Sihil, la historia breve de un gran redescubrimiento

Héctor Salvador Salgado Castro
hector.salvador.salgado@pemex.com

Jaime Javier Ríos López
jaime.javier.rios@pemex.com
Petróleos Mexicanos

Víctor Alfredo Hernández Mendoza
mexicanass@mssoil.com

Luzbel Napoleón Solórzano Zenteno
mexicanass@mssoil.com
Mexicana Smart Solutions for the Petroleum Industry

Información del artículo: recibido: agosto de 2016-aceptado: septiembre de 2016

Resumen

A su descubrimiento en 1998, Sihil generó grandes expectativas. Se pensó que sería un yacimiento gigante semejante a Akal.

Sihil posee la misma secuencia de horizontes geológicos y económicos que Akal. El cuerpo principal de Sihil-JSK, se ve hoy día con un gran potencial de producción de hidrocarburos. Antes se creía invadido de agua, pero eso se debía a que la mala calidad de la sísmica con la que se contaba en aquel tiempo impedía ver con nitidez sus características verdaderas.

Hoy se sabe que las acumulaciones de hidrocarburos del nivel JSK ocurren en bancos oolíticos rodeados de facies compactas de origen lagunar, que por distribuirse discretamente hacen más difícil su detección y evaluación.

En el cuerpo principal de Sihil-JSK no hay agua. Esto permite suponerle una extensión estructural de unos 80 kilómetros cuadrados, equiparable al área de Akal que mide algo más de 120 kilómetros cuadrados y a la de Sihil-BKSTP del orden de 80 kilómetros cuadrados.

Las características de Sihil-JSK podrían significar una reserva de aceite de entre 600 millones y 2,000 millones de barriles (P_{10}-P_{90}).

Se demuestra que con más de 100 pozos y un desarrollo acelerado, la producción de crudo podría llegar a los 500 mil barriles diarios con costos de producción inferiores a 10 dólares por barril.

La localización estratégica C-3011 perforada recientemente no cumplió su objetivo fundamental de investigar la formación JSK de Sihil. Sin embargo, alcanzó a comprobar que en efecto existe una acumulación importante de hidrocarburos en ese horizonte.

Palabras clave: Banco oolítico, facies, sistema petrolero, play, apertura, transpresivo, proto océano, alóctono, autóctono, imbricado, masa salina, paleoalto.

Sihil, the brief history of a great rediscovery

Abstract

When it was discovered in 1998, Sihil generated high expectations. It was thought it would be a giant reservoir.

Sihil has the same sequence of geologic horizons of great economic value than Akal. The main body of Sihil-JSK is today seen with a significant production potential. Previously it was believed that it was completly overrun with water, but that was due to the poor quality of seismic of that time which did not allow to see clearly their true characteristics.

It is known today that hydrocarbon accumulations in level JSK occur in oolitic banks surrounded by compact facies of lagoonal origin, whose discret distribution make its detection and evaluation be a more difficult task.

In the main body of Sihil-JSK there is no water. This suggests that its structural extensión is about 80 square kilometers, like the Akal area which measures more than 120 square kilometers and similar to Sihil-BKSTP area which is like 80 square kilometers.

The charasteristics of Sihil-JSK could mean oil reserves of between 600 million and 2 billion barrels (P_{10}-P_{90}).

With more than 100 wells and an accelerated development, oil production could reach 500,000 barrels per day, with lower production costs to $ 10 per barrel.

The strategic location C-3011 perforated recently failed to meet its primary objective of investigate the formation of Sihil-JSK. However it managed to prove that there is indeed a significant accumulation of hydrocarbons in that horizon.

Keywords: Oolitic bank, facies, petroleum system, play, rifting, transpressive, proto ocean, allochthonous, autochthonous, imbricated, salt dome, paleo high.

Antecedentes

El campo Sihil está ubicado en aguas someras del Golfo de México, a 92 km al noroeste de Ciudad del Carmen, Campeche.

Forma parte de la gran cuenca mesozoica del Golfo de México, la cual contiene sistemas petroleros y *plays* que guardan una gran similitud entre sí, tanto en la parte mexicana como en el territorio estadounidense.

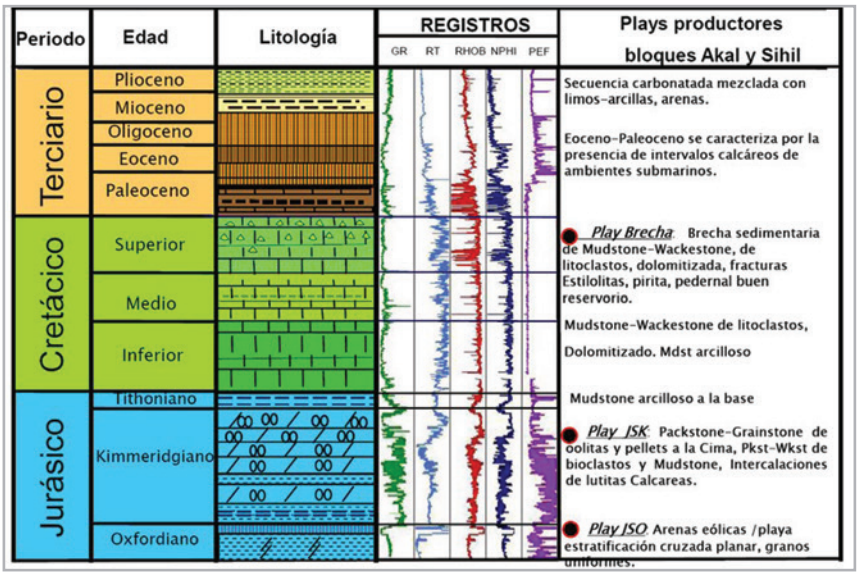

Figura 1. Columna estratigráfica del área Akal-Sihil y *plays* productores.

La estratigrafía basal de la gran cuenca mesozoica del Golfo de México no ha sido alcanzada aún por pozo alguno de la Sonda de Campeche. Hasta hoy la estratigrafía de esa cuenca sólo puede visualizarse a través de la geología superficial de la Sierra de Chiapas, caracterizada por una cuenca tipo *rifting* formada durante el Jurásico.

El basamento *pre-rift* aflora al sur de la Sierra de Chiapas y muestra la secuencia de un complejo ígneo-metamórfico de edad pre-cámbrica, sobre el cual descansan rocas sedimentarias deformadas de edad Paleozoica (Chicomuselo, Chiapas, México). Sobre éstos yacen, en discordancia angular, lechos rojos deformados de presumible edad triásica, intrusionados por diques andesíticos que marcan la etapa de ruptura de la gran cuenca del Golfo de México.

