

Aplicación de nuevas tecnologías de monitoreo en tiempo real para la evaluación de estabilidad y limpieza de pozos en yacimientos no convencionales

Este trabajo fue seleccionado en el marco del 4° Congreso Latinoamericano de Perforación y Terminación del IAPG, realizado en noviembre de 2021.

Por **F. Chiachiarelli, R. Escobar** (YPF S.A.); y **R. Moyano Paz, M. Zagatto y S. Comotti** (GEOLOG)

En este trabajo se muestran los resultados de la implementación de una herramienta que define medidas mitigatorias óptimas en caso de presentarse inestabilidad y mejoras de las maniobras de limpieza en las operaciones del no convencional.

El objetivo de este trabajo es mostrar los resultados de la aplicación de un caudalímetro de *cuttings* que determina en tiempo real las condiciones de estabilidad y limpieza del pozo, para poder tomar decisiones mitigatorias que reduzcan el impacto de estos eventos y, en definitiva, minimicen los NPT (*Non-Productive Times*) asociados.

El estudio se realizó sobre un pozo ubicado en el área al norte de la Dorsal, en la provincia del Neuquén, 5 km al norte de la ciudad de Cutral Co, y 110 km al oeste de la capital provincial (Figura 1).

Desde el punto de vista geológico, el área se ubica en el sector sur de la Cuenca Neuquina, al norte de la Dorsal de Huincul. La cercanía a este importante rasgo tectónico le imprime una fuerte estructuración al subsuelo, donde las fallas desempeñan un papel importante en la compartimentalización de los reservorios y generan grandes variaciones en el estado tensional de los esfuerzos al modificar su dirección y magnitud en cortas distancias.

La historia productiva del yacimiento es larga y prolífica, con pozos que probaron producción en diversos niveles de la columna estratigráfica. Sin embargo, se con-

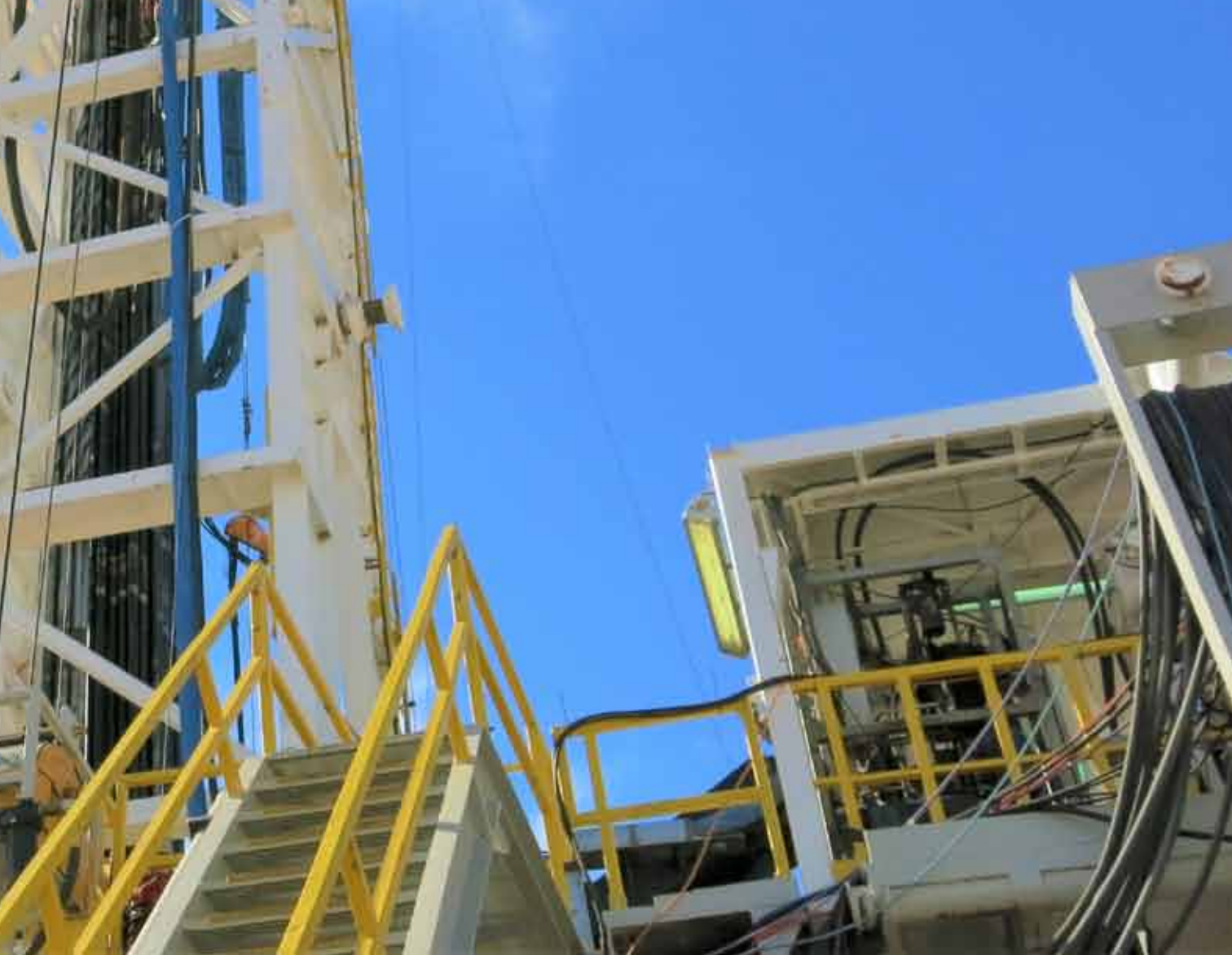


Figura 1. Mapa de ubicación del pozo donde se implementó el caudalímetro de *cuttings*.

taban con pocos antecedentes de la Fm. Vaca Muerta, entre los que podemos mencionar cuatro intervenciones de pozos con el objetivo de evaluar la productividad de la formación y tres pozos horizontales que navegan la sección inferior de la Fm. Vaca Muerta. Estos pozos tienen una extensión horizontal menor a 600 m, distinto al diseño planteado en el pozo analizado, que tiene una rama de 2000 m.

