

Análisis del modelo geomecánico para el pozo exploratorio no convencional Navegante-1

Franco R. Pulido Piñeyro
José Ramón Cabrera Salavarría
Kelvin Perea Sánchez
Pemex

Información del artículo: Recibido: enero de 2012-aceptado: febrero de 2013

Resumen

El pozo Navegante-1 ubicado en los bloques **Alóctono** y **Autóctono** del **Alto de Jalpa**, tiene como objetivo **explorar** el **Mesozoico Autóctono** a 7,444 mD. Por su **complejidad geológica** y **antecedentes de diseño**; este pozo representa **retos tecnológicos** cambiando el paradigma para **diseños no convencionales**. La geomecánica **aportó** la comprensión del **mapa de riesgo** que definió la **arquitectura mecánica** del pozo, y la **ventana operativa** para la planeación de la **densidad del lodo** de perforación.

El análisis del **modelo geomecánico** aplicado al pozo Navegante-1 tuvo como objetivo principal determinar la **ventana operacional** para calibrar los puntos naturales de **asentamiento de las tuberías de revestimiento**, las **densidades del fluido de perforación**, la **estabilidad mecánica del agujero** y el **entendimiento** de las **variaciones** en la **columna geológica**, calibrada con los **fenómenos físicos-geológicos** de los pozos de correlación.

El modelo geomecánico presenta incertidumbre por la complejidad geológica (estructura, tipo de roca y fluidos contenidos en el yacimiento), éste fue calibrado con información de pozos de correlación, la columna geológica probable y un **modelo estructural complejo**, permitiendo establecer el **modelo único** para **representar el área**.

En la **ejecución**, con base en el modelo geomecánico se obtuvo una **ventana operativa** consistente en la perforación, **calibrada en tiempo real** con los **eventos operativos** durante la perforación, los contactos formacionales, la toma de **registros geofísicos** de cada etapa, la profundidad de asentamiento de las tuberías de revestimientos y pruebas **FIT** y **LOT**. Para el caso presente, el régimen de presiones estimado en los bloques alóctono y autóctono se **calibró** con las **densidades de lodo utilizadas** durante la **perforación**.

Analysis geomechanical model for unconventional exploration well Navegante-1

Abstract

The Navegante-1 well located in the blocks of allochthonous and autochthonous Alto de Jalpa aims to explore the Mesozoic Autóctono 7.444 md. For its complex geology and history of design, this well represents breaking paradigms technological challenges in unconventional designs. The Geomechanics provided the risk map understanding that defined the mechanical architecture of the well and the operating window for planning the drilling mud weight.

Geomechanical model analysis applied to the well Navegante-1 main objective was to determine the operational window to gauge the settlement of natural casing, the drilling fluid densities, the mechanical stability of the hole and the understanding of variations geological column calibrated with phenomena physical -geological correlation wells.

The geomechanical model presents uncertainty geological complexity (structure, type of rock and fluids contained in this), it was well calibrated correlation information, the probable geologic column and a complex structural model, allowing to establish the single model to represent the area.

At runtime, the geomechanical model, obtained an operating window consisting of drilling, calibrated real-time: the operational events during drilling, formational contacts, take geophysical logs each stage casings and LOT test. In the case, the estimated pressure regime allochthonous and autochthonous blocks calibrated with mud weights used during drilling.

Desarrollo del tema

Realización del modelo geomecánico PreDrill

El objetivo del estudio es determinar la ventana operacional para definir los puntos de asentamientos y densidad del fluido de perforación, considerando el plan direccional del pozo exploratorio Navegante-1. Para construir el modelo de geomecánica para la localización exploratoria Navegante-1,

se aplicó la metodología definida en el VCDSE Exploratorio Región Sur, **Figura 1**. La ventana operacional de perforación consiste en cuatro curvas (presión de poro, presión de colapso, esfuerzo mínimo (cierre de las fracturas inducidas, y límite de rompimiento (pérdida total de circulación). Estas cuatro curvas permiten definir las densidades de lodo y asentamiento de tubería de revestimiento óptimo, que garantice la integridad mecánica y el gradiente de formación suficiente para la planeación de cada etapa.



Figura 1. Método aplicado para la construcción del modelo de geomecánica del subsuelo para el pozo exploratorio Navegante-1.

Para el estudio se analizaron los datos disponibles de perforación, geología, petrofísica y sísmica en los pozos de correlación Tepotzingo-1, Pomposu-1A, Acuatitán-1, Amatitán-1, Kali-1, Nikib-1 y Terra-1, por ser éstos los más representativos desde el punto de vista geomecánico en el área de interés.

El número de pozos empleados obedece al hecho que cada uno tiene información relevante para el estudio de geomecánica, es decir, los pozos Tepotzingo-1 y Pomposu-1A son los más cercanos a la localización, y muchas de las formaciones a perforar correlacionan con ambos pozos.

Los pozos Acuatitán-1 y Amatitán-1 se utilizaron primordialmente para entender el comportamiento de las presiones a nivel del alóctono, y finalmente, los pozos Kali-1, Nikib-1 y Terra-1 se usaron para calibrar el comportamiento de los esfuerzos y presiones del bloque autóctono.

Análisis de los registros geofísicos

En general se cuentan con los registros sísmico compresional y resistivo en todos los pozos de

correlación, aunque el registro sísmico está incompleto a lo largo de la trayectoria de algunos de ellos. Se debe resaltar que en términos generales no se cuenta con muchos registros geofísicos en los pozos de correlación, lo que limitó el entendimiento del comportamiento geomecánico del área, es decir, no existe información medida de la densidad, porosidad y litología a lo largo de toda la columna geológica. La **Figura 2** muestra un ejemplo de lo anteriormente mencionado.

