

Perforación no convencional para pozo esbelto en formaciones de alto gradiente

*Roberto Juárez López
Petróleos Mexicanos*

Artículo recibido en junio de 2021-revisado-evaluado-corrregido y aceptado en abril de 2022

Resumen

Por primera vez en México y en el mundo, se realiza una perforación no convencional para pozo esbelto en formaciones de alto gradiente, donde se perforó de forma satisfactoria con diámetro de 8 ½" a partir de 3950 metros, en la zona de presiones anormales (Oligoceno, Eoceno y Paleoceno), la zona del Cretácico (Cretácico Superior Méndez, Cretácico Superior San Felipe, Cretácico Superior Agua Nueva, Cretácico Medio, Cretácico Inferior y la sección superior del Jurásico Superior Tithoniano (JST) asentando la tubería de revestimiento (liner) de 7" a 6200 m.d. Finalmente, terminando de perforar todo el espesor de Jurásico Superior Kimmeridgiano a 6830 m.d., con tubería de revestimiento (liner) de 5", rompiendo paradigmas y récords del campo, reduciendo con esto, costos y tiempos de hasta un 50%. También mantuvo la trayectoria programada tipo "J" con ángulo máximo de 16 grados, azimut de 305, con una tasa de construcción de 1.7°, desplazamiento de 500 metros e iniciando el punto de desviación a 3500 metros. Es necesario hacer mención que la sección del Cretácico nunca ha sido explotada, el campo Madrefil es productor de aceite en JSK.

Palabras clave: No conveccional, gradiente, formación, costos.

Unconventional drilling for slim hole in high gradient formations

Abstract

For the first time in Mexico and in the world, an unconventional drilling for a slender well is being carried out in high gradient formations where it was successfully drilled with a diameter of 8 ½ "from 3,950 meters, in the area of abnormal pressures (Oligocene, Eocene and Paleocene), the Cretaceous zone (Upper Cretaceous Méndez, Upper Cretaceous San Felipe, Upper Cretaceous Agua Nueva, Middle Cretaceous, Lower Cretaceous and the upper section of Tithonian Upper Jurassic laying the 7 "liner at 6200 md. Finally, finishing drilling the entire thickness of Kimmerdigian Upper Jurassic 6830 md with a 5 "liner, breaking paradigms and field records, thereby reducing costs and times by up to 50%. It also maintained the programmed type" J trajectory, with a maximum angle of 16 degrees, azimuth of 305, with a construction rate of 1.7 °, displacement of 500 meters and starting the KOP at 3500 meters. It is necessary to mention that the Cretaceous section has never been exploited, the Madrefil field is an oil producer in JSK.

Keywords: Unconventional, gradient, formation, costs.

Introducción

El campo Madrefil se ubica en el municipio de Comalcalco, Tabasco y se desarrolló a partir del año 2009, donde han de perforar el pozo Madrefil 1 de forma vertical hasta 6492 metros, fue productor en Jurásico Superior Kimmeridgiano (JSK) de tipo roca carbonatada dolomitizada, con una

producción de 8000 bls diarios y 40° API. En la actualidad existen 15 pozos perforados en dos bloques distintos del campo, de los cuales en el bloque 1 se han perforado 12 pozos y en el bloque 2, tan solo 3 pozos, donde 7 han sido productores en el bloque 1 y 3 en el bloque 2. En la **Figura 1** se observa la configuración estructural de los dos bloques descritos.

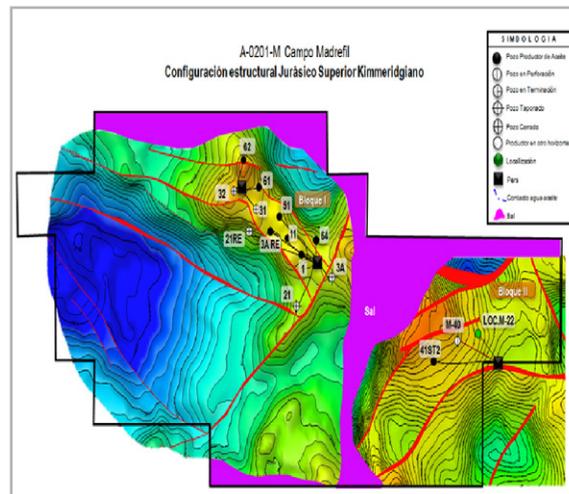


Figura 1. Configuración estructural, geológicamente el campo Madrefil se encuentra en los límites del pilar Reforma Akal y al oeste con la subcuenca de Comalcalco.

En cuanto a las características del campo, es un pozo productor en Jurásico Superior Kimmeridgiano, abarcando un área de 27 km², a una profundidad vertical de 6200 metros, con una porosidad de 3-5 %, permeabilidad de entre 2-22 md, tipo de fluido: aceite volátil/gas condensado, densidad de aceite de 40° api, presión de inicial de 1070 kg/cm², presión actual de 374 kg/cm², relación gas-aceite 236 y temperatura de 159°.

Evolución de la arquitectura de construcción

La ingeniería que se ha desarrollado en el campo Madrefil a inicios de su descubrimiento en cuanto a su arquitectura

de construcción, había sido planificada de forma robusta, es decir, con tubería de revestimiento corrida de 20" a +- 1000 metros para aislar la zona de acuífero, tubería de revestimiento corrida de 13 3/8" para aislar la zona de transición normal +- 3900 metros, liner y complemento de 10 1/8" x 9 7/8" para aislar la zona de alta presión a +- 5500 metros, liner de 7" para cubrir el espesor de Cretácico y cima de JST a +- 6500 metros, y finalmente liner de 5" para la zona productora de JSK a 6800 metros desarrollados. En la **Figura 2** se muestra la arquitectura robusta del campo. En resumen, se aplican los asentamientos naturales de cada tubería de revestimiento respetando los gradientes de cada formación de interés.

