

10º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos
 Simposio de Geofísica: La Geofísica como vínculo entre el conocimiento de la tierra y la sociedad

INVERSIÓN SÍSMICA PRE-APILADO COMO HERRAMIENTA PREDICTIVA PARA LA EXPLORACIÓN Y DESARROLLO DE LAS ARENAS BASALES DE LA FORMACIÓN LOS MOLLES. ÁREAS LOS BASTOS Y PUNTA SENILLOSA, CUENCA NEUQUINA

Paula E. Bagdo¹, Horacio Acevedo¹, Alfonso Mosquera¹, Alan Buchanan¹

1: Tecpetrol S.A., paula.bagdo@tecpetrol.com, horacio.acevedo@tecpetrol.com,
 alfonso.mosquera@tecpetrol.com, alan.buchanan@tecpetrol.com

Palabras clave: **inversión sísmica, areniscas basales Fm. Los Molles, Cuenca Neuquina**

ABSTRACT

The seismic inversion conducted in Las Chivas and Punta Senillosa structures (56 km²) resulted in a key technique to successfully prospect oil and gas resource potential and production in Los Molles Fm. basal sandstone reservoir (lower Jurassic). This objective lies over the Pre-Cuyo Group and corresponds to inner platform tuff sand facies, with a variable net pay from 4 to 35 m, average porosity of 15% and permeability between 0.01 and 0.1 mD. This reservoir shows not only strong lateral variations of thickness and petrophysic properties but also is interbedded with limestone tuffs and organic-rich mudstones levels (Chaschil Member), resulting thus in a complex prospection setting. The main purpose of this study was to obtain and analyze impedances and other elastic properties to better estimate the most favorable areas of hydrocarbon bearing reservoir presence. Pre-stack time migrated seismic gathers, previously conditioned without gains and filters, were used together with LCh.xp-1, LCh-1003 and PS.xp-1005 well logs. A cross-plots analysis guaranteed the inversion feasibility by separating reservoir sandstones from other non-reservoir lithology. The inversion method was based on an initial earth model created from well log impedances and seismic horizon interpretations of Quintuco Fm., the base of Vaca Muerta Fm., Los Molles Fm., and an organic level of Los Molles Fm. Acoustic and elastic impedances cubes were obtained as well as Poisson's Ratio, Lambda-Rho and Mhu-Rho volumes. All of them were used to generate lateral property distribution maps which allowed the quantitative interpretation of reservoir areas with the best effective porosity. The results showed a very good fit with drilled wells, but more importantly, successfully predicted the gas and condensate bearing reservoirs of PS-1015 y PS.x-1018 discovery wells drilled during the appraisal campaign in year 2017. So, it allowed the delimitation of a new oil & gas reservoir in Punta Senillosa field. Additionally, the results were used to improve seismic well tie and the structural and stratigraphic interpretation. Seismic inversion proved to be a very effective tool to successfully explore Los Molles Fm. basal sandstones objective, despite of local seismic amplitude attenuated areas.

INTRODUCCIÓN Y MARCO GEOLÓGICO

En este trabajo se presentan los resultados del estudio de inversión sísmica pre-apilado (prestack) realizado en un área parcial de los bloques Los Bastos y Punta Senillosa (Tecpetrol) (Fig.

1). El objetivo de este estudio fue proporcionar una herramienta geofísica que ayude a predecir la distribución lateral de las arenas basales de la Fm. Los Molles y a resaltar aquellas zonas con mayor porosidad (tight sandstones) y probabilidad de saturación de hidrocarburos. De esta forma, se buscó definir las zonas con mayor atractivo exploratorio y disminuir el riesgo geológico de los pozos propuestos. Una de sus aplicaciones directas fue determinar la continuidad lateral del reservorio en el tren estructural de Punta Senillosa (Fig. 2), en dirección hacia el Yacimiento Las Chivas, donde se propuso la perforación de un pozo exploratorio a los niveles profundos del Gr. Cuyo. Los resultados de este estudio se utilizaron, además, para mejorar el amarre de los principales passes formacionales y guiar la interpretación sísmica del reservorio y de toda la sección inferior del Gr. Cuyo.

Las áreas Los Bastos y Punta Senillosa ocupan una superficie de 392 km² en la zona sur de la cuenca Neuquina y en el segmento oriental de la Dorsal de Huincul. La zona fue afectada por eventos transtensivos y transpresivos y por una posterior inversión tectónica que dio desarrollo a múltiples estratos de sincrecimiento, truncaciones e importantes discordancias (Vergani *et al*, 1995; Silvestro y Zubiri 2008) dando lugar a un sector de gran complejidad geológica. El basamento está compuesto por las rocas ígneas y metamórficas paleozoicas (Fm. Colohuincul y Fm. Mamil Choique). Estructuras tipo hemigraben producidas por la extensión del Jurásico Inferior fueron rellenadas por depósitos de synrift conocidos como Gr. Precuyo. Estos depósitos consisten principalmente en facies volcánicas, volcanoclásticas y siliciclásticas con aporte piroclástico. (Legarreta y Gulisano, 1989). Posteriormente a partir del Pliensbaquiano, comenzó la depositación del Grupo Cuyo constituido en el área por las Formaciones Los Molles y Lajas, representando variados ambientes depositacionales que progradan desde el borde de cuenca incluyendo abanicos aluviales, fluviales, deltaicos y submarinos. La formación Los Molles está constituida principalmente por arcilitas,

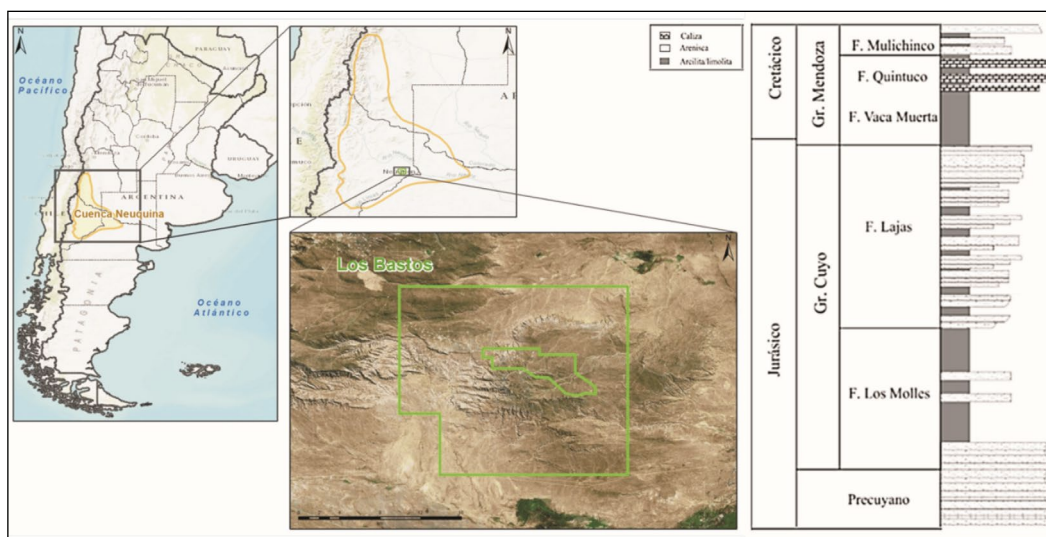


Figura 1. Mapa ubicación de los bloques Los Bastos y Punta Senillosa en la Cuenca Neuquina, Argentina. Sección estratigráfica Jurásica-Cretácica inferior del área.

limolitas y areniscas tobáceas de ambiente marino profundo, mientras que la Formación Lajas, que la suprayace, corresponde a progradaciones clásticas depositadas bajo condiciones litorales asociadas a ambiente de planicie de mareas y deltaico. El reservorio denominado “Molles Basal” se halla dentro de la sección inferior de la Fm. Los Molles y se apoya en discordancia erosiva sobre las tobas y vulcanitas del Gr. Precuyo. Está principalmente compuesto por areniscas y areniscas tobáceas medias a finas pobremente seleccionadas. Su porosidad, mayormente de tipo secundaria