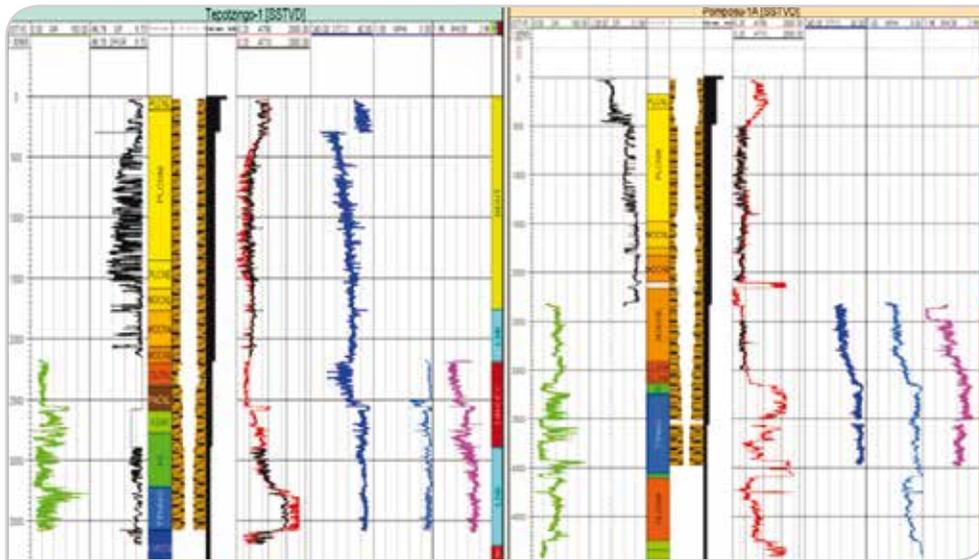


Figura 2. Registros disponibles en los pozos de correlación claves (Tepotzingo-1 y Pomposu-1A) del pozo exploratorio Navegante-1.

De la evaluación de la información de los registros se puede señalar lo siguiente:

- Ausencia de la curva de DTSM
 - » Incertidumbre en la estimación de las propiedades elásticas, resistencia de la roca y límite de colapso.
- Ausencia de la curva del registros de densidad (RHOB)
 - » Incertidumbre en la predicción de la sobrecarga y en consecuencia la presión de poro.
- Ausencia de los registros de petrofísica (VCL, PHIT y PHIE)
 - » Incertidumbre en la estimación de las propiedades elásticas, resistencia de la roca y presión de colapso.
- Registros no procesados (perfiles sísmicos radiales)
 - » Incertidumbre en la magnitud del modelo geomecánico.



Finalmente, la información ausente se reconstruyó utilizando correlaciones (NPHI/DT, DT/DTSM, DT/RHOB)

desarrolladas para el área del pozo Navegante, como se ejemplifica en la **Figura 3**.

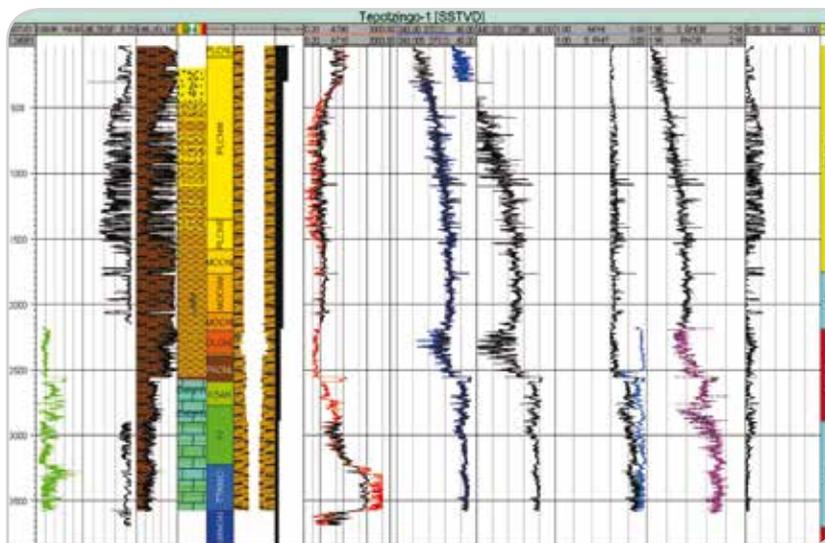


Figura 3. Reconstrucción y elaboración de sintéticos para el pozo Tepotzingo-1. Las curvas sintéticas (DTSM, RHOB, VSH, PHIT y PHIE) se muestran en color negro, mientras que las curvas en colores son reales (GR, SP, resistividad (RT), RHOB, PHIE, PHIT, DTCO y NPHI).

Sin embargo, la mayor dificultad para el análisis geomecánico está en la complejidad geológica característica del área en

estudio, como se ha discutido en los capítulos anteriores y se esquematiza nuevamente en la **Figura 4**.

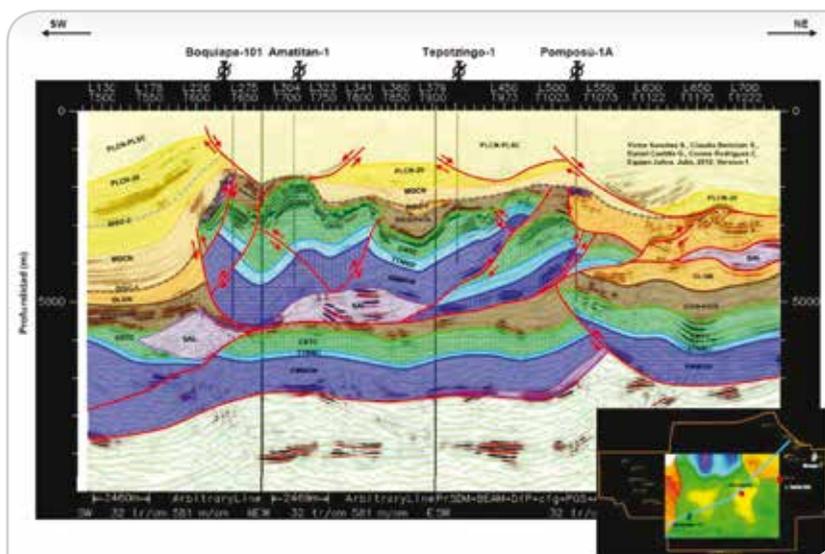


Figura 4. Representación esquemática de la complejidad geológica del área en estudio: sección sísmica mostrando los pozos de correlación Amatitán-1, Tepotzingo-1 y Pomposú-1A. La figura muestra el cabalgamiento del Mesozoico sobre el Terciario, almohadillas y soldadura de sal.

Este tipo de complejidades estructurales, donde los cuerpos se han ido deformando de manera importante por efectos del tectonismo regional y los efectos de la sal (cabalgando ± 80 Km bloques del Cretácico/Jurásico sobre formaciones más recientes del Terciario), presentan una variación lateral y vertical importante de las propiedades geomecánicas y petrofísicas. Esto implica que para un entendimiento del comportamiento geomecánico en esta área, es recomendable realizar estudios sísmicos en 3D, para mejorar la calidad de la información y comprender el modelo geológico estructural de esta zona.

