

## Perforación en zonas con planos de debilidad

*Alan Juárez Reyes*

*José Miguel Cruz Oropeza*

*Pemex Exploración y Producción, STEP*

Artículo recibido en julio de 2023-evaluado-correcto y aceptado en septiembre de 2023

### Resumen

Actualmente la búsqueda de hidrocarburos en México ha migrado a zonas con geología adversa; como consecuencia en la perforación de pozos se han presentado distintos tipos de inestabilidad del agujero, asociados a zonas con características estructurales débiles, comúnmente llamados “planos de debilidad”, los cuales ocasionan desviaciones en las operaciones de perforación.

En este trabajo se exponen casos reales actuales de algunos campos en México, en los cuales se han encontrado zonas de debilidad de la roca causadas principalmente por formaciones calcáreas-lutíticas fracturadas y zonas inestables por fallas geológicas, lo que ha ocasionado problemas de inestabilidad de agujero durante la perforación de los pozos, incrementando los tiempos operativos.

Con base en la experiencia obtenida se desarrolló una metodología que comprende la caracterización de las zonas problemáticas y la calibración del modelo de inestabilidad de acuerdo con el entorno geológico, dando como resultado la identificación de los mecanismos que pudieran ser precursores de este comportamiento y la mitigación de riesgos durante la perforación de estas zonas, lo que permitirá mejorar la planeación y ejecución de los pozos, con el fin de optimizar los tiempos operativos y su entrega a producción.

**Palabras clave:** Perforación, planos de debilidad, estabilidad del agujero, tubería de revestimiento.

## Drilling in formations with weakness planes failures

### Abstract

Currently, the search for hydrocarbons in Mexico has shifted towards areas with adverse geology; as a result, various types of hole instability have arisen during well drilling, associated with areas featuring weak structural characteristics, commonly referred to as “weakness planes failures”. These cause deviations in drilling operations.

This paper presents contemporary real-life cases from some fields in Mexico where weakness zones in the rock have been encountered, primarily caused by fractured calcareous-lutitic formations and unstable areas due to geological faults, which have caused hole instability issues during well drilling, thereby increasing operational times.

Based on the experience gained, a methodology was developed that encompasses the characterization of problematic zones and the calibration of the instability model according to the geological environment. The outcome includes the identification of mechanisms that might be precursors to this behavior and risk mitigation during the drilling of these zones, allowing for improved planning and execution of the wells, with the aim of optimizing operational times and their handover to production.

**Keywords:** Drilling, planes of weakness, hole stability, casing.

## Introducción

La estabilidad del agujero es uno de los factores más importantes a tomar en consideración durante la perforación de un pozo, ya que asegura el objetivo más importante de la perforación del agujero que siempre será la introducción de la tubería de revestimiento a la profundidad final de la etapa de acuerdo con lo planeado; sin embargo, existen zonas con características inestables que son susceptibles a presentar un mecanismo de falla del agujero, lo que obliga a tomar medidas adicionales para garantizar la calidad del mismo, como generar ventanas de operación seguras y prácticas operativas preventivas, las cuales se discutirán en este artículo.

Debido a la demanda de una producción mayor de hidrocarburos en México, la explotación petrolera ha migrado a campos más complejos, en los que se encuentra una alta anisotropía relacionada a eventos geológicos; a su vez más zonas inestables que provocan desviaciones en las operaciones de perforación, algunas de ellas con efectos catastróficos que dan como resultado atrapamientos de sarta y en ocasiones pérdida del agujero por pez.

En este artículo se describirá paso a paso como identificar las zonas con características inestables desde la planeación de un proyecto-pozo considerando los siguientes factores: eventos geológicos, zonificación de áreas, calibración del

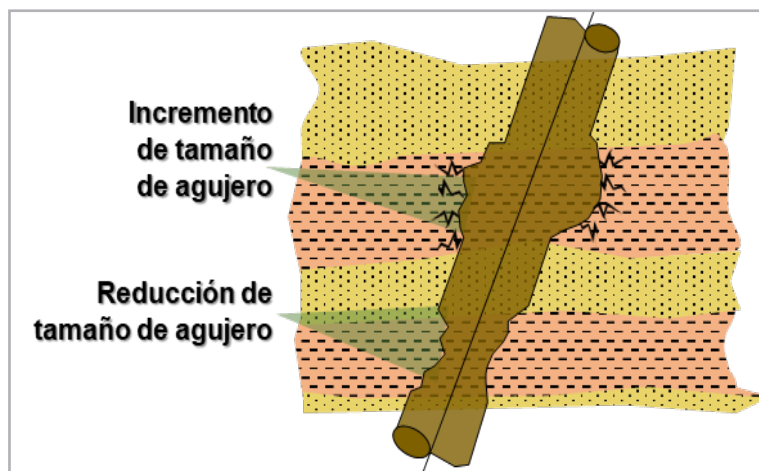
modelo geomecánico, lecciones aprendidas y mejores prácticas en pozos análogos; lo anterior para garantizar el éxito durante la perforación del agujero.

## Mecanismos de falla del agujero

La inestabilidad del agujero puede causarse por razones químicas o mecánicas, las cuales se originan por eventos geológicos, o se inducen durante la perforación.

La interacción del fluido de perforación con la formación durante la perforación puede generar una inestabilidad química del agujero (siendo ésta la más común); en algunos casos también se puede presentar una inestabilidad química por migración de fluidos entre las formaciones que modifican la composición de la roca.

Existen dos tipos de inestabilidad del agujero por influencia mecánica inducida durante la perforación; la primera puede deberse al colapso por una presión hidrostática baja y la segunda por fracturas inducidas debido a una alta presión hidrostática (Aadnoy y Chenevert, 1987), **Figura 1**, que provocan un mecanismo de falla del agujero; estos tipos de inestabilidad resultan tener mayor impacto cuando se atraviesan zonas con características estructurales débiles comúnmente llamadas “planos de debilidad”, debido a que la formación se alteró por los esfuerzos provocados durante eventos geológicos.



**Figura 1.** Problemas comunes del agujero, (Aadnoy y Chenevert, 1987).

Las formaciones pueden presentar un cambio estructural dependiendo del tipo de roca y el ambiente geológico, en un ambiente adverso el régimen de esfuerzos altera la matriz de la roca cediendo estructuralmente, creando o propagando fracturas o fallas precursoras de zonas inestables, las cuales son provocadas cuando el esfuerzo principal excede la resistencia de la roca. En este momento la resistencia estructural es cero, la cohesión a lo largo de los planos de debilidad es nulo, lo que conlleva que las partículas de la roca se deslicen a lo largo de los planos de debilidad más fácilmente, provocando una inestabilidad del agujero.

Durante la perforación del agujero se altera el equilibrio de los esfuerzos de la formación y éstos a su vez se redistribuyen para recuperarlo, pero en zonas inestables no ocurre de esa manera, la formación débil se desliza y cae en forma de derrumbe (caving), muchas veces es mal interpretado como sinónimo de insuficiencia de densidad de fluido de perforación, sin embargo; la variación hidrostática y las propiedades no óptimas del fluido, aceleran la inestabilidad de la formación hasta ocasionar un accidente mecánico.

## Identificación de planos de debilidad

### A) Ambiente geológico

Los planos de debilidad no son fáciles de identificar, por lo que resulta conveniente el trabajo en equipo entre el especialista geomecánico y el área de geociencias. El primer paso, ya seleccionada el área de interés para este proyecto, es verificar las características geológicas de la zona y qué estructuras o eventos geológicos pudieran impactar de forma negativa durante la construcción del proyecto-pozo. Los eventos de los pozos de correlación ayudan a confirmar las hipótesis. Se mencionarán algunos precursores para la generación de planos de debilidad.

- Tectónica salina (estructuras salinas).

Los pliegues por estructura salina son comunes dentro de la tectónica salina. Los anticlinales salinos tienen una sobrecarga relacionada por la surgencia de sal y se generan debido a su movilidad por diferencia de densidades entre las capas de sedimentos no consolidados. La evaporita más común es la halita (NaCl) con una densidad de  $2.17 \text{ g/cm}^3$ , considerablemente inferior a la mayoría de las rocas sedimentarias. La halita es sólida, pero al igual que todas las rocas, se comportará de manera plástica y se deformará si se somete a suficiente calor y/o presión, lo que produciría movilidad o Halokinesis (en el caso de la halita).