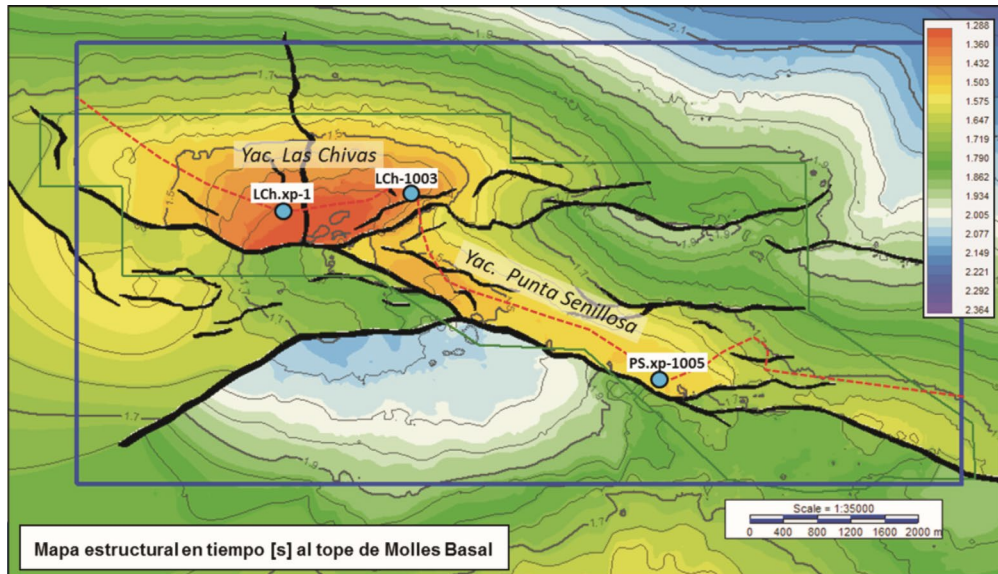


Figura 2. Mapa estructural en tiempo correspondiente a la interpretación sísmica del horizonte asociado a Molles Basal. Se identificaron los yacimientos asociados a los trenes estructurales de Las Chivas y Punta Senillosa. En azul se recuadra el área de inversión y con círculos celestes los pozos utilizados en el modelo. La línea punteada en rojo corresponde a la sección sísmica arbitraria «A» que se muestra en sucesivas imágenes.

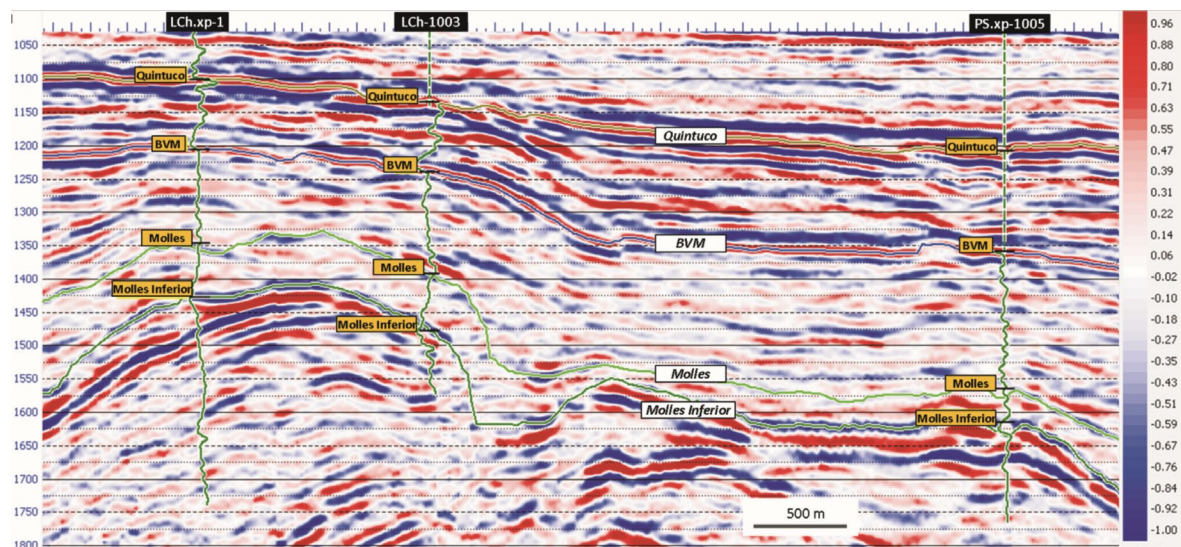


Figura 3. Línea sísmica arbitraria «A» con amplitudes extraídas del cubo 3D. Ubicación en figura 2. Las curvas verdes desplegadas en la posición de los pozos corresponden a las curvas de impedancia P calculadas con los perfiles de velocidad y densidad. Las curvas están filtradas a 80 Hz para una mejor visualización.

con distribución heterogénea, fue descripta como buena a muy buena (10-17%) aunque en las facies más finas se muestra baja (2%). El valor de permeabilidad promedio está en el orden de los 0.05 mD, sin embargo, el reservorio muestra valores entre 0.0001 a 1 mD, observándose baja a muy baja permeabilidad en el yacimiento Punta Senillosa. La exploración de la sección inferior de la Fm. Los Molles y del Gr. Precuyo en el Área Los Bastos resultó productiva de gas y condensado en pozos de los yacimientos Puesto Dinamarca (PD.xp-1 y PD.xp-2), Las Chivas (LCh.xp-2, LCh-1003 y LCh-1005) y Punta Senillosa (PS.xp-1005).

METODOLOGÍA

La inversión sísmica realizada fue de tipo simultánea pre-apilado con el fin de obtener cubos de impedancia acústica (Z_p) y elástica (Z_s) aprovechando el dato en todo su rango de offset disponible. Se basó en un modelo inicial de tierra, donde un modelo geológico es modificado iterativamente hasta encontrar el mejor ajuste con la respuesta sísmica. Dicho modelo inicial estuvo constituido por capas donde las profundidades y los espesores de cada formación fueron guiados por horizontes sísmicos y sus impedancias calculadas con los registros de densidad (ρ) y velocidades compresional (V_p) y de corte (V_s) de cada pozo y extrapoladas al área a invertir. Las relaciones estratigráficas y estructurales del modelo fueron definidas de acuerdo al comportamiento geológico de las formaciones. En la generación de este modelo se aplicó un filtro pasa-bajos con frecuencia de corte en 15 Hz, de manera que los cubos de impedancias y el cubo de relación V_p/V_s creados a partir del mismo contemplan el rango de bajas frecuencias (0-15 Hz) no contenido en el espectro de la sísmica. De acuerdo al objetivo del estudio, la inversión estuvo focalizada en una ventana temporal determinada por los topes de la formación Los Molles y del Gr. Precuyo y los horizontes asociados a las interpretaciones de las mismas (Fig 3). Se obtuvieron cubos de Z_p , Z_s y relación V_p/V_s , con los cuales se calcularon posteriormente otros atributos mecánicos como son relación de Poisson, $\lambda\rho$ y $\mu\rho$.

Análisis de factibilidad

Previo a efectuar la inversión se realizó un análisis de factibilidad de identificación y caracterización del reservorio Molles Basal en función de sus valores de impedancias a nivel de pozo. Para tal fin se utilizaron los perfiles registrados en los mismos y se construyeron distintos cross-plots que permitieron encontrar una relación entre las propiedades elásticas y petrofísicas. En este trabajo se asume que la presencia del reservorio en Molles Basal está condicionada a los cambios laterales de porosidad que sufra la sección. El análisis se realizó para cada uno de los pozos en el intervalo comprendido entre el tope de la Fm. Los Molles y el tope del Gr. Precuyo, con mayor énfasis en el intervalo identificado como Molles Basal por ser el objetivo principal de

este estudio. Se confeccionaron las curvas de Z_p y Z_s con los perfiles de densidad y sónico P y S previamente editados y corregidos mediante física de rocas, como se explicará más adelante.

