

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL HIDROCARBURÍFERO DE LOS RESERVORIOS DEL MB. SAN EDUARDO (FM. AGRIO) INTEGRANDO ANÁLOGOS DE AFLORAMIENTOS, DATOS DE CONTROL GEOLÓGICO Y REGISTROS ELÉCTRICOS DE POZO

Ariel Ibáñez¹, Rodolfo Guerello¹, Aldo Omar Montagna^{1,2}

1: YPF S.A

2: Universidad Nacional de Río Negro

Palabras clave: Vaca Muerta, electrofacies, modelado geológico

ABSTRACT

The San Eduardo Member corresponding to the Hauterivian, is proposed by Zavala et al (2002), within the Pilmatué Member, with a thickness of approximately 150 meters composed of tabular banks of fine to very fine sandstone, massive, partly calcareous towards the base, whose individual thicknesses range from 20 cm. up to 130 meters of power. This unit outcrops near to the locality of the same name.

Since this identification on the surface, several exploratory prospects have been defined with the aim of individualizing the unit in the subsoil and evaluating its potential as a reservoir.

This paper presents a petrophysical characterization works carried out by integrating geological control data and well log, from one of the wells carried out, having the aforementioned surface analog as a geological model.

The result of this integrated study, based on the inverse methodology of interpretation of logs (probabilistic method), showed a tight gas reservoir; with a total thickness of more than 100 meters; with porosities less than 10%; an evaluated average permeability of 0.001 mD (from the magnetic resonance recording); with gas production forecast. The estimated net thickness was around 90 meters.

Likewise, a pore size characterization work was carried out using the information from the magnetic resonance recording.

The choice of the probabilistic method allowed obtaining interpretation models applicable to the available well information, integrating outcrop data, conventional and special electrical log, and gas chromatography and description of geological control drilling cuttings.

CONSIDERACIONES GEOLÓGICAS GENERALES

El miembro Pilmatué (Leanza *et al.* 2001), corresponde a la secuencia sedimentaria que abarca del Valanginiano tardío al Hauteriviano temprano; aunque Spalletti *et al.* en al 2011 especifican que en algunas zonas del noroeste de Neuquen y sur de Malargue, los depósitos más profundos

de esta unidad estratigráfica, dominados por pelitas negras, habrían comenzado a acumularse ya en el Valanginiano temprano.

En líneas generales, las facies marinas del Miembro Pilmatué se vinculan a depósitos de rampa marina, que forman parte del relleno de una cuenca de trasarco (Howell *et al.* 2005), favorecidos por la combinación de una lenta subsidencia térmica y ascenso eustático; que conformó un periodo transgresivo y de alto posicionamiento del nivel de mar (Legarreta & Gulisano 1989; Legarreta & Uliana 1991).

Desde el punto de vista de la exploración y desarrollo de hidrocarburos, el Miembro Pilmatué adquiere gran importancia para los sistemas petroleros de la Cuenca Neuquina, ya que representa una de las cuatro grandes rocas madres marinas que están presente en la columna sedimentaria de la mencionada cubeta.

Asimismo, ya desde la óptica de reservorios no convencionales tipo *shale*, este intervalo estratigráfico ha sido testeado en algunos sectores de la cuenca, aunque aún no hay una definición cierta de la productividad y economía de esos proyectos.

Una particularidad que presenta esta unidad estratigráfica en una región de la cuenca es el desarrollo de un conspicuo espesor de arenitas de variada granulometría (aunque predominan las

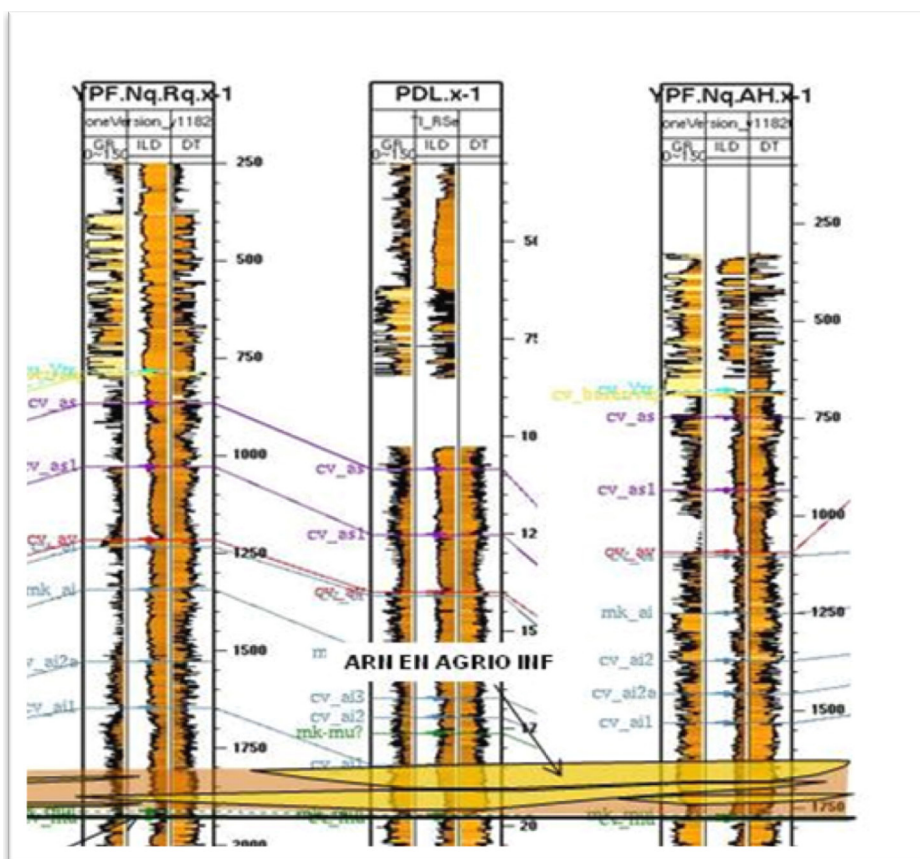


Figura 1. A.: Correlación eléctrica del Miembro San Eduardo entre Perfilajes del pozo Ranquiles x-1, AH.x-1 y PdL x-1

