

## CMP2022\_450

### IMPACTO DE LAS GEOCIENCIAS EN LA REDUCCIÓN DE RIESGOS DURANTE LA PERFORACIÓN DE POZOS DE AGUA SOMERAS EN MÉXICO

Aroldo Joa Bermúdez Guaita, René Gerardo García Vega, Miguel Alberto Briceño Venaventa, Ana Madelien Bello Lezama, José Santos Elías Tovar, José Vicente de Armas Monque, Eduardo González Niño (Opex)

#### Resumen

En los campos petroleros de aguas someras del Golfo de México, existen considerables volúmenes de reservas explotables, en trampas asociadas a condiciones geológicas muy particulares, zonas inestables por pasos de falla, diapiros de sal y zonas de alta o baja presión, son algunos ejemplos. Siendo los yacimientos objetivos los principales impulsores para la planeación de la trayectoria de los pozos, es necesario tomar en cuenta todas las complejidades geológicas y retos técnicos para minimizar los riesgos de perforación. Incluso, si todos los parámetros de perforación han sido abordados y revisados en la perforación en papel, el agujero puede experimentar problemas de estabilidad como atrapamientos, pegas por diferencial, pérdidas de circulación de lodo e influjos, entre otros. Estos problemas se pueden presentar de manera gradual o repentina y pueden agravarse por las propiedades del lodo o la interacción mecánica entre la roca y el ensamblaje de fondo utilizado.

Basado en la integración estructural, estratigráfica, eventos y pruebas operativas de los pozos perforados con la propuesta del pozo a perforar se genera un modelo para representar la ventana de estabilidad dentro de la cual se establece la densidad del fluido de perforación adecuado para el control de las geo-presiones entre el agujero y la formación a lo largo de toda la columna lo cual contribuye al diseño del pozo en cuanto a su número de etapas y control de riesgos de inestabilidad del agujero y control de influjos.

Debido a la heterogeneidad de las formaciones tanto lateral como verticalmente, las condiciones estáticas y dinámicas para cada pozo son diferentes a los anteriores en menor o mayor medida. En campos de desarrollo, donde existen pozos que drenan fluido de diferentes formaciones, a diferentes ritmos, las geo-presiones varían de acuerdo con el nivel de conectividad por distancia y por permeabilidad que pueda existir entre los puntos de drene de los pozos productores y los distintos niveles geológicos que se van penetrando durante la perforación. Estas posibles variaciones exigen la actualización de la ventana geomecánica y posiblemente ameriten cambios en el diseño del nuevo pozo.

También en campos de desarrollo es común que, con el aumento de la densidad de pozos en una trampa, sea necesario extender el alcance de los siguientes pozos, motivo por el cual aumente la incertidumbre geológica en zonas donde las correlaciones pierdan efectividad por el distanciamiento entre pozos, cambios estructurales como posición y



número de fallas y las variaciones laterales de los ambientes sedimentarios. Esta es razón suficiente para incrementar las acciones de mitigación de riesgos, reducción de incertidumbre geológica e inclusive reforzar los cuidados y monitoreo de los parámetros y acciones operativas durante la perforación.

Básicamente el diseño de la perforación de un nuevo pozo es el seguimiento y continuidad de la perforación de los pozos anteriores, en donde el entendimiento necesario para el éxito de la perforación radica en la integración de todas las disciplinas y en particular las del equipo de geociencias.

En este trabajo además de mostrar la estructura y flujo de trabajo del equipo de geociencias, se incluyen varios casos prácticos para demostrar el potencial que tienen las geociencias en brindar el acompañamiento técnico necesario para optimizar la perforación de pozos.



## Contenido

Introducción .....	4
Desarrollo .....	6
Cambio del punto de asentamiento y rediseño del peso de lodo en la etapa de TR de 16” .....	6
Reducción de pérdida de fluido y justificación del equipo MPD a partir del análisis geomecánico ...	6
Reducción de la pérdida de fluido en la entrada de la sal .....	7
Minimización de los ritmos de pérdidas mediante el manejo proactivo de la densidad del fluido en un área expuesta con diferentes regímenes de presión.....	8
Reducción de costos por reducción de la densidad del lodo derivado de la optimización del modelo geomecánico del campo T. ....	9
Recomendación minimizar los riesgos de atrapamiento diferencial de presión basado en la reducción de los tiempos de exposición BHA/TR en el agujero en zona de yacimientos arenosos.	11
Cálculo del ángulo de ataque para identificar zonas susceptibles de derrumbes para optimizar los baches de reforzamiento para mitigar riesgos de inestabilidad de agujero .....	12
Seguimiento del comportamiento del Caliper en tiempo real, ECD y cajas de recorte para evaluar la efectividad de limpieza de agujero y descartar derrumbes angulares asociados al peso de lodo recomendado.....	14
Sección del cuerpo de carbonatos inestables en la formación Mioceno Inferior. ....	15
Identificación de zonas de altos torques, y paros de rotaria por mineralogía.....	17
Aseguramiento de la perforación hasta la profundidad de asentamiento mediante correlación de muestras de canal, paleontología y ROP en ausencia de herramientas LWD. ....	18
Identificación y modelado estructural 3D para la interpretación detallada de fallas en la zona del pozo para detectar sistemas de fallas no presentes en la sección a rumbo del pozo.....	19
Correlación de eventos con el modelo estructural del campo.....	20
Control de estabilidad de zonas facturadas en pasos de falla.....	21
Indicadores del impacto de las geociencias sobre la perforación.....	22
Conclusiones .....	23
Agradecimientos .....	24
Trayectoria profesional del autor: .....	24



## Introducción

Previo a la perforación de un pozo la primera información que se tiene es el entendimiento geológico estructural del área en estudio. Esta información permite saber, comprender y analizar los riesgos inherentes a las variables geológicas intrínsecas inalterables existentes.

Las geociencias juegan un papel preponderante en el proceso de toma de decisiones antes y fundamentalmente durante la perforación de un pozo, lo que repercute en ahorros de tiempo y en consecuencia en costos de perforación. Esto último es debido a que se evalúan los posibles riesgos y se diseñan planes de contingencia para su mitigación en situaciones como atravesar o navegar en planos de falla, diapiros de sal o zonas de presiones anormales, situaciones que pueden ocasionar eventos de perforación como atrapamientos, pegas por diferencial, pérdidas de circulación de lodo, influjos, así como cualquier evento asociado a la geología que impacte en el proyecto.

El flujo de trabajo de las geociencias dentro de una empresa de perforación inicia con el análisis y evaluación del plan e ingenierías iniciales de perforación, previo al inicio de las operaciones. Posteriormente es durante la perforación, cuando aumenta el riesgo de eventos operativos indeseables que incrementan los tiempos de perforación, tiempos no productivos y costos operativos.

El equipo de geociencias “vigila” estrechamente todas las etapas de las operaciones, a fin de generar de manera oportuna y eficaz, planes de mitigación para los eventos y problemáticas durante la perforación, cuyo proceso se muestra en la siguiente figura.

Soporte G&G durante la perforación

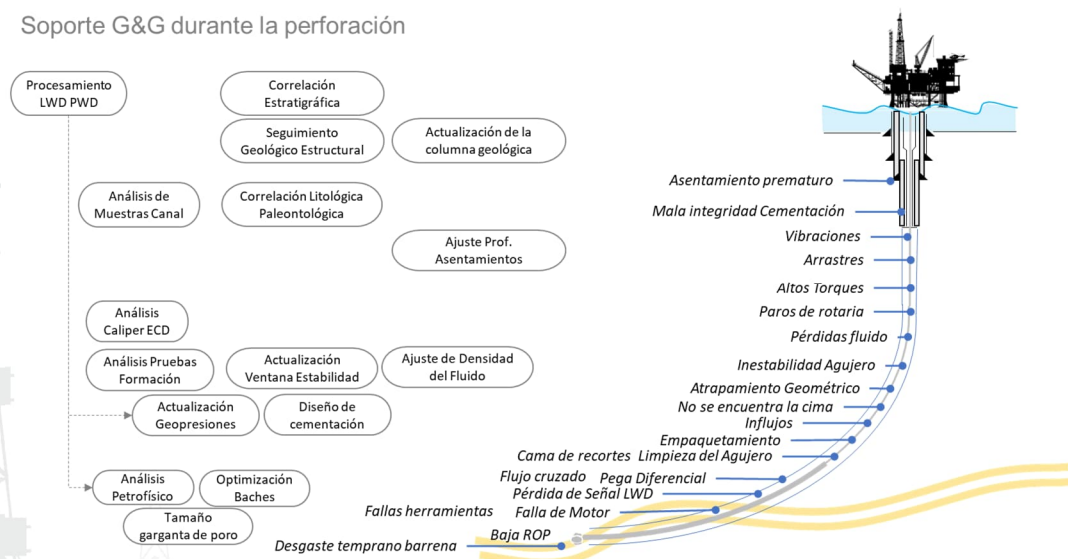


Figura 1 Diagrama esquemático con las problemáticas, riesgos y eventos durante la perforación cuya causa, mitigación y manejo dependen de las geociencias.

