OPTIMIZACIÓN DE LA DISCRIMINACIÓN DE ARENAS CON MODELOS DE FÍSICA DE ROCA EN SEDIMENTOS POCO CONSOLIDADOS. ANÁLISIS EN YACIMIENTO FLUVIAL DE EDAD TERCIARIA EN LOS LLANOS COLOMBIANOS

Javier Carrero[1], Gustavo Bertorelli[2], Trino Salinas[3], Gabriel Álvarez[4], Juan Tavella[5]

1: jcarrero@geoprocesados.com, 2: gbertorelli@pacificrubiales.com.co
3: tsalinas@pacificrubiales.com.co, 4: galvarez@pacificrubiales.com.co
5: jtavella@geoprocesados.com

Palabras clave: **Física de Rocas, Cuenca Llanos, Arenas poco consolidadas, Petrofísica, Caraterización Sísmica**

ABSTRACT

Sand discrimination optimization with rock physics models of sediments poorly consolidated

The area of study associated to Llanos Basin in Colombia presents great potential related to heavy oil from a fluvial tertiary reservoir. Weak mechanical properties contrast between oil and formation water makes the direct hydrocarbon detection impossible. The experience in the basin shows that clean sands facies with high effective porosity are usually associated with productive zones, due to their flux capabilities for viscous crudes.

Seismic prestack elastic inversion was selected as the methodology for conducting the identification and mapping of good quality sands based on the elastic properties contrast between different lithologies. However, it was hard to find out rock properties capable to discriminate sand from shales, endangering the success of the project. A detailed analysis of available well information allowed to outline an alternate approach based on a) the redefinition of petrophysical evaluation emphasizing on shale volume and effective porosity and b) the regeneration of shear wave velocity logs by means of poorly consolidated siliciclastic rock physics model.

Core analysis revealed the presence of quartzose siltstones that, in terms of mechanical properties, behave as shale but the original petrophysical evaluation based on gamma ray classified them as possible reservoir. The new approach based on density and velocity logs is appropriate for seismic detection due to its sensitivity to mechanical properties.

New relations between modeled elastic parameters and redefined reservoir properties produced enhanced lithology discrimination. It allowed seismic information to successfully predict a good reservoir quality geobody as a guide for field development.

INTRODUCCIÓN

El área de estudio situada en los Llanos colombianos presenta gran potencial para la producción de crudos pesados de propiedades mecánicas similares a las del agua de formación. Esta circunstancia imposibilita la detección en forma directa de hidrocarburos por medio de produc-

tos derivados de la información sísmica (parámetros elásticos). Nace, entonces, la necesidad de identificar las arenas y clasificarlas por su calidad dentro de los niveles de interés del yacimiento fluvial de edad terciaria. La experiencia en la cuenca indica que las facies de arenas limpias con alta porosidad efectiva, debido a su capacidad de flujo para crudos viscosos, suelen estar asociadas a zonas productoras de hidrocarburo.

También es importante destacar que el contacto de agua se presenta en diferentes niveles en varios de los pozos del campo, por lo que será necesario el entendimiento de la distribución de la calidad de reservorio para determinar el comportamiento del contacto debido al componente estratigráfico, además de los componentes estructurales y actividad del acuífero.

Se eligió la inversión sísmica elástica simultánea como base para identificar las arenas, clasificarlas según su calidad y guiar hacia las zonas saturadas con crudo. Para esto se confiaba que los registros medidos servirían para la generación del modelo *a priori* de la inversión sísmica y para el estudio de física de rocas. De esta manera se encontrarían los criterios que permitieran a los productos sísmicos y sus derivados, discriminar arenas de arcillas, y en segundo lugar, clasificar las arenas por su calidad de reservorio. Sin embargo, los primeros intentos en búsqueda de propiedades elásticas aptas para separar arenas de lutitas, no arrojaron resultados satisfactorios. Es de esperar que lutitas y arenas respondan diferenciándose mecánicamente con la compactación; sin embargo, se observó paridad entre las propiedades mecánicas de ambas clases litológicas fundamentales, situación poco lógica de acuerdo a las características litológicas en estudio. De esta manera quedaba seriamente comprometida la capacidad de discriminación, y por ende el éxito del trabajo. El análisis exhaustivo de los cuatro pozos con información completa -con sónico dipolar y análisis mineralógico de núcleo- permitió diseñar una estrategia alternativa basada en dos aspectos: la redefinición de la evaluación petrofísica con énfasis en el índice de volumen de arcilla y porosidad efectiva, y la regeneración de los sónicos de ondas de corte mediante un modelo de física de rocas para sedimentos siliciclásticos poco consolidados.

El estudio detallado del objetivo a través del análisis de núcleo reveló que los niveles de interés en el yacimiento en mucho menor medida, contienen limos cuarzosos que, en términos mecánicos y de reservorio, tienen un comportamiento similar al de la arcilla. Sin embargo, dada la naturaleza cuarzosa de estos limos, el registro *gamma ray* -base de la evaluación original del índice de volumen de arcilla (Vsh)- los clasificó como arenas. El cálculo del índice basado en el comportamiento del sónico compresional y densidad demostró ser el método más apropiado para llevar los limos a la categoría correcta en función de su rol dentro del reservorio. Este método de discriminación litológica basado estrictamente en propiedades mecánicas de la roca aparece, además, muy conveniente para asistir la caracterización sísmica de las arenas del reservorio, dada la sensibilidad de esta última a las propiedades elásticas de la roca.

La generación de nuevas versiones de la velocidad de ondas de corte a través de modelos de física de roca, se justificó en la observación de rasgos morfológicos poco explicables en las versiones medidas en algunos pozos. Se probaron los modelos Xu-White, Porosidad Crítica y

Krief. La selección del modelo a utilizar se hizo en base a comparaciones entre las predicciones de cada modelo y las curvas medidas que eran confiables. Se concluyó que si bien Krief apareció como el de mejor ajuste global en todo el reservorio, Xu-White producía el mejor ajuste en niveles de arena, mientras que el modelo de Porosidad Crítica hacía lo propio en zonas lutíticas y limosas. Se optó por un modelo mixto, Xu-White para arenas y Porosidad Crítica para arcillas, según un *cut-off* de 46% del índice de volumen de arcilla.

El estudio de física de rocas generado a partir de los resultados de la nueva evaluación del índice de volumen de arcilla y las curvas modeladas, proporcionó una separación arena-arcilla clara, prácticamente para todos los parámetros elásticos de la roca, destacándose una discriminación satisfactoria en el gráfico cruzado entre la relación Vp/Vs y la densidad. Las arenas se mostraron asociadas a valores bajos tanto de Vp/Vs como de densidad.

A pesar de la notoria mejoría, los cúmulos asociados a ambas clases litológicas conservaron un grado significativo de superposición en los rangos medios de ambas variables. Por esta razón se implementó una metodología de detección y caracterización de arenas basada en la generación de un geocuerpo multi-zona de calidad de arenas. Se lo definió a partir del *crossplot* en el dominio relación Vp/Vs versus densidad, ambos provenientes de la inversión. Se logró, de esta manera, un volumen de formato sísmico cuyos valores extremos están relacionados a las clases litológicas, y demostró buena correlación con la relación arena-arcilla de la evaluación petrofísica en los pozos. Los mapas, que de este geocuerpo se extraen para la zona del reservorio, son consistentes con la sedimentología de ambiente fluvial, propia de la zona. Los resultados serán utilizados para guiar el paso de la etapa exploratoria a la de desarrollo del yacimiento.

UBICACIÓN DEL ÁREA

Columna estratigráfica. Descripción del objetivo

Los niveles de interés del yacimiento de edad terciaria, constituyen un sistema deposicional fluvial de corrientes trenzadas con episodios de disminución en la energía (corrientes sinuosas), particularmente hacia el tope de los intervalos arenosos. Cooper *et al.* (1995) describe estos niveles como depósitos de planicie costera con influencia marina correlacionables en toda la cuenca de Los Llanos para el Oligoceno. Dentro de este ambiente, los cuerpos tipo barra constituyen los mayores almacenadores del área. Las secuencias de sobre banco–llanura de inundación son los sellos intra formacionales para estos almacenadores. Este sistema fluvial (corrientes trenzadas con periodos de caída en la energía del medio) controló la distribución de la litología (arena, arcilla), tamaño de grano y selección y por ende, tiene influencia sobre el tamaño, calidad y distribución del yacimiento y las barreras de permeabilidad. En la descripción de núcleos se observan facies de