La presión necesaria para que la halita se comporte plásticamente puede generarse con sólo unos pocos cientos de metros de espesor de los estratos superiores (sobrecarga) y, debido a su menor densidad, la masa de halita comenzará a moverse hacia arriba en áreas donde la sobrecarga es más delgada o debilitada, el movimiento ascendente de la sal deforma los estratos suprayacentes, fenómeno que se conoce como “tectónica salina”. Dicho cambio en el entorno geológico modifica los esfuerzos de la roca en todas las direcciones y en algunas secciones de formación débil crea o propaga fracturas o fallas, creando zonas de debilidad mayormente en formaciones sedimentarias.

- Cuerpos calcáreos fracturados

Existen cuerpos calcáreos depositados durante el Cenozoico que experimentan estrés por la misma sobrecarga y los cambios geológicos, como el movimiento tectónico o la influencia de estructuras salinas (empuje ascendente), **Figura 2**; en algunos casos los cuerpos calcáreos se encuentran mezclados con material lutítico que al recibir los esfuerzos del entorno se compactan, propiciando que el material con más dureza (carbonatos) ceda y se fracture, provocando un área inestable confinada a los esfuerzos geológicos.

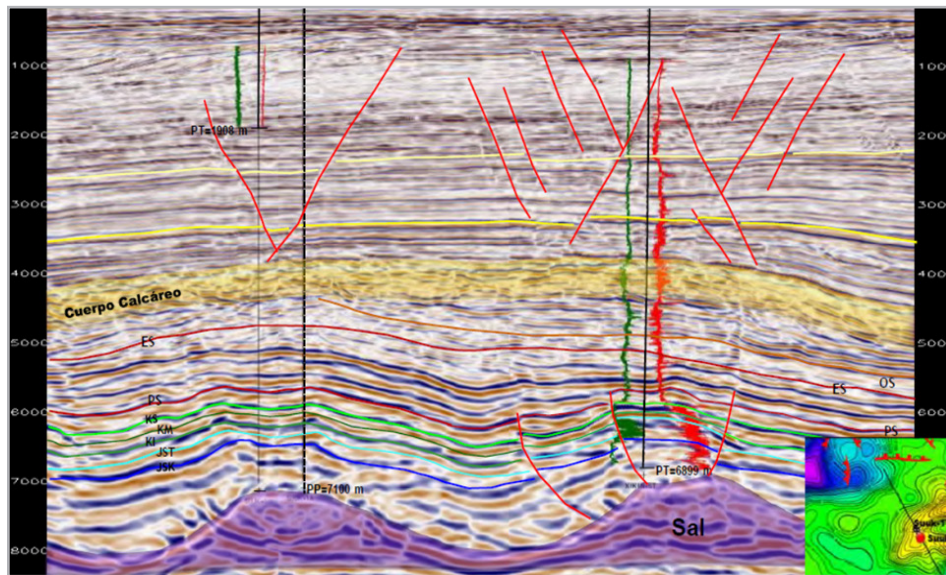


Figura 2. Sección sísmica que ilustra la influencia de la sal y el cuerpo calcáreo.

- Cuerpos lutíticos fracturados  
Al igual que los cuerpos anteriores, estos estratos se fracturaron por esfuerzos geológicos generados por el tectonismo o empuje de las estructuras salinas; estos cuerpos lutíticos no presentan alta plasticidad, comunes en la zona Terciaria del Mioceno y pueden ser altamente reactivos, como la montmorillonita y esmectita.
- Actividad tectónica, (fallas geológicas)  
Se ha observado que en fallas geológicas con grandes saltos o provocadas por una geología muy adversa, se presenta una influencia de esfuerzos cercanos a la falla, por lo que son precursores, **Figura 3**, generalmente de planos de debilidad y son más evidentes en los estratos paralelos más cercanos.

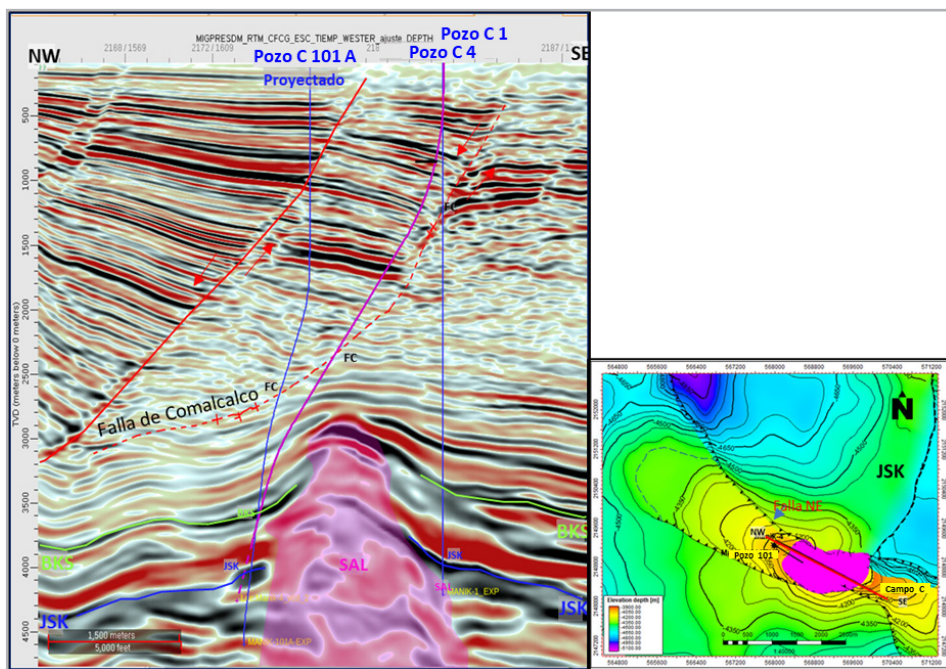


Figura 3. Sección sísmica que ilustra la influencia de la sal y la actividad tectónica por fallas.

### B) Durante la perforación del pozo

El indicativo más importante para identificar planos de debilidad es el derrumbe tipo “tabular” (tabular cavings) durante la perforación, en el que se muestra la inestabilidad de la formación no relacionada con la falta de densidad; otra herramienta que ayuda a ubicar con mayor exactitud

este comportamiento es el registro sísmico en tiempo real, ya que en conjunto con los eventos de derrumbe, sirve para delimitar las zonas con planos de debilidad, y se pueden observar como una atenuación de la medición del espectro de coherencia del registro sísmico en intervalos específicos, lo cual se conoce como falta o pérdida de coherencia, indicativo de zonas fracturadas o planos débiles.

## Características de los modelos geomecánicos de los pozos con zonas inestables por fracturamiento

Para el cálculo del gradiente de sobrecarga se utiliza la información disponible del registro RHOB, así como la TZ o velocidad de intervalo y el registro DTCO; con estos datos se elabora una correlación utilizando la ecuación de Gardner para determinar el RHOB en función del DTCO, resultando en valores promedio del coeficiente de 0.213 y de exponente de 0.262, la cual queda establecida en la forma siguiente:

$$RHOB\left(\frac{g}{cm^3}\right) = 0.213 * \left(\frac{1000000}{DTCO}\right)^{0.262}$$

Para el cálculo de la presión de poro, el primer paso es estimar el mecanismo generador de la presión de poro, el cual por lo general es el de subcompactación, aunque también existen pozos con mecanismo secundario, como la expansión de fluidos. Para la estimación se utiliza el registro de GR, RES y DTCO, mediante la ecuación de Eaton se determinan los exponentes que rigen el comportamiento del o de los campos.

Para la calibración de la presión de poro, se toma en cuenta si existe información de pruebas MDT o XPT, la densidad de lodo utilizada durante la ejecución de los pozos de correlación y los datos de la presión del yacimiento.

La estimación del gradiente de fractura se realizó mediante un análisis regional de las pruebas de goteo efectuadas en los campos, estableciéndose una ecuación como la que se muestra en la **Figura 4**.