Para brindar el soporte geocientífico adecuado y efectivo es necesario contar con un equipo multidisciplinario cuya base fundamental es la geomecánica, geofísica y la geología, asistidas continuamente por la petrofísica y la ingeniería de yacimientos. A continuación, se presenta la estructura organizativa del equipo de geociencias.

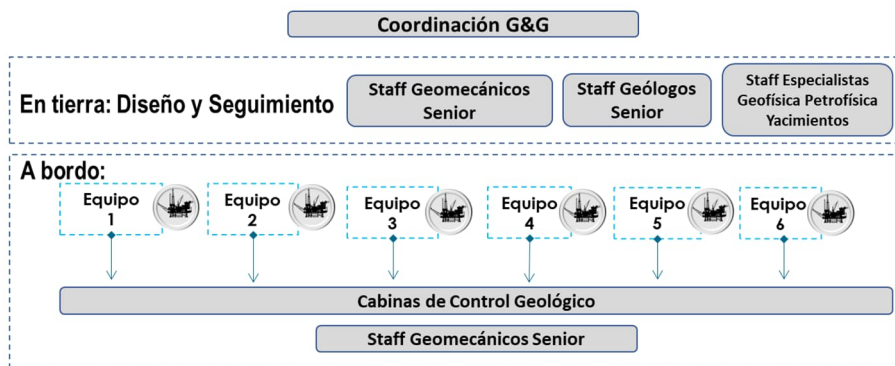


Figura 2 Estructura de trabajo para la asistencia diaria G&G sobre las actividades de perforación.

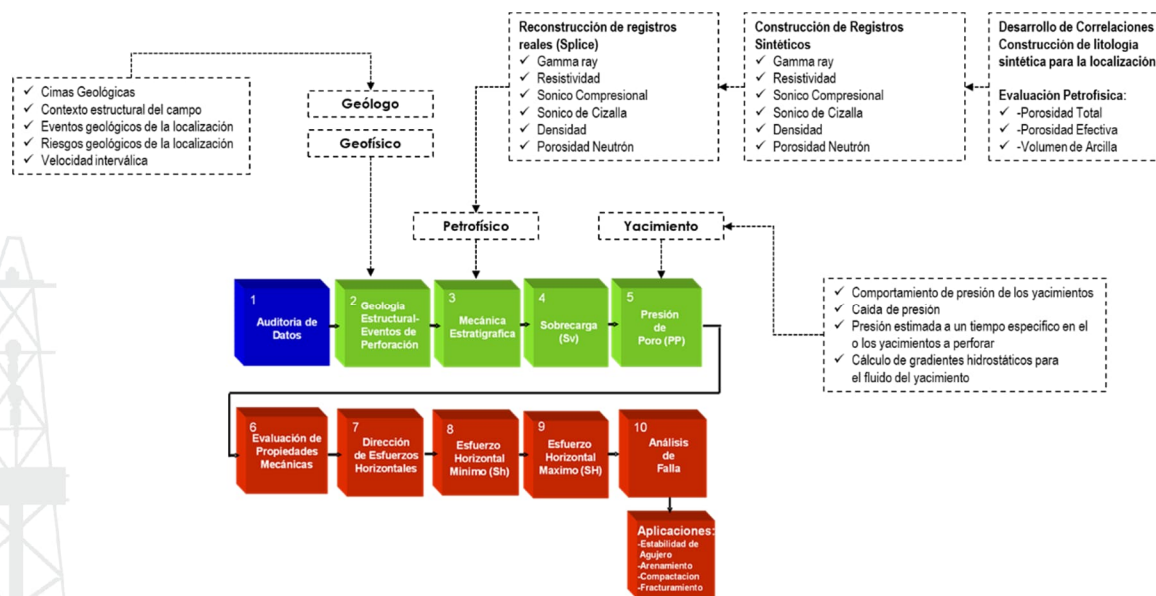


Figura 3 Flujo de Trabajo general operativo para la asistencia directa diaria G&G sobre las actividades de perforación basado principalmente en la integración de Geomecánica-Petrofísica-Geología-Geofísica.

Es importante mencionar que este flujo de trabajo está conectado con todos los procesos de perforación desde que se recibe el requerimiento del servicio de perforación hasta la terminación del pozo interactuando con los equipos de diseño, perforación, fluidos, direccional, cementos, corridas de tuberías de revestimiento, etc.

Durante la perforación es primordial mantener el seguimiento lito-estratigráfico y estableciendo la correlación estratigráfica, estructural y litológica entre el pozo en perforación y los pozos correlativos para identificar posibles cambios en las profundidades de cimas formacionales, intersección de fallas, entradas y salidas de domos salinos que puedan poner en riesgo la continuidad del programa operativo del pozo.

En la siguiente sección se muestra un resumen de casos en donde se evidencia el peso y el valor del análisis geocientífico para llevar a cabo con éxito la perforación de pozos.

## **Desarrollo**

### **Cambio del punto de asentamiento y rediseño del peso de lodo en la etapa de TR de 16”.**

Derivado del análisis de los eventos de perforación en los pozos del área, se identificó una zona de presión anormal a +/- 2400 mv, en las areniscas del Plioceno inferior, históricamente perforados en la etapa de 16” con densidades de lodo del orden de 1.46 g/cm<sup>3</sup>. En dicha zona de presiones anormales, los pozos de correlación han presentado problemas de inlfujos, pérdidas totales por el bajo gradiente de fractura al inicio de la etapa, mismas que ha causado atrapamientos por colapso de agujero al presentarse la pérdida de la columna hidrostática y la incapacidad de circular para limpiar el pozo.

Haciendo uso de dicho análisis, se calibró modelo geomecánico con el que se determinaron los límites del gradiente de fractura, decidiéndose de esta manera, recortar la etapa de 16” de 2400 a 2200 mv, evitando así perforar dicha zona de presiones anormales en la etapa antes mencionada, ya que la siguiente etapa será perforada con densidad de lodo máxima de 1.68 g/cm<sup>3</sup>, suficiente para mantener evitar cualquier evento de control de pozo.

El beneficio se percibió de inmediato al reducirse las pérdidas de fluido durante la perforación de la etapa de 337 m<sup>3</sup> en el pozo P-2DEL a 10 m<sup>3</sup> en el P-41, más 10 días de tiempo no productivo empleados en el control de pozo.

### **Reducción de pérdida de fluido y justificación del equipo MPD a partir del análisis**



## geomecánico.

En términos estrictamente de perforación en las etapas de producción, el campo puede dividirse en dos: el lado Este en el cual, el yacimiento muestra actualmente presiones en JSK del orden de 1000 Kg/cm<sup>2</sup> y una roca que exhibe un comportamiento de poca permeabilidad en la mayor parte de la columna geológica.

Por otro lado, el oeste, el cual tiene una presión de yacimiento de +/- 800 Kg/cm<sup>2</sup> en la formación JSK y un comportamiento durante la perforación de roca naturalmente fracturada.