Debido a que el pozo estudiado se encuentra en una zona de avanzada, se presentaron dos inconvenientes. Por un lado, la escasez de datos disponibles dificultó la calibración del modelo geomecánico, que entre otras co-

sas, generó incertidumbre en la estimación de la ventana de estabilidad. Asimismo, la ausencia de pozos previos con diseño similar al planteado impide estimar una ventana operativa basada en el historial de perforación. Más aún, a causa de la densidad de pozos del campo, el pozo horizontal se planificó perforarlo en una dirección no alineada a los esfuerzos principales, por lo que estimar la estabilidad en la pared del pozo se convirtió en un trabajo más arduo. En este contexto se utilizó el caudalímetro, con el objetivo de aportar certezas sobre la ventana de estabilidad y evaluar la limpieza del pozo.

La ejecución del pozo fue planificada en dos etapas: en

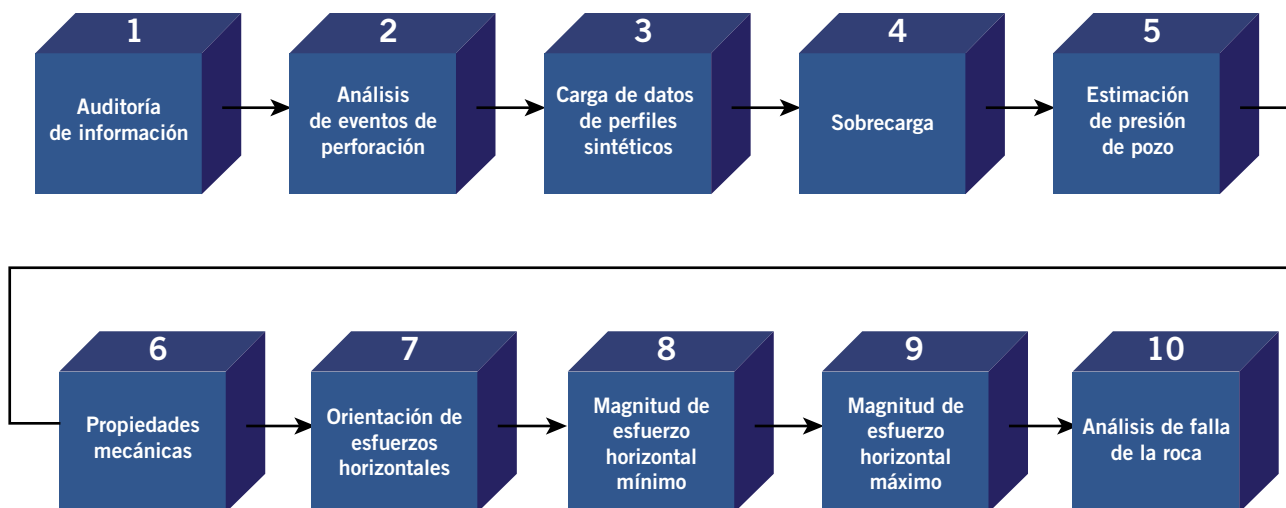


Figura 2. Flujo de trabajo para el desarrollo de un modelo geomecánico 1D.

primer lugar, se perforó un pozo piloto vertical para la adquisición de datos y luego se abandonó para perforar 2000 m de rama horizontal en los niveles basales de Vaca Muerta.

El caudalímetro de *cuttings* fue usado en el tramo aislación del pozo vertical y en el pozo horizontal desde el inicio del *side track* hasta la profundidad final.

Modelo geomecánico

Para el modelo geomecánico 1D del pozo, se siguió el flujo de trabajo que se muestra en la figura 2. Flujo de trabajo para el desarrollo de un modelo geomecánico 1D. Entre los objetivos del modelo se encuentran determinar una prognosis de la ventana operativa de lodo para la perforación, así como la determinación de la dirección más conveniente de la rama horizontal.

En la primera etapa del flujo se realizó un análisis de los principales datos de perforación, geología, ensayos de laboratorio, datos de terminación y registros de pozo, entre otros, con el propósito de generar una base de datos y entender la disponibilidad de datos necesarios para la construcción del modelo. De esta forma se pudo establecer que el campo cuenta con datos suficientes para el cálculo de propiedades mecánicas, la calibración de esfuerzos horizontales y la determinación de la dirección del esfuerzo horizontal mínimo y máximo.

Del análisis de eventos de perforación para el tramo aislación se destaca que los más frecuentes fueron las tracciones, seguido de eventos de influjos/gasificaciones y pérdidas parciales de lodo. Menos frecuentes resultaron los aprisionamientos. Algunos de estos eventos permitieron calibrar la ventana de lodo, otros simplemente ayudaron a identificar problemas de estabilidad del pozo.

Como resultado de esta etapa, se estimó una densidad de lodo mínima de 1,35 g/cc para evitar los eventos identificados en los pozos vecinos. Si bien es un valor conservador para la zona, resulta ser muy inferior a la densidad típicamente usada en bloques de desarrollo de Vaca Muerta, lo que generó cierta desconfianza en la

estimación e impulsó la importancia de contar con un estudio geomecánico completo.

Con el objetivo de completar los registros de pozo para el cálculo de las propiedades elásticas en condición dinámica, se generaron perfiles sintéticos a partir de correlaciones de los diferentes registros de pozo en función del sónico compresional (DTcomp). Luego, los registros de pozo reales se completaron con los sintéticos para obtener perfiles de toda la columna estratigráfica, como se puede observar en los *tracks* cuatro a seis de la figura 3.

El siguiente paso fue estimar la sobrecarga a partir de la integración de registros de densidad de los pozos de correlación cercanos. Para aquellos que no contaban con densidad somera, se completó usando una extrapolación entre la superficie y el primer valor registrado. Al comparar la sobrecarga obtenida de distintos pozos, se observó una única tendencia en los valores del gradiente de carga litostática, que validó la realización de un único modelo geomecánico. La sobrecarga resultante fue de 1,02 psi al tope de la Fm. Vaca Muerta.

