros con dirección Oeste-Este para las primeras y Norte-Sur para las segundas. Asimismo, los intervalos

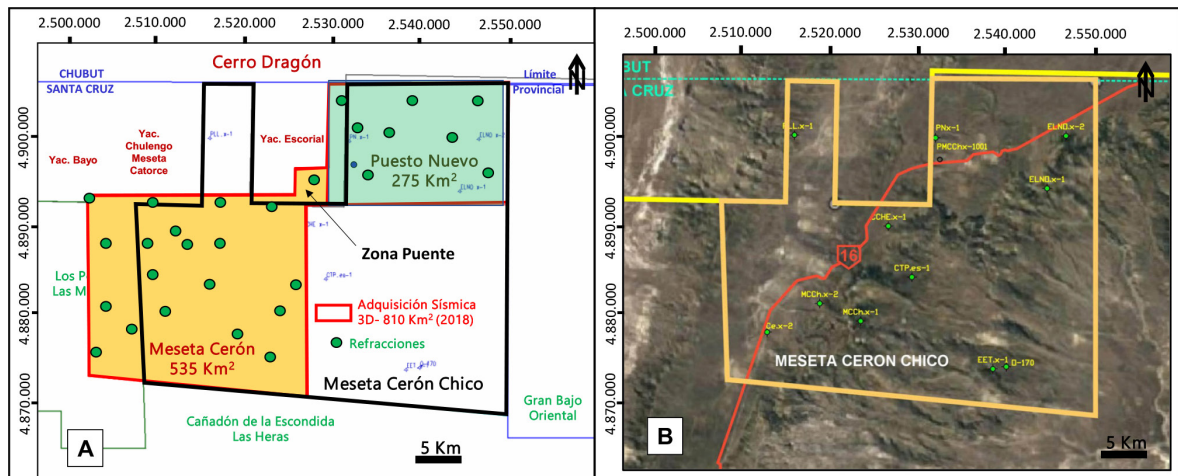


Figura 5. A) Área Meseta Cerón Chico. Proyectos Sísmicos Meseta Cerón, Puesto Nuevo y la zona de unión. Posición de las Refracciones. B) Imagen satelital: Visualización del relieve topográfico.

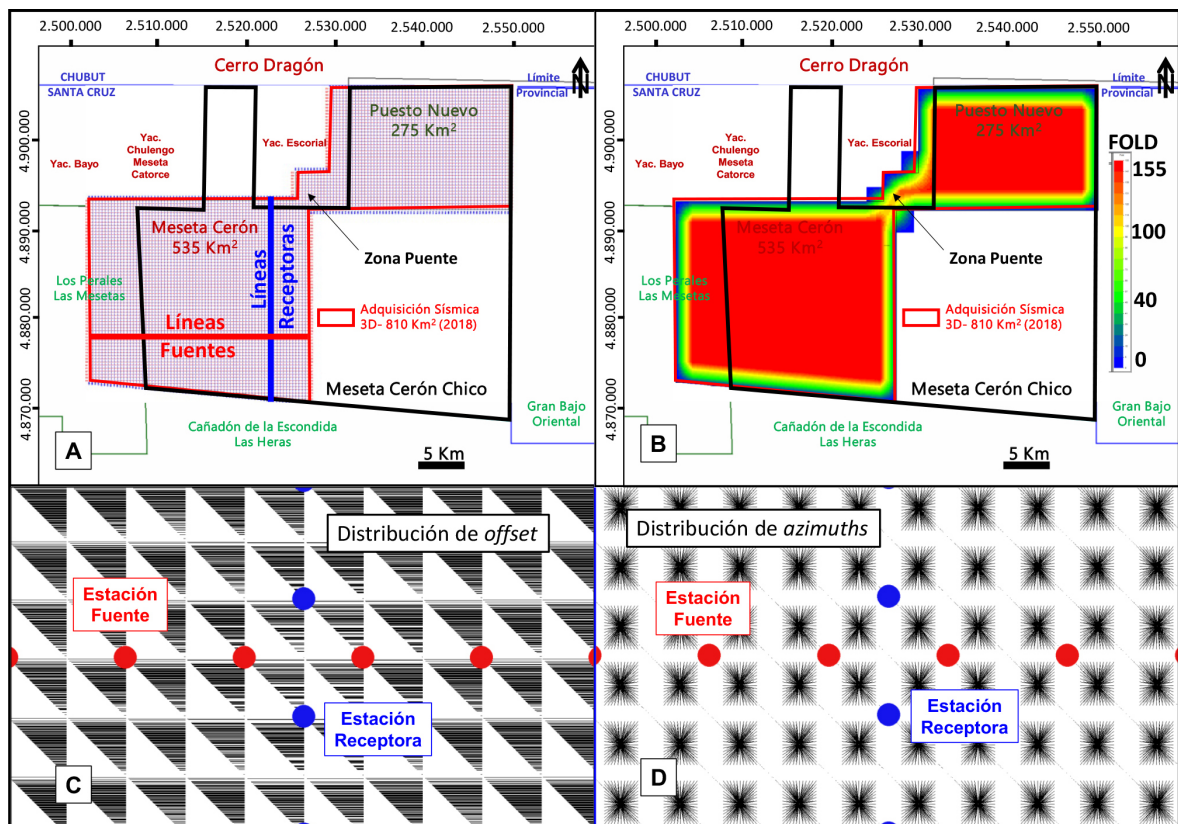


Figura 6. Proyectos Sísmicos Meseta Cerón y Puesto Nuevo. A) Preplot Líneas Fuentes y Receptoras. B) Mapa de fold. C) Distribución de *offset*. D) Distribución de *azimuths*.

entre las estaciones fuentes y receptores fue de 50 metros, generando un bin natural de 25 m x 25 m. El *patch* de registración tuvo un diseño de 22 líneas receptoras por disparo con 196 canales cada una, totalizando 4.312 canales activos; el *offset* máximo de registración fue de 6.400 m con una densidad de 58,12 fuentes/km². De esta manera la suma nominal alcanzada fue de 154 y las distribuciones de *offsets* y *azimuths* pueden verse en la Figura 6.

Para este trabajo se contó con diez equipos vibradores de fuerza pico de 60.000 libras de última generación; durante la operación de adquisición se emplearon dos grupos de cuatro camiones vibradores más un camión vibrador de *stand by* por grupo. El arreglo utilizado fue en box centrados en la estaca y se trabajó en modalidad ping pong.

En ambos proyectos se hicieron las pruebas de emisión y los parámetros seleccionados para la ejecución del trabajo fue la utilización de un apilado de 2 barridos logarítmicos cuya pendiente fue de -3db/octava, utilizando un rango de frecuencia entre 4 a 80 Hz con 12 segundos de duración, sólo el taper inicial fue diferente en ambos proyectos, se utilizó 400 ms para Meseta Cerón y 200 ms para Puesto Nuevo. El tiempo de escucha fueron 6 segundos y se utilizó un intervalo de muestreo de 2 milisegundos (Tabla 1).

Es importante mencionar que esta sismica fue adquirida enfatizando las bajas frecuencias con el fin de nivelar la energía en todo el ancho del espectro, a diferencia de la información que se dispone en el área de Cerro Dragón donde las registraciones sísmicas se hicieron con barridos lineales o con énfasis en las altas frecuencias.

Parámetros Seleccionados	Meseta Cerón	Puesto Nuevo
Fuerza	80%	80%
Barrido	Logarítmico -3db/oct.	Logarítmico -3db/oct.
Longitud de Barrido	12 s	12 s
Tiempo de Escucha	6 s	6 s
Muestreo	2 ms	2 ms
Número de Vibradores	4 en Box / Lineal	4 en Box / Lineal
Número de Barridos	2	2
Frecuencia Inicial	4 Hz	4 Hz
Frecuencia Final	80 Hz	80 Hz
Taper in	0.4 s	0.2 s
Taper out	0.4 s	0.4 s

Tabla 1. Parámetros de adquisición 3D de los proyectos Meseta Cerón y Puesto Nuevo.

Un total de 28 refracciones fueron registradas, la cantidad y ubicaciones de estas se definieron teniendo en cuenta la información existente correspondientes a las campañas sísmicas 2D; y además se contempló que dichas posiciones estuvieran distribuidas equiespacialmente sobre toda el área a cubrir con la nueva adquisición (Fig. 5A).

La registración sísmica 3D fue ejecutada entre febrero y mayo de 2018. Se trabajó gran parte del proyecto con modalidad 24 horas. Los trabajos de adquisición comenzaron por el proyecto Meseta Cerón al Oeste del área y de allí se procedió a barrer toda la superficie a cubrir con la sísmica.

Con la finalidad de optimizar los tiempos del proyecto, y aprovechando que la compañía que procesaría el dato sísmico sería la misma que registró la información, se decidió iniciar el procesamiento antes de finalizada la adquisición.

Procesamiento sísmico 3D

El procesamiento sísmico 3D fue realizado en la ciudad de Buenos Aires y comenzó cuando se alcanzó aproximadamente el 40% del total del área a registrar. En esta etapa inicial se utilizaron 23.537 disparos y 28.689 estaciones receptoras cubriendo un área de 332 km² (Fig. 7A). Este trabajo preliminar fue utilizado para hacer numerosas pruebas y así definir los procesos y parámetros a aplicar en la secuencia final del procesamiento permitiendo de esta manera optimizar los tiempos del proyecto. Sólo fue necesario agregar dos atenuaciones de ruido y se cambiaron algunos parámetros puntuales en el blanqueo espectral pre apilado para mejorar el contenido de baja frecuencia.

Para la etapa final se utilizaron todos los disparos (47.119) y todas las estaciones receptoras (47.044), resultando un área de 824 km² en subsuelo, 160 millones de trazas antes de suma y transformadas en 203 millones luego del proceso de interpolación 5D (Fig. 7A).

La mayoría de los registros fueron de muy buena calidad y los primeros arribos pudieron picarse con facilidad, presentando algunas dificultades puntuales debido a cambios relativamente abruptos en las elevaciones en las zonas noroeste y sudeste del proyecto Meseta Cerón y en el extremo sudeste de Puesto Nuevo (Fig. 5B). Sin embargo, las correcciones estáticas calculadas por inversión tomográfica dieron muy buenos resultados.