muy finas a finas), denominado como Miembro San Eduardo (Zavala *et al*, 2008). Su afloramiento tipo está en las inmediaciones de la mina homónima, donde el Miembro Inferior de la Formación Agrio tiene un espesor de casi 1000 metros (casi el doble de la potencia “normal” de esta unidad, tanto en subsuelo como en afloramientos), la mencionada secuencia psamítica se intercala entre las facies de lutitas negras y calizas características del Miembro Pilmatué, pudiendo alcanzar una potencia superior a los 100 metros. (Figura 1A).

ANTECEDENTES

Varios sondeos previos a la identificación y formalización del Miembro San Eduardo habían atravesado y documentado la existencia de ese espesor anómalo de arenas dentro del miembro Pilmatué. En la perforación del proyecto Ranquiles x-1, el cual durante la perforación mostro niveles de arena finas a muy finas y manifestaciones de gas. Los informes del legajo informan que

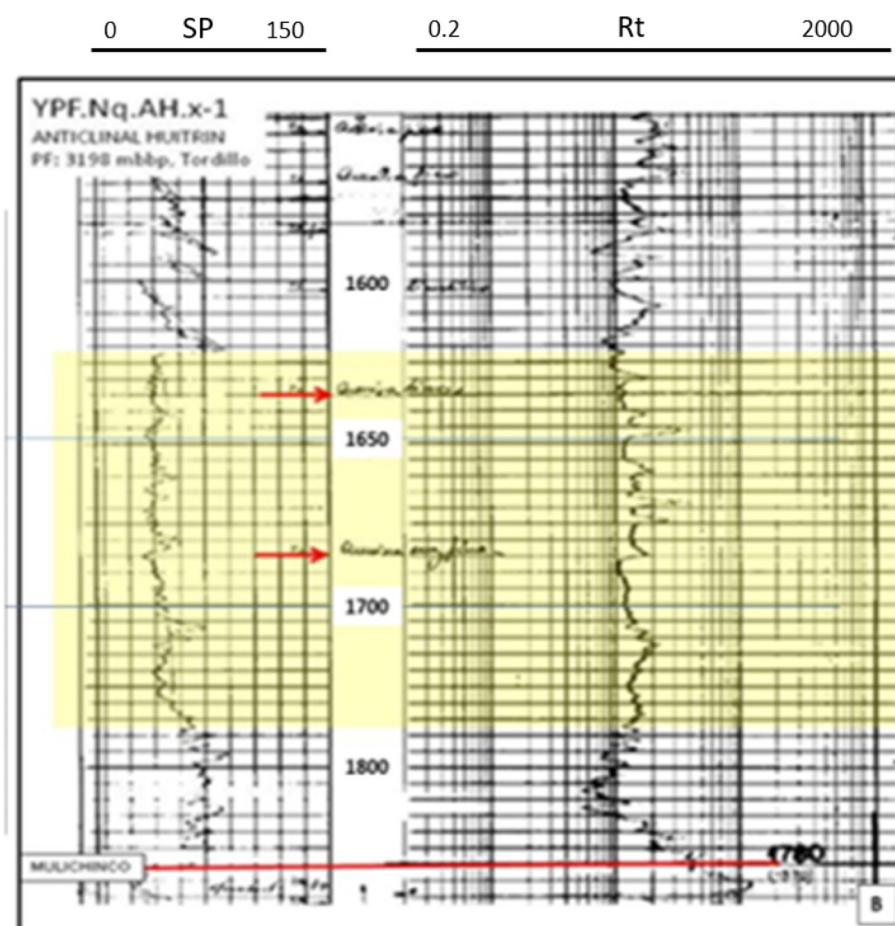


Figura 1. B: Perfilaje del pozo AH.x-1 del tramo asociable al Miembro San Eduardo. Las flechas negras indican la profundidad donde se extrajeron los testigos rotados.

se realizó un ensayo DST, y produjo 6120 m³/d de gas seco, caudal estimado (Figura 1 B).

Posteriormente, el pozo Anticlinal Huitrin x-1, perforado en el año 1975, que tenía como objetivo explorar la Formación Tordillo, atravesó en el Miembro Pilmatué un espesor de 115 metros de arenitas, donde se extrajeron dos testigos rotados, de cuya observación y descripción se pudo constatar la presencia de arenitas muy finas, grises, de aspecto bituminoso, que no presentaban rastros frescos ni fluorescencia. Este intervalo no fue estudiado en la terminación de este sondeo (Figura 1B).

La mejor zona para investigar este objetivo estaría ubicada al Este de la faja plegada, en el piedemonte, donde la generación no fue interrumpida por el levantamiento y solo es necesario que los niveles pelíticos del Agrio Inferior se encuentren en ventana de generación (o hayan pasado por este estadio anteriormente) y el hidrocarburo generado haya migrado directamente, sin sombras en el proceso migratorio, hacia estos cuerpos arenosos.

Una vez identificada formalmente esta unidad en afloramiento, se planificaron y ejecutaron distintos trabajos y proyectos exploratorios tendientes a encontrar y estudiar el Miembro San Eduardo en el subsuelo. Dentro de los proyectos de la compañía se perforaron dos sondeos exploratorios, con objetivos profundos y se recuperaron datos de interés en la secuencia Agrio Inferior. YPF.Nq.PDL x-1, y Pampa de las liebres x-2, cuya caracterización petrofísica es el tema del presente trabajo.