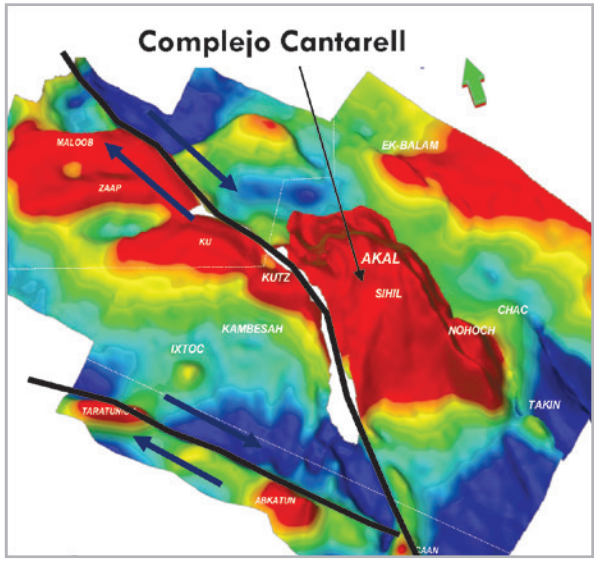

Figura 2. Marco estructural del área en estudio, donde se puede observar un dominio de fallas de desplazamiento lateral que provocan estructuras típicas transpresivas en escalón.

Descansando en franca discordancia angular, también se encuentra la secuencia sedimentaria *sin-rift*, constituida por limolitas, areniscas y conglomerados rojizos de la formación Todos Santos, a partir de la cual se iniciaron las primeras inundaciones del *proto océano,* caracterizado por sedimentos evaporíticos de sal y anhidrita de edad calloviana y terrígenos de edad oxfordiana. Finalmente, sobre esta sal se depositaron secuencias marinas carbonatadas, de plataforma interna a externa, con influencias locales por efecto de una tectónica vertical de la sal, sincrónica a la sedimentación, creando condiciones locales propicias para depósitos de alta energía. Los pozos de la Sonda de Campeche han permitido conocer lo que ocurre desde este nivel, en sentido vertical ascendente.

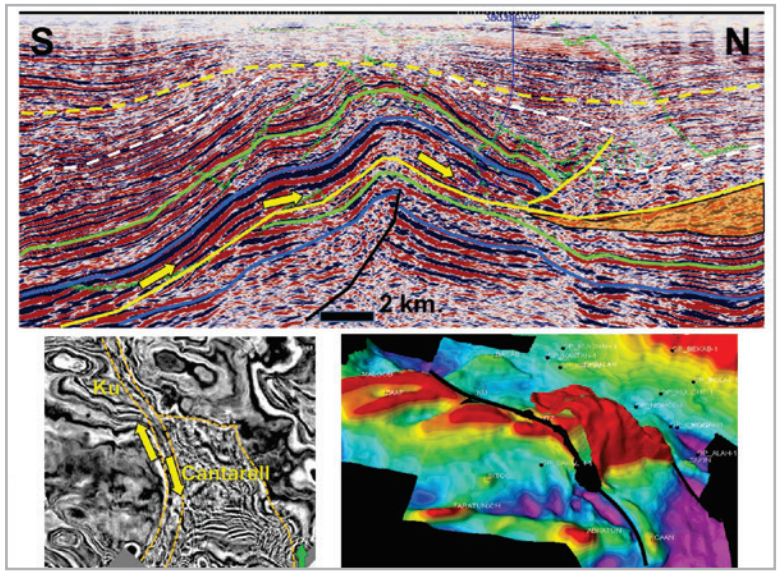

Figura 3. Estructura típica por efecto transpresivo, con cabalgadura del bloque superior Akal sobre el bloque inferior Sihil. Obsérvese la estratigrafía repetida en ambos bloques y entre ellos una falla que corre a lo largo de una zona dúctil (Modificado de Murillo y Figueroa, 2003).

El marco estructural de Sihil, área en estudio, se encuentra regido por una etapa de deformación de edad Mioceno, que se sobrepone a fallas de edad Jurásica, con un dominio de esfuerzo transpresivo, que da lugar a estructuras dispuestas en escalón como Maloob, Zap, Ku y Kutz, las cuales se ubican en el lado poniente de la falla de desplazamiento lateral derecha denominada falla Kutz, que separa estas estructuras de los campos del complejo Cantarell, en donde el efecto transpresivo provocó el cabalgamiento de Akal sobre Sihil.

Descubrimiento de Sihil

La historia del complejo Cantarell comienza en 1976, con el resultado exitoso del pozo exploratorio Chac-1, producto de una interpretación sísmica 2D y de manifestaciones superficiales de hidrocarburos. Los pozos perforados entre 1977 y 1980 permitieron definir los límites estructurales y estratigráficos de la parte de Cantarell. El desarrollo de los campos se inició a partir de 1979, enfocándose al bloque alóctono Akal, que contiene el mayor volumen de hidrocarburos. La existencia de un bloque autóctono fue conociéndose posteriormente con la perforación de pozos de desarrollo como el C-1035, primero de ellos, que se perforó entre 1981 y 1982, y que después de cortar una serie de bloques imbricados en el frente norte de Akal, alcanzó el Cretácico Superior Autóctono a una profundidad de 3,657 m.

Durante 1986 y 1987 se realizó el primer levantamiento sísmico 3D “Streamer”, que sustituyó a la anterior sísmica 2D. Con esta información se pudo definir con mayor exactitud la geometría estructural de los campos del Complejo Cantarell. Otro pozo, el Cantarell-1022, perforado en los años 1990-1991, penetró el Cretácico Superior del bloque Sihil en su flanco noroccidental, a la profundidad de 3810 m después de haber atravesado una secuencia del Jurásico Superior en el bloque alóctono.

Con la terminación del pozo C-3068 a principios de 2009, se descubrió una acumulación en el Jurásico Superior Kimmeridgiano, que dio lugar a la perforación de las localizaciones de desarrollo C-98, Sihil-19 y Sihil-5. Finalmente se perforó y terminó el pozo C-3026, que tuvo una función delimitadora al llegar a las facies de calizas compactas lagunares y resultar improductivo. Este hecho, aunado a la baja calidad de la información sísmica 3D disponible entonces, enturbiada por la yuxtaposición del bloque superior de alta velocidad, frenó el desarrollo de esa área que se consideraba ser de cuando mucho unos ocho kilómetros cuadrados.

Muy cerca de esa área, a ocho kilómetros hacia el noroeste, se perforó entre 2014 y 2015 la localización exploratoria Akal-301, que en su momento se propuso bajo un criterio puramente estructuralista. El pozo resultó improductivo por baja permeabilidad, aportando esporádicamente aceite ligero.