Una migración Kirchhoff post apilado de alta calidad fue generada con el fin de comenzar la interpretación sísmica, previo a la realización de la interpolación 5D que llevó varias semanas de pruebas y ejecución. Los horizontes allí interpretados, sobre todo los más someros y con menor variación estructural, pudieron utilizarse luego de algunos ajustes sobre la sísmica final migrada antes de suma.

La utilización de la interpolación 5D en el dominio *Comon Offset Vector* generó una cobertura homogénea en subsuelo en planos de *offset*. Esta disposición regular de los datos de entrada a la migración Kirchhoff antes de suma, permitió obtener a la salida una imagen de muy buena calidad, con eventos sísmicos bien definidos y posicionados (Fig. 7B).

Los CRP *gathers*, usados para el apilado de la migración Kirchhoff antes de la suma final, fueron acondicionados atenuando el ruido aleatorio remanente y corrigiendo las curvaturas

residuales en los eventos. A partir de estos CRP *gathers* acondicionados se generaron las sumas por rangos de ángulos de incidencia a saber: 0° a 12° , 12° a 22° y 20° a 32° y 32° a 50° . La conversión de los *gathers* del dominio del *offset* al ángulo de incidencia se realizó a partir de las velocidades de RMS de migración suavizadas.

Finalmente, se calcularon los atributos de AVO, Reflectividad de Incidencia Normal y Gradiente a partir de la aproximación de Shuey, con la restricción 0° a 35° para el rango de ángulos de incidencia (Shuey, 1985).

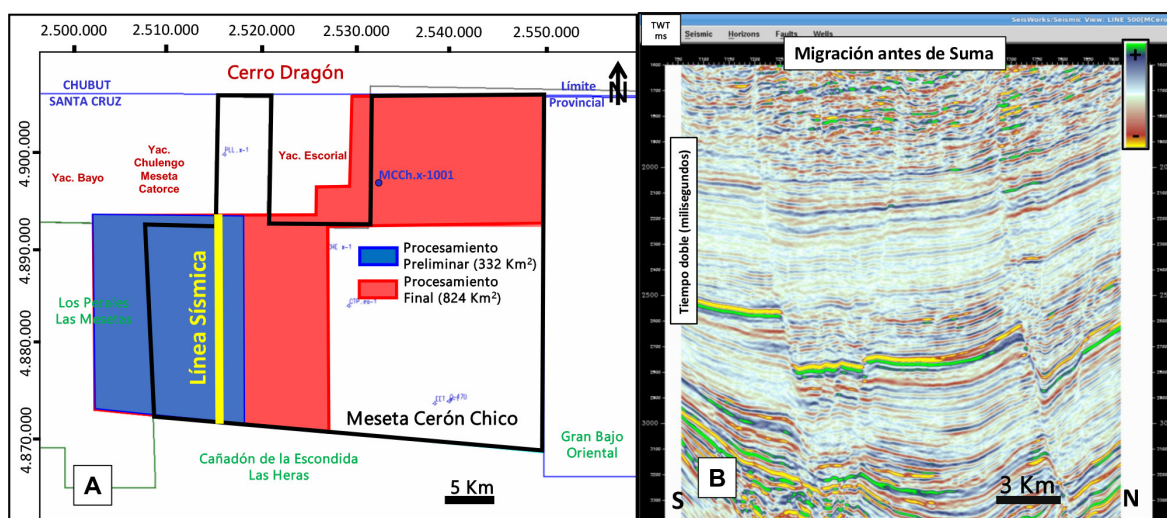


Figura 7. A) Áreas procesamiento preliminar y final. B) Sección Sísmica S - N. Procesamiento final

Reprocesamiento Sísmico 2D

El objetivo del reprocesamiento sísmico 2D fue mejorar la calidad de la información disponible previa a la concesión del bloque. Dichas secciones sísmicas se corresponden con imágenes sumadas y/o migradas post suma de baja calidad. De manera que una vez recibida la información de campo correspondiente a las registraciones se inició el trabajo.

Se planteó la ejecución de un procesamiento de migración en tiempo antes de suma, de manera que mejore la ubicación y definición tanto de reflectores como de fallas, con la finalidad de realizar una mejor interpretación estructural y estratigráfica a escala regional.

El proceso se llevó a cabo en la ciudad de Buenos Aires, entre noviembre del 2017 y febrero del 2019.

Se procesaron en total 2.188 km correspondientes a 87 líneas sísmicas, las mismas fueron registradas entre los años 1974 y 1995 por distintas compañías utilizando diferentes diseños de adquisición (Tabla 2 y Fig. 8). Por tal motivo, la secuencia de procesamiento fue adaptada especialmente para cada una de ellas.

Campaña Sísmica	Distancia entre Estacas Receptoras	Cantidad de Canales	Relación Receptor/Fuente	Intervalo de muestreo [ms]	Fuente Utilizada	Año de Adquisición	Cantidad de Líneas
1	90	24	2	4	Explosiva	74-77	11
2	100	48	1	4	Vibroseis	80-81	4
3	50	48	1	4	Vibroseis	80-82	9
4	50	96	2	2-4	Vibroseis	86-87	28
5	37,5	120	1	2	Vibroseis	91-92	17
6	35	120	1	2	Vibroseis	93-94	13
7	40	120	1	2	Vibroseis	94-95	5

Tabla 2. Características de las líneas sísmicas 2D reprocesadas agrupadas por campañas sísmicas.

El armado correcto de la planimetría fue muy laborioso e insumió un tiempo considerable dado que en algunos casos no se disponía de toda la información, para completarlos se realizaron relevamientos de coordenadas en la viejas picadas sísmicas y cruces de líneas tanto en el campo como sobre imágenes satelitales.

Uno de los aspectos más relevantes del procesamiento, es que se utilizaron correcciones estáticas por tomografía, tratando al proyecto como si fuera un 3D. Para ello se realizó un picado automático de primeros arribos, que fue posteriormente corregido manualmente. Desde los partes del observador se digitalizaron 660 dromocronas, de las cuales sólo se utilizaron 274 para construir el modelo inicial de velocidades de la capa meteorizada, sumadas a las 28 refracciones registradas durante el 2018 como parte del trabajo de registración sísmica 3D (Fig. 5 A).

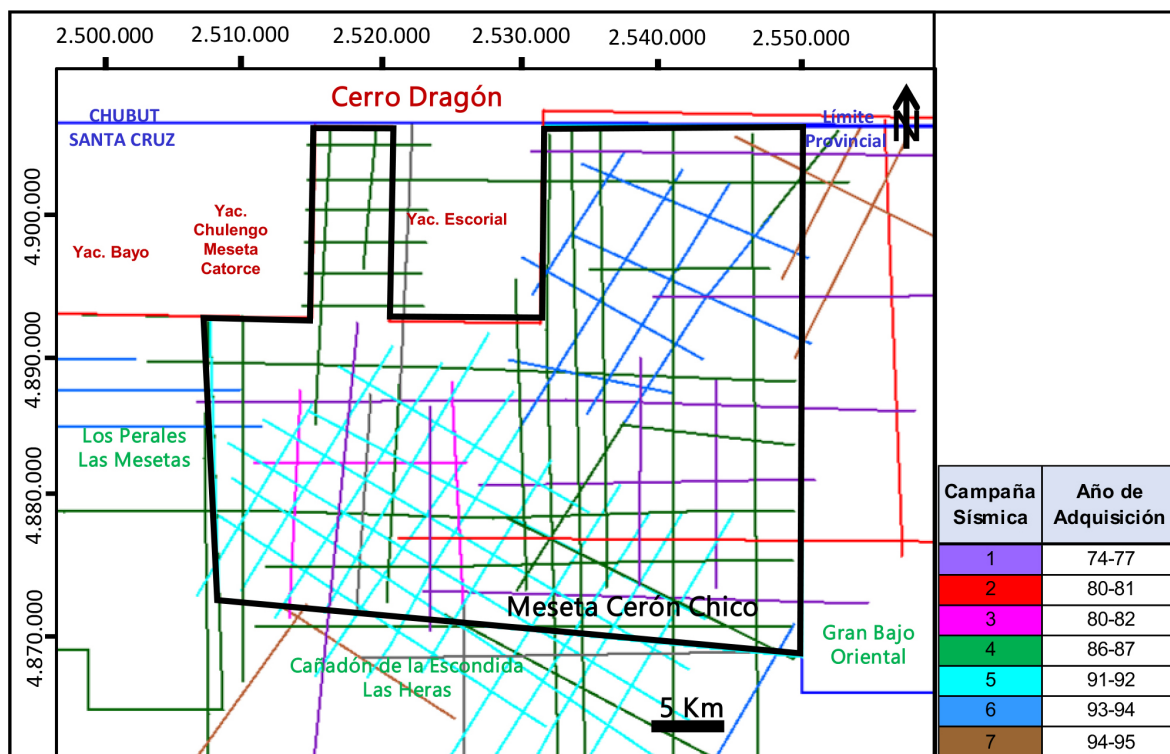


Figura 8. Ubicación líneas Sísmicas 2D Reprocesadas agrupadas por campañas sísmicas.

El modelo final fue generado con un tamaño de celda de 30 x 30 x 30 metros, y unos 200 metros por debajo de la cota topográfica, se hicieron 3 iteraciones. El valor de la estática aplicada fue la correspondiente a la isovelocidad de 2.200 m/s que se corresponde con la velocidad máxima de la capa meteorizada.

Los dos análisis interactivos de velocidades fueron realizados en puntos de control donde se generaron super *gathers* con el objeto de mejorar la relación señal/ruido mediante un common *offset stack*. Estos super*gathers* fueron utilizados para crear espectros de velocidades según el método de la semblanza facilitando la detección de la velocidad óptima.