En primer lugar se observó una buena diferenciación de las distintas formaciones de la sección del intervalo según rangos de impedancias, como se puede ver, por ejemplo, en el gráfico cruzado de Z_p vs Z_s de la figura 4 realizada con los perfiles del pozo LCh-1003. Las impedancias más altas se asocian muy bien con las calizas que se hallan generalmente al tope de Molles Basal (color rojo) ratificadas por altos valores de resistividad y bajos valores de GR. En el rango de las impedancias más bajas se localizan mayoritariamente las pelitas de la sección inferior de la Fm. Los Molles (color verde) donde, a su vez, se separan hacia la izquierda del gráfico las margas pertenecientes a la sección orgánica (color verde oliva). La sección Molles Basal se localiza hacia el centro del gráfico, donde los valores sombreados en violeta corresponden al intervalo de reservorio propiamente dicho, manifestado con altos valores de resistividad. El resto de las muestras, en color tono azul, corresponden a arenas y otras litologías sin calidad de reservorio.

Por otro lado, se efectuó el mismo cross-plot de impedancias en función del perfil de porosidad sólo para el intervalo comprendido entre el tope de Molles Basal y el tope del Gr. Precuyo, como se muestra para el pozo LCh-1003 en el gráfico A de la figura 5. En el mismo se observa la relación inversamente proporcional que existe entre la porosidad y los valores de impedancia acústica. A su vez, se pudieron identificar diferentes intervalos según rangos de impedancia, independientemente de los de valores de impedancia S, como se muestra en distintos colores en el gráfico B de la misma figura y su correspondiente cross-section en las curvas del gráfico C. De esta manera se puede visualizar que al interior de Molles Basal la sección identificada como reservorio coincide con las

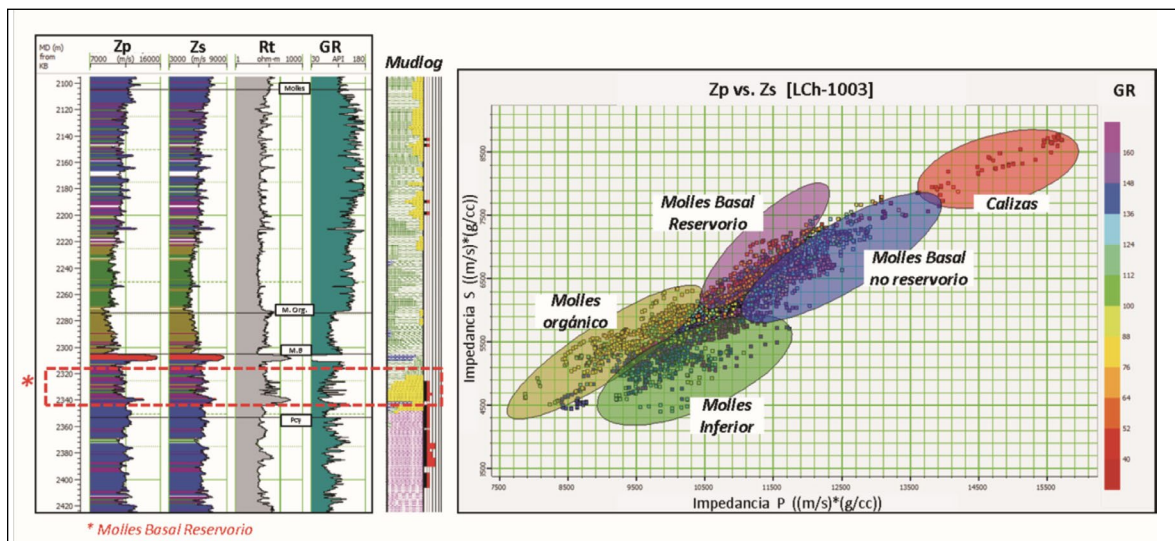


Figura 4. Crossplot de Impedancia P vs. Impedancia S para el pozo LCh-1003 en el intervalo Los Molles – Precuyo. A la izquierda, las curvas de impedancias junto con los perfiles de resistividad (Rt) y Gamma-Ray (GR) y el mudlog del pozo. Los intervalos marcados con distintos colores en las curvas corresponden a las zonas sombreadas en el gráfico cruzado. Se observa la concordancia de los diferentes rangos de valores de impedancia con los cambios litológicos y las unidades estratigráficas. Notar cómo la sección reservorio de Molles Basal (color violeta) se ubica en valores de impedancia P relativamente más bajos que las rocas circundantes (colores rojo y azul).

mayores porosidades y con menores impedancias acústicas (rectángulo verde), separándose de la no reservorio en azul y de las calizas, de mayor impedancia y menor porosidad, en rojo. Además, se calculó el perfil de impedancia acústica filtrado en 80 Hz de frecuencia para corroborar que este comportamiento se mantiene y se detecta en el rango de frecuencias contenidas en la sísmica (figura 3 C). Independientemente que a nivel del objetivo se logre establecer los cambios de porosidad asociados a cambios en impedancia P, se decidió correr una inversión pre-apilado para obtener una impedancia P de mejor calidad que la que ofrece una inversión post-apilado.

El análisis de estos gráficos no sólo permitió aseverar la factibilidad de distinguir las areniscas reservorio de las otras litologías en función de sus impedancias y de obtener una relación directa entre las mismas y la porosidad, sino que además ayudó a guiar la edición y corrección de las curvas (Fig. 7).

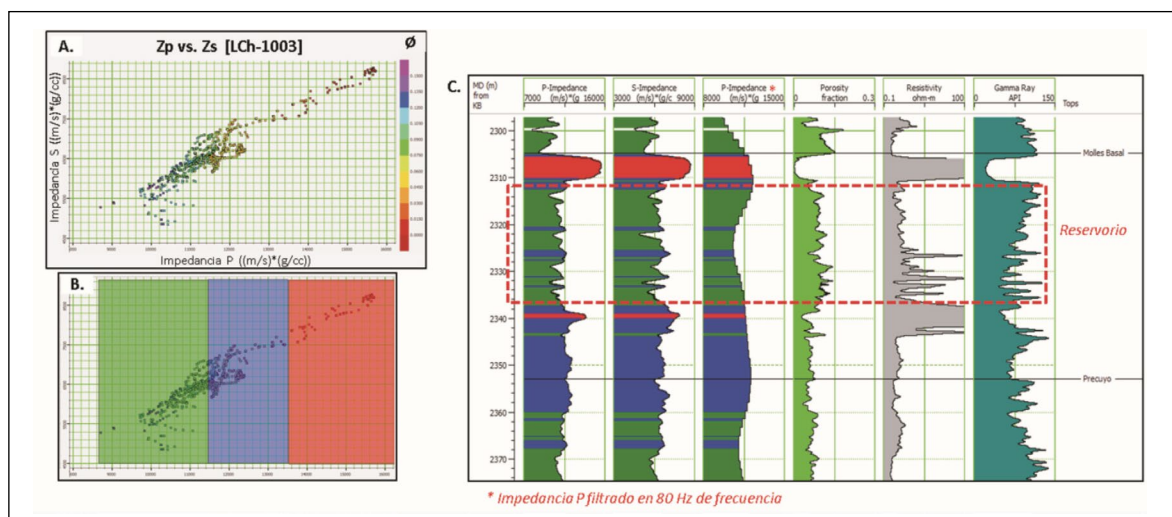


Figura 5. A) Crossplot de Impedancia P vs. Impedancia S para el pozo LCh-1003 en el intervalo Molles Basal – Precuyo en función del perfil de porosidad. Como es de esperarse, a mayores valores de porosidad, las impedancias disminuyen. En B) se diferencian distintos rangos, mostrando cómo la sección reservorio se identifica bien con los valores de impedancia acústica menores dentro de este intervalo de estudio, independientemente de la impedancia S. C) Cross-section correspondiente a B en función de los perfiles de impedancias, porosidad, resistividad y Gamma-Ray. La tercera columna corresponde al perfil de impedancia acústica filtrado en 80 Hz de frecuencia.

