



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

La estrategia de perforación y selección de herramientas para agujeros superficiales (24" y 17 ½") en pozo exploratorio en el subandino boliviano genera reducción en tiempo operativo

Por **Mario Bertarelli**, **Matheus Vieira** y **Rómulo Durán** (Repsol E&P Bolivia);
Fabio Navas, **Juan Naranjo** y **Grover Orellana** (Halliburton)

Los proyectos de perforación en la región Subandino Sur de Bolivia se ubican en una compleja geología de rocas duras y abrasivas que generan desgastes prematuros de las herramientas de perforación y de las brocas, con el consiguiente desabastecimiento e impacto negativo en la eficiencia de tiempos y costos del proyecto. Este trabajo incluye el análisis de ingeniería y diseño realizado para la selección de componentes y herramientas de perforación, y de las buenas prácticas y resultados obtenidos.

El bloque Caipipendi situado en la región Subandino Sur de Bolivia es un escenario de alta complejidad geológica, debido a la fuerte actividad tectónica, dureza y abrasividad de las formaciones que se encuentran en la zona, principalmente de edades carboníferas y devónicas. Estas condiciones, muy particulares en el ámbito de la perforación, exigen que la planificación de los pozos sea realizada al detalle, con análisis de riesgos a profundidad en la que se considere la gran incertidumbre geológica que se tiene en la zona y el impacto que podría tener en las operaciones de perforación.

Repsol E&P Bolivia, a través de los años, ha acumulado una gran experiencia en la perforación de pozos en el subandino, convirtiéndose en un referente entre las operadoras de la región. Una de las principales razones que han influido positivamente en el buen desempeño durante las operaciones de perforación ha sido la búsqueda constante de implementar nuevas tecnologías en todos los servicios de pozo, pero principalmente en aquellos específicos a brocas y componentes del BHA.

El documento técnico desarrollado explica el proceso de ingeniería seguido y la estrategia de perforación ejecutada en los pozos Boicobo Sur X1 y Margarita 10; también se explican las lecciones aprendidas a cada corrida y cómo el equipo implementó mejoras con la obtención inmediata de resultados positivos.

Como resumen operacional y para explicar brevemente la configuración mecánica de los pozos, se explica a continuación las secciones que comúnmente se tienen en los pozos del subandino:

Casing conductor: se perfora en diámetro de broca de 36" con ensamblaje convencional rotativo y broca tricónica. Esta sección se perfora hasta ~100 m de profundidad.

Casing superficial: se perfora en diámetro de broca de 24" con herramientas direccionales para control de verticalidad. Esta sección se perfora hasta ~1500 m de profundidad como máximo.

Casing intermedio: se perfora en diámetro de broca de 17 1/2" con tecnología direccional para control de verticalidad o desviación de pozo según los objetivos del pozo. Esta sección se perfora hasta ~3500 m de profundidad en función del tope de las formaciones del devónico.

Casing producción: se perfora en diámetro de broca de 12 1/4" con herramientas de fondo para hacer trabajo direccional. Esta sección se perfora normalmente hasta el tope del reservorio con profundidades de hasta ~4500 m de profundidad.

Liner producción: se perfora en diámetro de broca de 8 1/2" normalmente con tecnología de turbina y trépanos impregnados. Esta sección puede extenderse hasta ~6000 m de profundidad.

Este artículo se centra en las secciones de 24" y 17,5". Dichas secciones atraviesan mayoritariamente formaciones del carbonífero muy características por tener una alta dureza, alcanzando picos de hasta 30.000 psi de UCS y con altos valores de abrasividad, generando desgastes fuertes y prematuros tanto en las brocas como en los componentes de los ensamblajes de fondo (BHA).

En este tipo de pozos perforados en el subandino bo-

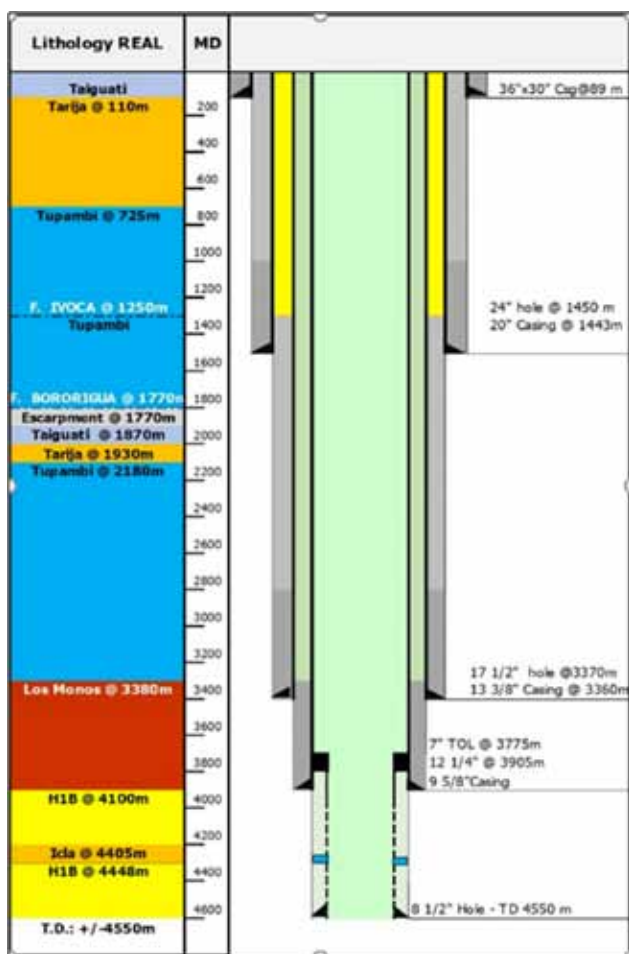


Figura 1. Configuración mecánica general de los pozos en la región Subandino Sur de Bolivia.

liviano, donde los tiempos perforación son mayores a seis meses, es necesario evitar desviaciones en la trayectoria que genere tortuosidades adicionales. Se debe tener especial atención a este punto en los agujeros superficiales (24" y 17,5"), ya que este incrementaría el nivel de complejidad de las secciones más profundas, y aumentaría la dificultad para transmitir los parámetros mecánicos de la perforación con valores de torque y arrastre adicionales, así como también afectaría la integridad de la cañería de producción con elevados desgastes internos por las altas fuerzas laterales y tiempo de exposición a la rotación. Esto conlleva al incremento de costos por el uso de medidas mitigatorias, como los protectores de cañerías y lubricantes adicionales en el fluido de perforación, entre otros.

Sinergia del equipo de trabajo para desarrollar una solución

Los pozos del subandino boliviano se caracterizan por carreras cortas y bajas tasas de penetración, debido a la compleja columna litológica heterogénea que se atraviesa. Con el liderazgo del departamento de ingeniería de Repsol E&P Bolivia, se estableció una metodología de

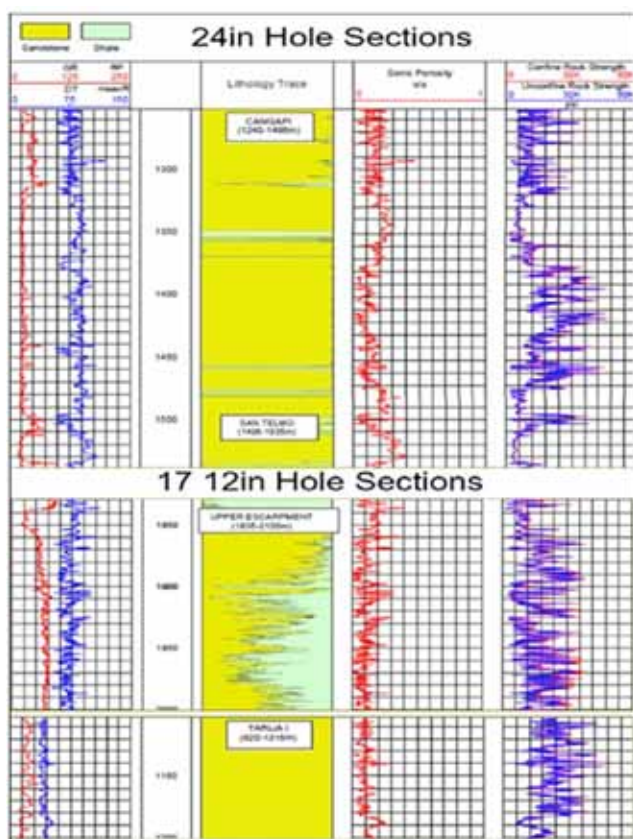


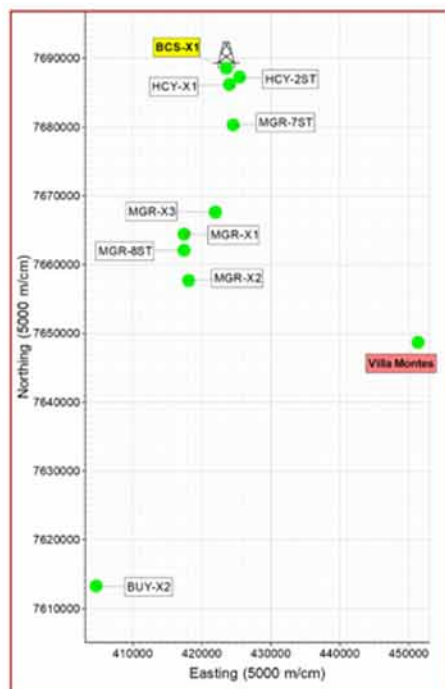
Figura 2. Ambiente de alta compresibilidad de roca (UCS). Independiente de la profundidad, las formaciones del carbonífero en el Subandino Sur de Bolivia tienen una alta dureza, por ejemplo, Fm. Tarija en MGR-4 se encontró a ~1000 m TVD, pero con el UCS en un rango de 15.000 psi a 28.000 psi .

trabajo estratégico donde la empresa operadora colocó objetivos específicos, como reducir el número de corridas, alargar los tiempos de perforación en fondo y mejorar la tasa de penetración (ROP).