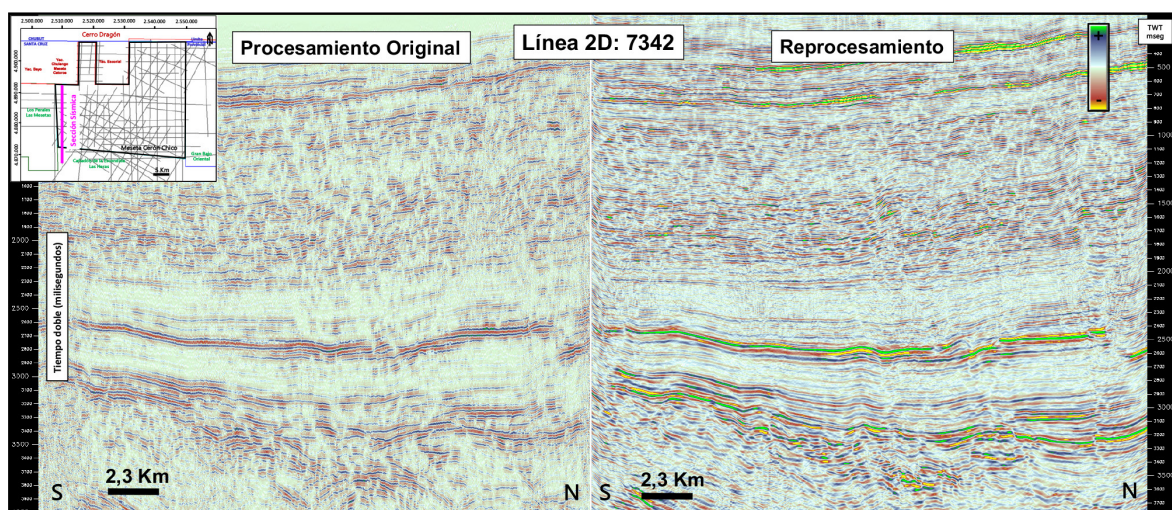


Figura 9. Comparación de la calidad de información sísmica procesamiento original con el reprocesamiento.

Los dos pasos de estáticas residuales que se aplicaron fueron consistentes en superficie. Esta metodología utilizada generó excelentes resultados en el amarre entre las distintas campañas sísmicas.

La cantidad de registros procesados fueron 41.476. En todos los casos la calidad de la imagen sísmica obtenida supera ampliamente a su versión original, esto se debe fundamentalmente al trabajo artesanal realizado por la compañía de servicios (Fig. 9). Asimismo, los datos de salida se adecuaron para facilitar el amarre con los datos sísmicos existentes de Meseta Cerón Chico y de Cerro Dragón (Figs. 3 y 4).

Recopilación de información de pozos

Al comenzar la concesión de exploración en el área Meseta Cerón Chico, Pan American Energy recibió una gran cantidad de información digital, mucha de ella solamente escaneada, no ordenada, sobre los pozos perforados en la zona. La misma se organizó y catalogó en forma de base de datos, lo que permitió entender la calidad y distribución de los datos disponibles. En los

casos en los que se consideró necesario, se digitalizaron archivos tales como controles geológicos y perfiles.

En el área habían sido perforados 11 pozos, todos abandonados bajo el rubro de “Pozo Exploratorio Estéril”. Su ubicación, año de perforación, profundidad final alcanzada, columna investigada y *set* de perfiles puede verse detallada en la Tabla 3 y Figura 10.

Nombre del Pozo	Año de Perforación	Profundidad Final (metros)	Columna Estratigráfica (Espesor en metros investigados)				
			Terciario	FM Yacimiento El Trébol	Fm Comodoro Rivadavia	Fm Mina del Carmen	Fm Pozo D-129
O-170	1962	2.752	638	964	1.150	-	-
CCHE.x-1	1964	3.074	1.008	1.018	1.048	-	-
CTP.es-1	1977	3.890	796	1.013	1.434	647	-
MCCh.x-2	1984	2.777	1.038	992	748	-	-
MCCh.x-1	1985	3.583	930	967	1.520	166	-
EET.x-1	1986	4.194	680	984	1.444	966	121
PN.x-1	1988	3.794	1.002	877	1.481	434	-
ELNO.x-1	1990	3.435	927	971	1.428	109	-
Ce.x-2	1993	2.962	1.055	977	930	-	-
ELNO.x-2	1995	3.194	1.095	956	1.142	-	-
PLL.x-1	1995	2.729	784	835	1.110	-	-

Tabla 3. Listado de pozos perforados en el área Meseta Cerón Chico previo al inicio de la concesión de exploración por parte de Pan American Energy.

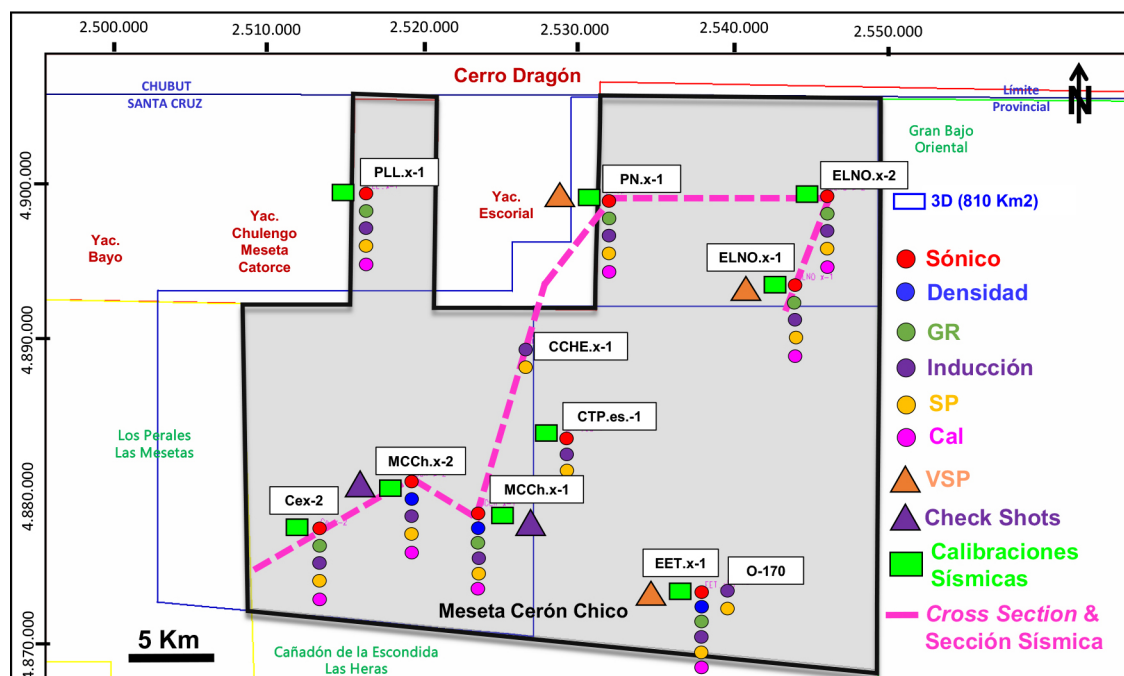


Figura 10. Ubicación y *set* de perfiles disponibles para los 11 pozos perforados en el área previo al inicio de la concesión de exploración por parte de Pan American Energy.

Con el fin de evaluar las conclusiones manifestadas en cada informe final de pozo y definir las zonas de mayor interés, para todos los pozos se hizo un análisis exhaustivo comparando

los objetivos propuestos con los resultados encontrados tanto a nivel de reservorio, posición estructural, trampa, columna estratigráfica investigada y ensayos.

INTERPRETACIÓN SÍSMICA Y CORRELACIÓN DE POZOS

Correlación de pozos

Con los perfiles de pozo y las descripciones de los legajos se procedió a realizar la correlación. El objetivo fue identificar e interpretar los markers conocidos y correlacionados en el área de Cerro Dragón para entender la columna atravesada en cada uno de ellos, de manera que no solo se usaron pozos cercanos del yacimiento Escorial y Chulengo Meseta Catorce, sino que también se usaron otros pozos más profundos y alejados también pertenecientes a esta área. Los principales perfiles de correlación fueron, en orden de importancia, Inducción, *Gamma Ray*, Sónico y SP. Para cada uno de ellos fue realizada una evaluación petrofísica utilizando parámetros similares a los utilizados en los yacimientos de Cerro Dragón (Fig. 11).

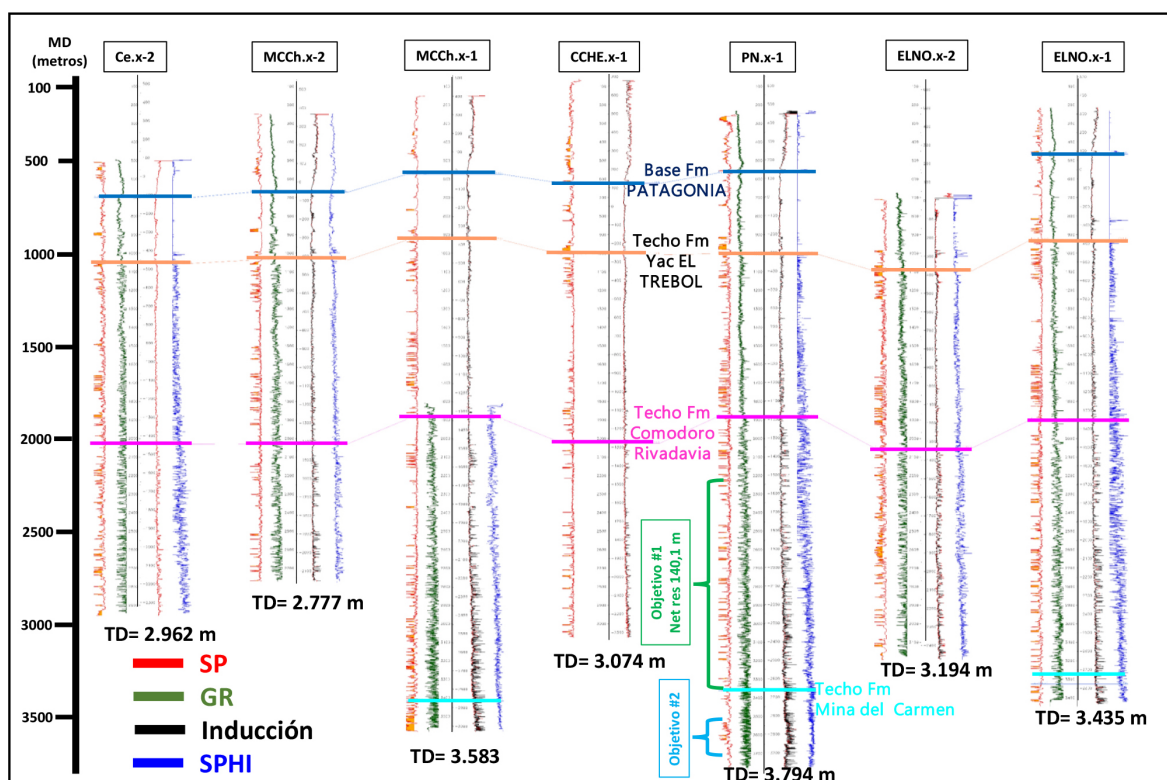


Figura 11. Correlación de Pozos, Perfiles utilizados: Inducción, *Gamma Ray*, Sónico y SP. Su ubicación puede verse en la Figura 10.