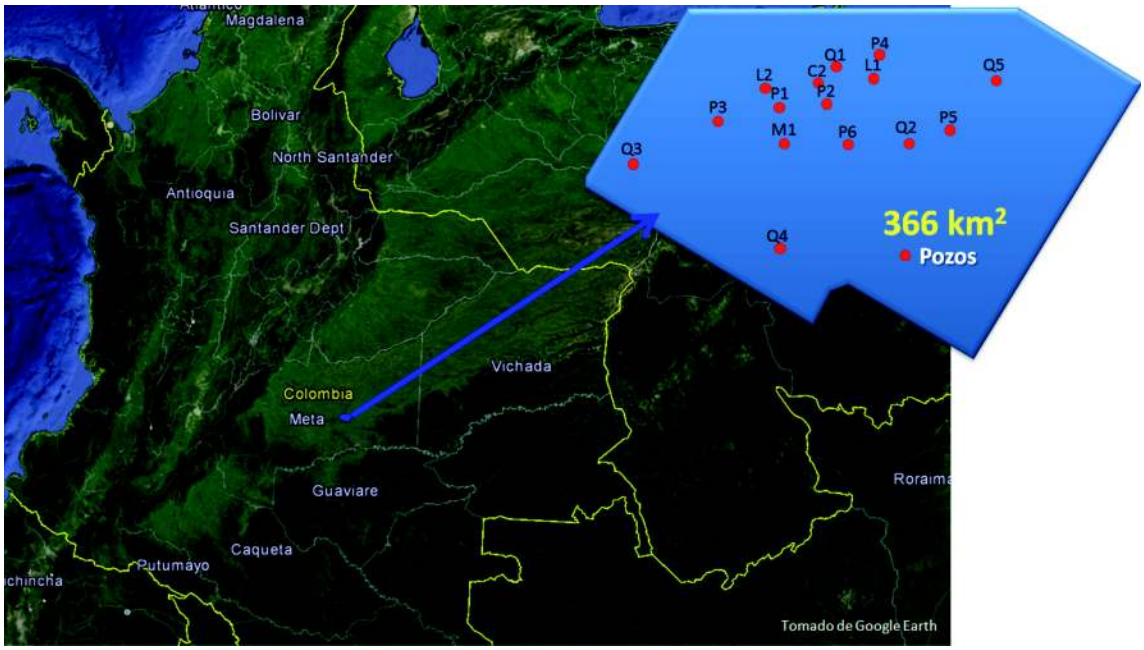


Figura 1. La información sísmica 3D de 366 km² está ubicada en el departamento del Meta, en los llanos colombianos.

cuarzoarenitas almacenadoras (algunas de ellas con buena impregnación de petróleo) y de lodolitas tipo sello. De acuerdo a las correlaciones de pozo, estos depósitos generalmente se organizan entre canales, segmentos de sobre banco y llanuras de inundación.

Los canales caen dentro de un amplio cinturón de corrientes principales dominado por una compleja distribución de canales activos y abandonados los cuales son difíciles de seguir de manera individual. Estos canales contienen facies finas de abandono de canal lo cual restringe su continuidad, pero puede formar yacimientos aislados; o ser relativamente libres de migrar lateralmente, desarrollando depósitos de acreción lateral asociados. Estas areniscas con limitada continuidad lateral podrían calificar como *pay* (yacimientos aislados). Las areniscas de interés corresponden a un yacimiento heterogéneo (cuerpos de arena discontinuos y probablemente aislados). Esta variabilidad influencia enormemente la exploración y el posible desempeño del campo, determinando la necesidad de tener bien delineado la calidad y continuidad de las capas en subsuelo.

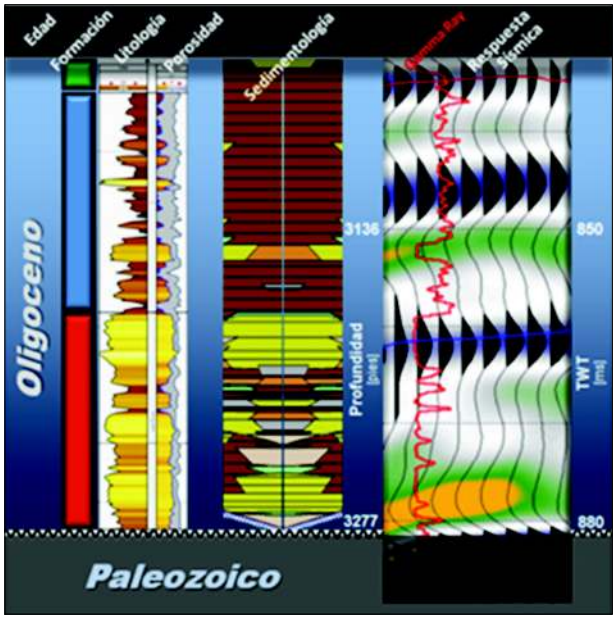


Figura 2. Descripción estratigráfica del yacimiento.

Será clave integrar la sísmica 3D, el análisis

sedimentológico y la evaluación petrofísica. La sísmica 3D deberá colaborar en la extracción de geocuerpos asociados a la presencia de arena validada por los pozos. De esta manera deberán corroborarse la dirección preferencial de los canales y lo interpretado en las secciones de pozo. La Figura 2 ilustra la descripción del objetivo, así como su profundidad y tiempo doble de su expresión sísmica.

Flujo de Trabajo

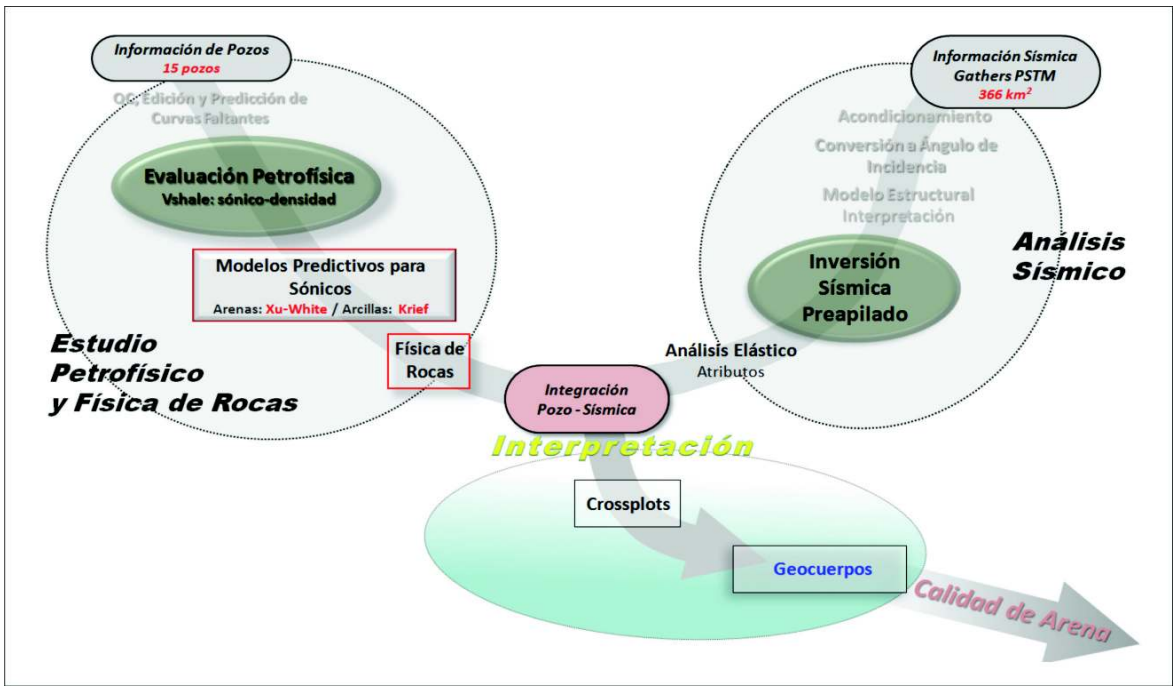


Figura 3. Esquema del flujo de trabajo.

Evaluación de Formaciones: Petrofísica vs. Física de Rocas

El análisis litológico a partir de los registros de pozo se realiza a partir de múltiples metodologías con diferentes principios, bien sea a partir de la respuesta a la mineralogía, permeabilidad eléctrica, textura de la roca (porosidad) o comportamiento mecánico. Para el inicio de este estudio se contaba con un estudio petrofísico calibrado con análisis mineralógico de núcleo pero que no tenía una correlación clara con los parámetros elásticos analizados para la inversión sísmica.

En el análisis preliminar de los cuatro pozos que contaban con registros sónico dipolar, se reconoció que el pozo P-1 presentaba un sónico de corte con poca variación entre los intervalos arenosos y los arcillosos (ver Figura 4). De acuerdo al diferencial de respuesta a la compactación entre las areniscas y las lutitas debido a la forma y tamaño de los poros, se espera poder reconocer distintas tendencias para ambas litologías al correlacionar los parámetros elásticos. Se calcularon

los parámetros elásticos (Impedancia P, Impedancia S, densidad, relación Vp/Vs, Lambda-Rho, Mu-Rho, relación de Poisson, Módulo de Young) y al correlacionarlos, ambas litologías mostraban similares tendencias. Este problema permitió plantearse tres hipótesis:

1.- *Problemas con el cálculo del índice de volumen de arcilla:* Fue calculado a partir del registro *gamma ray* en intervalos con presencias de Caolinitas e Illitas, minerales de arcilla con diferentes rangos de radioactividad.

2.- Problemas con algunos de los sónicos de corte que no mostraban mucha variación entre ambas litologías.

3.- La combinación de las dos anteriores.

Para analizar que tanto afecta la diferencia de minerales a los registros y a los cálculos provenientes de ellos, se procedió a realizar una evaluación petrofísica multimineral que toma en cuenta la diversidad de rangos de valores en la respuesta de cada mineral en cada registro. Esta evaluación fue guiada con el análisis de difracción de rayos X (XRD) realizado a los núcleos.