Se muestra de igual manera la variación lateral que se observó en las mediciones acústicas y eléctricas de los pozos de correlación. En ella se aprecia claramente cómo los pozos presentan poca similitud en su respuesta, a diferencia de la zona cercana de Terra, **Figura 5**, donde los registros reflejan un patrón de tendencias a lo largo de la trayectoria, y en su extensión lateral mucho más homogéneo, lo cual permite propagar las características de manera más predecible a las localizaciones a perforar.

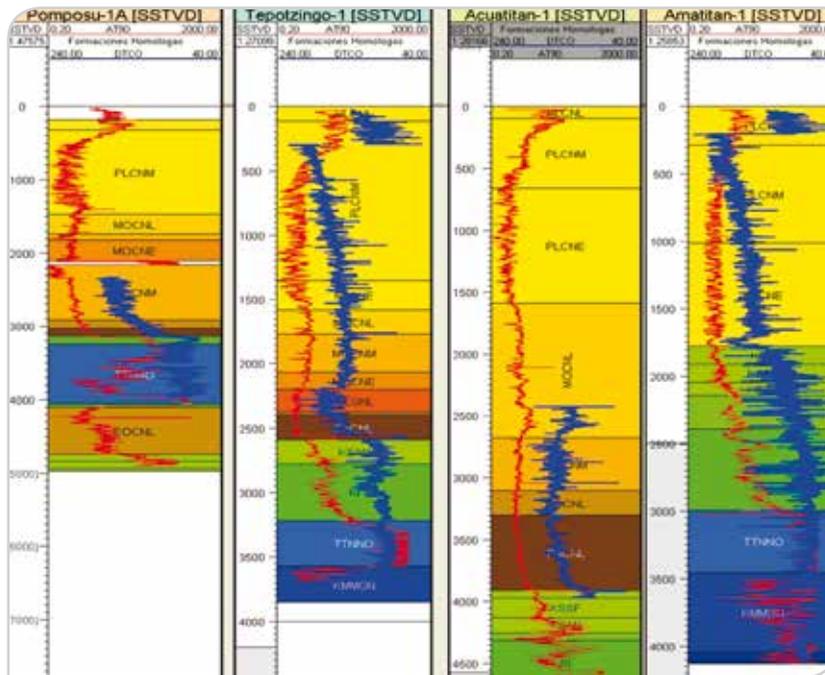


Figura 5. Registros geofísicos reales de los pozos Pomposu-1A, Tepotzingo-1, Acuatitán-1 y Amatitán-1, graficados sobre las columnas geológicas homologadas.

Con base en la geología e interpretación sísmica, se determinó que la localización Navegante-1 se debería correlacionar mejor con el pozo Tepotzingo-1 hasta la entrada del bloque Alóctono. Una vez que se esté perforando el bloque Alóctono, su comportamiento debería corresponder o correlacionar mejor el bloque Alóctono del pozo Pomposu-1A, por supuesto salvando los efectos posibles por el grado de fracturamiento y deformación a lo largo de su extensión horizontal.

Tomando en consideración lo antes mencionado, se realizó la reconstrucción del registro sónico en la localización de Navegante-1, propagando la información de los pozos Tepotzingo-1 y Pomposu-1A guiados por las edades formacionales, como se muestra en la **Figura 6**.

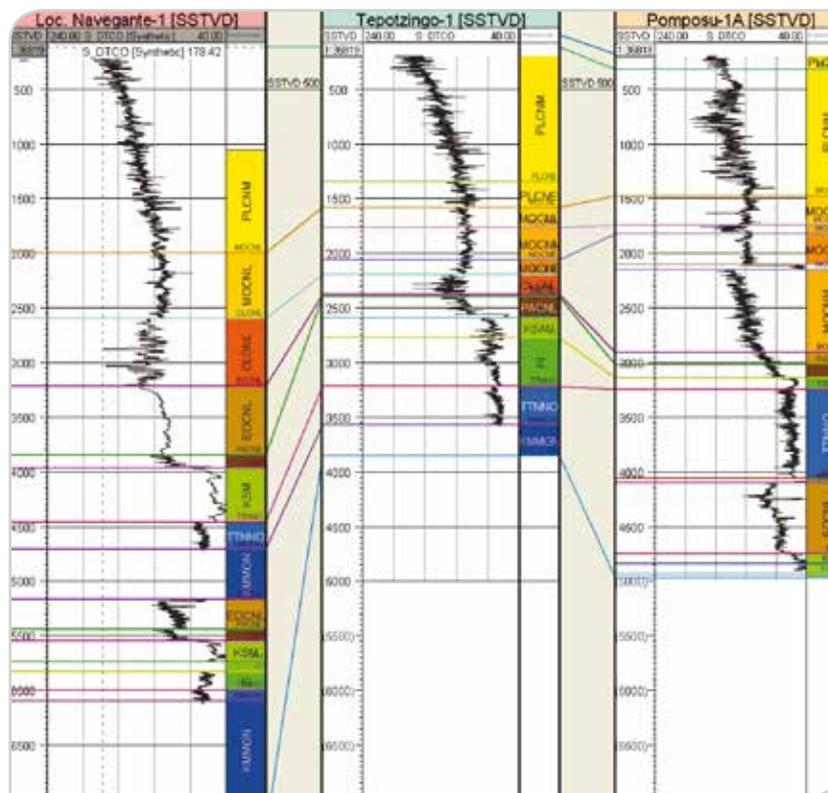


Figura 6. Registro sónico sintético de la localización Navegante-1, obtenido de los pozos Tepotzingo-1 y Pomposu-1A.

Análisis de la velocidad interválica

En los pozos exploratorios, uno de los insumos de mayor importancia para un estudio geomecánico, es el modelo de velocidades interválicas promedio en profundidad; sin embargo, como se ha señalado en los capítulos anteriores, para este estudio no se contó con un modelo de velocidades interválicas con la calidad suficiente que permitiera evaluar las velocidades litológicas y su impacto en el análisis geomecánico.

Las razones están asociadas fundamentalmente a la complejidad geológica del área y a las características de la adquisición sísmica. Es importante destacar que se analizaron diferentes opciones para utilizar la información disponible; no obstante no hubo manera de mejorar la que ya se tiene, sin que se implique tiempo y/o nueva toma de información incluyendo nueva adquisición sísmica 2D ó 3D.

