

PROSPECTOS DE EXPLORACIÓN CERCANA AL CAMPO MADURO. CONSIDERACIONES ACERCA DE TRAMPAS RELACIONADAS A MAGMATISMO. UNA EXPERIENCIA EXITOSA EN EL CAMPO SHUSHUFINDI (ECUADOR)

Agustín Paladines¹, Christian Gordon¹, Jean-Paul Lafournère¹, Juan C. Rodríguez¹, Daniel Pecuch¹,
Angélica Vargas¹, Jean-Pierre Bourge¹, Manuel García¹, Michelle Naranjo¹, Jorge Vega¹,
Johanna Navarrete¹, Andreas Suter², Gustavo Marín², Jorge Dután³, Angel Villavicencio³

1: Schlumberger del Ecuador PTE - Consorcio Shushufindi, Quito, Ecuador. abaranova@slb.com, carmas@slb.com, lafournere1@slb.com, jcrodriguez@slb.com, dpecuch@slb.com, avargas@slb.com, bourge1@slb.com, mrodriguez108@slb.com, mleon14@slb.com, jtorres37@slb.com, jguerra4@slb.com

2: Schlumberger del Ecuador SPM - Consorcio Shushufindi, Quito, Ecuador. suter3@slb.com, gmarin@slb.com

3: Petroamazonas, Quito, Ecuador. jorge_dutan@petroamazonas.ec, angel_villavicencio@petroamazonas.ec

Palabras clave: **Caracterización sísmica 3D, lacolito, trampa, sincronía, producción**

ABSTRACT

Near mature field exploration prospects. Issues about magma-related traps. A successful experience in Shushufindi Field (Ecuador)

World-class Shushufindi-Aguarico field, located in the Oriente basin of Ecuador, is a complex fault-related anticline structure in production since 1972 with a STOOIP of about 3.7 billions BOE and significant additional development potential.

In spite of being nowadays a somehow mature operation, near field exploration prospects were still recently identified, conceptualized and developed to withstand the drilling stage at an acceptable risk. The existing 3D seismic covering the area has been thoroughly reprocessed to obtain pre-stack depth migration imaged cubes as well as seismic facies and petrophysical volumes from pre-stack seismic inversion routines.

The integration of this new set of information allowed to revisit a feature west of Aguarico, related to late cretaceous magmatism regionally known in the basin. The seismic reprocessing was key to flip over the highly risky previous trap concept, and evolve it into a new drillable prospect, which was successfully put into production, showing initial rates and pressures that surpassed by far the original expectations.

This paper discusses the most relevant geological, geophysical and production engineering considerations taken into account as well as lessons learned in the different stages, while gaining knowledge and confidence in the prospect.

Last but not least, this paper states the importance of the lacolithe-related trap as near field exploration targets within the Aguarico-Shushufindi field, adding reserves and incremental production from reservoirs at original pressure conditions.

INTRODUCCIÓN

El campo Aguarico-Shushufindi se ubica en el centro-norte de la cuenca Oriente (Figura 1) y actualmente representa aproximadamente el 15% de la producción total del Ecuador. Descubierta en 1972 tiene un estimado de 3700 millones de barriles de petróleo in-situ y alcanzó su producción máxima en 1986 con 125.000 barriles de petróleo. Desde entonces, el campo ha estado en declinación, alcanzando los 43.000 barriles de petróleo en enero del 2012, con un factor de recobro de 30%.

En febrero del 2012, el estado ecuatoriano firma un contrato de servicios específicos con el Consorcio Shushufindi, con la finalidad de contrarrestar esta caída de producción y revitalizar el campo Aguarico-Shushufindi. A Mayo 2014, este produce 75.000 barriles de petróleo diarios. Esta importante alza en la producción se la alcanzó a través de la perforación de 64 pozos nuevos, tanto “*in-fill*” como de desarrollo y avanzada en zonas no exploradas del campo y la realización de 50 reacondicionamientos, entre los que se tiene apertura de nuevas zonas, estimulación por fracturas, terminaciones duales y terminaciones inteligentes.

El campo Shushufindi-Aguarico cuenta en la actualidad con 230 pozos, de los cuales 145 son productores, 25 inyectores y reinyectores, una veintena en reacondicionamiento o en espera de reacondicionamiento y el resto, abandonados, Paladines *et al.*, (2013).

Adicionalmente a este historial, se han identificado recientemente, áreas de exploración/ desarrollo dentro del bloque Shushufindi. En particular, el área objeto de este trabajo, está ubicada al oeste de la zona norte (Aguarico) y es una acumulación asociada a una trampa generada por la presencia de un intrusivo ígneo. El pozo Aguarico-029D perforó este nuevo *play*, confirmando la viabilidad comercial de este nuevo tipo de trampa dentro del complejo Aguarico-Shushufindi.

GEOLOGÍA

La cuenca “Oriente” ecuatoriana, es parte de una cuenca trans-arco de edad Mesozoico-Cenozoico asociada a la orogenia andina de edad Cretácica-Terciaria. Las trampas estructurales actuales,



Figura 1. Ubicación general del campo Shushufindi.

fueron creadas mayormente por deformación compresiva de los Andes, con rejuvenecimiento de paleo-rasgos. Las trampas consisten principalmente de anticlinales fallados o estructuras desarrolladas a partir de rasgos positivos del basamento.

El campo Aguarico-Shushufindi a nivel de los horizontes Cretácicos, es un anticlinal asimétrico de bajo relieve (1-2 grados de buzamiento regional) relacionado a un complejo sistema de fallas de tipo transpresivas. Tiene aproximadamente 33 km de longitud en dirección norte-sur y 7 km de ancho en dirección este-oeste. Este anticlinal está formado por tres culminaciones: Al norte el alto Aguarico con un cierre estructural de 220 pies, al centro y sur, la estructura Shushufindi con un cierre estructural de hasta 370 pies. Shushufindi se encuentra limitado al este por una falla discontinua de dirección norte-sur del tipo *strike-slip*. Esta falla es considerada parcialmente sellante.

El Pre-Cretácico está dominado por un sistema de *horst and graben*, el cual tuvo influencia directa en el condicionamiento de la secuencia sedimentaria suprayacente y en los ambientes de depósito del cretácico (Figura 2).

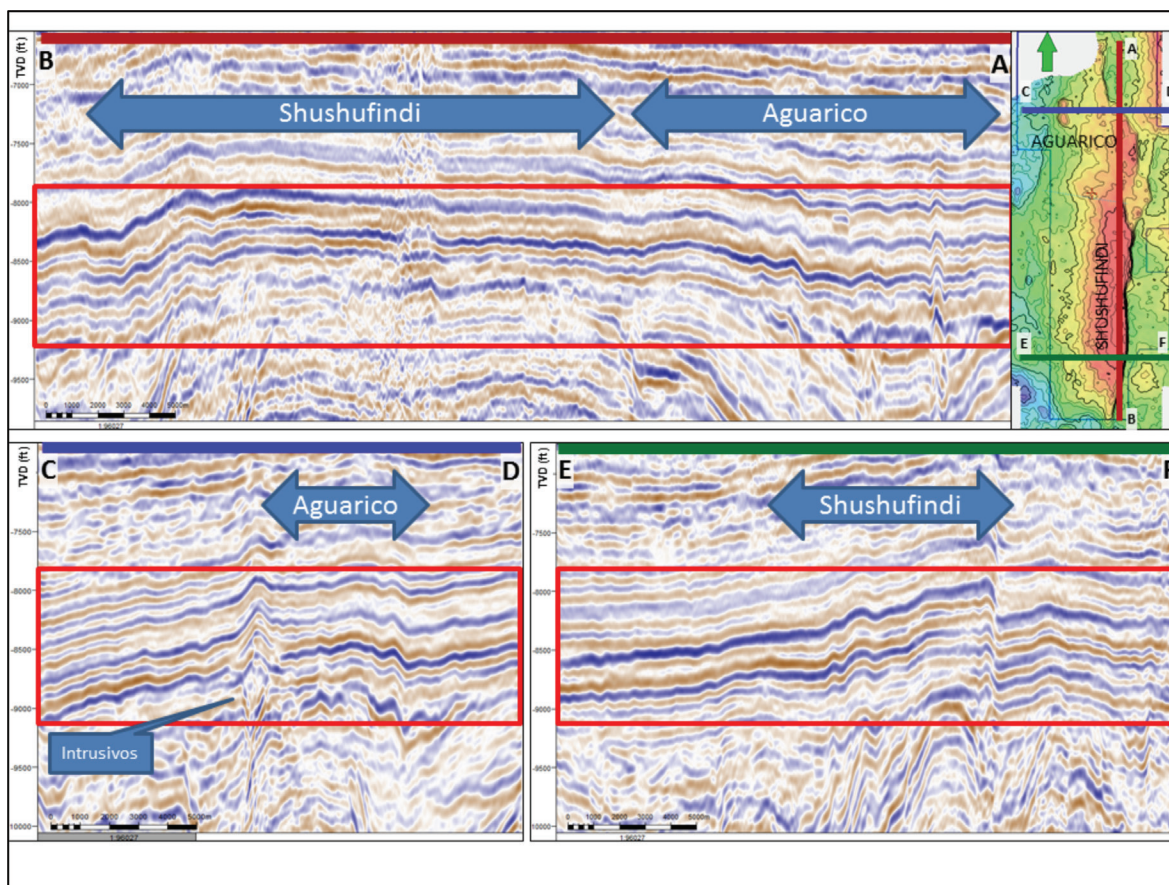


Figura 2. Líneas sísmicas esquematizando la estructura de Aguarico-Shushufindi. Los rectángulos rojos indican la zona de interés petrolero.