Calibraciones sísmicas

En todos los casos el amarre sísmica-pozo fue bueno; un ejemplo de esto puede verse en la calibración sísmica realizada para el pozo PN.x-1, que con una profundidad total de 3.794 metros investigó 434 metros en la Fm. Mina del Carmen. Este pozo sumado a la información del yacimiento Escorial daría el soporte a dos de los tres objetivos buscados para investigar con el pozo PAE.SC.MCCh.x-1001, siendo el Objetivo #1 en la Fm. Comodoro Rivadavia y el Objetivo #2 en la Sección Superior de la Fm. Mina del Carmen (Fig. 12). Para los pozos PPL.x-1, CTP.es-1 y EET.x-1 las calibraciones fueron realizadas con la información de las líneas sísmicas 2D.

Sólo en dos pozos, el CCHE.x-1 y el O-170 (Fig. 10), no fue posible hacer el amarre dado que carecen de perfil sónico. Asimismo, en los pozos que no se contó con perfil de densidad, se usó un valor constante igual a 2,3 gr/cm³. Finalmente, en los casos en que se contó con información de VSP y/o *Check Shot* las calibraciones sísmicas fueron realizadas utilizando dichos datos, generando así una mejor puesta en profundidad, tal como es de esperar.

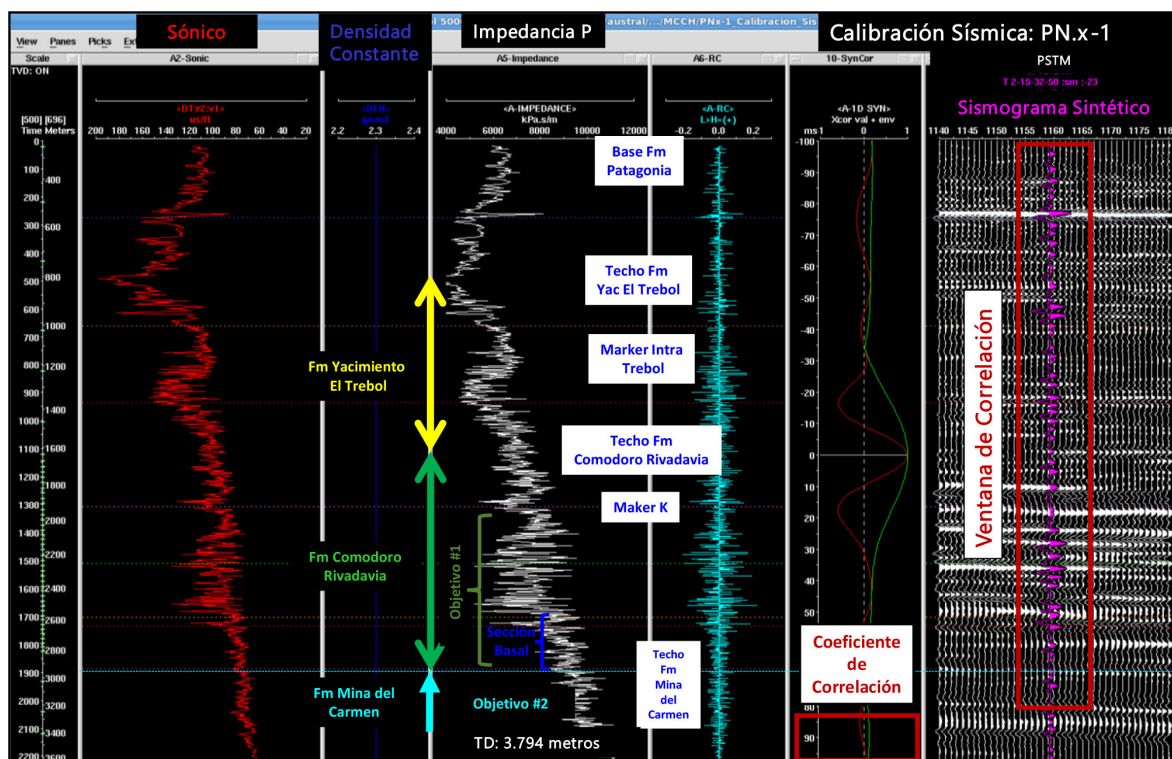


Figura 12. Calibración sísmica pozo PN.x-1. Objetivos #1 y 2 del pozo exploratorio PAE.SC.MCCh.x-1001

Interpretación sísmica

Varios niveles sísmicos fueron interpretados sobre la información 3D y 2D; y en todos los casos estos horizontes fueron vinculados al área de Cerro Dragón (Figs. 3 y 4).

La Figura 13 muestra una sección sísmica que pasa por los pozos y se corresponde con la cross section mostrada en la Figura 11.

Para la interpretación y correlación de fallas varios atributos sísmicos fueron calculados y tenidos en cuenta. El de mayor utilidad fue la coherencia de alta resolución (Hale, 2013) disponible en el *software* de interpretación. Para confeccionar los polígonos de fallas, en cada horizonte sísmico interpretado, se calculó el valor de la amplitud RMS con una ventana de extracción de 12 milisegundos, esto permitió incluso ajustar la correlación, en la Figura 14 se muestra el resultado obtenido para el techo de la Fm. Pozo D-129.

Una vez construidos los polígonos de fallas se generaron los mapas isócronos, y los principales niveles interpretados fueron unidos con los del área de Cerro Dragón.

En la Figura 15 se muestra el mapa isócrono correspondiente al techo de la Fm. Mina del Carmen; donde puede observarse la posición relativa más profunda del área Meseta Cerón Chico con respecto a Cerro Dragón, haciéndose mayor a medida que nos movemos hacia el centro de cuenca. Esto se ve para todos los niveles y sería uno de los condicionante más importantes a la hora de seleccionar y ranquear el prospecto a perforar.

Asimismo, se generaron mapas isocronopáquicos para las formaciones Pozo D-129, Mina del Carmen y Comodoro Rivadavia (Figs 16, 17 y 18). A partir de estos mapas y juntamente con la

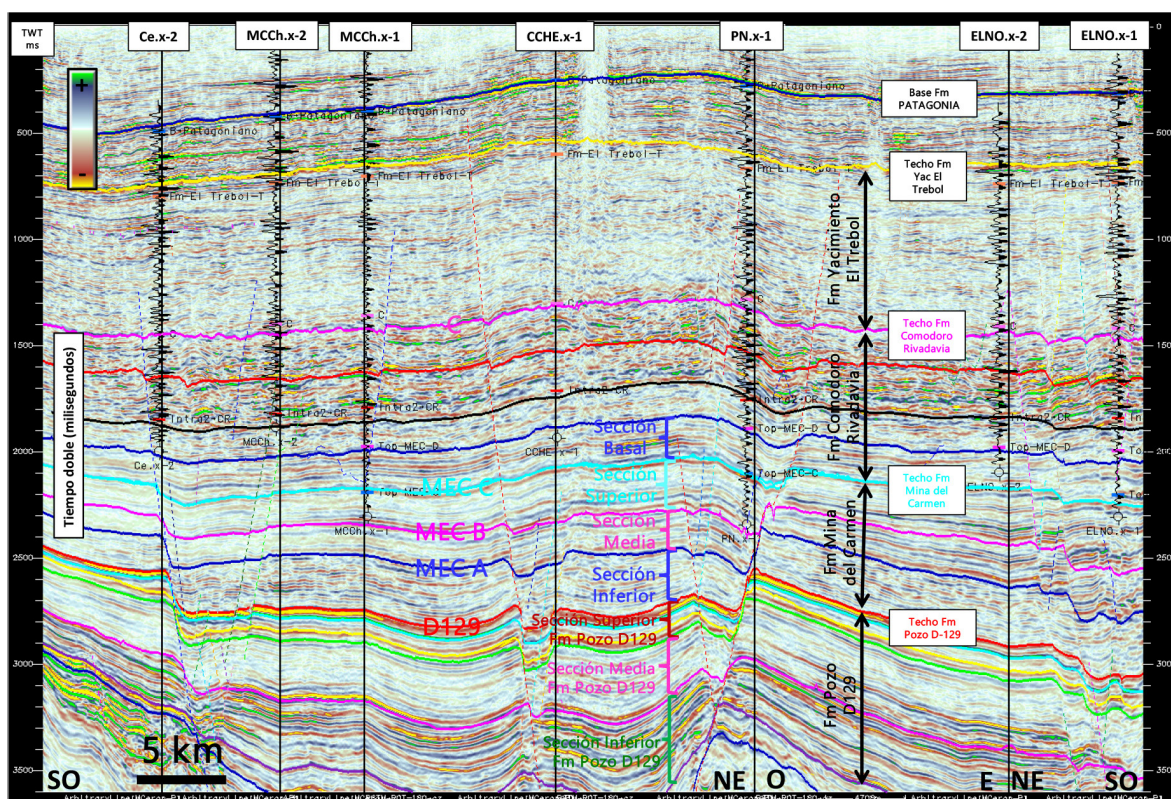


Figura 13. Sección sísmica donde pueden verse los principales horizontes sísmicos interpretados y sismogramas sintéticos en cada uno de los pozos. Su ubicación se muestra en la Figura 10.

información sísmica se definieron las zonas pertenecientes al Flanco Norte, Centro de Cuenca y Flanco Sur para el área de Meseta Cerón Chico.

Para el caso de la Fm. Mina del Carmen, se muestran los mapas isocronopáquicos correspondientes a los 3 intervalos estratigráficos: Sección Basal, Media y Superior (Cayo *et al.* 2011); para cada uno de ellos se muestran los paleocanales detectados con atributos sísmicos y descomposiciones espectrales que fueron realizadas utilizando los datos sísmicos 3D de Meseta Cerón y Puesto Nuevo. A partir de ahí fueron interpretadas las direcciones de las paleocorrientes; en todos los casos se observa que las direcciones de las mismas en el Flanco Norte tienen una dirección Norte-Sur, mientras que en el Flanco Sur se muestran con una dirección Sur-Norte; solo para la Sección Basal de la Fm. Mina del Carmen, se observa un paleocanal con orientación NO-SE (Fig. 19). De igual manera se procedió para la Fm. Comodoro Rivadavia.