Con el objetivo de mejorar la imagen del subsuelo, para el estudio de la localización se realizó un migrado en profundidad. Las velocidades de migración en profundidad no son útiles para el análisis geomecánico, debido a que su objetivo es un mejor entendimiento de la imagen del subsuelo, y sobre todo de los eventos geológicos relevantes. Para el estudio de geomecánica, es necesario contar con las velocidades interválicas de alta frecuencia, que permitan estudiar los cambios a nivel litológico. Este tipo de velocidades se pueden obtener de la inversión sísmica, velocidades de pozos (check shot, VSP) e información de los registros geofísicos.

Finalmente, después de aplicar diferentes métodos para mejorar las velocidades interválicas, se obtuvo un perfil de velocidad, el cual se comparó con el perfil sónico sintético de la localización, donde se aprecia cierta congruencia en ambas tendencias, **Figura 7**.

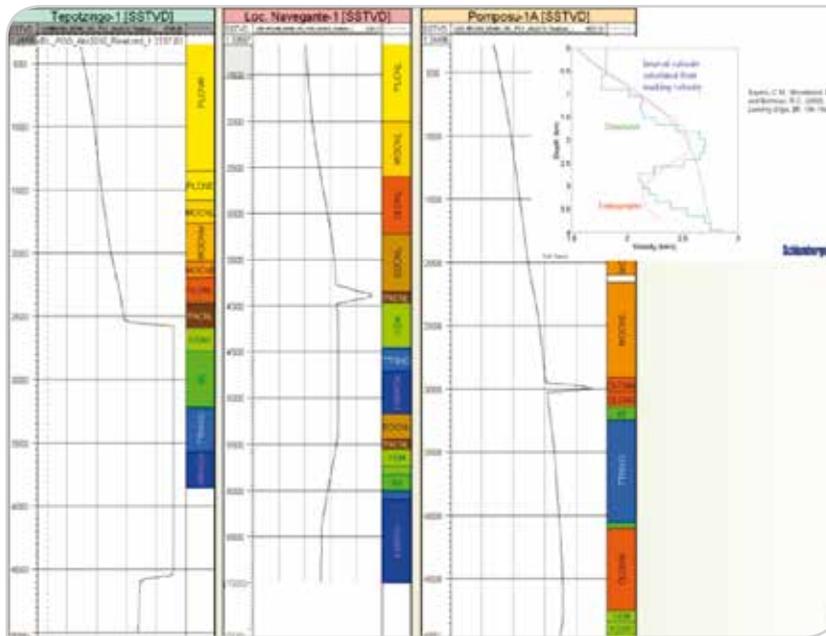


Figura 7. Perfil de las velocidades de migración (PRSDM) en profundidad para los pozos Tepotzingo-1, Pomposu-1A y la localización Navegante-1.

Sobrecarga y presión de poro

La sobrecarga se estimó integrando la variación de la densidad con respecto a la profundidad, la cual se reconstruyó de los pozos de correlación, propagándose hacia la localización del pozo Navegante.

La Figura 8 muestra el comportamiento de la sobrecarga para diferentes pozos del área. Las curvas muestran el impacto que existe en la estimación del peso de la columna de sedimentos debido al cabalgamiento de los bloques, estas diferencias repercuten directamente en la estimación de la presión de poro, por lo que se debe considerar este efecto en la comparación con los campos vecinos.

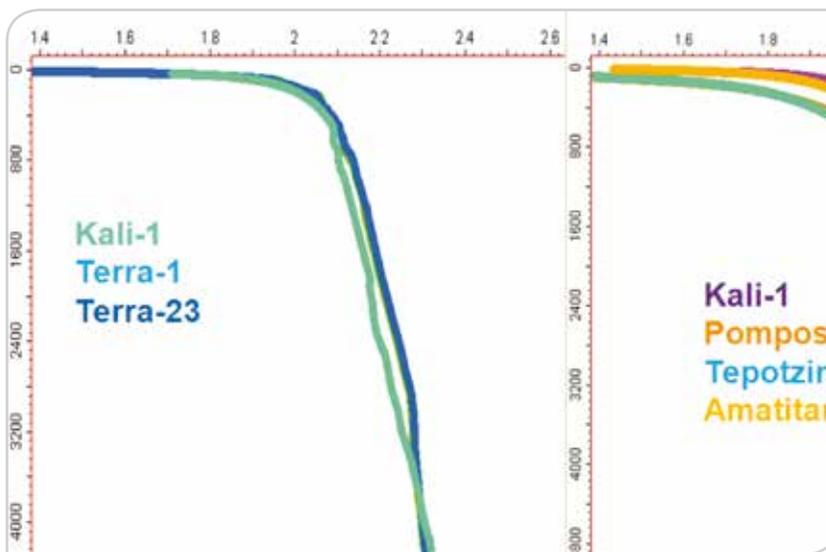


Figura 8. Comparación de la sobrecarga para diferentes pozos de la zona.

El mecanismo de sobrepresión predominante es el de sub-compactación; sin embargo, debido al tectonismo y cabalgamiento de los bloques, que ocasiono una interrupción del proceso de compactación de los sedimentos, se estimó una zona de presiones anormales mucho menos agresiva que la observada en los campos aledaños, por ejemplo la que se tiene en el Terra. Este

hecho también está validado por el comportamiento de los pozos de correlación, Tepotzingo-1 y Pomposu-1A.

Para la estimación de la presión de poro se utilizó el método de "Eaton", con un modelo único para la calibración de los pozos de correlación, como se muestra en la **Figura 9**.

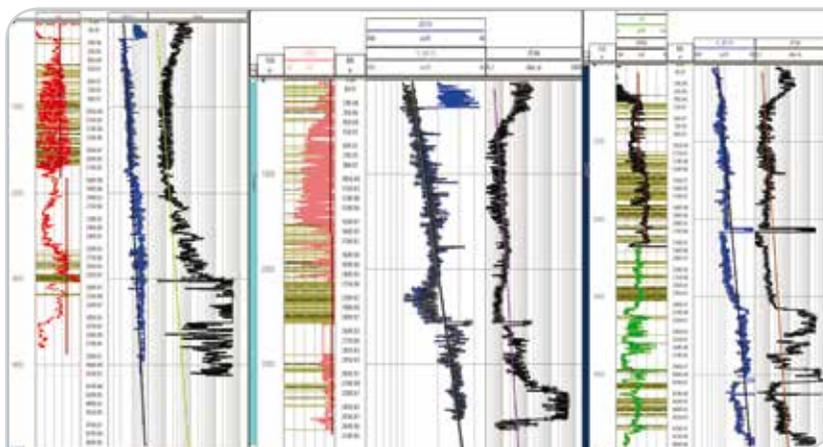


Figura 9. Correlación de Eaton aplicada a los pozos Amatitan-1, Tepotzingo-1 y Pomposu-1A, respectivamente. Nótese que tanto el coeficiente de Eaton, como el tren de compactación normal son los mismos para todos los pozos.