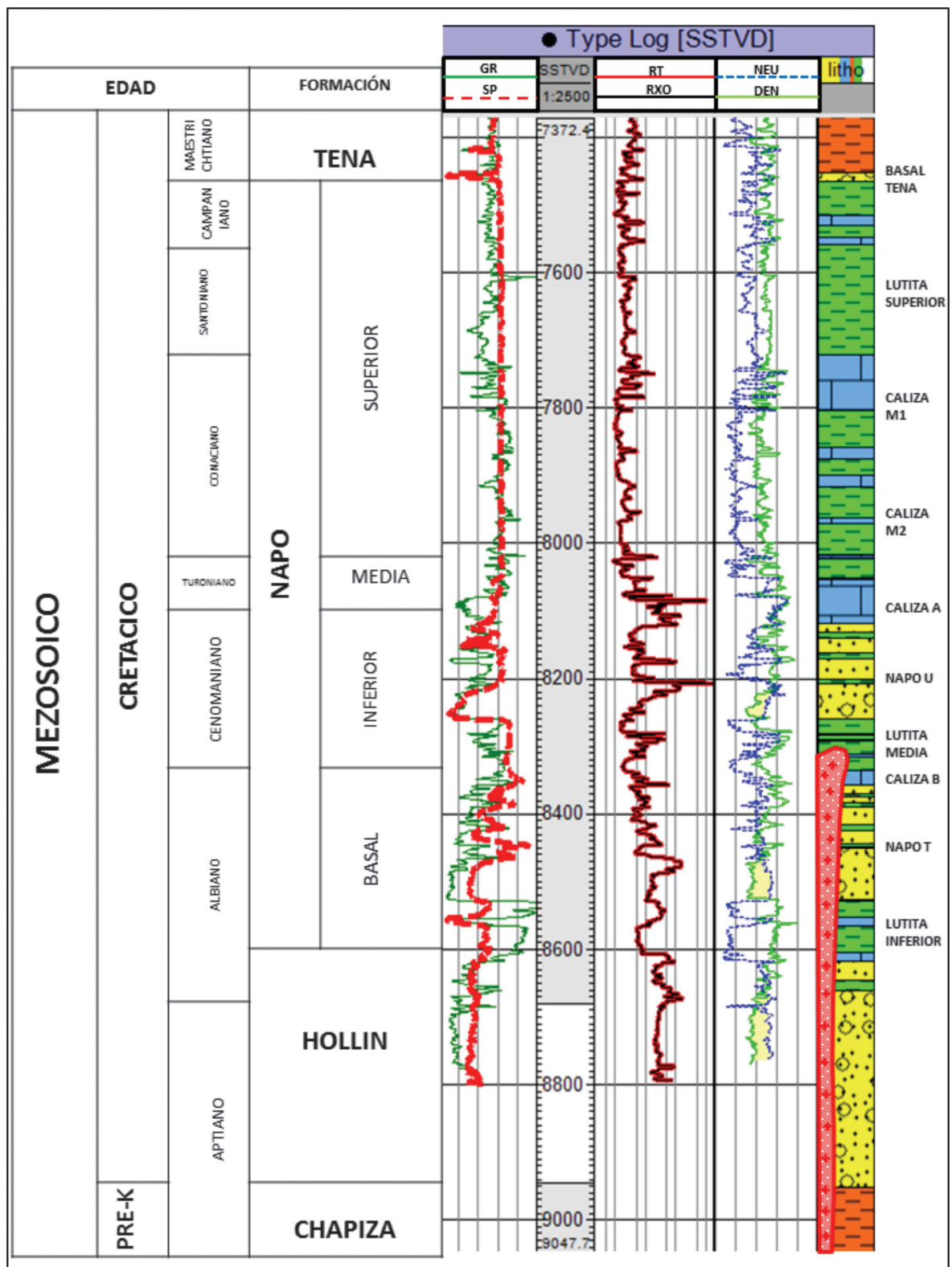


Figura 3. Registro tipo de la Cuenca Oriente del Cretácico para el área Aguarico-Shushufindi.

En la Cuenca “Oriente” los principales objetivos petroleros se encuentran dentro de las formaciones Hollín y Napo del Cretácico. Seis diferentes reservorios clásticos están presentes, estos son: Hollín, Napo T, Napo U, Napo M2, Napo M1 y Basal Tena. Estos reservorios consisten en varias secuencias transgresivas-regresivas relacionadas a los cambios eustáticos del nivel del mar y están compuestos por sucesiones de paquetes fluviales, deltaicos y estuarinos al este, que progredan a ambientes marino somero hacia el oeste. El cambio de espesor en dirección este-oeste de los reservorios contribuye a la formación de trampas estratigráficas.

En el campo Aguarico-Shushufindi, la producción proviene de los reservorios Napo T, Napo U y en menor escala, de Basal Tena. Las areniscas masivas de la formación Hollín se encuentran presentes en el área, sin embargo, no contienen petróleo. Los reservorios Napo T y Napo U están representados en el campo por depósitos de estuario y marino somero y han sido subdivididos en T Inferior, T Superior, U Inferior y U Superior respectivamente (Figura 3).

Ambas unidades Napo U Superior y Napo T Superior, están formadas por intercalaciones de areniscas y lodolitas depositadas en un ambiente marino somero. Las barras de arenisca cuarzosa-glauconítica, normalmente se encuentran encerradas dentro de secuencias de lodolitas calcáreas, por lo que generalmente tienen una extensión lateral limitada y poco soporte de presión.

Las unidades Napo U Inferior y Napo T Inferior, representan los principales yacimientos del campo y están compuestas por areniscas masivas estuarinas y marinas. Contienen el 90% del petróleo *in-situ* de Shushufindi.

Con respecto a la actividad magmática de la cuenca, un mecanismo de *slab roll-back*, asociado con la migración lateral y vertical de magma astenosférico, facilitó la generación del volcanismo alcalino intra-placa en la Cuenca Oriente Cretácica, a partir de la cesación de los procesos de subducción (~130-120 Ma). El *rift* pre-Cretácico ejerció un control fundamental en la generación de estos magmas, actuando como “*thin-spots*” litosféricos. En la Cuenca Oriente, la inversión tectónica a partir del Turoniano (~90 Ma), dio lugar a la reactivación en transpresión de las estructuras extensivas pre-existentes, originando la migración hacia el S-SW de la actividad magmática, y siguiendo la dirección del Corredor Sacha-Shushufindi, Barragán y Baby, (2004) (Figura 4).

Indican también que en este magmatismo, las facies extrusivas están caracterizadas predominantemente por conos de tobas y *maars* formando centros volcánicos monogenéticos, en tanto que los cuerpos ígneos intrusivos equivalentes, están caracterizados por *sills* diabásicos-gabróicos y diques basálticos. Los mismos fueron emplazados a varios niveles estratigráficos en la serie cretácica, Barragán y Baby, (2004).

Estos cuerpos intrusivos presentes en la zona de Vista-Shushufindi (Figura 4), representan potenciales entrapamientos y fueron el objetivo principal en la perforación del pozo Aguarico-029D.

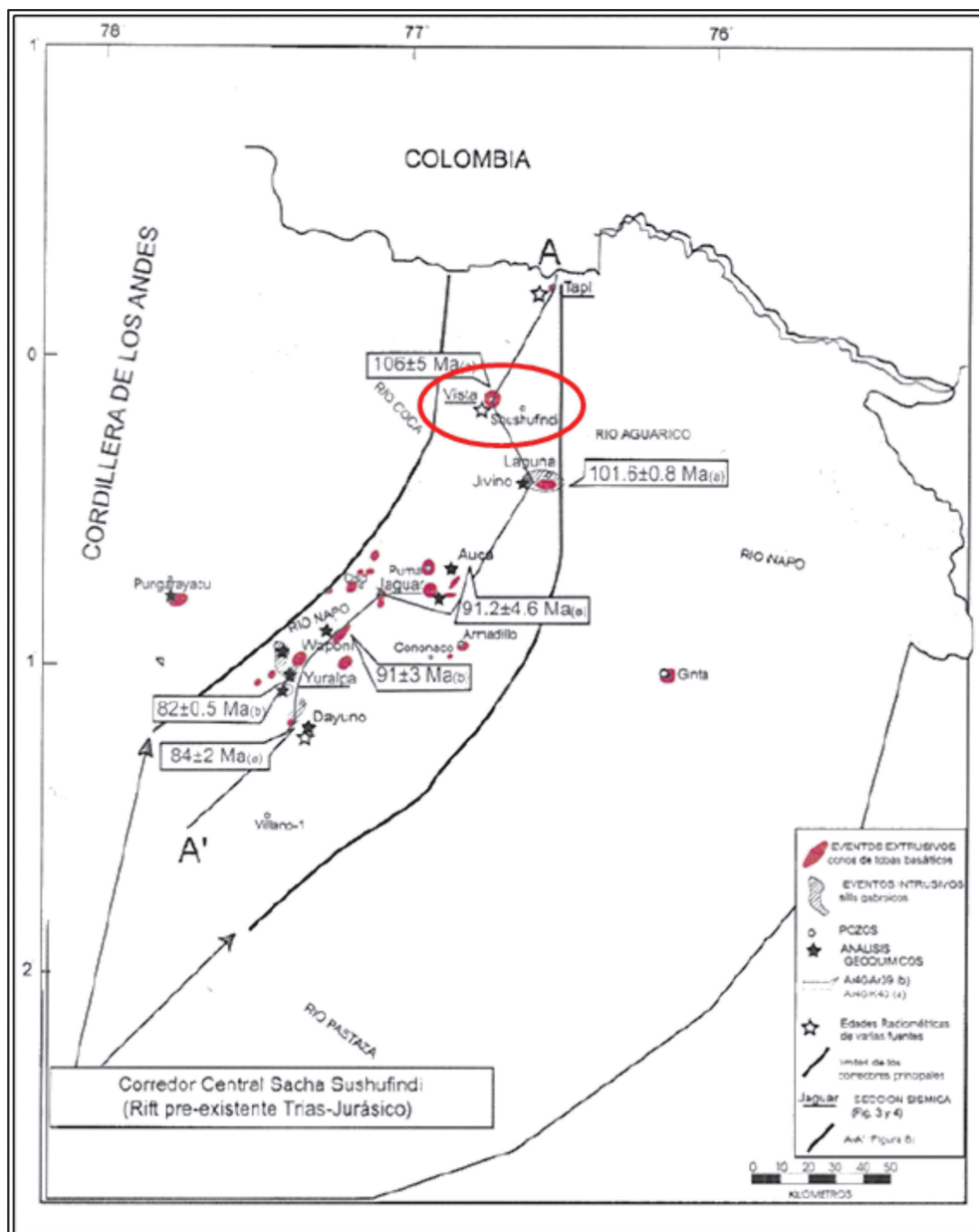


Figura 4. Distribución geográfica y localización de los eventos extrusivos e intrusivos cretácicos a lo largo de la Cuenca Oriente. Se identifican las diferentes muestras analizadas (análisis geoquímicos y radiométricos) y la zona de estudio. Modificado de Barragán y Baby, (2004).

CONSIDERACIONES ESTRUCTURALES

Como se explicó, la presencia de cuerpos ígneos está documentada en la zona. En particular para el noroeste de Aguarico, la sísmica 3D existente, procesada originalmente en 2003, permite interpretar rasgos complejos en la señal acústica, en relación a la instalación de ígneos en los intervalos Cretácicos e infrayacentes.

No obstante, la calidad de la imagen sísmica original, no permitía una interpretación suficientemente clara y unívoca de la zona afectada, lo cual conllevaba a un riesgo inherente a la incertidumbre del modelo geológico más plausible que representara la zona de interés. Por ejemplo, no era posible identificar el tope/base del intrusivo sin ambigüedad y por lo tanto, en qué medida podía estar afectando continuidad y presencia de los niveles reservorio. Estas consideraciones pesaron en la postergación de la perforación de un pozo, hasta tanto se contara con la información sísmica reprocesada.