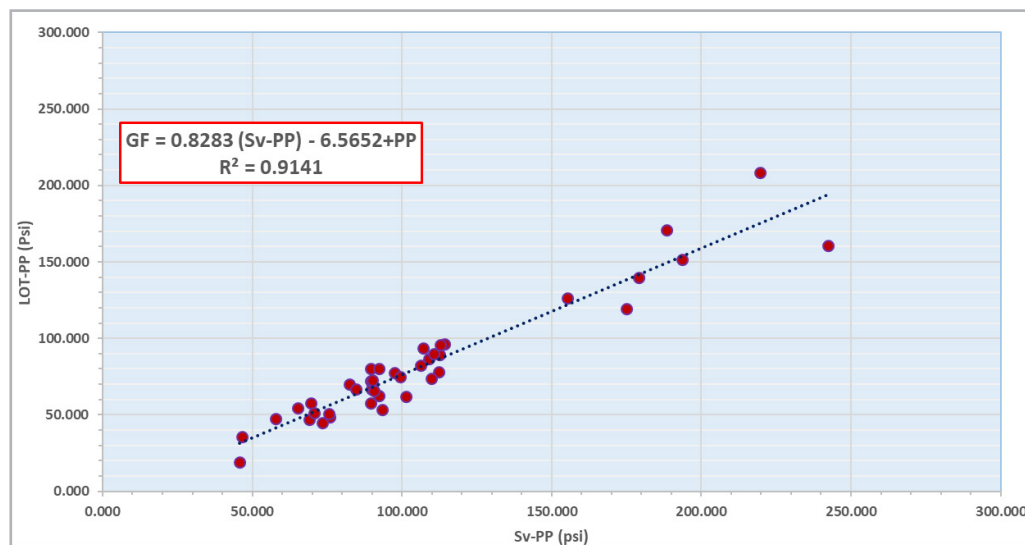
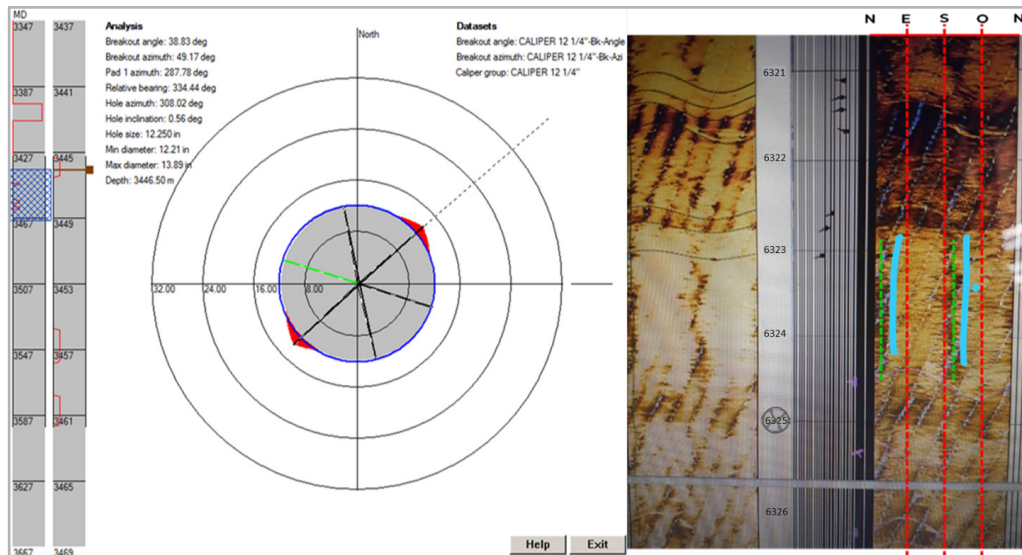


Figura 4. Ecuación regional para el cálculo del gradiente de fractura.

Las zonas que presentan fracturamiento y por ende derrumbe de tipo tabular, suelen presentar pérdida de fluido con densidades menores a las pruebas de goteo, causada por la misma naturaleza de la formación; se perfora con las densidades equivalentes mínimas para no generar perturbación en la zona fracturada, ya que este fenómeno provoca una mayor cantidad de derrumbe con densidades equivalentes altas. En pozos con zonas de fracturas se ha observado que la combinación de equipos como MPD, material obturante de alto impacto y DEC bajas, suelen generar menor derrumbe; si a esto se le agrega circulación cada 200 metros perforados y el bombeo de baches de limpieza y relajados, el éxito de la operación tendrá mayor probabilidad.

La estimación de la dirección y magnitud de los esfuerzos se realiza con la información del registro caliper orientado, o registro de imágenes en la sección del yacimiento. La característica que se busca con esta información es la de observar breakouts o fallas por tensión, ambos indicios indican la dirección del  $\sigma_{hmin}$  y del  $\sigma_{HMax}$ , respectivamente.

En la imagen de la izquierda de la **Figura 5**, se observa un breakout (zona roja), el cual indica la dirección del esfuerzo horizontal mínimo, en la imagen de la derecha se observa en el registro de imágenes fallas por tensión (líneas verdes punteadas), las cuales se generan en la dirección del esfuerzo horizontal máximo.



**Figura 5.** Registro caliper orientado y de imágenes.

La magnitud del esfuerzo depende de la anisotropía que exista en el área; en los campos en desarrollo se han observado anisotropías pequeñas de hasta 5% en el Terciario (lutitas y arenas), y de hasta 40% en el caso del Mesozoico

(dolomías y calizas arcillosas). La técnica utilizada en estos pozos suele incluir al polígono de esfuerzos, **Figura 6**, el cual requiere de la información de UCS, ancho de breakout y pruebas de goteo.

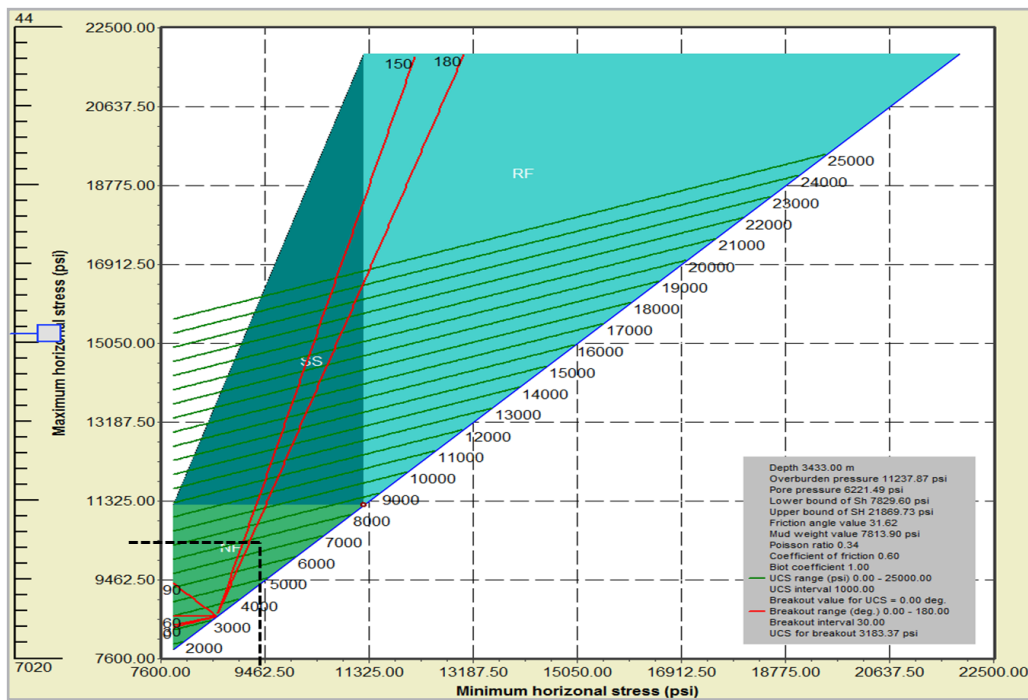


Figura 6. Polígono de esfuerzos.

## Casos de estudio y análisis

### 1) Caso campo A

El pozo 1 se perforó con barrena de 14 ½" x 17 ½" el intervalo de 2900 a 3430 m, presentando problemas como fricciones, resistencias, torques, atrapamientos en las profundidades de 2930, 3059, 3382 y 3433 m, derrumbes y efecto ballooning. La densidad utilizada fue de 1.91 g/cm<sup>3</sup> de fluido de emulsión inversa. Parte de esta problemática se debió a arcillas reactivas ante presencia de agua, tales como montmorillonita y/o esmectita.

En el intervalo perforado de 2200 a 3500 m se observó que los valores del registro caliper eran menores al diámetro del agujero, presentándose los problemas mencionados en el

párrafo anterior. De acuerdo con la información del master log, la sección de 2200 a 3500 m estaba conformada por casi un 100% de lutita y lutita arenosa del Mioceno Superior, presentándose durante la circulación del pozo derrumbes de tipo tabular.