PROBLEMÁTICA

Primero, nunca se lo tomó como objetivo principal a explorar. Los primeros datos completos se recuperaron en PDLx-2. Al momento de realizar la interpretación petrofísica basada en la evaluación de perfiles de pozo del espesor correspondiente al Miembro San Eduardo, nos encontramos con las siguientes particularidades:

Escasa información de registros eléctricos de pozo en el pozo PDL.x-1,(1985) para la época de su perforación, la secuencia Mb Agrio Inferior no presentaba interés. ya que su objetivo principal eran objetivos profundos, y se registraron perfiles básicos en el Miembro San Eduardo.

Durante la perforación del Proyecto YPF.Nq.PDL.x-2 con objetivos profundos, se obtuvieron datos en el intervalo Mb Agrio Inferior y se realizó la caracterización petrofísica de la secuencia Arenas de San Eduardo, con un modelo de arenas compactas mineralizadas con gas.

OBJETIVOS

En función de las problemáticas especificadas, se trazó el gran objetivo de realizar la mejor interpretación petrofísica posible, utilizando e integrando todos los datos de subsuelo y afloramientos, así como las distintas técnicas de análisis de perfiles disponibles.

DESARROLLO

El primer pozo evaluado es PDL.x-1, la evaluación fue realizada por métodos determinísticos, debido a lo limitado del conjunto de registros eléctricos disponible, (Solo sónico. como curva de porosidad). Así como de datos de roca de subsuelo. A pesar de las notorias incertidumbres existentes al momento de definir los parámetros y ecuaciones predeterminadas (densidad de matriz y arcilla, resistividad del agua, ecuaciones de saturación -Archie, Simandoux, etc, para poder aplicar el método convencional, la mencionada limitación en cuanto a la información con que se contaba no posibilitó otra alternativa de evaluación. La Figura 2 muestra el resultado de este análisis, donde se utilizó un modelo de porosidad basado en el perfil sónico, por no contar con otro registro de porosidad.

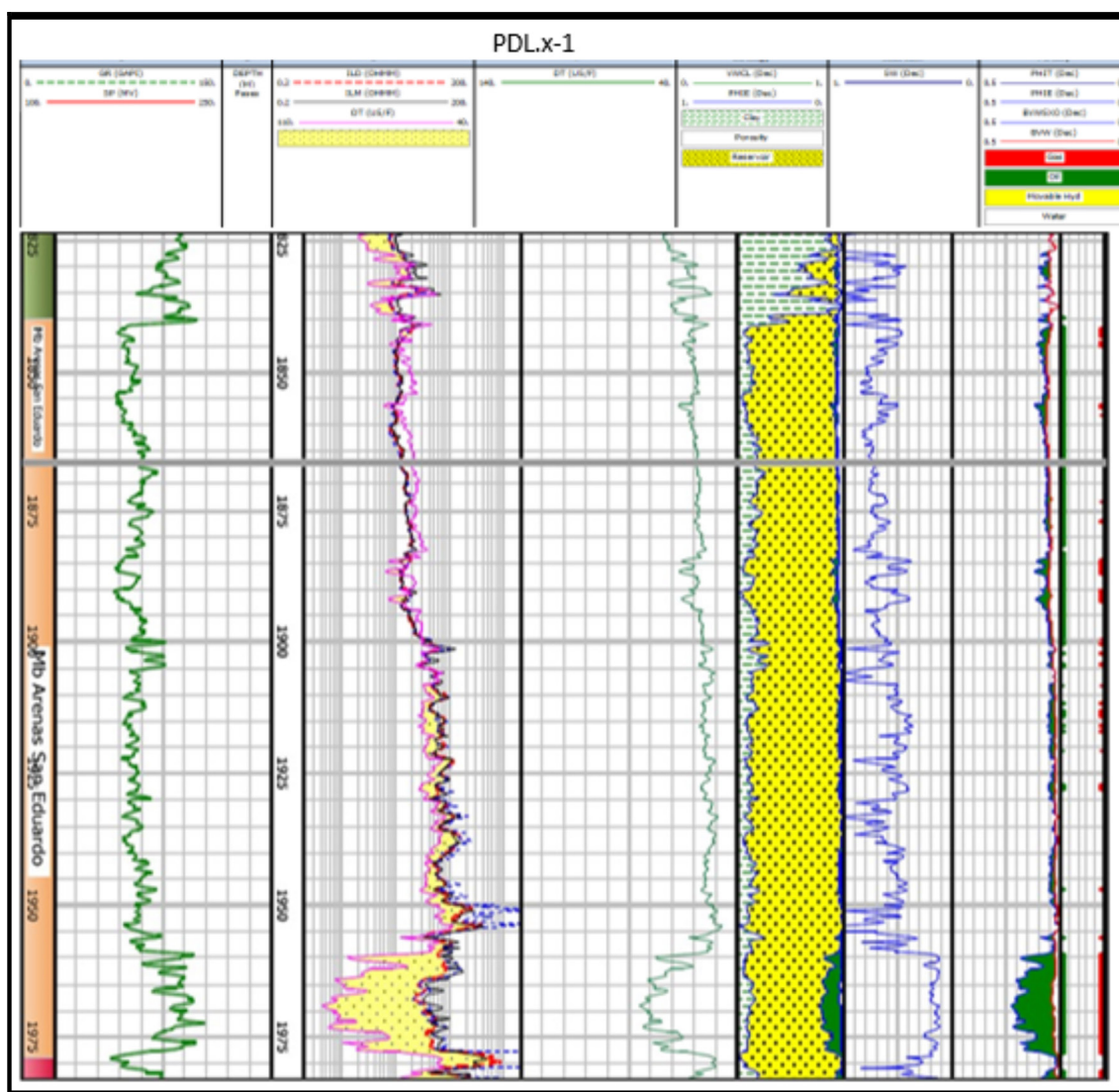


Figura 2. Tramo interpretado en el pozo PDL.x-1 del tramo psamítico del Miembro San Eduardo a partir de metodologías de análisis determinísticas.