Zonificación de gradientes

Se realizó el estudio de geomecánica permitiendo conocer la factibilidad de perforar la zona de alta presión, Cretácico y la cima de JST en una sola sección con una densidad de 1.88 gr/cc. El análisis de los datos obtenidos de múltiples pozos (y diferentes niveles estratigráficos en cada uno) permite desarrollar un modelo bastante completo del campo para el conocimiento de la orientación y magnitud de los esfuerzos principales, y a su vez entender de mejor forma el modelo geomecánico. Si bien tales modelos solo son precisos dentro de ciertos límites (obviamente, cuanto más información se utilice para derivar un modelo de tensión en profundidad, mejor será el modelo), para la

estabilidad del pozo [1]. Esto permitió generar el estudio de zonificación de gradientes colocando el perfil eléctrico resistivo en color rojo de acuerdo con la **Figura 4**, donde se muestran los pozos perforados del bloque 1 y bloque 2, confirmando una similitud de gradientes, y una densidad, la cual contribuyó a la estabilidad mecánica del agujero, aunado a que la roca exhibe un alto esfuerzo compresivo, sin comprometer al esfuerzo mínimo horizontal, dando como resultado una ventana operativa estable. No existen métodos ampliamente aceptados para la predicción de la presión de poro (PP) [6,7,8] en rocas carbonatadas. Los métodos y teorías existentes en la predicción de la PP se basan casi todos en las propiedades de lutitas [2]. Ver **Figura 5**.

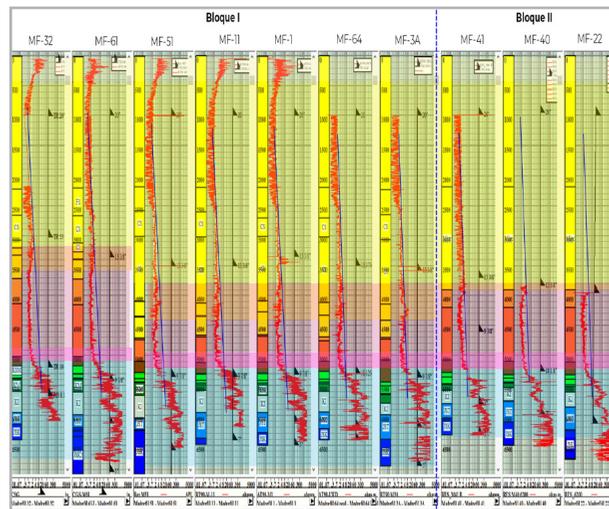


Figura 4. Zonificación de gradientes. Se muestran los perfiles eléctricos resistivos de los pozos de correlación, con los asentamientos de las tuberías con base en los gradientes.

Atashbari y Tingay (2012) publicaron el método de compresibilidad para predecir la PP en carbonatos representados en la ecuación 1 [4,5].

$$PP = \left[\frac{(1 - \Phi)C_b (PO - PP_n)}{(1 - \Phi)C_b - \Phi C_p} \right]^\beta \quad (1)$$

El parámetro C está relacionado con las propiedades de la roca, que es mayor que 1 en el depósito de gas e igual a 1 para los alrededores de las rocas, donde PP [psi] es la presión hidrostática correspondiente; C_b y C_p [psi⁻¹] son la compresibilidad a normalizada y la compresibilidad de poro respectivamente, que se puede calcular a partir de un análisis de núcleo especial; b es una constante empírica que varía entre 0,9 y 1,0. Ellos mostraron buenos resultados de predicción de la PP usando este método en dos pozos de carbonatos de Irán.

También hemos tomado en cuenta estudios recientes como de una nueva ecuación obtenida por investigadores en México para la presión de poro complementando los estudios mencionados anteriormente aplicados a formaciones de carbonatos con conocimientos del ambiente geológico y de registros. [3]. Como se describe en la ecuación 2:

$$PP = \left[\left(\frac{(2 - \phi)}{(1 - \phi)} \right) \sigma_d \right]^\beta \quad (2)$$

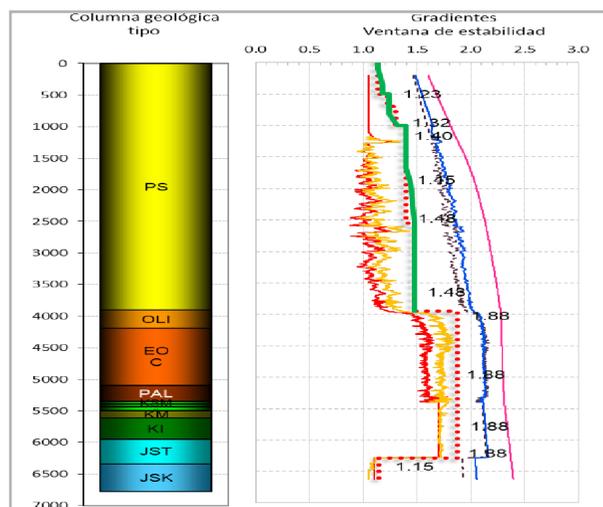


Figura 5. Ventana operativa. Se observa en color rojo la curva de presión de poro, en color amarillo la presión de colapso, en color café el esfuerzo mínimo horizontal, color azul el gradiente de fractura y en color rosa el esfuerzo vertical.

El exponente de correlación (β), fue introducido para aplicación de diferentes campos geológicos para calcular la presión de poros en carbonatos como se indica en la ecuación 2. La diferencial de esfuerzos σ_d es necesario para sustraer la tendencia de la presión de poro del esfuerzo vertical. Nuestros cálculos para la PP en rocas carbonatadas del pozo Madrefil 22, son consistentes de acuerdo con los estudios realizados en diferentes artículos presentados en distintos lugares del mundo. Esto se vio reflejado durante la perforación en dicha roca, ya que el modelo geomecánico cumplió con la densidad adecuada para perforar la sección de carbonatos, donde no se observó manifestación o pérdida de fluido a la formación [6].