Es importante resaltar que las presiones anormales están por debajo de los valores de presión usados en los campos vecinos de Navegante; es decir, el Campo Terra, por ejemplo, se perforó con densidades de alrededor de los 1.90 g/cc, mientras los pozos de correlación en el área de Navegante se perforaron con densidades que oscilan de 1.65 a 1.70 g/cc.

Esfuerzos horizontales

Se asume un régimen actual normal en la localización Navegante-1 ($S_v > S_H > S_h$), ya que no existe información suficiente para validar o rechazar este postulado. En cuanto a la dirección de los esfuerzos horizontales, se utilizaron la tendencia regional y el sistema de fallas presentes a nivel del Mesozoico, lo que resultó en una dirección del esfuerzo

máximo horizontal de +/- N35E grados, como se ilustra en la **Figura 10**.

Para estimar la magnitud de los esfuerzos horizontales se utilizó el modelo poro-elástico de deformación lateral, el cual se calibró con los eventos de perforación y las pruebas de goteo de los pozos de correlación. En este punto es importante resaltar que la información disponible de pruebas de goteo y/o densidad equivalente sólo existe para los pozos más alejados y sin las complejidades geológicas del área en estudio, es decir, Terra-1, Terra-23, Kali-1 y Nikib-1. En la **Figura 11**, se aprecia como el modelo se compara con las pruebas de goteo y eventos reportados en los pozos utilizados para la calibración del esfuerzo mínimo horizontal.

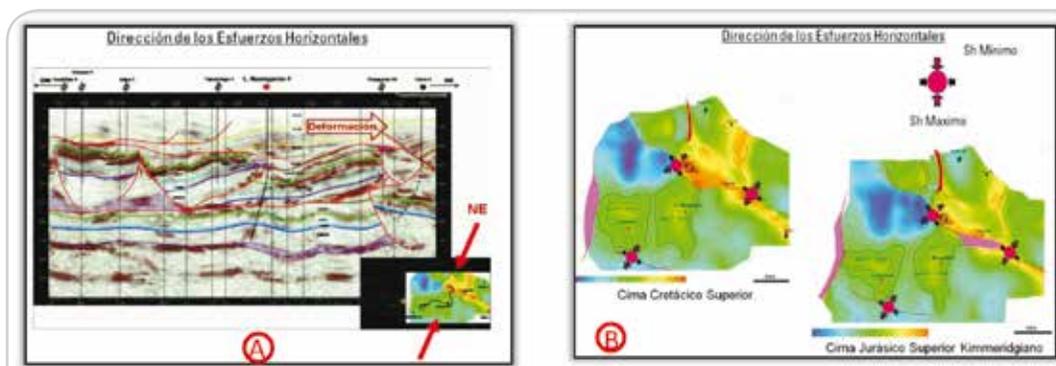


Figura 10. a) Sección sísmica mostrando la dirección de deformación de las formaciones interpretadas en el área; b) Dirección del esfuerzo horizontal máximo según las fallas interpretadas a nivel Mesozoico (fallas inversas). El esfuerzo máximo horizontal tiene una dirección \approx N35E.

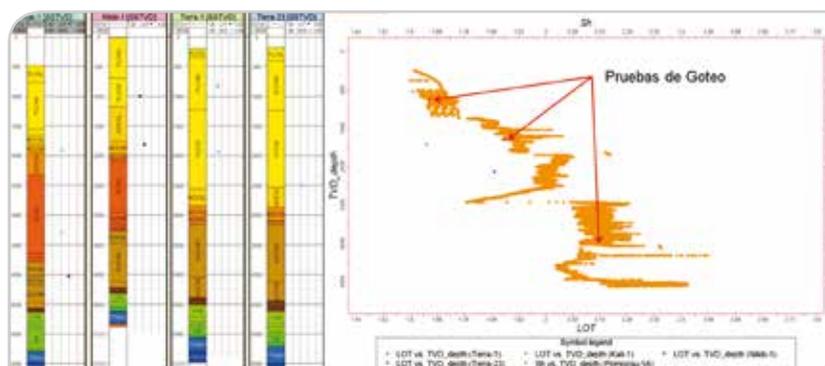


Figura 11. Calibración del modelo geomecánico usando los eventos y pruebas de goteo de los pozos de correlación: Kali-1, Nikib-1, Terra-1 y Terra-23.

Análisis eventos de perforación

Los problemas más importantes detectados y evaluados en los pozos de correlación, y que se relacionan a la geomecánica, corresponden a los influjos, gasificaciones y pérdidas, reportadas fundamentalmente en los bloques alóctono y autóctono del Mesozoico, como se muestra en la **Figura 12**. De la información de los calibres de los pozos y la historia de perforación, no se identificaron problemas asociados a inestabilidad geomecánica de la formación.

Existe el riesgo geomecánico debido a la aparición posible de una almohadilla de sal a nivel del Terciario,

la cual se estableció en un peso máximo de 1.70 g/cc para su perforación tomando en cuenta su profundidad y temperatura, usando las curvas tipo de Barker. Adicionalmente se espera la presencia de anhidrita en las interfaces calizas terrígenos, como se ha observado en los pozos de correlación; sin embargo, estas intercalaciones no representan mayor problema si se mantienen las propiedades adecuadas del lodo. La evaluación, así como las condiciones supuestas para la valoración de la sal se muestran en la **Figura 13**.