La interpretación del tramo correspondiente a las Arenas San Eduardo arrojó un espesor total de 120 metros de una secuencia psamítica, con alrededor de 34 metros de espesor útil, básicamente determinados por una restricción de porosidad, y 102 m de arenas. De la evaluación realizada no pudo identificarse un contacto de agua evidente.

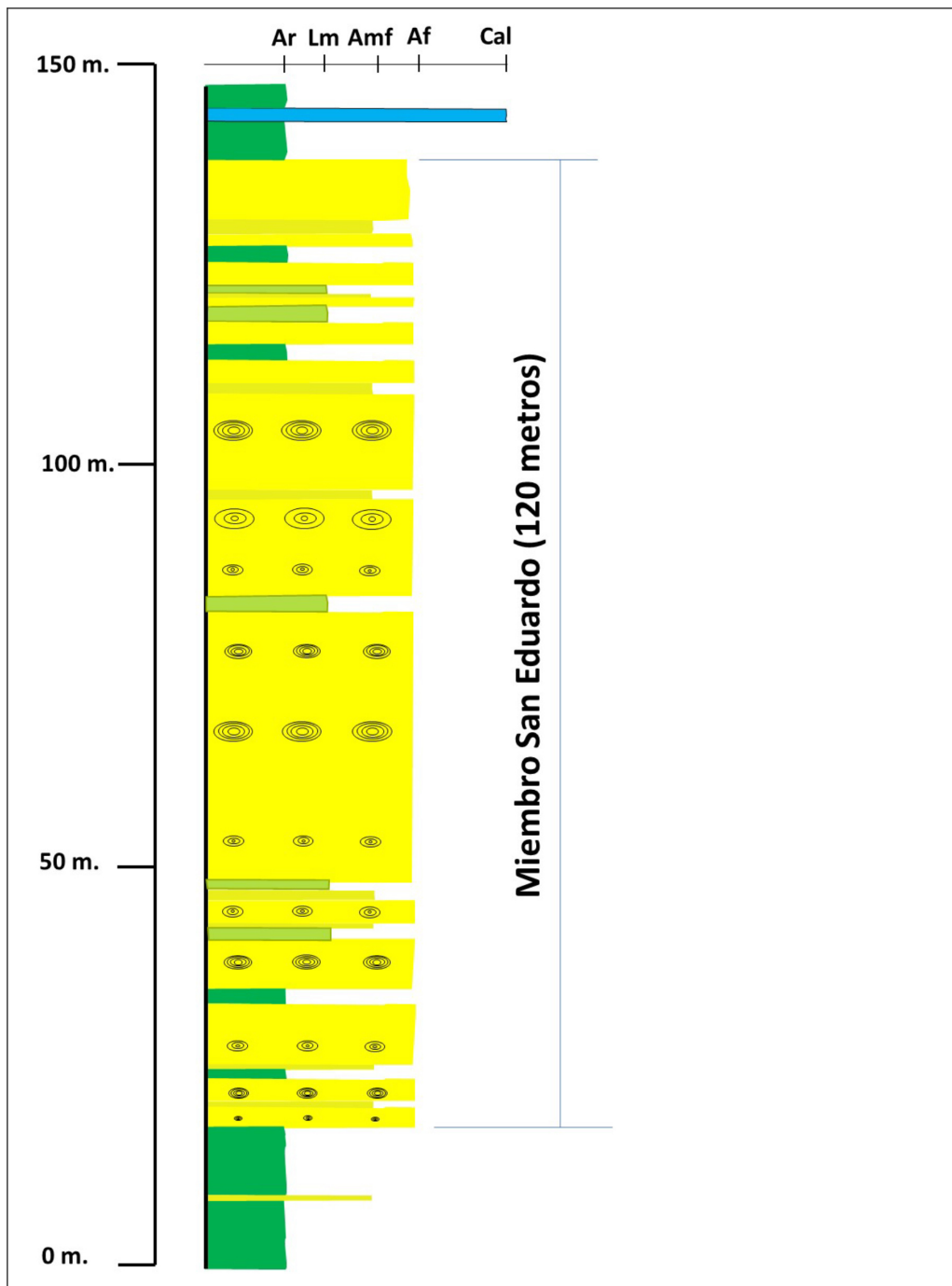


Figura 1 C. Perfil esquemático levantado en la zona de la Mina San Eduardo.

La ausencia de datos de rocas representativos de subsuelo, y ante la necesidad de tener alguna referencia cercana al momento de evaluar los perfiles en cuanto a parámetros determinísticos (Vsh a partir del rayos *gamma*; composición litológica para determinar tiempo de tránsito de la matriz para el modelo de porosidad a partir del modelo sónico; resistividad de las arcillas para la estimación de la saturación de agua; etc.); así como una primera aproximación de analogía en cuanto a espesor total y espesor de arenas; hizo necesario un trabajo de observación, descripción e interpretación de la secuencia correspondiente a la secuencia del Miembro San Eduardo en la localidad de la Mina homónima.

El trabajo de campo realizado permitió identificar una secuencia clástica de unos 120 metros de espesor (Figura 1 C), fuertemente dominada por bancos de variado espesor de arenitas muy finas a finas, extremadamente masivas. La muy marcada presencia de concreciones de distintos tamaños (de pocos centímetros a 60 – 70 centímetros de diámetro), impiden la identificación de estructuras sedimentarias inorgánicas internas.

Las facies identificadas en el trabajo de campo fueron lutitas, limolitas, arenitas muy finas y arenitas finas. Todas se disponían en bancos tabulares, cuyo espesor fluctuaba entre las pocas decenas de centímetros (20 – 30 centímetros), a 35 – 40 metros de potencia máxima (figuras 2A,



Figura 2. Marcada tabularidad de los cuerpos (A, B, E, F), así como predominancia de contactos netos (B, F), muchas veces marcados por niveles concrecionados (A, C, D).