A su descubrimiento en 1998, Sihil generó grandes expectativas. Se pensó que sería un yacimiento gigante semejante a Akal, pero ante los acontecimientos comentados líneas arriba, esa visión inicial pronto se derrumbó. Sin embargo, debe insistirse en que Sihil posee la misma secuencia de horizontes geológicos que Akal: Brecha del Cretácico Superior Terciario Paleoceno (BKSTP), Cretácico Medio (KM), Cretácico Inferior (KI) y Jurásico Superior Kimmeridgiano (JSK). Por tal motivo, es lógico suponer que al ser Sihil el bloque autóctono que se mantuvo inmóvil ante los movimientos de la corteza terrestre, debe conservar un área estructural mayor que la del bloque activo o cabalgante, y expectativas similares.

Lo más que Sihil ha llegado a producir entre todos sus horizontes ha sido 140 mil barriles diarios, mientras que Akal, antes de ser sometido a mantenimiento de presión por inyección de nitrógeno sostuvo durante 210 meses un promedio de producción de 855 mil barriles diarios, seguido por un periodo de 42 meses con 1 millón 160 mil barriles diarios. Por otra parte, mientras que el horizonte JSK de Akal llegó a producir hasta 140 mil barriles diarios, el JSK de Sihil apenas llegó los 12 mil. Esta escasa producción provino de lo que siempre se creyó ser la cresta de la estructura, o sea la mejor zona del yacimiento desde el criterio estructuralista, cuando en realidad no era más que un pequeño bloque expulsado del cuerpo principal según queda demostrado hoy con este estudio.

Los pozos terminados en la formación Jurásico Superior Kimmeridgiano han permitido probar que en el entrampamiento de hidrocarburos existe una componente fuerte estratigráfica combinada con la parte estructural. En los casos de Akal y Sihil, las variaciones laterales de bancos oolíticos a facies lagunares marcan la diferencia en cuanto a productividad, ya que las facies lagunares presentan de baja a nula permeabilidad. Debido a esto, los criterios en la definición de prospectos exploratorios y de desarrollo deben llevar el criterio estratigráfico además del estructural. El resultado del pozo exploratorio Akal-301 se debió al criterio puramente estructuralista en el que se basó la definición de su ubicación.

Ahora se sabe que el yacimiento Sihil JSK está formado por bancos oolíticos, rodeados de facies compactas de origen lagunar, que no se distribuyen de manera continua y generalizada, sino discretamente, lo que hace más difícil su detección y evaluación.

La definición de estos cuerpos depende totalmente de la calidad de la información sísmica y el hecho de que ahora se disponga de nuevos procesos sísmicos, como la migración en profundidad (Reverse Time Migration, RTM), ha permitido aumentar notablemente la calidad de la imagen sísmica.

En el cuerpo principal de Sihil JSK no hay agua. Esta es una de sus fortalezas. Los pozos más profundos no han encontrado contacto alguno de agua. Su extensión estructural podría abarcar unos 80 kilómetros cuadrados, equiparable al área de Akal, que mide algo más de 120 kilómetros cuadrados. Esta presunción fue el apoyo de la propuesta de perforar la localización estratégica C-3011 que se comenta a continuación.

Propuesta de la localización C-3011

La oportunidad C-3011 se visualizó como producto de un diagnóstico integrado del Activo de Producción Cantarell, que contempló la detección de oportunidades de bloques adyacentes en diferentes campos, seleccionándose la de Sihil-JSK como una de las más promisorias. Esta oportunidad fue producto de la interpretación de información sísmica 3D, con procesamiento especial en profundidad denominada RTM.

La propuesta inicial de visualización de la localización fue con la denominación C-1014D, ubicada en la parte flanqueada de un alto estructural.

Por recomendación de la Dirección de Exploración se integró un grupo interdisciplinario formado por especialistas de las

áreas de exploración y producción de Petróleos Mexicanos, por la compañía que procesó la información sísmica RTM y por asesores externos, con la finalidad de calibrar el proceso sísmico de migración en profundidad RTM y con ello reducir el riesgo del modelo estructural a definir. A lo largo de la falla Sihil que separa a los bloques autóctono y alóctono hay un cuerpo intermedio formado por lutitas del Eoceno, de muy baja velocidad. Este cuerpo provoca una inversión de velocidad, ya que arriba de él existen cuerpos carbonatados de alta velocidad, que dificultan la definición clara del modelo estructural del objetivo JSK del bloque Sihil.

Con la calibración realizada se llevó a cabo una nueva interpretación que dio por resultado la confirmación de la localización C-3011, ubicada a escasos 200 metros hacia el poniente de la localización original propuesta C-1014D.

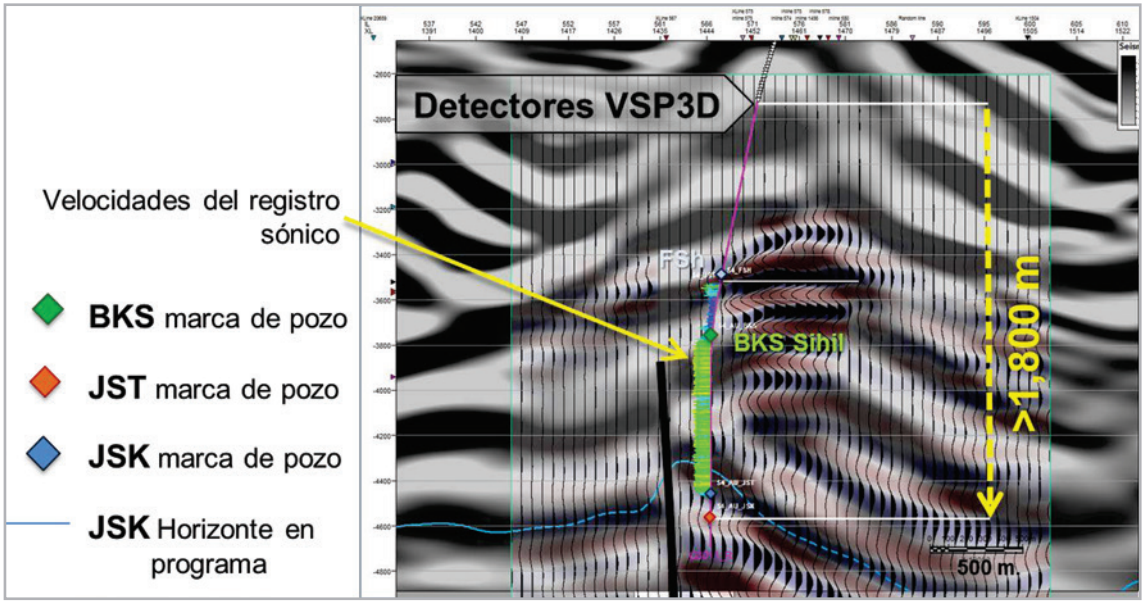

Figura 4. Línea sísmica 3D con el proceso especial en profundidad RTM, en la cual se muestra la ubicación de la localización C-3011, con registro VSP3D sobrepuesto.

El modelo estratigráfico pronosticado es una tendencia obtenida por las facies observadas en las localizaciones perforadas previamente del mismo objetivo.