Frente a estos objetivos desafiantes, cada línea de servicio involucrada en el proyecto buscó miembros de equipo que sean de alto desempeño y que tengan un buen relacionamiento de equipo, ya que deberían compartir un objetivo en común y trabajar en un ambiente multicultural (eliminar obstáculos y aprender juntos). Frente a esto, cada línea de servicio designó un líder técnico con altas habilidades de comunicación, un grupo de trabajo con experiencia de campo en ambientes hostiles y tecnologías acordes a las exigencias de la operación, además de un equipo de expertos (SMEs) en los niveles regional y global para ayudar en el análisis profundo y detallado de los riesgos y una propuesta sólida de mitigación de estos.

El departamento de ingeniería de Repsol E&P Bolivia suministró una amplia información técnica de los pozos de correlación (Figura 3), así como lecciones aprendidas importantes:

- La necesidad de un diseño de un ensamblaje de perforación robusto, que incluyó tanto herramientas de perforación como brocas.
- No solamente se requería diseñar una broca que perforara rápido, sino que era necesario acompañarla con componentes de perforación resistentes, que permitieran incrementar el tiempo de perforación efectivo en fondo y reducir la cantidad de viajes y el manipuleo de tubulares.
- Un efectivo control de la verticalidad durante la perforación de los agujeros superficiales.
- La correcta selección de parámetros en la perforación de roca dura es diferente a la perforación convencional, por lo tanto se requiere una selección particular de los parámetros que puedan ajustarse según la formación que se esté atravesando. No necesariamente parámetros más agresivos generan mejores resultados en tasas de penetración y metraje para la carrera.



Offset Wells	DIST (Km)	Start Date	Finish Date	Svy	BHA	EOWR	Master Log	Time Log	ASCII Logs	Bit Record	Vib Data
HCY-2ST	2.1	Oct 2015	Jan 2017	x	x		x			x	
HCY-X1 ST	2.7	Jun 2006	Nov 2007	x		x	x		GR	x	
MGR-7ST	8.2	Sep 2013	Mar 2015	x	x	x	x			x	
MGR-X3	21.1	Sep 1999	Feb 2000	x		x	x		GR, sonico	x	
MGR-X1	25.1	Aug 1997	Nov 1998	x		x	x		GR, res, por, dens, sonico	x	
MGR-8ST	27.2	Nov 2013	Jan 2015	x	x	x	x			x	
MGR-X2	31.6	Jan 1999	Nov 1999	x		x	x		GR, res, por, dens, sonico	x	
BUY-X2	77.6	Jul 2017		x	x		x		GR, Vib	x	x

Figura 3. Ubicación de los pozos de correlación y evolución tecnológica.

2015/2020: brocas TRI/PDC; motor de fondo de alto performance; Sistema Rotativo Direccional (RSS) en todas las secciones.

2013/2015: brocas TRI, PDC, híbridas; motor de fondo; Sistemas Rotativo de Verticalización (RSSV); RSS en algunas secciones.

1997/ 2013: brocas TRI; motor de fondo y sartas rotarias en todas las secciones.

- La situación se vuelve más compleja al tratarse de formaciones naturalmente fracturadas (producto del fuerte tectonismo del área) que ocasionan pérdidas de circulación importantes e impactan en el rango de caudales que se puede aplicar durante la operación.

Con esta importante información de los pozos de correlación, las lecciones aprendidas y teniendo en cuenta los objetivos, la metodología de trabajo se desarrolló a través de discusiones técnicas semanales por parte de todo el equipo de trabajo teniendo en cuenta que una solución planteada podría afectar a otra disciplina o línea de servicio. De requerirse, estas discusiones estaban abiertas a una mayor cantidad de sesiones en la semana. Se discutía técnicamente el riesgo, la interpretación de este, sus causas y su mitigación. Estos análisis se realizaban en base a los resultados de los diferentes softwares de última generación con sustento tanto en la experiencia local y global en ambientes con cierta similitud, esto se hizo con cada uno de los riesgos en cada áreas/etapas buscando un espacio y las oportunidades de mejorar la solución del riesgo analizado.

Esta metodología de trabajo se desarrolló en las etapas de planeación y ejecución de cada corrida/etapa correlacionando los resultados obtenidos durante la perforación con el resultado del análisis obtenido de los pozos de correlación y de la etapa o corrida analizada, también cabe resaltar el involucramiento del personal de ejecución de cada una de las áreas y disciplinas.

Desafíos

El histórico de pozos perforados en el Subandino Sur de Bolivia nos muestran un alto nivel de complejidad en la construcción del pozo, por los múltiples viajes de sartas de perforación (BHA) no planificadas en todas las etapas. Los tiempos improproductivos de perforación (NPT) en esta área, básicamente están relacionados con la baja tasa de penetración (ROP) y las múltiples fallas en las herramientas o componentes del BHA, desde desgaste y/o daño prematuro de la broca hasta el equipo de perforación (taladro).

Normalmente, las tres primeras etapas superficiales (36", 24" y 17,5") son planeadas para perforar verticalmente, aunque debido a la incertidumbre geológica, en estos dos pozos perforados (BCS-1X y MGR-10) se replanteó la trayectoria del pozo de manera que se tuvo que realizar el KOP en la etapa de 17,5", lo cual incrementó el nivel de complejidad en la construcción.

Repsol E&P Bolivia estableció objetivos desafiantes, identificando los riesgos y sus orígenes para su posterior gestión, por lo tanto el equipo de trabajo comenzó con el análisis de las lecciones aprendidas y con la realización de una revisión cronológica y detallada de los tipos de tecnología usados en pozos de correlación (Figura 3), así también se analizó los registros de parámetros utilizados tanto en tiempo como en profundidad (Figura 4), el tipo de desgaste de los componentes del BHA; el entendimiento y la discriminación de los tiempos de operación,

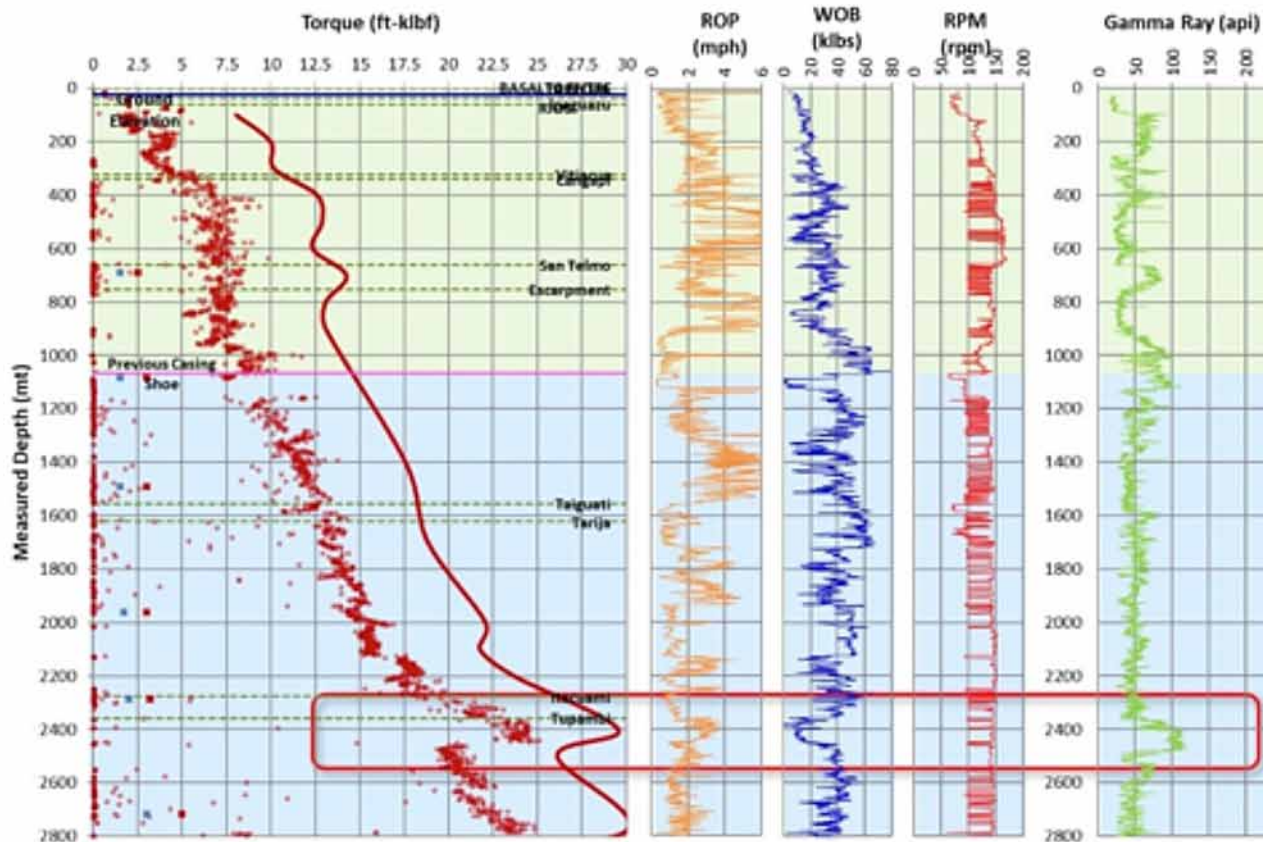


Figura 4. Análisis de registro de parámetros en profundidad de pozos de correlación. ROP variable desde 0., mph a 6 mph/RPM entre 100 a 150 rpm/peso sobre broca de hasta 60 klb. El torque aumenta particularmente en capas arcillosas y existen ciertos intervalos donde la rampa de torque se incrementa anormalmente.

como tiempo en fondo, tiempos de viaje, horas de circulación y también condición de agujero, como limpieza de agujero, presión de poro, caliper y otros.