Comenzando en 2012, la información sísmica fue reprocesada a partir de registros de campo, en una secuencia integral que comprendía migración pre-apilado en tiempo y profundidad con anisotropía, inversión de traza pre-apilado y caracterización de reservorio en términos de *rock-type* y propiedades petrofísicas, con notables mejoras respecto del dato histórico (Figura 5).

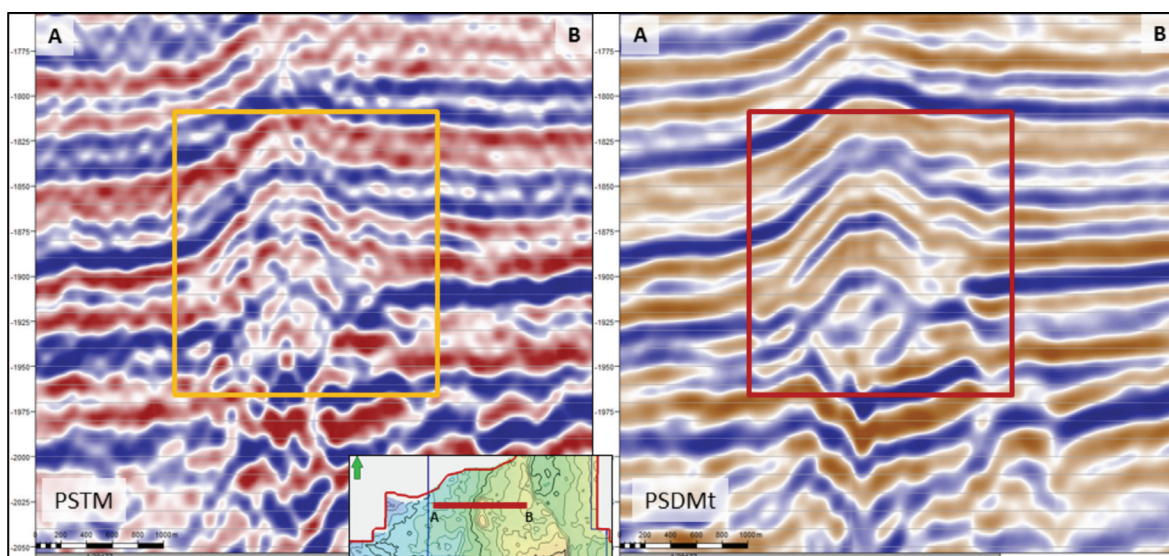


Figura 5. Información sísmica original migrada en tiempo pre-apilado (izq.) vs. reprocesada con migración pre-apilado en profundidad (der.): La mejora de la imagen, permitió la ubicación conveniente de un pozo exploratorio con un riesgo geológico aceptable.

La mejora e integración de esta nueva información permitió reevaluar el área a los efectos de exploración y desarrollo, ya que fue posible disminuir los riesgos relacionados a los elementos que conforman el concepto de trampa (estructura, reservorio, sellos, carga, etc), incluyendo un análisis del *timing* de la misma a los efectos de confeccionar una “carta de eventos” y determinar su factibilidad y viabilidad.

Es así que el pozo Aguatico-029D considerado de avanzada, probó una trampa de tipo estructural asociada a un intrusivo. El objetivo principal de este pozo fue el yacimiento Napo U, en tanto que Basal Tena, dada su posición estructural y al igual que las calizas de la Napo, las cuales podían

estar alteradas y asociadas a fracturamiento, se presentaron como objetivos secundarios del pozo. Napo T y Hollín, los cuales están bajo el intrusivo, fueron considerados objetivos investigativos.

La ubicación del Aguarico-029D, combinó la mayor cantidad de objetivos posibles para definir su relevancia y de igual manera, para obtener información del tamaño de cada potencial yacimiento en este sector del campo.

El intrusivo presente en el área tiene un desarrollo complejo según se puede ver en las vistas 3D y secciones sísmicas mostradas a continuación (Figuras 6, 7 y 8).

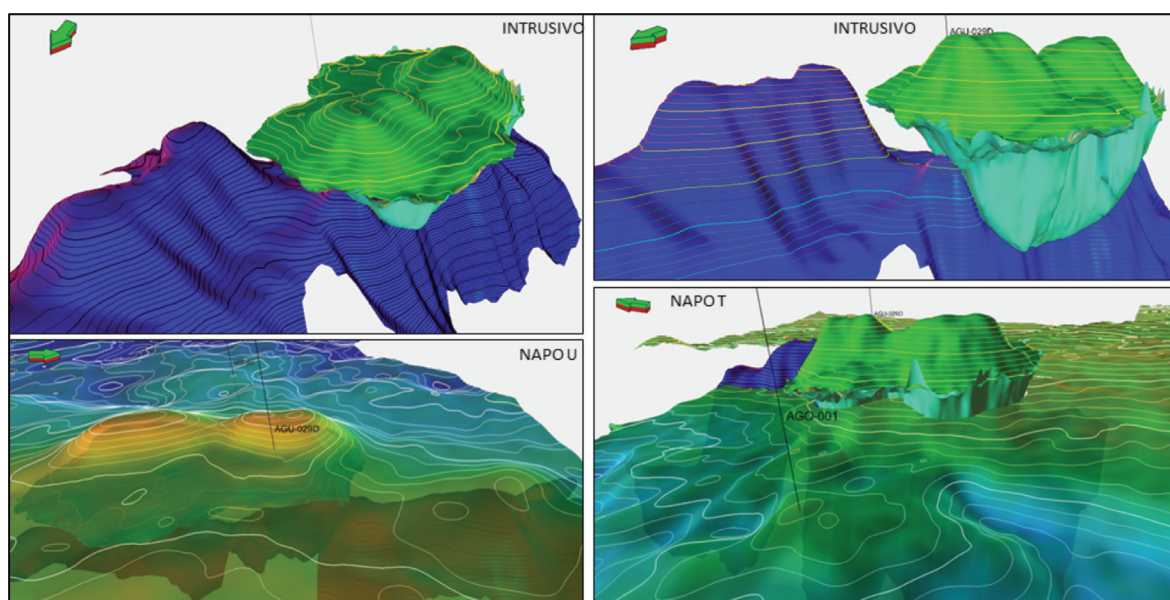


Figura 6. Vistas 3D: Arriba: cuerpo principal del intrusivo (verde) y relación con el apófisis y raíz (azul). Abajo: Napo U estructurado por el intrusivo (Izq.) y Napo T intruído, pero sin estructurar (Der.).

El intrusivo, posee un cuerpo principal, por la característica de haberse instalado dentro de los reservorios Cretácicos (en verde en la Figura 6), masivo y ligado a otro cuerpo en profundidad, instalado en sedimentos pre-cretácicos mayormente, si bien afecta los niveles Napo T hacia el norte del cuerpo principal (Figura 6 abajo derecha). El conjunto, está ligado a una “raíz” o vía de instalación del cuerpo ígneo, que se relaciona a fracturas en profundidad, en sintonía a lo explicado por Barragán y Baby (2004), según se puede apreciar en la sección sísmica de la Figura 2 abajo izquierda.

El cuerpo principal, que se podría describir como un “lacolito”, intruye de manera tal que genera un alto estructural del tipo anticlinal con eje principal Norte-Sur y dos culminaciones, Norte y Sur respectivamente, de flancos Este-Oeste asimétricos, siendo el Este un poco menos abrupto y más extendido, en concordancia con el mayor desarrollo del intrusivo en esa dirección, respecto de la posición de su “raíz” (Figura 6).

Este lacolito, estructura las rocas suprayacentes con pliegues asimétricos, afectando principalmente el intervalo desde Lutita Media del Napo Inf., los reservorios de Napo U, hasta Caliza A

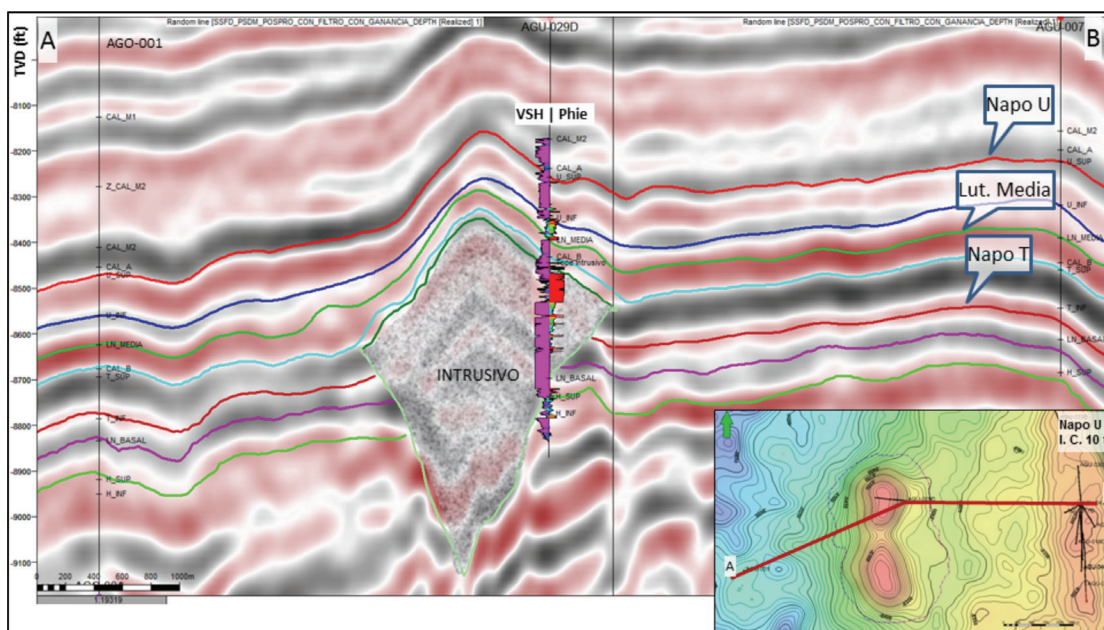


Figura 7. Sección sísmica compuesta con la orientación de la pendiente regional. Se observa el corte transversal de la culminación Norte del intrusivo principal.