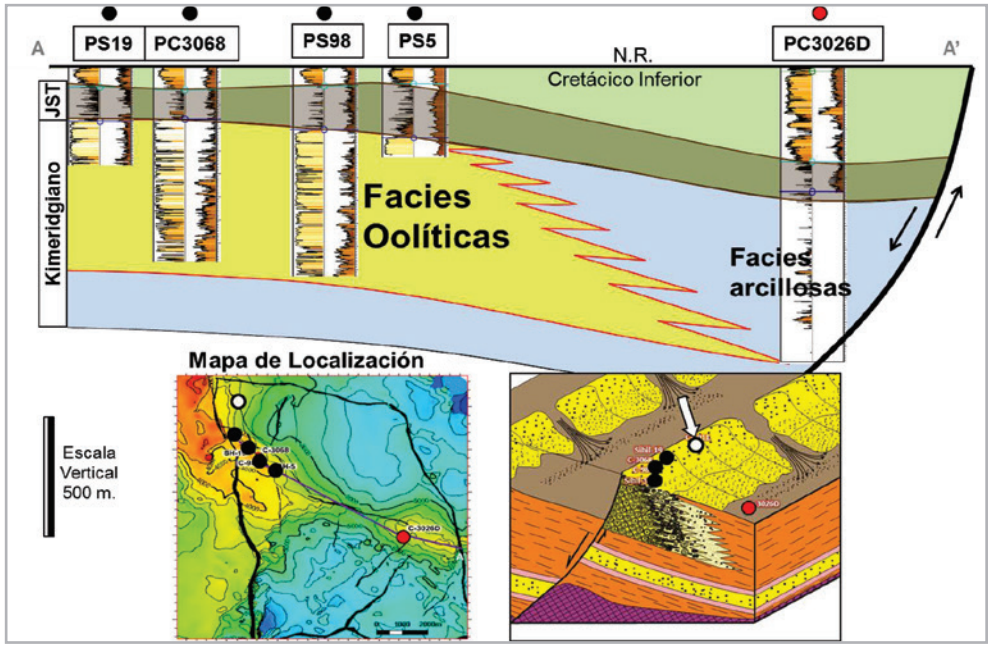

Figura 5. Modelo geológico propuesto para el área de la localización C3011 (Flecha); falla normal rotacional de edad Jurásico con desarrollo de medio graben y creación de condiciones de depósito de alta energía en el bloque alto de la falla, propicias para formación de facies oolíticas.

Expectativas de producción y rentabilidad económica

A continuación se presenta un panorama general sobre las expectativas de producción y rentabilidad económica de Sihil-JSK, y el volumen de actividades operativas que habría que realizar para su desarrollo, tomando en cuenta las probables reservas de hidrocarburos, el número de pozos, el número de plataformas, el número de equipos de perforación y las inversiones requeridas.

Para el cálculo de las reservas de hidrocarburos sólo se consideró un área de alrededor de 30 kilómetros cuadrados, de la que una vez descontadas las probables intercalaciones compactas se obtuvo un área neta de 24 kilómetros cuadrados (P_{50}) y un espesor neto de 259 metros (P_{50}). Para la porosidad se utilizó una distribución normal de media 6.5% y desviación estándar 1.5%; para la saturación de agua una función dependiente de la porosidad; para los pozos un ritmo de producción inicial de 3 mil a 10 mil barriles diarios (Sihil-19, 11,517 bd; Sihil-98, 9,158 bd; Sihil-5, 3156) y declinación de la producción de entre 12% y 48% anual.

Esto dio por resultado una reserva de aceite que va de 318 millones (P_{10}) a 988 millones de barriles (P_{90}) con mediana de 584 millones (P_{50}) y la distribución probabilista que se muestra en la **Figura 6**. Todos los percentiles aludidos de aquí en adelante se calcularon con datos ordenados de menor a mayor.

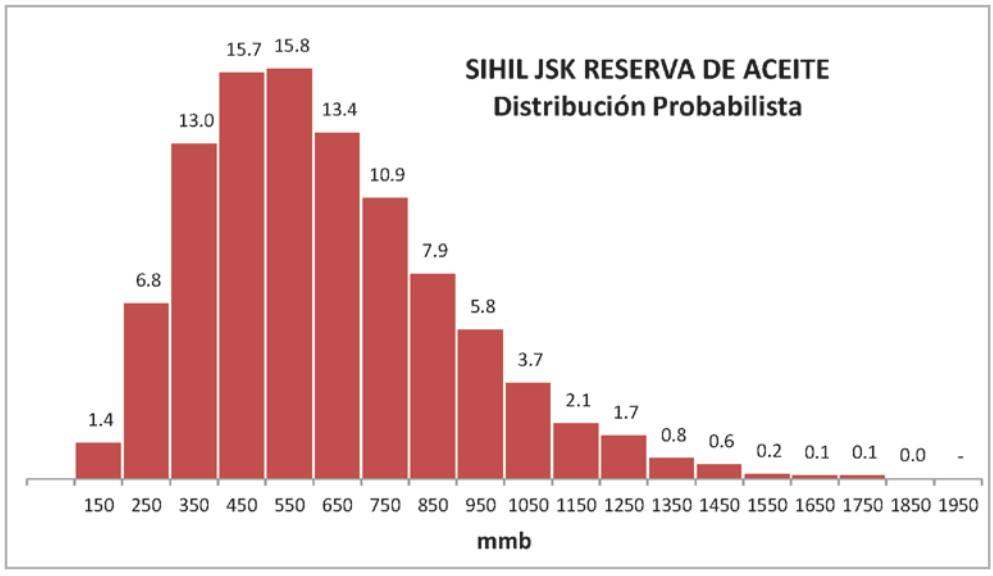

Figura 6. Distribución probabilista de la reserva que correspondería a un área bruta de apenas 30 kilómetros cuadrados.

Al tomar como casos análogos únicamente los pozos del pequeño bloque de yacimiento que fue expulsado del cuerpo principal, la cifra acumulativa de volumen de aceite esperada por pozo es del orden de 8.4 millones de barriles. Con esto, el número esperado de pozos oscila entre 32 (P_{10}) y 176 (P_{90}), con una mediana de 79 (P_{50}) y una media de 94.

Bajo un ritmo de desarrollo intenso, de unos 36 pozos por año, la banda de producción P_{10}-P_{90} podría oscilar entre 149 mil y 423 mil barriles diarios, con una P_{50} de 250 mil barriles diarios, **Figura 7**.