2B y 2C). estos cuerpos presentan por lo general bases y techos netos (en muy pocos se vieron contactos algo transicionales), sin estructuras de deformación por carga ni erosiva.

Respecto a las facies, la de lutitas se presenta muy subordinada, caracterizadas por ser algo bituminosas y calcáreas, gris oscuras, en parte de aspecto margoso; con espesores que raramente superaban los dos metros de potencia. La facies de limolitas presentaba color castaño claro, muy meteorizada, en partes con reacción con leve reacción al ácido clorhídrico, lo que indicaba una mayor cementación calcárea. La estructura interna dominante era la masiva, y presentaba en algunos bancos trazas de thalasinoides y ophiomorphas.

Las facies de arenas muy finas son más claras, castaño grisáceas, de regular a buena selección, con abundante presencia de concreciones (Figura 3A, 3B, 3C y 3D). Exhibe clastos de cuarzo, feldspatos del tipo plagioclasas y líticos verdes y morados. Algunos bancos exhiben matriz arcillosa. En general, muestran marcada masividad, aunque la fuerte presencia de concreciones (mayoritariamente calcáreas), dificulta la identificación de posibles estructuras sedimentarias inorgánicas. La disposición de estas concreciones es netamente horizontal, pudiendo presentarse tanto en los contactos entre cuerpos como en el interior de estos. La alternancia de niveles concrecionados con otros sin estas estructuras diagenéticas, nos permite intuir diferencias petrofísicas en los niveles de sedimentos que se estaban depositando, así como en la secuencia de rocas resultantes de la litificación de los mismos.

Con respecto a las estructuras sedimentarias biogénicas, también se observan, con variado índice de bioturbación, que puede ir de pobre a moderado, trazas de thalasinoides y ophiomorphas.

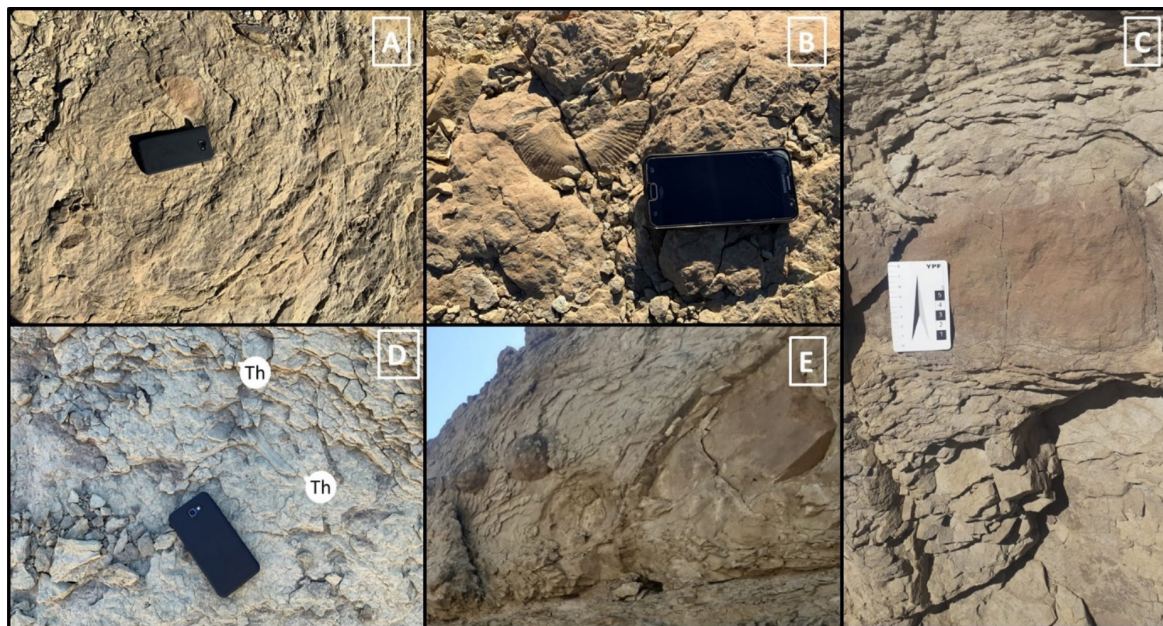


Figura 3. Marcada presencia de niveles con concreciones, preponderantemente calcáreas, de variados tamaños (C y E). También se observa el grano fino a muy fino de los depósitos (A), y la masividad que caracteriza a la secuencia estudiada (A, E, C), en parte generada por la presencia de bioturbación (mayormente thalasinoides, D). La foto B muestra la presencia de amonites en la parte superior de la secuencia, cerca del contacto con las pelitas negras y bancos calcáreos típicos del Membro Pilmatué.

Los bancos de areniscas muy finas están notoriamente subordinados respecto a los estratos de areniscas finas, que son los más abundantes, representando aproximadamente el 80% del perfil levantado.

Posteriormente al trabajo de campo, en el sondeo PDL.x-2 se extrajeron 6 testigos laterales rotados en el intervalo correspondiente al Miembro san Eduardo, con varios objetivos: uno, tratar de aproximar la analogía entre afloramiento y subsuelo en cuanto a características primarias de la roca; dos, tener valores petrofísicos para calibrar el modelo de porosidad y permeabilidad a utilizar; tres, conocer si los procesos y productos diagenéticos identificados en superficie eran los mismos que los presentes en el área de estudio; y, cuatro, definir el mejor modelo litológico – petrofísico de entrada en un posible flujo de interpretación probabilística de perfiles a utilizar en la caracterización petrofísica a realizar.