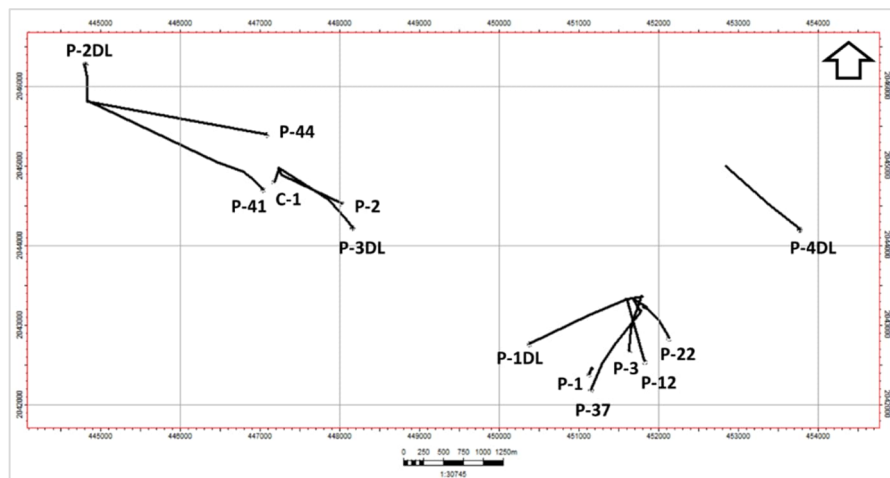


Figura 4 Distribución de los pozos en el campo P.

Los pozos del lado oeste del campo fueron perforados con una densidad de lodo del orden de 1.90 g/cm<sup>3</sup> y en dos etapas: un liner de 7 3/4" asentado en medio de JST y un agujero de 6 1/2" hasta la profundidad total del pozo en la formación JSK, con pérdidas de lodo a formación de hasta 4000 m<sup>3</sup> en una sola etapa.

Con la información de perforación de los pozos de correlación y el modelo geomecánico, se estimó un nuevo gradiente de presión de formación y se recomendó el uso de equipo de contrapresión (MPD) para la perforación de la etapa.

Estas recomendaciones, junto con el seguimiento geomecánico de la perforación, redujeron los tiempos de perforación y las pérdidas de fluido en un 75%, con lo que se delineó el nuevo standard de la perforación en Mesozoico en el lado Oeste del campo.

## Reducción de la pérdida de fluido en la entrada de la sal.

La etapa de 13 5/8” en el campo se perfora con lodo de E.I. de densidad de 1.63 a 1.75 g/cm<sup>3</sup> y tiene como objetivo aislar las rocas del Plioceno y Mioceno, asentando el revestidor en la cima de la sal para así poder incrementar la densidad de lodo en la siguiente etapa a valores del orden de 2.15 g/cm<sup>3</sup>.

La densidad máxima de lodo en esta etapa se determina por la mínima densidad necesaria para evitar el cierre de agujero en la cima de la sal e históricamente, ha sido determinada empleando en nomograma de Leyendecker. Estas curvas, las cuales consideran el fenómeno de “creeping” para determinar la densidad de lodo necesaria para mantener el agujero estable por un periodo determinado, datan del año 1975 y fueron desarrolladas para condiciones de agujero muy específicas y probadas en la cuenca de Luan, en Texas.

Nuestro campo se encuentra en el Golfo de México, donde las estructuras salinas están formadas en su mayoría por halita. La halita, en comparación con otras sales cuya estructura está compuesta de cloruros de potasio o calcio, es la que presenta la menor afectación por efectos de creeping. Esto se confirmó durante la perforación de los pozos en el campo, mismos que, con temperaturas en domo de sal de hasta 140°C, se mantuvieron estables por más de 700 horas y sin problemas asociados al cierre de agujero por tiempo de exposición.

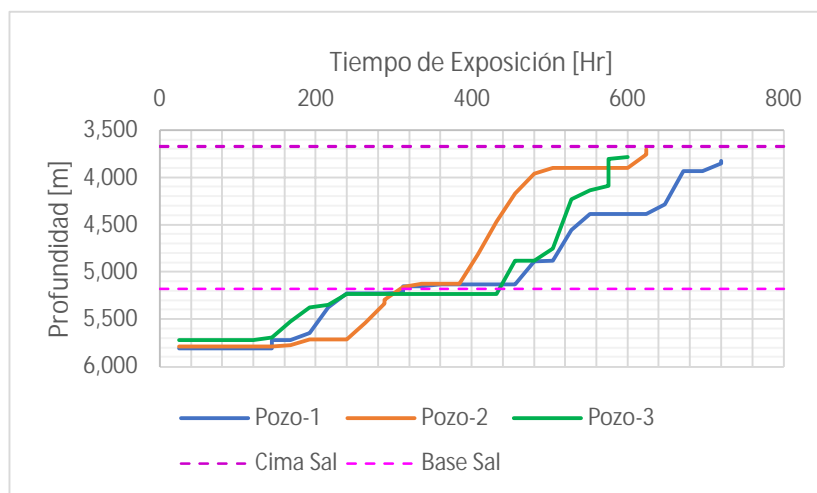


Figura 5 Tiempo de exposición del intervalo salino en los pozos del campo.

Minimización de los ritmos de pérdidas mediante el manejo proactivo de la



**densidad del fluido en un área expuesta con diferentes regímenes de presión.**

Este tipo de eventos se deben a pérdidas de circulación por disipación de presión al pasar por una falla no sellante, como fue el caso de la sección de 12 ¼” de este pozo. Al no tener la opción de bombear baches obturantes se procedió a bajar el peso del lodo de 1.35 gr/cm<sup>3</sup> a 1.33 gr/cm<sup>3</sup> para bajar el gasto de pérdidas de 24 m<sup>3</sup>/día a 1 m<sup>3</sup>/día.

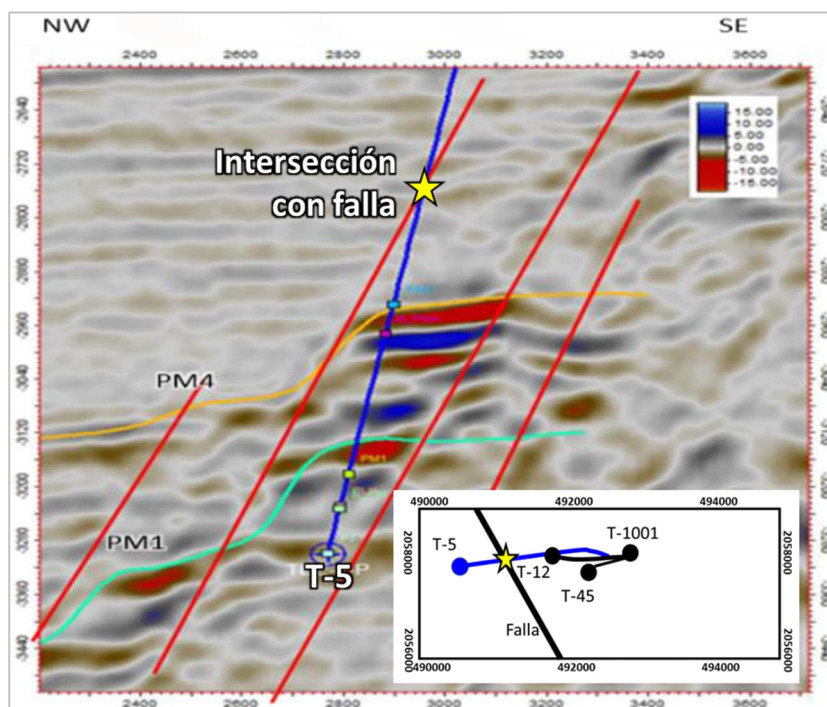


Figura 6 Imagen sísmica que refleja discontinuidades cercanas al paso de falla lo cual genero pérdidas de circulación por disipación.

La decisión de bajar el peso de lodo de 1.35 gr/cm<sup>3</sup> a 1.33 gr/cm<sup>3</sup> a 15 días de la finalización de la etapa, permitió que en lugar de perder 360 m<sup>3</sup>, solo se perdieran 76 m<sup>3</sup>. Quedando así demostrado que el control y conocimiento de los límites técnicos de la ventana geomecánica permite minimizar las pérdidas aun en condiciones severas de fracturamiento y fallas transmisibles abiertas al flujo, lo que se traduce en la minimización de costos no programados.

**Reducción de costos por reducción de la densidad del lodo derivado de la**

### optimización del modelo geomecánico del campo T.

La construcción de un modelo geomecánico en el campo T permitió diseñar un peso de lodo mucho menor comparado con la experiencia del campo. Esto repercutió, desde el punto de vista de operaciones en plataforma, en facilitar las operaciones durante la perforación. De igual forma esta reducción del peso de lodo mitigó el riesgo de pega por diferencial de presión en las arenas superiores del plioceno medio y las arenas yacimientos ya que ya se habían reportado en pozo del campo el atrapamiento de una sonda de registros producto de el alto peso de lodo utilizado en el campo.