Arquitectura de construcción de Madrefil 22

Como se mencionó anteriormente, Madrefil 41 y Madrefil 40, ver Figura 6, fueron los últimos pozos con una arquitectura de forma robusta del campo, que dieron la pauta para planificar la reingeniería de construcción del Madrefil 22, a una arquitectura pozo de forma esbelta, modificando para esto el asentamiento natural de la cima de Cretácico Superior Méndez (KSM), es decir, en vez de realizar el asentamiento en esta formación, se realizó en la cima del Jurásico Superior Tithoniano, esto fue un cambio medular para realizar la perforación en una sola sección

de la zona de alta presión y la zona del Cretácico con una densidad de 1.88 gr/cc, debido a como ya se mencionó anteriormente, conviven con el mismo gradiente. De esta forma se plantearon los siguientes asentamientos: tubería de revestimiento corrida de 20" a 500 metros, esto debido a que el cabezal existente era para iniciar en este diámetro y no en 13 3/8", tubería de revestimiento corrida

de 13 3/8" a 1000 metros para aislar la zona de acuífero, tubería de revestimiento corrida de 9 7/8" a 3950 metros para aislar la zona de transición normal, liner de 7" para cubrir la zona de alta presión, el espesor de Cretácico y cima de JST a +- 6200 metros desarrollados, y finalmente liner de 5" para la zona productora de JSK a 6800 metros desarrollados, Ver **Figura 6**.

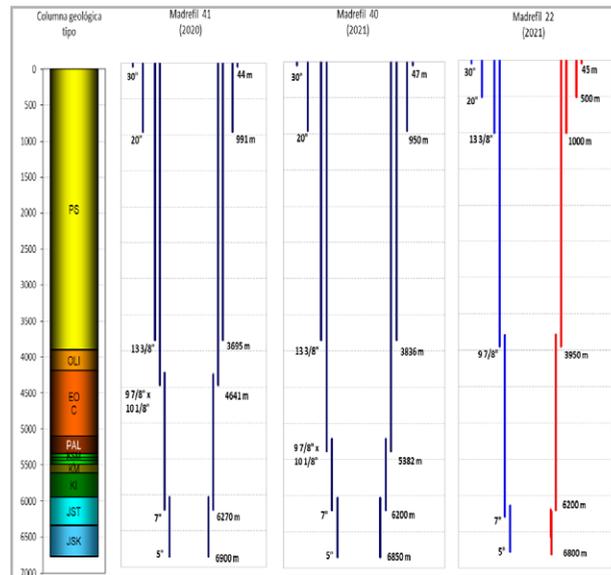


Figura 6. Ingeniería de arquitectura de los pozos Madrefil 41, 40 y 22, mostrando este último el diseño de forma esbelta.

Ingeniería de perforación

La ingeniería de perforación se desarrolló para realizarlo en un tiempo de menos de 100 días, con una trayectoria direccional tipo "J con un KOP a 3500 metros, un ángulo de máximo de 16°, azimuth de 305°, severidad de 1.7° y un desplazamiento de 500 metros, tal y como se muestra en la **Figura 7**.

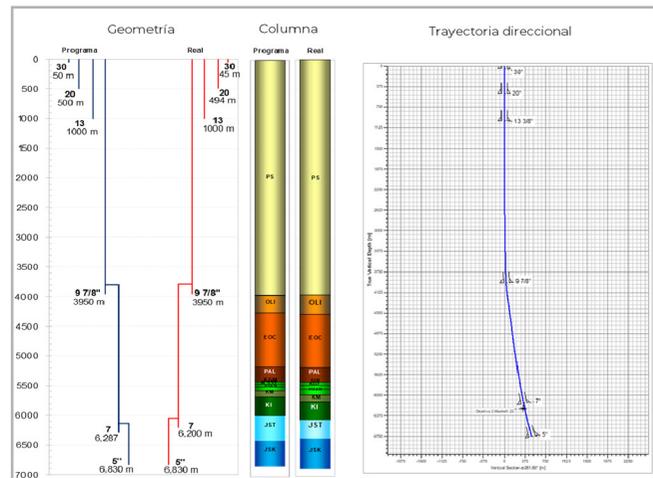


Figura 7. Arquitectura del estado mecánico programada en azul vs estado mecánico real en color rojo, con la trayectoria tipo "J".

Al realizar la perforación de un pozo esbelto el diámetro de las barrenas disminuye en comparación al diámetro original de un pozo robusto, lo que se significa que la masa a perforar es mucho menor, dando como resultado un ritmo de penetración alto y en consecuencia un índice de construcción también alto. En la **Figura 8** se realizó el análisis del ritmo de penetración del pozo esbelto Madrefil 22 versus el campo Madrefil, donde también se agregó el esfuerzo compresivo del campo para hacer una mejor comparativa, dado que éste no cambia con respecto a la arquitectura del pozo, haciendo mención que éste llega a tener valores de hasta 42 mil kpsi, donde se observa que el ritmo de penetración en el pozo esbelto es mucho más alto en comparación al pozo robusto. En la sección de 1000 metros a 3950 metros, se observa una clara disminución de tiempos en Madrefil 22, donde antes se perforaba con diámetro de barrena PDC (policristalino de diamante) en 17 1/2" y ahora con diámetro de barrena PDC de 12 3/4" y sarta navegable, esta sección de acuerdo al registro litológico contiene muchas intercalaciones de arenas, lo cual hace que la formación sea muy abrasiva y que las barrenas tengan un mayor desgaste al perforar este intervalo y por lo tanto un menor ritmo de penetración, (en pozos anteriores

del campo se tiene la estadística de que en promedio para perforar la sección comentada se han utilizado hasta 7 barrenas para llegar al objetivo de asentamiento a la cima de la zona de alta presión con ROP de 12 m/h, ver **Figura 9**) sin embargo, esto no sucedió al perforar con el diámetro de 12 3/4", ya que el ROP (ritmo de penetración) estuvo en un rango de 25 m/h promedio alcanzado hasta 48 m/h, además de que solo se utilizó una sola barrena para esta sección.