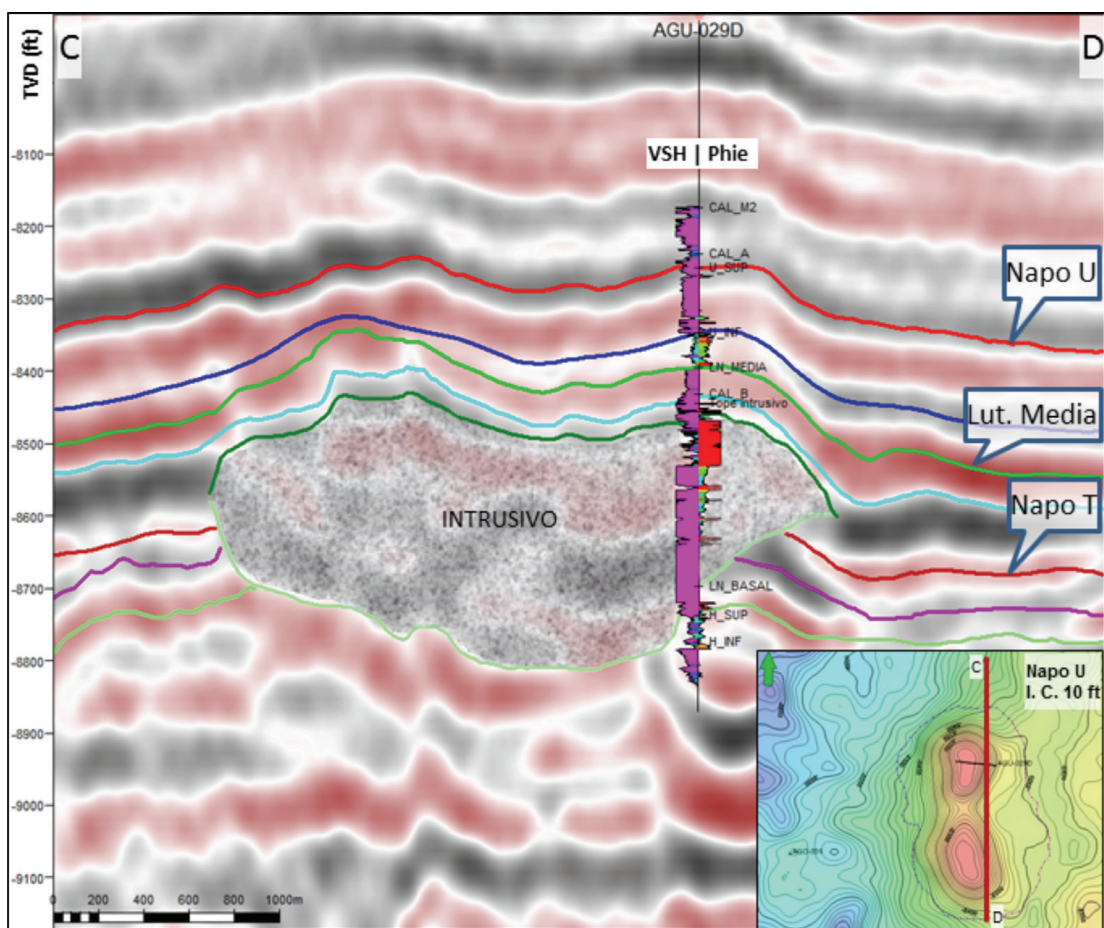


Figura 8. Sección sísmica Norte-Sur a lo largo del eje longitudinal del intrusivo principal.

y en menor medida, los superiores hasta Basal Tena y con vestigios en el tope de Tena (Figura 9).

No obstante, son evidentes los cambios de espesor lateral por la deformación impuesta al tiempo de la instalación del lacolito, desde la caliza A hasta la Lutita Media, con adelgazamientos progresivos desde los flancos hasta un mínimo en los ápices, por lo que se lo interpreta en concordancia de edades a los demás datados en la cuenca. En tanto que la deformación posterior, en los intervalos del Napo Superior y Tena, más suaves y sin cambios sustanciales en los espesores, se debe a acomodamiento local en respuesta a los pulsos de deformación regionales documentados para la cuenca y compactación diferencial.

El apófisis norte, de menor dimensión y de emplazamiento más profundo, intruye en niveles pre-cretácicos mayormente y hasta la Lutita Media, pero no llega a estructurar tan intensamente como el intrusivo principal a los niveles del yacimiento Napo U (ver Figura 9 abajo derecha).

En relación al intrusivo principal, los intervalos inferiores, desde Napo T hasta Hollín, se encuentran claramente afectados por la intrusión, por desaparición y plausible incorporación a la masa ígnea al momento de instalación, en la zona de emplazamiento del lacolito, con relieve positivo truncando en la base de la intrusión. Inmediatamente fuera del ámbito del lacolito, los intervalos inferiores, conservan mayormente la pendiente regional (Figura 9).

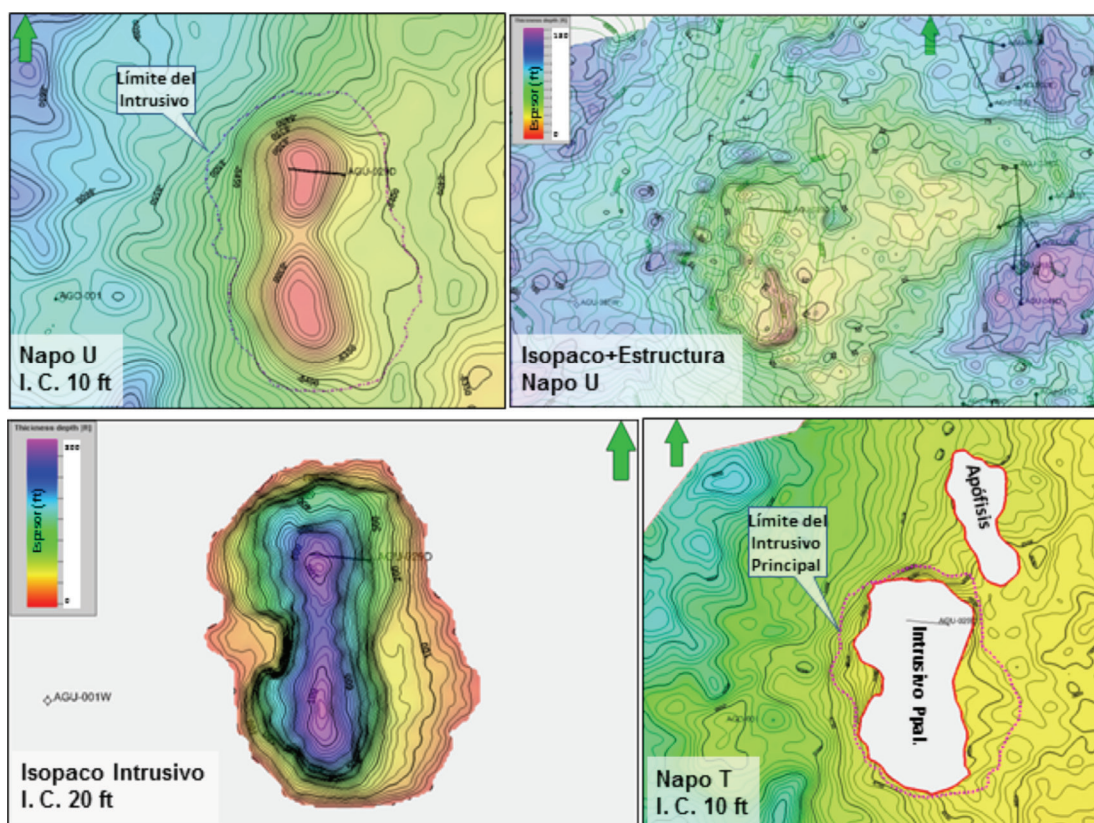


Figura 9. Arr. Izq.: Estructura de Napo U debido al Intrusivo. Arr. Der.: El isopaco Napo U, evidencia el adelgazamiento hacia los ápices de las dos culminaciones. Ab. Izq.: Isopaco del cuerpo intrusivo principal. Ab. Der.: Estructura del Napo T y su relación con el intrusivo ppal. y el apófisis norte.

La interpretación sísmica, muestra entonces dos tipos de trampas diferentes del tipo estructural para el Napo U y el Napo T:

Napo U: Una figura anticlinal por la influencia del lacolito principal subyacente, con dos culminaciones y separado por una silla del campo principal Aguarico, ubicado más hacia el este, con continuidad lateral de Napo U, tanto en los flancos como en la parte alta del intrusivo. Los horizontes cercanos a U Inferior y U Superior no se encuentran “cortados” por el intrusivo, aunque con importante adelgazamiento plástico y sin fallamiento evidente para la compensación de espacios (por ejemplo radial en los ápices), lo que también juega un papel importante respecto de la integridad de sellos latero-verticales. Se puede definir un cierre propio para esta trampa, en la silla al este, a la vez que cierres propios menores para cada una de las dos culminaciones.

Napo T y Hollín: Trampa combinada resultante de cortar el monoclinal regional que sube hacia el Este, contra las paredes del intrusivo y su raíz (Figura 7), en donde se logran cierres combinados contra el intrusivo, asumiéndolo con características de sello, tanto para el flanco Oeste, como para el flanco Este, asociados al emplazamiento del cuerpo ígneo, como se observa en la Figura 9 abajo derecha, inmediatamente a los lados de la presencia del intrusivo para Napo T. Si bien ambos reservorios son considerados aquí como objetivos a investigar, o secundarios, Napo T tiene relevancia por el hecho de ser el principal yacimiento productor en el campo Shushufindi y por su parte el pozo exploratorio Aguarico Oeste-1, ubicado a 3150 metros al sudoeste del Aguarico-029D, produjo de Hollín Superior acumulando 100 mil barriles de petróleo.

ANÁLISIS DE FACIES SÍSMICAS

Se estudiaron las características sismo-faciales de los distintos intervalos, para ganar conocimiento respecto de la calidad de los reservorios y los sellos intervinientes, con el objetivo de calificar objetivamente cada nivel de interés, la trampa asociada y el riesgo inherente a los fines de las estimaciones volumétricas de recursos; para ayudar a la determinación de la mejor ubicación del pozo a perforar para evaluar la potencial acumulación de hidrocarburos.

El Napo U, objetivo principal, se evaluó en base a cubos sísmicos resultado de la caracterización efectuada en el reproceso. En particular, se utiliza un cubo de tres “*rock-type*” relacionados a areniscas de buena, regular y mala calidad, dados por *cut-off* de arcillosidad y porosidad en línea con los derivados de los pozos del campo. La extensión y distribución de los distintos *rock-types* se determina mediante el mapeo de una extracción previa de geocuerpos con la característica determinada (Figura 10), como *rock-type* y probabilidad de ocurrencia.