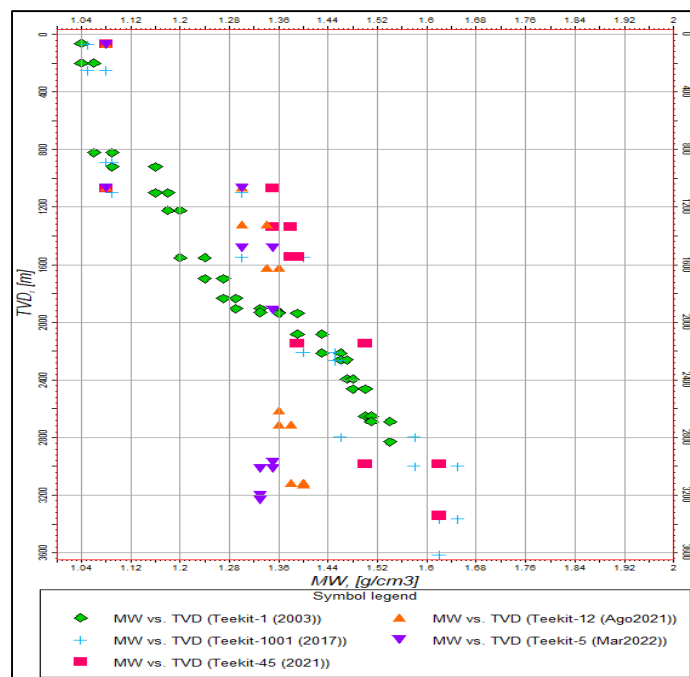


Figura 7 Comportamiento gráfico de la variación de las densidades del fluido de perforación vs. profundidad TVD con la evolución de los pozos perforados en el campo T.

El resultado del entendimiento del comportamiento de presiones del campo y las propiedades mecánicas de la roca permitieron, en el 5to pozo perforado en el campo, la reducción del peso de lodo requerido hasta en 20 puntos lo cual refleja la optimización en el modelo geomecánico del campo.

**Minimización de los riesgos de atrapamiento diferencial de presión basado en la reducción de los tiempos de exposición BH/TR en el agujero en zona de yacimientos arenosos.**

El campo T al producir de varios yacimientos de arena tiende a disminuir la presión de poro en esos cuerpos lo cual trae como consecuencia el riesgo de pegadura por diferencial de presión al perforar la sección o bajar la TR. Esta razón antes descrita permite estar en alerta al equipo de operaciones a bordo y estar preparados ante cualquier indicio de atrapamiento por diferencial de presión.

Peso de lodo máximo (gr/cc)	Yac-4 (psi)	Yac-1 (psi)
1.33	1,065	817

Tabla 1 Diferencial de presión del pozo T-5.

Uso del Gamma Ray en la barrena para detectar la base del último yacimiento y no perforar zona de alta presión y alto colapso de agujero.

El campo T tiene un comportamiento, mayormente, de presión de poro normal con la excepción de una zona de transición de presión de poro anormal a partir de las arcillas de la base del yacimiento 1.

Esta condición genera un posible riesgo de flujo e inestabilidad de agujero ya que se combina la perforación una zona de presión de poro normal con una zona de transición de alta presión que requiere mayor peso de lodo. El hecho de llevar un gamma ray en la barrena permite detectar de manera oportuna la base del yacimiento 1 y poder tomar la decisión de cuantos metros perforar sin tener la necesidad de aumentar el peso de lodo y no tener eventos de inlfujos y posibles derrumbes angulares.

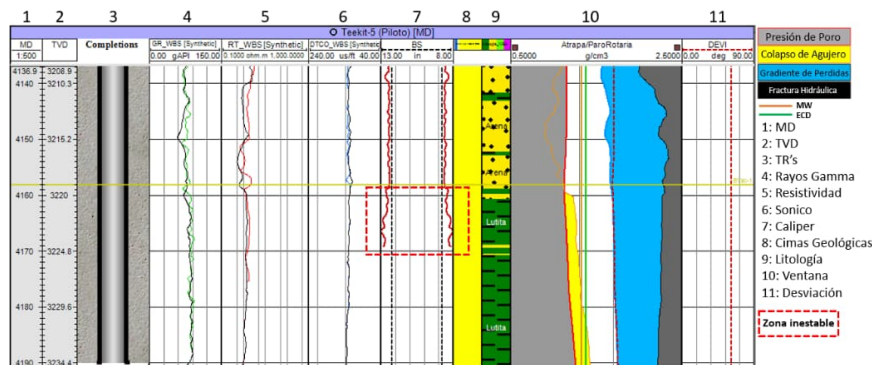


Figura 8 Ventana geomecánica del pozo T-5

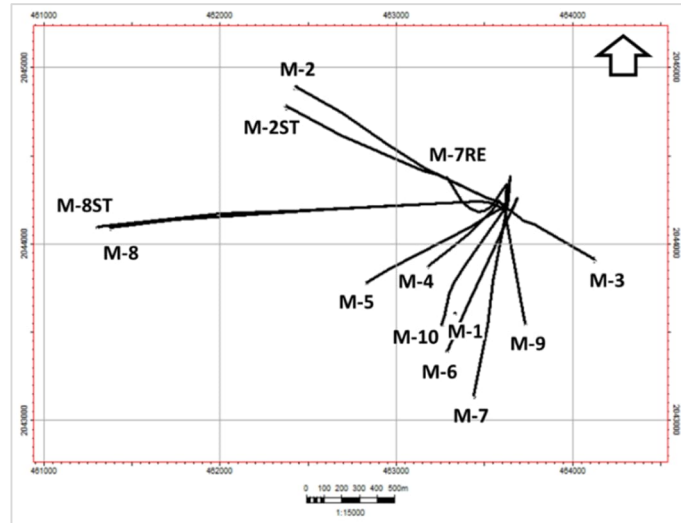


Figura 9 Distribución de los pozos en el campo M.

**Cálculo del ángulo de ataque para identificar zonas susceptibles de derrumbes para optimizar los baches de reforzamiento para mitigar riesgos de inestabilidad de agujero.**

Existen tres formas de derrumbes: angular, tabular y astillado. En el caso particular del campo M existe la tendencia de presentar derrumbes tabulares asociados a zonas falladas poco estables lo cual genera este tipo de derrumbes.

Una técnica de tratar de mitigar la generación de derrumbes es de comparar el ángulo de la trayectoria con respecto a los planos de debilidad de las zonas falladas (ángulo de ataque).

Como punto de referencia un ángulo de ataque por debajo de 30 grados tiene una alta probabilidad de generar derrumbes tabulares lo cual puede generar atrapamientos de BHA. Para el caso del pozo M-2ST al no poder cambiar el ángulo de ataque, que fue menor a los 30 grados, se procedió a bombear baches de asfalto con grafito para tratar de mejorar la estabilidad cercana a las zonas de fallas. Esto dió como resultado una mitigación de la generación de derrumbes tabulares lo cual impacto en el éxito de la perforación del pozo.



Figura 10 Derrumbes tabulares reportados en el pozo M-2 (izquierda) y M-2ST (derecha)

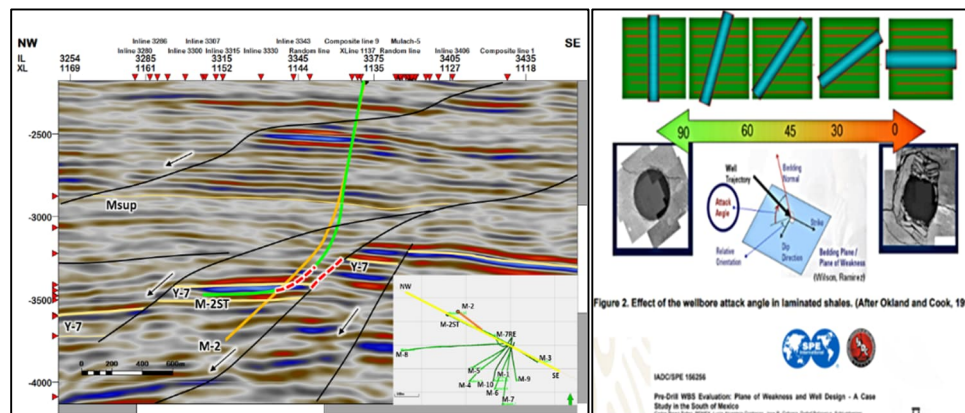


Figura 11 Bajo ángulo de ataque sobre trayectoria del pozo (izquierda) y el soporte técnico sobre el efecto de los ángulos de ataque sobre la estabilidad del agujero (derecha).