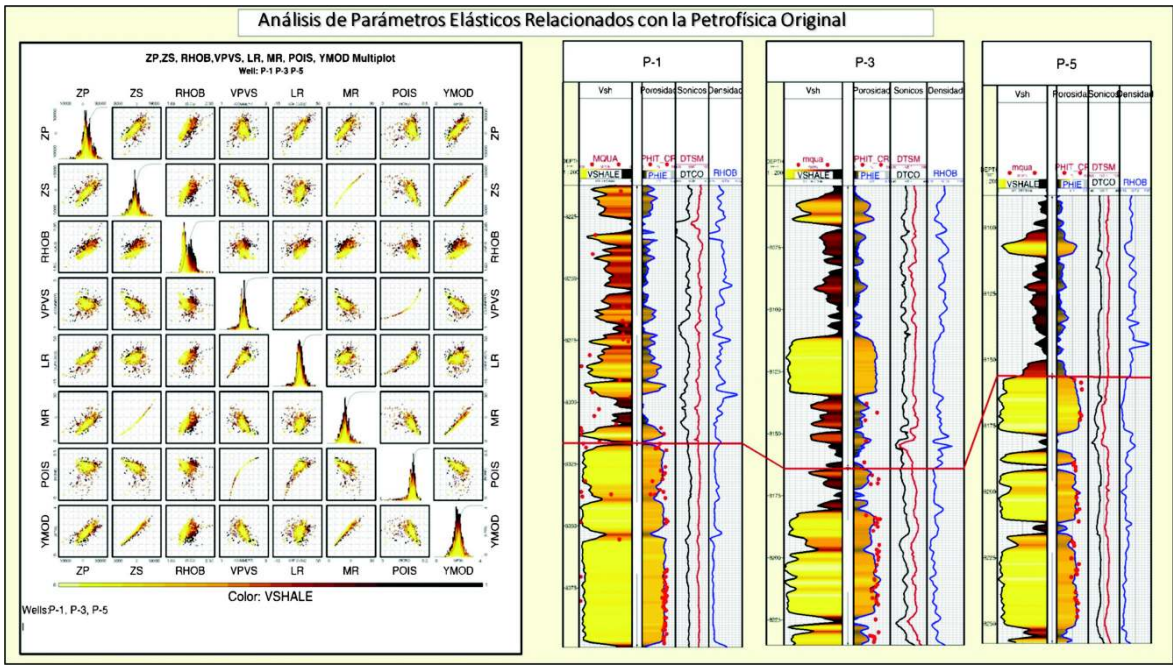


Figura 4. Análisis de condiciones iniciales: En el *xplot* de impedancia P vs Impedancia S se puede visualizar que las arcillas y arenas presentan la misma tendencia. De igual forma, en el resto de los gráficos se observa que no es clara la discriminación litológica, sólo aquellos relacionados con la densidad. En el pozo P-1, el sónico de corte (Rojo) se presenta con valores similares en intervalos de ambas litologías.

Se realizó el cálculo de índice de volumen de arcilla por diferentes metodologías (Figura 5), pudiéndose notar una correlación entre todos menos aquel estimado a partir del resistivo debido a la influencia de la diferencia de fluidos presentes en la formación. A partir del análisis granulométrico del núcleo, se logró detectar intervalos de limos finos, que mineralógicamente tenían un alto porcentaje

de cuarzo reflejado en el índice a partir del GR, pero mecánicamente se comporta similar a los intervalos arcillosos según el índice estimado de los registros densidad/sónico. Estos intervalos no representan características de reservorio debido a su baja permeabilidad y a la alta viscosidad del crudo presente en la formación, por lo cual, en la práctica representa lo mismo que los intervalos arcillosos.

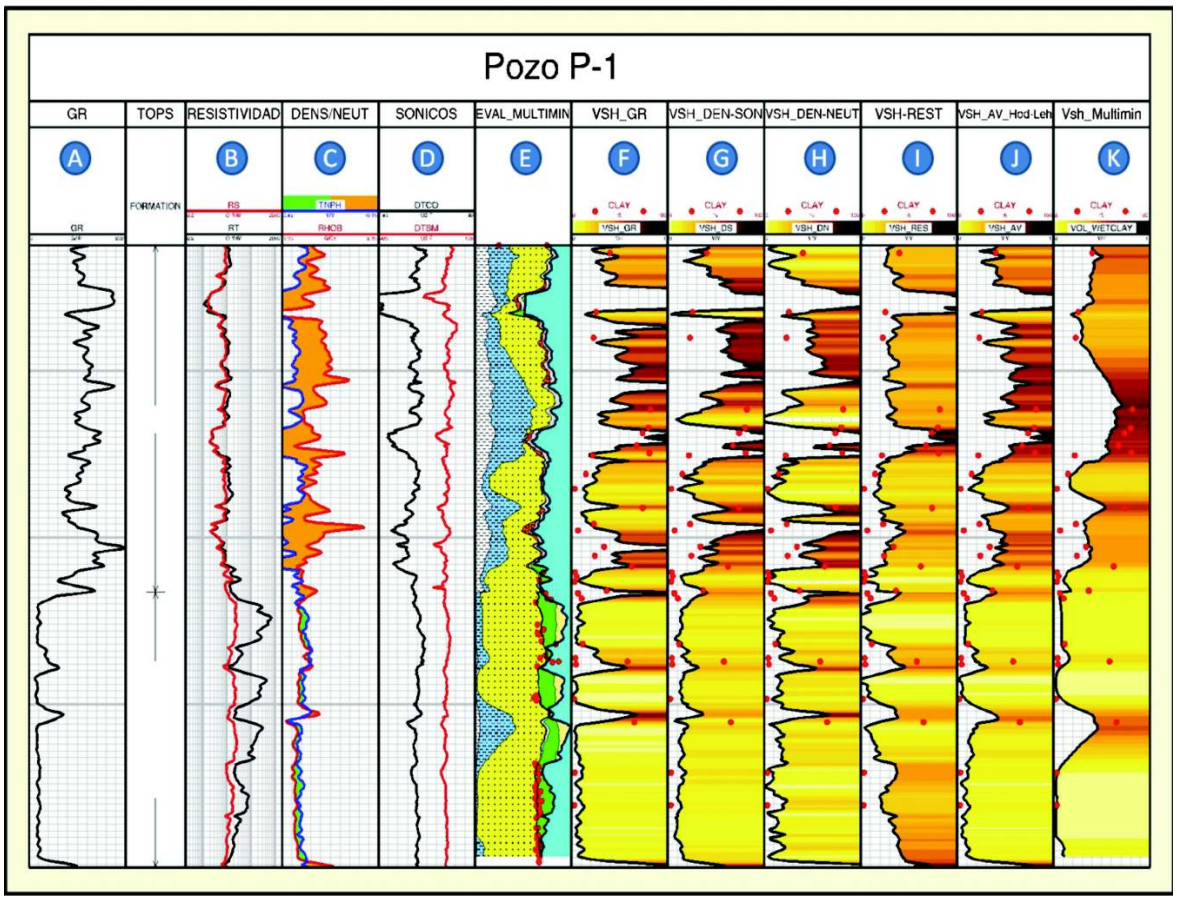


Figura 5. Análisis de la metodología de predicción del índice de volumen de arcilla. A) Gamma ray, B) Resistivos, C) Densidad (Rojo)/Neutrón (Azul), D) Sónico compresional (negro) y sónico de corte (rojo); E) evaluación petrofísica multimineral, F) índice de volumen de arcilla a partir del GR, G) índice de volumen de arcilla a partir de densidad/sónico. H) índice de volumen de arcilla a partir de densidad/Neutrón. I) índice de volumen de arcilla a partir de resistividad. J) integración de los índice de volumen de arcilla F, G y H a partir de la metodología de Hodges-Lehman, K) Índice de volumen de arcilla a partir de la evaluación multimineral.

En el análisis multimineral se pudo determinar que el intervalo de interés más arcilloso presentaba una combinación entre minerales de arcilla Illita y Caolinita, en cambio para el intervalo correspondiente al yacimiento solo se presentaba en pequeñas cantidades la Caolinita. Los valores de *gamma ray* para la caolinita fluctúan entre 80 y 130 API, mientras que para la Illita se encuentran entre 250 y 300 API. Si se calcula el índice de volumen de arcilla a partir de una relación lineal con el GR tomando los valores máximos de la Illita como la línea de arcillas, entonces en las zonas con presencia de caolinita, dicho índice, se va a subestimar. La densidad de la caolinita varía entre 2,41 y 2, 60 g/cc, y la de la Illita varía entre 2,52 y 2,61; y la velocidad P

también tienen rangos similares y dependen del grado de compactación. Por tal motivo se empleó el índice de volumen de arcilla a partir del densidad/sónico, además de ser los registros que están directamente relacionados con los parámetros elásticos a analizar con el dato sísmico.