La quinta etapa del flujo de trabajo consistió en la determinación de la presión poral. La cual fue estimada usando el método de Eaton, y calibrada con datos medidos de presión estática en diferentes pozos y niveles reservorio, incluido Vaca Muerta. En el mapa de sobrepresión de la formación de interés, el pozo de estudio se ubicaba en una zona de borde, donde las presiones podrían variar entre 0,48 psi/ft y 0,73 psi/ft. Considerando la ubicación del pozo propuesto existía el riesgo de no encontrar la sobrepresión esperada. A partir de modelo geomecánico se estimó una presión poral de 0,72 psi/ft para el nivel navegado, lo cual reforzó el interés del nivel reservorio y, posteriormente, la presión de formación obtenida del DFIT estuvo en el rango estimado.

Las propiedades elásticas en condición dinámica se determinaron a partir de los perfiles sónico compresional, de cizalla y densidad completos, y en condición estática usando las correlaciones generadas a partir de la base de datos para la Fm. Vaca Muerta de YPF (Varela y Hasbani, 2017).

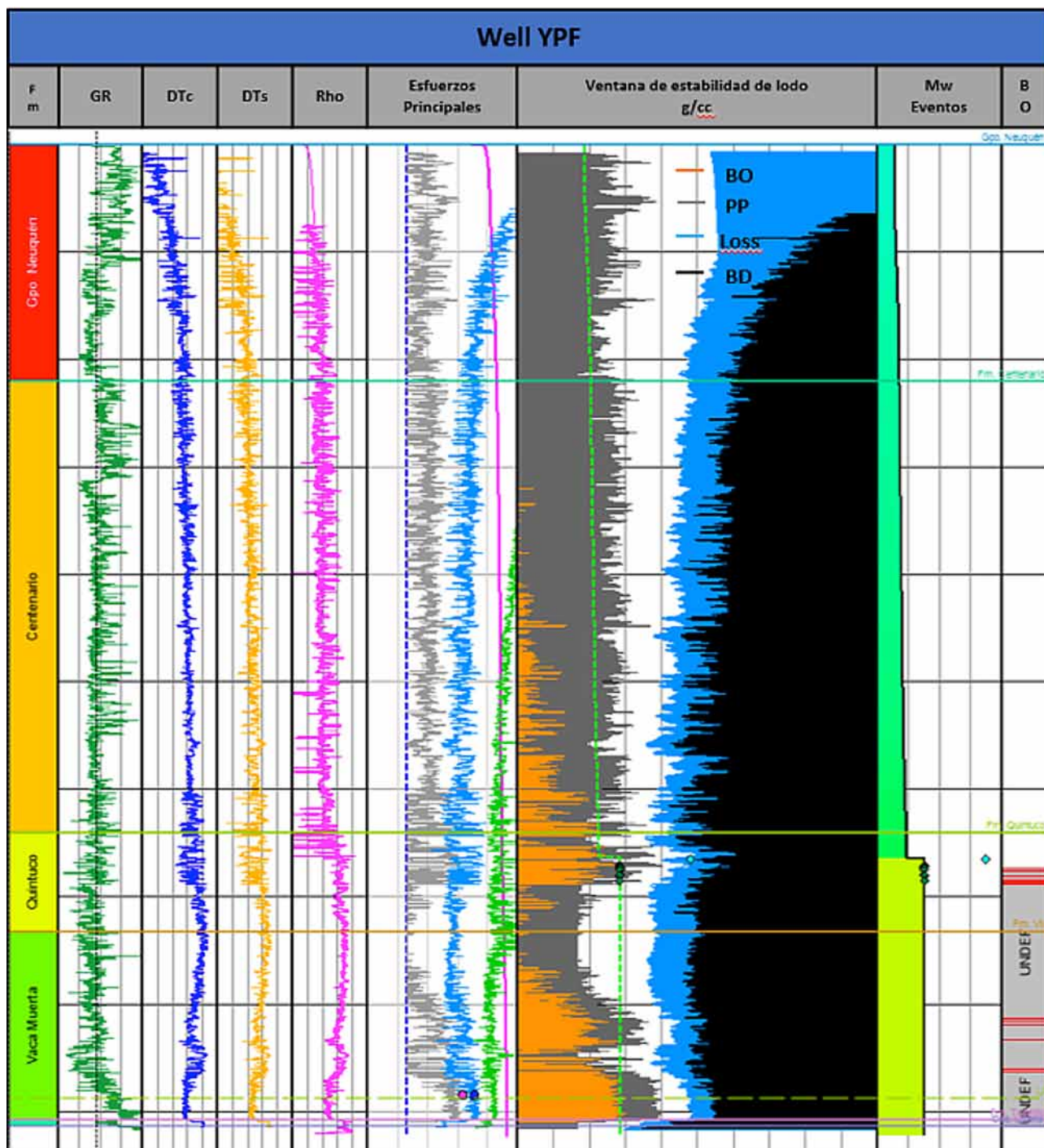


Figura 3. Perfiles de pozo. Track 1: MD; Track 2: formaciones geológicas esperadas; Track 3: gamma Ray; Track 4: sónico compresional; Track 5: sónico de cizalla; Track 6: densidad; Track 7: esfuerzos principales (Shmin, Sv y SHmáx), presión poral y puntos de calibración, en gradiente psi/ft; Track 8: ventana de estabilidad en g/cc: curva de colapso (BO), curva de presión poral (PP), curva de pérdidas (Loss) y curva de breakdown (BD); Track 9: densidad de lodo y eventos de pozos; Track 10: breakout identificados en imagen de pozo.

En la etapa siete del flujo de trabajo, se estimó la dirección de los esfuerzos horizontales a partir de la identificación de *breakouts* y fracturas inducidas en las imágenes de cuatro pozos disponibles dentro del campo, resultando en una orientación promedio del SHmax en Az110°, mientras que el Shmin se ubicaba en Az20°. Esta última fue la dirección sugerida para la perforación de la rama horizon-

tal. Sin embargo, para evitar el riesgo de interceptar pozos existentes, el pozo se orientó en dirección Az0°.