DATOS DE ENTRADA

La inversión se realizó sobre cdp-gathers con migración en tiempo pre-apilado (PSTM-gathers) sin filtros ni ganancias, pertenecientes al cubo sísmico del área Los Bastos adquirido en el año 2000 y reprocesado en 2015. El área de inversión corresponde al polígono remarcado en la Figura 2. El procedimiento de inversión se llevó a cabo con el software Hampson-Russell (CGG GeoSoftware).

Los horizontes sísmicos que guiaron el proceso fueron el tope de la Fm. Quintuco, la base de la Fm. Vaca Muerta, el tope de la Fm. Los Molles y un nivel interno de esta última formación asociado a su parte orgánica, al cual denominados “Molles orgánico”.

De todos los pozos existentes dentro del área de interés, al momento de realización del trabajo pudieron ser utilizados sólo tres por ser los únicos con registros de sónico dipolar y perfil de densidad de buena calidad completos hasta la profundidad del objetivo. Estos pozos son LCh.xp-1, LCh-1003 y PS.xp-1005 (Fig. 2).

PROCESAMIENTO

Los elementos más importantes en una inversión sísmica son el acondicionamiento de los datos para la minimización del ruido (preservando amplitudes relativas), la cuidadosa determinación de la ondícula y la buena correlación de los pozos. La amplitud sísmica del dato de entrada es, junto con la resolución vertical y horizontal, uno de los factores de mayor influencia en el resultado final de una inversión sísmica. Por consiguiente, el procedimiento inició con el acondicionamiento de los gathers con el fin de mejorar las amplitudes atenuando el ruido aleatorio y las posibles reflexiones múltiples de largo período, incrementando así la relación señal-ruido en la zona de interés. Para ello se empleó un filtro basado en la transformada Radón (Radon, 1917) de tipo parabólica que lleva el dato a un dominio en el que el move-out (Δt) representa la curvatura de la parábola y corresponde a la diferencia de tiempo entre un offset lejano y el offset cero. El conjunto de parábolas elegido cubre el rango de move-out donde se asume que se encuentra el dato, incluyendo primarias y múltiples. En este trabajo el filtro fue aplicado para datos previamente corregidos por NMO (Normal Move-Out), por lo que fue esperable que eventos primarios tengan Δt iguales o cercanos a cero, mientras que reflexiones múltiples tengan Δt positivos. Los mejores resultados se obtuvieron considerando un total de 50 parábolas y un rango total de Δt igual a 40 ms, compuesto por un intervalo positivo de 20 ms y otro negativo de -20 ms para considerar posible NMO residual en el dato original. Por otro lado, se definió una relación señal/ruido de 0.1, indicando que al menos habrá un 10 % de ruido en el resultado final. Se utilizaron offset máximo igual a 3.540 m y frecuencia máxima de 100 Hz (Fig. 6).

A posteriori se aplicó el modelo de velocidades interválicas obtenidas del cubo de velocidad PSTM para estimar corredores de ángulo de incidencia y apilar los gathers por ángulo de incidencia parciales y a su vez separarlos en cercanos (0 a 10°), medianos (10 a 20°), lejanos (20 a 30°) y ultra lejanos (30 a 40°). Previamente, se validaron estas velocidades a partir del buen ajuste con las velocidades interválicas derivadas de los registros sónicos de los pozos. El máximo ángulo de incidencia considerado en el apilamiento se determinó como el ángulo hasta el cual se conserva energía considerable en las reflexiones a la profundidad del objetivo (Fig. 6).

Simultáneamente al acondicionamiento de la sísmica se confeccionaron los mapas estructurales en tiempo de las interpretaciones sísmicas asociadas a los niveles de la columna estratigráfica que servirían de dato de entrada para la inversión (Fig. 2).

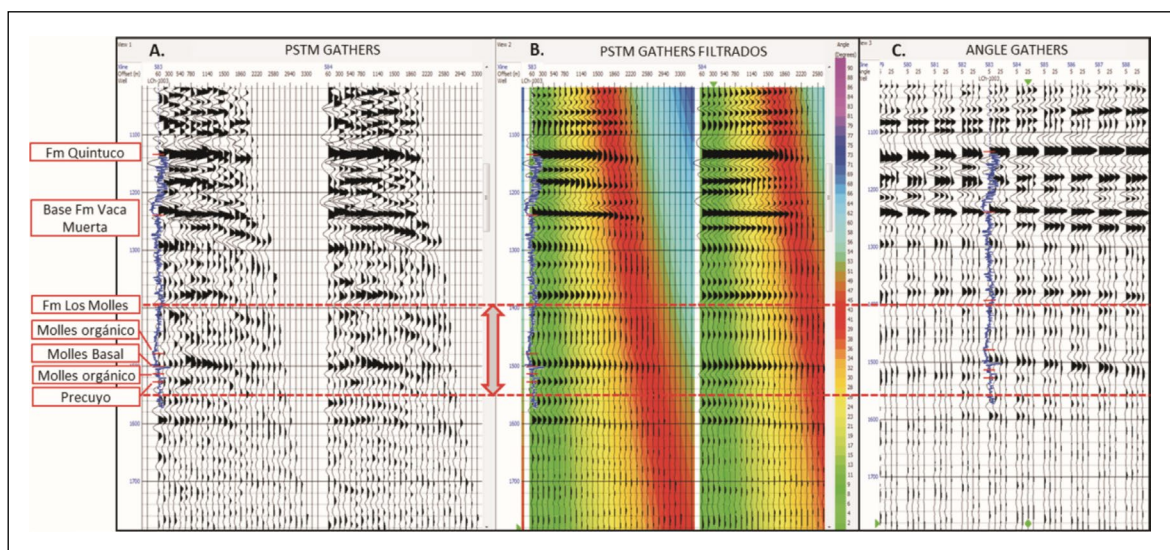


Figura 6. Etapas del acondicionamiento del dato sísmico previo a la inversión. Los gathers corresponden a la IL 550 en la posición del pozo LCh-1003. Entre líneas punteadas se encuentra la zona de interés del estudio, que se extiende desde el tope de Fm. Los Molles a poco más del tope de Gr. Precuyo. En azul, la curva de impedancia acústica del pozo. En líneas rojas sobre el pozo, los pases geológicos de los principales niveles de referencia. A) PSTM gathers originales ordenados por CDP, sin filtros ni ganancias. B) PSTM gathers con filtro transformada Radón aplicado, coloreado por ángulo de incidencia de 0° a 90° . Se incrementó la relación señal-ruido de las reflexiones primarias y los eventos en general se ven más horizontalizados. Nótese que a profundidad de los objetivos, el máximo ángulo para el cual se tiene señal es de aproximadamente 40° a 45° . C) Angle gathers luego del apilamiento parcial en 4 grupos.

El amarre de los pozos a la sísmica se realizó con leyes de velocidad derivadas de la cross-correlación de los gathers con sismogramas sintéticos. Los mismos fueron generados a partir de los registros sónicos y de densidad utilizando ondículas estadísticas de 200 ms de longitud, de fase cero, extraídas de las trazas sísmicas en la posición de cada uno de los pozos.

El amarre resultó muy bueno en toda la sección en la zona del yacimiento Las Chivas y buena en la sección Cuyano Inferior en la zona de Punta Senillosa, como se puede observar en las secciones sísmicas que muestran los resultados finales. Para ilustrarlo en detalle, en la Figura 7 se muestra el sismograma sintético generado para el pozo LCh-1003, junto con la cross-correlación con las trazas reales que muestran un coeficiente de 0.73. También se muestran en esta imagen los sismogramas sintéticos de los tres pozos utilizados en la inversión sobre la línea sísmica arbitraria A, donde se aprecia el buen amarre mencionado.