Con la información del registro caliper, así como de la semblanza del registro sísmico, es posible identificar los intervalos con zonas débiles o con fracturamiento natural. Para la sección de 2175 a 3419 m se observaron en el caliper secciones totalmente derrumbadas, **Figura 7**; así como durante la limpieza se recuperaron derrumbes tabulares en temblorinas, **Figura 8** izquierda, los cuales se asociaron a planos de debilidad, inferidos en la falta de calidad o coherencia del registro sísmico (cuadros rojos de la parte derecha de la Figura 8).

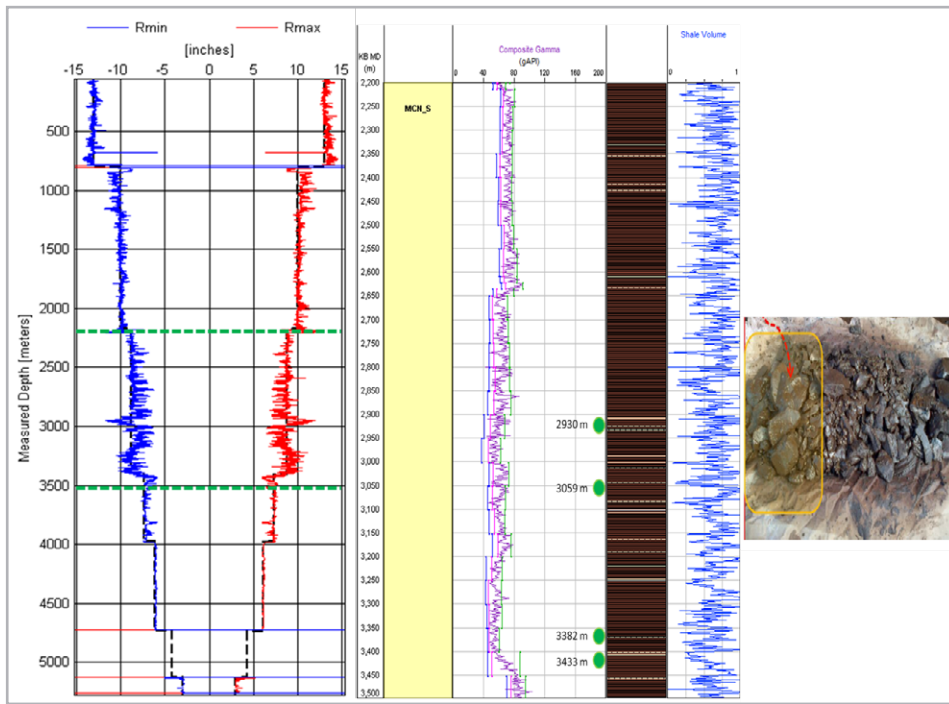


Figura 7. Registro caliper y correlación litológica.

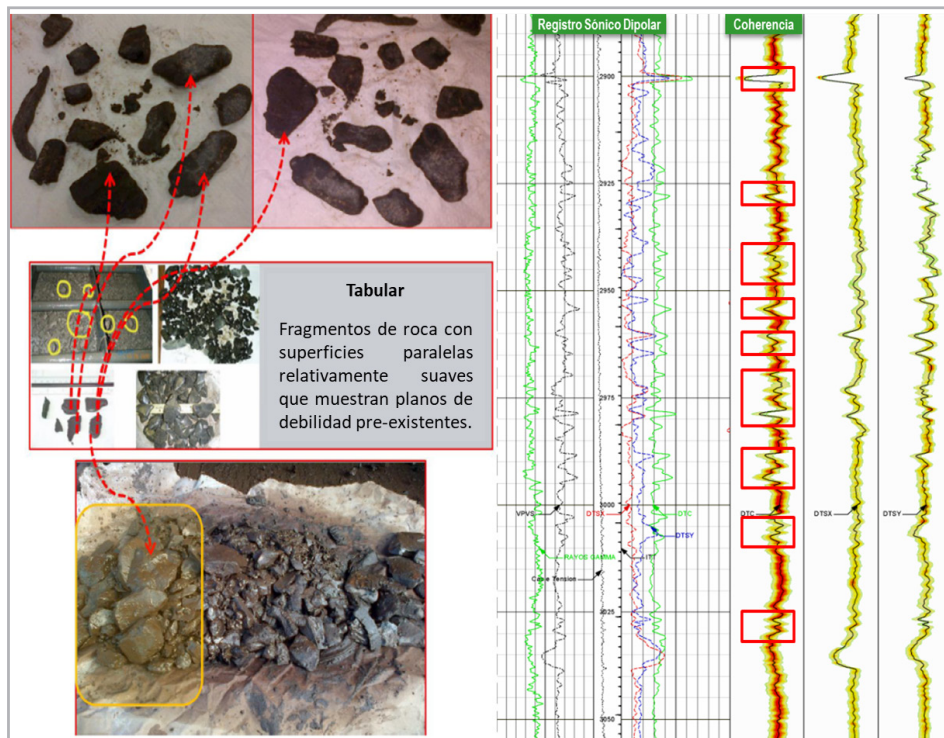


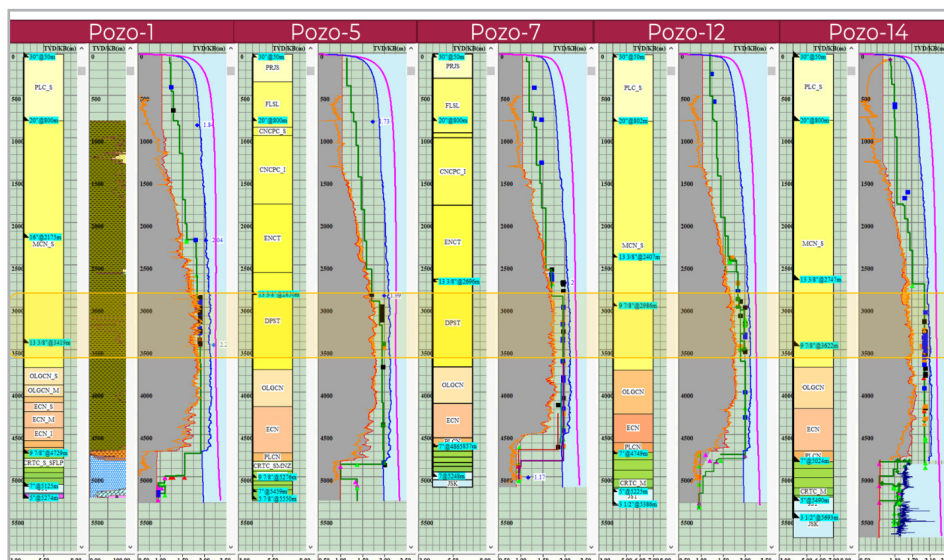
Figura 8. Registro sónico dipolar y espectro de coherencia.



Estas zonas pueden generar gran cantidad de derrumbe tabular debido a incrementos de densidad, ya que esto aumenta el filtrado de lodo provocando que estas zonas cedan y se incorporen al pozo, también durante la perforación de estas zonas no se recomienda realizar backreaming (rimado en reversa) con ampliador, ya que también incrementa el derrumbe. Es recomendable diseñar una sarta que ayude a mitigar choques y vibraciones.

Con la información analizada de los modelos geomecánicos de los pozos del campo A, así como de la problemática

presentada, es posible observar que la mayoría de los eventos se concentran en el intervalo de 2500 a 3700 m, **Figura 9**, dentro de las formaciones Encanto y Depósito pertenecientes al Mioceno; los más relevantes como fricciones, resistencias, atrapamientos y derrumbe de tipo tabular se asocian a zonas con microfracturamiento, salinidad del lodo baja respecto a la formación y zonas con presencia de montmorillonita, la cual es altamente reactiva. Esto ha provocado el incremento innecesario de densidad de lodo de hasta 2.03 g/cm<sup>3</sup>, causando pérdidas parciales y/o totales en zonas con mayor permeabilidad.



**Figura 9.** Intervalo de inestabilidad del campo A.

En la gráfica de avance del pozo 14 mostrada en la **Figura 10**, se observa que la mayor concentración de eventos está aproximadamente en el intervalo de 3200 a 4000 m. Durante la perforación del primer agujero no se observó ningún

problema; sin embargo, durante el viaje a superficie de la sarta se presentaron problemas de estabilidad de agujero, asociados a la zona fracturada del campo y a la presencia de arcillas reactivas, (montmorillonita).