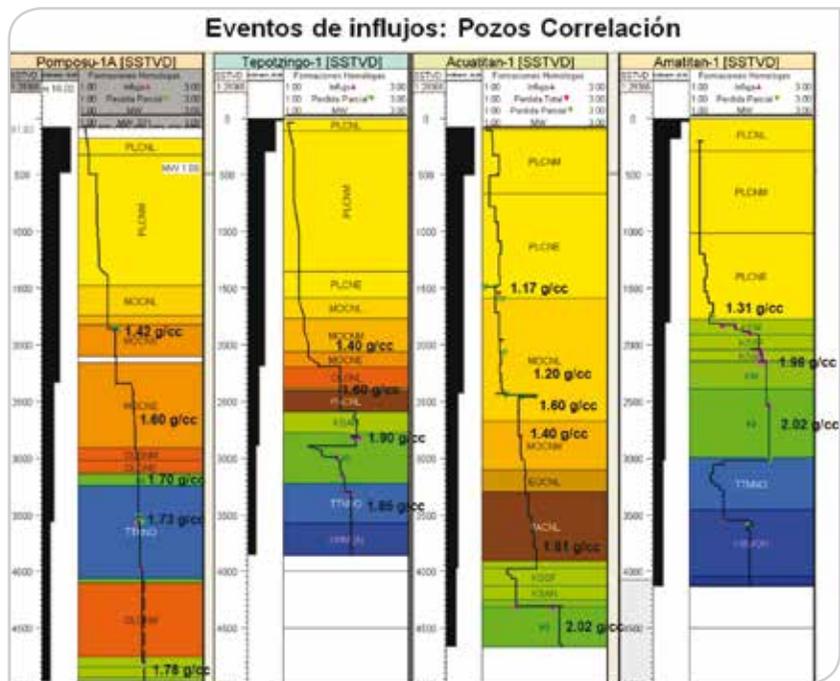


Figura 12. Eventos de inlfujos y pérdidas reportados en los pozos de correlación durante su perforación: Pomposu-1A, Tepoztingo-1, Acuatitán-1 y Amatitán-1.

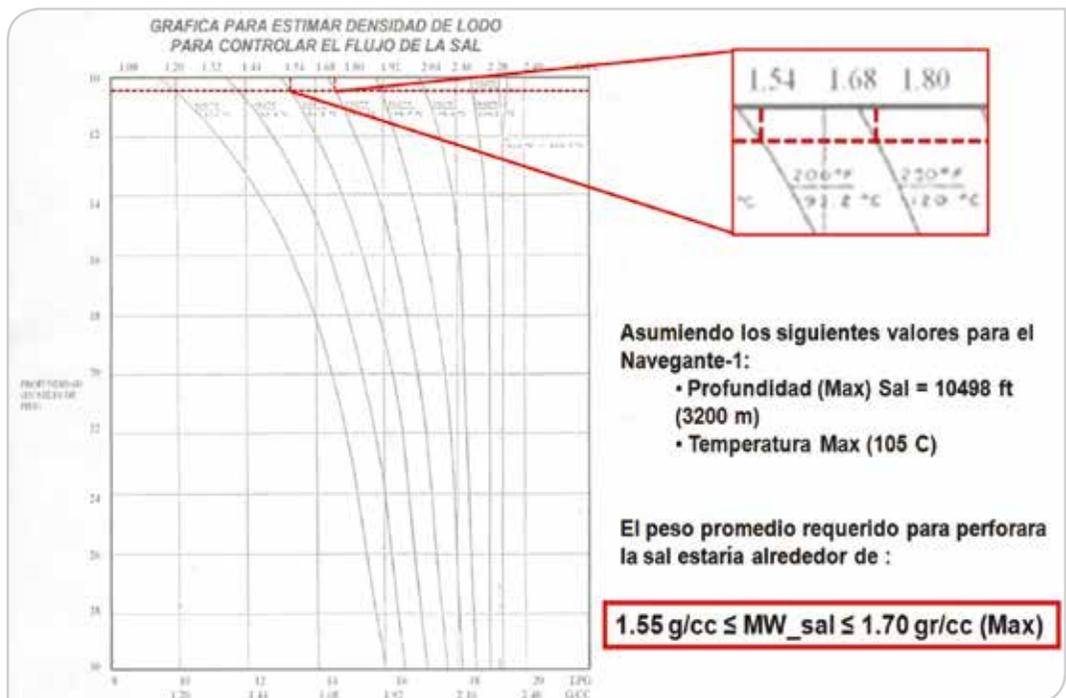


Figura 13. Modelado de la plastificación de la Sal. Solución de "Barker" (SPE-2460).

El modelo geomecánico se calibró con todos los eventos e información de los pozos de correlación, lo que permitió establecer un modelo único para representar el área en estudio. La **Figura 14** muestra la comparación entre el modelado geomecánico y los eventos de perforación para dos de los pozos claves de correlación. En general se observa una buena calibración entre la ventana geomecánica y los eventos, lo cual reduce la incertidumbre del modelo utilizado.

Sin embargo, la mayor incertidumbre está asociada a las características geomecánicas que tiene la trayectoria de la localización, ya que no fue posible contar con algún método que permitiera guiar dichas características en el momento de construir los registros sintéticos para esta localización.

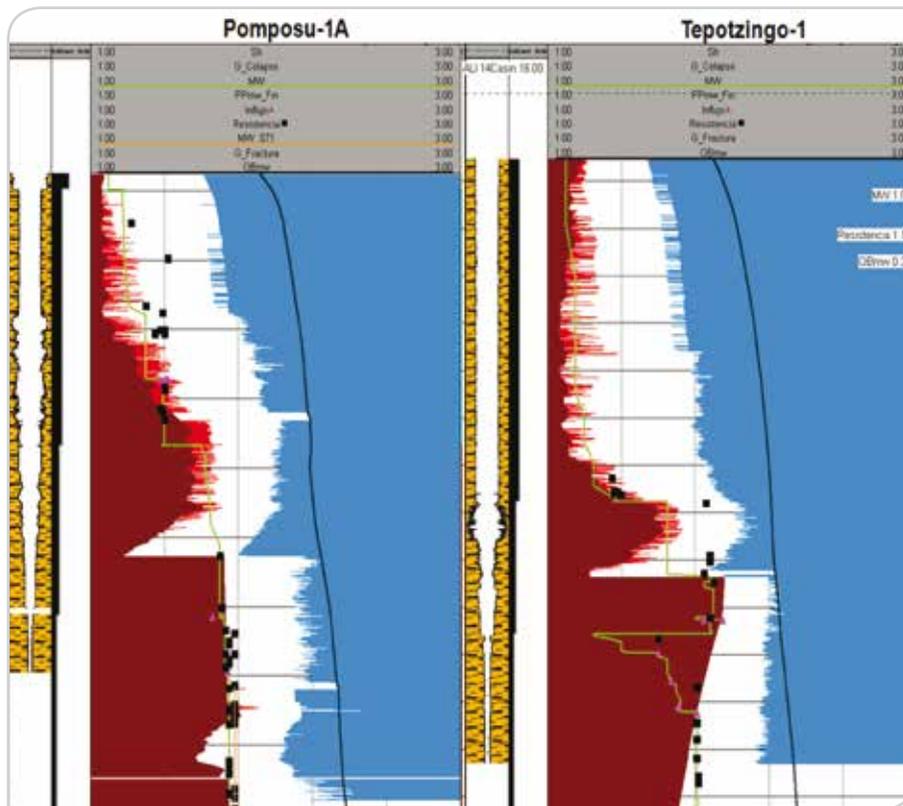


Figura 14. Calibración del modelo geomecánico usando los eventos de perforación y mediciones de los pozos de correlación: Pomposu-1A y Tepotzingo-1.