Algunos de los desafíos encontrados fueron:

- **Incertidumbre geológica y estructural.** Alto nivel de incertidumbre en la definición de los tiempos de tránsito de la sísmica, lo que dificulta una interpretación exacta de plegamientos y posición de las capas por lo que resulta esencial responder rápidamente a cambios de parámetros de perforación y estrategias en el diseño de sargas de perforación.
- **Incertidumbre de la presencia de fallas geológicas y rocas fracturadas.** La presencia de fallas y rocas fracturadas originan pérdida de fluido de perforación en diferentes niveles (parciales, totales), que obliga a manejar cambios hidráulicos y, en consecuencia afecta el manejo del sistema de perforación (es importante que todo el equipo de trabajo conozca las limitaciones del sistema).
- **Alto grado de buzamiento de las formaciones.** Debido al tectonismo del subandino boliviano es común encontrar buzamientos mayores a 30 grados. Con estos altos grados de buzamiento de las formaciones existe facilidad para desviarse de la vertical.
- **Tortuosidades.** Con el afán de realizar correcciones a la trayectoria se generan severidades arriba de lo planeado en 2 °/30 m o mayores y estos ocasionan:
 - incremento del torque y arrastre sobre todo en etapas inferiores,
 - desgaste mecánico del revestimiento causado por la rotación de las sargas de perforación. Este desgaste del revestimiento compromete la integridad del pozo, por eso su monitoreo continuo se vuelve crítico, así como el control de parámetros para minimizarlo (reducción de revoluciones en superficie).
- **Dureza y abrasividad de la formación. Formaciones** intercaladas, fracturadas en algunos intervalos, con valores de compresibilidad desde los 10.000 psi a 30.000 psi; con presencia de diamictita, mineral glasear de alta abrasividad en algunas de estas formaciones. La combinación de parámetros de perforación con la dureza y la abrasividad de estas formaciones generan:
 - Vibraciones
- Aceleradas por diseño inapropiado del ensamblaje de perforación, generando un desbalance de masa.
- Acciones retardadas para identificar los mecanismos de vibración y/o manejo inapropiado de los parámetros de perforación que, en lugar de mitigar, inducen a las armónicas.
 - Desgaste prematuro de la broca y los componentes del BHA, este desgaste se acelera si aparecen vibraciones.
 - Bajo ROP efectivo. Mayor cantidad de viajes para cambio de broca y/o componentes del aparejo de perforación (Figura 5).
- **Número de aparejos de perforación para alcanzar profundidad programada.**
 - Etapa 24": se requiere en promedio 12 ensamblajes de perforación para alcanzar profundidad de revestimiento en el agujero superficial con



Figura 5. Componentes desgastados en pozos de correlación. ROP Perdida de conos de brocas tricónica y desgaste prematuro de los PAD del RSS, debido a formaciones abrasivas.

un metraje ~1300 m.

- Etapa de 17.5": se requiere en promedio 14 ensamblajes de perforación para perforar ~1550 m y alcanzar la profundidad de casing en el agujero intermedio (Figura 6).
- **Agujero ensanchado (alargado).** Caliper muestra que a pesar de la dureza de la formación existen intervalos donde el agujero se encuentra alargado hasta un 20% de su diámetro original, el cual también se convierte en una fuente del desbalance de masa de la sarga de perforación (BHA) y, en consecuencia, en una fuente de vibraciones del tipo remolino (whirl) que afecta el comportamiento del sistema de perforación en diferentes sentidos y el mantenimiento de la verticalidad del pozo.

Al asociar toda esta información con las diferentes formaciones fue posible discriminar y mapear los riesgos de manera objetiva.

Solución personalizada

El trabajo sistemático y la estrategia planteada por el equipo de ingeniería del proyecto, con los objetivos propuestos y la identificación, el mapeo y la determinación de los riesgos operativos; así como las lecciones aprendidas de pozos de correlación y los diferentes análisis y discusiones técnicas con los equipos de expertos locales y globales (SME) permitieron definir una estrategia de perforación en la que se consideraba únicamente brocas PDC, así como el uso de un sistema robusto de perforación vertical con controladores mecánicos no rotatorios (PAD) y acoplado a este sistema, un motor de alto performance como fuente independiente de potencia en fondo. También se identificó la necesidad de usar tres sensores de vibración localizados estratégicamente en la sarga de perforación, donde uno de ellos debía colocarse en la profundidad de la broca, para entender y manejar la dinámica de la perforación a diferentes profundidades del ensamblaje de perforación. Además, se determinó la necesidad de una herramienta PWD con dos sensores de presión, una interna y otra externa, para tener las condi-

N°	DIAM (mm)	TIPO	IADC	TFA	PROP		AV (m)	HORAS HRT	ROP (m/hr)	WOB (klb)	RPM		PRES (psi)	CAUD (gpm)	DENS (ppg)	
					ENTR	SALD					M R	M F				
HCV-25T																
2	24	T11	115	2.08	98.5	102.5	6	8.5	0.71	7-8	40-50	-	810	250	8.80	Escarpment
2RR1	24	T11	115	1.02	102.5	107	4.5	4.4	1.02	6-10	57	57	500	650	8.80	Escarpment
3	24	TCT100DCR	115	0.95	107	395	288	62.3	4.63	40-50	-	91	1700	850	9.00	Escarpment
4RR1	24	TCT100DCR	115	0.95	395	564	169	35.5	4.76	40-50	-	91	1700	850	9.00	Escarpment
5	24	TCT118BODCR	435X	0.95	721	827	106	64.7	1.64	40-60	-	98	1850	890	9.00	Tarja
2RR2	24	T11	115	1.02	827	827	0						850	900	8.80	Tarja
6	24	TCT118BODCR	435X	0.95	827	914	87	65.4	1.33	50-60	-	100	2100	910	9.10	Tarja
6RR1	24	TCT118BODCR	435X	0.95	914	947	33	53.0	0.62	55-65	20	65	1950	890	9.11	Tarja
7	24	TCT118BODCR	435X	0.95	947	1078	131	97.2	1.35	50-68	-	96	2000	870	9.1-9.2	Tarja
8	24	TCT118BODCR	435X	0.95	1078	1172	94	73.6	2.55	40-60	-	95	2150	890	9.20	Tarja
8RR1	24	TCT118BODCR	435X	0.95	1172	1381	209	73.9	2.83	30-65	-	64	2150	880	9.20	Tarja - Escarpment
9	24	TCT118BODCR	435X	0.95	1381	1536	155	60.9	2.55	15-60	-	63	2150	870	9.20	Escarpment
2RR3	24	T11	115	1.02	1536	1536	0			CARRERA CALIBRACIÓN 0 - 30 - 60R						
2RR4	24	T11	115	1.02	1536	1536	0			CARRERA CALIBRACIÓN 0 - 30 - 60R						
MGR-7																
3(U)	24	VD-03MDX	415	1.310	97	103.5	6.0	11.2	0.58	6-8	-	-	350	490	8.80	
4	24	Kymera HP633X	1.353	103.5	586	482.5	135.8	3.55	30-55	-	-	74	1850	930	9.00	
5	24	Kymera HP633X	1.353	586	788.5	202.5	108.1	1.87	40-70	-	-	74	1880	920	9.10	Escarpment - Tarja - Tarja
6	24	Kymera HP633X	1.353	788.5	981	192.5	94.4	2.04	40-55	-	-	74-76	1750	920-950	9.10	Tarja
7	24	Kymera HP633X	1.353	981	1247	266	114.9	2.31	15-55	-	-	72-74	1820	920-950	9.20	Tarja
8(U)	24	GTX-CMG1	115	1.767	REPASO CON BHA 0 - 30 - 60R						45		900	930	9.20	
8RR1	24	GTX-CMG1	115	1.767	REPASO CON BHA 30-60R								960	930	9.20	
MGR-8																
2	26	XR+CPB	115	1.310	98	104	6	9.4	0.64	10	60		160	400	8.60	CANGAR
2RR1	26	XR+CPB	115	1.310	104	133	29	51.0	0.57	10	45		210	400	8.60	CANGAR
2RR2	26	XR+CPB	115	1.310	133	133	0	0.0		0	0		0	0	8.60	CANGAR
2RR3	26	XR+CPB	115	1.310	133	134	1	1.1	0.91	10	50		435	750	8.60	CANGAR
3	26	XR+CPB	115	0.838	134	250	116	19.6	5.92	50		92	1820	860	8.60	ESCARPMENT
3RR1	26	XR+CPB	115	0.838	250	429	179	74.3	2.41	60		86	1700	803	8.90	ESCARPMENT
4	26	XR+CPB	115	0.838	429	655	226	98.0	2.31	55		86	1700	800	9.00	ESCARPMENT
5	26	GS04BCPS	415	0.838	655	708	83	18.9	2.81	80		85	1600	790	9.00	ESCARPMENT
5RR1	26	GS04BCPS	415	0.838	708	840	132	76.2	1.73	50	25	89	1700	830	9.00	ESCARPMENT
6	26	TCT5118BDCR	445	0.861	840	1047	207	55.9	3.71	60	30	92	2120	850	9.00	ESCARPMENT
7	26	TCT5118BDCR	445	0.861	1047	1085	38	10.5	3.62	55	25	89	1780	830	9.00	TARJATI
8	26	GS04BCPS	415	1.227	1085	1122.5	38	73.6	0.52	60	40	80	1490	800	8.90	TARJATI
9	26	GS04BCPS	415	1.227	1122.5	1185	62.5	90.7	0.69	60	12	75	1400	850	9.00	ESCARPMENT
7RR1	26	TCT5118BDCR	445	0.861	1185	1233	48	22.3	2.16	55	20	90	2050	880	9.00	TARJIA
10	26	GS04BCPS	415	1.227	1233	1302	66	76.3	0.60	60	40	72	1650	850	8.90	TARJIA
11	26	GS04BCPS	415	0.942	1302	1319	17	73.6	0.23	60	6	75	1750	900	8.90	TARJIA
2RR4	26	XR+CPB	115	1.310	1319	1319	0	0.0		0	0	0	200	800	8.90	TARJIA
2RR5	26	XR+CPB	115	1.310	1319	1319	0	0.0		0	0	0	200	800	8.90	TARJIA
12	26	XR+CPB	115	0.942	1319	1319	0	0.0		15	0	72	800	600	8.90	TARJIA
12RR1	26	XR+CPB	115	0.942	1319	1319	0	0.0		0	0	0	1550	900	8.90	TARJIA
BUY-X2																
2	24	T11	115	2.08	0	101	101	12.1	6.34	10-15				405		Tarja
2RR1	24	T11	115	2.081	101	127	26	15.16	1.72	15-18				600		Tarja
3	24	TCT100+CR (Bicono)	115T	0.948	127	356	229	71.17	3.22	30-60				850-873		Tarja - Tarja
4	24	TCT118BOD+CR (Bicono)	435	0.948	356	420	64	31.6	2.03	40-50				910		Tarja
2RR2	24	T11	115	2.081	420	487	47	36	1.31	15-18				200-800		Tarja
5	24	K27165(PDC 7 Aleas)	0.928	487	601	334	141.38	2.36	35-48				850		Tarja	
5RR1	24	K27165(PDC 7 Aleas)	0.928	601	991	190	130	1.45	30-45				870-890		Tarja	
6	24	TCT520BODCR (Bicono)	515X	0.948	991	1050	59	47.21	1.25	40-60			900-910		Tarja	
7	24	PK106 (PDC 10 Aleas)	5422	0.959	1050	1134	84	56.54	1.43	40-45			900		Tarja - Escarpment	
8	24	PK106 (PDC 10 Aleas)	5422	0.963	1134	1192	48	53.64	0.89	40-50			910		Tarja - Escarpment	
9	24	TCT520BODCR (Bicono)	515X	0.907	1192	1289	107	74.68	1.43	30-50			920		Tarja - Escarpment	
10	24	TCT118BODCR	435X	0.865	1289	1399	110	57.5	1.91	30-45			910		Tarja	
10	24	TCT118BODCR	435X	0.865	1399	1514	115	53.3	2.16	15-45			900		Tarja	
11	24	T41ADH	415	1.600	1514	1514	0						920		Tarja	
11RR1	24	T41ADH	415	1.600	1514	1514	0						920		Tarja	