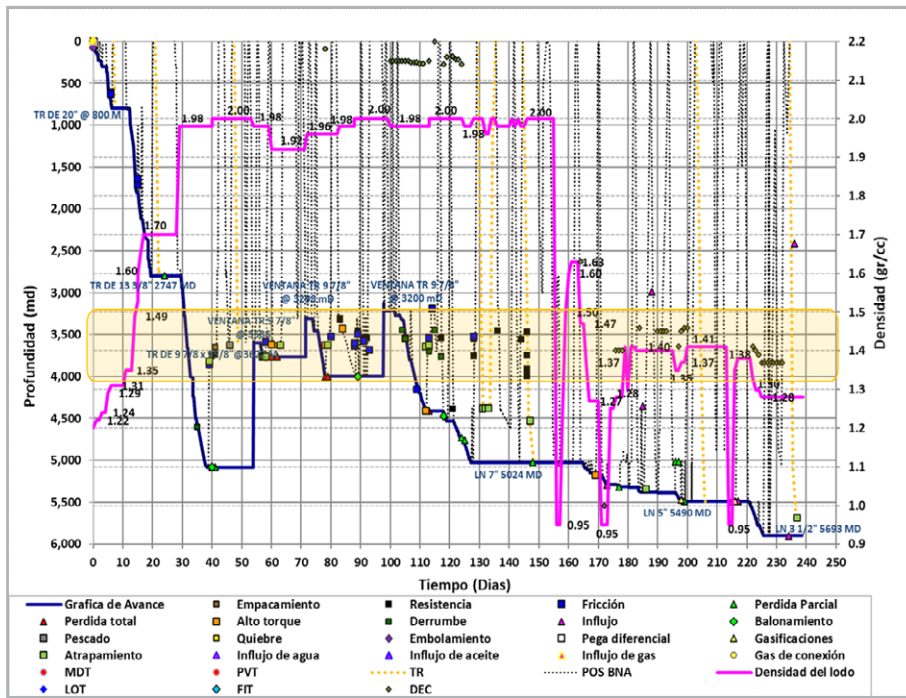


Figura 10. Gráfica de avance de perforación vs densidad pozo 14.

La apariencia de los derrumbes del pozo 14 es de tipo tabular, como resultado de varias intersecciones de fases de fallas que ocasionan fracturamiento en el área. El fracturamiento de la zona puede causar pérdida de fluido y a su vez que el fluido entre en las fracturas, provocando que los bloques se desprendan ocasionando represionamiento en el pozo e

incremento de la DEC. Otro factor que complica la situación es la relación del ángulo de ataque o de perforación versus los echados de la formación, que contribuye a la generación de derrumbes, como los observados durante la perforación del pozo 14, **Figura 11**.

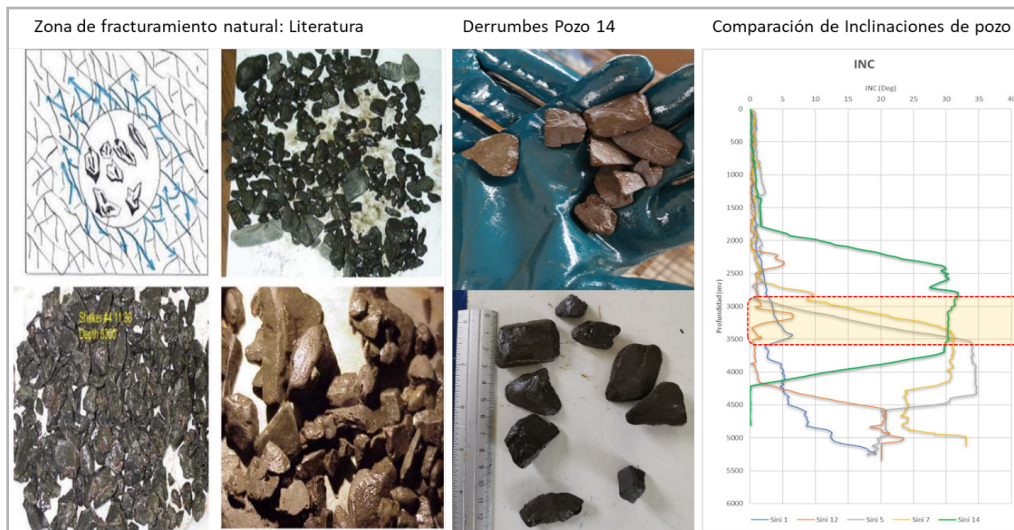


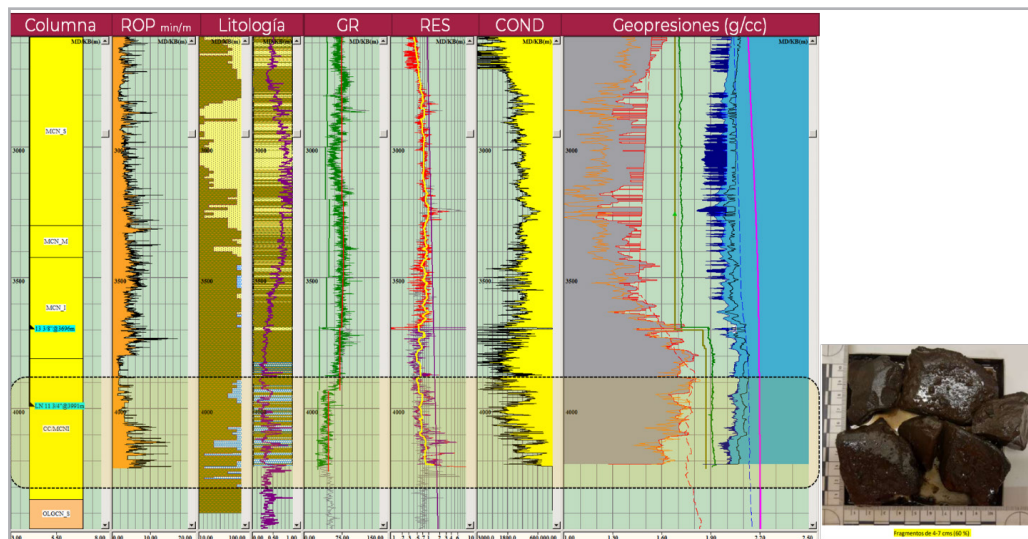
Figura 11. Zona de debilidad en pozo 14.

## 2) Caso del campo B

Los eventos más relevantes durante la perforación del pozo 10 fueron los siguientes:

- 1) Fricción al levantar sarta a 673 m con densidad de 1.14 g/cm<sup>3</sup> y resistencia a 930 m al meter la TR con 1.14 g/cm<sup>3</sup>.
- 2) Pérdidas parciales al introducir la TR de 16" de 954 a 1700 m con lodo de 1.55 g/cm<sup>3</sup>.
- 3) Problemas de altos torques y derrumbe en el intervalo de 2069 a 3168 m con densidad de lodo de 1.68 g/cm<sup>3</sup>. Pérdida parcial a la profundidad de 3247 m, con densidad de 1.68 g/cm<sup>3</sup>.
- 4) Pérdida parcial al meter la TR de 13 3/8" en el intervalo de 842 a 3700 m, con densidad de lodo de 1.68 g/cm<sup>3</sup>.
- 5) Fricciones al repasar y sacar la sarta en el intervalo de 4300 a 3918 m, con densidad de lodo de 1.87 g/cm<sup>3</sup>.
- 6) Efecto balloning al ir bajando el liner de 11 3/4" en el intervalo de 3687 a 3712 m, con densidad de lodo de 1.87 g/cm<sup>3</sup>.
- 7) Atrapamiento del liner a 3991 m, con densidad de lodo de 1.87 g/cm<sup>3</sup>.
- 8) Salida de derrumbe y altos torques repasando el agujero de 3991 a 4390 m.

Durante la perforación del intervalo de 3880 a 4300 m del pozo 10, se identificó una zona inestable compuesta de material calcáreo y lutita, con un fracturamiento intenso perteneciente al Mioceno Inferior, donde se presentaron resistencias, altos torques y derrumbes de tipo tabular (característico de planos de debilidad, **Figura 12**; al realizar el viaje a superficie se tuvieron arrastres e intentos de atrapamiento a 3918 y 4331 m.