Para el cálculo de la magnitud de los esfuerzos horizontales (etapa 8), se utilizaron las ecuaciones del modelo poro-elástico, que involucran los parámetros de sobrecarga, presión poral, el coeficiente de Biot y los módulos elásticos previamente estimados y calibrados (Figura 4).

$$\sigma_h = \alpha P + \frac{\nu}{1-\nu} \cdot (\sigma_v - \alpha P) + \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_h + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \varepsilon_H$$

$$\sigma_H = \alpha P + \frac{\nu}{1-\nu} \cdot (\sigma_v - \alpha P) + \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_H + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \varepsilon_h$$

P	Presión de poro
σ_h	Esfuerzo horizontal mínimo
σ_H	Esfuerzo horizontal máximo
σ_v	Esfuerzo vertical o sobrecarga
α	Coefficiente de Biot
ν	Relación de Poisson
E	Módulo de Young
$\varepsilon_h, \varepsilon_H$	Deformaciones tectónicas

Figura 4. Ecuaciones del modelo poro-elástico isotrópico para la determinación de esfuerzos horizontales.

Las deformaciones tectónicas actúan como variables de calibración, ajustándolas hasta que el cálculo del esfuerzo mínimo calibre con la medición de presión de cierre obtenidas del ensayo DFIT.

En la etapa 9, el esfuerzo horizontal máximo se calibró mediante un proceso iterativo en el que se buscó correspondencia entre los *breakouts* estimados por el modelo y los observados en el pozo a través del registro de imagen, nuevamente con el uso de las deformaciones tectónicas para lograr la calibración.

La última fase consistió en la determinación de la ventana de estabilidad de pozo, la cual está definida por el rango de densidad de lodo requerida para que las paredes del pozo no fallen por corte (*breakouts*) y, además no supere la resistencia a la tracción de la roca y se genere una fractura inducida (*breakdown*). Aplicando el criterio de rotura de Mohr-Coulomb, se generó la ventana de estabilidad para los pozos analizados (Figura 3, *Track 8*).

Como resultado del modelo geomecánico, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- La ventana operativa de estabilidad en el intervalo Quintuco-VM se encuentra entre 1,35 g/cc y 1,65 g/cc.

El límite inferior está dado por la curva de colapso, la cual está por debajo de la presión poral estimada.

- Al no perforar el pozo en la dirección del σ_{hmin} , pueden presentarse más eventos de inestabilidad de pozo.
- Como medida de control de la estabilidad de pozo se propuso el uso del servicio de caudalímetro de *cuttings* para ajustar/validar el modelo en tiempo real.

Descripción de la herramienta, características y limitaciones

Se trata de una solución en tiempo real para monitorear tanto la estabilidad de las paredes del pozo, como la capacidad de evacuación de los recortes y el estado de limpieza del pozo, durante la perforación. Resulta especialmente efectivo en pozos con alto grado de inclinación, horizontales y de alcance extendido. Esto se consigue mediante la instalación de una balanza delante de cada zaranda, de tal forma que todos los recortes son descargados a un sistema de pesaje continuo, conectado





Figura 5. Ejemplo de instalación de caudalímetros en zarandas.

al software de adquisición de datos (Figura 5). El especialista en el servicio monitorea todo el proceso, interpreta y comunica los resultados en tiempo real.

Las zarandas descargan los recortes en una bandeja de recepción equipada con cuatro transductores que proporcionan una medida muy precisa del peso de los recortes recibidos en superficie. A partir del peso bruto de los recortes, medidos por las máquinas, el software de monitoreo aplica los coeficientes de corrección “*mud coating*” y “*retrieve*” y calcula el peso real de los recortes recuperados.

El coeficiente *mud coating* es necesario para eliminar el peso del lodo de perforación que recubre los recortes, así como el lodo atrapado dentro de sus poros. El revestimiento de lodo se calcula midiendo la diferencia en términos de peso entre un volumen fijo de muestra de recortes lavados y sin lavar.

El coeficiente *retrieve* permite tener en cuenta todos los sólidos finos que pasan por las zarandas, pero no llegan a las bandejas, es decir, no se pesan. A partir del peso real total de los recortes, medido por las máquinas, el software calcula el volumen total de recortes recuperado y lo compara con el volumen teórico perforado en función de la ROP medida y el tamaño nominal del pozo. El cálculo se realiza utilizando la densidad aparente de los recortes.

Dependiendo del tipo de lodo empleado, las máquinas se equipan con un sistema de pulverización de agua a presión para facilitar la evacuación de los recortes ya analizados y garantizar un servicio sin interrupciones.

Metodología de trabajo

El primer paso consistió en una visita técnica a la torre de perforación para tomar medidas y diseñar la instalación de las máquinas de medición de los recortes (CVM) en función del número y tipo de zarandas, del

espacio disponible y de las tomas de agua, aire comprimido y electricidad.

A continuación, se elaboró un informe técnico detallado en el que se describió la instalación por realizar, así como las modificaciones necesarias para alojar el equipamiento. Posteriormente, se instalaron tres máquinas CVM, para las cuales el montaje, la calibración y la puesta en marcha en el Rig la realizó un ingeniero especialista en este servicio.

Durante la perforación de la sección 6-1/8” del pozo (tramo aislación), los recortes fueron conducidos a las bandejas de las máquinas CVM que realizan una medida continua del peso. Estas bandejas incorporan un sistema de rotación y volteo que permite la descarga de los recortes una vez superado un umbral de peso o tiempo de medición.

El sistema de adquisición de datos se encarga de registrar todo el proceso de medición. Un algoritmo especialmente diseñado para ello permite la visualización de los datos en tiempo real y la comparación con los volúmenes esperados tanto en el dominio del tiempo como de la profundidad.

Todo el proceso fue supervisado por el especialista de la compañía de servicios, quien no solo garantizó el correcto funcionamiento del hardware y software, sino que también realizó la corrección e interpretación de los datos y la elaboración de los informes. En este caso trabajaron dos especialistas 24 horas los 7 días a la semana.