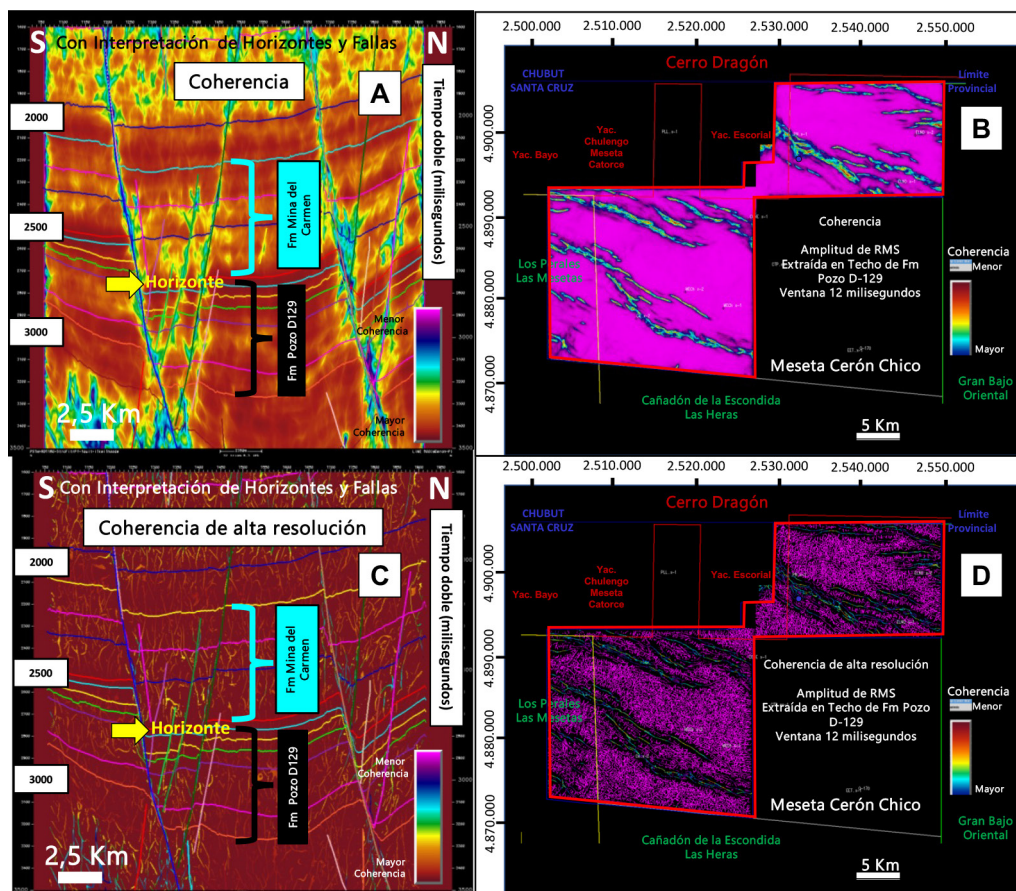
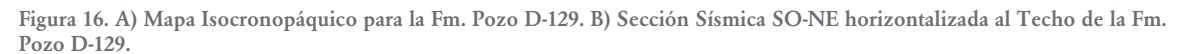


Figura 14. Secciones Sísmicas. Extracción de Amplitud RMS en el techo de la Fm. Pozo D-129. A) y B) Coherencia. C) y D) Coherencia de alta resolución.



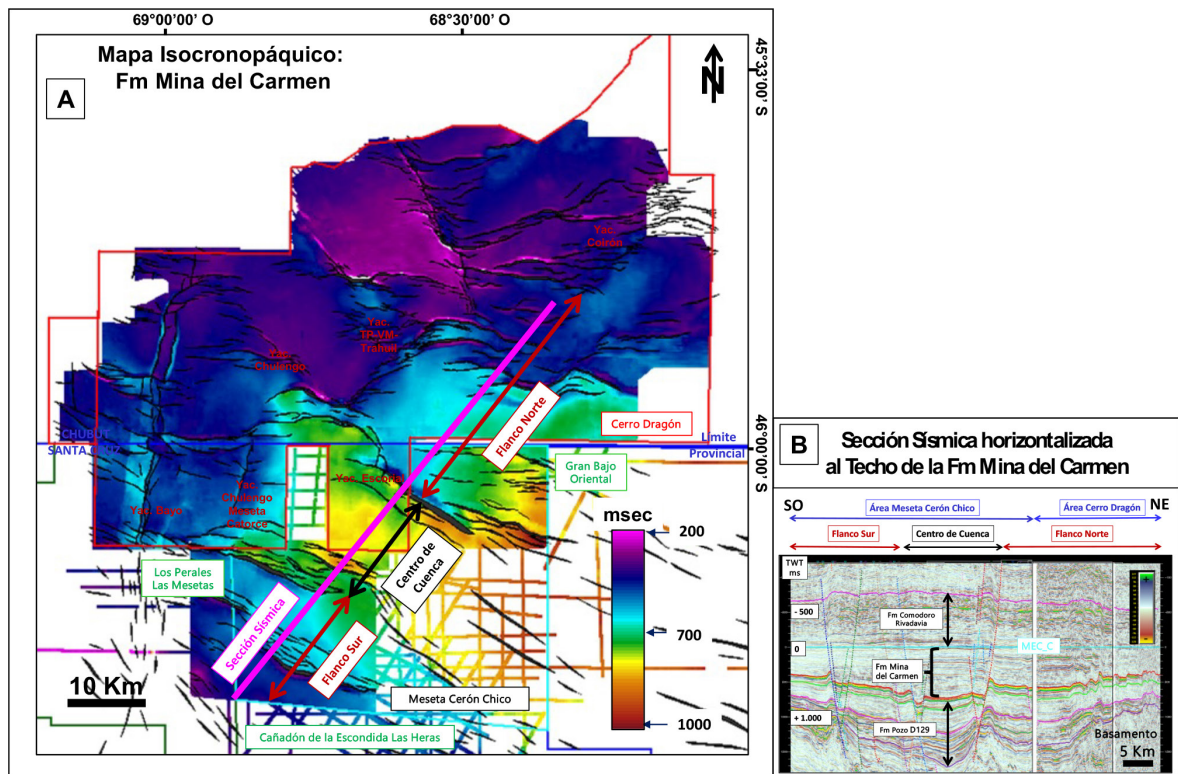


Figura 17. A) Mapa Isocronopáquico para la Fm. Mina del Carmen. B) Sección Sísmica SO-NE horizontalizada al Techo de la Fm. Mina del Carmen.

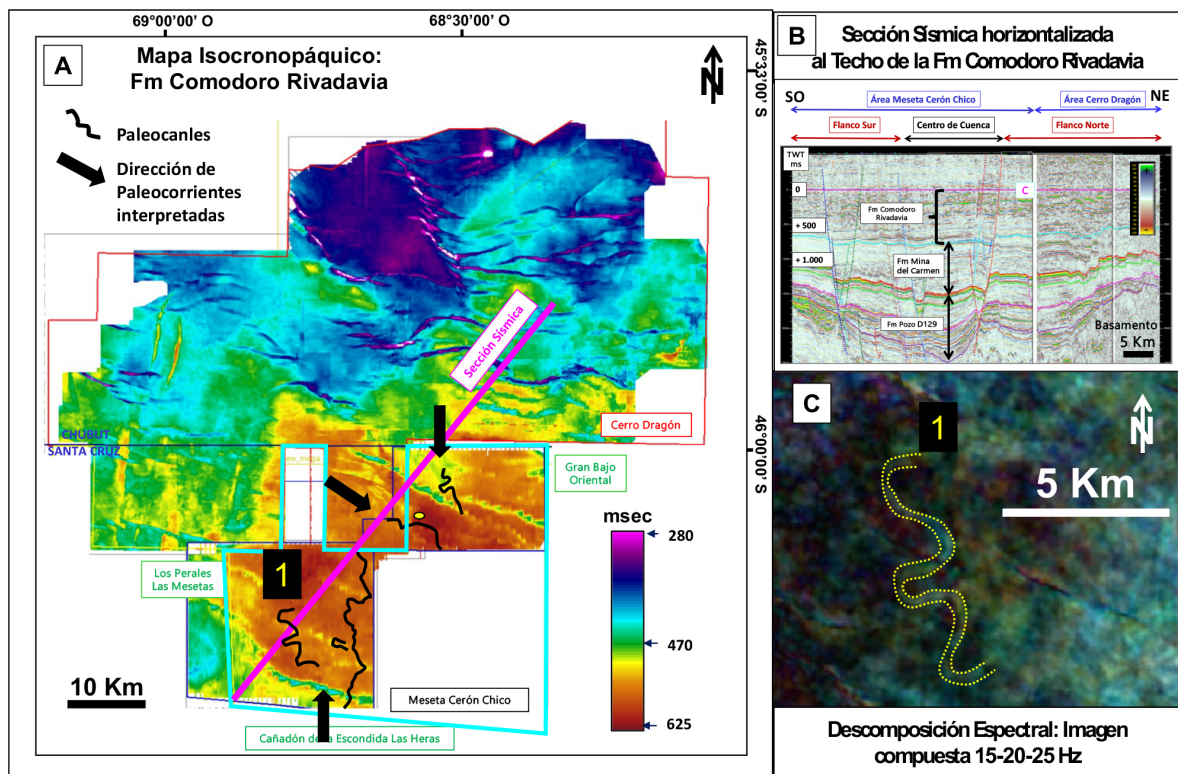


Figura 18. A) Mapa Isocronopáquico para la Fm. Comodoro Rivadavia. B) Sección Sísmica SO-NE horizontalizada al Techo de la Fm. Comodoro Rivadavia. C) Descomposición Espectral