**Figura 12.** Zona de debilidad debido al CCMI pozo 10.

En la introducción del liner 11 3/4" se presentaron resistencias y circulación parcial (el equipo de flotación presentó falla), ocasionando atrapamiento del liner a 3991 m, sin poder liberar. Posteriormente se realizó un viaje de reconocimiento con sarta simulada y ampliador a fondo perforado (4400 m), con intentos de atrapamientos, salida

abundante de derrumbe, aumento de presión de la bomba y circulación intermitente. Se incrementó la densidad de 1.87 a 1.90 gr/cm<sup>3</sup> y durante el viaje a superficie a 4006 m se observó atrapamiento de la sarta, la cual se pudo liberar; se levantó a superficie sin recuperar la barrena y el ampliador, ocasionando pérdida del agujero por pez, **Figura 13**.

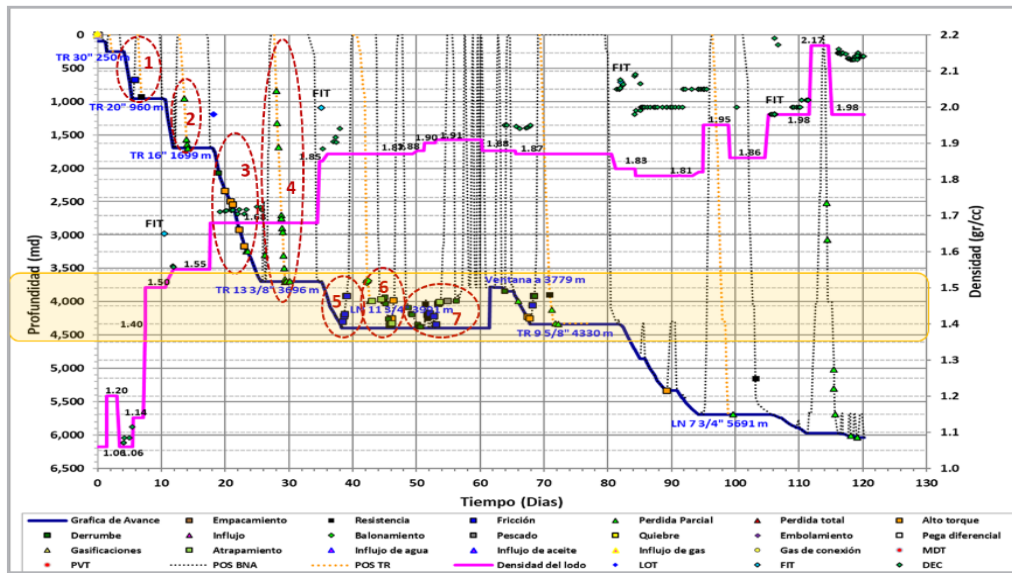


Figura 13. Gráfica de avance de perforación vs densidad pozo 10.

Se identificó que la inestabilidad del cuerpo calcáreo es muy severa, susceptible a la variación hidrostática y al tiempo de exposición, definiendo que la mejor opción es aislarlo para poder perforar la etapa siguiente sin ningún problema con una densidad de lodo de 1.95 g/cm<sup>3</sup> y una DEC de hasta 2.00 g/cm<sup>3</sup>. Para asegurar el viaje a fondo de la TR en esta zona, se debe garantizar la limpieza del agujero durante la perforación repasando cada tramo perforado y antes de realizar el viaje a superficie, bombeando baches viscosos y de material obturante, con rotación y reciprocando la sarta en ciclos de cada 500 m, para mejorar el acarreo de recortes y derrumbe. Se deberá determinar el tiempo de introducción óptimo, utilizar accesorios diferenciales de alto flujo y realizar su conversión dos tramos antes del fondo perforado para reducir la surgencia; el colgador deberá tener capacidad de rotación y hacer uso de una zapata perforadora.

de zonas permeables y poco consolidadas características del campo.

- 2) Fricciones en el intervalo de 1759 a 1841 m con densidad de 1.30 g/cm<sup>3</sup>, así como gasificaciones de 2198 a 2459 m, incrementando la densidad de 1.30 a 1.36 g/cm<sup>3</sup>.
- 3) Influjo al perforar a la profundidad de 3385 m y ganancia en presas con densidad de 1.68 g/cm<sup>3</sup>. Incrementó densidad a 1.84 g/cm<sup>3</sup> controlando el pozo.
- 4) Perforó la sección de 12 ¼" hasta 4181 m y durante la introducción de la TR presentó resistencias a 3345 m; sacó la TR a superficie y bajó con sarta observando torques, resistencias y atrapamientos, así como derrumbe de tipo tabular. Efectuó ST.
- 5) Pérdida de circulación de 0.3 a 0.7 m<sup>3</sup>/h con densidad de 1.34 g/cm<sup>3</sup> a perforar a 4348 m, disminuyó densidad a 1.12 g/cm<sup>3</sup> reduciendo pérdida.

### c) Caso del campo C

Los eventos más relevantes durante la perforación del pozo 4 del campo C fueron los siguientes:

- 1) Pérdidas parciales de circulación, fricciones y resistencias durante la perforación de la etapa de 26" con densidad de 1.12 a 1.18 g/cm<sup>3</sup>, derivado

La trayectoria direccional propuesta para el pozo 4 evitaba perforar el domo salino que afecta el campo C, **Figura 14**; sin embargo, esto originó que se atravesara la falla regional de Comalcalco con un ángulo < 30° y que la sección fuera paralela a esta falla, **Figura 15**, lo que implicó asumir un riesgo considerable con respecto a posibles problemas de inestabilidad asociados a planos de debilidad y fracturas preexistentes, **Figura 16**.

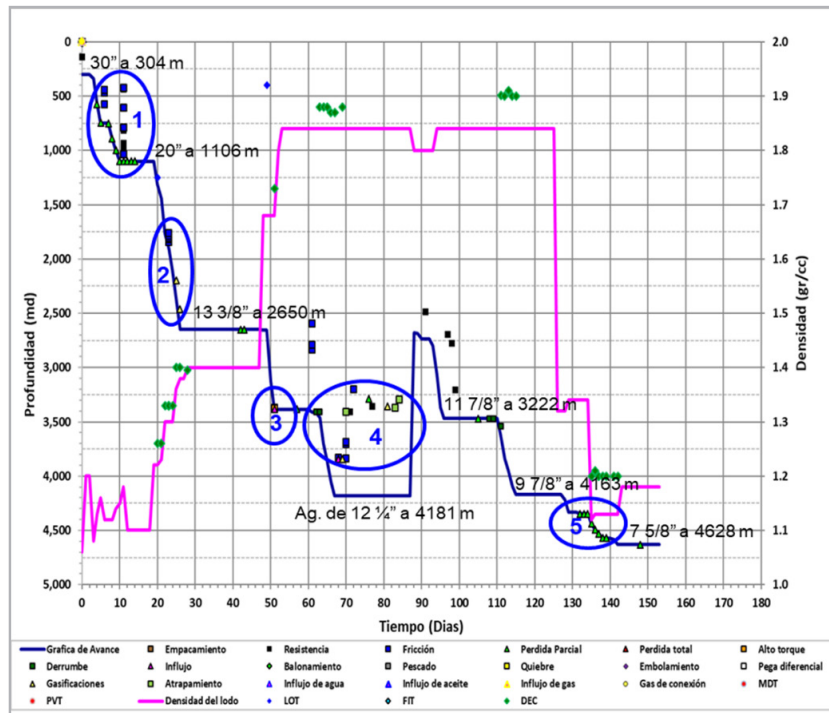


Figura 14. Gráfica de avance de perforación vs densidad pozo 4.