La ventana geomecánica final se muestra en la **Figura 15**, donde la curva de color ojo carmesí representa la presión de poro, la curva rojo escarlata la presión de colapso, la curva azul el gradiente de pérdida parcial y la curva color negro el peso de la columna de sedimentos o sobrecarga.

En general, si el modelo geológico, sobre todo las cimas formacionales, aparecen según pronostico, y los pesos de lodos se mantienen dentro de la ventana operacional, no deberían presentarse problemas severos de inestabilidad geomecánica de la formación, **Figuras 16 a 18**.

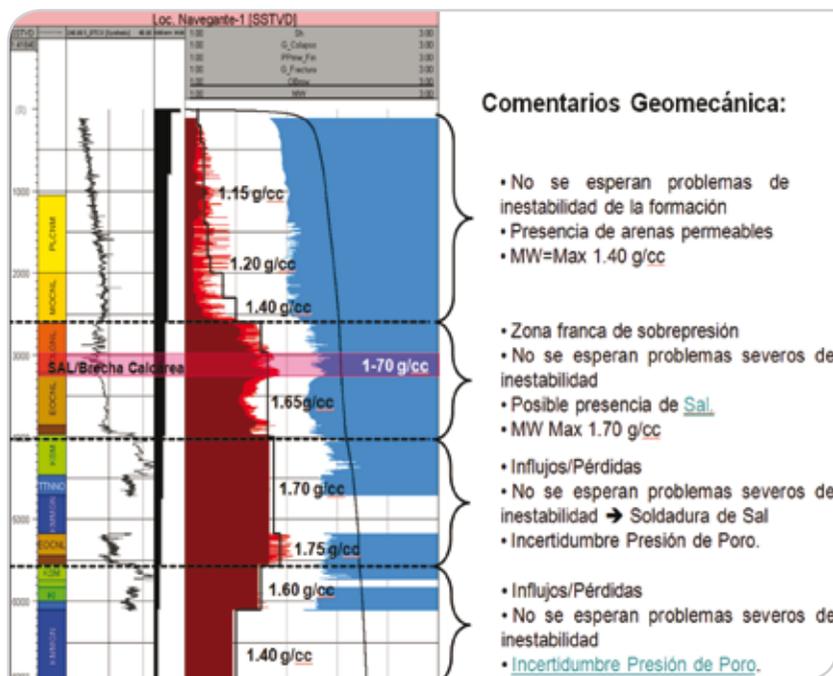


Figura 15. Ventana de geomecánica propuesta para la Localización Navegante-1. En el primer carril se muestra el registro sísmico sintético color negro utilizado para el análisis, y en color negro la velocidad para la trayectoria, extraída del modelo de velocidades en profundidad. En el segundo carril los asentamientos de las TR sugeridas para la localización y en el tercer carril la ventana operacional con los pesos de lodo sugeridos a diferentes profundidades.

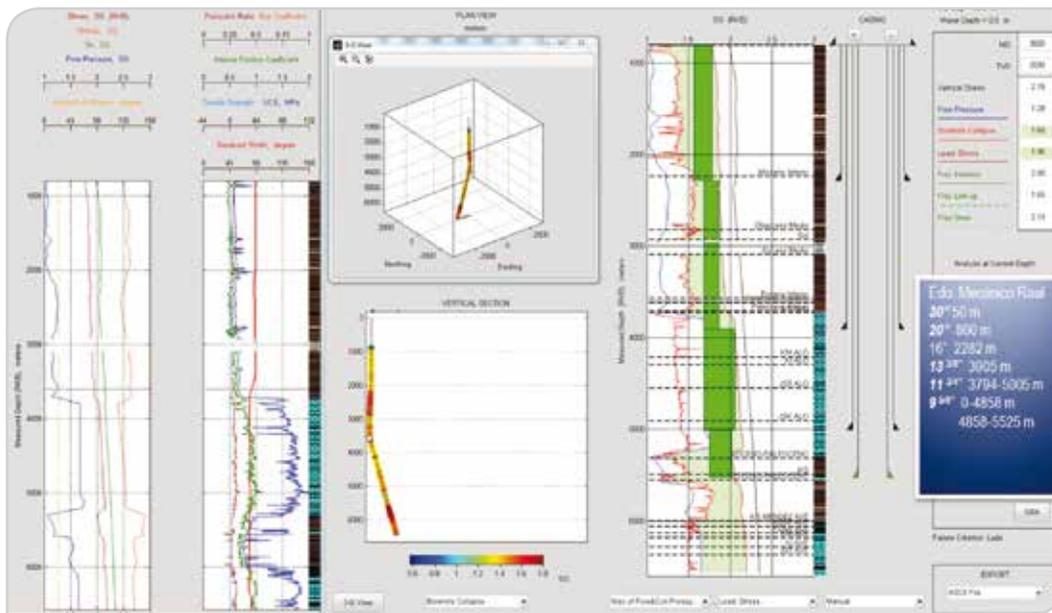


Figura 16. Ventana operativa actualizada a la etapa de 7", pozo Navegante 1.

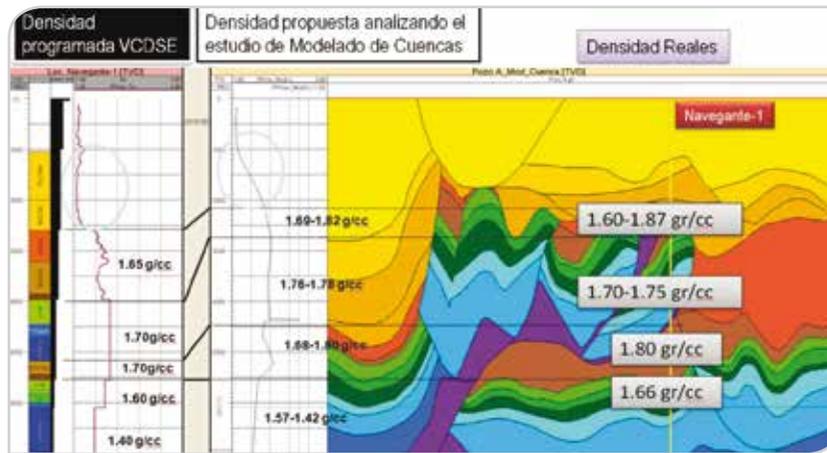


Figura 17. Comparación de densidades programadas por el equipo VCDSE, densidades propuestas por el estudio de modelado de cuencas y densidades reales durante la etapa de perforación del pozo exploratorio Navegante-1 actualizado a la etapa de 7”.

