

EVALUACIÓN TÉCNICA Y FINANCIERA DEL MEJORAMIENTO EN LA
CALIDAD DEL HUECO MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE BROCAS CON
CALIBRE EXTENDIDO EN LA FASE DE 12 ¼" EN EL CAMPO CASTILLA

JUAN FELIPE DÍAZ GONZÁLEZ
CRISTIAN CAMILO IGUAVITA AMADO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ D.C
2018

EVALUACIÓN TÉCNICA Y FINANCIERA DEL MEJORAMIENTO EN LA CALIDAD
DEL HUECO MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE BROCAS CON CALIBRE
EXTENDIDO EN LA FASE DE 12 ¼" EN EL CAMPO CASTILLA

JUAN FELIPE DÍAZ GONZÁLEZ
CRISTIAN CAMILO IGUAVITA AMADO

Proyecto integral de grado para optar el título de
INGENIERO DE PETRÓLEOS

Director
CAROLINA QUINTERO MONTOYA
Ingeniera de petróleos

Asesor
Leandro Uriel Gómez Barbosa
Ingeniero de petróleos

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ D.C
2018

NOTA DE ACEPTACIÓN

JORGE ANDRES TOVAR

LAYDY MORA

IVAN PEÑALOZA

Bogotá, mayo del 2018

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro:

Dr. JAIME POSADA DÍAZ.

Vice rector de Desarrollo y Recursos Humanos:

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA.

Vice rectora Académica y de Posgrados:

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS.

Secretario General:

Dr. JUAN CARLOS POSADA GARCÍA-PEÑA

Decano Facultad de Ingenierías:

Dr. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI.

Director Programa Ingeniería de Petróleos:

Dr. JOSE HUMBERTO CANTILLO SILVA

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Éstos corresponden únicamente a los autores.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de grado está dedicado a mis padres Jaime Eduardo Diaz Cárdenas y Gloria González Urrego que me apoyaron desde el principio y en los momentos más difíciles de mi carrera, que inculcaron en mi la tenacidad necesaria no solo para culminar mi pregrado sino para sobrellevar los desafíos que la vida me presente, y que me brindan con cariño su consejo y experiencia cada vez que lo necesito.

Le doy las gracias a mis hermanas, Natalia y Valeria, que estuvieron siempre atentas al progreso del proyecto con la mejor disposición. A mi novia Catalina Ortega que me otorgó su apoyo incondicional durante el pregrado, que me ha acompañado en los momentos más importantes de mi vida y que siempre ha estado a mi lado para celebrar los triunfos y superar las dificultades.

Agradezco a la familia Iguavita Amado que procuró ofrecer el mejor ambiente de trabajo, a Elizabeth Amado Moreno que nos acogió en su casa con los brazos abiertos en tantas veladas de arduo trabajo y al ingeniero Orlando Iguavita Gonzalez que nos proporcionó sus conocimientos técnicos y nos facilitó su apoyo desde el principio.

A mi compañero Camilo Iguavita Amado con el que compartimos las preocupaciones y las metas alcanzadas no solo durante el desarrollo de este trabajo sino en nuestra vida colegial y universitaria, le ofrezco mi agradecimiento por su apoyo incondicional y por el aporte que significa su amistad a mi como persona.

Y por último agradezco a la ingeniera Carolina Quintero y al ingeniero Carlos Dossman por su paciencia y colaboración técnica que permitió llevar a feliz término el trabajo, y en general a la empresa Ulterra que suministro la información necesaria y los recursos técnicos usados en el desarrollo del presente trabajo.

Juan Felipe Diaz González.

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia quiero agradecer a Dios por brindarme esta oportunidad, acompañada de salud, paciencia y sabiduría para llegar al día en el que sea profesional.

Quiero agradecer en gran medida a mi familia, a mi madre Elizabeth Amado M. por estar presente en los momentos más felices y los más duros de este trabajo, a mis hermanos Valentina y Daniel por su interés, preocupación, abrazos y apoyo de mil maneras en los momentos más difíciles del trabajo, y a mi padre Orlando Iguavita G. por su apoyo tanto moral como técnico en las múltiples dudas que surgían constantemente durante el desarrollo del trabajo. Adicionalmente a mi novia Paola Vesga R. y a su familia por siempre brindarme su apoyo, dándome aliento para continuar y llegar al punto en el que me encuentro en este momento.

A mi compañero Juan Felipe Diaz González por estar conmigo superando cada uno de los obstáculos presentados al inicio, durante y al final del desarrollo de este cumulo de ideas que presentamos en este trabajo. Igualmente, a la familia Diaz González que me brindaron un lugar agradable donde el trabajo se hacía muy ameno.

Finalmente, a los ingenieros Carolina Quintero y Carlos Dossman por disponer de su tiempo para atendernos y explicarnos con la mejor disposición, formando en mí una postura crítica frente a los problemas presentados; adicionalmente ampliando mi visión por múltiples enfoques y así tener una respuesta mucho más acertada. A la familia Ulterra por siempre brindar una mano de ayuda al trabajo que me permite aspirar al título de ingeniero de petróleos.

Cristian Camilo Iguavita Amado

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	26
OBJETIVOS	27
1.GENERALIDADES DEL CAMPO	28
1.1 ANTECEDENTES DEL CAMPO	28
1.2 LOCALIZACION DEL CAMPO	29
1.3 MARCO GEOLOGICO	30
1.3.1 Estratigrafía	30
1.3.2 Geología estructural	35
1.3.3 Geología del Petróleo	36
1.4 HISTORIA DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO CASTILLA	36
1.5 MÉTODOS DE PRODUCCIÓN	37
1.6 NUMERO DE POZOS	37
1.7 CARACTERISTICAS DEL YACIMIENTO	38
2.DISEÑOS DE LAS BROCAS 12 ¼" DE ULTERRA CON CALIBRE DE 2.5" Y 4" EMPLEADAS EN EL CAMPO CASTILLA	40
2.1 COMPONENTES TEORICOS DE PERFORACION	40
2.1.1 Tipos de brocas	41
2.1.2 Hidraulca de perforación	56
2.1.3 Clasificación de desgaste para las brocas según la IADC	59
2.1.4 Motores de fondo y herramientas rotatorias (rss)	62
2.2 DISEÑO DE LA BROCA U519S 12¼" DE ULTERRA™ CON CALIBRE DE 2.5" Y 4"	69
2.2.1 Diseño de la broca con calibre de 2.5"	70
2.2.2 Diseño de la broca con la broca de 4"	71
2.3 CORRIDAS EN EL CAMPO CASTILLA CON EL DISEÑO DE BROCA U519S 12 ¼" DE ULTERRA™ CON CALIBRE DE 2.5" Y CALIBRE DE 4"	73
2.3.1 Broca de Uletra con calibre de 2.5"	74
2.3.2 Broca de Ulterra con calibre de 4"	77
3.NUEVO DISEÑO DE BROCA 12 ¼" DE ULTERRA™ CON CALIBRE EXTENDIDO CON SU RESPECTIVO BHA	81
3.1 NUEVO DISEÑO DE BROCA DE 6" EN EL GAUGE PAD	81
3.1.1 Diferencias entre los diseños de brocas anteriores y el nuevo diseño.	81
3.2 BHA CORRESPONDIENTE A LOS POZOS DONDE SE IMPLEMENTO EL DISEÑO DE ULTERRA CON CALIBRE DE 6"	83
3.2.2 Castilla 216	84
3.2.3 Castilla 226	85
3.2.4 Castilla Norte 281	87