En la sección con barrena PDC de 8 1/2" y sarta rotatoria antes 12 1/4", desde el Oligoceno hasta la base de Paleoceno, también se observa un incremento del ROP obteniendo 23.6 m/h promedio y alcanzado hasta 68.8 m/h (cabe hacer mención que anteriormente se alcanzaba un ROP de 15 m/h).

En lo que se refiere al espesor del Cretácico, como se puede observar en la Figura 8, hubo solo una ligera mejoría en cuanto a ROP, esto debido a que el Cretácico se siguió perforando a como los demás pozos de correlación con el mismo diámetro de barrena PDC en 8 1/2" y sarta rotatoria, de tal forma se observa el mismo comportamiento en la sección con barrena PDC de 5 7/8" con sarta navegable.

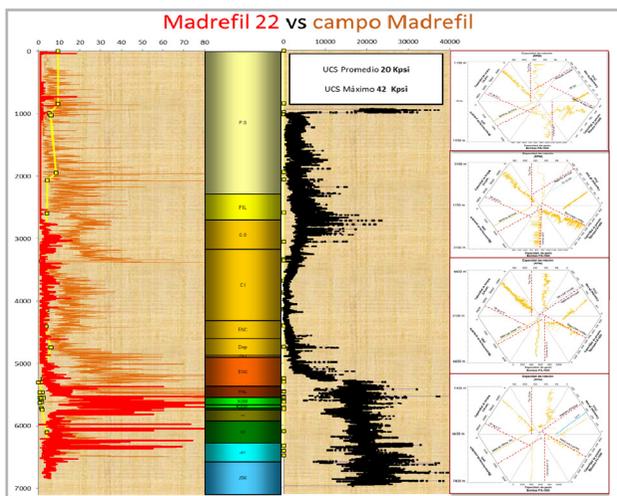


Figura 8. Madrefil 22 vs campo Madrefil. Se grafica el ROP en color rojo de Madrefil 22 y el ROP en color marrón del campo Madrefil, donde se observa una mejoría radical para Madrefil 22 en 12 3/4" y 8 1/2". En color negro se grafica el esfuerzo no confinado de la formación. Los hexágonos explican las cargas por etapa del equipo de perforación.

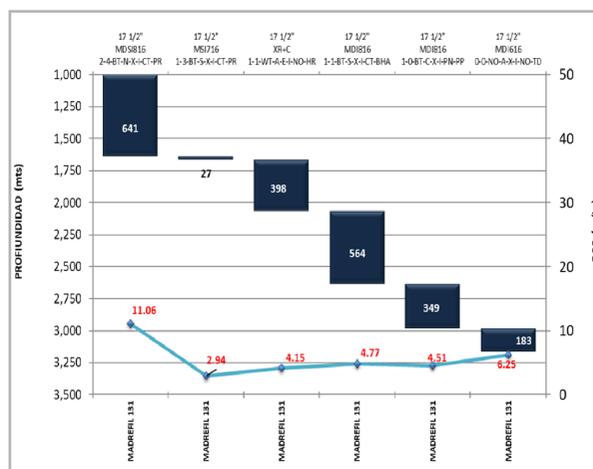


Figura 9. Madrefil 131 es un pozo de correlación donde se aprecia el número de corridas para perforar la sección de 17 1/2", en total 7.

También se realizó un análisis de cargas para el equipo de perforación para cada una de las etapas donde se demuestra que al perforar un pozo esbelto las cargas de energía para el torque, potencia, izaje, gasto y rotación disminuyen considerablemente a excepción de la presión,

ya que al disminuir los diámetros se genera mayor caída de presión. De forma general el equipo de perforación se desgasta menos, minimizando con esto algún tipo de falla. Ver **Figura 10**.

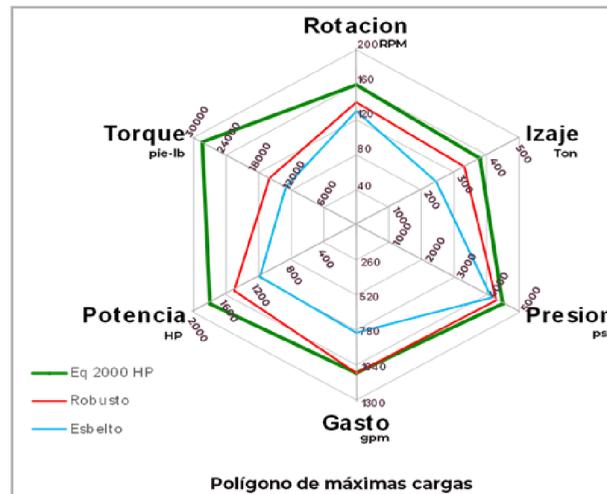


Figura 10. Se observan los parámetros principales de operación referente al equipo de perforación, en color verde son las condiciones máximas, en color rojo representa las condiciones de carga para un pozo robusto y color azul las condiciones de carga para un pozo esbelto.

En la **Figura 11** se analizan las condiciones de operación referente al peso sobre barrena (PSB), revoluciones por minuto (RPM), ROP y gasto, donde se observa que a menor PSB, mayor RPM y mayor gasto se obtiene un incremento en el ROP y en el índice de limpieza (HSI), confirmando lo ya mencionado en la Figura 8. Este análisis es en la sección de

8 ½", así que el arrastre y punto de apoyo nunca estuvo por arriba de lo calculado, manteniendo una limpieza bastante buena en el agujero descubierto, lo cual ayudó a bajar el liner de 7" con una longitud de 2250 mts a fondo perforado de 6250 mts.