El perfil del ingeniero especialista está muy orientado a la geomecánica. Su presencia es fundamental para mantener una comunicación constante con los representantes del cliente, participando activamente en la toma de decisiones, y en caso de ser necesario, remediar alguna situación complicada, como la falta de limpieza del pozo o la presencia de *cavings* que indiquen inestabilidad en las paredes del pozo. El especialista tiene la preparación y la experiencia necesaria para recomendar qué acción se debe tomar en cada momento.

En particular, el especialista en este proyecto contribuyó a:

- Identificar la falta de recuperación de recortes en la sección horizontal.
- Definir las prácticas de limpieza previas a cada conexión, que mejoraron la recuperación de recortes y evitaron LTI.
- Variar el caudal cuando la tendencia de recuperación de recortes descendía.
- Evaluar la efectividad de las píldoras bombeadas siguiendo el programa de perforación, identificar cuando no eran efectivas y contribuir con ellos al ahorro de costos del proyecto.

Adicionalmente, se realizó un control diario de calidad de los datos por parte de la oficina técnica.

Resultados

A continuación, se muestran los resultados de la aplicación de esta tecnología, dividido en dos secciones: por un lado, el pozo piloto vertical y, por el otro, el tramo horizontal. El motivo de esta división es que la geometría de ambos tramos condiciona en forma directa tanto las maniobras de limpieza como los cálculos de estabilidad de pozo, por lo tanto deben analizarse por separado.

Pozo piloto vertical

Se analizaron 440 m de perforación. De acuerdo con los resultados de la curva de recuperación de sólidos, se identificaron tres intervalos diferentes. Los primeros 250 m (Figura 6, Zona 1) se perforaron con una elevada ROP

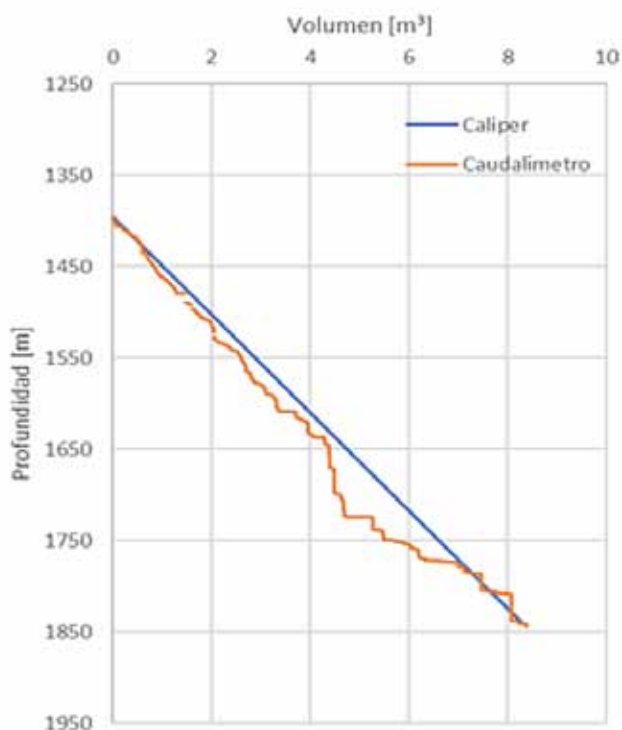


Figura 7. Comparación entre el volumen estimado por caliper y por caudalímetro para el pozo vertical.

(17 m/h promedio, 46 m/h máxima), con una recuperación de volumen de recortes durante la perforación del 88%. La falta de recuperación ocurrió con valores de ROP por encima de 30 m/h, con 180 gpm y 50 rpm, que fueron finalmente recuperados reciprocando la sarta antes de la conexión. La segunda zona (Figura 6, Zona 2) correspon-

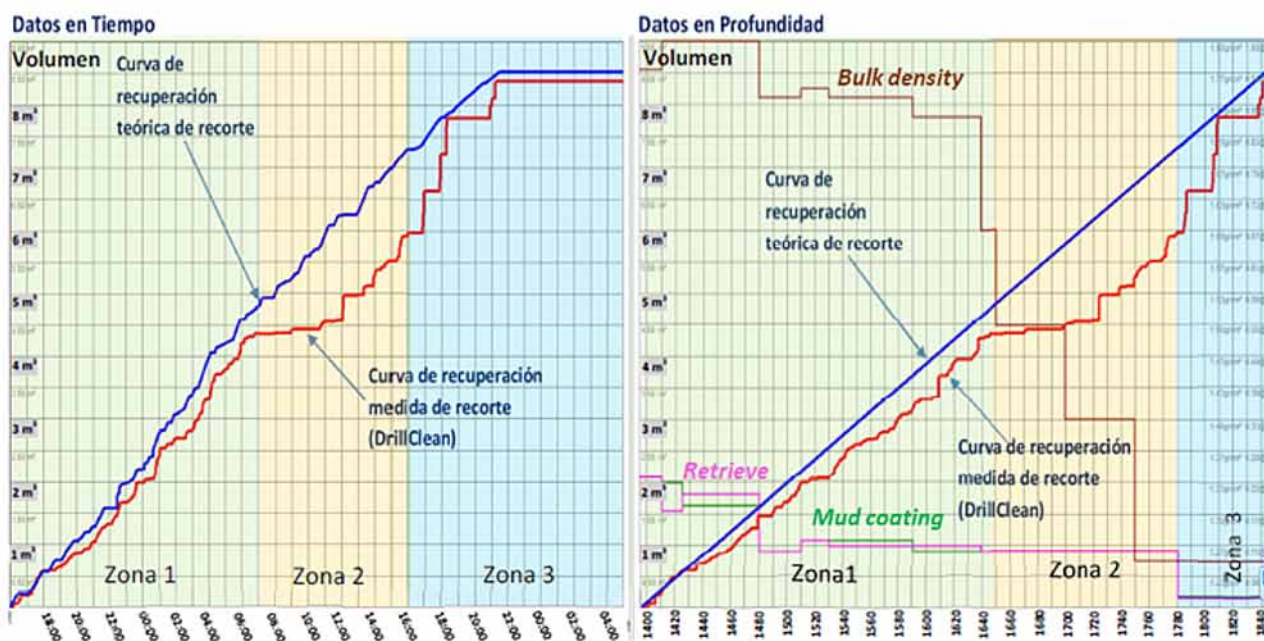


Figura 6. Curva de recuperación de recortes para el tramo vertical en función del tiempo (izquierda) y de la profundidad (derecha).