4.IMPLEMENTACIÓN DEL NUEVO DISEÑO DE BROCA POLICRISTALINA CON CALIBRE EXTENDIDO DE 6" EN LA SECCIÓN DE 12 ¼" DEL CAMPO CASTILLA	89
4.1 POZO CASTILLA 216	89
4.2 POZO CASTILLA 226	103
4.3 POZO CASTILLA NORTE 281	118
5.ANALISIS DE LA PRESENCIA DE FENOMENOS VIBRACIONALES EN LA BROCA POLICRISTALINA DE CALIBRE EXTENDIDO IMPLEMETADA EN LA SECCION 12 ¼" EN EL CAMPO CASTILLA	132
5.1 VIBRACIONES	132
5.2 ENERGÍA MECÁNICA ESPECÍFICA (MSE)	136
5.3 ANÁLISIS CUALITATIVO Y CUANTITATIVO DE LA POSIBLE PRESENCIA DE FENOMENOS VIBRACIONES DURANTE LA CORRIDA DEL NUEVO DISEÑO CON CALIBRE DE 6"	139
5.3.1 Castilla 216.	139
5.3.2 Castilla 226	149
5.3.3 Castilla Norte 281	159
5.4 COMPARACION DE LA POSIBLE PRESENCIA DE FENÓMENOS VIBRACIONALES	166
5.4.1 Análisis cualitativo	167
5.4.2 Análisis cuantitativo	171
6.EVALUACION DE DESEMPEÑO DEL NUEVO DISEÑO DE LA BROCA POLICRISTALINA CON CALIBRE EXTENDIDO DE 6" CON LAS BROCAS DE CALIBRE DE 2.5" Y 4" EN LA SECCIÓN 12 ¼" EN EL CAMPO CASTILLA	175
6.1 CASTILLA 216	175
6.2 CASTILLA 226	177
6.3 CASTILLA NORTE 281	179
6.4 ANALISIS COMPARATIVO DE LOS POZOS PERFORADOS CON EL NUEVO DISEÑO CON CALIBRE EXTENDIDO DE 6"	181
6.4.1 Gráficos de ROP efectiva vs Footage	181
6.4.2 Análisis ROP efectiva por Cluster	184
6.4.3 Gráfico Horas efectivas vs Formación	186
6.4.4 Gráfico WOB vs Formación	187
6.4.5 Gráfico Torque vs Formación	189
6.4.6 Gráfico Presión vs Formación	190
6.4.7 Gráficos del Trabajo direccional	191
6.4.8 Gráfico ROP efectivas vs KOP	194
7.COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CORRIDA DE LA BROCA CON CALIBRE DE 6" CON LAS CORRIDAS DE LAS BROCAS ANTERIORMENTE IMPLEMENTADAS	196

7.1 TIEMPOS OPERACIONALES DE LOS POZOS CON BROCA DE CALIBRE 2.5"	197
7.1.1 Pozo C322.	198
7.1.2 Pozo C342	198
7.2 TIEMPOS OPERACIONALES DE LOS POZOS CON BROCA DE CALIBRE 4"	199
7.2.1 Pozo C217	200
7.2.2 Pozo C316	201
7.2.3 Pozo C471	201
7.3 TIEMPOS OPERACIONALES DE LOS POZOS CON BROCA DE CALIBRE 6"	202
7.3.1 Pozo C216	203
7.3.2 Pozo C226	204
7.3.3 Pozo CN281	205
7.5 COMPARACION ROP EFECTIVA	207
7.5.1 ROP efectiva de los pozos con KOP somero	207
7.5.2 ROP efectiva de los pozos con KOP profundo	208
7.5.3 ROP efectiva vs Inclinación en cada calibre	209
7.6 COMPARACION TIEMPOS TOTALES Y TIEMPO DE VIAJE	210
7.6.1 Pozos con KOP Somero	210
7.6.2 Pozos con KOP profundo	212
8.EVALUACION FINANCIERA	215
8.1 ANÁLISIS DE COSTOS DE INVERSION (CAPEX)	217
8.1.1 Costo por pie con el diseño de broca con calibre de 2.5".	219
8.1.2 Costo por pie con el diseño de broca con calibre extendido de 4"	221
8.1.3 Costo por pie con el diseño de broca con calibre extendido de 6"	222
8.2 EVALUACION FINANCIERA	224
8.2.1 Costo anual uniforme equivalente (CAUE).	225
8.2.2 Tasa interna de oportunidad	225
8.3 CONCLUSIÓN FINANCIERA	229
9.CONCLUSIONES	231
10.RECOMENDACIONES	233
BIBLIOGRAFIA	234
.ANEXOS	238

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Localización del Campo Castilla	29
Figura 2. Columna estratigráfica de la cuenca de los Llanos Orientales.	31
Figura 3. Mapa Estructural Formación Lutita E3	35
Figura 4. Tipos de brocas	42
Figura 5. Relación de los dientes de las brocas triconicas con la dureza de la formación	43
Figura 6. Falla por esfuerzo de compresión.	44
Figura 7. Partes de una broca de conos giratorios	45
Figura 8. Partes de una broca con conos giratorios	45
Figura 9. Avances históricos en el diseño de brocas PDC	49
Figura 10. Falla por esfuerzo cortante	50
Figura 11. Partes principales de las brocas PDC	51
Figura 12. Partes principales de las brocas PDC (vista de planta)	51
Figura 13. Perfiles de la corona en brocas de cuerpo fijo	53
Figura 14. Cortador PDC	54
Figura 15. Componentes básicos Motores de Desplazamiento Positivo.	63
Figura 16. Camisa Protectora	65
Figura 17. Pozo perforado con motor convencional	66
Figura 18. Pozo perforado con RSS	66
Figura 19. Secciones Rotary Steerable System-Point the bit.	68
Figura 20. Secciones Rotary Steerable System-Push the bit.	69
Figura 21. Cara del diseño U519S con calibre de 2.5"	70
Figura 22. Diseño U519S con calibre de 2.5"	71
Figura 23. Cara del diseño U519S con calibre de 4"	72
Figura 24. Diseño U519S con calibre de 4"	73
Figura 25. Nuevo diseño de broca 12 ¼" de Ulterra™	81
Figura 26. Comparación fichas técnicas de los tres diseños de brocas de Ulterra™	83
Figura 27. BHA #1 implementado en el pozo Castilla 216	84
Figura 28. BHA #1 implementado en el pozo Castilla 226	85
Figura 29. BHA #2 implementado en el pozo Castilla 226	86
Figura 30. BHA #1 implementado en el pozo Castilla Norte 281	87
Figura 31. BHA #2 implementado en el pozo Castilla Norte 281	88
Figura 32. Estado mecánico del pozo Castilla 216	90
Figura 33. Sección A de parámetros Castilla 216 con BHA #1	92
Figura 34. Sección B de parámetros Castilla 216 con BHA #1	94
Figura 35. Sección A de parámetros Castilla 216 con BHA #2	96
Figura 36. Sección B de parámetros Castilla 216 con BHA #2	98
Figura 37. Vista de Planta de la broca con calibre de 6"- Castilla 216	102
Figura 38. Vista del calibre de la broca con calibre de 6"- Castilla 216	103
Figura 39. estado mecánico del pozo Castilla 226	104