La interpretación de las fallas, tipo, dimensión y su salto, así como su rango de influencia en el área de la trayectoria del pozo, permite conocer el ángulo de se forma en la intersección de ambos elementos y de esta manera identificar zonas de alerta en la estabilidad del agujero.

**Seguimiento del comportamiento del Caliper en tiempo real, ECD y cajas de recorte para evaluar la efectividad de limpieza de agujero y descartar derrumbes angulares asociados al peso de lodo recomendado.**

En la sección de 12 ¼”, por medio del registro en calibre en tiempo real, se evaluó el colapso de agujero para detectar zonas de inestabilidad asociado a falta de peso de lodo la cual arrojó resultados consistentes con la predicción del modelo geomecánico. De igual forma ayudo a descartar o diferencial derrumbes asociados al paso de planos de debilidad con respecto a derrumbes angulares por falta de peso de lodo.

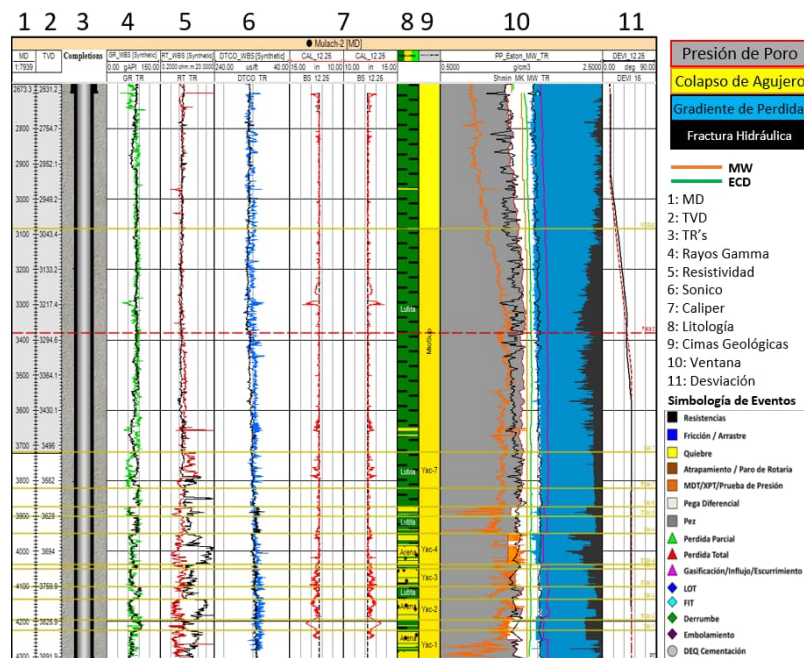


Figura 12 Ventana geomecánica del pozo M-2.

Así mismo, este conocimiento ya mencionado del campo permitió evaluar en tiempo real el comportamiento de presión de poro en la sección de 12 ¼”, del M-2, la cual fue consistente con las zonas depresionadas del yacimiento-4 las cuales tuvieron pruebas de presión MDT para confirmar dicha presión. Este conocimiento permitió prepararnos para un potencial atrapamiento por diferencial de presión en la zona depresionada. Así mismo para el pozo M-3 se ajustó el peso de lodo adecuado de 1.55 gr/cm<sup>3</sup> evitando eventos de influjo, inestabilidad de agujero y pérdidas de circulación inducidas. Alcanzando el ICO más alto del Campo M.

### Sección del cuerpo de carbonatos inestables en la formación Mioceno Inferior.

La gran mayoría de los campos petroleros en la costa del sur de México se caracterizan por una geología muy compleja en rocas terciarias y mesozoicas. Esto ha requerido la perforación de pozos con alta complejidad a través de zonas de naturaleza calcárea, algunas veces falladas y fracturadas, las cuales provocan, altos torques, arrastre, producción excesiva de derrumbes y eventos de tubería atascadas. Por lo tanto, los procesos de perforación se ven afectados por tiempos improductivos (NPT) debido a pérdidas de circulación, viajes adicionales de limpieza, operaciones excesivas de repaso con repaso posterior y algunas veces con desvíos indeseables (Sidetrack), con altos impacto en los costos de operación final.

Algunas de las áreas consideradas en este estudio, lo constituyen los campos S y X, en donde se ha visualizado un Cuerpo Calcáreo en la base del Mioceno Inferior (CCMI), el cual abarca una gran extensión de estos campos, así como de otros vecinos. Estos campos contienen yacimientos petrolíferos muy prolíficos, donde se han perforado una gran cantidad de pozos que al atravesar este cuerpo calcáreo se han visto afectados por tiempos improductivos de perforación como consecuencia de los diferentes problemas que los afectan al atravesar esta zona de muy alta inestabilidad; la cual tiene una longitud de entre 400 y 600 md. Para la perforación de esta etapa, se ha establecido por ventana geomecánica y por los diferentes eventos que se han discretizado, con 12 ½” y ampliado a 14 ½”, y cubrir esta sección con Linner de 11 ¾”.

Desde el punto de vista de la geociencias, se realizó un seguimiento de los registros geofísicos metro a metro (LWD), monitoreo continuo de los parámetros de perforación mediante las herramientas de High performance, e igualmente, se dió seguimiento continuo cada 10 metros de la litología, mineralogía presente en las descripciones de las rocas perforadas, así como la clasificación de los derrumbes, por tipos y morfología para emitir las recomendaciones a tiempo de las densidades de lodo a mantener o variar en caso de que fuese requerido, al igual que se mantuvo una constante calibración y actualización de la ventana geomecánica de perforación y en constante comunicación con el superintendente de pozo.



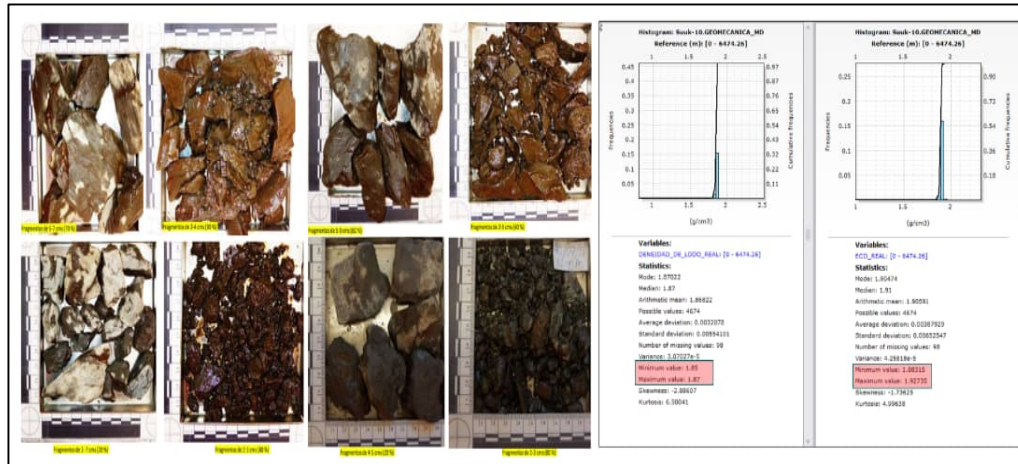


Figura 13 Derrumbes durante la perforación Clasificación e Histogramas Densidad de Lodo y ECD.

Lo adicional para esta sección, es la presencia durante la perforación y bajada de la TR, del geomecánico que, durante la perforación, y limpieza del hoyo se estuvo tomando las muestras de los derrumbes, clasificándolas y emitiendo alertas y documentando el final e inicio de la etapa de bajar la TR. Igualmente se generó con los registros de los parámetros de perforación (Drilling mechanics) una calibración metro a metro con las muestras clasificadas cada 10 mts con los datos de la cabina geológica y ajustadas por correlación con los registros geofísicos del LWD, y de esta manera se entrega a los ingenieros de perforación y Company, para la optimización de la sacada de la BHA al terminar la perforación y un diseño de la limpieza del hoyo durante la misma, mediante el control de los parámetros de perforación evitando por ejemplo el reciprocar en las zonas afectadas por zona deleznable, y de esta manera así se evitó la afectación de los carbonatos inestables.