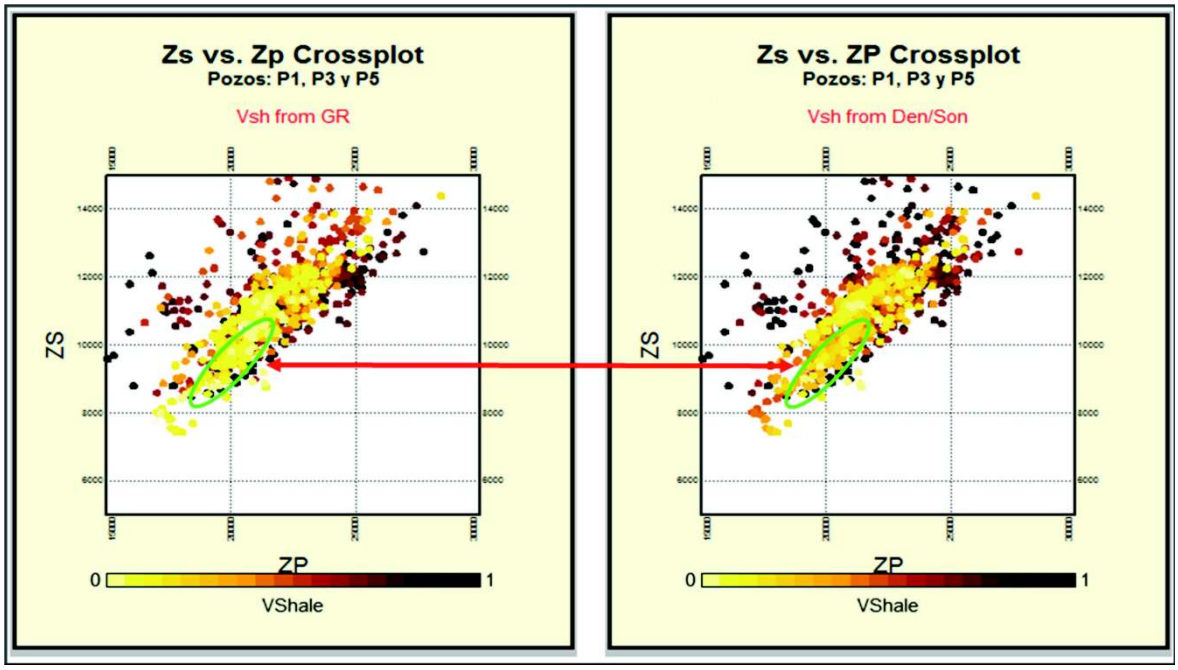
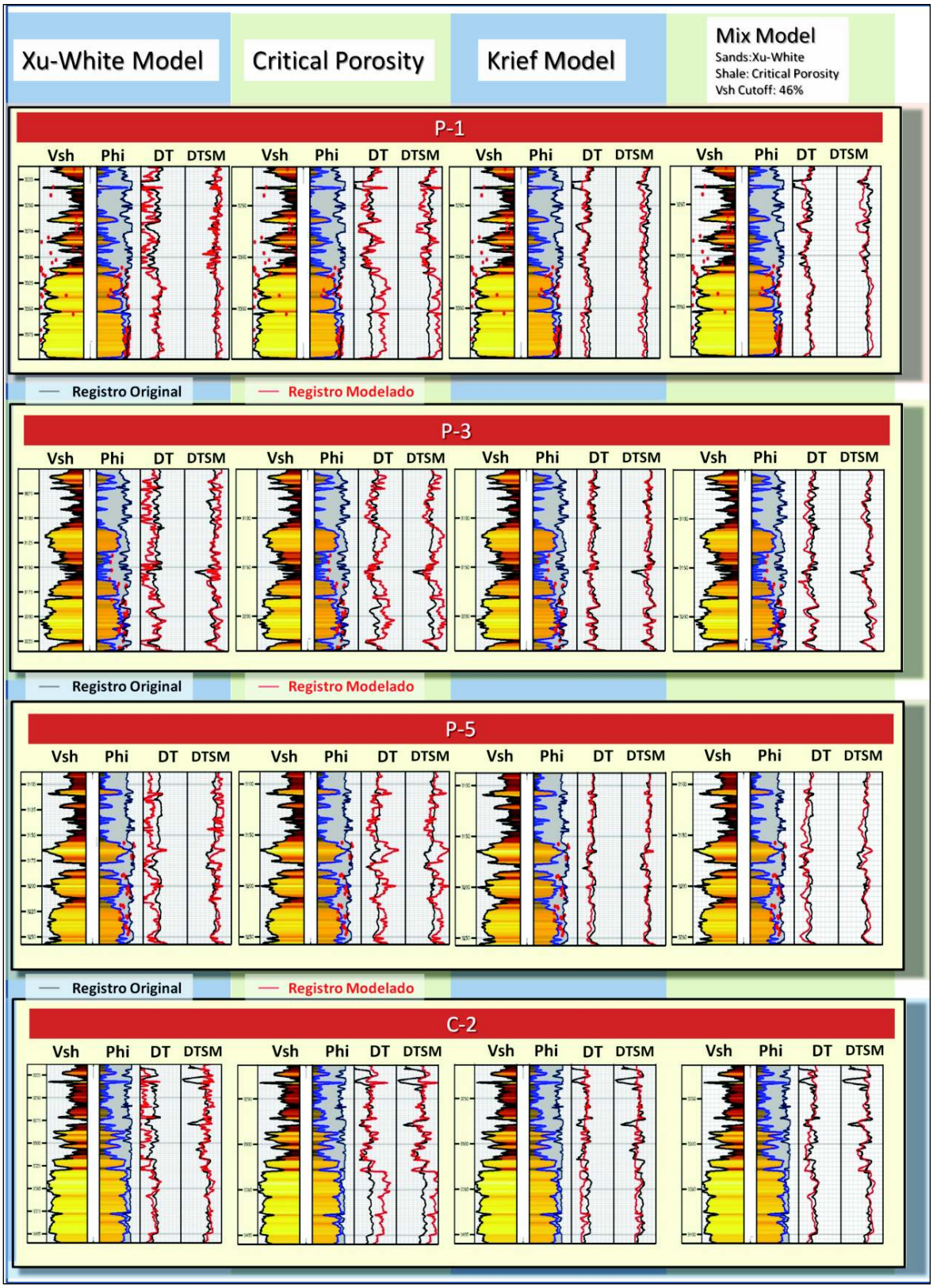


Figura 6. Comparación entre las relaciones Zp vs. Zs con la escala de color de Vsh original calculado a partir del GR (Izq.) y el nuevo Vsh calculado a partir de Densidad/Sónico (Der.).

A partir de los resultados obtenidos, se determinó que había una mejor discriminación cambiando la metodología del cálculo del índice de volumen de arcilla (Figura 6), pero aún no era clara, por lo que se debía analizar la calidad de los registros de corte. Para ello era preciso calcular la porosidad efectiva y total a partir de la densidad, al igual que la saturación de agua para discriminar fluidos y poder separarlos de acuerdo a sus propiedades en los modelos de física de rocas.

De acuerdo a la experiencia del campo, se conocen diferentes estados de compactación y consolidación de las rocas presentes, por lo cual se dificulta la selección del modelo petrofísico *a priori*. Por ello se procedió a probar 3 modelos, la aproximación del modelo de velocidad de Xu-

Figura 7 (pág. siguiente). Modelos de Física de rocas analizados para la predicción de sónico de corte: En general el modelo de Krief presentó una buen predicción para todo el intervalo. Sin embargo, la combinación de los modelos de Xu-White para zonas arenosas y de porosidad crítica para zonas arcillosas presentó una mejor predicción. Para ellos se probó con varios valores de corte de arcilla quedando como mejor un 46% de Vsh. Pozo P-1: Se desconfía del sónico de corte debido a su poca variabilidad ante litologías distintas. Se obtiene una buena predicción del sónico compresional menos en el modelo de porosidad crítica en la zona arenosa. Pozo P-3: El modelo Xu-White no logra predecir en la zona arcillosa y el modelo de porosidad crítica no logra predecir en la zona arenosa. La predicción de los picos de máxima arcillocidad son mejor en el modelo de porosidad crítica. Pozo P-5: El modelo Xu-White no logra predecir en la zona arcillosa y el modelo de porosidad crítica no logra predecir en la zona arenosa. El modelo de Krief logra una muy buena predicción en ambos sónicos. Pozo C-2: Este pozo se usó como control de calidad de las predicciones ya que contaba con sónicos confiables. El modelo de Xu-white presenta problemas en la predicción del DT en la zona arcillosa y el modelo de Porosidad Crítica en ambos sónicos en la zona arenosa.


Xu-White Model
Critical Porosity
Krief Model
Mix Model
Sands:Xu-White
Shale: Critical Porosity
Vsh Cutoff: 46%
P-1
Vsh Phi DT DTSM
Registro Original
Registro Modelado
P-3
P-5
C-2

White dada por Keys *et al.* (2002) (para zonas con poca heterogeneidad en la forma de los poros), el modelo de porosidad crítica de Dvorkin *et al.* (2000) (para intervalos poco consolidados) y el modelo de Krief *et al.* (1990) (como método general para todo el intervalo en estudio).

El intervalo arenoso, de acuerdo a lo observado en los registros y en la sísmica, presenta menor impedancia P que el intervalo más arcilloso que lo suprayace. Es probable que el intervalo reservorio haya rellenado los valles del paleozoico y la columna litológica superior haya ejercido sus esfuerzos contra el paleozoico, quedando estas arenas protegidas por las zonas altas paleozoicas, y por tanto, con un tren de compactación de menor intensidad.