Los registros de los pozos elegidos para la inversión poseen buena calidad, dado que corresponden a perfiles obtenidos open-hole, completos y calibrados en toda la sección de interés. Sin embargo, fue necesario someterlos a ediciones para optimizar los resultados, principalmente en los intervalos en los que las condiciones de caliper no son las deseables. Para ello se recurrió a relaciones empíricas calculadas independientemente para cada litología (arenisca, arcilla y carbonatos principalmente), y para cada intervalo rocoso, las que luego fueron ponderadas mediante la curva de definición de litología (perfil volumétrico de proporción de arcilla). Las principales relaciones empíricas utilizadas fueron: adaptaciones de Faust (1953) para ediciones

puntuales del sísmico compresional; Castagna (1993) para ediciones de densidad a partir del sísmico compresional; y Greenberg y Castagna (1992) para ediciones del sísmico de corte a partir del sísmico compresional. Finalmente, los perfiles corregidos no fueron muy distintos a los originales, principalmente en la sección inferior de Gr. Cuyo, pero ayudaron a una optimización de los resultados y una correcta estimación de ondículas (Fig. 8).

Se graficaron los datos de todos los pozos superpuestos para evaluar la posible dispersión existente entre los rangos de valores debida a las distintas técnicas de perfilaje o a condiciones

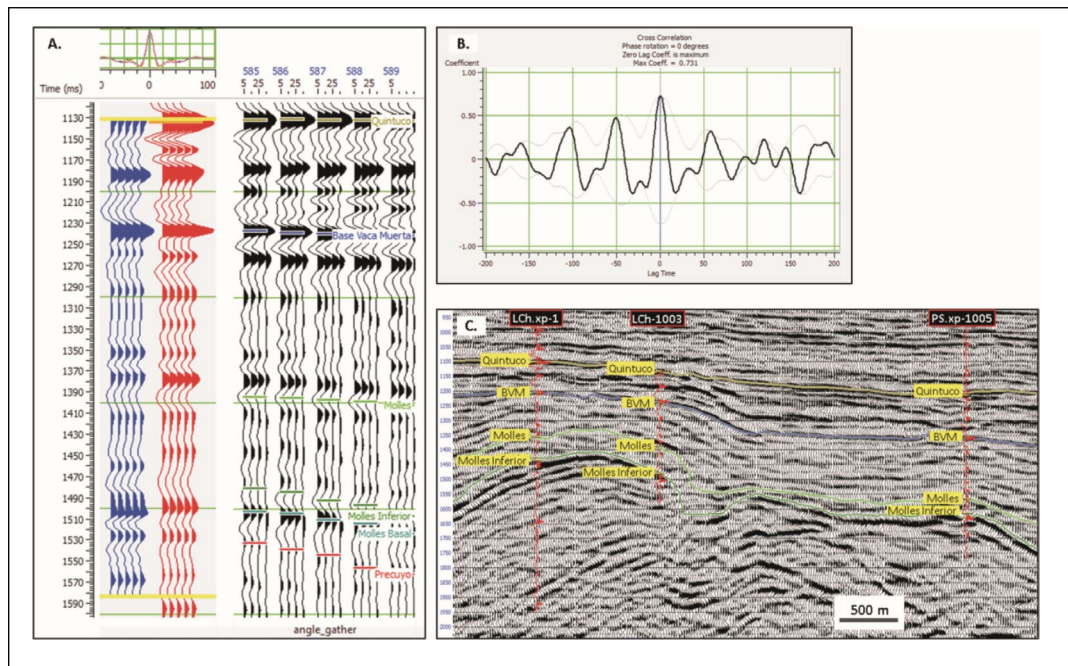


Figura 7. A) Ajuste del pozo LCh-1003 en profundidad a partir de la generación de un sísmograma sintético y su cross-correlación con las trazas sísmicas reales. B) El buen amarre se cuantifica mediante el coeficiente de correlación de 0.73 obtenido. C) En rojo, sísmogramas sintéticos generados en los tres pozos utilizados en la inversión. La línea sísmica corresponde a la arbitraria «A».

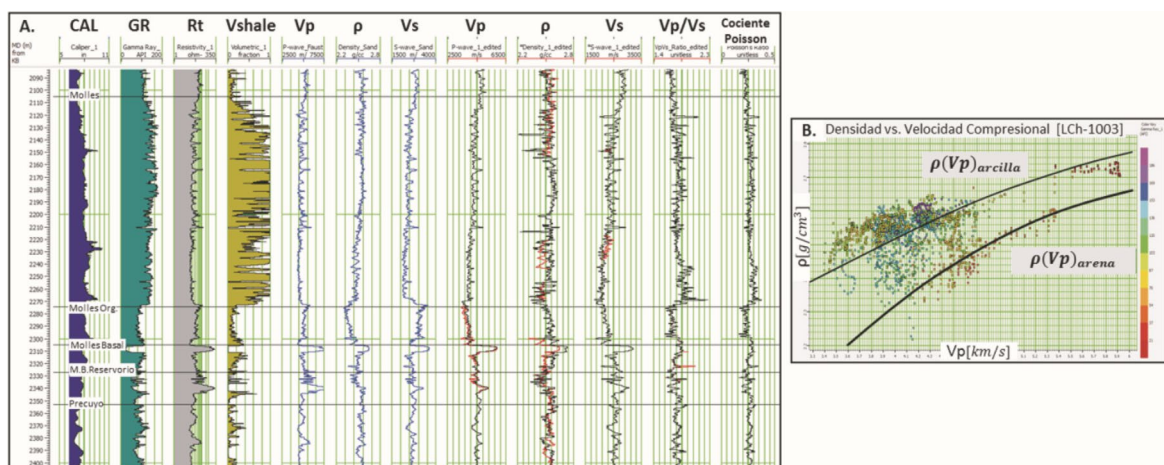


Figura 8. A) Perfiles del pozo LCh-1003. En negro, las curvas originales y en rojo las editadas. En azul, las curvas calculadas a partir de las relaciones empíricas de Faust, Castagna y Greenberg-Castagna. B) Gráfico cruzado de ρ en función de V_p con los registros de LCh-1003 y ajuste de las curvas empíricas para los casos de arcilla y arena.

ambientales de registración diferentes. A raíz de esta observación fue necesario normalizar el pozo LCh.xp-1 según LCh-1003.

El modelo inicial de tierra fue construido con las impedancias calculadas en los pozos, a partir de los registros editados, y extrapoladas a través del cubo mediante las superficies de los horizontes seleccionados. No se utilizó el tope de Gr. Precuyo para no condicionar el modelo a una interpretación a la cual le faltan puntos de control. El método de interpolación de datos aplicado entre los pozos fue Inverse Distance Power con una potencia de 2. En cuanto a la extrapolación de los datos en los rangos en donde los perfiles no tienen cobertura se utilizaron tendencias obtenidas de los perfiles de todos los pozos mediante un ajuste por mínimos cuadrados, de manera que el resultado contemple efectos de compactación y tenga cierta consistencia geológica.

Las relaciones estratigráficas que se definieron para el modelo fueron las siguientes: tope de Fm. Quintuco en relación de base lap con las unidades suprayacentes y concordante con los niveles subyacentes hasta la base de Fm. Vaca Muerta; tope de Fm. Los Molles en relación de top lap respecto de la base de Fm. Vaca Muerta y concordante hasta tope de Molles.