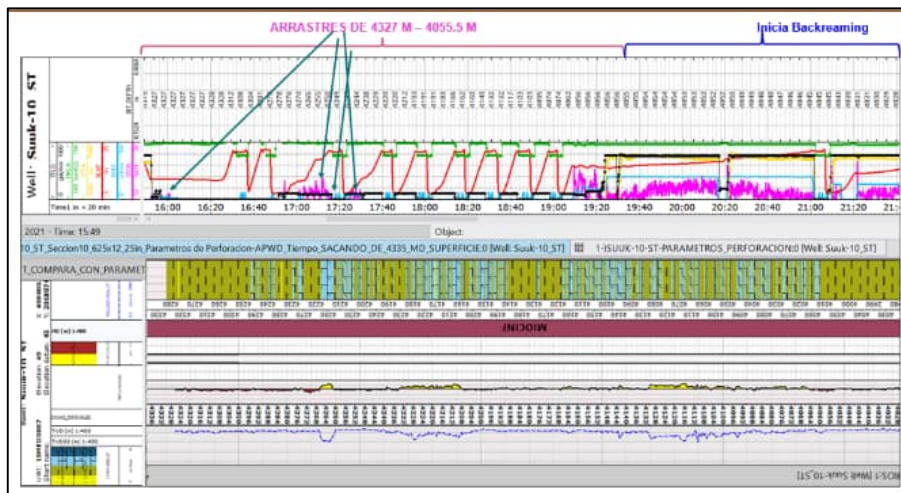


Figura 14 Correlación de litología perforada y parámetros mecánica de perforación y eventos.



### Identificación de zonas de altos torques, y paros de rotaria por mineralogía.

La Complejidad geológica por variación vertical y lateral de la litología Mudstone, lutita calcáreas y lutitas bentonítica, y la existencia de un sistema de fallas internas, juegan con los parámetros de perforación de las diferentes secciones a partir de las unidades geológicas del Mioceno hasta el mesozoico. Durante la integración de los datos de perforación (eventos), mineralogía y registros geofísicos del área, nos permitieron identificar que la presencia o coexistencia de lutitas tipo bentonítica (5%) y carbonatos (>16%) Figura, son causantes de zona de altos torques, arrastres y paros de rotaria, y de acuerdo con el seguimiento realizado durante las diferentes etapas, se presentan cuando el ampliador trabaja dichas litologías durante la perforación de la columna. Estos datos nos han servido para calibrar el valor máximo de paro en el Top drive y a realizar un plan de trabajo con diferentes pruebas de perforabilidad, así como la optimización del plan de sacada de la BHA, una vez terminadas la etapa a la profundidad programadas.

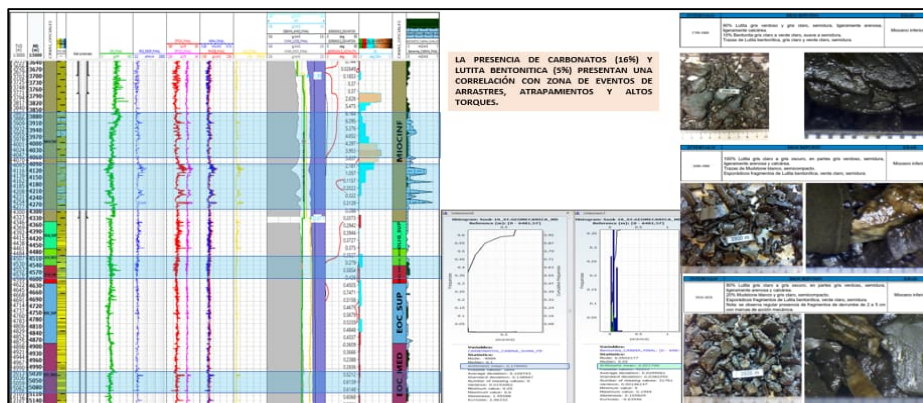


Figura 15 Análisis de Identificación de zona de presencia de lutitas bentoníticas, Carbonatos y Lutitas Calcáreas.

La integración de esta información nos permitió identificar que todos estos eventos eran por condiciones mineralógicas, dando seguridad de que los componentes de la BHA si estaban trabajando con su estructura de corte para las secciones y así evito viajes innecesarios a superficie para ver las condiciones de alguna de los componentes (Ampliador, Barrena). Igualmente se identificó que cuando el ampliador trabajaba litologías de manera individuales de bentonita o mudstone los valores de torque eran entre los 15.000 lbs-ft y 25.000 lbs-ft, pero cuando estos estaban al mismo tiempo en un intervalo, dichos valores superaban los 30.000 lbs-ft, y se generaban paros de rotaria.

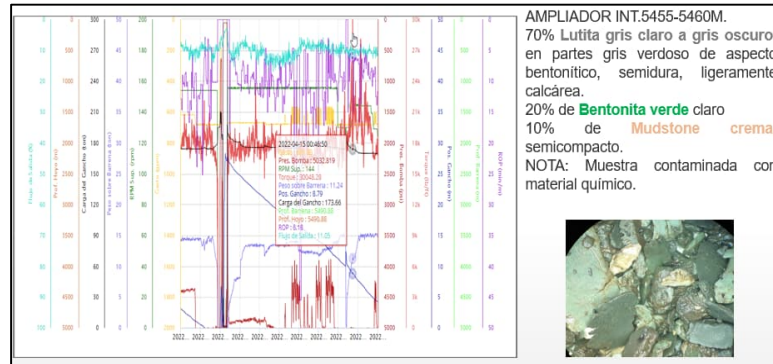


Figura 16 Intervalo conformado de acuerdo con la descripción mineralógica en campo, con la coexistencia de Lutitas bentonítica, Lutita Calcárea y Carbonatos (Mudstone), paros de Rotaria torques mayores a 30.000 lbs-ft.

**Aseguramiento de la perforación hasta la profundidad de asentamiento mediante correlación de muestras de canal, paleontología y ROP en ausencia de herramientas LWD.**

Para optimizar el asentamiento de la TR de 9 7/8” por falla de las herramientas LWD, se definió el punto de asentamiento por medio de la combinación de marcas eléctricas, análisis de espesores, litología y paleontológica de las últimas muestras de fondo.

En la siguiente figura se muestran los registros LWD, litología y ROP del pozo P-41 al momento de detener la perforación por haber encontrado el punto de asentamiento en KS. Se puede observar que no se disponía de registros LWD en la última sección de pozo, desde la parte inferior del Paleoceno Superior, por lo que se tuvo que aplicar un plan de acción que permitió correlacionar litológicamente el pozo en perforación y los pozos correlativos.



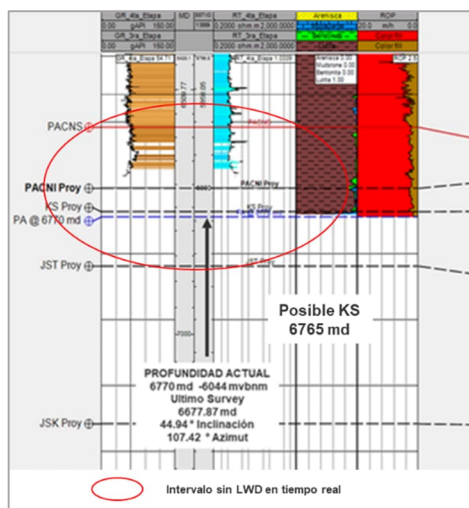


Figura 17 Perfil de registros LWD, litología y ROP del pozo P-41 donde se aprecia ausencia de los datos de GR y Resistividad mientras se continua la perforación con datos de litología y ROP.

De igual manera, el uso de la ROP permitió en este caso junto con el tiempo de atraso de recuperación de muestras litológicas, hacer mediciones de la sección a penetrar dentro de KS luego de la detección de la cima.

La integración de la información de la cabina de hidrocarburos, los parámetros de perforación e información adicional disponible en tiempo real, además de los respectivos análisis geológicos permiten hacer optimizaciones en los asentamientos de TR's en casos donde existan fallas de telemetría de herramientas LWD, como ha sido demostrado con la finalización de la etapa 9 5/8" del pozo P-41.