Figura 6. Resumen de la cantidad de sarts de perforación (BHA) en etapa de 24" y 17,5".
24": metraje de la etapa:1300 m / # BHA promedio para la etapa: 12 / Peso sobre broca: +60,000 Lb.
17,5": metraje de la etapa: 1550 m / # BHA: 14.

ciones y medir diferenciales de presión, de esta manera entender la potencia generada y consumida por el sistema de perforación; adicionalmente con el sensor externo del PWD poder medir la hidrostática del pozo y ECD para entender condiciones hidráulicas y de limpieza del agujero perforado. Finalmente, para complementar la información generada por geología y acotar, dentro de lo posible, la incertidumbre litológica, se colocó un sensor de rayos gamma para entender y correlacionar los diferentes pases de formación.

Tecnologías y procesos claves en la construcción de la solución personalizada teniendo en cuenta la flexibilidad y la búsqueda de la mejora continua

- Para el diseño de la broca se empleó un método de trabajo sobre el cual se realiza un diseño exclusivo para la aplicación con las siguientes consideraciones: el tipo de roca por perforar, la compresibilidad, la abrasión, la respuesta direccional y los parámetros de perforación, los cuales se plasman en la plataforma de diseño para proceder a revisiones y al análisis de detalle del proceso de manufactura de los trépanos con la mejor tecnología en cortadores para abrasión e impacto disponibles, al igual que la opción de toma de data de vibraciones en la broca en modo memoria (Figura 7).
- El ensamblaje de perforación (BHA) fue diseñado

con un criterio de sistema integrado, teniendo en cuenta las condiciones de perforación y las necesidades específicas del proyecto. Básicamente con el siguiente enfoque:

- Energía necesaria para una destrucción eficiente de la roca. Para ello fue crítico entender e identificar los siguientes aspectos:
- El torque que desarrollaría este nuevo diseño de broca.
- Se seleccionó un motor de alta potencia con elastómeros de última generación de manera que pueda manejar eficientemente estos torques de broca;

24" GT75WOs (7-16mm) 113 Cutters

- Stability focused
- Stega backups in 3 blades
- Straight Nozzles
- Greater cutter density in shoulder
- Step Gauge (5")
- To use in shallower layers

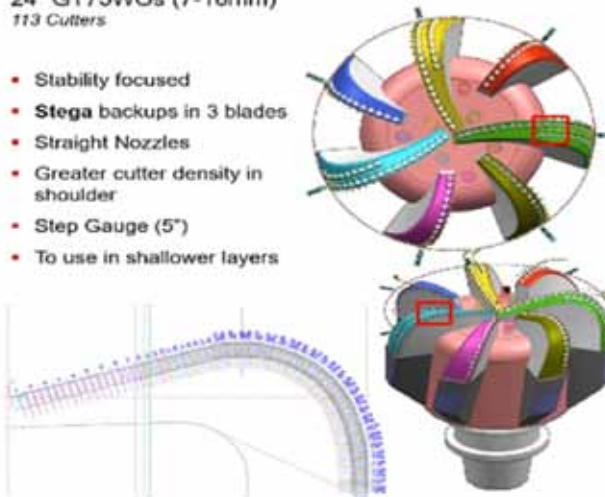
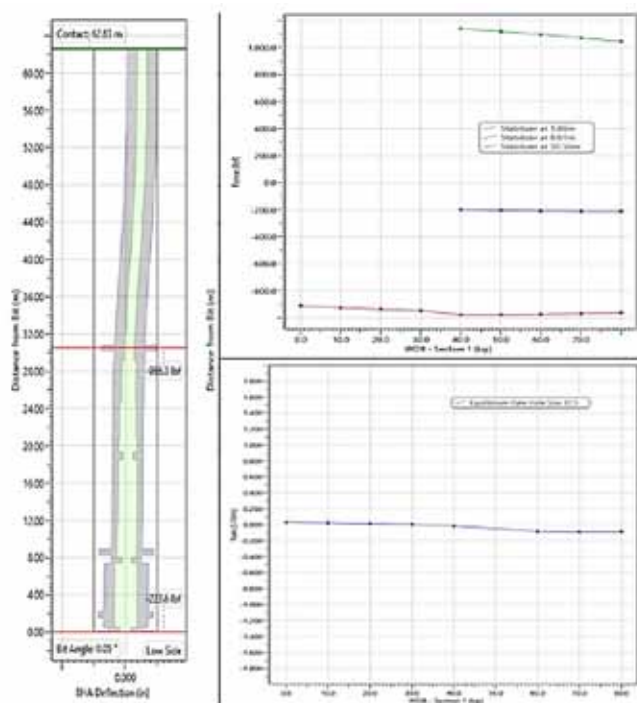


Figura 7. Este es uno de los nuevos diseños elaborados para la etapa de 24" que presentó un excelente desempeño.



también se hizo énfasis en la potencia del sistema de manera que la eficiencia no se comprometa cuando se sea necesario trabajar con cero revoluciones por minuto en superficie, es decir, que se entreguen las revoluciones que la broca necesite para su buen desempeño.

- Las partes de este motor, así como la sección de potencia y secciones de transmisión y cojinetes, debían tener la compatibilidad para reducir riesgos de falla del sistema.
 - Mantener la verticalidad del pozo con baja tor-tuosidad en un ambiente con alta tendencia a desplazarse de la vertical, debido a los buza-mientos mayores a 30 grados presentes, y simul-táneamente buscar durabilidad (mayor tiempo en fondo):
- El sistema seleccionado es una herramienta mecánica que, de manera automática, busca la verticalidad y su durabilidad, es decir, con mínimos desgastes por esfuerzos mecánicos y/o por la abrasión de la formación, este sea resistente a los esfuerzos de corte generados por los nuevos diseños de brocas y de esta manera se realicen menos viajes a la superficie obteniendo así un sistema más durable o de más tiempo en el fondo. Esta herramienta seleccionada cuenta con un sistema interno pendular con capacidad de reaccionar ante variaciones del orden de 0.1 grados de inclinación, así también con un sistema de actuadores de control no rotatorios (PAD no rotatorios). En pozos de correlación utilizaron sistema con actuadores de control rotatorios donde se observan desgastes severos que imposibilitaron la eficiente ac-

tuación en el control de la verticalidad y obligaron a realizar viajes para cambio de componentes y también generaron tortuosidades adicionales al hacer las correcciones de trayectoria.