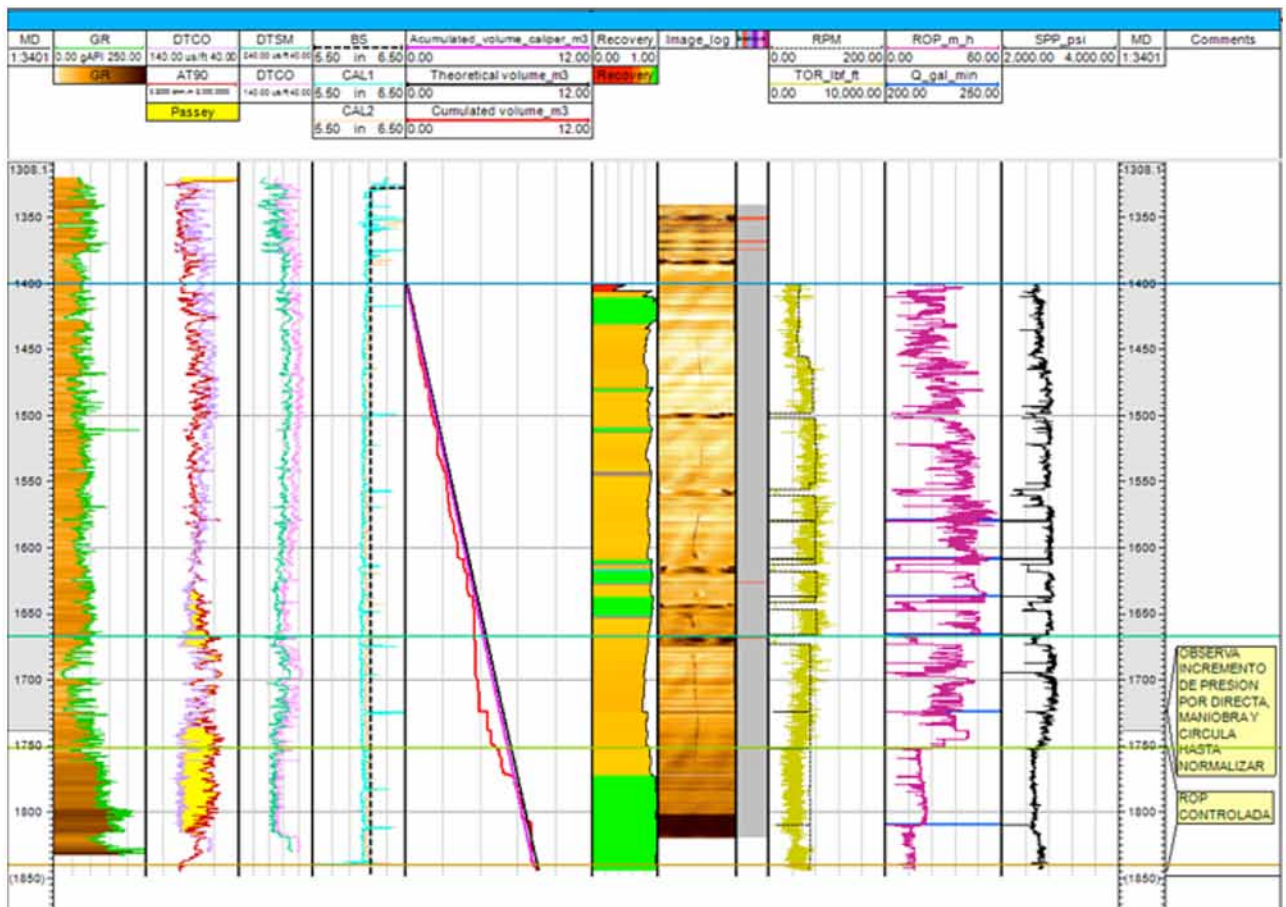


Figura 8. Perfiles de pozo. Track 1: MD, Track 2: gamma Ray, Track 3: cruce de Passey, Track 4: sónico compresional y de cizalla, Track 5: caliper y bit size, Track 6: volumen acumulado teórico, real y por caliper, Track 7: porcentaje de recuperación, Track 8: perfil de imágenes, Track 9: beakouts, Track 10: torque y RPM, Track 11: ROP y caudal, Track 12: presión de stand pipe.

de a 130 m donde la recuperación de *cuttings* disminuyó hasta 80,8% debido a la alta ROP (22,6 m/h promedio, 46 m/h máxima), un caudal de 180 gpm y 50 rpm.

En los metros finales del pozo (Figura 6, Zona 3) la ROP se redujo a 19 m/h promedio, lo que generó un aumento en la recuperación de recortes hasta llegar al 98,1% con respecto al volumen teórico del pozo. Este aumento también estuvo impulsado por un incremento en el caudal de 180 gpm a 270 gpm.

El volumen del pozo medido con el caudalímetro fue comparado, al finalizar la fase, con el volumen obtenido con el perfil de *caliper* registrado. El volumen acumulado final obtenido con ambos métodos difieren en solo un 1% (Figura 7), lo cual sirve como calibración de los resultados obtenidos con el caudalímetro. El *caliper* registrado fue de dos brazos, por lo que la precisión de este a la hora de estimar el área transversal del pozo, con el que luego se calcula el volumen, puede considerarse aceptable.

Por otro lado, se registró un perfil de imagen ultrasónico, en el que se observan muy escasos *breakouts* en zonas puntuales. Esto coincide con lo observado con el caudalímetro, ya que en caso de presentarse colapso de las paredes del pozo, el volumen medido hubiese sido superior al volumen teórico, producto de un incremento en el aporte de material al pozo (Figura 8).