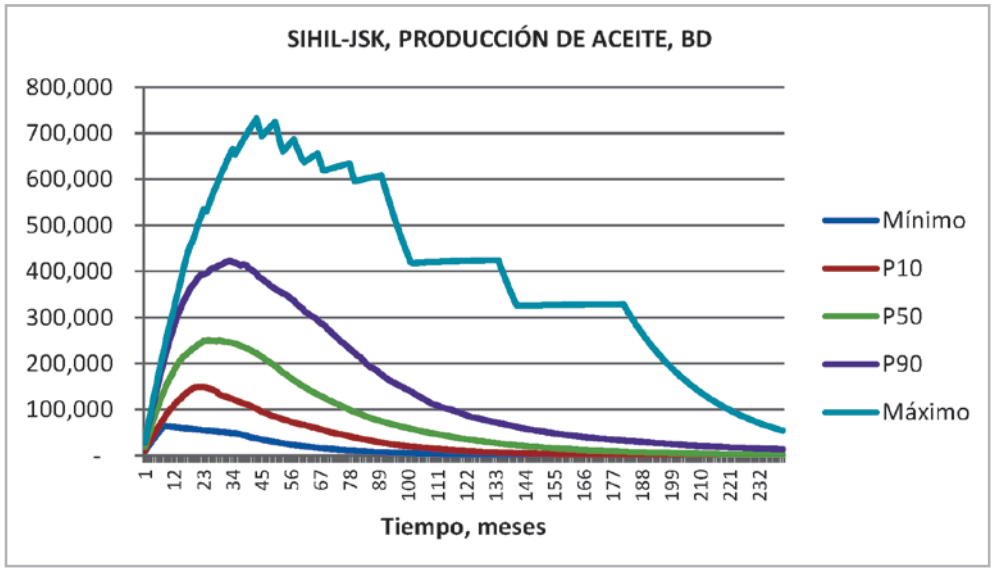

Figura 7. Perfiles de producción probabilistas que resultan de un esquema de desarrollo intenso.

Para medir la rentabilidad del proyecto se consideró el desarrollo del yacimiento con siete plataformas de perforación tipo octápodo, con capacidad conjunta de 84 pozos. El proyecto arrancaría con cuatro plataformas y un año más tarde se incorporarían otras tres. El ritmo de producción inicial por pozo sería, de acuerdo al rango mencionado arriba, de 6,500 barriles diarios, con una declinación de 30% anual.

Los pozos se diseñarían de acuerdo a su ritmo de producción, a la profundidad de su objetivo y a su columna estratigráfica. Serían esbeltos, rápidos de hacerse, seguros, confiables y de bajo costo, si optimiza su diseño, cementación, penetración de zonas depresionadas, control geológico y logística. Su construcción podría tomar en promedio cinco meses.

El pronóstico de producción indica que el ritmo de producción de aceite podría alcanzar 280 mil barriles diarios en el mes 62 y lograrse una cifra acumulativa de volumen de 652 millones de barriles al mes 240.

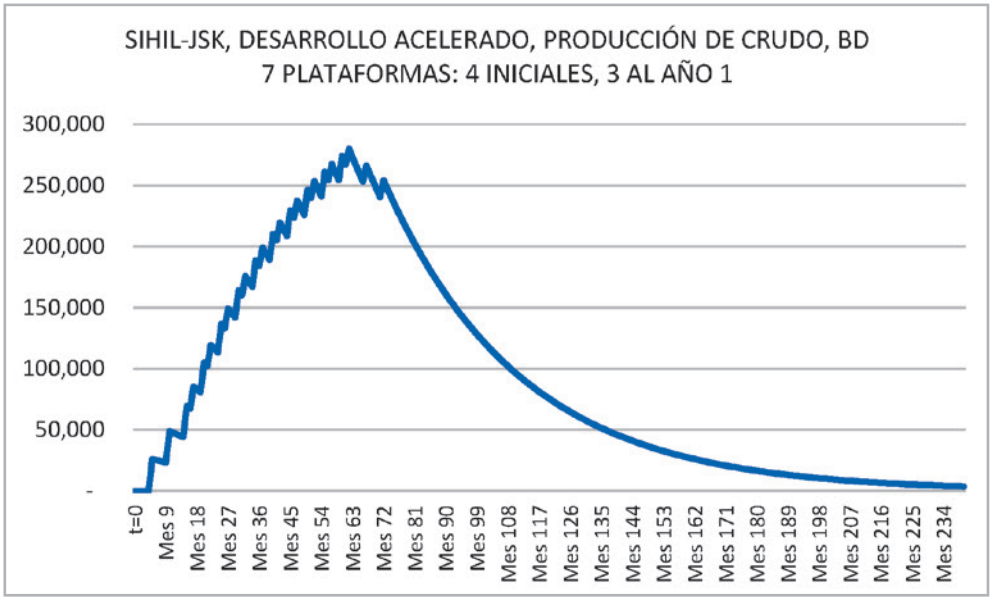

Figura 8. Perfil de producción determinista que corre entre las curvas probabilistas P10 y P90 que se tomó como base para la elaboración del proyecto de inversión.

Para el análisis de la rentabilidad económica se consideraron los datos siguientes: 100 millones de dólares (USD) para cada plataforma; 20 millones de USD para cada ducto; 30 millones de USD para cada pozo; 40 USD por barril como precio de venta del aceite; 2 USD por millar de pies cúbicos como precio de venta del gas; 1 USD/bpce, costo unitario de operación y mantenimiento, que considera gastos de BN más transporte y tratamiento de la producción de aceite y gas en un centro de proceso del Activo de Producción Cantarell; 1 USD/bpce como costo unitario de rehabilitación y mantenimiento de instalaciones superficiales; 1 USD/bpce como costo unitario de deshidratación y desalado; 15 años para la amortización de plataformas, ductos y pozos al ritmo de extracción de la reserva; y 6% anual como tasa de interés, **Figura 9**.

Los indicadores de rentabilidad resultantes son: VPN de 14,142 millones de dólares; VPI de 2,916 millones de dólares y VPN/VPI de 4.8.

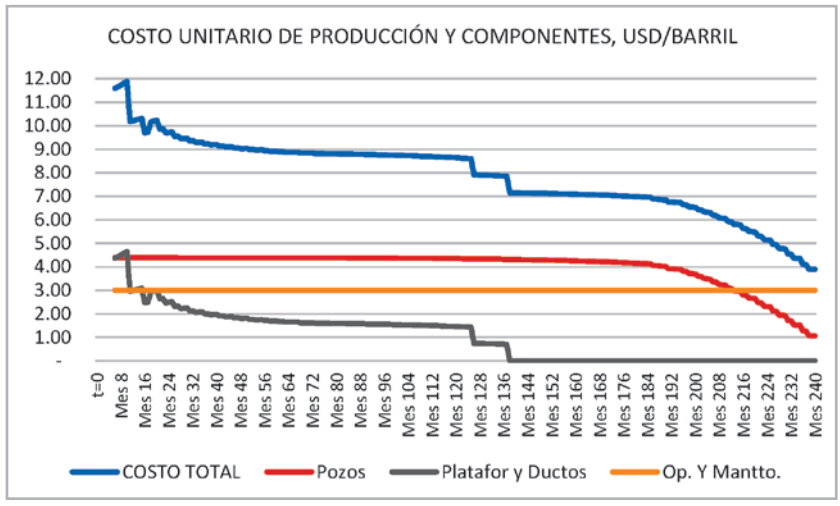

Figura 9. Costo unitario de producción que muestra la participación relativa de sus principales componentes.