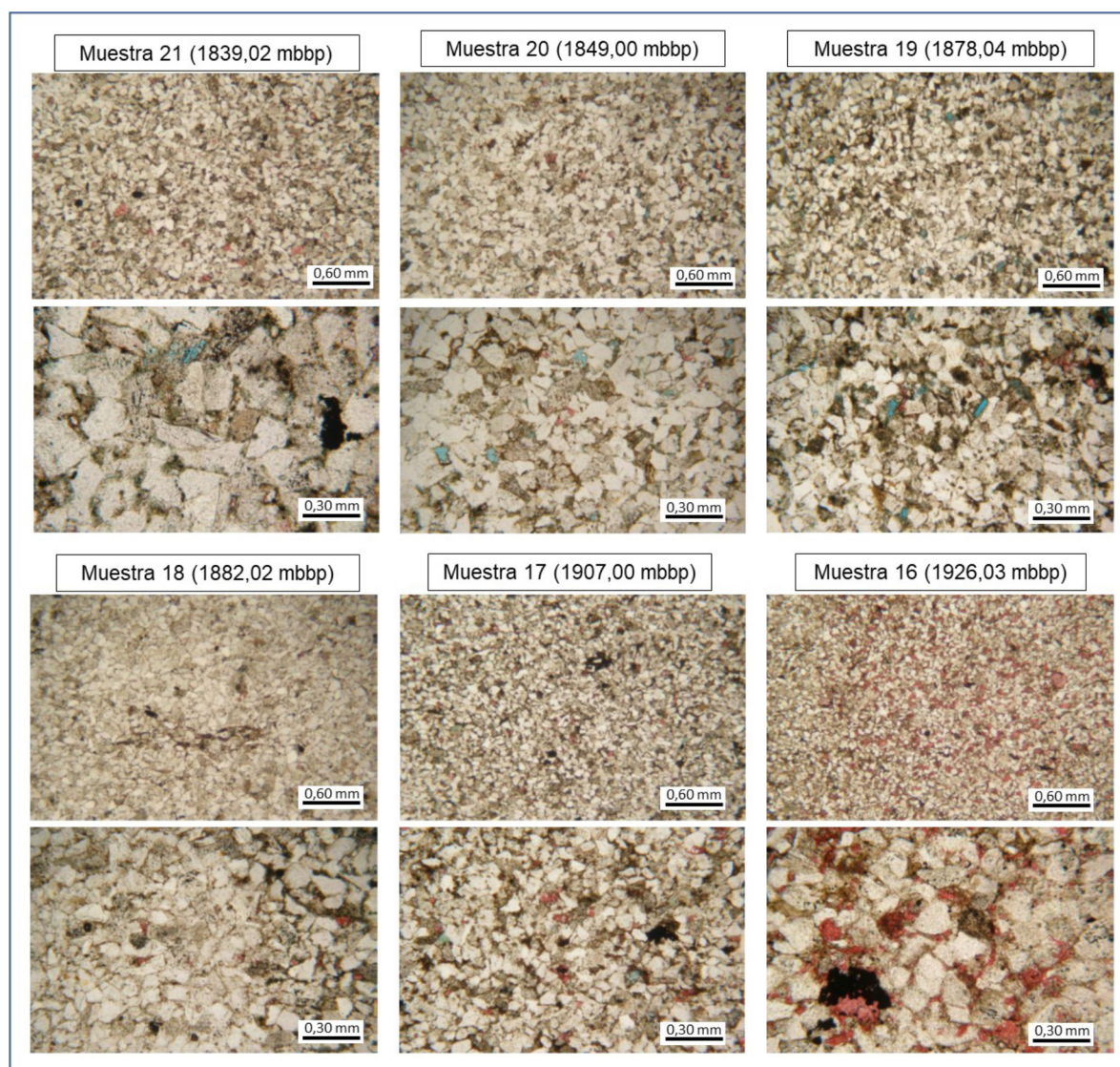


Figura 4. Cortes delgados de 0.60 y 0.30 mm (nicols paralelos), de los 6 testigos rotados laterales.

El análisis petrográfico y la observación y descripción de los cortes delgados permiten definir a la roca como una arenita cuarzo feldespático lítica, tamaño arena muy fina (predominante) a fina; mayormente constituidas por clastos (77% a 86%), matriz (3% a 15%); cemento (5% a 16%) (Figura 4).

La composición de los clastos muestra porcentajes mayoritarios de cuarzo que fluctúan entre 68% y 73%; seguidos por feldespatos (mayoritariamente plagioclasas, ortosa subordinada), con guarismos entre 17% y 23%; y, líticos, 7% a 9%, predominantemente volcánicos, con escasa participación de clastos de metamorfitas y de naturaleza volcanoclastica (fundamentalmente tobas vítreas).

Por su parte la matriz es arcillosa, como relleno de poros, y recubrimiento de granos; mientras que el cemento es mayormente calcáreo (predominancia de calcita como relleno de poros y parches; quedando subordinada la dolomita como relleno de poros formado cristales romboédricos pequeños), subordinadamente silíceo (crecimiento secundario de cuarzo)

Desde el punto de vista granulométrico - textural, en líneas generales presentan un grado de redondeamiento fundamentalmente subanguloso (subordinados angulosos, escasos subredondeados); con buena selección; texturalmente submadura con alta madurez mineralógica; y una textura general grano sostén.

El análisis y evaluación de estos datos de roca, sumados a lo colectado en el trabajo realizado en el análisis del análogo de roca, permitió mejorar sensiblemente el modelo litológico – petrofísico de entrada en el flujo de trabajo de interpretación inversa (o probabilística), utilizado en la evaluación de los perfiles adquiridos en el segundo sondeo exploratorio. Esta calibración dio un sustento muy firme para utilizar las ecuaciones de respuesta de las herramientas de perfilaje, y la consiguiente definición de la respuesta teórica de cada herramienta de perfilaje en función de las variables de la formación (marco teórico del método inverso de interpretación de perfiles o método estadístico); daba la posibilidad de especificar las mediciones disponibles y utilizar el conocimiento local como restricción sobre las ecuaciones (Perez *et al.*, 1999; Montagna *et al.*, 2006) (Figura 5).