- Calcular y evaluar los esfuerzos en todos los componentes del BHA para su óptimo diseño. Esto se consigue con un software de última generación que permite calcular con precisión los esfuerzos en los diferentes componentes del BHA, al tiempo que realiza análisis de sensibilidad para definir el impacto sobre una o varias variables, como los diferentes pesos de broca aplicados, y/o en condición de agujero alargado o en condición de desgaste de los diferentes componentes de contacto del BHA, como los estabilizadores. Todo esto para entender los esfuerzos en el BHA y definir su envolvente de manera que no pongan en riesgo la integridad de la sarta y se logre obtener los objetivos del trabajo (Figura 8).
- Otro aspecto crítico fue contar con una tecnología que permita medir en tiempo real la potencia entregada a la broca y para esto el PWD, con sus dos sensores de presión (interno/externo), entregaría un panorama completo de los regímenes hidráulicos desarrollados durante la perforación para entender la potencia del motor de fondo y la masa que esta debería manejar por debajo de la misma (Figura 9).
- La identificación de los diferentes mecanismos de vibración en tiempo real y memoria, entendiendo que cada mecanismo de vibración tiene una cura diferente para lo que se dispuso de tres sensores de vibración en el ensamblaje de fondo (BHA). Asimismo, se preparó al equipo de cam-

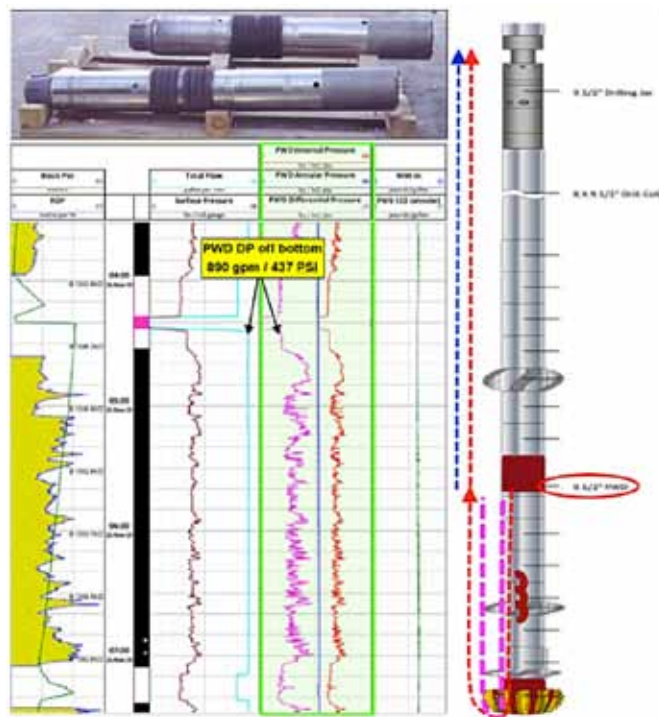


Figura 9. Herramienta PWD con dos sensores de presión. Los dos sensores permiten medir y entender la potencia generada y consumida por el sistema de perforación.

po con entrenamiento riguroso para identificar y actuar eficientemente cuando alguno de estos mecanismos aparecieran.

- Categorizar este trabajo como pozo crítico. Un pozo al ganar el estatus de pozo crítico recibe especial atención y es revisado rigurosamente por el equipo de ingeniería global y SME (Expertos en la materia) para analizar los riesgos y sus métodos de mitigación, y certificar que los cálculos de ingeniería y asunciones sean correctos.
- Para atacar situaciones de pérdida de fluido de perforación se contaba con una válvula multi-ciclo que permitiría manejar rápidamente situaciones de pérdida de fluido de perforación.

Ejecución y mejora continua

La tecnología seleccionada, como la broca, los elementos del ensamblaje de fondo, los sensores, el diseño BHA para la perforación de las secciones de 24" y 17,5", la entrega de parámetros y las acciones rápidas para la mitigación de vibraciones fueron exitosas.

El primer pozo construido fue el BCS-X1 y a su finalización se ejecutó el pozo MGR-10. El proceso de ejecución comenzó con el DWOP donde se revisó con el equipo involucrado, el paso a paso de cada una de las actividades de perforación incluida la bajada de las diferentes cañerías y tiempos planos asociados. En este escenario se realizaron ajustes menores en base a las lecciones aprendidas y las consideraciones omitidas durante la planeación.

La etapa de 36" se ejecutó con ensamblaje (BHA) convencional sin sensores desde superficie hasta +/- 100 m para asentar revestimiento superficial de 30". Posteriormente, se inició la perforación direccional con control de verticalidad para las etapas de 24" y 17,5" con el uso de ensamblaje de fondo (BHA) direccional diseñado para este propósito. Como se comentó, este artículo se centra en las etapas de 24" y 17,5", que mayoritariamente perforan formaciones del carbonífero, que consiste en litologías intercaladas como areniscas conglomeráticas, diamictitas abrasivas con dureza de roca que varían de 10.000 psi a 25.000 psi, con picos de 30.000 psi de UCS.

La ejecución de las etapas de 24" y 17,5", se caracterizó por los siguientes objetivos:

- mejorar la tasa de penetración (ROP),
- reducir el número de corridas por etapa,
- alargar el tiempo de perforación en fondo y
- eficiente control de la verticalidad.

Para cumplir con estos cuatro objetivos de performance, durante la ejecución se hizo énfasis en los siguientes aspectos:

- la selección de parámetros de perforación con la finalidad de maximizar la vida útil de todo el sistema de perforación (incluida la broca) con el mejor ROP determinado por los pozos de correlación y corridas anteriores en una determinada litología. Para este objetivo se utilizó información de parámetros de pozos de correlación, así como litología y composición

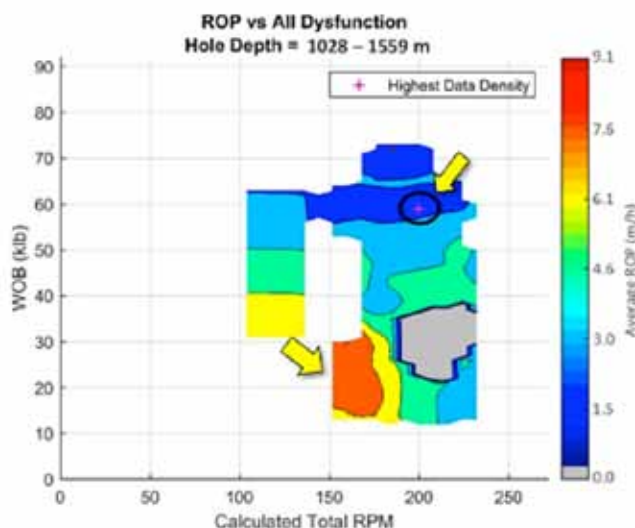
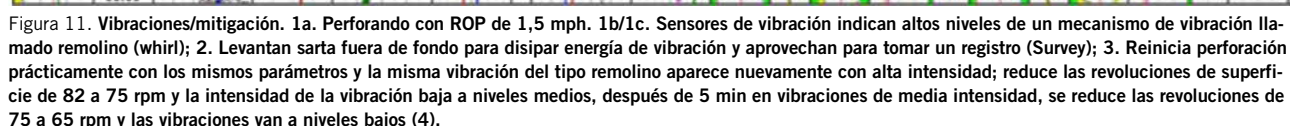


Figura 10. Mapa de calor: muestra que en esta formación y litología los mejores parámetros serían 25 Klb y 170 rpm.

de la roca. Esta información se consolidó a través de mapas de calor generados con softwares especializados que muestran las ROP versus parámetros, que identifican los mejores parámetros para conseguir las mayores ROP de una determinada formación o intervalo específico (Figura 10).

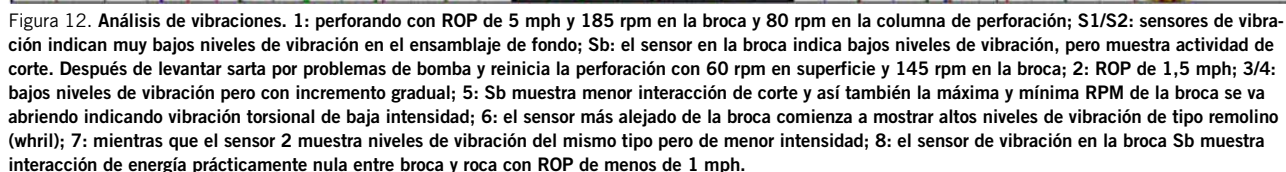
- Mitigación de vibraciones con la identificación e interpretación del mecanismo de vibración obtenidos en tiempo real, el equipo de operaciones (ejecución) actuó oportunamente para mitigar estas vibraciones y de esta manera conseguir la mejora de la transferencia de energía a la estructura de corte de la broca y preservar ensamblaje de fondo, como se ejemplifica en la figura 11, donde se observa a las 22:40 h, en la pista 1 (track 1) una tasa de penetración (ROP) de ~1,5 mph y en este mismo período en las pistas de vibraciones (pista 16) se observan altos niveles de vibración del tipo remolino (whirl). Posteriormente, a las 22:55 h se levanta la sarta de perforación fuera de fondo y este mecanismo de vibración desaparece. Se mantiene broca fuera de fondo por un período de 5 min, al intentar reanudar la perforación con los mismos parámetros anteriores, los altos niveles de vibración tipo remolino vuelven aparecer. A las 23:18 h se reduce las rotaciones de superficie de 85 rpm a 75 rpm, al realizar esta operación los niveles de la vibración tipo remolino se reducen a niveles medios. Posteriormente, a las 23:25 h se realiza una reducción adicional de las revoluciones de superficie a 65 rpm y los niveles de vibración de tipo remolino van para niveles bajos. Así también se observó que el ROP es de 3,8 mph; mientras que con altos niveles de vibración estaban en 1,5 mph, esta acción realizada por el equipo de operaciones crea un beneficio para las operaciones de más del 125% de tasa de penetración aunado la preservación de las herramientas de fondo.
- Monitoreo continuo en la potencia del motor de fondo por medio de la lectura de la diferencial de presión del PWD (presión interna y externa).



lecciones aprendidas que permitan seguir mejorando los objetivos marcados por Repsol E&P Bolivia.