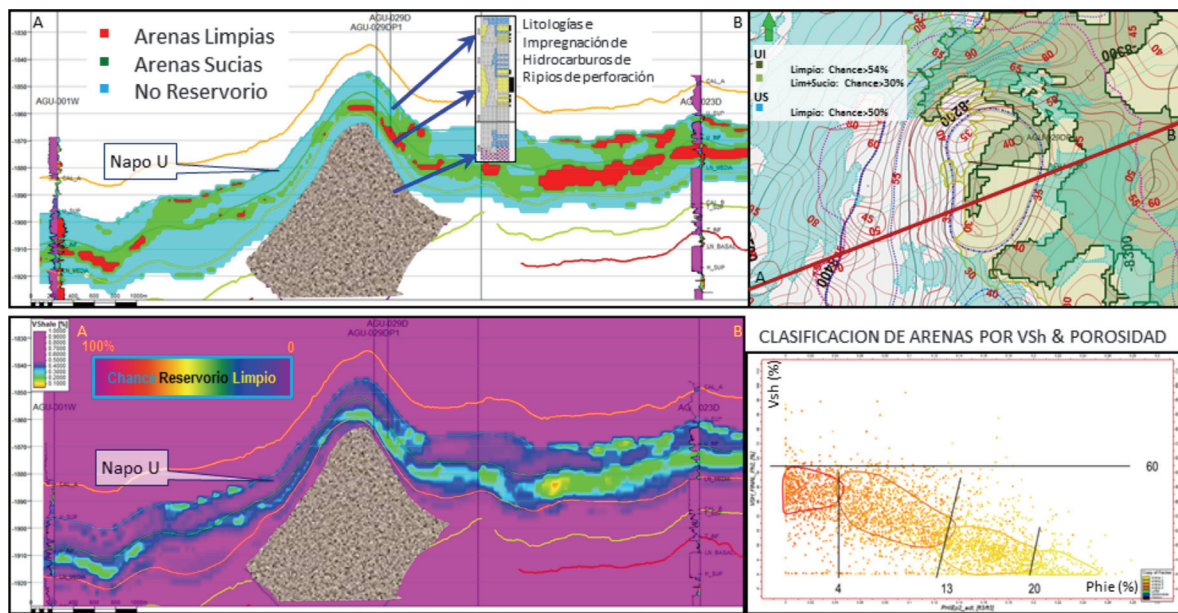


Figura 10. Optimización de locaciones con secciones (Izq.) y mapas (Arr. Der.) con la distribución vertical y horizontal de las 3 clases de reservorios reconocidos en sísmica y calibrados a datos de pozo (Abajo Der.), además de cubos de arcillosidad (Abajo Izq.), porosidad y propiedades elásticas.

Además, se disponía de cubos de arcillosidad y porosidad complementarios al análisis, al igual que combinaciones de cubos de propiedades elásticas (Impedancia Acústica, Lambda-Rho, Mu-Rho y Lambda/Mu), que fueron evaluados de manera equivalente, en cortes, mapas y geocuerpos con distintos *cut-off*, para asegurar la presencia areal de los parámetros relacionados a condiciones de reservorio aceptable (por ej. $Vsh < 60\%$ y $\Phi > 8\%$).

INTEGRIDAD DE LOS SELLOS

La secuencia sedimentaria de lodolitas de la Lutita Napo Superior es considerada como un probado y eficiente sello regional para los reservorios Napo U y en el área Aguarico-Shushufindi.

No obstante, la naturaleza de la trampa ameritó una revisión en detalle de los sellos teniendo en cuenta que:

- El cuerpo ígneo, podría tener un hidrotermalismo asociado que modifique reservorios y sellos, en beneficio o detrimento de la trampa, dependiendo de la composición química del mismo.
- La interpretación de atributos sísmicos relacionados a fracturas o fallamiento sub-sísmico, permiten extraer información relevante sobre el reservorio Napo U y los sellos carbonáticos inmediato superiores.
- De igual manera, para los reservorios Napo T, evaluar la característica de sello del intrusivo para la conformación de trampa y en forma asociada.

- Evaluar la posibilidad de fracturas dentro del intrusivo, que pudiera considerarlo un reservorio secundario no convencional, naturalmente fracturado.

A partir de los cubos sísmicos de amplitud, se obtienen otros derivados (*Chaos*, *Varianza*, *Ant-Tracking*), optimizados a evidenciar discontinuidades (Figura 11), los que se complementan con los cubos de sismofacies, propiedades elásticas y petrofísicas (arcillosidad), para obtener información acerca de la integridad de los sellos verticales y también del propio cuerpo intrusivo.

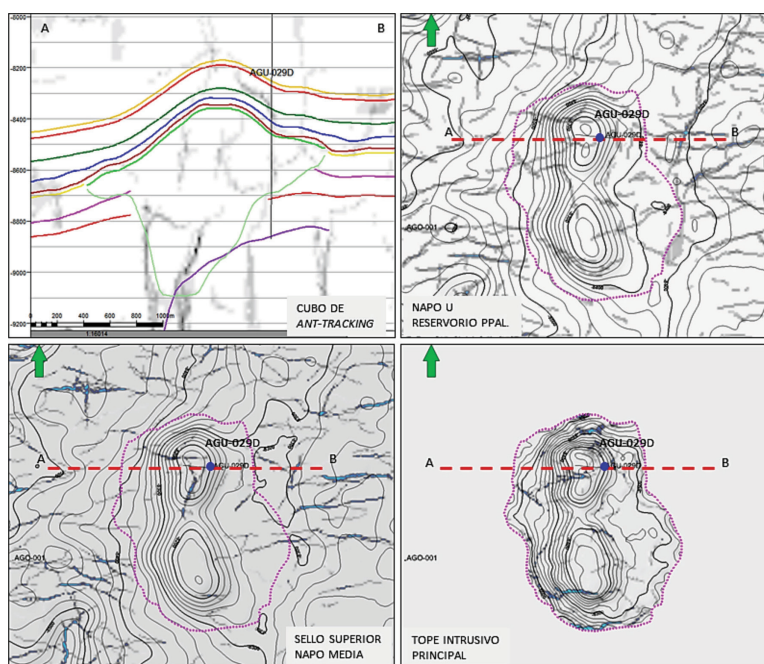


Figura 11. Atributos sísmicos relacionados a fallamiento y fractura de la estructura y posible heterogeneidad del cuerpo intrusivo (*Ant-Tracking*).

De este análisis, se determina que hay buenos sellos para el reservorio Napo U y Basal Tena, no obstante y en relación al posible hidrotermalismo, se especuló que las calizas M y A, podrían tener condiciones de reservorio por porosidad móldica, pero el pozo no confirmó esto último.

Respecto del intrusivo, se concluyó que puede tener condiciones de sello lateral para entrapar fluido en Napo T, principalmente en el flanco Oeste de la estructura, lo que se espera confirmar en eventuales futuras perforaciones.

El pozo AGU-029D perforó un total de 252 pies de intrusivo, en una posición que inicialmente, podía estar relacionado a características de reservorio por fractura (Figura 11 abajo, derecha) con sellos de Lutita Media. Los análisis de ripios, cromatografías y parámetros de perforación, no indicaron características de reservorio fracturado, pero al no haber sido optimizada la ubicación del sondeo para evaluarlo específicamente al intrusivo como reservorio, esta condición no se ha descartado y permanece de interés para futura evaluación.

DESCRIPCIÓN RIPIOS DE PERFORACIÓN EN EL POZO AGUARICO-029D

Como ya se mencionó anteriormente, el pozo de avanzada Aguarico-029D tuvo múltiples objetivos de producción e investigación. El objetivo principal de este pozo fue el yacimiento Napo U, así como Basal Tena y las calizas de Napo fueron objetivos secundarios. Napo T y Hollín, los cuales se esperaban bajo el intrusivo, fueron considerados objetivos investigativos.

Una vez perforado el pozo, la Napo U Inferior presento las siguientes características en los ripios de perforación: arenisca de color blanco, café clara, sub-transparente a transparente, sub-translúcida, suelta a friable, cuarzosa, grano medio a fino, redondeado a sub-redondeado, regular selección, matriz y cemento no visible, regular porosidad inferida. Presenta manchas de hidrocarburo en: puntos, parches y uniformes, color café a café oscuro, fluorescencia natural amarillo oro moderadamente brillante, fluorescencia al corte rápido, correntoso a nuboso, fuerte, blanco lechoso. Anillo residual con luz ultravioleta amarillo fuerte.

Anillo residual con luz natural café amarillento, fino. Buena presencia de hidrocarburo. Gas de formación registrado: 232,000 ppm (0.23%) (Figura 12).

La descripción de ripios de perforación más la evaluación petrofísica, confirmó el potencial de Napo U en el área, con idénticas características de porosidad y permeabilidad, que en el resto del campo, descartando el efecto perjudicial de un metamorfismo de contacto e hidrotermalismo en éste reservorio.

No obstante, se confirman efectos de acomodamiento de espacios y compactación diferencial por el efecto de la intrusión.

El yacimiento secundario Basal Tena, se presentó en un intervalo de 21 pies de espesor, arena de color blanca, gris clara, translúcida a transparente, suelta, cuarzosa, de grano fino a medio, sub-angular a sub-redondeado, regular selección, matriz y cemento no visible, porosidad no visible. La manifestación de hidrocarburo presente en las arenas y la reacción a la acetona determinó pobre presencia de petróleo. El gas de formación registrado fue de 6827 ppm.

Las calizas M-1, M-2 y A, se consideraron como objetivos prospectivos por la posibilidad de que

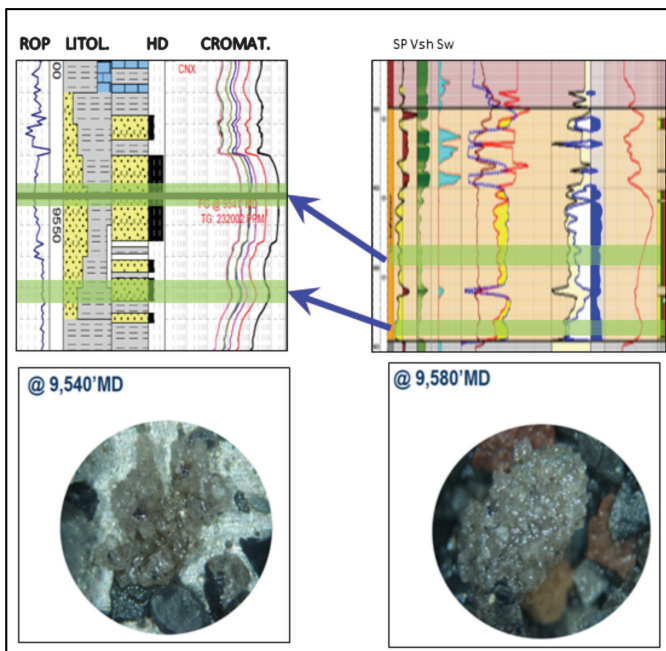


Figura 12. Fotografías de los ripios de perforación del pozo AGU-029D en los intervalos Napo U 9540' (MD) y 9580' (MD) comparado con el masterlog y registros eléctricos.

se encontrasen fracturadas o afectadas por disolución de hidrotermalismo asociado, sin embargo al analizar los ripios de perforación, éstas se presentaron empaquetadas y lodosas, de color gris oscura a crema con gris oscura, moderadamente duras, sub-blocosas, porosidad secundaria no visible y sin presencia de hidrocarburo. El máximo gas de formación se registró en la Caliza M1 con 23116 ppm. Sin embargo estas unidades como en el resto de la cuenca, se presentaron como una buena roca sello.