						Mineral	Calcite	Quartz	KERO	Illite	Gas Sw	Gas Sxo	Water Sw	Water Sxo	Pyrite	Albite
						Type	Matrix	Matrix	Matrix	Wet Clay	Hyd. Sw	Hyd. Sxo	Water Sw	Water Sxo	Matrix	Matrix
						Shading										
						Use										
Curve / Val	Equation	Eq. Mode	Use	Confidence	Inv. Fact.	Result	Vlime	VSand	VKER	Vclay	VgasSw	Vgas	VwaterSw	Vwater	Vpyrite	Vd2
1.0	Unity	Model	✓	0.01	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
DT	Sonic	Model	✓	6	0		47	55	190	100	220	220	189	189	39.2	49
GP/RHOB	Density	Model	✓	0.05	0		2.71	2.65	1.2	2.73	0.3	0.3	1	1	4.99	2.6
CNCLS	Neutron	Model	✓	0.05	0		0	Auto	0.8	0.26	0.5	0.5	1	1	0.01	-0.001
U	U	Model	✓	2	0		13.8	4.8	2	9.9	0.8	0.8	Auto	Auto	82	5.6
Ct	Cond. Cxo	Model	✓	0.2	0		0	0	0	0.7	0	0	1.2	1.2	0	0
GRSL	GammaRay	Model	✓	20	0		50	100	800	150	0	0	0	0	0	60
0.1	Constant	> Limit	✓	0.001	0		0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Uran	Uran	Model	✓	2	0		1.8	1	150	4.6	0	0	0	0	0	2
TH	Thor	Model	✓	1	0		3	10	0	20	0	0	0	0	0	5

Figura 5. Modelo litológico – petrofísico de entrada en el flujo de trabajo de interpretación inversa (o probabilística) utilizado.

Formación	Muestra	Profundidad (mbbp)	Clasificación	Tamaño de grano	Selección	Redondeamiento	Empaquetamiento	Madurez textural	Composición				Arcilla total (matriz+cemento)	Petrofísica	
									Clastos %	Matriz %	Cemento %	Porosidad %		Porosidad %	Permeabilidad mD
Agrio	21	1839,02	AFL	mF-F	B	Sa (Sr-A)	I	SMa	86	4	8	2	4	7,23	0,0042
	20	1849,00	AFL	mF-F	B	Sa (A)	I	SMa	85	3	8	4	3	7,10	0,0083
	19	1878,04	AFL	mF-F	B	Sa (A)	I	SMa	85	3	7	5	3	7,56	0,0103
	18	1882,02	AFL	mF-F	B	Sa (A)	I	SMa	89	4	5	2	4	7,55	0,0048
	17	1907,00	AFL	mF (F)	B	Sa (A)	I	SMa	85	5	9	1	5	3,84	0,0017
	16	1926,03	AFL	mF (F)	B	Sa-A	I	SMa	77	7	16		7	1,76	0,0007

Figura 6. Datos de porosidad y permeabilidad de laboratorio utilizados en la definición del modelo petrofísico de entrada.

De esta forma el análisis de perfiles realizado se adaptó a mediciones, conocimiento y requerimientos específicos, teniendo a favor el hecho que el método determina, a través de técnicas de minimización de errores, la solución que crea la menor diferencia entre la respuesta