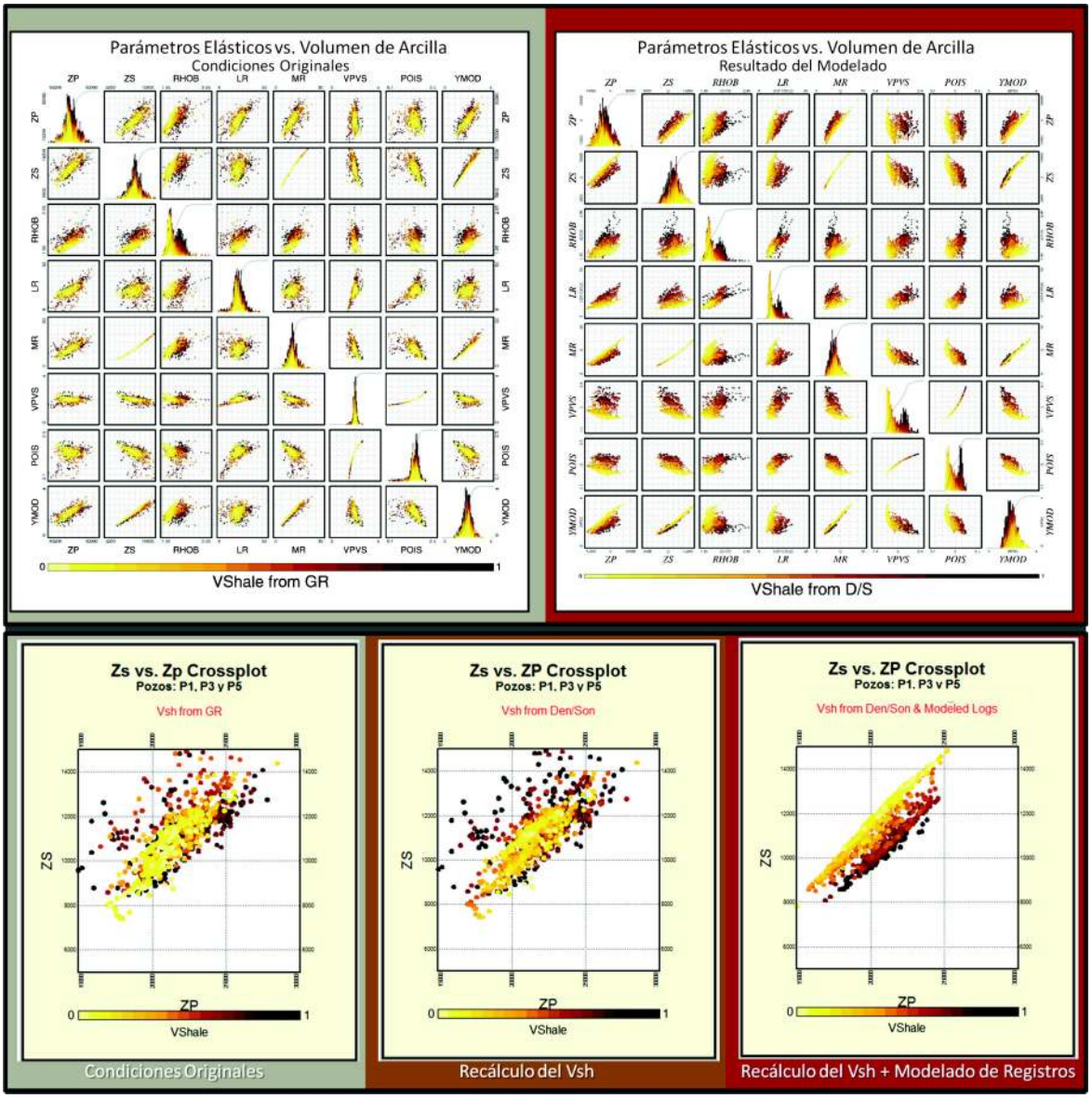


Figura 8. Comparación entre las condiciones iniciales del proyecto con los resultados obtenidos: En general todos los parámetros presentan un rango lógico respecto a cada litología y permite su discriminación.

Debido a que no se tenía la certeza de la calidad de los sónicos de corte, se tomó al pozo C-2 como pozo de control de calidad de las predicciones, ya que era el pozo que mostraba una discriminación más clara de la litología a partir de los parámetros elásticos. De igual forma, se tomaron con reserva los pozos P-3 y P-5 como guías. Era claro que el sónico de corte del pozo P-1 no era confiable.

El modelo de Xu-White implementado presentó una mejor predicción en la zona de las arenas, pero también en las zonas de arenas limpias del intervalo suprayacente, sin embargo, a medida que se iba haciendo arcillosa la roca se alejaba la predicción de los registros medidos.

En cambio el modelo de porosidad crítica presentó las características contrarias al de Xu-White, teniendo una mejor predicción para las zonas arcillosas.

El modelo de Krief presentó una mejor predicción para todo el intervalo en general, no había diferencias en el margen de error entre las zonas de arcillas y las zonas de arena. Sin embargo, seguía siendo Xu-White una mejor predicción en arenas, y el de porosidad crítica en las arcillas. Por tal motivo se procedió a determinar un valor de corte de índice de volumen de arcilla a partir de aproximaciones sucesivas hasta obtener la mejor predicción. Dicho umbral fue de 46%. (Ver Figura 7).

Una vez obtenida la predicción de los sónicos de corte, se procedió al recálculo de los parámetros elásticos para analizar las tendencias esperadas que permitieran la discriminación litológica. Como se muestra en la Figura 8, se ven tendencias más claras y se pueden discriminar fácilmente las arenas limpias de las arcillas. Esto permitió a su vez tener un mejor modelo inicial de velocidad S para la inversión sísmica, y posteriormente, una mejor comprensión en el análisis de gráficos cruzados para la generación de atributos de detección de geocuerpos arenosos.

Una vez que se obtuvo una clara tendencia para los parámetros elásticos a partir del recálculo del índice de volumen de arcilla y del modelado de registros sónicos, se generaron predicciones de los sónicos de corte en el resto de los pozos a partir de la misma metodología del modelado. Esto permitió tener un grupo de registros de pozos, con una buena distribución en el área de estudio, para proveer a la inversión sísmica la información *a priori* requerida.

Inversión Sísmica: Verificación de las Tendencias y Resultados

Como ya se mencionó, la inversión sísmica elástica (Tonellot *et al.*, 2001 y Hampson *et al.* 2005) es la herramienta seleccionada para predecir las características de los reservorios más allá de las zonas de cobertura de los pozos. La principal dificultad que enfrentó la inversión residió en el fuerte contraste de propiedades mecánicas asociadas a la discordancia entre Cenozoico y Paleozoico. La proximidad del objetivo a la discordancia –directamente arriba-, genera distorsión en la zona de máximo interés con efectos influenciados por el Paleozoico. Dos factores contribuían: a) la penetración hacia arriba de la rampa -carente de sentido estratigráfico- generada por cualquier

proceso de suavización que se intentaba aplicar a los pozos para generar el modelo de información *a priori*, y b) la contaminación debida a la fracción importante de energía propagada por los inevitables remanentes de los lóbulos laterales, dada la alta reflectividad asociada al evento Paleozoico. La primera fue evitada por medio de un modelo inicial mixto. Este consistió en unir un modelo suprayacente al Paleozoico construido por filtrado de curvas de pozos *ad-hoc*, -a las que se les había extirpado el escalón asociado al Paleozoico-, con otro modelo subyacente elaborado a partir de los cuatro pozos que penetraron el nivel profundo en forma franca. El segundo efecto distorsivo, el relativo a los remanentes del colapso de la ondícula, si bien es imposible corregirlo totalmente, se le minimizó incluyendo el Paleozoico en la ventana de evaluación de ondícula para inversión.

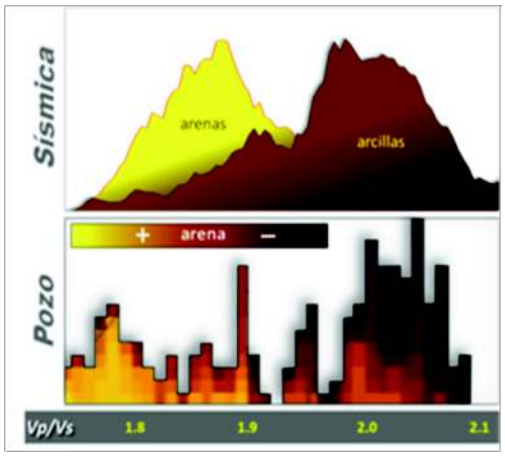


Figura 9. Histogramas de Vp/Vs en la zona de interés. A partir de la inversión en la sección entre los pozos P2 y P4 (arriba) y según los pozos (abajo).

Se esperaba que los volúmenes de propiedades mecánicas provenientes de la inversión aportaran tendencias que ayuden al entendimiento del modelo sedimentario –dirección dominante de canales- y, directa o indirectamente, reduzcan el riesgo en la etapa del desarrollo del yacimiento. Para cumplir con el objetivo es necesario que sus productos reflejen las mismas tendencias que revelaron los pozos a través de la física de rocas, en particular para la relación Vp/Vs y la densidad, y en el nivel exacto definido como objetivo. La Figura 9, compara los histogramas de Vp/Vs –propiedad clave para caracterizar el reservorio- para pozo y sísmica. El histograma de la sísmica -coloreado según un *cut-off* del geocuerpo arenoso (se explicará más adelante), ubica las arenas y las lodolitas en rangos compatibles con los vistos por la información de pozo (histograma). Asimismo, es claro como la inversión sísmica reproduce la separación de ambas de litologías en modas.