Uno de los criterios establecidos desde la planificación fue identificar oportunidades de mejora durante la ejecución de cada corrida a través del análisis de perforación con datos en tiempo real y memoria; y así tener

Análisis de vibraciones. Se realizaron estudios de dinámica de perforación con datos de los tres sensores de vibración colocados en el ensamble de fondo



(BHA), para tener una mejor comprensión de la fuente y el mecanismo de excitación del sistema. Los sensores de vibración miden las fuerzas que están actuando en el BHA al igual que las revoluciones por minuto en donde se encuentra localizado el sensor. En la figura 12 (líneas abajo), en la primera pista, se muestra la tasa de penetración en amarillo oscuro, misma que lee una ROP promedio de 5 m/h; en la siguiente pista, se muestran las RPM entregadas por el equipo (en púrpura) y también las RPM leídas por el sensor de vibración ubicado en la barrena (en rojo); mientras las RPM de la superficie están a 80 rpm, la broca gira a 185 rpm; en esta condición de perforación, ambos sensores de vibración ubicados en el LWD detectan niveles muy bajos de vibración, mientras que el sensor de vibración ubicado en la broca muestra vibraciones de baja intensidad pero con algunos picos que indican la interacción entre broca y roca. Luego de levantar el BHA del fondo con una reducción de las RPM en superficie y el caudal, se ve una consecuente reducción de las RPM en la broca. Se vuelve al fondo para reanudar operaciones de perforación con 60 rpm en superficie y 145 rpm en la broca, observando una ROP de 2 mph, los sensores de vibración en el LWD muestran bajos niveles de vibración y el sensor de la broca muestra menores picos que antes, luego de unos 15 min, los sensores en el LWD empiezan a registrar vibraciones tipo remolino (*whirl*) de baja intensidad, que se incrementan

gradualmente a niveles mayores, mientras que el sensor de la broca muestra que no hay interacción entre los cortadores y la formación, y se obtienen ROP de alrededor de 1 mph. Este análisis muestra claramente la influencia de las rpm en el ROP; donde en una misma formación oscila entre 5 mph y 2 mph por reducción de las rpm en la broca; también muestra que los 60 rpm de superficie excitan al sistema de forma negativa, generando vibraciones de alta intensidad del tipo remolino (*whirl*). Este tipo de vibración en la sarta de perforación compromete la entrega de energía a la broca y esto muestra el sensor de fondo con niveles de vibración prácticamente nulos indicando muy poca interacción entre los cortadores y la formación.

Influencia del caudal en el control de la trayectoria. Analizando las lecturas de presión interna del PWD se comprendió que el porcentaje de pérdida de fluido en el sistema de perforación fue mayor de lo esperado. Así también en áreas de pérdida parcial de circulación es necesario trabajar con menor caudal, por lo que la fuerza en los actuadores de control no rotatorios (PAD) del sistema de accionamiento se ve comprometida. Al calcular el porcentaje de flujo que se pierde, debido a la lubricación interna del sistema de perforación con el peso aplicado en la broca (WOB) y también con la variación de flujo que maneja el equipo de operaciones

CABLES DE ACERO
ESLINGAS
ACCESORIOS

Crosby® Distribuidor oficial
para Argentina y Brasil



American Petroleum Institute
API Monogram. License 9A-0018.



(5411) 4469-8100
www.iphglobal.com

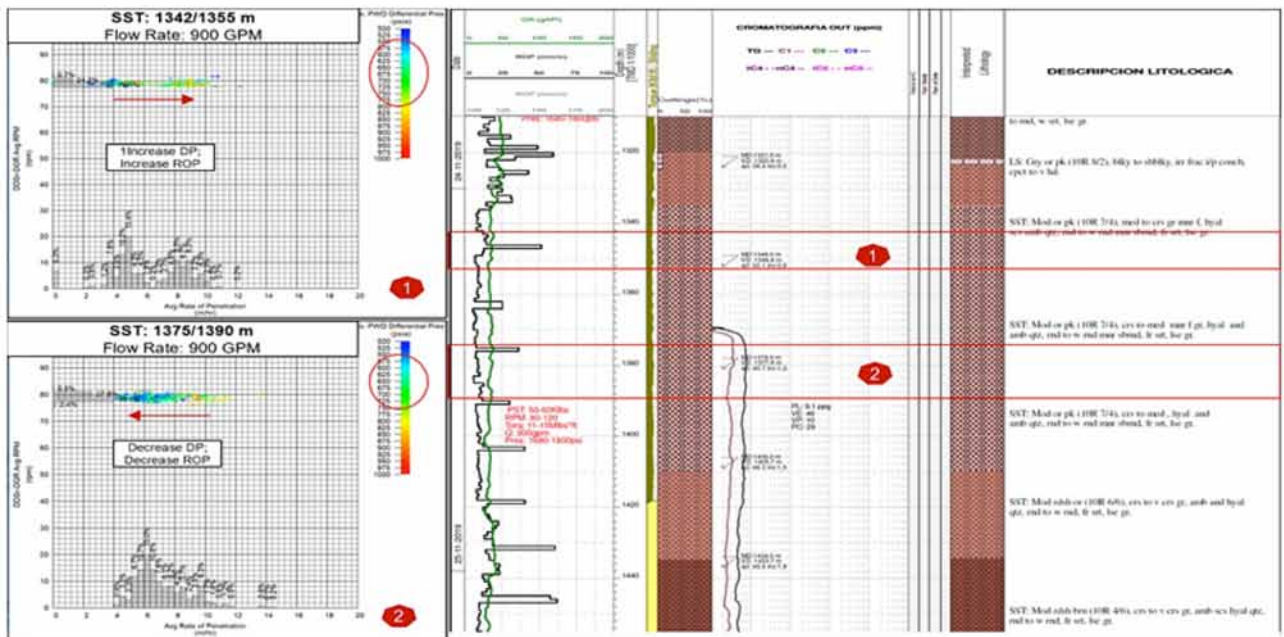


Figura 13. Análisis-Mejora continua: análisis realizados en los intervalos 1 y 2, en una misma formación/litología se observa diferente ROP, a causa de la presión diferencial obtenida debido al PSB de la sección de potencia del motor de fondo.

en situaciones de pérdida de fluido, se hacen necesarios ajustes para garantizar el buen control direccional de la herramienta. Estos análisis nos llevaron a conclusiones, como la necesidad de utilizar restrictores en la herramienta de perforación y también a regular el TFA de la broca. Entonces, al comprender la influencia del peso sobre la broca (PSB) en el flujo derivado, debido a lubricación del sistema de perforación y también a la necesidad de utilizar menor caudal en formaciones con pérdidas de circulación, permitió hacer modificaciones en el BHA y así mejorar la tasa de penetración y el control de la verticalidad incluso en áreas de pérdida de circulación.

Mejora de la tasa de penetración. Como se muestra en la figura 13 líneas abajo abajo se realizó un estudio de la influencia del peso sobre la broca (PSB) en la tasa de penetración (ROP). Analizando eventos de ROP en una misma formación/litología y al mismo caudal; se seleccionaron dos intervalos con diferentes ROP. Al analizar la presión diferencial del PWD a través de gráficas, la conclusión para esta formación/litología fue que con un aumento de presión diferencial del motor en la sarta de perforación (BHA) o un aumento de peso sobre broca (PSB), la tasa de penetración (ROP) también aumenta.