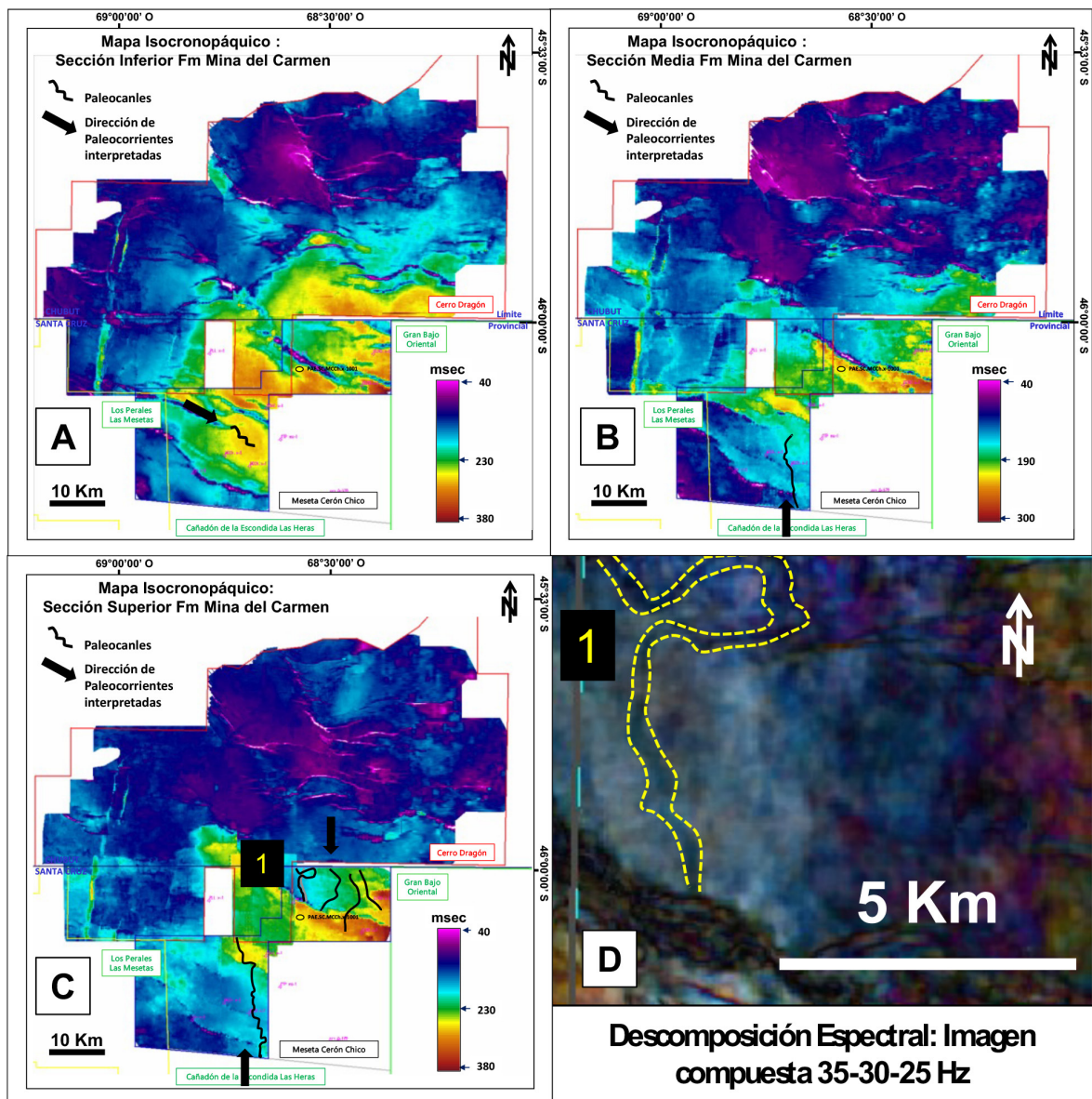


Figura 19. Mapas Isocronopáquicos correspondientes a los Intervalos estratigráficos de la Fm. Mina del Carmen A) Sección Inferior B) Sección Media C) Sección Superior. D) Descomposición Espectral.

POZO PAE.SC.MCCH.X-1001

El pozo PAE.SC.MCCh.x-1001 se encuentra ubicado dentro del graben central de la Cuenca del Golfo de San Jorge, al sur de una falla principal de basamento de rumbo NO-SE con vergencia al SO, que actúa de límite entre el graben central y el Flanco Norte. Estructuralmente la zona está definida por un sistema de fallas sintéticas y antitéticas de rumbo NO-SE (Fig. 3). El pozo se localiza aproximadamente a 1 km al Este del límite con el área de Cerro Dragón, próximo al yacimiento Escorial (Fig. 1).

La profundidad total alcanzada por el pozo fue de 4.800 metros luego de 71 días de perforación, siendo este pozo el tercero más profundo de toda la Cuenca del Golfo San Jorge.

Es un pozo vertical cuyo fondo se encuentra desplazado 108 m hacia el Oeste desde la boca del pozo, mostrando una inclinación máxima de 9,1°.

La máxima temperatura dinámica registrada durante la perforación alcanzó 128 °C.

Fue perforado y entubado durante el año 2019, y la terminación planificada para evaluar los reservorios de bajas porosidades y permeabilidades pertenecientes a la Fm. Mina del Carmen pudo concretarse recién un año más tarde. Esto se debió principalmente a dos motivos: el primero, las altas temperaturas y presiones presentes en el fondo del pozo; y el segundo, a que en la Cuenca del Golfo San Jorge no se encontraban disponibles los recursos tecnológicos necesarios requeridos para este tipo de terminación de pozo no convencional; teniendo en su mayoría que ser trasladados desde la provincia del Neuquén con costo elevados y ventanas acotadas de trabajo.

Actualmente el pozo continúa siendo testeado. Su producción diaria sostenida de 10.000 m³ de gas es captada en una batería perteneciente al yacimiento vecino de Escorial.

Objetivos

El pozo tuvo 3 objetivos bien diferenciados (Tabla 4, Figs. 15B y 20).

Objetivo #1, evaluar la continuidad del yacimiento Escorial para la Fm. Comodoro Rivadavia en la zona de Puesto Nuevo donde se baja estructuralmente unos 70 metros en la posición del pozo.

Objetivo # 2, evaluar la Sección Superior de la Fm. Mina del Carmen que había sido testeada por el pozo PN.x-1 mostrando porosidades del 9% con abundantes rastros frescos de hidrocarburos. A partir de los datos de este pozo, dicho intervalo fue caracterizado sísmicamente siendo esta una capa de alta impedancia acústica que mediante la realización de una pseudo inversión acústica mostró continuidad y desarrollo en la zona de la propuesta.

Objetivo #3, evaluar la Sección Inferior de Fm. Mina del Carmen y Sección Superior de la Fm. Pozo D-129 en una zona de transferencia de rechazo entre fallas basado en una respuesta atípica de atributos sísmicos, donde los reflectores muestran muy poca continuidad y muy baja amplitud. Si

Evaluar	Objetivo #1	Objetivo #2	Objetivo #3
	Continuación del yacimiento Escorial	Depósitos equivalente a los encontrados en el pozo PN.x-1	Basado en la respuesta de atributos sísmicos atípicos
Formación (Intervalo)	Fm Comodoro Rivadavia	Fm Mina del Carmen (Sección Superior)	Fm Mina del Carmen (Sección Media & Inferior) Fm Pozo D-129 (Sección Superior)
Tipo de Fluido	Petróleo - Gas	Petróleo	Gas
Trampa	Combinada	Combinada	Combinada
Tipo de Reservorio Esperado	Depósitos fluviales	Progradaciones en el bloque bajo de falla Posibles Depósitos gravitacionales/Aluviales/Abanicos	Reservorios naturalmente fracturados
Rango de Profundidad	2.200 - 3.250 metros	3.500 - 3.800 metros	4.200 - 5.500 metros

Tabla 4. Objetivos a evaluar con el pozo PAE.SC.MCCh.x-1001.

bien este rasgo sísmico se extiende hasta aproximadamente 5.500 metros, por cuestiones operativas y de costos en esta instancia se decidió investigar solo la parte somera correspondiente a la Sección Inferior de la Fm. Mina del Carmen sin entrar en la Fm. Pozo D-129.

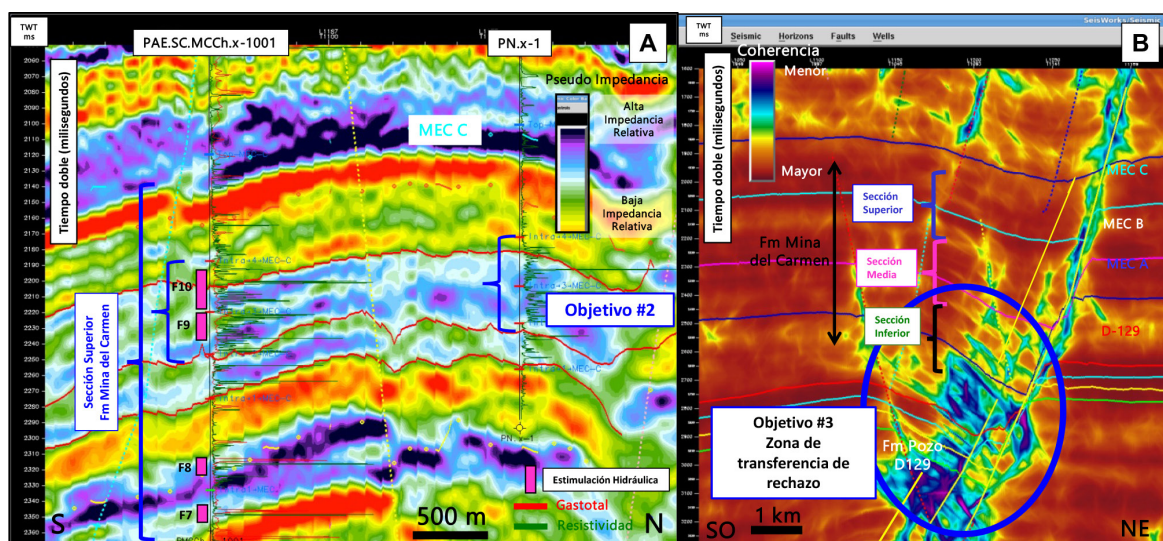


Figura 20. Objetivos a investigar con el pozo PAE.SC.MCCh.x-1001. A) Objetivo #2. Pseudo impedancia acústica relativa B) Objetivo #3. Los eventos sísmicos muestran muy poca continuidad y baja amplitud, la zona se muestra como caótica con pobre coherencia. Ver ubicaciones Figura 15 B).

Resultados y evaluación

Los 3 objetivos fueron encontrados a las profundidades esperadas, la evaluación del pozo se basó en toda la información disponible, datos de perforación, control geológico y set completo de perfiles.