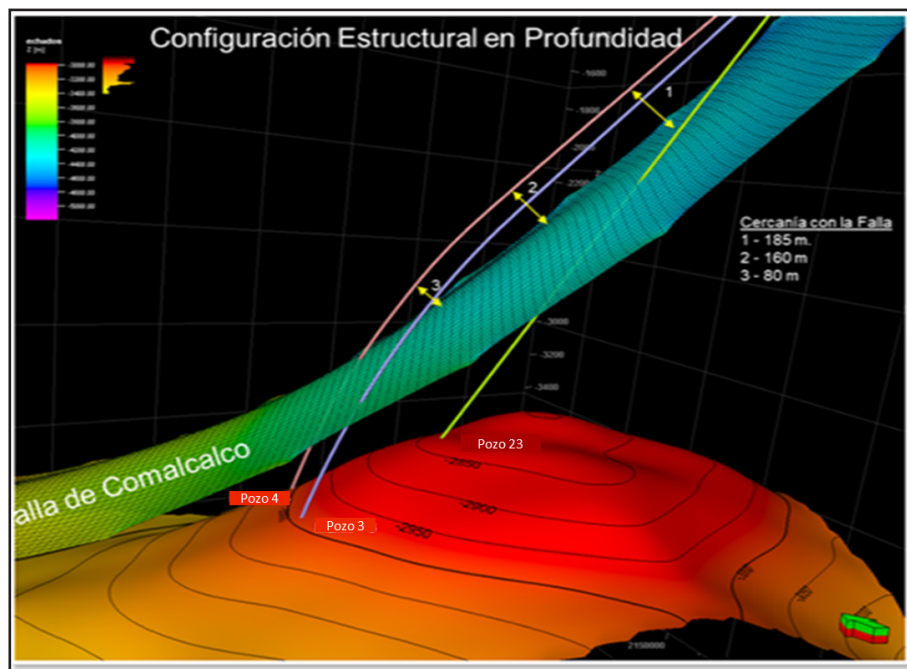


Figura 15. Paralelismo de la trayectoria con la falla de Comcalco pozo 4.

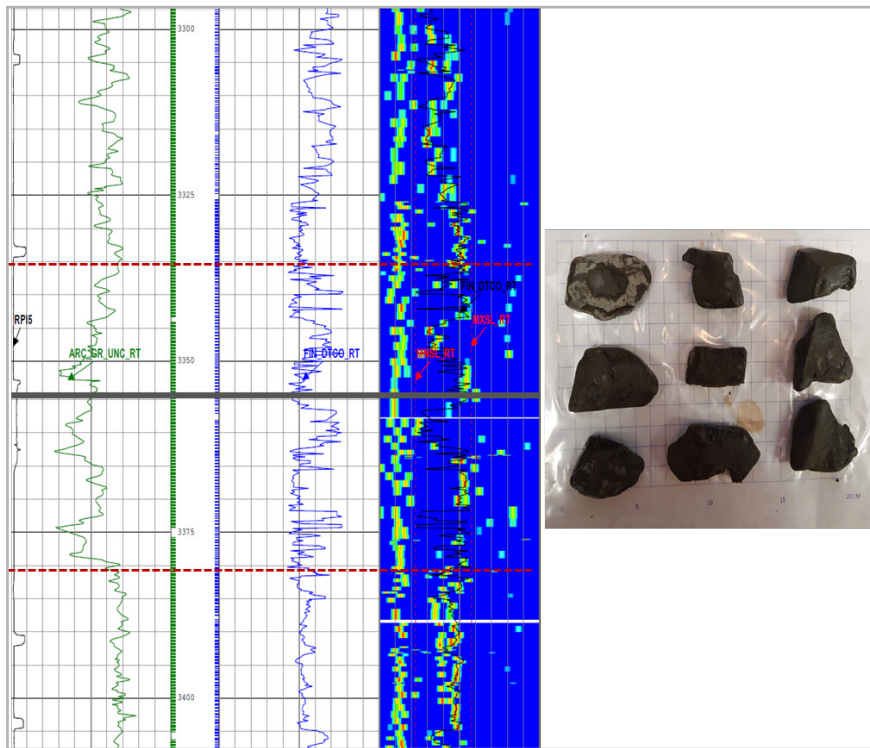


Figura 16. Zona con planos de debilidad del pozo 4.

Del registro sísmico en tiempo real se observa que en el intervalo de 3335 a 3380 m se encuentra una zona muy afectada por planos de debilidad, los cuales se vieron reflejados por la pérdida de la coherencia en el registro sísmico (tercer carril) y por los derrumbes tabulares que salieron durante la circulación del pozo, en el viaje de reconocimiento. La gráfica muestra una vista en sección transversal del pozo visualizándola hacia abajo de su eje. Las zonas rojas, **Figura 17**, significan que las tensiones exceden la resistencia de la roca (ya sea de los echados / fracturas

definidas o de la roca intacta), suponiendo que la presión de poro esté en todas partes.

Se muestra en la Figura 17 la falla que podría esperarse si no hay lodo que penetre en la roca a lo largo de las zonas de debilidad, las líneas paralelas muestran las orientaciones de los planos débiles anisotrópicos proyectados en el plano perpendicular al eje del pozo. Las “orejas” (breakout) en ambos lados son el resultado de una falla debido a la anisotropía de la roca.

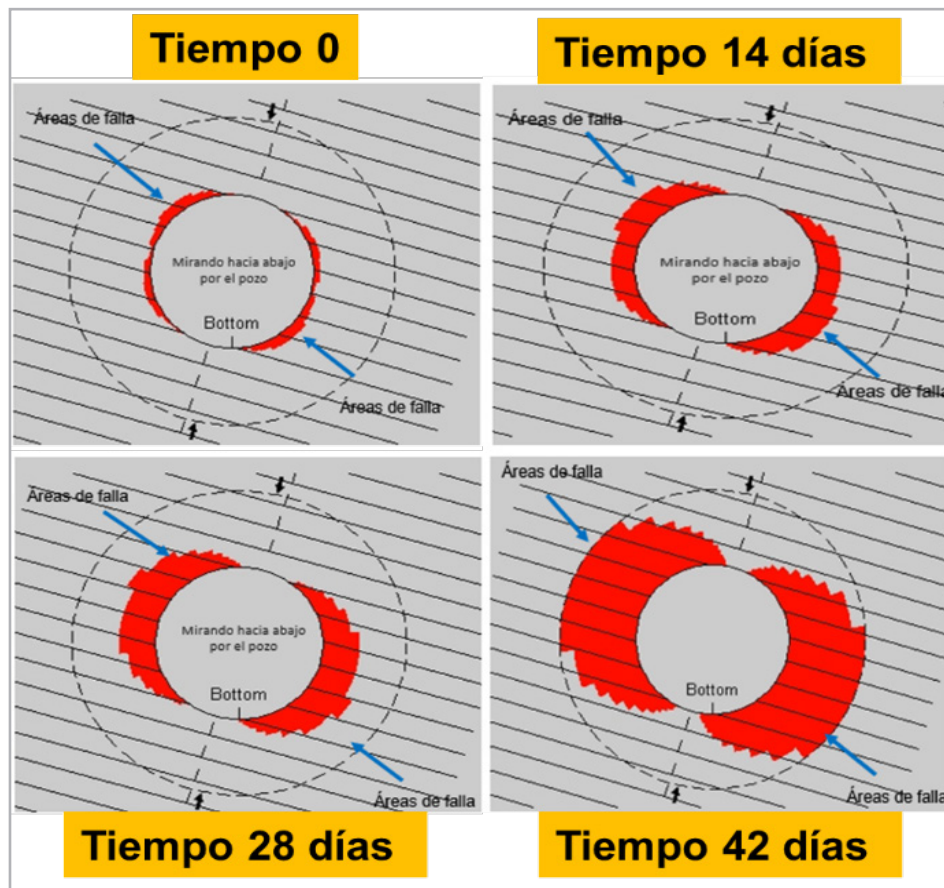


Figura 17. Falla del agujero por tiempo de exposición debido a la anisotropía de la roca.

### Recomendaciones y mejores prácticas para la perforación de formaciones con planos de debilidad

- Consideraciones durante la planeación del diseño de la perforación del pozo:
  - Caracterización geológica y estratigráfica en la trayectoria propuesta del pozo.
  - Identificación de zonas potenciales precursoras con planos de debilidad como zonas de pasos de falla, cercanía a estructuras salinas, intrusiones de cuerpos calcáreos o lutíticos.
  - Una vez identificadas las zonas de alto riesgo geológico, realizar un diseño de trayectoria direccional que evite o reduzca el contacto con estas zonas.
  - La mejor opción es perforar de manera vertical la zona problemática, o con un ángulo de ataque de 90° con respecto al echado de la formación; en caso de no ser posible evitar trabajos direccionales y perforar la sección de forma tangente, con una inclinación no mayor a 30°.
- Revisar la implementación de una configuración de geometría de pozo más robusta para considerar una TR de contingencia.
- Dependiendo de la frecuencia y la cantidad de aporte del derrumbe se deberá determinar si es conveniente aislar la zona o si permitirá continuar perforando hasta terminar la etapa programada, con base a la limpieza del agujero.
- Para el diseño de sartas el ensamble de fondo debe ser lo menos rígido posible, por lo que es conveniente reducir los puntos de estabilización.
- Usar zapata rimadora y colgador rotatorio y en caso de TR corrida usar casing runing, sin considerar puntos de restricción como centradores y procurar emplear conexiones lisas o semi-lisas.