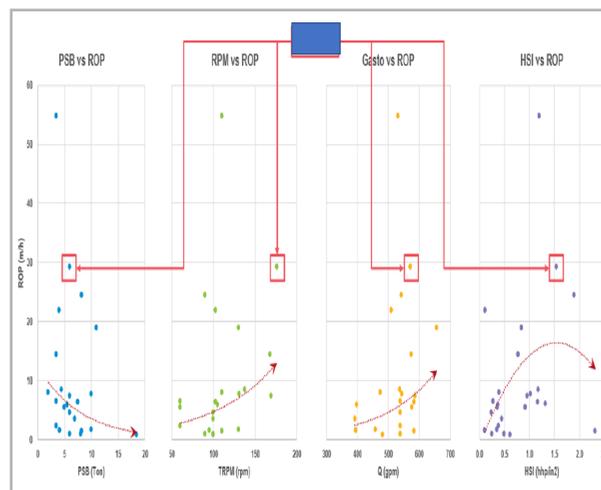


Figura 11. Se puntualiza que al tener un pozo esbelto las condiciones de operación mejoran.

Ingeniería de costos

En la actualidad los costos forman parte indispensable para la rentabilidad del proyecto para perforar un pozo, siendo la rentabilidad punto importante para evaluar el éxito de la perforación derivado de la producción comprometida. Se realizó un análisis después de haber concluido la perforación del pozo con el costo total del mismo y se comparó con el costo total de un pozo robusto, dando como resultado un margen a favor considerable en el costo del pozo. En consecuencia, hemos implementado el concepto de ZAR (zona de alta rentabilidad), haciendo un análisis

de correlación de variables costo-tiempo-profundidad, en línea de potencia, para esto se graficaron los costos totales del pozo robusto y esbelto y posterior se dividió en cuatro cuadrantes, siendo el cuadrante número 1, la zona de mejor rentabilidad, con resultados de $y=10303$, $x=4E+08$, para la correlación costo vs días pozos robustos y esbeltos (caso a). **Figura 12.** Y para la correlación de costos vs profundidad pozos robustos y esbeltos (caso b) de $y=10203$, $x=4E+08$, donde éste nos indica que el ZAR se encuentra en el cuadrante número cuatro, **Figura 13.** De tal forma que el pozo Madrefil 22, por ambos análisis se encuentra ubicado en la ZAR.

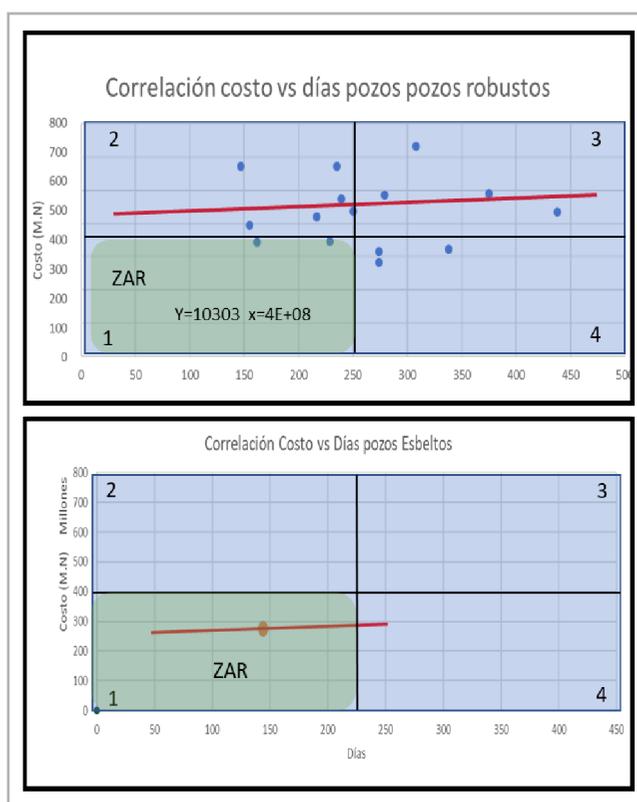


Figura 12. Gráfica de correlación costo vs días pozos robustos y esbelto. Caso a.

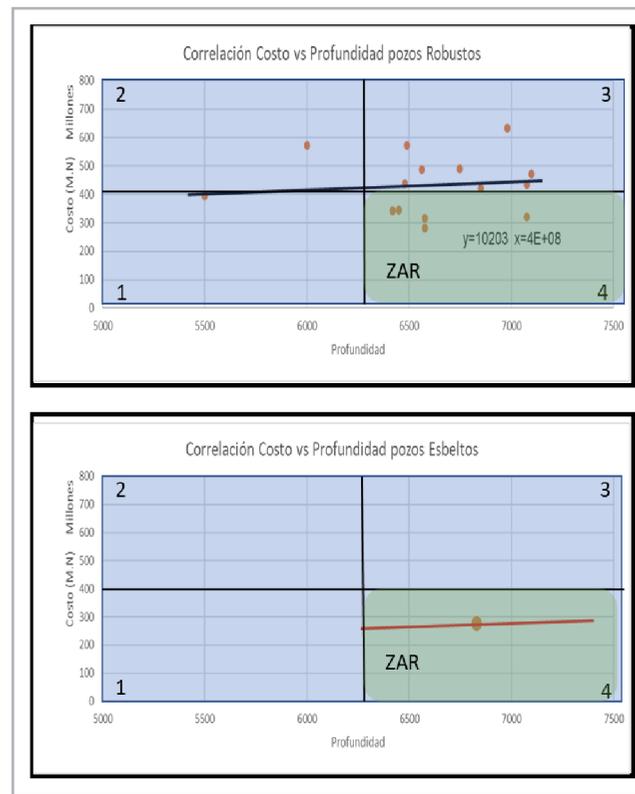


Figura 13. Gráfica de correlación costo vs profundidad pozos robustos y esbelto. Caso b.