El costo de producción resulta inferior al precio de venta en todo el horizonte de tiempo considerado. El indicador permite apreciar de inmediato la rentabilidad del proyecto si se considera como el número de veces que el costo de producción cabe dentro del precio de venta.

Perforación de la localización C-3011

El pozo fue desde un principio clasificado como estratégico, con objetivo fundamental de recabar información para probar el potencial de producción de un área nueva. Debería atravesar la formación JSK en su totalidad y llegado el momento, someterse a una prueba de alcance extendido.

En agosto 19 de 2015 dio comienzo la perforación desde la plataforma Akal-KL con el equipo auto elevable Tuxpan.

En enero 4 de 2016, a la profundidad de 4,527 metros, se tomó un registro VSP-WA (Vertical Seismic Profile Walk Away) que confirmó la tendencia estructural y estratigráfica previamente concebida del pozo, y que permitió realizar los ajustes a la columna programada. Mostró además que por debajo de la trayectoria trazada del pozo existía la posibilidad de encontrar una masa salina originadora de un paleo-alto, que ha controlado la sedimentación hasta el KI. Por estas condiciones favorables, era de esperarse que en el JSK estuvieran presentes zonas de sedimentación de alta energía productoras de bancos oolíticos. El posible espesor se redujo a 400 metros, como se había previsto para el caso de que la localización se ubicara en la cresta, **Figura 10**.

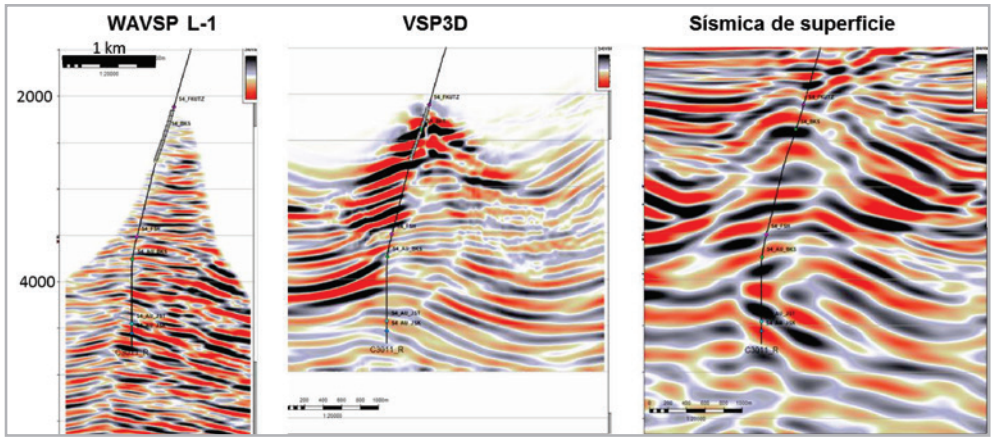

Figura 10. Información sísmica de pozo confrontándola con la sísmica de superficie.

En enero 30 de 2016, cuando habían transcurrido 164 días de iniciada la perforación y sólo faltaban dos días para atravesar totalmente la formación JSK de Sihil y con ello cumplir el objetivo pleno del C-3011, se suspendió la perforación. Ésta había avanzado apenas 134 metros dentro del JSK. Se habían perforado 4,837 metros y sólo faltaban 282 metros para llegar a la profundidad total programada de 5,119 metros. Fue aquí cuando se decidió la suspensión, dando como argumentos la tendencia a disminuir de la resistividad conforme aumentaba la profundidad, la poca impregnación de hidrocarburos, según la descripción petrográfica observada en las láminas delgadas obtenidas de un núcleo previamente cortado y la presencia de anhidrita, señal de la existencia de sal.

Debe insistirse, sin embargo, que la localización C-3011 tenía carácter estratégico, por lo que era muy importante que se definiera el límite vertical del yacimiento sin dejar lugar a dudas; además, de no encontrarse agua en el trayecto, debería incluso llevarse hasta el siguiente horizonte económico, que es el JSO.

Respecto de la creencia de que lo mejor del JSK está en su cima, que fue otro de los argumentos para suspender la perforación; vale recordar lo obtenido recientemente en el pozo C-2121, que produce en una unidad ubicada a 250 metros por debajo de la cima, y cuya resistividad oscila entre 10 y 50 ohms-m, como podría ser el caso del C-3011, según se desprende del registro Spectra Scan que se le tomó.

Durante la perforación y terminación, se observaron muchos signos favorables: presencia de hidrocarburos; ausencia de indicios de agua; gasificaciones frecuentes; buena porosidad en el núcleo cortado y exudación de hidrocarburos en superficie fresca y sin sabor salado; nivel de presas normal durante el corte del núcleo, sin alteración de las características reológicas y químicas del fluido de perforación, que mostrará incorporación de agua salada; parte media a inferior del núcleo con dolomía de buena porosidad e impregnación de regular a buena, con exudación de hidrocarburos al romperse la muestra.

Con respecto a que los valores de resistividad de 100-150 ohms-m mostraban tendencia a reducir hacia la parte baja, se observó, en efecto, que a la profundidad de 4800 metros desarrollados, disminuía a 10-20 ohms-m, coincidía con una tendencia arcillosa que se observaba en los rayos gamma, **Figura 11**. Sin embargo, un poco más abajo, al encontrarse un cuerpo limpio a 4,807 metros, la resistividad aumentaba de nuevo hasta los 800 ohms-m, bajando después, a la profundidad de 4,810 m, hasta los 30 ohms-m para luego volver a aumentar a los 4,825 metros a 300-400 ohms-m. Este comportamiento de ninguna manera indica un gradiente por la presencia de algún acuífero, dado que se necesita más sección cortada para establecer el comportamiento de todo el paquete JSK.