Figura 40. Sección A de parámetros Castilla 226 con BHA #1	106
Figura 41. Sección B de parámetros Castilla 226 con BHA #1	108
Figura 42. Sección A de parámetros Castilla 226 con BHA #2	110
Figura 43. Sección B de parámetros Castilla 226 con BHA #2	112
Figura 44. Vista de Planta de la broca con calibre de 6"- Castilla 226	117
Figura 45. Vista del calibre de la broca con calibre de 6"- Castilla 226	117
Figura 46. Estado mecánico del pozo Castilla Norte 281	119
Figura 47. Sección A de parámetros Castilla Norte 281 con el BHA #1	121
Figura 48. Sección B de parámetros Castilla Norte 281 con BHA #1	123
Figura 49. Sección A de parámetros Castilla Norte 281 con el BHA #2	125
Figura 50. Sección B de parámetros Castilla Norte 281 con BHA #2	127
Figura 51. Vista de Planta de la broca con calibre de 6"- Castilla Norte 281	131
Figura 52. Vista del calibre de la broca con calibre de 6"- Castilla Norte 281	131
Figura 53. Efecto sobre la sarta de perforación bajo la influencia de las vibraciones	133
Figura 54. Relación de los parámetros WOB y RPM respecto a las vibraciones	136
Figura 55. Sección A del estado final de la broca tras la primera corrida en el pozo C216	140
Figura 56. Sección B del estado final de la broca tras la primera corrida en el pozo C216	140
Figura 57. Sección A del estado final de la broca tras la segunda corrida en el pozo C216	141
Figura 58. Sección B del estado final de la broca tras la segunda corrida en el pozo C216	142
Figura 59. Gráfica MSE con el BHA #1, pozo C216	143
Figura 60. Gráfica MSE con el BHA #2, pozo C216	145
Figura 61. Sección A del MSE según parámetros en el pozo C216	147
Figura 62. Sección B del MSE según parámetros en el pozo C216	148
Figura 63. Sección A del estado final de la broca tras la primera corrida en el pozo C226	149
Figura 64. Sección B del estado final de la broca tras la primera corrida en el pozo C226	150
Figura 65. Sección A del estado final de la broca tras la segunda corrida en el pozo C226	151
Figura 66. Sección B del estado final de la broca tras la segunda corrida en el pozo C226	151
Figura 67. MSE con BHA #1, pozo C226	153
Figura 68. MSE con BHA #2, pozo C226	155
Figura 69. Sección A del MSE según parámetros en el pozo C226	157
Figura 70. Sección B del MSE según parámetros en el pozo C226	158
Figura 71. Sección A del estado final de la broca tras la primera corrida en el pozo CN281	160
Figura 72. Sección B del estado final de la broca tras la primera corrida en el pozo CN281	160

Figura 73. Sección A del estado final de la broca tras la segunda corrida en el pozo CN281	161
Figura 74. Sección B del estado final de la broca tras la segunda corrida en el pozo CN281	162
Figura 75. MSE con BHA #1, pozo CN281	163
Figura 76. MSE con BHA #2, pozo CN281	165
Figura 77. Comparación de la aleta #1 con los distintos calibres	167
Figura 78. Comparación de la aleta #2 con los distintos calibres	168
Figura 79. Comparación de la aleta #3 con los distintos calibres	169
Figura 80. Comparación de la aleta #4 con los distintos calibres	170
Figura 81. Comparación de la aleta #5 con los distintos calibres	171
Figura 82. Perfil actual de los pozos en el Campo Castilla	216
Figura 83. Costo por cada dos pozos llevados a valor presente, determinado con el calibre de 2.5"	226
Figura 84. Costo por cada dos pozos llevados a valor presente, determinado con el calibre de 4"	227
Figura 85. Costo por cada dos pozos llevados a valor presente, determinado con el calibre de 6"	228

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Parámetros de clasificación	59
Cuadro 2. Detalles de la corrida del pozo C216 con el BHA #1	91
Cuadro 3. Detalles de la corrida del pozo C216 con el BHA #2	95
Cuadro 4. Detalles de la corrida del pozo C226 con el BHA #1	105
Cuadro 5. Detalles de la corrida del pozo C226 con el BHA #2	109
Cuadro 6. Detalle de la corrida pozo Castilla Norte 281 con el BHA #1	120
Cuadro 7. Detalle de la corrida pozo Castilla Norte 281 con el BHA #2	124
Cuadro 8. Clasificación de la severidad de las vibraciones según su tipo	134
Cuadro 9. Tipos de vibraciones y sus posibles soluciones	135
Cuadro 10. Calificación IADC de la broca, Castilla 216, BHA #1	139
Cuadro 11. Calificación IADC de la broca, Castilla 216, BHA #2	141
Cuadro 12. Calificación IADC de la broca, Castilla 226, BHA #1	149
Cuadro 13. Calificación IADC de la broca, Castilla 226, BHA #2	150
Cuadro 14. Calificación IADC de la broca, Castilla Norte 281, BHA #1	159
Cuadro 15. Calificación IADC de la broca, Castilla Norte 281, BHA #2	161
Cuadro 16. Resumen de la presencia de fenómenos vibratoriales	166
Cuadro 17. Parámetros de perforación promedio del pozo C216 con el BHA #1	175
Cuadro 18. Parámetros de perforación promedio del pozo C216 con el BHA #2	176
Cuadro 19. Parámetros de perforación promedio del pozo C226 con el BHA #1	177
Cuadro 20. Parámetros de perforación promedio del pozo C226 con el BHA #2	178
Cuadro 21. Parámetros de perforación promedio del pozo CN281 con el BHA #1	179
Cuadro 22. Parámetros de perforación promedio del pozo C226 con el BHA #2	180
Cuadro 23. Costo por pie de los pozos donde se implementó la broca con calibre de 2.5"	220
Cuadro 24. Costo por pie promedio de los pozos donde se implementó la broca con calibre de 2.5"	220
Cuadro 25. Costo por pie de los pozos donde se implementó la broca con calibre de 4"	221
Cuadro 26. Costo por pie promedio de los pozos donde se implementó la broca con calibre de 4"	222
Cuadro 27. Costo por pie de los pozos donde se implementó la broca con calibre de 6"	223
Cuadro 28. Costo por pie promedio de los pozos donde se implementó la broca con calibre de 6"	224

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Propiedades petrofísicas del Campo Castilla	39
Tabla 2. Relación tipo de estructura de corte con respecto al tipo de formación	47
Tabla 3. Sistema de cojinetes	47
Tabla 4. Características adicionales	48
Tabla 5. Material de la broca	55
Tabla 6. Densidad de los cortadores	55
Tabla 7. Tamaño de los cortadores	55
Tabla 8. Nomenclatura del tipo de las brocas	56
Tabla 9. Perfil de la broca	56
Tabla 10. Desgaste de la estructura de corte brocas PDC	60
Tabla 11. Desgaste de la estructura de corte brocas triconicas	60
Tabla 12. Secciones de la broca triconica	61
Tabla 13. Secciones de la broca PDC	61
Tabla 14. Siglas para sacar la sarta de perforacion	62
Tabla 15. Descripción de los pozos perforados con broca de calibre 2.5"	77
Tabla 16. Descripción de los pozos perforados con la broca de calibre 4"	80
Tabla 17. Datos de compresibilidad por formación en el Campo Castilla	138
Tabla 18. comparación vibracional de los intervalos extraídos de los parámetros	174
Tabla 19. Compilación de las características de los pozos en estudio	196
Tabla 20. Pozos con KOP Someros	197
Tabla 21. Pozos con KOP Profundos	197
Tabla 22. Costos de operación (USD)	218
Tabla 23. Escenario de la campaña de perforación	219
Tabla 24. Costo de inersión con la broca de calibre 2.5"	221
Tabla 25. Costo de inersión con la broca de calibre 4"	222
Tabla 26. Costo de inersión con la broca de calibre 6"	224
Tabla 27. Resumen financiero con las anualidades correspondientes a cada calibre	229

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Grafica 1. Produccion total por año en el Campo Castilla.	38
Grafica 2. Perfil direccional del pozo Castilla 216	100
Grafica 3. Perfil direccional del pozo Castilla 226	114
Grafica 4. Perfil direccional del pozo Castilla Norte 281	129
Grafica 5. ROP efectiva vs Footage	182
Grafica 6. MSE vs Formación	183
Grafica 7. ROP efectiva en el Cluster 94	184
Grafica 8. ROP efectiva en el Cluster 89	185
Grafica 9. Horas efectivas vs Formación	186
Grafica 10. WOB vs Formación	187
Grafica 11. Torque vs Formación	189
Grafica 12. SPP vs Formación	190
Grafica 13. Trabajo direccional Castilla 216	192
Grafica 14. Trabajo direccional Castilla 226	193
Grafica 15. Trabajo direccional Castilla Norte 281	194
Grafica 16. ROP efectiva vs KOP	195
Grafica 17. Tiempos operacionales pozo C322	198
Grafica 18. Tiempos operacionales pozo C342	199
Grafica 19. Tiempos operacionales pozo C217	200
Grafica 20. Tiempos operacionales pozo C316	201
Grafica 21. Tiempos operacionales pozo C471	202
Grafica 22. Tiempos operacionales pozo C216	204
Grafica 23. Tiempos operacionales pozo C226	205
Grafica 24. Tiempos operacionales pozo CN281	206
Grafica 25. Comparación ROP efectiva vs Footage en Pozos con KOP somero	207
Grafica 26. Comparación ROP efectiva vs Footage en Pozos con KOP profundo	208
Grafica 27. ROP efectiva vs Inclinación en cada calibre	209
Grafica 28. Tiempos totales en pozos con KOP somero	210
Grafica 29. Tiempos de viaje en pozos con KOP somero	211
Grafica 30. Tiempos totales en pozos con KOP profundo	212
Grafica 31. Tiempos de viaje en pozos con KOP profundo	213