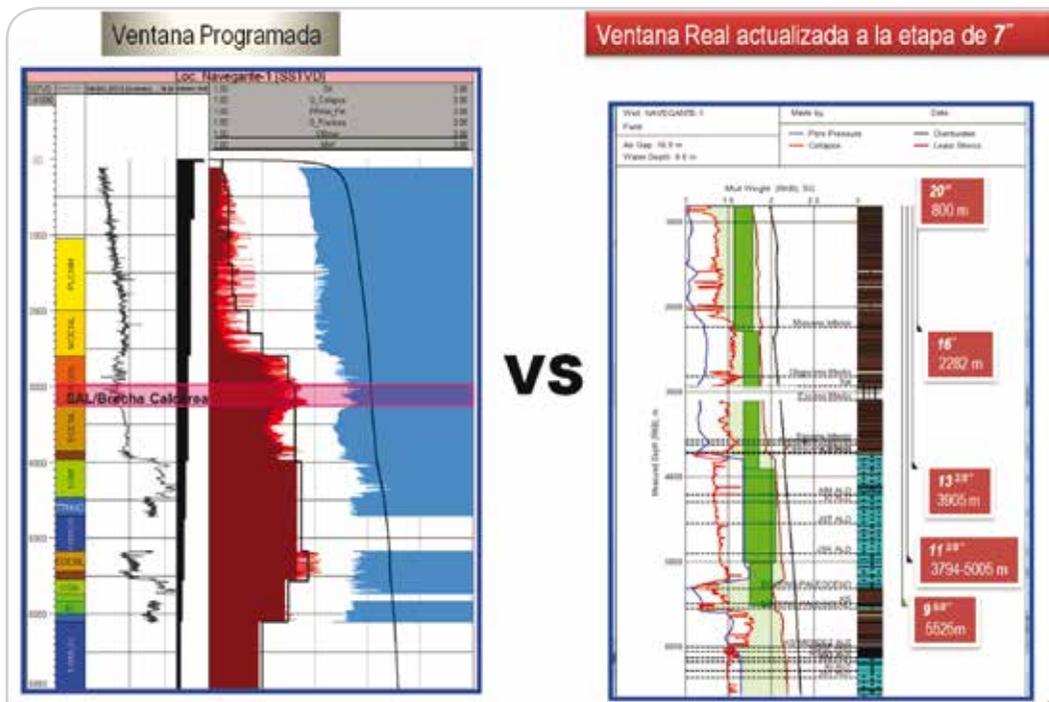


Figura 18. Ventana operativa actualizada a la etapa de 9 5/8” ventana programada vs ventana real.

Observaciones y conclusiones

Por los retos del diseño para construir la arquitectura mecánica para un pozo no convencional, la geomecánica aportó:

- El modelo geomecánico manejó una incertidumbre importante, fundamentalmente por la complejidad geológica y la limitación de la sísmica existente, para obtener un modelo de velocidades de alta frecuencia que permita definir las características geomecánicas a nivel litológico.
- La estabilidad mecánica del pozo, especialmente en secciones de agujero con longitud y diámetros no convencionales.
- La zona de presiones anormales es mucho menos agresiva que la mostrada durante la perforación de los campos vecinos del área. Este punto es muy importante a la hora de la ejecución y monitoreo del proyecto.
- Las características de influjos y pérdidas tanto en la sección del alóctono como del autóctono, serían los eventos potenciales de mayor severidad que podrían obligar al asentamiento no programado de una de las tuberías de revestimiento, arriesgando el alcance de los objetivos del proyecto; sin embargo, los valores de presión de poro se calibraron con los eventos de los pozos de correlación y adicionalmente se compararon con los resultados del modelado geológico realizado en el área, obteniéndose bastante similitud tanto en tendencia como en valores absolutos.
- La arquitectura no convencional de los pozos, obligó al diseño de TR's y conexiones al límite de carga; fue necesario determinar las cargas hidrostáticas, geopresiones y flexibilizar los criterios para seleccionar los materiales, dentro de los factores de diseño de Pemex.
- Las propiedades mecánicas de las rocas para la selección de barrenas en las etapas de agujeros ampliados, en rocas carbonatadas y con presencia de pedernal.
- Rangos de temperatura y presión para carbonatos e intervalos de sal.
- Finalmente, se deben respetar los criterios definidos para los asentamientos de las tuberías de revestimiento, y mediante un monitoreo estricto del pozo en las etapas y profundidades ya mencionadas, realizar las alertas y correcciones necesarias para ajustar el modelo con el nivel de incertidumbre con el que se estableció.

Semblanza

Ing. Franco R. Pulido Piñeyro

Egresado del Instituto Tecnológico de Ciudad Madero con el título de Ingeniero en Geociencias.

Ha laborado en diversas compañías entre las que se encuentran las siguientes:

Baker and Hughes (Inteq) División de Fluidos de Perforación, desempeñándose como Ingeniero de fluidos en pozos de la Cuenca de Burgos.

Schlumberger Informations Solutions se desempeñó como Ingeniero de Gerenciamiento y Administración de Bases de Datos del proyecto ADITEP.

ROTENCO, Registro de Hidrocarburos, como Ingeniero de Registro de Hidrocarburos y Parámetros de Perforación en pozos Exploratorios y de Desarrollo de la Región Sur.

COMESA, Compañía Mexicana de Exploración S.A., como Ingeniero de Subsuelo brindando Control Geológico a boca de pozo en pozos exploratorios de la Región Sur.

El 20 de mayo de 2008 ingresa a Pemex Exploración y Producción, lo que en su momento era el Activo Regional de Exploración Sur, a la Coordinación de Operación Geológica, desempeñándose como Ingeniero de Subsuelo brindando Control Geológico a boca de pozo en pozos exploratorios de la Región Sur.

Actualmente se desempeña como Líder de la competencia de geomecánica en el VCDSE de Exploración del Activo de exploración cuencas del Sureste Terrestre..