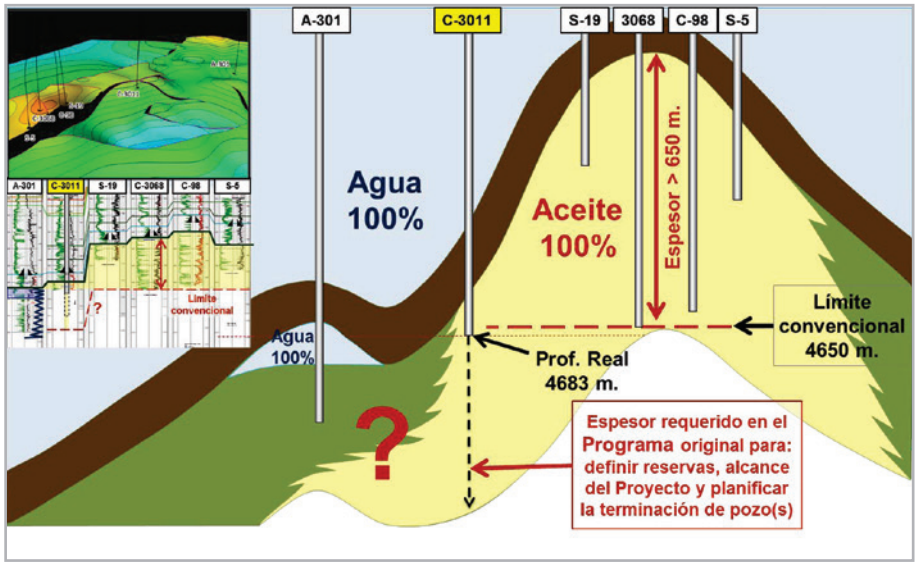

Figura 11. Correlación entre el pozo C-3011 y los pozos de desarrollo del campo Sihil-JSK para su comparación en características de electrofacies y sección esquemática ilustrando el límite convencional y potencial volumétrico.

La comparación con la resistividad de los otros pozos Sihil, mucho mayor, no es representativa, ya que fueron perforados con lodos base agua y registrados con herramientas de doble laterolog, mientras que en la localización C-3011 se utilizó lodo de emulsión inversa de alta salinidad y herramienta de inducción.

En febrero 14 de 2016, ya en la etapa de la terminación, al estar cambiando el lodo de 1.25 gr/cm^3 por salmuera de 1.28 gr/cm^3, el pozo se empezó a arrancar debido a lo cual se aumentó la densidad de la salmuera a 1.35 gr/cm^3. Parece ser que éste era el momento de terminar el pozo en agujero descubierto; sin embargo, se tomó la decisión de cambiar la salmuera por un lodo de mayor densidad, ocasionando con ello daños al yacimiento.

En marzo 1 de 2016, el flujo del C-3011 llegó a 98% de aceite de 25 ^{o}API, con pozo limpio antes de la estimulación matricial. El pozo estaba en agujero descubierto.

En marzo 3 de 2016 comenzó la estimulación en directo. Como se señala en el comentario del 14 de febrero, con la operación de pasar de lodo a salmuera y luego regresar al lodo, se perdieron las condiciones idóneas para la limpieza que debió hacerse más adelante, si es que se pensaba estimular.

Durante la estimulación no se consideró ningún tipo de limpieza de la formación, la cual se encontraba en seno de lodo; tampoco se consideró la limpieza de la roca para prepararla al ácido y realizar la estimulación selectiva con divergentes químicos y/o poliméricos, para garantizar la aplicación correcta en la zona de interés. Debido a que la estimulación no fue nitrogenada, el retorno de fluidos no fue el adecuado.

El yacimiento posiblemente fue dañado y había que limpiarlo con solventes antes de someterlo a cualquier otro tratamiento; por ejemplo con xileno y estabilizador de arcillas. Era inútil continuar con la inducción con nitrógeno sin esta operación de limpieza previa.

Por otra parte, de acuerdo al comportamiento del trazador, se infirió una anomalía en el espacio anular de la tubería de 9-5/8, que explicaba el flujo de agua a través del aparejo comunicado.

Conclusiones y recomendaciones

La propuesta de la localización estratégica C-3011 en sus diferentes etapas (visualización, conceptualización, definición), fue producto del trabajo de un equipo multidisciplinario colegiado de especialistas de exploración, producción, perforación y planeación de Petróleos Mexicanos, y asesores externos, lo cual marca un hito en la forma de trabajar este tipo de propuestas.

Con diferencias de profundidad explicables, el pozo C-3011 alcanzó su objetivo geológico, pues llegó a la cima del Jurásico Superior Kimmeridgiano y con ello comprobó el modelo geológico propuesto. Se encontraron las facies de roca almacén esperadas y se evidenció la buena porosidad e impregnación de aceite de densidad superior a 30 ^{o}API, confirmada por las manifestaciones frecuentes de gas c1 a c5 a nivel del objetivo en la etapa final de la perforación, aun cuando el pozo se perforó con un lodo de 1.25 gr/cm^3 contra el 1.15 gr/cm^3 utilizado en los otros pozos JSK de Sihil.

Las presiones observadas en el registro XPT, **Figura 12**, de entre 390 a 440 kg/cm^2 demuestran que este pozo se encontraba en un bloque con condiciones originales distintas a las observadas en los pozos de desarrollo del bloque, donde se asientan Sihil-5, Sihil-19, C-98 y C-3068, y con ello confirma plenamente la existencia de un área potencial no desarrollada.

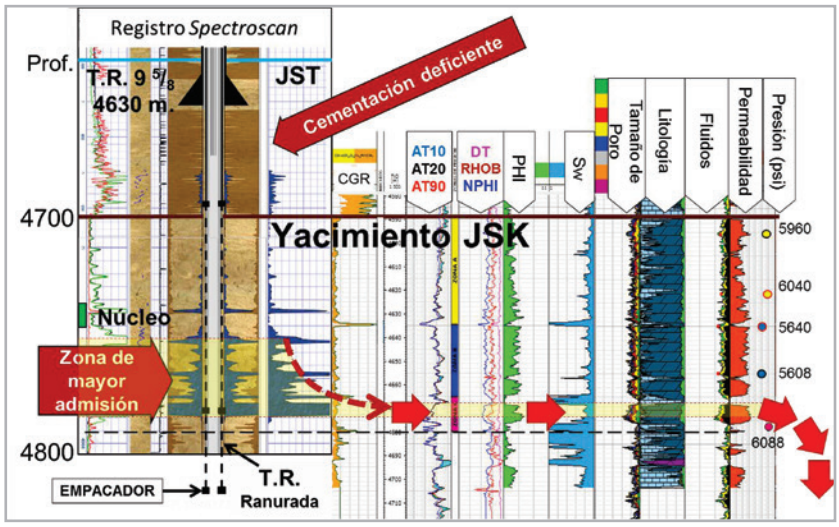

Figura 12. En el registro Spectra Scan se observa la mayor admisión en la zona C (parte inferior del pozo), que coincide con un cuerpo poroso intercalado entre zonas compactas hacia donde se fueron los productos de estimulación.

Durante la etapa de terminación, cuando se desplazó el lodo de 1.25 por salmuera de 1.35, el pozo manifestó escurrimiento ligero y quema de gas. Este pudo ser el momento adecuado para terminar el pozo como productor en agujero descubierto.