La arenisca Hollín Superior presentó 36 ft de espesor con una arena de color blanco a gris verdosa, transparente a translúcida, suelta a friable, cuarzosa de grano medio a grueso, sub-angular a sub-redondeado, pobre selección, con matriz arcillosa, en parte con cemento calcáreo, con presencia de glauconita y pobre porosidad inferida. Presentó manchas de hidrocarburo residual en parches en las arenas.

La arenisca Hollín Inferior mostró una arena limpia de grano medio a fino, sin presencia de hidrocarburo.

El intrusivo interrumpe la secuencia sedimentaria desde la base de la Caliza “B” hasta la Lutita Inferior del Napo Basal, reemplazando en su totalidad a Napo T. Este cuerpo se interpretó en el *masterlog* a partir de 9650’ hasta 9850’, utilizando como referencia el comportamiento del ROP, cambio en los parámetros de perforación y el análisis de las muestras recuperadas. Sin embargo del análisis de los registros eléctricos se puede observar que el tope del intrusivo está a 9623’ y su base a 9875, con un espesor de 252’, las curvas de densidad y porosidad muestran un solo cuerpo masivo (Figura 13).

Durante la perforación no se evidenciaron presencia de fallas o fracturas asociadas a este cuerpo. El comportamiento del gas en el intrusivo fue constante, mostrando un solo *background* de gas de 27000 ppm.

En la parte superior, el intrusivo es de color gris claro, gris verdoso, gris oscuro, ocasional café claro, moderadamente duro a duro, corte de forma irregular, presenta fenocristales de plagioclasas cálcicas (50%), clorita (40%), cuarzo (10%), con presencia de vetillas de pirita y calcita (Figura 13 arriba derecha).

En la parte inferior, el Intrusivo es de color gris verdoso, gris claro, verde claro, duro a muy duro, corte de forma irregular, presenta fenocristales de plagioclasas cálcicas, cuarzo angular, menor clorita,

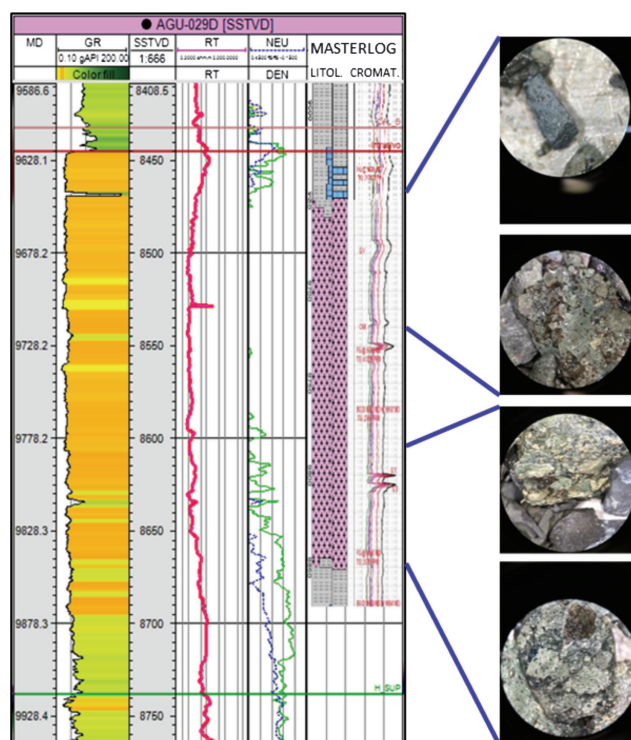


Figura 13. Masterlog y registros eléctricos del cuerpo intrusivo en el pozo AGU-029D en conjunto de imágenes de los ripios en las zonas superior e inferior del mismo.

se observó fragmentos con textura brechosa, con presencia de pirita (Figura 13 abajo derecha).

Por los minerales reconocidos bajo el microscopio binocular y por la textura que presentan los ripios de perforación recuperados, podríamos indicar que se trata de una Diorita, pero se necesita realizar un estudio de mineralogía para determinar con exactitud la composición de esta roca y poder clasificarla de una manera correcta.

La información obtenida indica que la instalación del intrusivo responde a un solo pulso de magma, posiblemente de edad Cenomaniano como indica Barragán *et al.*, (2004), esto ayuda a refinar la historia del emplazamiento de este intrusivo y de la creación de la trampa de una manera más clara.

EVALUACIÓN PETROFÍSICA DEL RESERVORIO NAPO U EN EL POZO AGUARICO-029D

Como parte del programa de registros utilizados para evaluación de formación del pozo Aguarico-029D, se utilizó la tecnología LWD (*Logging while drilling*), Resistividad-Densidad-Neutrón y presiones, información que permitió visualizar en tiempo real la prospectividad del yaci-

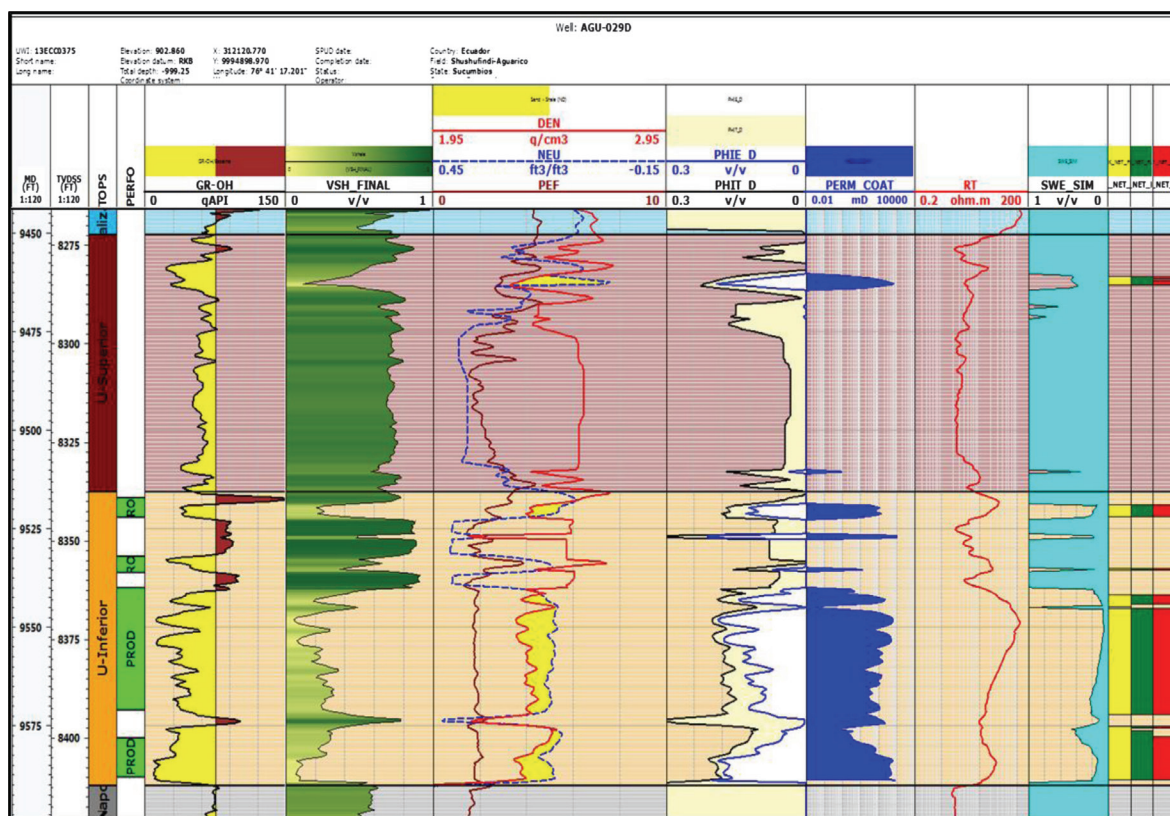


Figura 14. Evaluación petrofísica de los reservorios U Superior y U Inferior (Profundidad Wireline, registro de referencia USIT-CBL-VDL) en el pozo Aguarico-029D. Descripción de los *tracks* de este pozo de izq. a der., referencia MD-TVDSS, topes, intervalos completados, curva de Vsh, curvas densidad-neutrón y PEF, curvas de porosidad total y efectiva, curva de permeabilidad absoluta, curva de resistividad profunda, curva de saturación de agua, flags de roca-reservorio-pago.

miento registrado y la subsiguiente estrategia de terminación. En la Figura 14, se presenta la evaluación petrofísica correspondiente a los reservorios Napo U Superior y Napo U inferior del pozo Aguatico-029D, la misma que fue terminada con información de puntos de presión de formación.

El reservorio U inferior muestra 4 intervalos de pago prospectivos, evaluados de manera cuantitativa con porosidad densidad-neutrón y con salinidad de 90000 ppm NaCl, la misma que equivale a un R_w de 0.032 a temperatura de fondo de 200 degF. En el cuerpo basal se observa degradación de la calidad de roca con sorteo grano-decreciente, mientras en el tercer cuerpo se observa un sorteo grano-creciente con aumento de la porosidad y permeabilidad.

La descripción petrofísica de los 4 cuerpos presentes a continuación:

- **Intervalo 1, 9517-9522 ft-MD:** presenta una resistividad promedio de 32 ohm.m y porosidad efectiva promedio de 17%. Zona de pago prospectiva.
- **Intervalo 2, 9532-9536 ft-MD:** presenta una resistividad promedio de 18 ohm.m, porosidad efectiva de 7% y saturación de agua promedio de 17%. Zona de pago prospectiva.
- **Intervalo 3, 9540-9571 ft-MD:** presenta una resistividad entre 16-102 ohm.m, porosidad efectiva entre 12-18% y saturación de agua promedio de 14%. Zona de pago prospectiva.
- **Intervalo 4, 9578-9588 ft-MD:** presenta una resistividad promedio de 25 ohm.m, porosidad efectiva 17% y saturación de agua promedio de 18%. Zona de pago prospectiva.

De los resultados obtenidos a partir de la presión de formación tomada en los reservorios U Superior y U inferior, se tiene que la estabilización de la presión se obtuvo en aproximadamente 7 minutos para la mayoría de los ensayos con rango de 0.1 psi/min. Se realizaron en total 10 estaciones de presión, en donde se observó que el reservorio U Inferior esta hidráulicamente conectado, con una presión promedio de 3002 PSI (Figura 15). Por otra parte, de acuerdo al comportamiento de movilidades se observa que siguen la misma tendencia de la resistividad profunda estableciéndose valores en el rango de 12.9-225.3 mD/cP.