Las muestras para el control geológico fueron tomadas desde superficie, cada 5 metros en todo el pozo bajando a un muestreo de 3 metros en las zonas de interés; se contó con registro del gas total durante toda la operación. Las distintas carreras de perfilaje fueron programadas teniendo en cuenta el diseño del pozo, que a su vez contempló los objetivos a investigar y la futura puesta en producción; sin embargo, en función de los inconvenientes de *set up* que se tuvieron en el tramo perforado con trépano de 12 1/4", se decidió bajar con *Logging while drilling* para todo el intervalo perforado con diámetro de 8 1/2" y así asegurar tener un conjunto de datos básicos para la zona de los objetivos #2 y #3. Otro inconveniente para este tramo fueron las altas temperaturas esperadas y encontradas en el fondo del pozo (Estática igual a 191,7 °C), de manera que se programaron y ejecutaron dos instancias de perfilaje aprovechando un cambio de trépano, contemplando que entre ambas hubiera un solapamiento suficiente (200 metros) para hacer la unión entre las curvas registradas (Fig. 21).

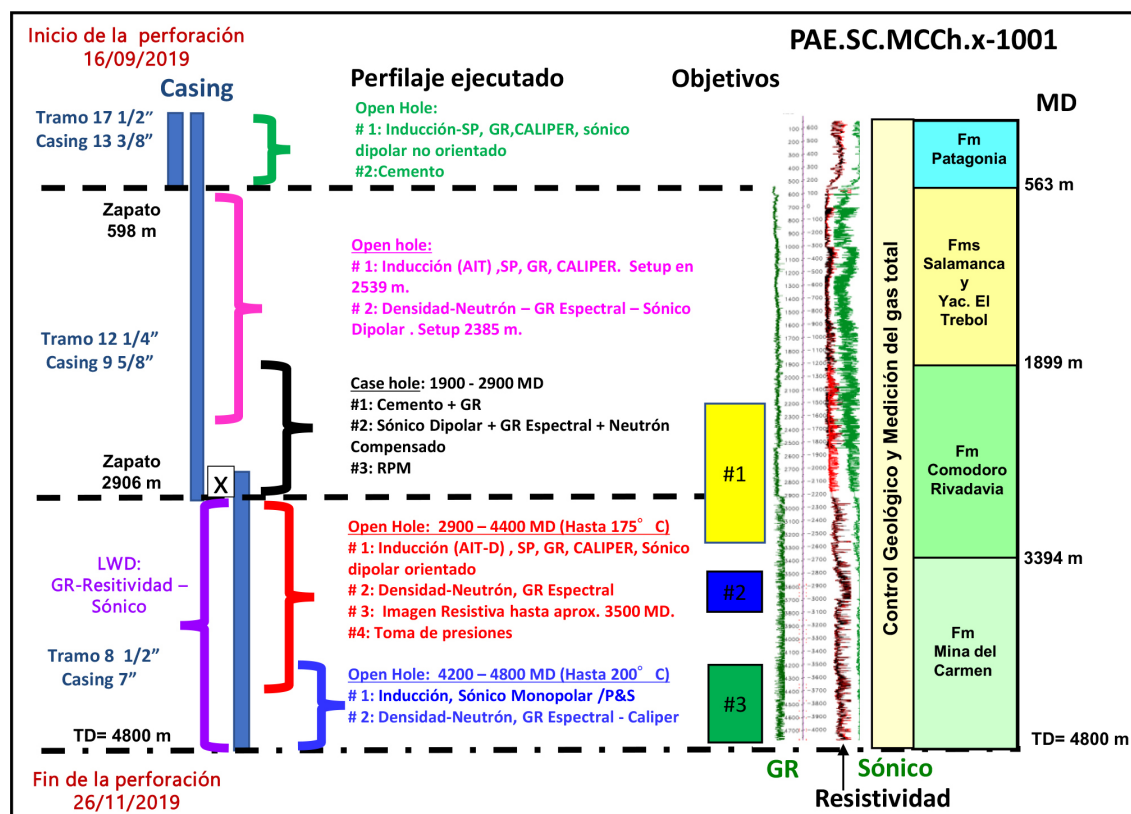


Figura 21. Esquema final del pozo PAE.SC.MCCh.x-1001. Programa de perfilaje ejecutado. Pases formacionales.

Con toda la información descripta se realizó la evaluación de pozo identificando así los principales reservorios para cada uno de los objetivos investigados. En la Tabla 5 se muestran las características generales para cada uno de ellos. Es importante mencionar que el potencial mayor del pozo se vio en su fondo, en reservorios pertenecientes a la Sección Inferior de la Fm. Mina del Carmen, en función de esto se decidió focalizar la terminación del pozo en los objetivos #3 y #2, dejando la evaluación de los reservorios pertenecientes a la Fm. Comodoro Rivadavia (Objetivo #1) para una instancia futura (Fig. 22).

PAE.SC.MCCh.x-1001	Objetivo #1	Objetivo #2	Objetivo #3
	Continuación del yacimiento Escorial	Depósitos equivalente a los encontrados en el pozo PN.x-1	Basado en la respuesta de atributos sísmicos atípicos
Tipo de Reservorio	Depósitos Fluviales típicos de la Fm Comodoro Rivadavia: Espesores promedios entre 2 y 10 metros	Depósitos (Aluviales?) con estratificación paralela hacia el Este y subordinada estratificación entrecruzada hacia SE.	Depósitos canalizados. Presencia de fisuras naturales con intensidad creciente con la profundidad, según imagen.
Espesor Útil	60 m	57 m	132 m
PHIE Promedio	13%	8,10%	9,50%
Saturación de Agua	52%	49%	50%
Tipo de Terminación	No completado en esta etapa	No convencional	No convencional
Total de Fracturas Realizadas (10)	-----	2	5
		Se fracturan 3 zonas correspondientes a canales aislados típicos de la Fm Mina del Carmen encontrados entre el Objetivo #2 y #3	

Tabla 5. Características de los reservorios encontrados para los tres Objetivos.

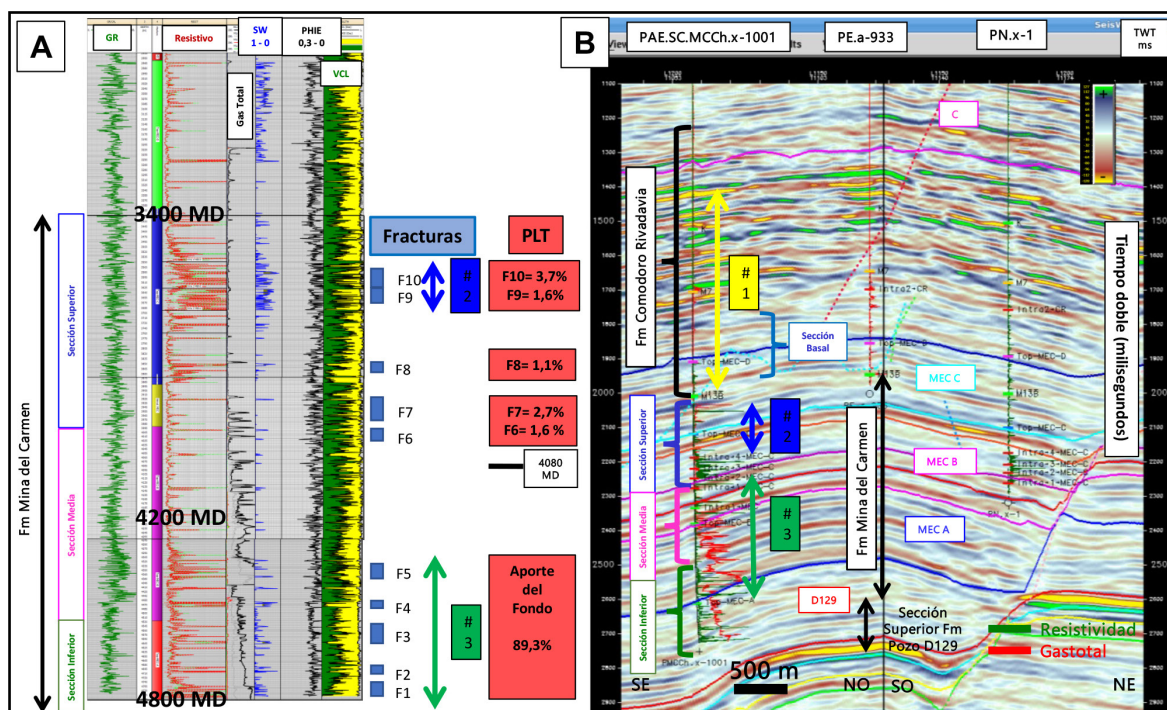


Figura 22. A) Evaluación petrofísica realizada en el pozo PAE.SC.MCCh.x-1001 para los Objetivos #2 y #3. Posición de las 10 fracturas realizadas. Resultados del PLT. B) Sección Sísmica donde pueden verse los 3 objetivos y para el caso del Objetivo #1 su correspondencia con el pozo PE.a-933 perteneciente al yacimiento de Escorial del área Cerro Dragón. Ver ubicación Figura 15 B)

Terminación

La terminación de pozo se llevó a cabo en 3 etapas. La Fase 0 fue realizada en agosto del 2020 donde se realizó la reparación del cabezal del pozo y se hizo un perfil de Presión y Temperatura hasta 2.800 MD, más allá de esa profundidad la herramienta no pudo bajar por la mala condición del fluido en el pozo.

Durante diciembre del 2020 y enero de 2021, se llevó a cabo la Fase 1, que consistió en acondicionar el pozo para la operación, lo primero que se hizo fue una carrera de limpieza en todo el pozo, luego se corrió el perfil de cemento completo que en la fase anterior no se había podido registrar; con ese dato se definió la posición del *packer* permanente (3.303 MD) y se bajó tubing 4 1/2", finalmente se hicieron pruebas de hermeticidad confirmando que el pozo estaba en condiciones para iniciar la etapa de estimulación hidráulica. La temperatura del fondo medida durante esta intervención fue de 191,7 °C.