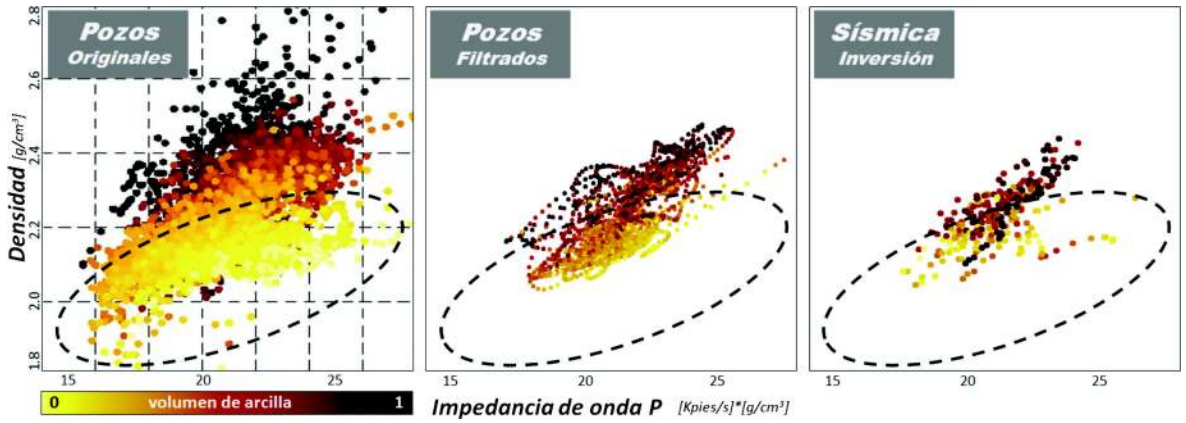


Figura 10. *Crossplots* impedancia de ondas P vs densidad en la zona de interés. A partir de información de pozos (izquierda), de pozo restringida al ancho de banda de la inversión 0-0-150-180 hz, con muestreo de 1 pie (centro) y de atributos de la inversión extractados en los pozos (derecha) a 2 ms.

Otro control de la eficiencia de la inversión para trasmitir las tendencias son las relaciones básicas entre impedancia de ondas P y densidad (Figura 10) y entre impedancias de ondas P y S (Figura 11). La primera asegura que la densidad, la otra propiedad clave, exprese adecuadamente las tendencias observadas en los pozos, mientras la segunda es una verificación adicional para las tendencias de la relación Vp/Vs. En estas figuras se incluyen *Crossplots* entre la información de pozos pero con el ancho de banda reducido por filtrado (centro), hasta hacerlo compatible con el de los productos de la inversión sísmica. Al comparar los *Crossplots* basados en información de pozos con el de la derecha –productos de inversión– se observa que la sísmica, a pesar de la perdida de ancho de banda y la consecuente reducción del rango dinámico, conserva las tendencias observadas en el dato de espectro extendido de los pozos.

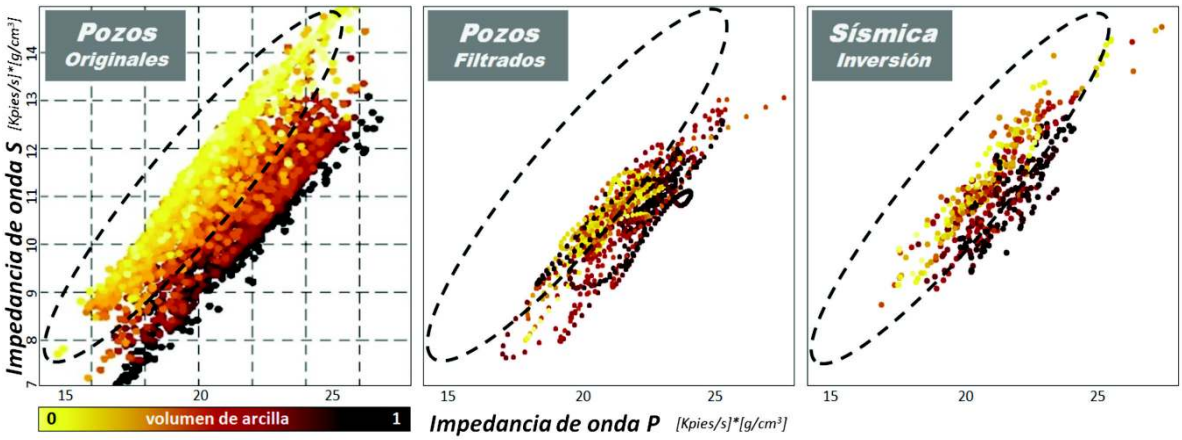


Figura 12. ***Crossplots*** **entre relación Vp/Vs y densidad para el intervalo de interés individual por pozo. Arriba: información de pozo sin filtrar. Abajo: trazas extractadas de los volúmenes de la inversión. El color de los puntos es el índice de volumen de arcilla mediante sónico-densidad de la nueva evaluación.**

Finalmente, la Figura 12 presenta gráficos en *crossplot* Vp/Vs vs densidad -la pareja recomendada por el estudio de física de roca como mejor discriminador litológico-, en cada pozo. En la parte superior se ven los elaborados a partir del dato de pozo y abajo los correspondientes a la solución por inversión sísmica. De la comparación se desprende que la tendencia de las arenas a valores bajos, tanto para Vp/Vs como para densidad, está aceptablemente predicha en todos los pozos. Este resultado es fundamental para la valoración de la solución en función de su capacidad para separar las arenas de las arcillas en todos las posiciones muestreadas por los pozos.

La Figura 13 muestra los atributos básicos de la inversión con los pozos insertos en la misma escala de color. Las secciones son una forma directa de controlar la efectividad de la predicción conseguida.

Detección de Arenas

La re-evaluación del índice de volumen de arcillas junto con el modelado de los sónicos generó información capaz de reconocer las diferencias mecánicas entre arenas y arcillas en la zona objetivo. Esto se tradujo, como se mencionó en el Estudio de Física de Rocas, en criterios

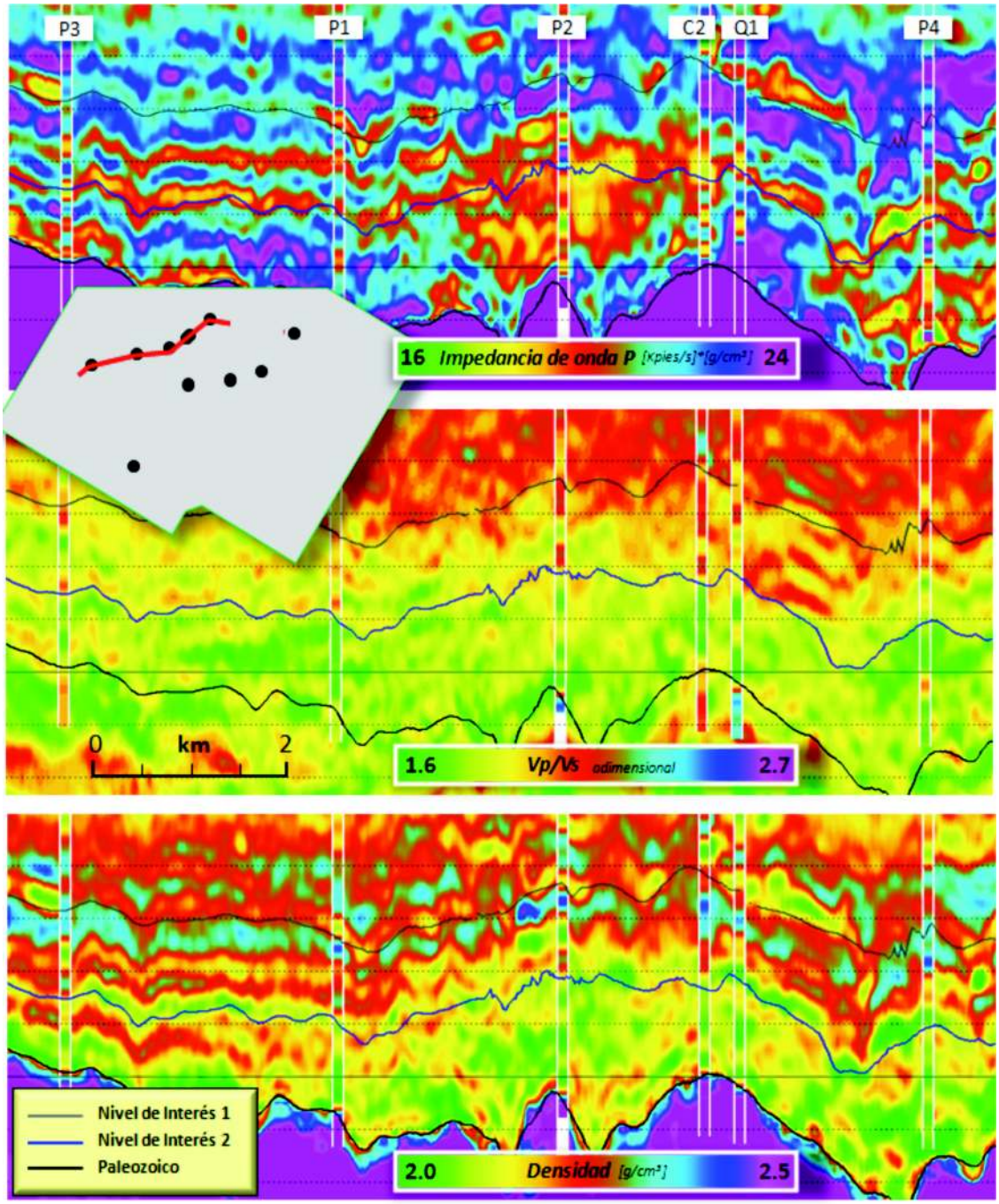


Figura 13. Secciones arbitrarias por los pozos de impedancia de ondas P (arriba), relación Vp/Vs (medio) y densidad (abajo). En la posición de los pozos se ven insertas las correspondientes curvas de pozo en la misma escala de color que los atributos, filtrado al ancho de banda sísmico para mejor control.

concretos de relación entre las variables elásticas de la roca reservorio, que hacen posible discriminar las arenas, e inclusive clasificarlas por su calidad. La aplicación directa del criterio definido en el dominio del *crossplot* Vp/Vs vs densidad –Figura 14 izquierda–, a los productos de la inversión nos debería delinear a un geocuerpo arenoso. Se decidió implementar una técnica algo más ambiciosa consistente en generar una multiplicidad de polígonos, 12 en nuestro caso, a lo largo de la línea de tendencias de calidad de arenas según la física de rocas, como se ve en la Figura 14 a la derecha.