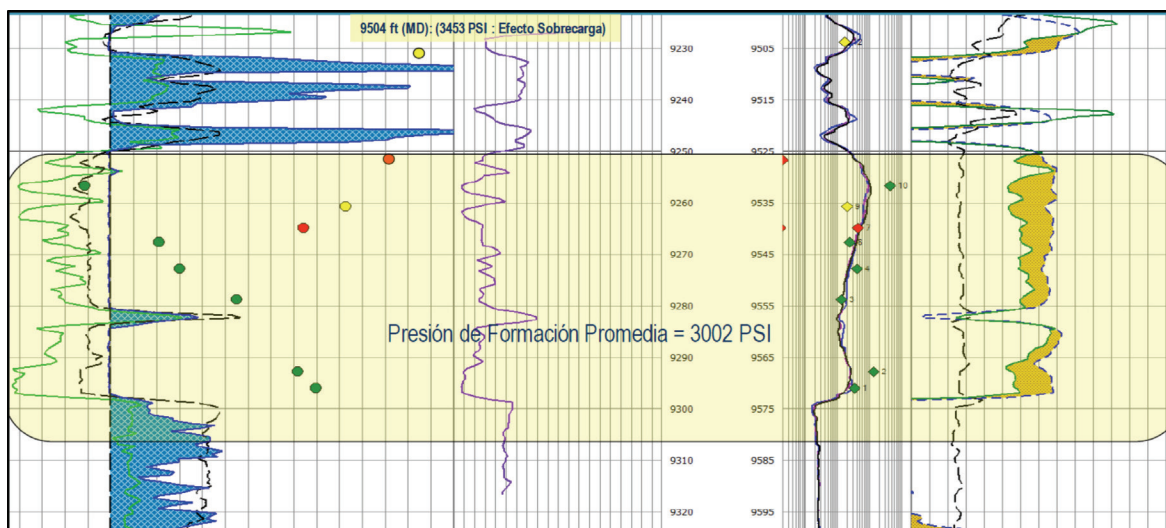


Figura 15. Resultados de puntos de presión de formación (Profundidad LWD) tomados a lo largo de los reservorios U Superior y U Inferior en el pozo Aguatico-29D.

TIMING

Respecto de la sincronía entre los distintos elementos que conforman la trampa y la migración del petróleo, la Figura 16 muestra una línea sísmica horizontalizada al tope de Tena, inicio de la ventana de generación y expulsión de petróleo, así como, un mapa del tope de la paleoestructura de U inferior al tope Tena. Se puede observar claramente que el intrusivo ya estaba emplazado al inicio del Paleoceno tardío (~60 m.a) y la estructura conformada en ese momento, al igual que los demás elementos que conforman la trampa, por lo tanto no se interpretó problemas de sincronía, considerando el momento crítico en el pico de generación-expulsión y condiciones de preservación aseguradas mayormente durante el movimiento andino, Daswood y Abbotts (1990).

La posición del pozo Aguarico-029D se puede considerar que se encuentra ubicada dentro del cierre paleo-estructural de la misma (Figura 16 abajo izquierda).

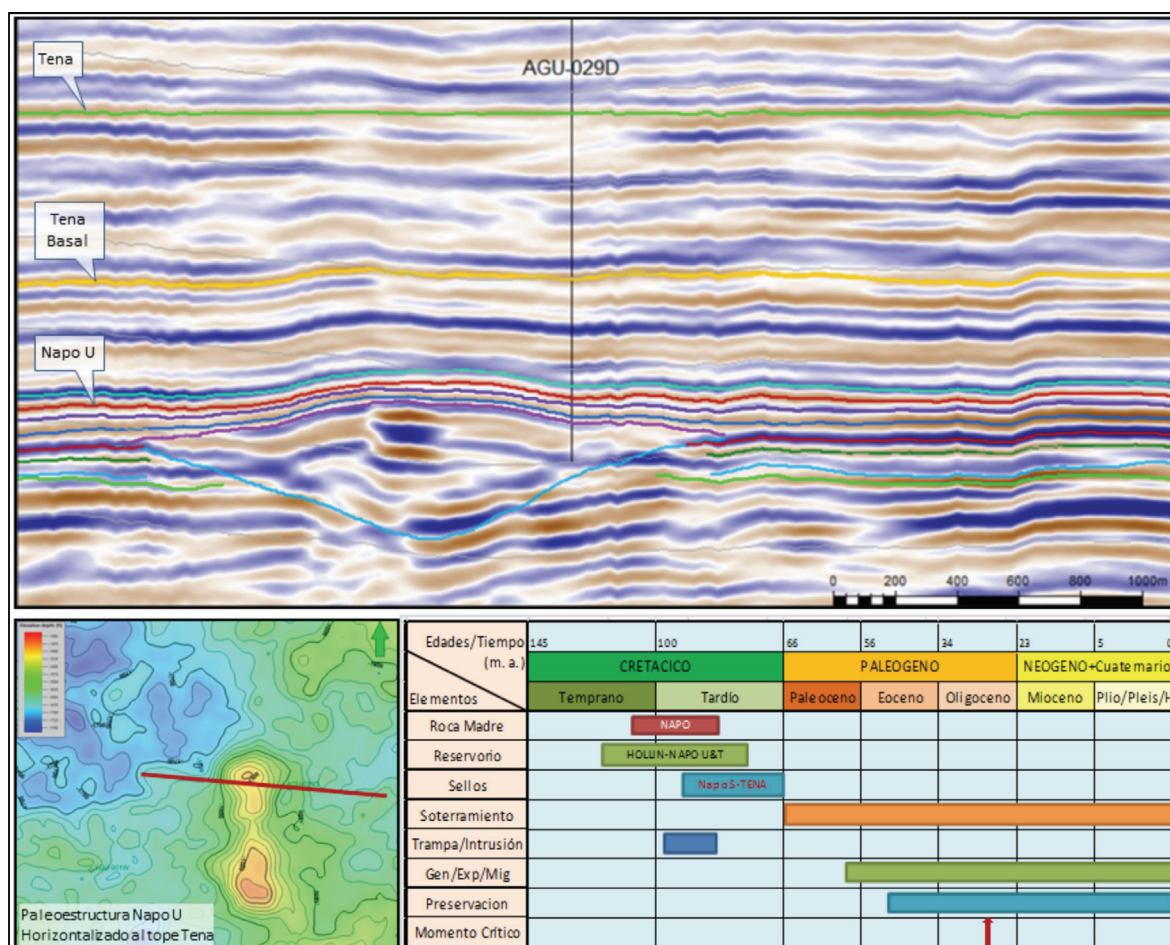


Figura 16. Sección sísmica horizontalizada al tiempo del inicio de la generación de hidrocarburos, mapa paleoestructural y carta de eventos del sistema petrolero para la trampa.

PRODUCCIÓN- ASPECTOS RELEVANTES

El pozo Aguarico-029D se perfora hasta la profundidad total de 10050 pies (MD). En la Figura 17, se detalla el estado mecánico y la terminación final del mismo.

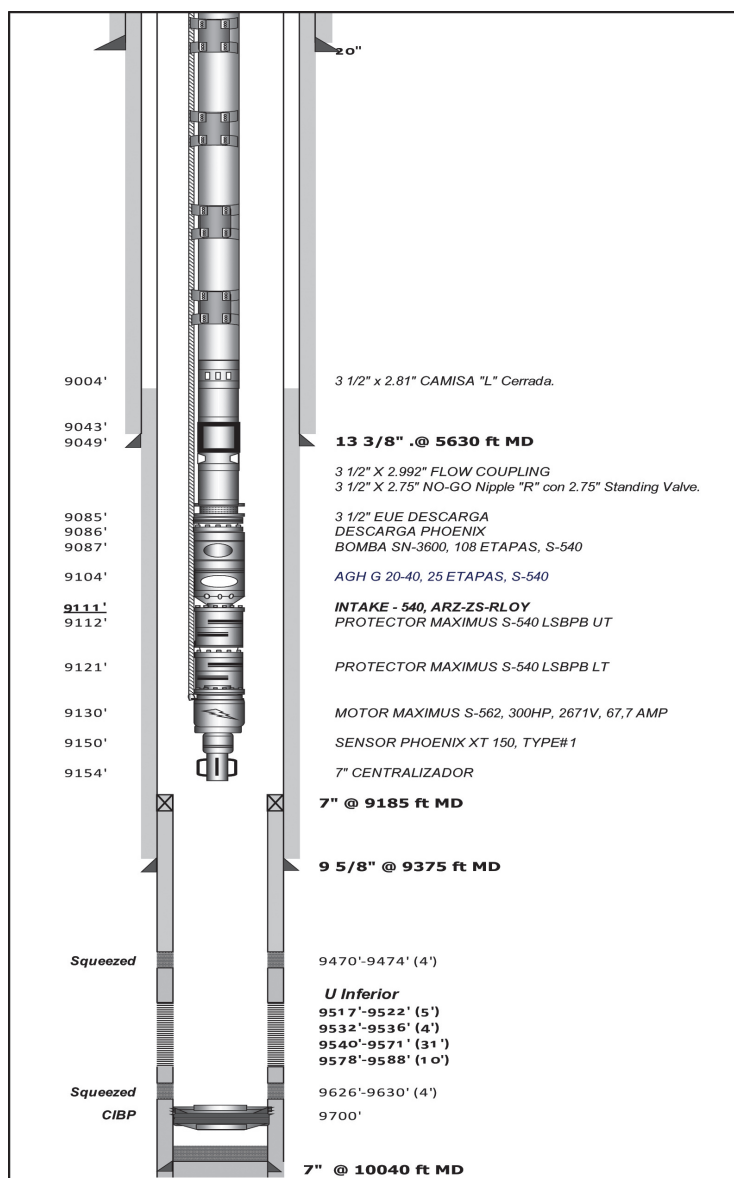


Figura 17. Diagrama mecánico de terminación del pozo AGU-029D.

Durante los trabajos de terminación del pozo, se corrieron registros para evaluar la calidad del cemento en el *liner* de 7" desde 9714' hasta 9780', encontrándose la necesidad de realizar trabajos de remediación para garantizar la hermeticidad entre las capas de interés. Posteriormente,

se bajó cañones TCP con ensamblaje de evaluación en tubing de 3 1/2", se cañoneó arena Napo U inferior y se evaluó la misma con el sistema de bombeo hidráulico y bomba tipo *jet*, obteniéndose los siguientes resultados: 50 BFPH, 1200 BFPD, 16% de corte de agua y salinidad de 9600 ppm. El pozo fue cerrado para prueba de evolución de presión con sensores de presión y temperatura en fondo, obteniéndose los siguientes resultados: $P_{wf} = 1200$ psi, $P_{ws} = 3000$ psi, $IP = 4.4$ BFPD/psi.

Los datos de las pruebas presión-producción, los registros de desviación y el estado mecánico del pozo sirvieron de base para la realización del correspondiente análisis de productividad (análisis nodal), mostrado en la Figura 18.