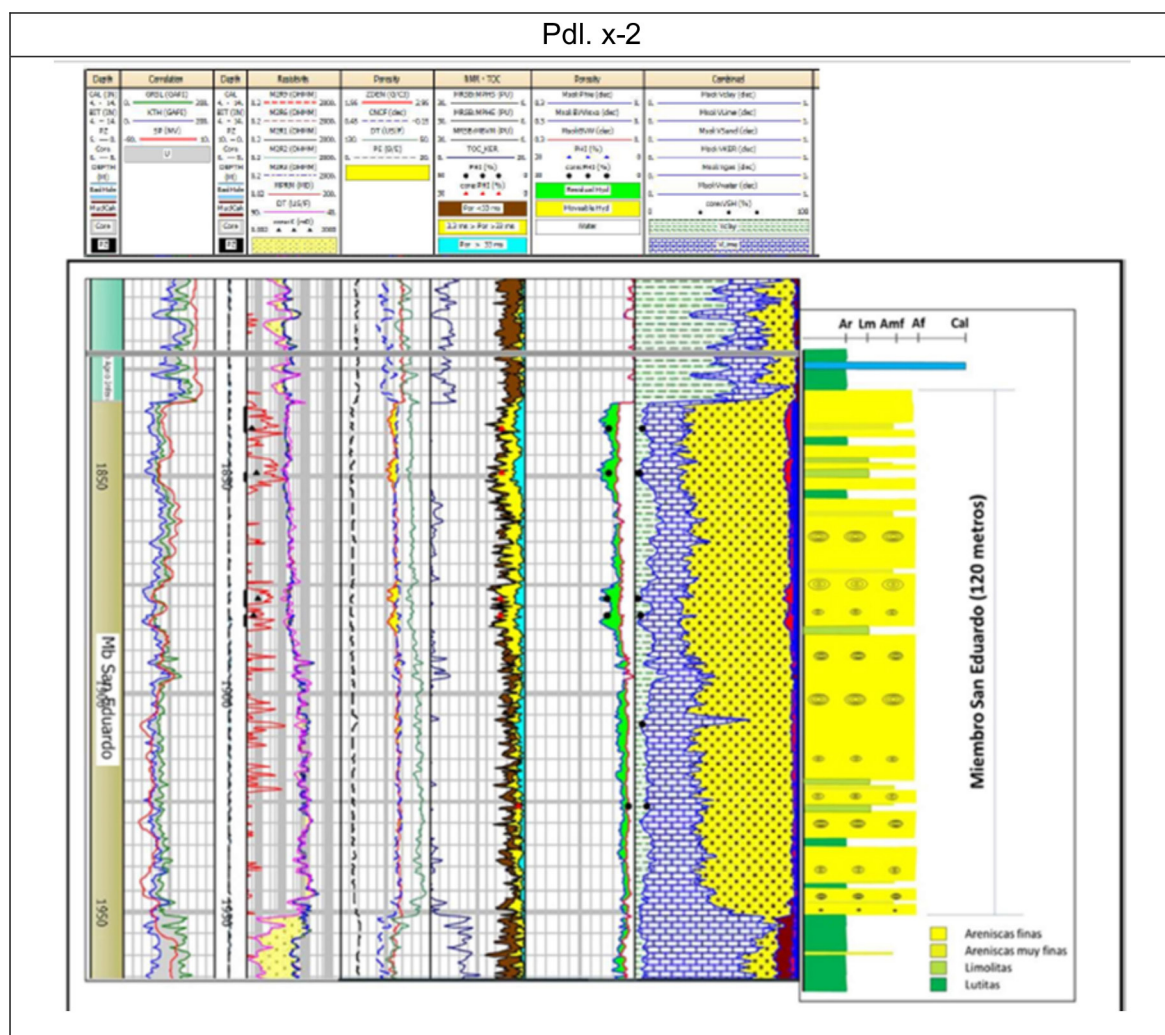


Figura 7. Resultado de la evaluación realizada siguiendo el flujo de trabajo basado en la interpretación inversa de perfiles explicada. A la derecha, la comparación del modelo litológico conseguido con el perfil de afloramientos levantado.

teórica a partir de las ecuaciones de las herramientas, y las mediciones realmente hechas. En este momento, el resultado obtenido es el óptimo para la información disponible.

Por su parte, para la confección del modelo de porosidad se trabajó con los valores petrofísicos de esos testigos, y gráficos de interrelación interactivos con los tres perfiles de porosidad (Sónico, Neutrón y Densidad); y la información del perfil de resonancia magnética adquirido en el pozo PDL.x-2.

Por último, para la determinación del modelo de saturación, se procedió a ajustar los exponentes de cementación y saturación a partir de los ensayos de terminación; utilizándose la cromatografía de gases del control geológico como indicador cualitativo la momento de la estimación de hidrocarburos.

La Figura 7 muestra el modelo litológico – petrofísico optimizado, así como el tramo interpretado a partir del mismo.

CONCLUSIONES

La utilización de afloramientos análogos puede llegar a ser una excelente fuente de información en caso de ausencia de rocas de subsuelo para calibrar interpretaciones petrofísicas basadas en evaluaciones de registros eléctricos de pozo.

Los arreglos y variaciones litológicas identificadas en afloramiento llevados a la metodología de análisis permitieron ajustar el modelo de depósito sedimentario para el Miembro San Eduardo.

La técnica de interpretación probabilística permite la determinación de parámetros litológicos - petrofísicos consistentes y una metodología para caracterizar estáticamente los reservorios en escenarios de marcada incertidumbre geológica inicial.

A partir de los datos de entrada (superficie – subsuelo), y los datos obtenidos se logra una base común de información interdisciplinaria, que será enriquecida en una futura etapa de desarrollo.

Se obtuvo un modelo petrofísico del sondeo interpretado, con información de espesor total, neto y útil, así como de variaciones petrofísicas que, además de permitir el diseño y la terminación realizada, sirve como base para la planificación de nuevas perforaciones; y para definir un posible horizonte a navegar en un futuro pozo horizontal.

El método de interpretación de perfiles permitirá, en un futuro, obtener información confiable con un conjunto mínimo de perfiles acotado: dos registros de porosidad (densidad–sónico, o densidad–neutrón), y el registro de factor fotoeléctrico (aunque éste también puede estar ausente); registros de inducción y potencial espontáneo.

BIBLIOGRAFÍA

- Alberty M., Hashmy K.H., 1984. Application of ULTRA Log Analysis. SPWLA 25th Annual Logging Symposium, June 10-13,
- Alberty M., Hashmy K.H., 1984. Use of Physical Samples and INVERSE Log Evaluation for Improved Formation Analysis. Nigerian Association of Petroleum Explorationists, Second Annual Conference, November 27-29.
- Gysen M., Mayer C., Hashmy K., 1988. A New Approach to Log Analysis Involving Simultaneous Optimization of Unknowns and Zones Parameters. Internal, Gearhart Industries, Inc, Forth Worth.
- Howell *et al.* 2005.
- Legarreta & Gulisano 1989; Legarreta & Uliana 1991.
- Leanza *et al.* 2001.
- Montagna A., Perez G., Zumel J., 1999. Metodología de evaluación petrofísica aplicada a la caracterización del yacimiento Centenario, Neuquén, Argentina. III INGEPEP. Lima, 1999.
- Montagna, A., Olmos, M., 2003. Caracterización petrofísica aplicando el método inverso de interpretación de perfiles en un yacimiento de la cuenca neuquina, Argentina. EXITEP. México.
- Montagna A., Santiago E., Barros S., 2007. Aplicación del método probabilístico de interpretación de perfiles a la evaluación de prospectos exploratorios. SIS Forum 2007. Buenos Aires. 2007
- Spalletti *et al.* en al 2011
- Zavala *et al* (2002)
- Zavala C., Arcuri M., Di Meglio M., Zorzano A., 2008. Las capas de San Eduardo: 130 metros de arenas en el miembro inferior de la Formación Agrio, Cretácico Inferior, Cuenca Neuquina. VIII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Mar del Plata. 2008