Coefficiente de correlación de Pearson

Para este estudio se decidió tomar el concepto de correlación de Pearson para visualizar de mejor forma como es que el costo se reduce cuando se perfora un pozo esbelto. El coeficiente de correlación de Pearson es una prueba que mide la relación estadística entre dos variables continuas. Si la asociación entre los elementos no es lineal, entonces el coeficiente no se encuentra representado adecuadamente.

El coeficiente de correlación puede tomar un rango de valores de +1 a -1. Un valor de 0 indica que no hay asociación entre las dos variables. Un valor mayor que 0 indica una asociación positiva. Es decir, a medida que aumenta el valor de una variable, también lo hace el valor de la otra [17]. Un valor menor que 0 indica una asociación negativa; es decir, a medida que aumenta el valor de una variable, el valor de la otra disminuye.

La fórmula del coeficiente de correlación de Pearson es la siguiente:

$$X_{xy} = \frac{\sum Z_X Z_Y}{N} \quad (3)$$

Donde:

“X” es igual a la variable número uno, “y” pertenece a la variable número dos, “Z_x” es la desviación estándar de la variable uno, “Z_y” es la desviación estándar de la variable dos y “N” es número de datos.

En las Figuras 14 y 15 se realizó el análisis del coeficiente de correlación de Pearson para el caso del pozo robusto y esbelto, donde se observa que para un mismo valor en costo existen diferentes posibles valores en días. Se trata de una correlación positiva pero no perfecta. Este conjunto de puntos, denominado diagrama de dispersión o nube de puntos tiene interés como primera toma de contacto para conocer la naturaleza de la relación entre dos variables.

Si tal nube es alargada apunta a una recta y ascendente como es el caso que ocupa este trabajo, es susceptible de aplicarse el coeficiente lineal de Pearson.

El grosor de la nube da una cierta idea de la magnitud de la correlación; cuanto más estrecha menor será el margen de variación en Y para los valores de X, y, por tanto, más acertado los pronósticos, lo que implica una mayor

correlación. En resumen, el valor de $x^2 = -1.496$ para el caso del pozo robusto indica un incremento de costos debido a que se aleja del cero. Para el caso de pozo esbelto el valor de $x^2 = -1.221$, indica un menor costo debido a que se acerca al cero.

Una vez calculado el valor del coeficiente de correlación interesa determinar si tal valor obtenido muestra que las variables X e Y están relacionadas en realidad, o tan solo presentan dicha relación como consecuencia del azar. En otras palabras, nos preguntamos por la significación de dicho coeficiente de correlación. Un coeficiente de correlación se dice que es significativo si se puede afirmar, con una cierta probabilidad, que es diferente de cero [18]. El coeficiente de correlación obtenido procede de una población cuyo coeficiente de correlación es distinto de cero.

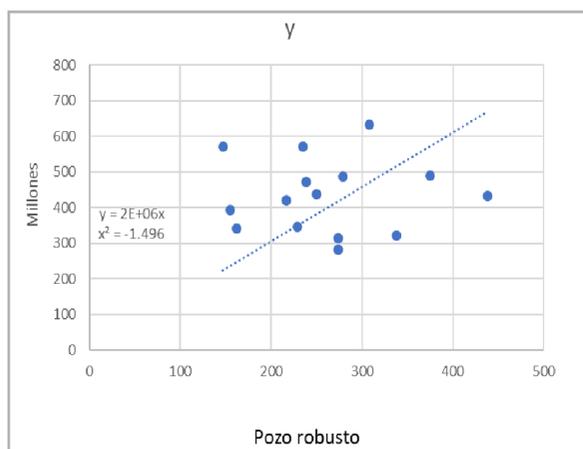


Figura 14. Gráfica de correlación de Pearson para pozo robusto y esbelto.

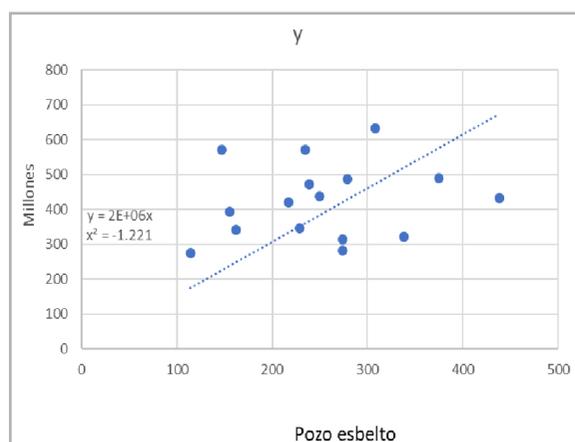


Figura 15. Gráfica de correlación de Pearson para pozo robusto y esbelto.

Resultados y discusión

Durante la perforación del pozo es necesario llevar un comparativo a lo que se programó en ingeniería de diseño con respecto a lo real, esta muestra comparativa se ve reflejada en la Figura 16, profundidad vs días o bien gráfica de avance, donde se muestra los tiempos de perforación del pozo Madrefil 22 vs los tiempos de perforación del campo Madrefil, además se presenta el número de barrenas utilizadas para el pozo esbelto que fueron un total de 8 y el número de barrenas promedio para el campo, siendo una ingeniería de arquitectura robusta donde se han utilizado

hasta 17 barrenas. Como se mencionó en la Figura 8, en la etapa donde mejor se optimizó, es en el intervalo de 1000 a 3950 metros, al reducir de 7 barrenas promedio para el campo a tan solo 2 barrenas para el pozo esbelto.

Es necesario hacer mención que se adecuó la barrena PDC 12 ¼" para perforar esta sección con características de 6 aletas con cortadores de 16 mm con estructura de corte secundario con menor densidad de diamante para tener mayor velocidad en el Terciario, con cortadores geométricos en 3D que reduce la fluctuación del torque y requiere menor PSB.