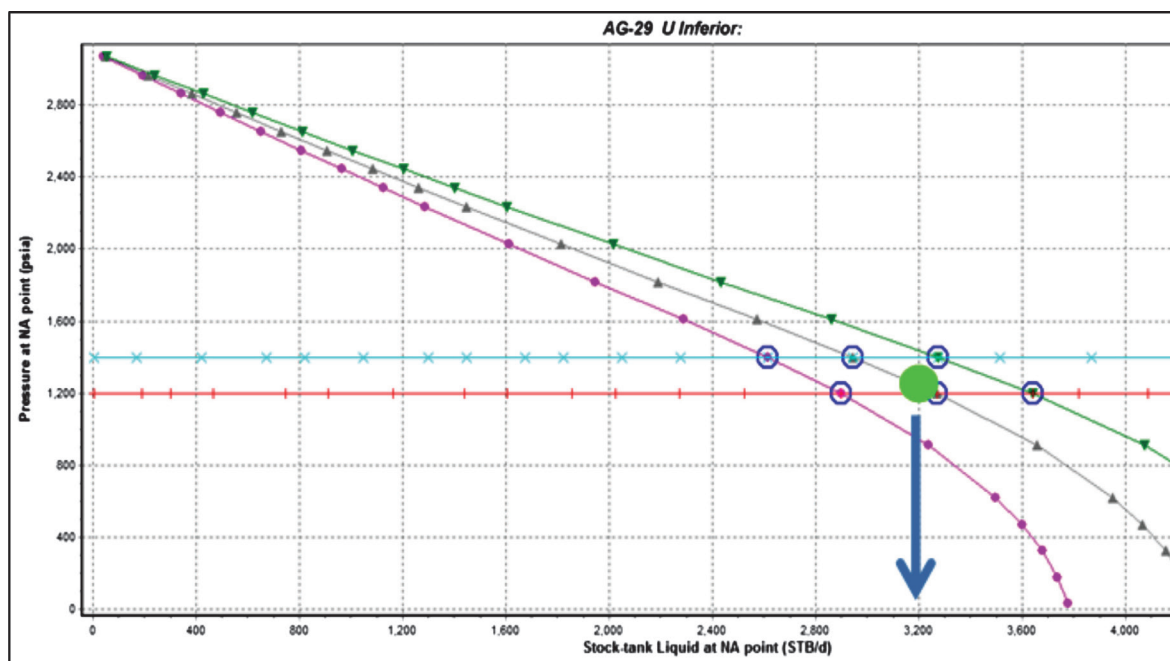


Figura 18. Análisis nodal para definir la productividad del pozo.

Con la información antes detallada se diseñó el sistema de levantamiento artificial más apropiado, que como en la totalidad del campo, fue el sistema de bombeo electro-sumergible.

El comportamiento de la bomba electro-sumergible seleccionada es la que se muestra en la Figura 19, donde se puede ver que para las condiciones de diseño suministradas la bomba trabaja en rango óptimo de operación.

La historia de producción del pozo AGU-029D que se ilustra gráficamente en la Figura 20, certifica que el equipo de levantamiento artificial fue adecuadamente seleccionado y opera en condiciones estabilizadas.

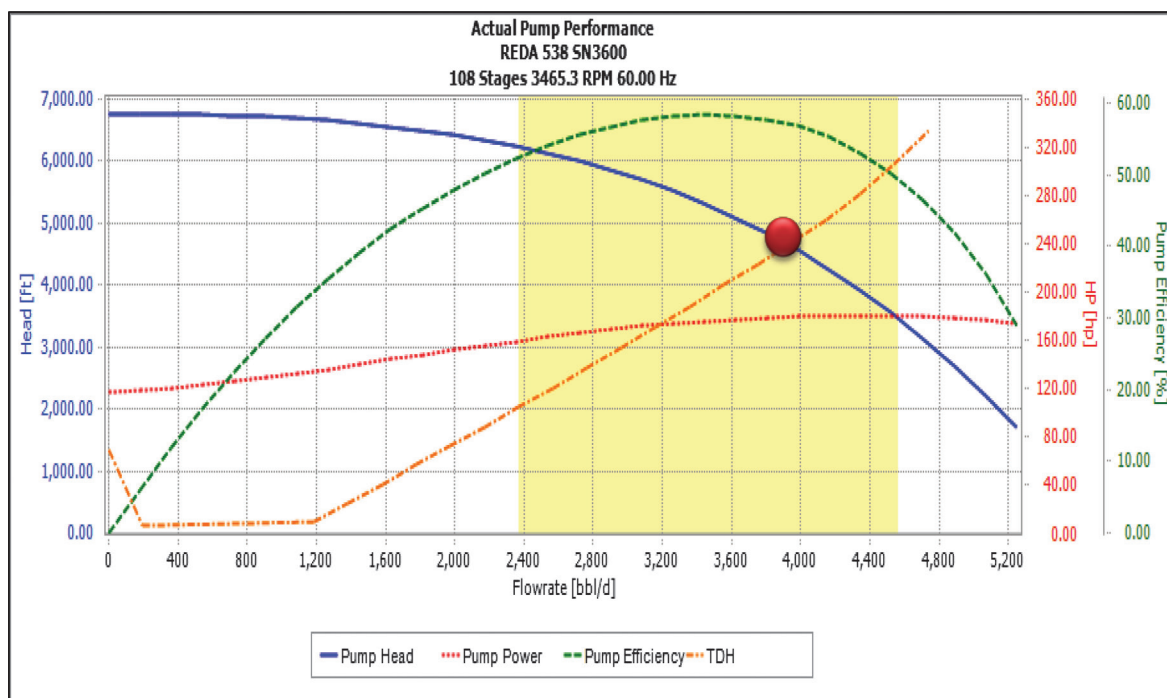


Figura 19. Comportamiento de la bomba electrosumergible.

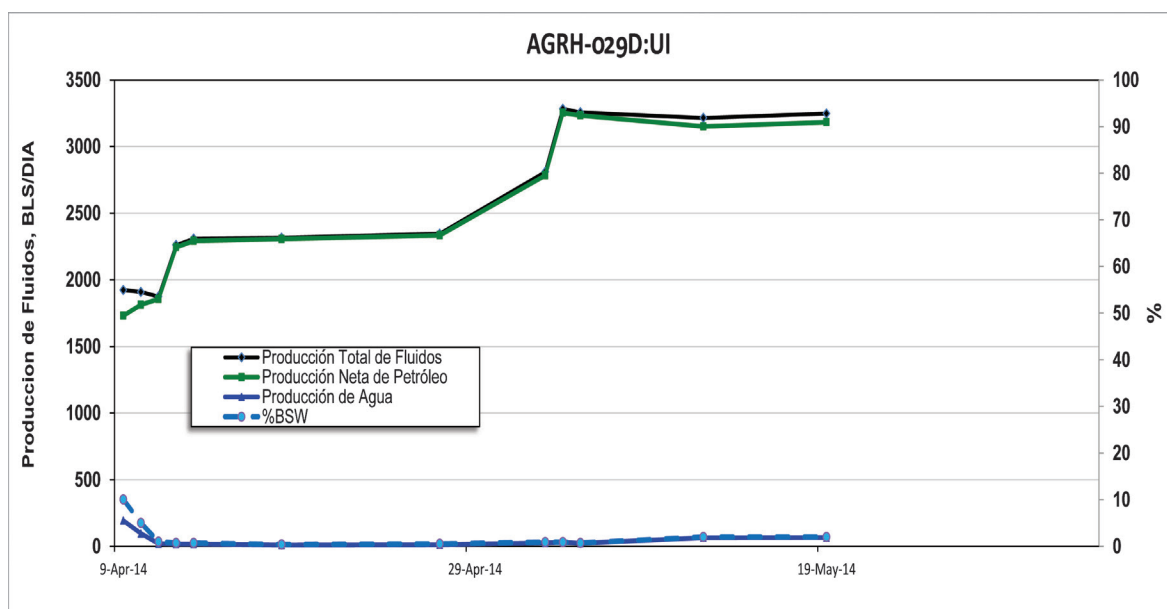


Figura 20. Historia de producción del pozo AGU-029D.

CONCLUSIONES

Del análisis de este caso histórico de exploración cercana al campo Shushufindi-Aguarico, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El intrusivo ígneo del campo, es concordante en edad y momento de su emplazamiento, a los demás documentados en la cuenca, a comienzos del Cretácico tardío.
- La estructura anticlinal que provoca en los horizontes supra-yacentes, en especial los niveles Napo U y hasta el Tena Basal, están en sincronía y con condiciones de entrapamiento.
- Los reservorios de Napo U, han probado una acumulación comercial de petróleo, con producción inicial en el AGU-029D del orden de 2500 bopd, una vez conectado a la línea de producción y con presiones originales.
- No se observó acumulaciones en objetivos secundarios de calizas suprayacentes a Napo U, las que confirmaron la calidad de buen sello.
- No se evidencia alteración térmica en la roca de caja y reservorios, o influencia hidrotermal para Napo U Inferior, en contacto casi directo con el intrusivo.
- Se confirman efectos de acomodamiento de espacios y compactación diferencial por el efecto de la intrusión, particularmente en los intervalos incompetentes.
- El reservorio Basal Tena tuvo pobre presencia de hidrocarburo y su eventual potencial será definido según los resultados de futuras perforaciones.
- Fue clave una buena información sísmica, tanto en imagen de amplitud como de caracterización sísmica del reservorio, para la correcta evaluación de una trampa tan discreta como la estudiada en relación al cuerpo intrusivo.

Como conclusión final, queda demostrado que estas trampas, relacionadas a intrusivos, son de gran interés para su exploración y desarrollo, a pesar de su tamaño modesto en términos de reservas, que agregan valor adicional a la operación de un campo maduro como Aguarico-Shushufindi.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen especialmente a:

Petroamazonas, Operador del campo Aguarico-Shushufindi, por permitir la publicación del presente.

A la gerencia del Consorcio Shushufindi, por el compromiso y apoyo.

A los profesionales del equipo de subsuelo y producción de Shushufindi, tanto en campo como en oficinas, por proveer colaboración en tiempo y forma en sus áreas de incumbencia, para el éxito del proyecto.

Al geólogo Sebastián Villarroel, por sus observaciones respecto de la geología del petróleo.

REFERENCIAS CITADAS

- Agustín Paladines, Gustavo Marín, Andreas Suter, Lex Montano, Jackson Jiménez, “The Shushufindi Adventure”, 2013 SPE WVPS Second South American Oil and Gas Congress, Porlamar, Nueva Esparta, Venezuela, 22–25 October 2013. SPE-WVS-218.
- Barragán R. y Baby P., Magmatismo alcalino intraplaca en la cuenca cretácica Oriente. Ecuador: evidencias geoquímicas, geocronológicas y tectónicas. Cap. 1 pags. 45-68 en La cuenca Oriente: Geología y Petróleo. Patrice Baby, Marco Rivadeneira, Roberto Barragán 2004, IFEA-IRD-PETROECUADOR editores.
- Dashwood M.F., Abbotts I. L (1990) Aspects of the petroleum geology of the Oriente basin, Ecuador, en Brooks J. (editor) Classic Petroleum Provinces. Geol. Soc. London, Spec. Publ. 50:89-118.