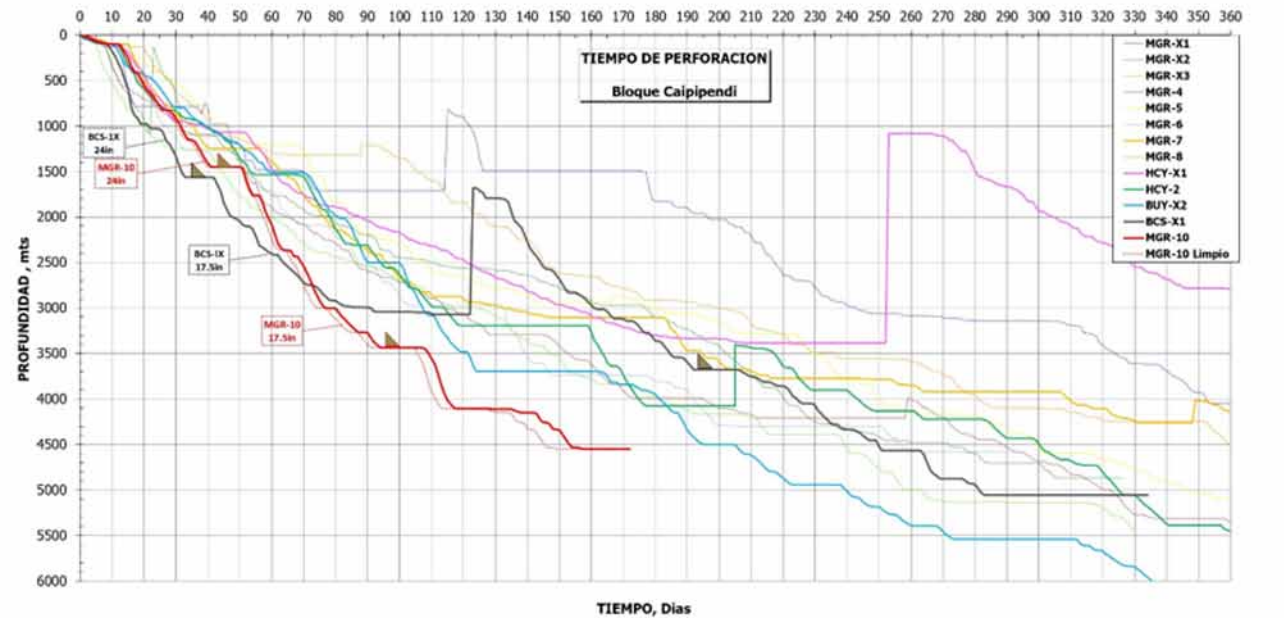


Figura 14. Tiempos de perforación de pozos en la región Subandino Sur de Bolivia.

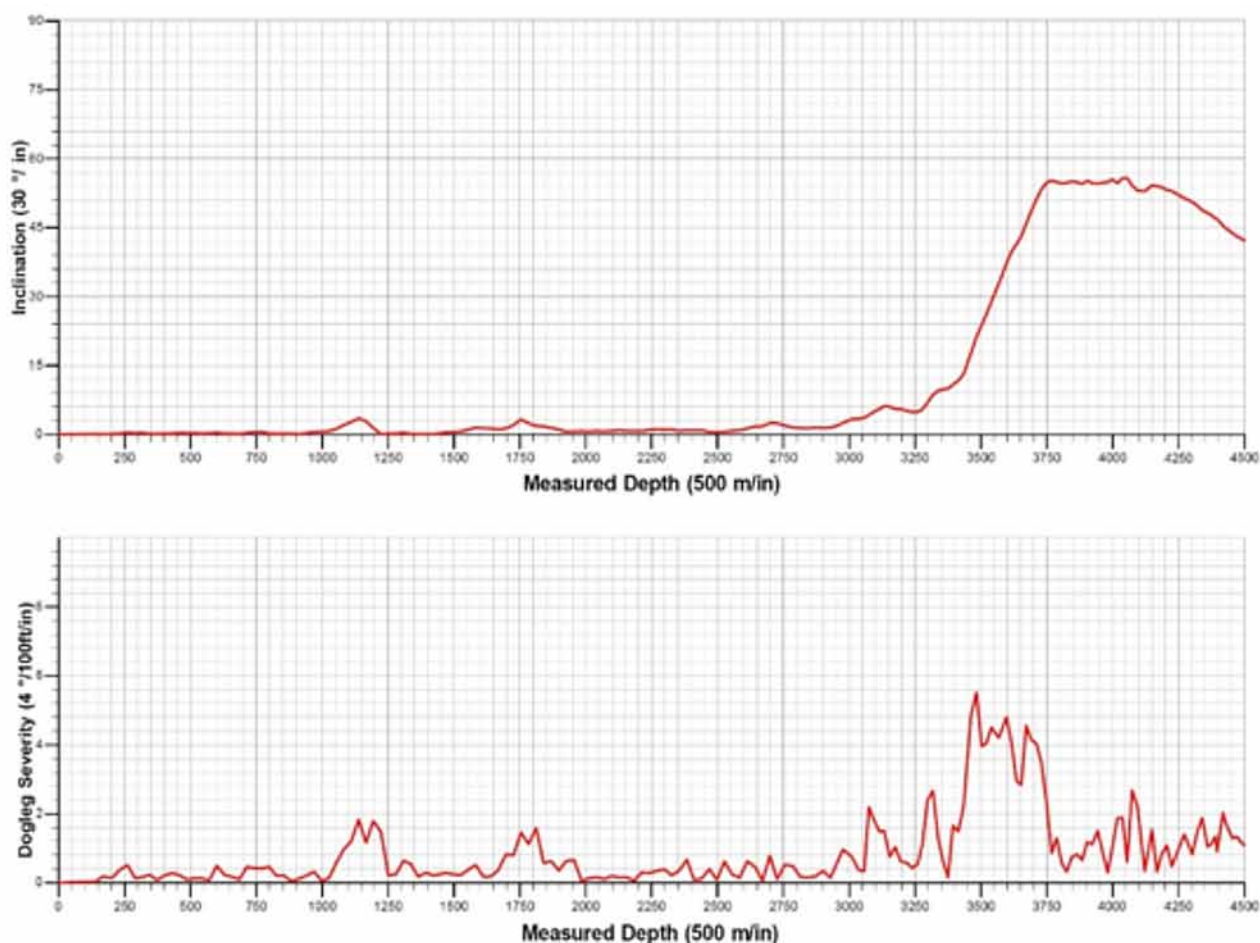


Figura 15. MGR-10: gráficas Profundidad y Medida versus Inclinación y Severidad (DogLeg Severity).

Las lecciones aprendidas que no pudieron ser aplicadas de forma inmediata en las siguientes corridas, se planificaron con más tiempo de trabajo para el siguiente pozo. A continuación, se mencionan algunos de los ajustes realizados para el pozo de la campaña el Margarita-10.

- Brocas: se realizaron ajustes en términos de configuración, tipo de cortadores, acción de corte de la estructura primaria y otros adicionales, como resultado se lograron brocas ajustadas a la aplicación, con el objetivo de mejorar el desempeño (Metraje perforado/ROP). Esto cobraba aún más importancia al considerar que las formaciones superficiales para este pozo eran aún más exigentes en dureza y abrasividad que las del pozo anterior.
- Sistema de perforación: se reforzó la protección de los estabilizadores de sarta, contribuyendo de esta manera a incrementar el tiempo en fondo en un 5% comparado con corridas similares.

Resultados

Los resultados obtenidos en las secciones de 24" y 17,5" para estos proyectos marcan un hito en el desempeño de la construcción de pozos nunca antes logrado en la región Subandino Sur de Bolivia (Figura 14).

Los objetivos desafiantes, como el control eficiente

de la verticalidad del pozo, mejorar la tasa de penetración, reducir el número de corridas por sección de pozo y optimizar el tiempo de perforación en el fondo se lograron con éxito.

La capacidad del sistema de perforación seleccionado para mantener la verticalidad en este entorno complejo con fuertes tendencias de desviación natural (buzamientos de más de 30 grados), en situaciones en las que fue necesario hacer una corrección de inclinación suave del pozo para evitar altas fuerzas laterales, debido a la alta tortuosidad se logró con éxito (Figura 15). La inclinación y los niveles de tortuosidad alcanzados estuvieron dentro de los límites establecidos, manteniendo baja inclinación en la parte vertical del pozo con mínima tortuosidad.

De la información de los pozos de correlación

Sección de 24": el número promedio de ensamblajes de fondo (BHA) para perforar alrededor de 1300 m y alcanzar la profundidad del revestimiento fue del orden de 12 BHA.

Sección de 17,5": con un metraje promedio de 1550 m, el número de BHA utilizados para alcanzar la profundidad del revestimiento fue de 14 en promedio.



Los resultados obtenidos en estos dos pozos BCS-1X y MGR-10 son los siguientes (ver figuras 17 y 18).

En la sección de 24" se terminó con 3 ensamblajes (BHA) y dos brocas (una broca se repitió; el rendimiento de la segunda corrida se debió a problemas externos a las actividades de perforación). También se logró la carrera

más larga, de 822 m con un mismo ensamblaje y con un ROP promedio de 4,78 mph. En la sección de 17,5" también se logró la corrida más larga en el campo que fue de 769 m con un mismo ensamblaje y una ROP promedio de 3,4 mph.