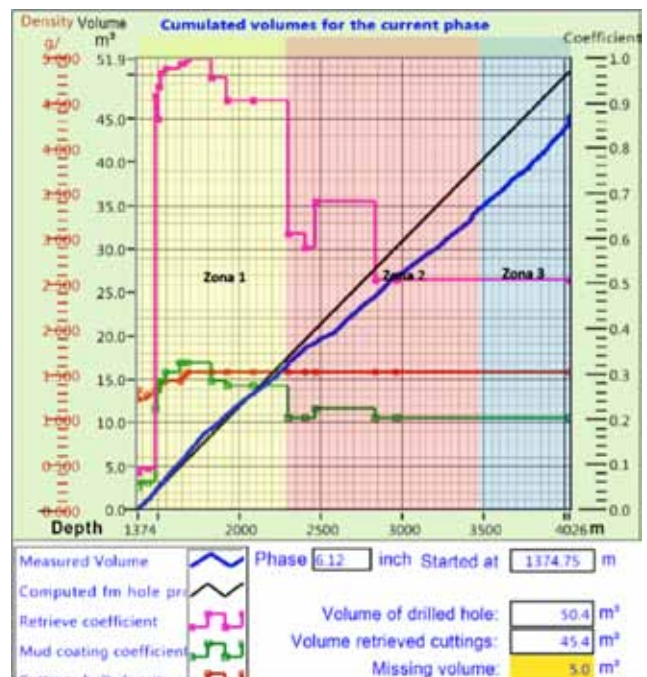


Figura 9. Curva de recuperación de recortes para el tramo horizontal.

En línea con lo expuesto, no se registraron derrumbes durante la perforación y la circulación final del pozo, lo cual fue otro indicio de la estabilidad mecánica del pozo.

Como conclusión de esta etapa, se puede mencionar que la optimización de los parámetros de perforación permitió mejorar en forma significativa la limpieza del pozo, evitando de esta forma la aparición de problemas potencialmente generadores de NPT.

El monitoreo en tiempo real del volumen recuperado, en conjunto con la inspección visual de los recortes

para identificar derrumbes permitió corroborar la estabilidad de pozo y confirmar la ventana de estabilidad.

Pozo horizontal

En este tramo del pozo, así como en el anterior, se pudieron diferenciar tres zonas a partir del perfil de la curva de recuperación de *cuttings*.

Los primeros 920 m (Figura 9, Zona 1) corresponden

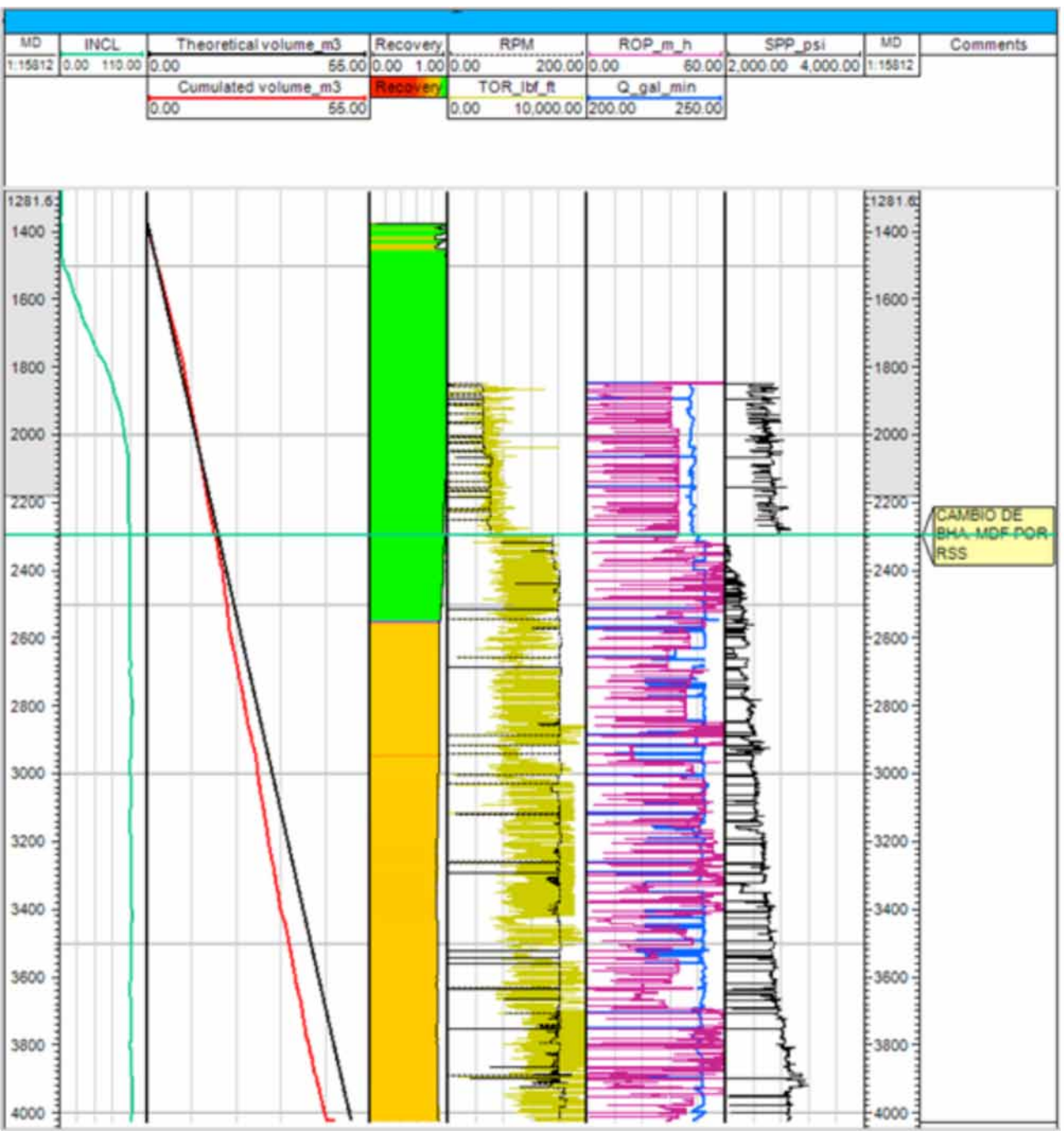


Figura 10. Perfiles de pozo. Track 1: MD, Track 2: inclinación, Track 3: volumen acumulado teórico y real, Track 4: porcentaje de recuperación, Track 5: torque y RPM, Track 6: ROP y caudal, Track 7: presión de stand pipe.