- El ritmo de penetración (ROP) deberá ser el óptimo para asegurar la limpieza del agujero, establecer estaciones de circulación con rotación para garantizar el acarreo de recortes y derrumbes.
- Considerar el monitoreo de registro de hidrocarburos de la zona problemática.
- Analizar la factibilidad de ampliar el intervalo problemático para asegurar la introducción de la TR.
- Contemplar el empleo de accesorios diferenciales de alto flujo (Big bore) con puertos laterales y/o disco de ruptura; se recomienda la conversión al cople flotador faltando uno o dos tramos del fondo programado.
- Normalmente las zonas de planos de debilidad tienen en su mayoría lutitas, por ende, la inhibición también es un factor adicional que pudiera causar problemas, se recomienda en fluidos de E.I., utilizar relaciones aceite/agua mayores de 80/20 y en caso del Campo A la formulación que funcionó fue de 90/10.
- Con base a los pozos de correlación, identificar, monitorear los eventos de vibración y realizar las mejores prácticas para su mitigación. Con base a los parámetros de perforación se puede definir ventanas de operación seguras.
- Para mitigar la presencia de derrumbe tabular y cierre del agujero durante la perforación, se recomienda lo siguiente:
  - Bombeo de baches concentrados con material obturante o sellante, tales como: carbonatos, grafitos, asfaltos y celulósicos para tratar de reducir la interacción roca-fluido.
  - Manejar filtrado bajo del fluido de perforación (< 2 ml).
  - Realizar análisis de higrometría cada 20 m, tomando en referencia la información de la cabina de registros de hidrocarburos, con la finalidad de tener registros de salinidad de formación más continuos en la zona problemática.
  - La salinidad del fluido de perforación deberá ser igual o mayor a la concentración de la formación para no provocar ósmosis inversa.
  - Realizar viajes de repaso cada 500 metros perforados, o cada 96 horas de exposición del agujero descubierto (lo que ocurra primero), para conformar la zona plástica con tendencia a cerrar el agujero.
  - En caso de ampliación, desactivar el ampliador en el fondo del agujero antes de realizar el viaje a superficie.
  - El backreaming de alta energía no es recomendable en zonas con planos de debilidad; en caso necesario se deberá analizar el riesgo. Considerar parámetros mínimos operativos aceptables dependiendo de la respuesta del incremento del torque y el arrastre durante el backreaming. Es necesario no detener la circulación para evitar que los derrumbes se decanten y empaquen la sarta.
  - Analizar la factibilidad de emplear una herramienta rimadora para efectuar backreaming.
  - Manejar densidades de lodo y DEC mínimas, de acuerdo con el modelo geomecánico desde el inicio de la etapa, esto evitará perturbación en las zonas débiles y generación adicional de derrumbes.
  - Definir arrastre máximo permitido de acuerdo con el diseño y la calibración en el pozo.
  - Reducir el tiempo de exposición del agujero y evitar dejar el pozo estático por tiempo prolongado.
  - Asegurar la limpieza del agujero con bombeo de baches viscosos cada dos lingadas, perforadas rotando y reciprocando la sarta.
  - Al finalizar la perforación bombear un tren de baches viscosos con rotación y reciprocando la sarta.

## Conclusiones

Identificar los eventos geológicos y de perforación, ayuda a realizar una caracterización geológica que permite localizar secciones con altos riesgos potenciales, dentro de las cuales se pueden ubicar las zonas con planos de debilidad.

La planeación ahora preventiva se deberá enfocar como primer paso para considerar las dificultades geológicas en el plan direccional implementado para tratar de reducir la perforación de estas zonas, o en su caso evitar trabajos direccionales al atravesarlas, así como ángulos elevados al cortar esta sección. La calibración del modelo geomecánico



es primordial para ajustar la densidad correcta de la etapa; siempre se debe emplear una densidad igual o ligeramente mayor a la presión de poro. El aumento de la densidad de lodo y las variaciones hidrostáticas alteran con mayor rapidez estos planos de debilidad, provocando pérdidas de circulación y mayor caída de derrumbe.

Dependiendo de la inestabilidad de la formación, se deberá evaluar si una zona determinada permite perforar la sección hasta el asentamiento programado, o si deberá aislarse con una TR de contingencia para poder continuar con la perforación, ya que en ocasiones no es posible continuar la perforación de toda la etapa programada como se planificó para el campo B, debido a la cantidad de derrumbe generado por la exposición del agujero, que da como resultado el atrapamiento de la sarta al realizar el viaje a superficie una vez finalizada la perforación.

La toma de información de las zonas problemáticas es de gran importancia, sin poner en riesgo la ejecución del proyecto. La recopilación de muestras litológicas y los registros en tiempo real (LWD), son herramientas excelentes para delimitar, evaluar la formación y tomar las decisiones mejores, por lo que es recomendable incluirlos durante toda la perforación.

Acorde a las experiencias obtenidas en los campos desarrollados, se determinaron las mejores prácticas operativas mostradas en este artículo, que están relacionadas con la limpieza del agujero, el manejo de las propiedades reológicas del fluido de perforación, mitigación de pérdidas de circulación con material obturante, mantener la DEC al mínimo, evitar trabajos de construcción direccional y reducir los tiempos de exposición del agujero.

## Nomenclaturas

CC:	Cuerpo calcáreo
DEC:	Densidad equivalente de circulación
E.I.:	Emulsión inversa
LWD:	Logging While Drilling
NaCl:	Cloruro de sodio
ROP:	Ritmo de penetración
ST:	Sidetrack
TR:	Tubería de revestimiento

## Referencias

- Aadnoy, B. S. y Chenevert, M. E. 1987. Stability of Highly Inclined Boreholes. *SPE Drill Eng* **2** (04): 364–374. SPE-16052-PA. <https://doi.org/10.2118/16052-PA>.
- Bradley, W. B. 1979. Failure of Inclined Boreholes. *ASME. Journal of Energy Resources Technology* **101** (4): 232-239. <https://doi.org/10.1115/1.3446925>.
- Fossen, H. 2016. *Structural Geology*, second edition. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Jackson, M. P. A. y Hudec, M. R. 2017. *Salt Tectonics: Principles and Practice*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Li, Q., Yousefzadeh, A. y Aguilera, R. 2015. Anisotropic Wellbore Stability Model For Naturally Fractured and Foliated Formations with Multi-Weakness Plane Failure. Artículo presentado en SPE/CSUR Unconventional Resources Conference, Calgary, Alberta, Canadá, octubre 20-22. SPE-175896-MS. <https://doi.org/10.2118/175896-MS>.

## Semblanza de los autores

### Alan Juárez Reyes

Ingeniero Petrolero egresado del Instituto Politécnico Nacional. Inició su trayectoria profesional en el año 2012 en la compañía Weatherford con el puesto de Asistente de company man y posteriormente como Ingeniero de diseño de perforación y terminación de pozos.

En 2014 ingresó a Pemex Exploración y Producción como Ingeniero de pozo, se ha desempeñado también dentro de la empresa en otros puestos como Coordinador de operaciones en pozos HPHT, Ingeniero de diseño y soporte a la operación, y actualmente se desempeña como Ingeniero de diseño de perforación en la Gerencia de Ingeniería de Intervenciones a Pozos de Explotación.

### José Miguel Cruz Oropeza

Ingeniero Petrolero egresado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Inició su carrera profesional como ingeniero de registro de hidrocarburos en la compañía ROTENCO.

En el año 2010 ingresó a Pemex Exploración y Producción como Ingeniero de diseño de perforación. Se ha desempeñado en puestos como Geomecánico, Coordinador de operaciones de perforación y reparación de pozos, Líder de especialidad de geomecánica, Líder de ingeniería de diseño y soporte a la operación; actualmente se desempeña como Especialista en geomecánica en la Gerencia de Ingeniería de Intervenciones a Pozos de Explotación.