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Caída de presión en la Broca	56
Ecuación 2. Potencial hidráulico en la broca	57
Ecuación 3. Potencial hidráulico en la broca por pulgada cuadrada.	57
Ecuación 4. Velocidad de salida de fluido	57
Ecuación 5. Fuerza de impacto contra la formación	58
Ecuación 6. Fuerza de impacto por pulgada cuadrada	58
Ecuación 7. Área total de flujo (TFA)	59
Ecuación 8. Reducción del diámetro de la broca	61
Ecuación 9. Energía Mecánica Especifica (MSE)	136
Ecuación 10. CCS Rocas Permeables	137
Ecuación 11. CCS Rocas Impermeables	137
Ecuación 12. Ecuación de costo por pie	219
Ecuación 13. Costo anual uniforme equivalente	225
Ecuación 14. Calculo del valor presente neto con la broca de 2.5"	226
Ecuación 15. Valor del Costo anual uniforme equivalente empleando la broca con calibre de 2.5"	226
Ecuación 16. Calculo del valor presente neto con la broca de 4"	227
Ecuación 17. Valor del Costo anual uniforme equivalente empleando la broca con calibre de 4"	228
Ecuación 18. Calculo del valor presente neto con la broca de 6"	229
Ecuación 19. Valor del Costo anual uniforme equivalente empleando la broca con calibre de 6"	229

ABREVIATURAS

Km	Kilómetros
ANH	Agencia Nacional de Hidrocarburos
' ó ft	Pie(s)
%	Porcentaje
Ma	Millones de años
BPD	Barriles por día
Bls	Barriles
WTI	West Texas Intermediate
OPEX	Operating Expenses (Gastos Operativos)
md	MiliDarcyes
psi	Pound per square inch (Libra por Pulgada Cuadrada)
°	Grado
GOR	Gas Oil Relation (Relación Gas Petróleo)
scf	Standard cubic feet (Pie Cubico Estándar)
stb	Standard barrel (Barril Estándar)
pag	Página
" ó in	Pulgada
BHA	Bottom Hole Assembly (Ensamblaje de Fondo)
PDC	Policristalyne Diamond Cutter (Compacto de Diamante Policristalino)
IADC	Internacional Association of Drilling Contractors (Asociacion Internacional de Contratistas de Perforacion)
ROP	Rate of Penetration (Tasa de Penetración)
TCI	Tungsten Carbide Insert (Inserto de Carburo de Tungsteno)
ST	Acero
WOB	Weight On Bit (Peso Sobre la Broca)
RSS	Rotary Steerable System (Sistema Rotativo Direccional)
RPM	Revolutions Per Minute (Revoluciones Por Minuto)
JSA	Junk Slot Area (Area de Evacuacion de Recortes)
TFA	Total Flow Area (Area Total de Flujo)
TSD	Thermally Stable Diamond (Diamante Termicamente Estable)
mm	Milimetro
hr	Hora
Klbs	Kilolibras
TOC	Top Of Cement
min	Minutos
gpm	Galones Por Minuto
MD	Measured Depht (Profundidad Medida)
MWD	Measuring While Drilling (Medir Durante la Perforacion)
TVD	True Vertical Depht (Profundidad Vertical Verdadera)
# ó N°	Numero
LCM	Lost Control Material (Material de Control de Perdidas)
TD	Target Depht

MSE	Mechanical Specific Energy (Energía Mecánica Específica)
Hz	Hertz (Hercios)
SPP	Stand Pipe Pressure (Presión en la Tubería Vertical)
TQ	Torque
AFE	Authority For Expenditure (Autorización de gastos)
NPT	Not Productive Time (Tiempo No Productivo)
CAPEX	Capital Expenditures (Inversiones en bienes Capatales)
CPP	Costo Por Pie
USD	United States Dollars (Dólares de Estados Unidos)
\$B	Costo de la broca
\$R	Costo del equipo de perforación por hora
CAUE	Costo Anual Uniforme Equivalente
VPN	Valor Presente Neto
*	Multiplicación
/	División
+	Adición
°API	Gravedad API
°F	Grados Fahrenheit
API	American Petroleum Institute (Instituto Americano del Petróleo)
cP	Centipoise
DC	Drill Collar (Collar de Perforacion)
DHM	Down Hole Motor (Motor de fondo)
DLS	DogLeg Severity (Tasa de construcción de ángulo)
HHPb	Horse Hydraulic Power on the Bit (Potencia hidráulica en la broca)
HSI	Horse power Square Inches (Caballaje hidráulico de la broca por pulgada cuadrada)
HWDP	Heavy Weight Drill Pipe (Tubería de perforación extrapesada)
i	Tasa de interés
ID	Internal Diameter (Diámetro interno)
IF	Impact Force (Fuerza de impacto hidráulico)
KOP	Kick Off Point (Profundidad de inicio de trabajo direccional)
N/A	No aplica
OD	Outer Diameter (Diámetro externo)
S. A.	Sociedad anónima

GLOSARIO

AZIMUT: orientación que se le da la sarta de perforación con respecto a los 360° existentes, donde el direccional toma la decisión de construir ángulo, tumbarlo, ir a derecha o a la izquierda.

API: instituto americano petrolero encargado del desarrollo de prácticas recomendadas en el área de perforación, fluidos de perforación y cementos; adicionalmente regula la calidad de todos materiales empleados en estas áreas.

BACK REAMING: operación empleada para revolver algún tipo de restricción en dirección a la superficie; esta maniobra se puede realizar con bombas prendidas o apagadas, según su complejidad, adicionalmente se realiza rotando la sarta de perforación.

BACK RAKE ANGLE: ángulo el cual se forma en entre el cortador de la broca y la formación, donde este al ser mayor, se considera que la broca es más agresiva con la roca.

BHA (BOTTOM HOLE ASSEMBLY): conjunto de herramientas en componen la parte final de la sarta de perforación que atraviesan las distintas unidades litológicas existentes en cada una de las cuencas sedimentarias.

BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE: sistema de levantamiento artificial el cual se encarga de llevar el hidrocarburo desde el reservorio hasta superficie mediante una bomba en el subsuelo alimentada por electricidad, es capaz de llevar altos volúmenes a superficie.

BOMBEO MECANICO: es un sistema que permite el transporte casi continuo del aceite desde el yacimiento hasta superficie, gracias a un motor eléctrico o de combustión interna, donde mediante una sarta de varillas, un tambor y un movimiento reciprocante, genera succión que permite el movimiento del petróleo.

BOQUILLA: orificio en la parte de la cara de broca, por el cual fluye el fluido de perforación para generar la limpieza del pozo, llevando los recortes de la formación por medio del anular hasta superficie y lubricación de las aletas de broca.

BROCA PDC: cuerpo de acero o matriz el cual emplea cortadores policristalinos de diamante compacto para generar un corte de cizalla a las rocas, mediante el rapado de la misma.

CALIBRE DE LA BROCA: sección de la broca subsecuente al hombro, este es clave para el control direccional y la estabilidad de esta, entre mayor longitud tenga se considera una broca más estable.