El mapeo de los polígonos múltiples al dominio del volumen sísmico, asignando valores crecientes de 1 a 12 –de verde a rojo– a las muestras provenientes de los distintos polígonos, condujo a la generación de un geocuerpo de calidad de arena, del que se aprecia una sección arbitraria en la Figura 16.

Para apreciar el comportamiento de la solución en forma areal se extractaron del geocuerpo mapas para tres niveles reconocidos como productores en los pozos existentes: una ventana de 10 ms en la base del horizonte de interés de la Fm terciaria, otra de igual extensión en el tope del nivel arenoso y la que agrupa las dos anteriores. En la Figura 15 se ven los mapas en una escala de colores compatible a la sección de la Figura 16. La distribución de las mejores arenas sigue patrones similares al modelo sedimentológico de ambiente fluvial de canales entrelazados. Las estructuras, como el canal principal, quedan orientadas según la dirección conocida para el antiguo sistema de escurrimiento superficial.

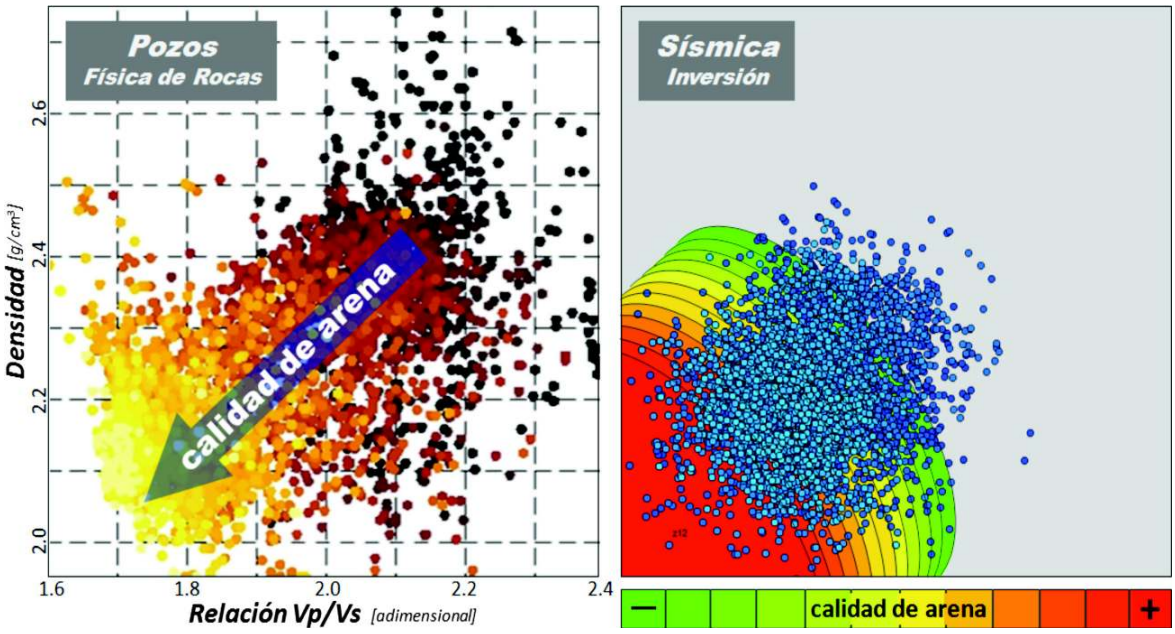


Figura 14. ***Crossplot*** **de física de rocas de Vp/Vs vs densidad con el índice de volumen de arcilla en la gama de amarillo a negro (izquierda). El mismo espacio de detección, pero a partir de los atributos de la inversión (derecha). Definición de 12 polígonos –elipses– a lo largo de la dirección de tendencia arena-arcilla.**

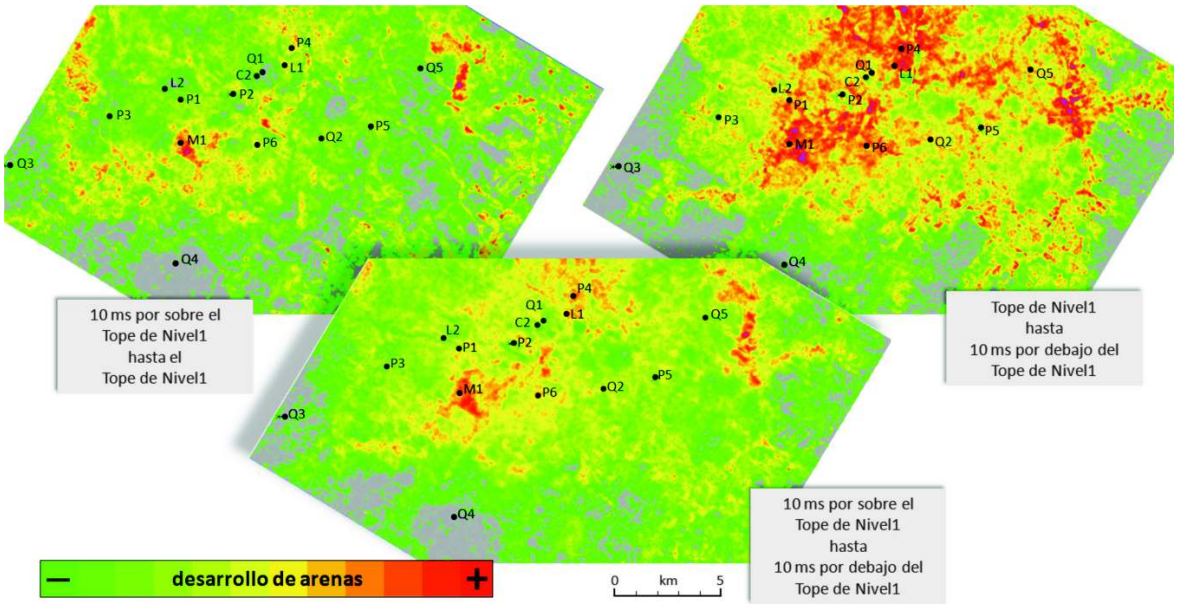


Figura 15. Mapas extractados del geocuerpo de calidad de arena para tres niveles de importancia económica dentro del sistema fluvial. La distribución geográfica de las arenas está relacionada con canales del antiguo sistema de drenaje, morfología que se aprecia en los mapas.

Finalmente, como medida objetiva del nivel de ajuste y predicción de la solución, se evaluó la correlación entre los valores del geocuerpo y los del índice de volumen de arcilla, en las locaciones de los pozos. Para este fin, se generó el *crossplot* entre ambos conjuntos de datos –Figura 17–; como es esperable, las variables están en relación inversa. En el eje de abscisas se colocó la raíz cuadrada del índice de volumen de arcilla proveniente de la evaluación petrofísica. Este recurso logra desplegar más claramente el tipo de relación entre las dos variables, lo cual es un indicio de que en este procedimiento –los polígonos múltiples– no necesariamente produce relaciones lineales entre las variables, sino que dependerá de la forma de distribuir los polígonos.

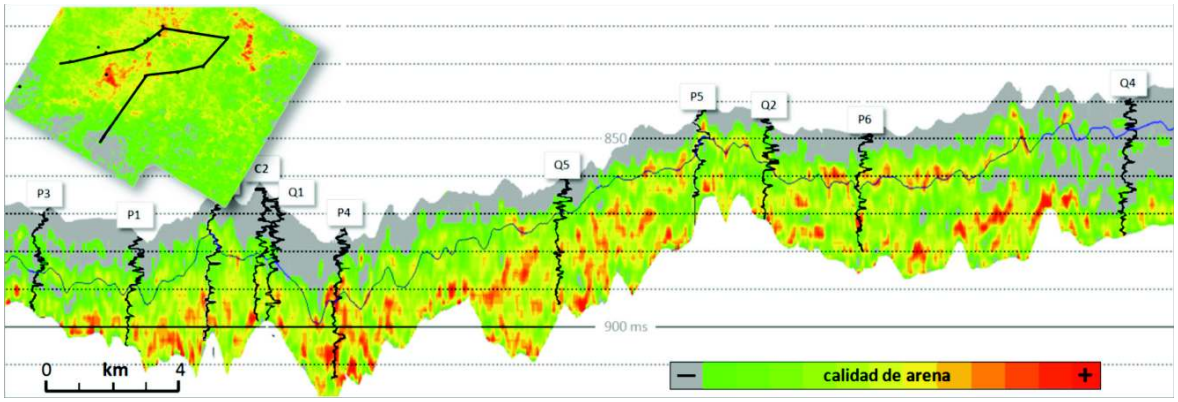


Figura 16. Geocuerpo de calidad de arena: sección arbitraria por los pozos. En los pozos se incluye la curva del índice de volumen de arcilla de la evaluación petrofísica, con el objeto de apreciar el grado de ajuste logrado. El color gris agregado a la izquierda de la escala está asociado a los puntos por fuera de los polígonos en el *crossplot* de la Figura 14, relacionados a los niveles arcillosos de la parte superior del intervalo de interés.