Después de la prueba de admisión y de la estimulación matricial, las condiciones respecto al contenido de aceite cambiaron totalmente, presentándose aceite degradado de muy baja densidad (10-15 °API) que probablemente provenía de estratos superiores del Cretácico, acompañado de un aumento gradual de las condiciones de salinidad del agua hasta llegar a 140 mil ppm, todo lo cual puede estar indicando una comunicación entre diversos horizontes a través del espacio anular.

Es recomendable realizar un análisis causa-raíz (ACR), a fin de determinar las causas por las cuales no se alcanzó el objetivo económico del pozo C-3011.

El ABC de la administración integral de yacimientos de PEP menciona que el control de la producción de agua constituye un desafío importante para los especialistas en productividad de pozos, y que es indispensable conocer con exactitud la procedencia y origen del agua. Con esto se concluye que para dimensionar el acuífero, en caso de existir, era necesario penetrar completamente el paquete estratigráfico económico del JSK.

La debilidad principal de este proyecto radica en la capacidad pobre de la sísmica actual para definir con precisión la distribución de los bancos oolíticos y sus facies porosas, por lo cual los pozos podrían caer fácilmente en zonas compactas. Ante esto es necesario intensificar la toma de nueva información hacia la sísmica 3D con enfoque a producción, generalizar los estudios de tomografía sísmica, tomar perfiles sísmicos verticales tridimensionales (VSP-3D), promover los registros sísmicos de lapsos (time lapse) y llevar a cabo estudios geoquímicos de producción.

Este proyecto trae consigo retos fuertes y variados. La tecnología de perforación, por ejemplo, deberá resolver el problema de la penetración de zonas depresionadas, como el casquete gaseoso de Akal. Por otra parte, deberán ensayarse esquemas de explotación que permitan lograr factores de recuperación realmente elevados. Dada su situación de confinamiento en compartimentos de menor volumen relativo, podrían ensayarse, tras el análisis formal de las propiedades físicas de los hidrocarburos, esquemas de reinyección del gas producido, complementado con volúmenes de gas natural provenientes de estratos superiores del Terciario que pudieran evaluarse a través de un estricto control geológico de la perforación de cada pozo nuevo incorporado al desarrollo.

En la **Figura 13** se observa la correlación estratigráfica del pozo C-3011 con los pozos del campo Sihil, destacando el considerable espesor no penetrado, y por lo tanto no evaluado, mismo que se confirma con la interpretación del VSP.

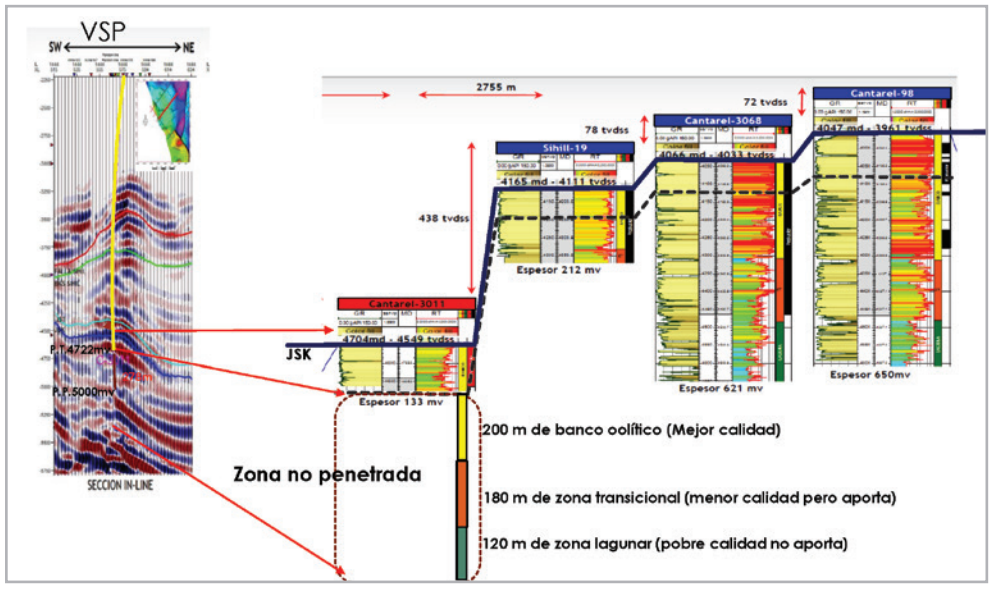

Figura 13. Objetivo JSK no evaluado totalmente.

Las expectativas del proyecto Sihil-JSK son ahora más atractivas que antes, pues ya quedó confirmada la presencia de acumulaciones de hidrocarburos a alta presión en esa formación. Por lo tanto, el proyecto no debe ser relegado, debe reponerse el pozo C-3011 en caso de ser posible, además de proponerse pozos estratégicos adicionales para confirmar el potencial visualizado. De entre todos los proyectos de PEP, éste es quizás el único que podría aportar a bajo costo y a plazos muy cortos, importantes volúmenes frescos a la producción de hidrocarburos del país.

Semblanza de los autores

Héctor Salvador Salgado Castro

Especialista en ingeniería de yacimientos y administración de activos; 32 años de ejercicio profesional.

Licenciatura y Maestría en Ingeniería Petrolera por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Maestría en administración de negocios del programa Universidad del Carmen-ITESM-Tulane University. Diplomados en IPADE, Universidad de las Américas, British Petroleum y Statoil.

Coordinador de diseño de explotación del Activo Ek-Balam. Coordinador de diseño del Activo Integral Ku-Maloob-Zaap. Administrador del Activo Integral Bellota-Jujo. Gerente del Proyecto de Desarrollo Ayatsil-Tekel. Administrador del Activo de Producción Cantarell, cargo actual.

Jaime Javier Ríos López

Especialista en Geociencias; 27 años de ejercicio profesional.

Licenciatura en ingeniería geológica y maestría en geología petrolera por el Instituto Politécnico Nacional. Programa de perfeccionamiento directivo del IPADE. Autor y coautor de más de 20 artículos técnicos publicados en revistas especializadas de exploración y explotación de hidrocarburos de la AIPM, AMGP, AAPG y CSPG. Poseedor de registros de derechos de autor de dos metodologías técnicas y de un libro en temas de caracterización de yacimientos. Coordinador de geociencias del Activo de Producción Cantarell, cargo actual.

Víctor Alfredo Hernández Mendoza

Especialista en geociencias de explotación de yacimientos; 36 años de ejercicio profesional.

Licenciatura en ingeniería geológica por el Instituto Politécnico Nacional y maestría en exploración de recursos energéticos del subsuelo por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Luzbel Napoleón Solórzano Zenteno

Especialista en ingeniería de yacimientos, planeación del desarrollo de campos y evaluación de proyectos de inversión; 51 años de ejercicio profesional.

Licenciatura en ingeniería petrolera y maestría en ingeniería hidráulica por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Graduado del programa especial de Formación de Profesores de Matemáticas de la Facultad de Ciencias de la UNAM.