**Identificación y modelado estructural 3D para la interpretación detalla de fallas en la zona del pozo para detectar sistemas de fallas no presentes en la sección a rumbo del pozo.**

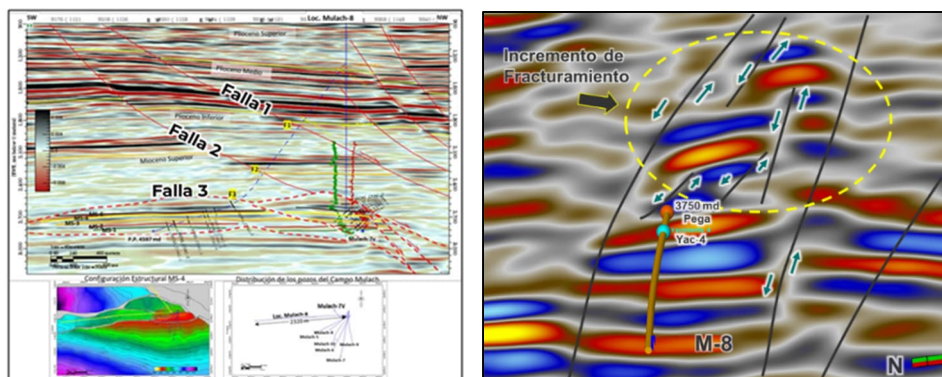


Figura 18 Sección sísmica en profundidad a rumbo del pozo (izquierda) y sección sísmica en profundidad perpendicular a la trayectoria del pozo.

Los eventos geológicos de fallas documentados en la ingeniería inicial correspondieron a los identificados únicamente en la sección sísmica a rumbo de la trayectoria del pozo M-8 los cuales correspondieron a 3 fallas normales, sin embargo, sistemas de fallas fueron identificadas posteriormente por medio de análisis más detallados con secciones sísmicas perpendicular y radiales a la trayectoria del pozo permite identificar un sistema de fallas de menor dimensión pero mayormente distribuidas en la trayectoria del pozo.

La pega del pozo M-8 correspondió a un evento geológico durante la perforación en una zona fracturada, de alta complejidad estructural con planos de debilidad asociados a la existencia de un sistema de fallas no considerada en la ingeniería inicial. Tomando en cuenta esta consideración, los siguientes pozos M-2 y M-3 fueron perforados sin problemas.

### Correlación de eventos con el modelo estructural del campo

Modelado estructural 3D de fallas y su correlación con eventos de atrapamientos, resistencias y fricciones en pozos perforados para mejorar la trayectoria de otros siguientes pozos.

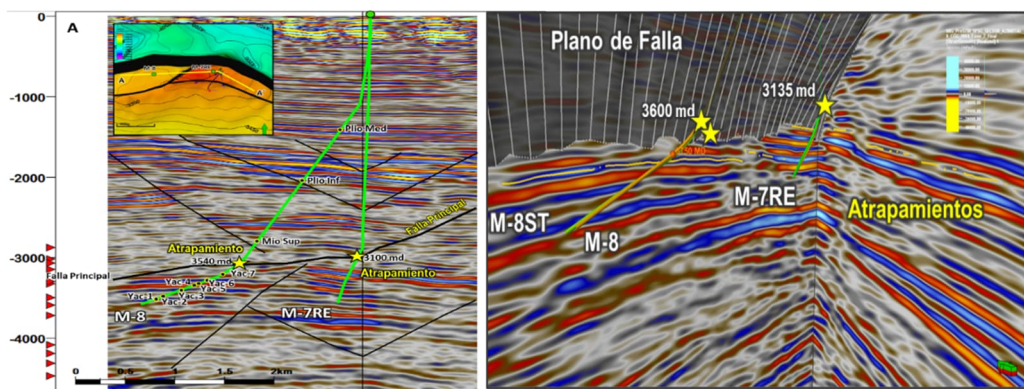


Figura 19 Sección sísmica 2D en profundidad (izquierda) indicando eventos de pegas sobre una misma falla y vista 3D (derecha) de eventos de atrapamiento de distintos pozos sobre el plano de una misma falla.

La interpretación del sistema de fallas dentro del campo permite dar seguimiento a fallas que han causado problemas durante la perforación de otros pozos y de esta manera tomar precauciones y mejorar la trayectoria de los siguientes pozos. A continuación, se muestran un ejemplo de derrumbes tabulares por perforación de zonas de debilidad en el pozo M-7RE.

### Control de estabilidad de zonas fracturadas en pasos de falla

Optimización del diseño de baches de reforzamiento en zonas de inestabilidad y posibles pérdidas a partir del cálculo del tamaño de la garganta de poro.

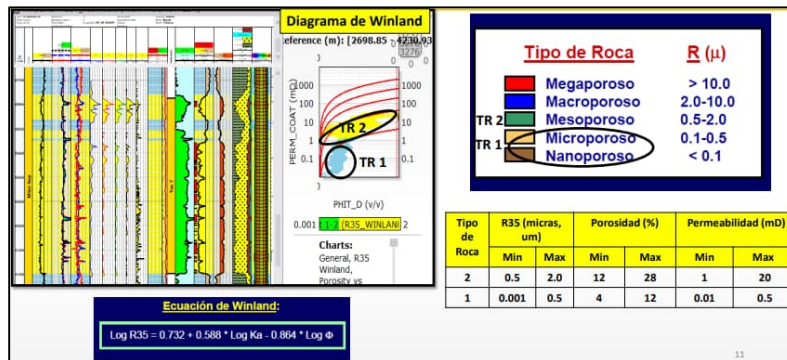


Figura 20 Esquema del análisis petrofísico para el cálculo de tamaño de garganta de poro.

De acuerdo con el Diagrama de Winland de Porosidad vs Permeabilidad pudo identificar dos tipos de roca en el resultado del gráfico, uno señalado en amarillo (TR 2) caracterizado por poseer permeabilidades promedio de 15 mD y gargantas de poros en el orden de 1.8 um y otro señalado en azul caracterizado por poseer permeabilidades en el orden de 0.1 mD con gargantas de poros menores a 0.5 um.

En la etapa de 14.5 in x 17.5in para la TR 13 5/8”, se encuentra una zona de efecto centroide constituidas por areniscas acuíferas con alta presión que han causado la pérdida de varios pozos durante la perforación de esta, igualmente en esta sección en la parte basal se encuentran unas areniscas con fracturas verticales, las cuales al ser perforadas presenta regímenes de altas pérdidas. En el caso de los pozos S y U dichas areniscas fueron discretizadas y analizadas integrando la información de registros geofísicos y mineralógica de cabina de Mud Logging, obteniéndose un estimado de las aperturas de los poros presentes, optimizándose, el plan de baches de obturantes, resultando la etapa sin pérdidas.

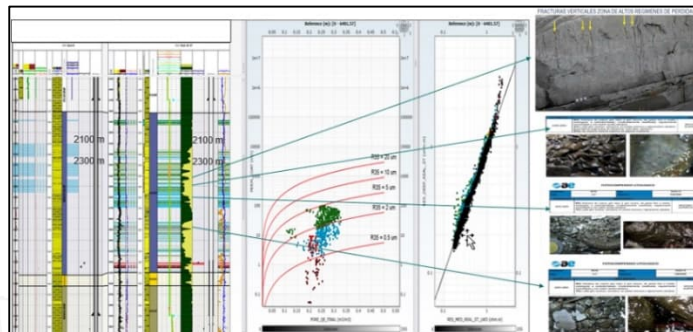


Figura 21 Predicción e identificación de zona de fracturas verticales e identificación de apertura en micrones para el diseño de baches de obturantes para reducir pérdidas.

Indicadores del impacto de las geociencias sobre la perforación.

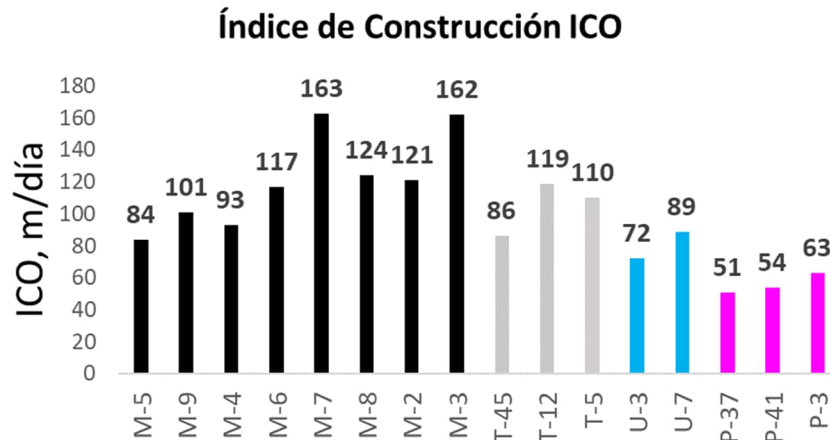


Figura 22 índice de construcción en pozos de los campos M, T, U y P.