al tramo vertical del pozo, desde el inicio del *sidetrack* hasta el *landing point*. Este sector fue perforado con motor de fondo, con una ROP promedio de 11,39 m/h, 240 gpm de caudal y 50 a 60 rpm. Con estos parámetros se consiguió una excelente recuperación del 95,4% con respecto al volumen teórico.

El aumento del torque, debido al incremento en la inclinación del pozo a partir de los 1770 m, junto con un aumento en la presión de *stand pipe*, y una diferencia entre la ECD medida y la calculada, confirmó un deterioro en la limpieza del pozo, que fue detectado también por el caudalímetro. A partir de los 2300 m (Figura 9, Zona2) se cambió el BHA y se reemplazó el motor de fondo por un RSS. Esto derivó en el aumento de la ROP (37,88 m/h promedio), el cual, acompañado por el mismo caudal (240 gpm) y un aumento en las rpm a 150-160, llevó a una disminución en la recuperación de recortes, que llegó a caer hasta 85,3% del volumen teórico a final de la Zona 2.

Finalmente, en el último tramo del pozo (Figura 9, Zona 3) una disminución en la ROP a 28,79 m/h, con el mismo caudal y rpm de la Zona 2, generó un aumento constante en la recuperación de recortes hasta llegar al 88,9% en el final del pozo.

Al alcanzar la profundidad final, se realizó un viaje de calibre hasta el *landing point* que logró aumentar la recuperación hasta un 90,7%.

Al detectar la disminución de la recuperación de recortes, se propuso circular y repasar una vez cada tres tiros perforados. Esta práctica si bien fue beneficiosa, no permitió una recuperación completa de los recortes.

Por otro lado, las píldoras de limpieza bombeadas durante la perforación del tramo horizontal no mostraron ser eficientes, ya que no aumentaron en forma significativa la recuperación.

Es importante destacar que, dada las características geométricas del pozo, es esperable que parte de los recortes no puedan ser recuperados, por lo que es lógico asumir que la recuperación será menor en un pozo horizontal que en uno vertical. Teniendo esto en cuenta y usando como soporte las observaciones de la curva de recuperación, se sugirió no realizar una segunda carrera de calibre, que estaba programada al llegar a profundidad final. Sin embargo, dada la relevancia del pozo, se decidió hacerla igualmente. La recuperación de recortes en esta última maniobra no aumentó, por lo que se demostró que el uso de este tipo de herramientas es de utilidad para decidir en tiempo real la necesidad de las maniobras planificadas.

Con respecto a la presencia de derrumbes, se observó escasa cantidad durante la circulación final, después del viaje de calibre. De acuerdo con su morfología, estos derrumbes pueden clasificarse como tabulares, y su origen puede estar relacionado a los planos de debilidad producto de la fina laminación de la Fm. Vaca Muerta, o bien por efectos mecánicos de la sarta sobre la pared del pozo.

Por último, en este tramo del pozo no se registraron perfiles, por lo tanto, no fue posible implementar la calibración utilizada en el tramo vertical. Los parámetros

de perforación y curvas de recuperación se muestran en la figura 10.

Conclusiones

En este trabajo fueron presentados los resultados de la aplicación de un caudalímetro de *cuttings*. Al comparar el volumen acumulado medido con esta herramienta con el obtenido a partir de un *caliper* de dos brazos en el pozo piloto vertical, se observó solo un 1% de diferencia entre ambas mediciones, lo cual sirve como validación de las mediciones del caudalímetro.

El análisis de la evolución del volumen de pozo real en función del teórico permitió evaluar la limpieza y la estabilidad del pozo, así como también tomar medidas mitigatorias para solucionar estos desvíos. Las principales conclusiones se resumen a continuación:

- Existe una alta dependencia entre los parámetros de perforación (principalmente ROP, caudal y RPM) y la limpieza del pozo. Se observó que al aumentar la ROP, si no se ajustan los otros parámetros, la recuperación de *cuttings* comienza a disminuir y, si no se corrige, podría conducir a aprisionamientos o dificultades en el movimiento de los tubulares.
- La geometría del pozo condiciona la recuperación final de *cuttings*. El pozo horizontal, por ejemplo, tuvo mayor tendencia a presentar un menor volumen de recortes en superficie, ya que parte de ellos se depositarían por gravedad en la parte inferior del pozo.
- Se propuso repasar el pozo en cada tiro para mejorar la recuperación de *cuttings*, lo cual fue efectivo.
- Las píldoras de limpieza bombeadas durante la perforación del tramo horizontal no mostraron ser eficientes, ya que no aumentaron en forma significativa la recuperación.

Por último, no se registraron evidencias de inestabilidad mecánica en base a las curvas del caudalímetro de *cuttings*, lo cual coincide con las predicciones del modelo geomecánico y con la ausencia de derrumbes observada durante la perforación. No obstante, en caso de existir inestabilidad, esta herramienta podría detectarla, y junto con el análisis morfológico de los derrumbes, se podrían tomar las medidas necesarias para mitigarla y evaluar en tiempo real el resultado de esa inestabilidad.

Agradecimientos

Los autores agradecen a YPF S.A. por la autorización para publicar los datos presentados en este trabajo.

Bibliografía

Varela, R. A. y J. G. Hasbani. "A Rock Mechanics Laboratory Characterization of Vaca Muerta Formation". 51st U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco, California, USA, June 2017.