CONTRATO DE EXPLORACION Y PRODUCCION: es aquel contrato otorgado por parte de la agencia nacional de hidrocarburos con el fin de entregar una zona petrolera para su exploración y producción.

CUENCA SEDIMENTARIA: pliegue de la corteza terrestre, generado por la actividad tectónica de las placas, donde se presenta acumulación de múltiples tipos de sedimentos; donde de mantener una tasa constante se pueden generar las condiciones propias para la generación y/o almacenamiento de hidrocarburos.

DLS (DOG LEG SEVERITY): sección del pozo en la cual se presenta un cambio abrupto de dirección, puede ser ocasionado por el perforador direccional, sin embargo, dificulta el movimiento de la sarta de perforación; su severidad se mide en °/100ft; entre más grande sean esos grados, el hueco será más tortuoso.

DP (DRILL PIPE): tubos de acero de aproximadamente 33' de longitud los cuales se encargan de llevar la energía rotatoria desde el top drive o unidad de Kelly a las herramientas de fondo,

DRILL OUT: es aquella operación inmediatamente siguiente al secado del cemento de la fase anterior; consta de perforar el cemento remanente para continuar con la perforación.

EMBOTAMIENTO: condición en la cual pueden salir distintos componentes de las herramientas de fondo a superficie por problemas del fluido de perforación y/o problemas estructurales del pozo, donde se genera un recubrimiento de generalmente arcilla por la parte externa de las herramientas.

ESPESOR NETO: sección de la columna estratigráfica en la cual se encuentra almacenado el hidrocarburo, este siempre es menor que el total, o en casos particulares puede ser igual.

ESPESOR TOTAL: sección la columna estratigráfica donde pueden estar presentes dos o más puntos de interés sin importar su espesor; en este se tiene en cuenta las distintas intercalaciones de zonas productoras y no productoras.

FASE DE UN POZO: un pozo petrolero se realiza en forma de cono descendente, donde para mantener su integridad es dividido en fases, desde la de superficie hasta la productora, estas divisiones que comprenden diversas actividades desde la perforación de la misma, hasta la cementación es lo que se conoce como fase.

GRADOS API: connotación que se le asigna al petróleo de un reservorio, para determinar su calidad y realizar un plan de acción para su extracción, esto puede variar dependiendo de la composición del aceite. Entre más alto sea el valor, el crudo es de mejor calidad, lo que quiere decir que entre menor sean los grados, más pesado será y requerirá de técnicas más complejas para su producción.

HWDP (HEAVY WAVE DRILL PIPE): tubería de la misma longitud que las convencionales (DP), la diferencia radica en un menor diámetro interno, ya que su peso puede ser de hasta tres veces del de uno normal, su función es garantizar y aportar peso a la broca para perforar.

CALIFICACION IADC DE LAS BROCAS: serie de letras y números en orden específico, el cual refleja el estado final de una broca tras haber sido corrida en

algún pozo, esta contempla estado, lugar y tipo de daño o desgaste que puedo llegar a sufrir.

INCLINACIÓN FINAL: ángulo al cual es requerido llevar la sarta de perforación para contactar la zona productora en un punto específico, el cual puede ser de bajo ángulo si el pozo se encuentra cerca de las coordenadas de fondo o por el contrario si se encuentra alejado este será mayor.

JSA (Junk Slot Area): área en la cual se encuentran las boquillas de la broca y fluye el fluido de perforación y se lleva los rípios generados por los cortadores hacia la superficie.

JUNTA: tubo de acero, el cual cuenta con especificaciones puntuales otorgadas por el instituto americano petrolero, para su uso, manejo y transporte. Estas suelen tener una longitud de 33ft.

PARADA: conjunto de dos o tres juntas, las cuales permiten agilizar la bajada de tubería al pozo, al reducir el tiempo de conexión.

PEGA: restricción que se puede presentar por motivos de empaquetamiento, geométrica o diferencial a lo largo del pozo; esto conlleva a demoras en las operaciones y en el peor de los casos a la pérdida parcial o total de las herramientas de fondo y del mismo pozo.

REAMING: operación que se realiza cuando se presenta algún tipo de restricción en dirección hacia el fondo del pozo, puede ser realizada con bombas prendidas o apagadas, adicionalmente se realiza rotando la sarta de perforación.

RIPIOS: son los pequeños recortes de formación que se generan tras el paso de los dientes o cortadores de la broca de perforación, los cuales son llevados a superficie por medio del fluido de perforación, donde finalizan en las zarandas vibratorias para su respectiva disposición.

SARTA DE PERFORACIÓN: Es aquella la cual está compuesta por las herramientas de fondo BHA y tubería de acero, las cuales constan con una sinergia óptima para realizar la perforación de un pozo petrolero.

SURVEY: reporte generado automáticamente por las herramientas de fondo, generalmente se toma tras finalizar la perforación de una parada. En el cual muestran datos claves para la orientación del pozo y determinar su ubicación exacta en el subsuelo.

TARGET: nombre que reciben múltiples unidades litológicas, las cuales son consideradas de interés en cada una de las fases de la perforación de un pozo petrolero.

TIEMPO DE VIAJE DE TUBERIA: número de horas empleadas para llevar el BHA desde la profundidad actual hasta el zapato guía o superficie, también es considerado desde superficie hasta donde se haya perforado.

TIEMPO PROGRAMADO: tiempo estipulado para realizar cada una de las actividades pertinentes referentes a la operación de extracción de hidrocarburos del subsuelo, esta es monitoreada permanentemente, siempre en la constante búsqueda de optimización del tiempo.

TIEMPO NO PRODUCTIVO: número de horas gastadas para resolver cualquier imprevisto durante la operación, estos tiempos son no productivos ya que no permiten el avance normal de la operación, son destinados únicamente a resolver problemas operacionales.

TIEMPO TOTAL: tiempo final registrado una vez se culminan todas las actividades programadas, en este caso se suman los tiempos reales y todo el tiempo destinado en la solución de problemas.

TOP DRIVE: es aquel instrumento encargado de proporcionarle energía torsional y axial a la sarta de perforación mediante el propio peso de esta.

TORTUOSIDAD: Es aquella desviación que se forma con relación de una línea recta.

VIBRACIONES: son movimientos oscilatorios ocasionados por la falta de focalización energética en el eje de referencia, puede producirse por el mismo equipo o condiciones exteriores que lo lleven a generar una vibración.

WASH OUT: termino empleado para indicar una ruptura parcial o total de alguna herramienta o componentes de la sarta de perforación, la cual no permite un normal desarrollo de las actividades, obliga a realizar el cambio para continuar con normalidad.

ZAPATO (SHOE): es un componente que está ubicado en la punta de la sarta de revestimiento, este se encarga de conducir la tubería de revestimiento hacia el pozo recientemente perforado, reduciendo los inconvenientes que surgen de los derrumbes del pozo mientras que la tubería de revestimiento baja.

ZONA PRODUCTORA: unidad litológica en la cual se encuentra almacenado el hidrocarburo que se está extrayendo desde los distintos pozos y los distintos sistemas de levantamiento.

RESUMEN

TITULO: “EVALUACIÓN TÉCNICA Y FINANCIERA DEL MEJORAMIENTO EN LA CALIDAD DEL HUECO MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE BROCAS CON CALIBRE EXTENDIDO EN LA FASE DE 12 ¼” EN EL CAMPO CASTILLA”.

En presente trabajo de grado se pretende evaluar técnica y financieramente el mejoramiento de calidad del hueco mediante la implementación de brocas con calibre extendido en la sección de 12 ¼” en el Campo Castilla. Esta cuenta con tres componentes, uno geológico, uno técnico y uno financiero.

El componente geológico trata acerca de la historia de la cuenca sedimentaria y de las distintas unidades litológicas presentes, adicionalmente se realiza una descripción de su composición mineralógica, que es fundamental para futuros análisis. Tomando una vista más general, se indica su localización y rutas de acceso tanto por tierra como por aire, finalmente se hace una revisión de las propiedades petrofísicas que se encuentran en el yacimiento para así tener conocimiento del posible tipo de hidrocarburo que se encuentre atrapado y la historia de su desarrollo a lo largo de los años.