En la figura 9 se observa una sección de impedancia acústica modelada sobre una línea arbitraria cuya trayectoria pasa por los tres pozos utilizados en el modelo. Los pozos se muestran con el rango de color según las impedancias obtenidas. Se observa la variación existente entre los valores de impedancia desde la zona de Las Chivas hasta Punta Senillosa, ratificando la variabilidad geológica del área. El control de calidad del modelo consistió en examinar secciones verticales y

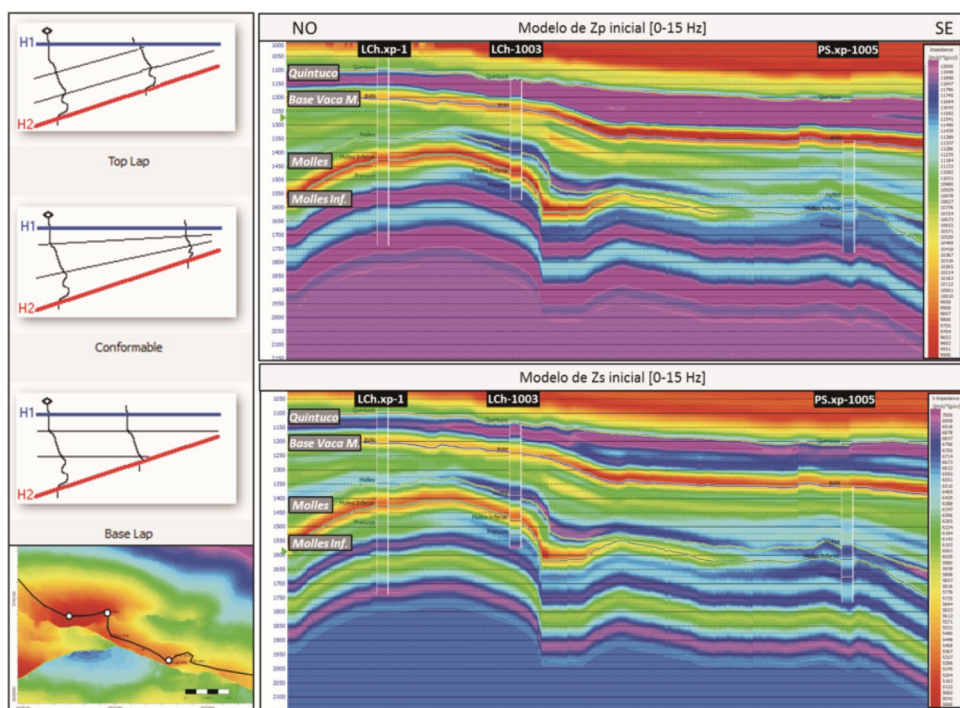


Figura 9. Modelo de impedancias P y S inicial con el contenido de baja frecuencia, sobre la línea arbitraria «A». A la izquierda, las descripciones de las relaciones estratigráficas utilizadas en la confección del modelo. En el margen izquierdo inferior, la ubicación en el mapa de la línea arbitraria.

time slices en la zona de interés para asegurar que no se generaran “bull eyes” o artefactos propios del proceso de interpolación y extrapolación de los datos.

Otro de los elementos clave en una inversión sísmica es el juego de ondículas con el que se realiza la deconvolución de las trazas. Por tratarse de una inversión prestack, se consideró un set de 4 ondículas según los rangos en que fueron apilados los gathers: 0° - 10° , 10° - 20° , 20° - 30° y 30° - 40° (Fig. 10). El software utilizado en este trabajo asume una ondícula constante tanto en tiempo como en espacio, que a los fines de este trabajo es aceptable, dado que la inversión está focalizada en una ventana temporal de 100 ms como máximo. Tomando la posición del pozo LCh-1003 como la zona de mejor reflectividad dentro del área a invertir, se extrajo un set de ondículas de forma estadística, de fase cero. Se definió una longitud de 200 ms y se utilizó la polaridad sísmica definida normal. La ventana temporal de la que se sustrajo contempló el rango en el que se encuentran los objetivos del Cuyano Inferior. Para la posición del pozo LCh-1003 la ventana abarcó desde 1280 a 1600 ms. Como se observa en la figura 10, las 4 ondículas concentran la mayor parte de la energía del espectro de amplitud (amplitudes mayores a 0.5) entre las frecuencias 10 a 45 Hz, aproximadamente, con picos alrededor de los 12 Hz y 28 Hz, lo cual indica que la frecuencia de las trazas sísmicas a la profundidad del objetivo en esa zona es relativamente baja. La forma de la ondícula es aceptable dado que no posee excesivos lóbulos laterales y la amplitud de los mismos es pequeña en relación al lóbulo principal.

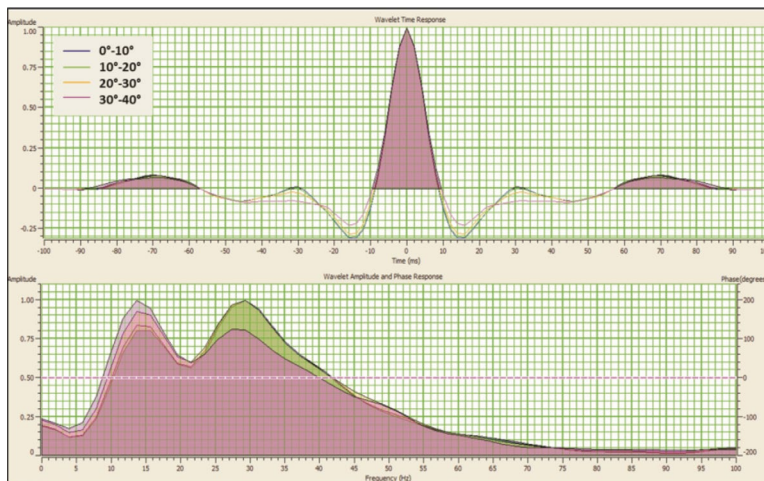


Figura 10. Set de 4 ondículas estadísticas de fase cero, extraídas de las trazas sísmicas en la posición del pozo LCh-1003, con la que se realizó el proceso de inversión.

Finalmente se definieron los parámetros de inversión previo a invertir el volumen sísmico. En el análisis se ajustaron los valores de las relaciones empíricas que definen los trenes de impedancia y densidad del intervalo de interés a invertir, el escalar de amplitud de acuerdo a la reflectividad de la sísmica y el método y los coeficientes de regularización, entre otros, buscando minimizar el error entre las curvas de velocidad y densidad sintéticas y las reales del pozo. La Fig. 11 ejemplifica el error obtenido entre las curvas sintéticas y las reales para el pozo LCh.xp-1 según los parámetros seleccionados, donde se obtuvo una correlación de 0.98.

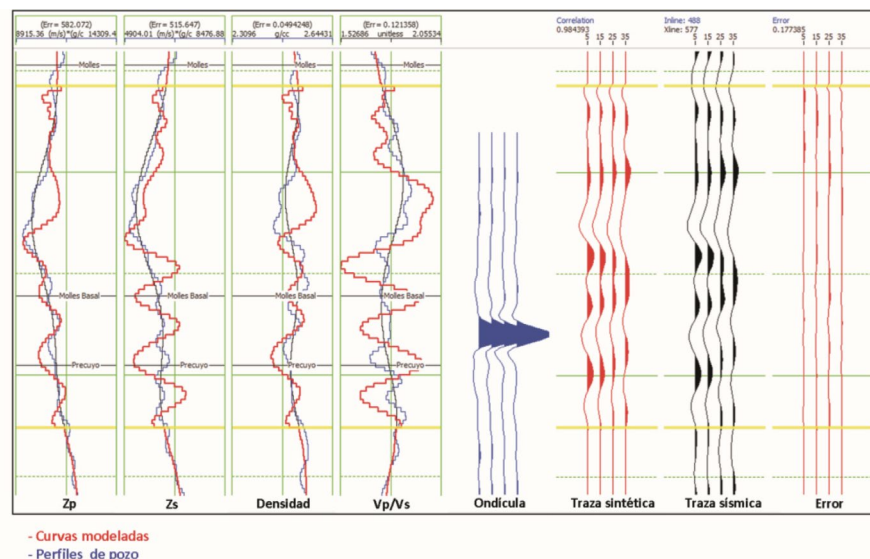


Figura 11. Curvas de impedancias P y S sintéticas generadas a partir del modelo y de los parámetros de inversión elegidos en el análisis (curvas rojas). Se muestra la correlación con las curvas reales (azules) y el error entre ellas. El modelo deriva también una curva de densidad aunque ésta no sea un producto final de la inversión buscado. Se muestran las trazas sintéticas generadas con el modelo y su correlación con la sísmica real, arrojando para el caso específico de este pozo, un error de 0.18.

RESULTADOS

La inversión sísmica generó cubos de impedancias acústica (Z_p) y elástica (Z_s) y un cubo de relación V_p/V_s en forma simultánea que tuvieron un buen ajuste con los pozos empleados. A partir de los volúmenes de Z_p y Z_s se obtuvieron cubos de $\lambda\rho$, $\mu\rho$ y relación de Poisson.