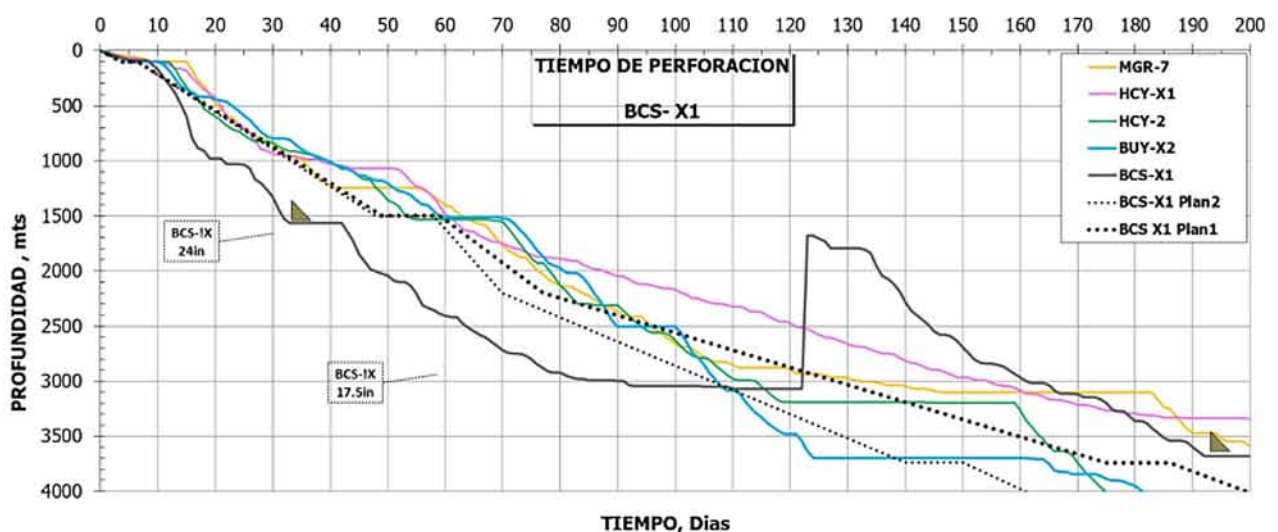


Figura 16. BCS-X1/Tiempos de perforación: En la etapa de 24in de este pozo se alcanzaron importantes eficiencias, la sección terminó 19 días antes de lo programado y 30 días antes del pozo BUY-X2, uno de los mejores pozos perforados donde también se utilizó tecnología RSS y brocas PDC.

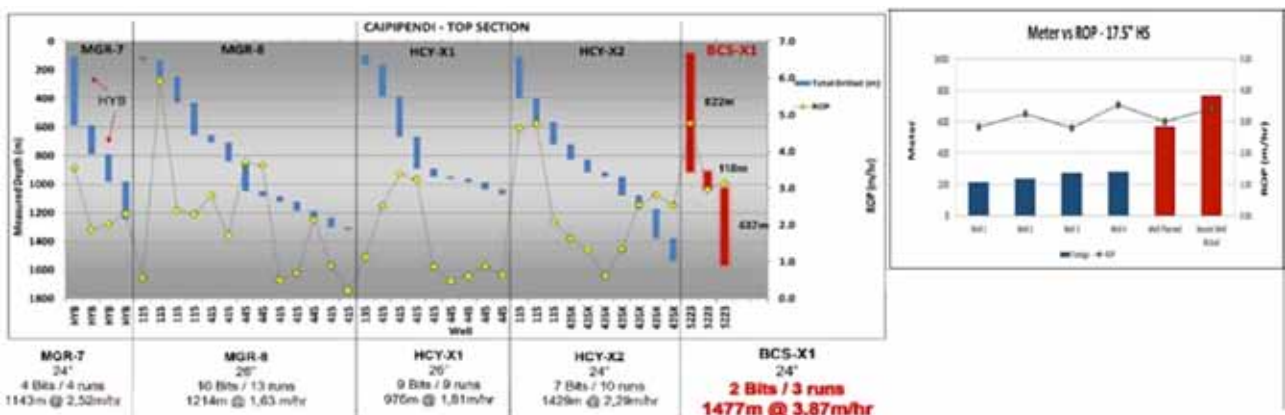


Figura 17. BCS-X1: información estadística de eficiencias tanto para las etapas de 24" y 17,5".

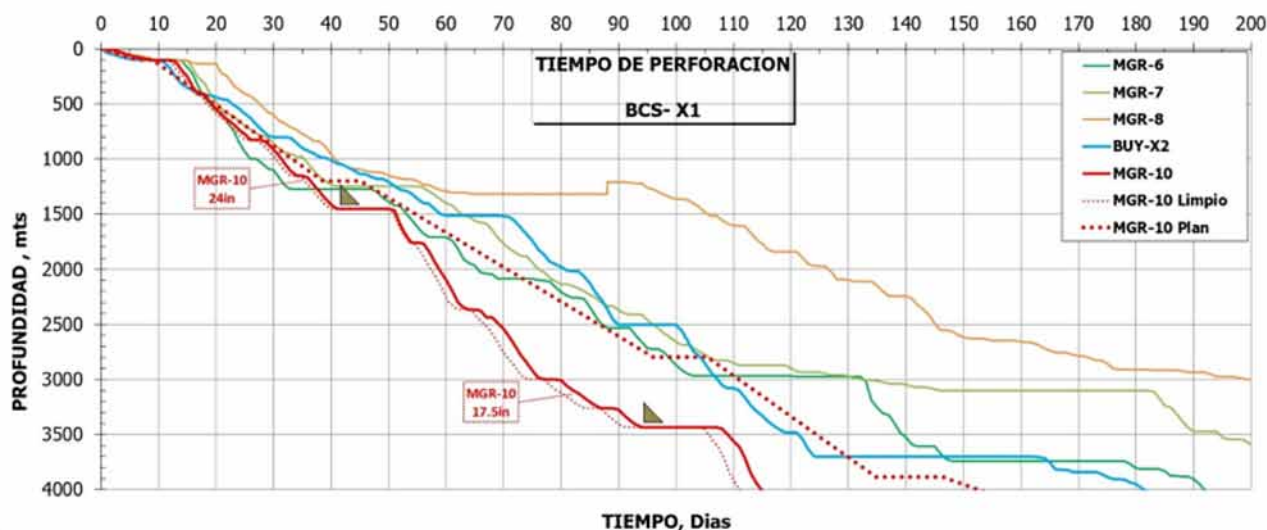


Figura18. El pozo MGR-10 terminó las secciones de 24" y 17,5" más de 20 días antes de lo planeado, convirtiéndose en esta profundidad en el mejor pozo del campo. Esto fue debido a la optimización en la cantidad de ensamblajes utilizados y en las excelentes ROP obtenidas. La sección de 17,5" se realizó con 5 ensamblajes (BHA), se obtuvo una ROP promedio de 3,39 mph y un total de 1985 m.

Conclusiones

El buen desempeño experimentado en los pozos Boicobo Sur X1 y Margarita 10 estableció un nuevo punto de referencia de performance en el ambiente de perforación de la región Subandino Sur de Bolivia tanto para la empresa operadora Repsol como para otras operadoras del área.

Los objetivos establecidos por Repsol E&P Bolivia en las secciones superficiales fueron alcanzados exitosamente. La introducción de nuevas tecnologías, específicamente diseñadas para este entorno desafiante de perforación, probó una vez más que genera resultados positivos. El equipo altamente competente que actuó durante la planificación y ejecución, así como las tecnologías seleccionadas de brocas y ensamblaje de fondo, fueron acertadas. El complejo escenario para la construcción de pozos en este ambiente extremo de alto tectonismo, rocas muy duras y abrasivas y gran incertidumbre geológica requiere mucho énfasis en la fase de planificación de los proyectos, cubrir múltiples escenarios posibles, identificar riesgos operativos y desarrollar soluciones específicas desde una visión integral.

La ejecución de las operaciones se vio afectada positivamente por el trabajo en el diseño de los componentes del BHA, no solo por la reducción de tiempos de perforación que genera un impacto positivo en los costos del proyecto, sino también en los servicios de soporte logístico, en los que se requirió menor preparación de herramientas, repuestos, transporte terrestre y manipulación en locación. Es de destacar la capacidad que mostró el equipo para adaptarse a los cambios e implementar de forma inmediata las lecciones aprendidas que se iban adquiriendo durante las operaciones, que permitió aplicar modificaciones sobre la marcha y garantizar los mejores resultados para el proyecto.

Los proyectos del subandino boliviano tienen condiciones de perforación muy difíciles y llevan asociados tiempos de perforación y costos muy elevados. Sin embargo, mediante la planificación detallada y apostando

al desarrollo y la aplicación de nuevas tecnologías, se demostró que es posible mejorar notablemente los desempeños históricos de la región y alcanzar resultados cada vez mejores. Esto representa una oportunidad muy importante para las operadoras del país, para darle competitividad al sector hidrocarburos y reflotar proyectos estratégicos en el área gasífera.

Glosario

En la industria contamos con acrónimos provenientes del inglés, que permiten identificar una acción, una condición o una herramienta. En este documento hemos citado varios acrónimos que especificamos a continuación:

BHA: Bottom Hole Assemblie (sarta de perforación); **PDC:** Polycrystalline Diamond Compact (broca compacta de diamante policristalino); **RSS:** Rotary Steerable System (Sistema Giratorio Direccional); **PAD:** parte de la herramienta que presiona firmemente (hace contacto) con la pared del pozo, en su mayoría son de forma rectangular y el contacto con la pared del pozo, puede ser por períodos cortos (menores a un segundo) o largos (mayores a un segundo); **ROP:** Rate Of Penetration (tasa de penetración); **UCS:** Unconfined Compressive Strength (Resistencia a la compresión); **PWD:** Pressure While Drilling (Presión durante la Perforación); **LWD:** Logging While Drilling (Registros mientras se Perfora); **TFA:** Total Flow Area (Area Total de Flujo); **DWOP:** Drill Well On Paper (Perforación del Pozo en Papel); **WHIRL:** Remolino (es un tipo de vibración); **KOP:** Kick Off Point (Punto de salida al ejecutar una desviación del pozo); **NPT:** Non Productive Time (Tiempo No Productivo); **SME:** Subject Matter of Expert (Expertos en la materia).

Agradecimientos

Agradecemos a Repsol y Halliburton por permitir la utilización y publicación de sus datos y por su incansable empuje para exigir y alentar a terminar este documento.