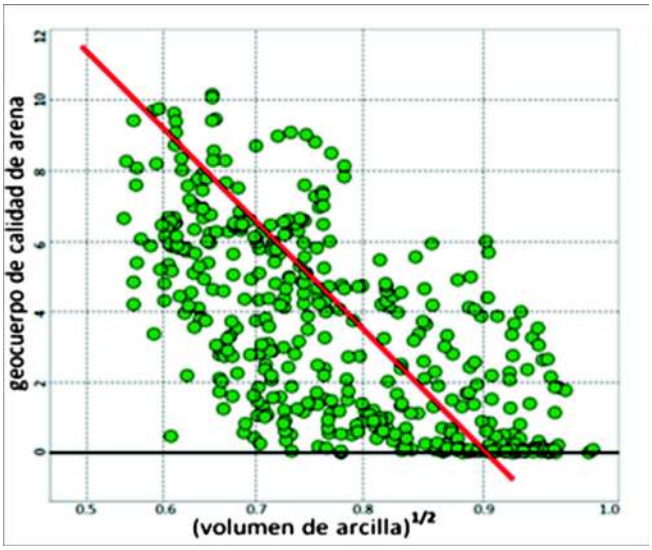


Figura 17. Volumen de arcilla vs geocuerpo de calidad de los niveles de la Fm de edad terciaria.

El grado de correlación observada asegura que las tendencias estarán presentes en cualquiera de los productos que se deriven a partir del cuerpo arenoso. De esta manera se demuestra el éxito logrado en el proceso global de discriminación litológica. Sin embargo, también hay que hacer notar que la predicción alcanzada no es óptima. Las posibles alternativas para dar respuesta a los requerimientos de mayor detalle, necesario en las próximas etapas del desarrollo, serán analizadas en Conclusiones y Recomendaciones.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El dato sísmico posee una excelente calidad que lo hizo apto para cumplir con los objetivos planteados. En especial, se destaca el alto contenido de frecuencias, habiéndose demostrado la presencia de energía sísmica aprovechable en la banda 150-180 hz. Esto le confiere gran resolución temporal, sin la cual no hubiera sido posible discriminar los cuerpos arenosos delgados en la zona de interés.

Al entrar en contacto con la información de pozo se advirtió que la capacidad de discriminación litológica –fundamentalmente arenas de arcillas– se iba a ver fuertemente limitada por la poco explicable similitud entre los parámetros mecánicos de ambas clases litológicas. No es común que arenas y arcillas que, habiendo atravesado por historias geológicas similares, a igual profundidad, no se diferencien mecánicamente. Este hecho impulsó el estudio adicional de modelado de física de rocas con el objeto de generar nuevas curvas a partir de los modelos de física de rocas de Porosidad Crítica y Xu-White. El estudio condujo a una clara mejoría en la separación de litoclases a partir las propiedades elásticas. Este hecho, junto con la re-evaluación petrofísica asociada, constituyen las claves del éxito del proyecto en la consecución de los objetivos.

A partir de los histogramas para todas las variables elásticas de la roca, coloreados de acuerdo a la proporción arena-arcilla, se estableció que la relación Vp/Vs (o la razón de Poisson) y la densidad ostentaban la mejor capacidad de discriminación litológica. El *crossplot* entre ambas fue seleccionado como la herramienta para el mapeo de presencia y calidad de reservorio.

El grado de ajuste y predicción -obtenido a partir del flujo basado en la regeneración de curvas

por modelado de física de rocas, redefinición del modelo petrofísico e inversión sísmica y productos asociados- alcanzó para discriminar y clasificar las arenas. Quedó claramente demostrado, por medio de *Crossplots* e histogramas de las variables clave, que las tendencias fueron extractadas del dato sísmico y que contribuirán a disminuir el riesgo durante el desarrollo.

El geocuerpo de calidad de arena, generado en base a 12 zonas distribuidas a lo largo del eje arena-arcilla en el *crossplot* Vp/Vs vs densidad, hizo posible no sólo la detección de las arenas sino también clasificarlas por su calidad como reservorio. El geocuerpo toma la forma de un atributo sísmico con valores entre 12 (arena) y 0 (arcilla), muy apropiado para definir zonas en función de la calidad de reservorio. Dicho atributo es consistente con el modelo sedimentario, lo que constituye una evidencia de éxito de la metodología implementada.

En el *crossplot* entre el geocuerpo –principal atributo para caracterizar el reservorio– y la evaluación del volumen de arcilla (Figura 17), se aprecia que la predicción obtenida, a pesar de que cumplió los objetivos planteados, está lejos de ser óptima. El proceso de caracterización no está cerrado, debiéndose buscar metodologías complementarias para refinar las predicciones.

Las alternativas disponibles para buscar mejor ajuste en los resultados se pueden agrupar en dos categorías, dependiendo de la estadística de información de control de los pozos:

Con la información disponible

Las **redes neuronales** se pueden usar para mejorar, en forma directa, el ajuste del geocuerpo de calidad de arena o, en forma indirecta, refinando primeramente los productos de la inversión, a partir de los cuales se genera el cuerpo arenoso mejorado.

Las **sismofacies** son clases generadas en base a la respuesta sísmica en la ventana asociada al reservorio. Las mismas adquieren sentido estratigráfico en la medida que estén adecuadamente supervisadas por electrofacies calculadas a partir de la información de pozo. La metodología puede colaborar en la definición más precisa de fronteras entre distintas unidades litoestratigráficas.

Con el aumento de la estadística de pozo

Las **funciones de densidad de probabilidad (PDF)** son apropiadas en casos como el presente, en que los cúmulos que representan a las distintas litologías muestran alto grado de superposición en cualquiera de los espacios de discriminación elegido. En vez de modelar cada cúmulo como una región definida en el espacio multiatributo, se lo hace a través de funciones de densidad de probabilidad (PDF). El resultado ya no son geocuerpos sino volúmenes de probabilidad de ocurrencia de cada clase litológica. Suele proporcionar resultados de mayor detalle y realismo.

La **inversión estocástica** consiste en la construcción de un alto número de soluciones o realizaciones consistentes con la respuesta sísmica y de variabilidad controlada por los variogramas de pozo, de sísmica y de sísmica-pozo. El correcto análisis estadístico de estas realizaciones puede conducir, entre otras cosas, a estimaciones de conectividad de arenas, de gran utilidad en etapas más alta madurez en el desarrollo.

AGRADECIMIENTOS

A las empresas Pacific Rubiales, Talisman Energy y Geoprocesados por permitirnos realizar y publicar este trabajo. A Horacio Acevedo por su gran aporte en la idea inicial.

REFERENCIAS CITADAS

G. Bayona, *et al.*, 2007, "Paleocene-Middle Miocene Flexural-Margin Migration of the Nonmarine Llanos Foreland Basin of Colombia" CT&F, Vol. 3 No. 3.

Hampson, D.P., Russell, B.H., and Bankhead, B.,2005, "Simultaneous inversion of pre-stack seismic data: Ann. Mtg. Abstracts", SEG, p. 1633-1637.

R.G. Keys and S. Xu, 2002, "An approximation for the Xu-White velocity model", Geophysics, vol 67, 1406-1414.

Aki, K., and Richards, P.G., 2002, "Quantitative Seismology", 2nd Edition: W.H. Freeman and Company.

Tonellot, T., Macé, D. and Richard, V. 2001 "Joint stratigraphic inversion of angle-limited stacks". 71st Annual International Meeting. Society of Exploration Geophysicists, 227-230.

J. Dvorkin and A. Nur, 2000, "Critical Porosity Models", Stanford University

Dvorkin, J., and Brevik, I., 1999, "Diagnosing high-porosity sandstones: Strength permeability from porosity and velocity", Geophysics, 64, 795-799.

Avseth, P., Dvorkin, J., Mavko, G., and Rykkje, J., 1998, "Diagnosing high-porosity sands for reservoir characterization using sonic and seismic", SEG 66 Annual Meeting, Expanded Abstracts, 1024-1025.

Mavko G., Mukerji T. and J.Dvorkin, 1998, "The Rock Physics Handbook -- Tools for Seismic Analysis in Porous Media", Cambridge University Press.

M. A. Cooper, *et al.*, 1995, "Basin Development and Tectonic History of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley,Colombia" AAPG Bulletin, V. 79, No. 10, P. 1421–1443

M. Krief *et al.*, 1990, "A petrophysical interpretation using the velocities of P and S waves (full-waveform Sonic)", The Log Analyst, 31, 355-369.