El control de calidad consistió en la comparación de las impedancias obtenidas por la inversión con las calculadas en los pozos a partir de sus registros, filtrados al ancho de banda de la sísmica mediante la aplicación de un filtro pasa-banda con frecuencias de corte inferior en 15 Hz y superior en 80 Hz. A su vez, se utilizó el pozo PS-1001 como testigo para la evaluación del modelo, obteniendo un muy buen ajuste. En la figura 12 se muestra una sección del volumen Z_p invertido, filtrado al rango de frecuencias sísmico sobre la misma línea arbitraria de la figura 3. Se puede observar el gran ajuste logrado con los pozos LCh.xp-1, LCh-1003 y PS.xp-1005 utilizados en el modelo y corroborado con el pozo PS.xp-1001. Del mismo modo se muestran los resultados del volumen Z_s invertido en la figura 13.

Un resultado importante del estudio fue el perfeccionamiento del amarre de los pozos a la sísmica pudiendo identificar con mayor precisión los horizontes sísmicos asociados a los principales niveles estratigráficos. Consecuentemente se obtuvieron re-interpretaciones de Molles Basal y Gr. Precuyo y la interpretación del nivel asociado al reservorio de Molles Basal.

Los productos de esta inversión sísmica se han utilizado para la creación de mapas de impedancia acústica y mapas de atributos sísmicos, con los cuales se visualizó la distribución lateral de las propiedades asociadas al nivel Molles Basal. La información aportada por la inversión de las trazas sísmicas permitió identificar, en primer lugar, los niveles correspondientes al intervalo Molles Basal, el cual se distingue fuertemente de las bajas impedancias del Molles orgánico que lo suprayace y de las relativas altas impedancias del Gr. Precuyo en el límite inferior.

Dentro de estos niveles se logró distinguir el reservorio asociado a anomalías de bajas impedancias P relativas, resultado afín a lo observado en los gráficos cruzados. Estos valores de impedancia son asociados a una relativa alta porosidad efectiva. La distribución de estas anomalías en secciones sugirió la variabilidad lateral de la calidad petrofísica del reservorio. El mapa de la figura 14 contiene los valores mínimos de impedancia acústica extraída dentro de una ventana de estudio de aproximadamente 40 ms entre los horizontes sísmicos correspondientes al tope del reservorio Molles Basal y el Gr. Precuyo. El área de extracción está limitada al tren estructural Las Chivas - Punta Senillosa paralela a las principales fallas de rumbo NO-SE por ser la zona de interés al momento de realización del trabajo. Las anomalías de baja impedancia fueron asociadas a zonas donde el reservorio Molles Basal presenta mayor porosidad y, por lo tanto, mejores condiciones petrofísicas. Estos resultados tuvieron un gran ajuste con el reservorio de gas comprobado en el Yacimiento Las Chivas en los pozos LCh.xp-1, LCh.xp-2 y LCh-1005 y en el Yacimiento Punta Senillosa mediante el pozo PS.xp-1005. El pozo PS.xp-1001 mostró buenas propiedades petrofísicas para el nivel reservorio pero no pudo ser comprobado debido a que no fue ensayado. El modelo se puso a prueba con la perforación de dos pozos posteriores a la realización de este estudio: el pozo de desarrollo PS-1015, localizado sobre una anomalía de baja impedancia, y el pozo exploratorio PS.x-1018, cuyas coordenadas de fondo se ajustaron a partir de este trabajo. Las impedancias calculadas con los registros de ambos pozos ajustaron muy bien con las invertidas en este trabajo como se muestra en las figuras 12 y 13, lo que constituye otro indicador de robustez de los resultados. Ambos pozos comprobaron gas y petróleo del reservorio Molles Basal, sustentando la predictibilidad del modelo.

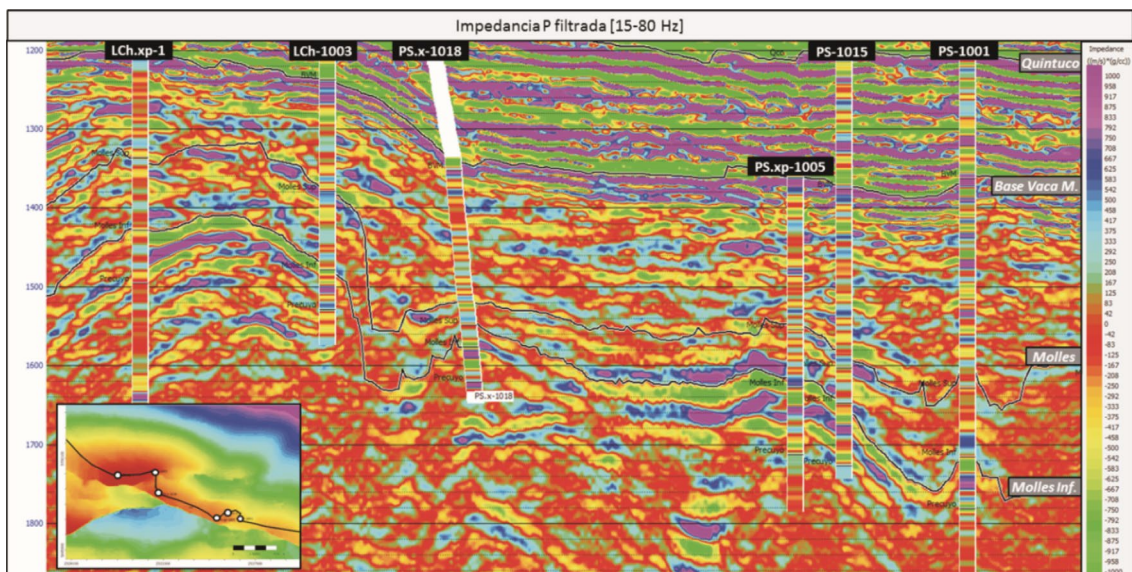


Figura 12. Impedancia acústica invertida de las trazas sísmicas sobre la línea arbitraria «A». Se aplicó un filtro pasabanda para mostrar sólo el rango espectral del dato sísmico. Para cada pozo se muestran las impedancias obtenidas a partir de los perfiles. Se observa un buen ajuste entre los datos y la inversión, tanto para los pozos utilizados en el modelo como para el pozo testigo (PS.xp-1001) y los pozos perforados posteriormente a este trabajo (PS-1015 y PS.x-1018).

A partir de la re-interpretación de los horizontes se confeccionaron mapas isopáquicos de la sección inferior de Molles, permitiendo concluir que el acuñaamiento desde Punta Senillosa hacia el Noroeste afecta principalmente a la sección orgánica, preservando el espesor y continuidad de la capa reservorio a lo largo del tren estructural Las Chivas – Punta Senillosa paralelo a la falla, lo cual fue comprobado con el pozo PS.x-1018.