Desde el componente técnico, una vez sean descritas las brocas antecesoras, se analizan las corridas y eventos ocurridos tras la implementación de brocas policristalinas con calibre de 2.5” y 4”; posteriormente se describe el nuevo diseño de broca con calibre extendido de 6” y los cambios a los cuales fue sometida para obtener resultados aún mejores que los recopilados con las de 2.5” y 4”. Una vez descrita la corrida de los 3 pozos de estudio perforados con el nuevo diseño, se realiza un análisis cualitativo y cuantitativo de la presencia de fenómenos vibracionales, los cuales pueden afectar la calidad del hueco y perjudicar la estructura de corte de la broca. Posteriormente se realiza un análisis sobre los parámetros de perforación obtenidos en los tres pozos estudiados, para verificar la afectación sobre el desempeño que genera la implementación del nuevo diseño. Una vez se finaliza esa comparación entre los mismos pozos con calibre de 6” entran a ser comparadas las brocas con calibre de 2.5” y 4” donde se evalúa la calidad del hueco por medio de los tiempos operacionales, tiempos de viaje, tiempos totales.

Por último, para el componente financiero se realizan tres simulaciones en las cuales están involucrados cada uno de los calibres anteriormente implementados, la simulación se realiza tras hallar el costo operativo por hora y el costo por pie de cada uno de los pozos para determinar valores promedio que permita contar con una base sólida de estudio. El ejercicio permite determinar costos ideales en pozos que se desean perforar a futuro y mostrar la línea de ahorro a lo largo de los distintos calibres y de cuantificar el ahorro total expresado en USD por cada dos pozos. Para realizar esto se aplica el indicador financiero costo anual uniforme equivalente CAUE y así determinar la viabilidad de esta nueva herramienta de ser usada en proyectos a gran escala.

PALABRAS CLAVE: Cuenca Llanos Orientales, Campo Castilla, Broca Calibre Extendido, Tortuosidad.

INTRODUCCIÓN

Ecopetrol S.A como operadora estatal, es la encargada de la dirección, administración y parte del desarrollo de los campos existentes en Colombia; lo cual requiere estar en la constante investigación y desarrollo de herramientas y equipos primordiales para la explotación de hidrocarburos. Uno de los campos insignias para Ecopetrol S.A es el Campo Castilla, dado que el volumen de petróleo producido no es comparable con la mayoría de los campos descubiertos en el país.

Dado que actualmente el Campo Castilla se encuentra en un estado avanzado de desarrollo, es indispensable el ahorro de recursos económicos para la perforación de nuevos pozos; a razón de esto se busca continuamente la implementación de herramientas vanguardistas, las cuales mantengan la sinergia con los demás componentes del BHA y así permitan llegar a los objetivos planeados, siempre manteniendo como meta la optimización de tiempos tanto perforando como en los viajes a superficie, ya que estos se resumen en una reducción del capital de inversión.

En el presente trabajo de grado se analiza el desempeño de una broca PDC con calibre extendido de 6", la cual pretende realizar una perforación más estable mediante una mayor área de contacto con la formación; su verificación se realiza en tres pozos del campo en estudio en la sección de 12 ¼". Los resultados esperados serían una mejoría en la calidad del hueco y se comprueba en la reducción considerable de los tiempos de viaje; que finalmente será un ahorro de los recursos económicos para la operadora. Como se demostró tras la implementación de la broca con calibre extendido de 4".

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar técnica y financieramente el mejoramiento en la calidad del hueco mediante la implementación de brocas con calibre extendido en la sección 12 ¼” en el Campo Castilla.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Describir las generalidades y aspectos geológicos del Campo Castilla.
2. Describir los diseños de las brocas con calibre de 2.5” y 4” y sus respectivos parámetros obtenidos tras la utilización de las mismas en la fase de 12 ¼ “.
3. Describir el nuevo diseño de broca policristalina de 12 ¼” con calibre extendido junto con el BHA.
4. Implementar el nuevo diseño de la broca policristalina con calibre extendido en la sección de 12 ¼” del Campo Castilla.
5. Analizar la presencia de los fenómenos vibracionales en la broca con calibre extendido de 6”.
6. Evaluar el desempeño de la broca con calibre extendido de 6”, de acuerdo con los parámetros de perforación y los tiempos de operación.
7. Comparar los resultados obtenidos en la corrida de la broca con calibre de 6” con las corridas de las brocas anteriormente implementadas.
8. Evaluar la viabilidad financiera del proyecto, tomando como referencia el indicador costo anual uniforme equivalente (CAUE).

1. GENERALIDADES DEL CAMPO

En este capítulo se hace alusión a las características del Campo Castilla, partiendo de la descripción de su historia, en la cual se menciona, su ubicación geográfica, su estratigrafía, su producción actual y las propiedades del subsuelo que lo comprenden.

1.1 ANTECEDENTES DEL CAMPO

El Campo Castilla, el cual hace parte de la cuenca de los Llanos Orientales inicio sus operaciones en el año 1969 bajo el contrato de concesión Cubarral N° 1820 comprendiendo un área de 97.450 hectáreas. La perforación se inició con el pozo Castilla 1 en 1969 con el cual se logró llegar a una profundidad de 7.347 pies, pero no fue sino hasta el año 1977 que se inició la producción ya que no se contaba con la infraestructura de transporte necesaria. Todo esto bajo la administración de la operadora Chevron Petroleum Company.

En 1975 se celebró el primer contrato de asociación entre Chevron y Ecopetrol S.A, el cual culmino en enero del año 2000. Para entonces el Campo acumulo una producción aproximada de 94 millones de barriles de crudo pesado, entre las formaciones productoras Mirador, Guadalupe y Une de las cuales se extrajo el crudo denominado extra pesado y pesado respectivamente.

Desde el año 2000 en cumplimiento con el contrato de asociación, Ecopetrol S.A. asume la dirección y administración del Campo Castilla en su totalidad; invirtiendo millones de dólares para mejorar los procesos de extracción y tratamiento del crudo presente en el campo.

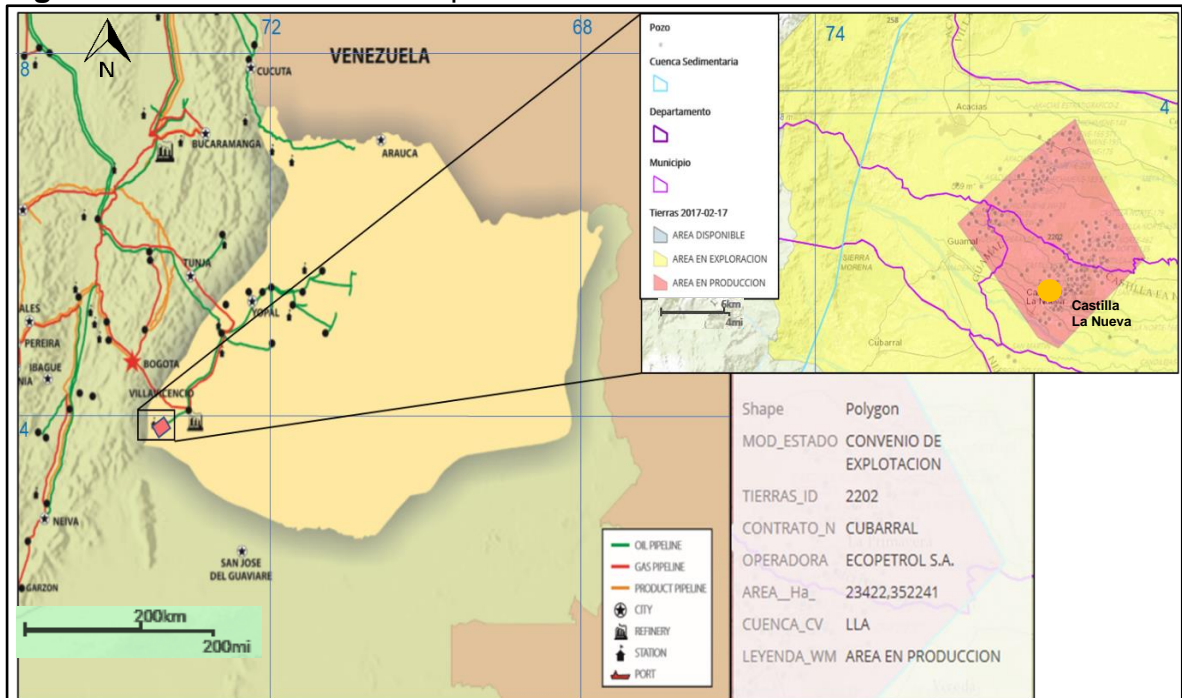
1.2 LOCALIZACION DEL CAMPO

El Campo Castilla se encuentra ubicado en la cuenca de los Llanos Orientales, en el departamento del Meta, bloque Cubarral y bajo la jurisdicción del municipio de Castilla La Nueva; a 158 km desde Bogotá. Su ubicación se ilustra en la **Figura 1**.