Esta barrena es para formaciones con intercalamiento litológico, abrasivo, de alta compresibilidad, y resistentes al impacto.

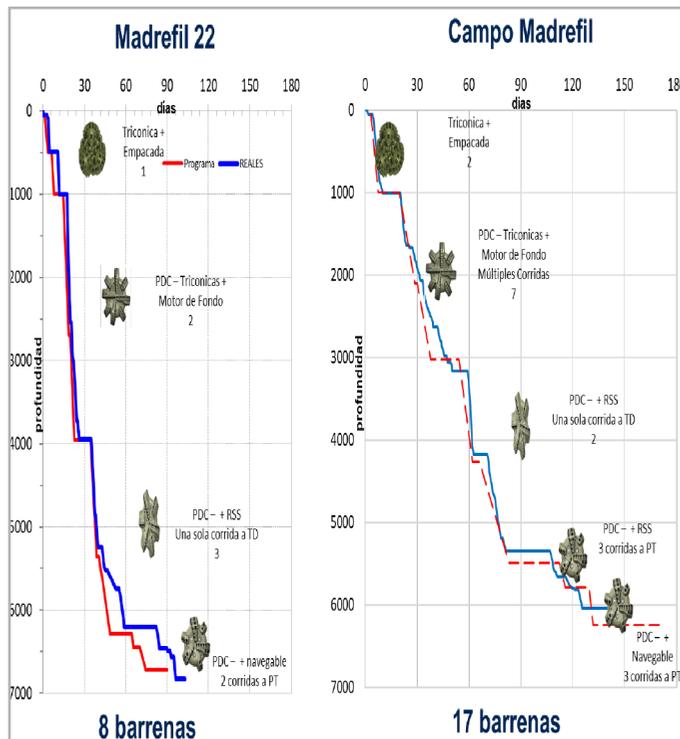


Figura 16. Gráfica de avance comparativa Madrefil 22 vs campo Madrefil. En color rojo se observan los tiempos programados, en color azul se observan los tiempos reales para ambos casos.

Haciendo referencia a la gráfica de avance, en la **Figura 17** se observan los tiempos de perforación para Madrefil 22 con un total de 103 días reales de 90 días programados, y también se visualizan los tiempos de perforación reales de todo el campo Madrefil, que desde que se perforó el primer pozo hasta antes del pozo esbelto, los tiempos promedio oscilan en 240 días, lo cual hubo una reducción de hasta un 60% de tiempos.

La evolución tecnológica de las herramientas de perforación ha ayudado definitivamente para rediseñar la ingeniería y ver maximizados de forma optimizada cada una de las etapas a perforar.

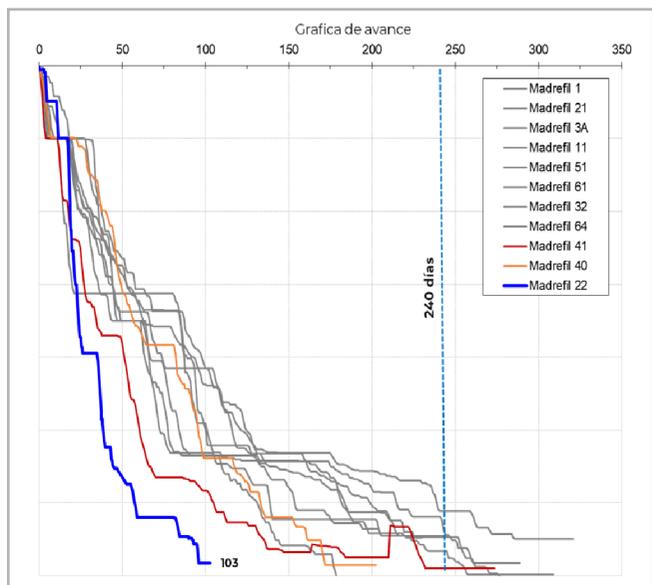


Figura 17. Gráfica de avance comparativa Madrefil 22 vs todos los pozos de correlación. En color azul se muestra el mejor tiempo de 103 días pozo el pozo esbelto.

Conclusiones

Derivado de los altos tiempos de perforación que se han alcanzado con el arreglo del pozo actual (robusto) en el campo Madrefil. Se hizo la ingeniería para diseñar el pozo esbelto en el Madrefil 22 con buenos resultados, logrando reducir el tiempo de perforación en 60% respecto al campo Madrefil. También se redijeron sustancialmente las fallas asociadas al equipo de perforación debido a la menor demanda de cargas para el arreglo esbelto. Se estableció una sinergia adecuada entre la ejecución y el seguimiento del pozo durante la toma de decisiones entre todo el personal integrado en el proceso. Se tiene planificado realizar esta arquitectura de pozos esbelto en los próximos pozos a perforar en el campo Madrefil. También se tiene la propuesta de identificar y seleccionar campos candidatos para la aplicación de esta ingeniería, haciendo consideración de que muchos de los campos en la región sur tienen un gradiente depresionado en el Cretácico, lo que imposibilita la perforación continua y obliga al asentamiento en la cima de KSM. Es necesario crear y fabricar barrenas específicas para el campo a perforar, sin duda esto ayudará a realizar un mejor performance. No se cumplió con el tiempo programado de 90 días, en mayor medida a la falla de herramientas direccionales.