En la imagen previa se observan los pozos perforados en los campos M, T, U y P en orden cronológico donde se identifica el aumento progresivo del índice de construcción producto de la optimización de los procesos de perforación guiados por el conocimiento geológico y dinámico de los campos que han derivado en la mitigación de riesgos geológicos, reducción de tiempos de perforación, reducción de tiempos improductivos y costos asociados a actividades y materiales no previstas en los programas de perforación.

A continuación, se presentan las causas que generaron tiempos no productivos en los pozos del campo P.

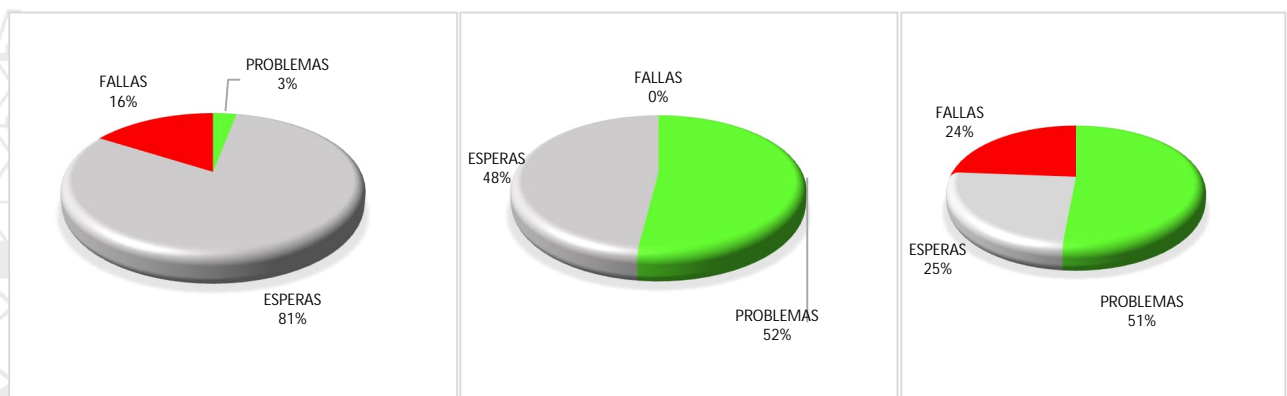


Figura 23 Causas de NPT en los pozos P-37, P-41 y P3

Los tiempos no productivos (NPT) están compuestos por tiempos por fallas, por esperas y por problemas o eventos. En notable como los NPT en dos de los tres pozos perforados en el campo P se deben a problemas o eventos que dependen de la ingeniería programada y su adaptación a las condiciones operativas reales durante la perforación, viajes de la sarta de perforación e introducción de tuberías de revestimiento.

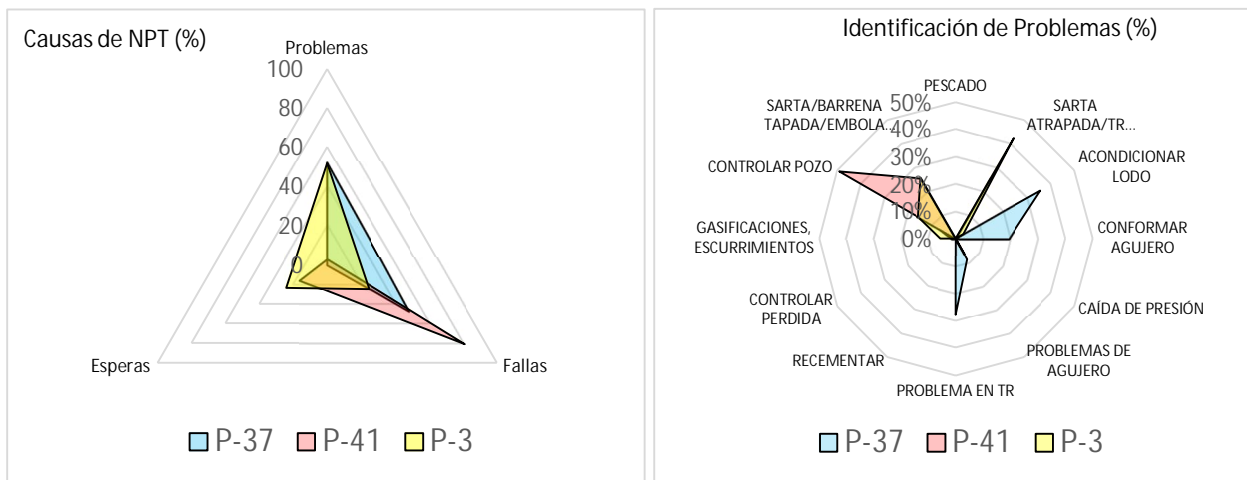


Figura 24 Diagrama de distribución de NPT en el campo P (izquierda) y diagrama con la distribución de problemas en los pozos del campo P.

De acuerdo con los esquemas anteriores, la principal causa de NPT son los problemas o eventos ocurridos durante la perforación originados por las variaciones de las condiciones estáticas (estructura de las formaciones) y dinámicas (geo presiones) del agujero que no fueron consideradas en la etapa de diseño e ingeniería de detalle y por ende genera eventos y acciones no programados que derivan en costos adicionales. La resolución de estos problemas requiere en un 95% de la intervención del equipo multidisciplinario de geociencias. En el campo P más del 50% de los de los problemas están asociados a control de pozo y atrapamientos de sarta y TR.

### Conclusiones

El control de la inestabilidad del agujero por planos de debilidad amerita baches de reforzamiento cuya efectividad requiere del análisis geocientíficos.

La existencia de una subestructura multidisciplinaria de geociencias de apoyo y seguimiento a la perforación a hace posible elaborar los métodos para anticipar y entender el origen los eventos geológicos y con ello identificar de una manera integral las posibles causas de los problemas que generan NPT.

El éxito de las operaciones de levantamiento del ensamblaje de fondo e introducción de

tuberías de revestimiento está íntimamente relacionado con el tipo de litología y composición mineralógica presente a lo largo del agujero por lo que conocer su distribución y el comportamiento de los parámetros durante la perforación son la clave para detectar las zonas susceptibles a inestabilidad que requieren cuidados y atención especial.

La integración la información litológica proveniente de la cabina de hidrocarburos, en conjunto con los parámetros de perforación y registros con en tiempo real, además de análisis geológicos representan una alternativa efectiva para realizar correlaciones aceptables y con ello hacer optimizaciones en los asentamientos de tuberías de revestimiento en casos donde existan fallas en las herramientas de LWD.

El aumento de la eficiencia de las actividades de perforación durante el desarrollo de campos marinos está directamente influenciado por el cada vez mayor nivel de entendimiento de las condiciones geológicas y dinámicas de los campos, reflejado en el incremento de los índices de construcción evidenciados en todos los campos intervenidos.

La evolución en el entendimiento de los campos específicamente de sus condiciones geológicas y de yacimientos han permitido elaborar modelos geomecánicos más realistas y optimizados que en algunos casos han generados ahorros significativos en fluidos de perforación por uso de fluidos de menor densidad a los pozos previos y minimización de pérdidas de circulación hasta de 75%.

Basado en las causas de los NPT, el impacto de las geociencias es mayor al 50%.

## Agradecimientos

A la empresa Opex perforadora SA de CV por la apertura y confianza para tomar en cuenta las recomendaciones del equipo de geociencias en pro del éxito de las perforaciones de pozos en aguas someras.

### Trayectoria profesional del autor:

Ing. Aroldo Joa Bermúdez Guaita

Ingeniero de petróleo con más de 22 años de experiencia como ingeniero de yacimientos y producción, participando diferentes proyectos de estudios integrados en operadores y empresas de servicios de petróleo y gas en Venezuela, regiones terrestres y marinas de México y área permian en USA. Cuenta con experiencia en evaluación de campos en desarrollo para generar cartera de pozos a perforar, reparar e identificar oportunidades para optimizar los sistemas de levantamiento artificial. Experiencia en el control de ejecución de proyectos EOR como inyección de solventes y diluyentes en pozos. Experiencia en análisis geocientíficos aplicado a la ejecución de programas de perforación minimizando la incertidumbre geológica.