Para llegar por tierra al campo desde Bogotá se debe tomar la vía Bogotá – Villavicencio por la Carretera 40 por 90 km; en la cual se atraviesan municipios como Chipaque, Cáqueza, Quetame y Guayabetal. A continuación, se toma la Carretera 65 hacia el occidente del país en dirección al municipio de Acacias por 30 km. Atravesando el casco urbano de Acacias se continúa por la misma ruta hacia Guamal por 10.5 km, dentro de Guamal se toma la carrera 7, la calle 13 y por último la carrera 10 para seguir por la vía Guamal-Castilla La Nueva por 10.3 km para llegar al casco urbano de Castilla La Nueva; este municipio ya está dentro del bloque Cubarral, sin embargo si se toma la vía Castilla La Nueva-Chichimene por 1 km y se gira a la derecha, a 1.6 km se encuentra ubicada la Estación de Recolección Castilla-1.

Otra alternativa para arribar al Campo Castilla es de forma aérea, tomando como punto de partida la ciudad de Bogotá D.C. en el aeropuerto El Dorado y como punto final en el municipio de Villavicencio en el aeropuerto Vanguardia, desde ese punto se sigue la ruta anteriormente descrita para el acceso de forma terrestre.

Figura 1. Localización del Campo Castilla



Fuente: AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS, Eastern Llanos Basin, Colombia Oil & Gas, 2007; GEOVISOR ANH. Mapa Bloque Cubarral. [en línea]. Disponible en: <https://geovisor.anh.gov.co/> Modificado por los autores.

1.3 MARCO GEOLOGICO

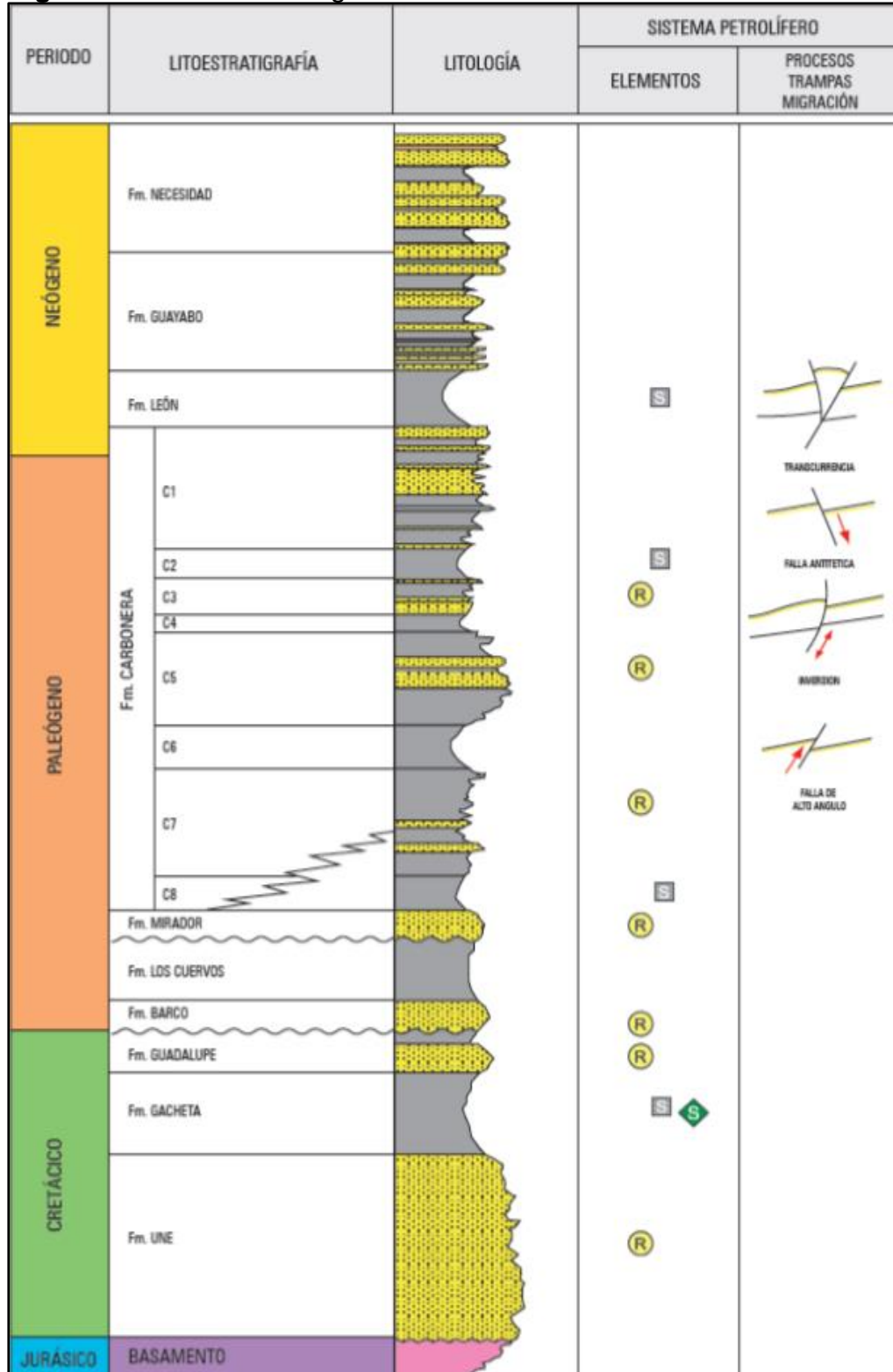
Esta sección contiene una descripción de las principales características geológicas del campo, comenzando por la estratigrafía presente en la cuenca de los Llanos Orientales y sus formaciones. Así mismo se expone el escenario geológico que permitió la acumulación y reserva de hidrocarburos en el yacimiento.

Es necesario aclarar que, durante el estudio de la cuenca de los Llanos Orientales, la operadora Ecopetrol S.A hace una clasificación de las estructuras geológicas en cinco provincias: Arauca, Casanare, Vichada, Meta y Piedemonte Llanero.

Ubicando los campos de Castilla y Chichimene en la provincia del Meta. Por lo tanto, será la nomenclatura operacional del Meta, la misma aplicada por Ecopetrol S.A, la más pertinente para describir las unidades del presente trabajo.

1.3.1 Estratigrafía. La cuenca de los Llanos Orientales descrita a partir de los pozos hasta ahora perforados se conforma por rocas basamento del Precámbrico y por formaciones del Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico. Como se muestra en la **Figura 2** la columna estratigráfica presenta tres discordancias: en la base del Mesozoico, Cretácico Superior, y en el Eoceno Medio. Las formaciones terciarias Barco, Los Cuervos y León no están presentes en la zona de la Cuenca de los Llanos Orientales, donde se ubica el Campo Castilla (Meta), por tanto, no se describen en el apartado de Estratigrafía.