Referencias

- Zoback, M. D., Barton, C. A., Brudy, M. et al. 2003. Determination of Stress Orientation and Magnitude in Deep Wells. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* **40** (7-8): 1049–1076. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2003.07.001>.
- Wang, Z. y Wang, R. 2015. Pore Pressure Prediction Using Geophysical Methods in Carbonate Reservoirs: Current Status, Challenges and Way Ahead. *Journal of Natural Gas Science and Engineering* **27 Part, 2** (noviembre): 986-993. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.09.032>.
- Morales-Salazar, J., Samaniego-Verduzco, F. y García-Herrera, M. G. 2020. A Pore-Pressure Equation for Carbonates. *SPE Drill & Compl* **35** (02): 191-200. SPE-199881-PA. <https://doi.org/10.2118/199881-PA>.
- Atashbari, V. y Tingay, M. 2012. Pore Pressure Prediction in Carbonate Reservoirs. Artículo presentado en SPE Latin America and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Ciudad de México, México, abril 16-18. SPE-150835-MS. <https://doi.org/10.2118/150835-MS>.
- Atashbari, V., Tingay, M. y Zareian, M. H. 2012. Compressibility Method for Pore Pressure Prediction. Artículo presentado en Abu Dhabi International Petroleum Conference and Exhibition, Abu Dabi, EAU, noviembre 11-14. SPE-156337. <https://doi.org/10.2118/156337-MS>.
- Matthews, W. R. y Kelly, J. 1967. How to Predict Formation Pressure and Fracture Gradient. *Oil and Gas Journal* **65**: 92-1066.
- Terzaghi, K. y Peck, R. B. 1967. *Soil Mechanics in Engineering Practice*, second edition. New York: John Wiley and Sons, Inc.
- Mitchell, J. 2002. *Perforando Sin Problemas*. The Woodlands, Texas: Drillbert Engineering Inc.
- Acevedo Aguirre, O. D. 2009. *Determinación de la Magnitud de Esfuerzos In Situ*. Tesis de Licenciatura, UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Ciencias de la Tierra, México, D.F.
- Tellez, C. P., Elisabeth, F., Bentosa, E. et al. 2012. Geomechanics Characterization of the Clastics and Carbonates Formation of Southern Fields of Mexico (2005–2009). Artículo presentado en SPE Latin America and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Ciudad de México, México, abril 16-18. SPE-153430-MS. <https://doi.org/10.2118/153430-MS>.
- Trejo Ortiz, M. del C. 2009. *Aplicación de la Geomecánica en la Estabilidad del Agujero de un Pozo de la Región Sur*. Tesis de Maestría. UNAM, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería.
- Weakley, R. R. Determination of Formation Pore Pressures in Carbonate Environments from Sonic Logs. Artículo presentado en Annual Technical Meeting, Calgary, Alberta, Canadá, junio 9-12. PETSOC-90-09. <https://doi.org/10.2118/90-09>.
- Wang, R., Wang, Z., Shan, X. et al. 2013. Factors Influencing Pore-Pressure Prediction in Complex Carbonates based on Effective Medium Theory. *Petroleum Science* **10**: 494-499. <https://doi.org/10.1007/s12182-013-0300-7>.

14. Soleymani, H. y Riahi, M. A. (2012). Velocity Based Pore Pressure Prediction—A Case Study at One of the Iranian Southwest Oil Fields. *Journal of Petroleum Science and Engineering* **94-95** (septiembre): 40–46. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2012.06.024>.
15. Yu, H. y Hilterman, F. J. 2014. The Effect of Pressure on Rock Properties in the Gulf of Mexico: Comparison Between Compaction Disequilibrium and Unloading. *Interpretation* **2** (1): SB1–SB15. <https://doi.org/10.1190/int-2013-0067.1>.
16. Yu, F., Jin, Y., Chen, K. P. et al. 2014. Pore-Pressure Prediction in Carbonate Rock Using Wavelet Transformation. *Geophysics* **79** (4): D243–D252. <https://doi.org/10.1190/geo2013-0277.1>.
17. Santabárbara, J. 2019. Cálculo del Intervalo de Confianza para los Coeficientes de Correlación Mediante Sintaxis en SPSS. *Revista d'Innovació i Recerca en Educació* **12** (2): 1-14. <https://doi.org/10.1344/reire2019.12.228245>.
18. Hernández-Lalinde, J., Espinosa-Castro, J.-F., Peñaloza Tarazona, M. et al. 2018. Sobre el Uso Adecuado del Coeficiente de Correlación de Pearson: Definición, Propiedades y Suposiciones. *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica* **37** (5): 587-595.

Semblanza del autor

Roberto Juárez López

Ingeniero Petrolero egresado del Instituto Politécnico Nacional en 2005.

2011 Maestría en geociencias y administración de los recursos naturales.

2016 Doctorado en tecnología avanzada con especialidad en fenómenos de transporte en sólidos de plasma y gases de descargas.

2019 Posdoctoral en la División académica de ciencias básicas de la Facultad de Ciencias en Química aplicada en el laboratorio de nanomateriales catalíticos aplicados al desarrollo de fuentes de energía y remediación ambiental del Centro de investigaciones de ciencia y tecnología aplicada de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

2007 Diplomado en diseño y construcción de pozos.

2009 -2016 Profesor en la Academia de ingeniería petrolera, (ESIA-TICOMAN- IPN)

Impartición de cursos de perforación, terminación y reparación de pozos a escuelas como: IPN-UNAM, instructor dentro de Pemex para el pozo escuela en Castaño, entre otros, así como a institutos y empresas.

Director tesis de investigación a alumnos de Licenciatura de la carrera de petroleros ESIA – TICOMAN- IPN.

Director de tesis de investigación a alumnos de Maestría en Geociencias y administración de los recursos naturales ESIA-TICOMAN-IPN.

Autor de artículos de investigación científica y de divulgación.

Candidato al SNI, (Sistema Nacional de Investigadores)

Múltiples conferencias internacionales y nacionales de interés Petrolero, Científico y Académico con participación destacada en países como Argentina, Colombia, Cuba, Uruguay, Chile, Estados Unidos, Brasil, España y Estonia.

Experiencia Profesional

Actualmente labora en Pemex, en el área de Diseño, ingeniería y operación para el seguimiento de los pozos en perforación, terminación y reparación.