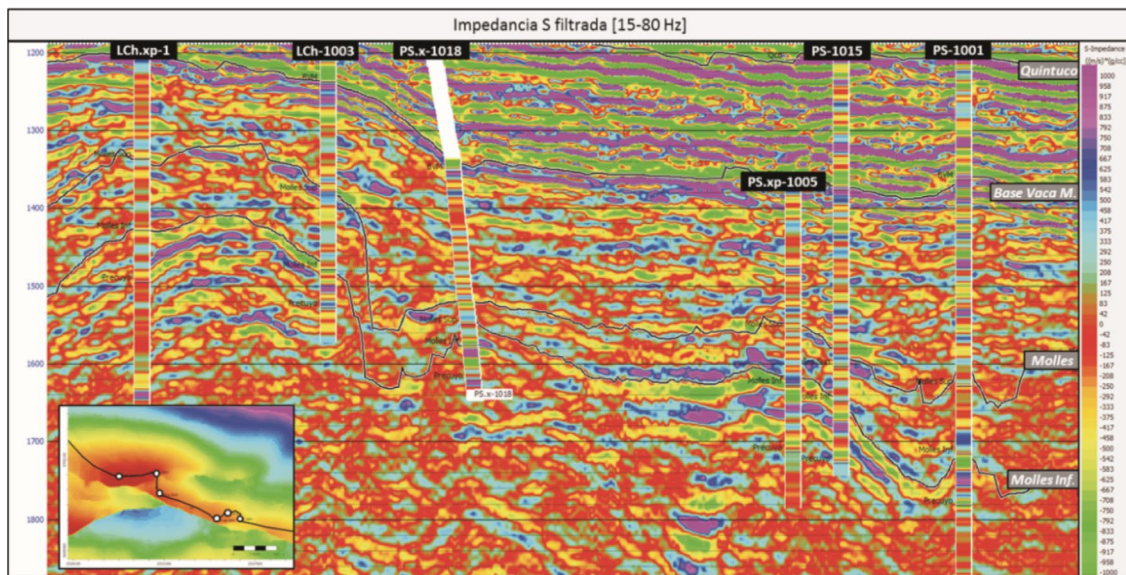


Figura 13. Impedancia S invertida de las trazas sísmicas sobre la línea arbitraria «A». Se aplicó un filtro pasabanda para mostrar sólo el rango espectral del dato sísmico. Para cada pozo se muestran las impedancias obtenidas a partir de los perfiles. Al igual que con la Z_p , se observa un buen ajuste entre los datos y la inversión.

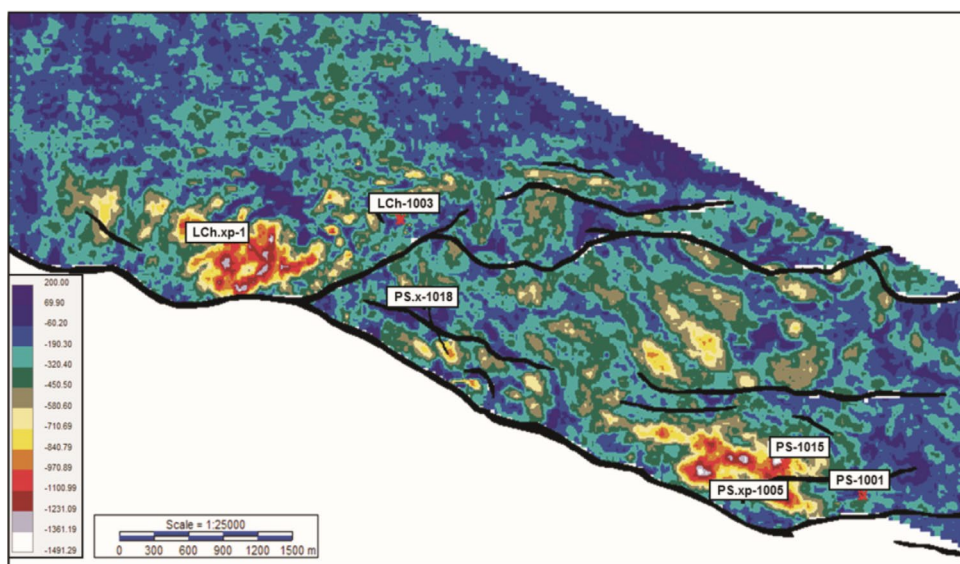


Figura 14. Mapa de valores mínimos de impedancia acústica extraídos del cubo Z_p invertido. Para la extracción se consideró una ventana temporal contenida entre los horizontes sísmicos asociados al reservorio de Molles Basal y el tope de Gr. Precuyo luego de ser ajustado a partir de este estudio. Los colores más cálidos representan valores bajos de impedancia y su distribución en el mapa constituye anomalías que concuerdan muy bien con la ubicación de los yacimientos Las Chivas y Punta Senillosa.

CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

La inversión sísmica prestack resultó exitosa y sus resultados son robustos, evidenciados por el muy buen ajuste con los datos de pozo. Las predicciones obtenidas para el reservorio Molles Basal a partir del análisis de sus resultados se comprobaron con los pozos PS-1015 y PS.x-1018.

Este estudio ayudó a mejorar el amarre entre los pozos y la sísmica y a ajustar la interpretación de los horizontes sísmicos asociados tanto al tope como al reservorio de Molles Basal y al Precuyo, mejorando el entendimiento de la estructura sísmica de la columna estratigráfica. Permitió además disponer de mapas de distribución de impedancias en el intervalo de interés, favoreciendo una mejor identificación y caracterización del reservorio. Se asociaron las zonas de bajos valores relativos de impedancia acústica a mayores porosidades, y por lo tanto, a tener mejores probabilidades de hallar el reservorio de Molles Basal con presencia de hidrocarburos. La inversión sísmica resulta clave para la integración de los distintos tipos de datos que se van obteniendo con el avance de la campaña de desarrollo.

En cuanto a la metodología, el acondicionamiento de las trazas sísmicas y de los registros de pozo contribuyeron a que la respuesta sísmica sea clara. Resultó adecuado no incluir la interpretación del Gr. Precuyo en la generación del modelo de tierra ya que al ser un horizonte que presenta mucha ambigüedad podría haber generado una tendencia incorrecta.

Si bien las mayores conclusiones se obtuvieron del análisis de las impedancias acústicas, la realización de una inversión simultánea permitió obtener un volumen de Z_p más consistente y de mejor calidad.

Debido a la gran complejidad del modelo lito-estratigráfico y estructural en el área, sobretudo en el ámbito de Punta Senillosa, los atributos elásticos resultantes de este estudio no deben ser tomados como únicos indicadores para la identificación de las zonas con presencia de reservorio y deben ser complementados con otras técnicas de estudio. En un ambiente litológicamente tan complejo, donde aún se barajan distintos modelos geológicos, la asociación de los valores relativos de impedancias a una única variable como es la porosidad puede resultar una simplificación riesgosa. Sin embargo, hasta el momento el modelo se ha comprobado exitosamente, validando la inversión sísmica como herramienta geofísica que ayuda a la predictibilidad del reservorio basal de la Fm. Los Molles.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Tecpetrol S. A. por autorizar la publicación del presente trabajo.

REFERENCIAS

- Castagna, J.P., 1993, "AVO analysis-tutorial and review. In offset Dependent Reflectivity. Theory and Practice of AVO Analysis", ed. J.P. Castagna and M. Backus, Investigations in Geophysics, No. 8, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, pp. 3-36.
- Faust, L.Y., 1953, "A velocity Function Including lithologic variation", *Geophys.*, 18, 271-288.
- Greenberg, M.L. y Castagna, J.P., 1992, "Shear-wave velocity estimation in porous rocks: theoretical formulation, preliminary verification and applications", *Geophys. Prospect.*, 40, 195-209.
- Legarreta, L. y Gulisano C.A., 1989, "Análisis estratigráfico secuencial de la Cuenca Neuquina (Triásico superior - Terciario inferior)". En: G.A. Chebli & L.A. Spalletti (eds.), *Cuencas Sedimentarias Argentinas*, 221-243
- Radon, J., 1917, "Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten", *Berichte über die Verhandlungen der Königlich-Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig, Mathematisch-Physische Klasse* (Reports on the proceedings of the Royal Saxonian Academy of Sciences at Leipzig, mathematical and physical section), Leipzig: Teubner, 69, pp. 262-277. Traducción: Radon, J., Parks, P.C., 1986, "On the determination of functions from their integral values along certain manifolds", *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 5 (4), 170-176.
- Silvestro, J. y Zubiri, M., 2008, "Convergencia oblicua: Modelo estructural alternativo para la dorsal neuquina (39° S)-Neuquén", *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 63 (1): 49-64.
- Vergani, G.D., Tankard, A.J., Belotti, H.J. y Welsink, H.J., 1995, "Tectonic evolution and Paleogeography of the Neuquén basin, Argentina." In: A.J. Tankard, R. Suárez & H.J. Welsink (eds.), *Petroleum basins of South America*, AAPG Memoir 62: 383-402.