El comienzo de la Fase 2 fue el 5 de enero de 2021 con la llegada de materiales a la locación, se realizó el almacenaje de arena, el montaje de dos tanques con una capacidad individual de 5.000 m³ y comenzó el acopio de agua, se realizó el armado de *trailers*, oficinas, campamento y finalmente el montaje del equipo de fractura que fue traslado desde Neuquén al igual que muchas de las otras cosas necesarias para realizar esta operación y que no se disponen en la Cuenca del

Golfo San Jorge. Es importante mencionar que este último aspecto sumado a la profundidad de los objetivos, las altas temperaturas y presiones a las que se encuentran, es uno de los más críticos y de mayor impacto económico cuando se evalúa la rentabilidad de los proyectos en el área Meseta Cerón Chico.

La terminación del pozo fue en forma de Rigless y cada zona fracturada se aisló mediante tapones de arena. Se realizaron las 10 fracturas (F) planificadas y uno de los dos DFIT propuestos, el tiempo de ejecución fue de 21 días, finalizando el 6 de febrero de 2021. Dada la alta temperatura en el fondo para la realización del DFIT en la F1 hubo que utilizar cargas especiales que tuvieron que ser importadas por no estar disponibles en Argentina. Si bien para todas las fracturas se utilizó agua de producción, por esta misma razón y su influencia en el agente sostén en reservorio, para las fracturas F1, F2 y F3 hubo que utilizar agua de producción seleccionada con menor salinidad; adicionando para el caso de la F1 la necesidad de realizar un bombeo de enfriamiento previo a la estimulación hidráulica propiamente dicha.

Los datos del DFIT realizado en la F1 permiten inferir una presión en el reservorio igual a 11.270 psi (65% de sobrepresión) y una permeabilidad del orden de los 0,002 mD. En función de estos datos hubo que replanificar la estimulación para la F1, bajando el caudal de bombeo propuesto de 35 a 18 bpm y la cantidad de bolsas de arena de 4.000 a 3.000, dado que cuando se quería respetar el programa el pozo levantaba presión.

Es importante mencionar que, si bien se esperaba una sobrepresión, está era sólo del 15 al 20 % similar a la existente en la zona del yacimiento Jorge (Albaytero *et al*, 2019) dentro del área de Cerro Dragón y no de 65% como mostró el DFIT

En la Figura 23 se muestra una comparación de lo programado versus lo ejecutado detallado por fractura en referencia a la cantidad de sacos de arena, agua y caudal de bombeo. El total de arena utilizada fue de 23.509 bolsas y en formación quedaron 22.454 en contraposición con las 5.600 y 2.800 bolsas que se utilizan generalmente en la terminación de los pozos productores de las Fms Mina del Carmen y Comodoro Rivadavia respectivamente en el área de Cerro Dragón. El volumen de agua utilizado fue de 6.143 m³.

El DFIT planificado para el F9 debió ser cancelado por falta de hermeticidad en el tapón de arena, quedando de esta manera sin evaluar el Objetivo #2.

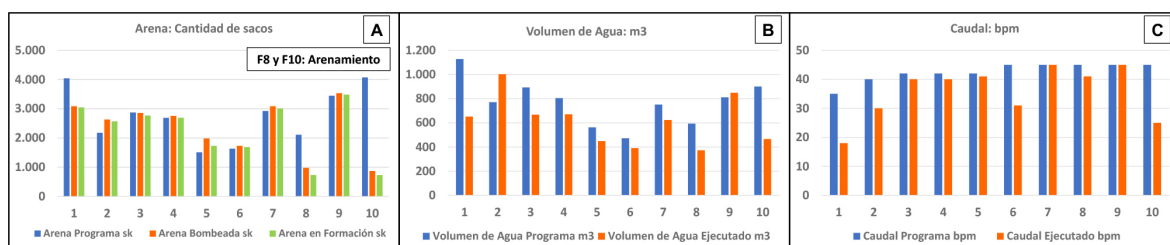


Figura 23. Estimulación Hidráulica realizada en el pozo PAE.SC.MCCh.x-1001. Comparación programa versus ejecución. A) Cantidad de Sacos B) Volumen de Agua C) Caudal de bombeo

Limpieza, ensayo extendido y PLT

El 24 de marzo, un mes y medio después de haber finalizado la estimulación, se abrió el pozo y ensayó 6.754 m³/día de gas. La muestra analizada en el laboratorio muestra una composición de C1 (Metano) con un %molar igual a 82, también se registró un nivel de 110 ppm de SH₂, que generó inconveniente durante los primeros días de limpieza del pozo. Si bien en un principio se creyó que el SH₂ estaba asociado a fluido de fractura, actualmente y habiendo recuperado ya el 105% del fluido inyectado se cree que está asociado a su presencia en el reservorio.

Actualmente el pozo lleva acumulado a la fecha 0,2 bcf de gas; mostrando una producción promedio estable típico de los reservorios no convencionales del orden de los 10.000 m³/d de gas (Fig. 24). Este caudal es captado en una de las baterías del yacimiento Escorial en el área de Cerro Dragón.

Con el fin de evaluar el aporte de cada fractura se realizó un PLT en septiembre de 2021, luego de haber transcurrido 6 meses de iniciado el ensayo extendido. Dado que la temperatura máxima de trabajo para la herramienta es de 175°C, de antemano se supo que las fracturas del fondo F1, F2, F3, F4 y F5 no podrían ser evaluadas por separado y con la ejecución del PLT tendríamos una medida de lo que aporta todo el fondo en su conjunto sin poder discriminar el aporte de cada una de ellas.

Durante la operación la herramienta bajó hasta 4.080 MD. Los resultados del PLT muestran que el caudal mayor del gas (89,3%) proviene del fondo correspondiente a la Sección Media e Inferior de la Fm. Mina del Carmen (Fig. 22).

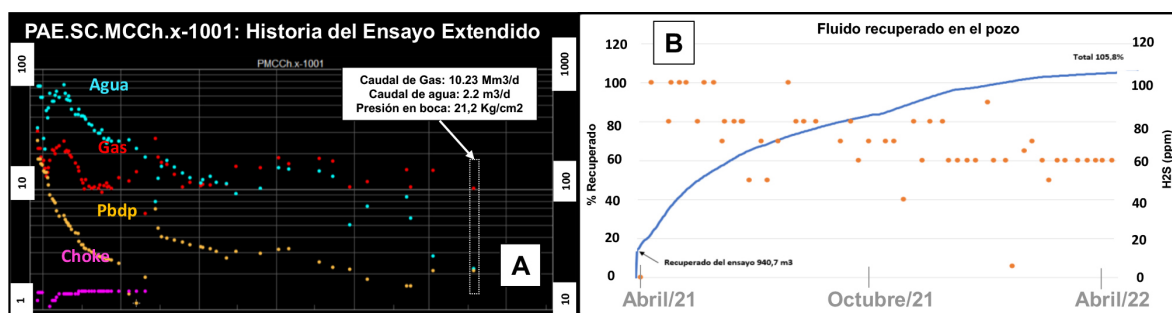


Figura 24. A) Historia del ensayo extendido en el pozo PAE.SC.MCCh.x-1001. B) Porcentaje de fluido recuperado y control de SH₂.

CONCLUSIONES

El pozo exploratorio PAE.SC.MCCh.x-1001, ubicado en el área Meseta Cerón Chico, con una profundidad total de 4.800 metros es el tercero más profundo de la Cuenca Golfo San Jorge. Los reservorios alcanzados de la Fm. Mina del Carmen muestran bajas porosidades y permeabilidades y los más profundos una sobrepresión de 65% y temperaturas de 191,7°C.

Se realizó una estimulación hidráulica de 10 fracturas con un total de arena bombeada de 23.509 sacos, atípica para las ejecutadas en el Cuenca del Golfo San Jorge.

Actualmente el pozo está siendo evaluado con un ensayo extendido con el fin de ajustar el modelo de reservorio y evaluar su economicidad.

Los trabajos mencionados sumado a la decisión de pasar al segundo periodo reflejan el compromiso de Pan American Energy para continuar con la exploración de los recursos potenciales del sector profundo de la Cuenca del Golfo de San Jorge.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Tecpetrol, YPF y Pan American Energy por autorizar la publicación de este trabajo. A Luis Vernengo por liderar la registración sísmica 3D. A Juan Moirano por los aportes realizados durante el procesamiento de los datos sísmicos. A Seiscenter S.A. por la dedicación y esmero en el reprocesamiento de la líneas sísmicas 2D. A Eduardo Fernández por el excelente trabajo realizado con los perfiles y evaluación petrofísica. A Marcelo Pellicer y Roberto Sentinelli. Y especialmente a Isabel Cano Frers y Nicolás Crevani por su acompañamiento y compromiso demostrado con el proyecto.

REFERENCIAS CITADAS

- Albaytero, M., Cabrera, J., Scazzioti, F., Galliano F. y Stier, S. 2019. Sobrepresión en los reservorios de la Fm. Mina del Carmen en yacimientos Jorge y Choique - Cuenca del Golfo San Jorge, Argentina. VII Congreso de Producción y Desarrollo de Reservas, Mar del Plata.
- Cayo, E., Crovetto, C., Plazibat, S., Stein, J., Díaz, M. y Paredes, J.M. 2011. Control tectónico sobre la sedimentación de la Fm. Mina Del Carmen (Albiano) en el yacimiento Cerro Dragón, Cuenca Del Golfo San Jorge, Argentina. VIII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Trabajos Técnicos: 397-418, Mar del Plata.
- Cohen, M., Castillo, V., Fernandez, S., Galarza, B., García Torrejón, L., Millo, L., Plazibat, S., Poveda, L., Scasso, J., Vernengo, L.F.4. Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos en Cerro Dragón, Cuenca del Golfo San Jorge, Argentina. Relatorio XXI Congreso Geológico Argentino. Puerto Madryn, 2022 Geología y Recurso Naturales de la Provincia del Chubut.
- Hale, D. 2013. Methods to compute fault images, extract fault structures, and estimate fault throws from 3D images; Geophysics, Vol 78 No. 2. o33-o34.
- Shuey, R. T., 1985, A simplification of the Zoeppritz equations: Geophysics, 50, 609-614
- Sylwan, C.A., Rodríguez, J.F. y Strelkov, E.E. 2008. Petroleum systems of the Golfo San Jorge Basin, Argentina.
- Sylwan, C., Droeven, C., Iñigo, J., Mussel, F. y Padva, D. 2011. Cuenca del Golfo San Jorge. 8° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Simposio Cuencas Argentinas: visión actual, Actas Electrónicas: 139-183, Buenos Aires.