Figura 2. Columna estratigráfica de la cuenca de los Llanos Orientales.



Fuente: Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos, ANH, 2012

1.3.1.1 Basamento Precámbrico. El Basamento del Precámbrico está compuesto por las rocas más antiguas encontradas en la cuenca de los Llanos Orientales. Por lo tanto, la información acerca de esta unidad está limitada a los pocos pozos exploratorios que atravesaron todas las formaciones. Se reportan dos tipos de basamento a lo largo de la cuenca, uno ígneo-metamórfico de composición diorítica-sienítica y uno con metamorfismo de bajo grado alcanzado por los pozos Suria-1, Castilla-2, Castilla-12 y Castilla-18.

1.3.1.2 Paleozoico. Las unidades del Paleozoico reposan de manera discordante sobre el Basamento metamórfico y se acuñan desde unos 6000' en la zona central hacia el sureste de la cuenca. Está clasificado en dos secuencias principales según Ecopetrol S.A: la primera secuencia está compuesta por metasedimentos, y está limitada por dos discordancias que separan el Paleozoico Inferior del Superior, y el Paleozoico Inferior del basamento respectivamente; la segunda secuencia no está bien identificada en la cuenca, pero se puede correlacionar con el Grupo Farallones.

1.3.1.3 Formación Une (K2). Como enuncia la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH)¹ la Formación Une, de edad cretácica, o unidad K2 en el área del Meta, se compone por areniscas cuarzosas con intercalaciones y de limolitas carbonosas. Su espesor oscila entre 50' y 650' aumentando hacia el Piedemonte Llanero y disminuye hacia el Sureste. En la base presenta un ambiente deposicional de canales fluviales y en la parte superior presenta depósitos marinos. Es productora de aceite en los campos de Apiay y Suria.

1.3.1.4 Formación Gachetá (K1 Inferior). De acuerdo con la ANH² la Formación Gachetá o K1 Inferior consiste en la máxima transgresión hacia el Sureste ocurrida en el Cretácico, esta originó que el límite de depositación se moviera hacia el Este, sobre el Escudo de Guyana. Esta formación está conformada por areniscas basales de 600' en su máximo espesor seguido por intercalaciones de lutitas y areniscas depositadas en un ambiente marino. Se acuña hacia el Sureste de la cuenca. Además, es una unidad productora en varios campos de la cuenca de los Llanos Orientales como lo es en el caso de Castilla.

1.3.1.5 Formación Guadalupe (K1 Superior). Como se trata en la tesis de las ingenieras Duarte y Prada³, la Formación Guadalupe o K1 Superior está conformada por areniscas masivas intercaladas con pequeñas capas de lutitas y

¹ ANH; INGRAIN DIGITAL ROCK PHYSICS LAB y HALLIBURTON. Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos. Colombia: ANH, 2012. p. 48.

² *Ibid.* p. 48.

³ DUARTE DIAZ, Paula Daniela y PRADA FONSECA, María Angelica. Propuesta De Una Metodología De Análisis Causa Raíz Para El Diagnóstico De Las Causas De Los Problemas Durante La Perforación Del Pozo A En El Campo Castilla. Trabajo de grado Ingenieros de petróleos. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América. 2016. p. 27-33.

carbón. Hace parte del Cretáceo Superior y su depositación se dio en canales estuarinos presentes en un área de llanura de marea. En la Integración Geológica de la Digitalización y análisis de Núcleos de la ANH⁴ se especifica que su espesor presenta una disminución en las cercanías al Escudo Guayanés, teniendo su máximo espesor cercano a los 600' en dirección al Piedemonte Llanero.

1.3.1.6 Formación Mirador. (San Fernando-T2). Esta formación, del Paleógeno, compuesta en su mayoría por areniscas representa el reservorio más importante de la cuenca, sin embargo, en el Campo Castilla esta formación es considerada como objetivo secundario. Está conformada por areniscas masivas no tan limpias que incluyen feldespatos y trazas de shales. El espesor aumenta de Oriente a Occidente y alcanza un máximo de 950'.

Debido a que el ambiente de depositación descrito por la ANH⁵ en la parte inferior es fluvial y hacia el tope cambia a marino, la formación presenta selección pobre, granodecreciente hacia el techo.

1.3.1.7 Formación Carbonera. La Formación Carbonera, del Paleógeno, es una megasecuencia litológica que alcanza los 6000' de espesor y fue depositada durante ciclos de transgresión y regresión. En la Integración Geológica propuesta por la ANH⁶ se especifica como hacia el área del Meta, esta formación ha sido dividida por Ecopetrol S.A en 8 unidades operacionales que se acuñan hacia el Sureste de la cuenca: Lutita E4, Unidad T1, Lutita E3, Conjunto C2, Areniscas de Carbonera, Conjunto C1, Lutita E y Areniscas Superiores Carbonera.

- **Unidad C8 (Lutita E4):** Según el trabajo de grado de las ingenieras Duarte y Prada⁷, esta Unidad está compuesta predominantemente por lutitas verdosas intercaladas con limolitas pardas, además registra pequeños lentes arenosos hacia la base. Su espesor promedio a lo largo de la cuenca de los llanos es de 50'.
- **Unidad C7 (Unidad T1):** Con espesores de 250' hacia el centro de la cuenca, la unidad se conforma por paquetes de arenas sueltas y areniscas de grano medio a fino que se intercalan con limolitas grises.

⁴ ANH; INGRAIN DIGITAL ROCK PHYSICS LAB y HALLIBURTON. Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos. Colombia: ANH, 2012. p. 48.

⁵ Ibid. p. 49

⁶ Ibid. p. 50

⁷ DUARTE DIAZ, Paula Daniela y PRADA FONSECA, María Angelica. Propuesta De Una Metodología De Análisis Causa Raíz Para El Diagnóstico De Las Causas De Los Problemas Durante La Perforación Del Pozo A En El Campo Castilla. Trabajo de grado Ingenieros de petróleos. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América. 2016. p. 28.

- **Unidad C6 (Lutita E3):** Como se trata en el trabajo de grado de Espinosa y Gongora⁸, la Unidad está constituida de manera homogénea por lutitas laminares de grano muy fino en el tope y trazas de arenisca hacia la base que marcan la entrada a la Unidad T1. Su espesor varía entre los 400' y 450'.
- **Unidad C5 y C4 (Conjunto C2):** Según la ANH⁹, esta formación corresponde a un paquete de casi 1000' de intercalación de arcillolitas y areniscas de grano medio, e incluye las unidades C5 y C4 debido a la dificultad para diferenciar su límite cronoestratigráfico.
- **Unidad C3 (Areniscas Carbonera y Conjunto C1):** También llamada Unidad C3 se conforma por una sucesión de arenisca fina a gruesa y limolitas de color pardo oliva, su espesor oscila entre 150' y 700'.
- **Unidad C2 (Lutita E):** Los espesores de 100' a 200' de lutitas grises y limolitas de grano muy fino hacen de esta unidad uno de los mejores sellos en la cuenca, sin embargo, hacia el Noreste su porcentaje de arenas aumenta marcando el límite de depositación.
- **Unidad C1 (Areniscas Superiores de Carbonera):** Según la integración geológica de la ANH¹⁰, esta unidad presenta una depositación de areniscas de forma granodecreciente hacia el tope, con trazas de lodolitas a medida que se llega al contacto con León. Hacia la base predomina el grano más grueso llegando incluso a conglomerados arenosos y cuarzosos. La unidad tiene un espesor promedio de 1200' a lo largo de la cuenca.

1.3.1.8 Formación Guayabo. Este intervalo fue clasificado por el Estudio Integrado de Crudos Pesados de la ANH¹¹, como perteneciente al Neógeno; puede tener espesores entre 2000' y 13000', y lo componen arcillolitas de varios colores, areniscas mal seleccionadas e incluso niveles de conglomerados. Su ambiente de deposición es mayormente marino, no obstante, hacia el Meta aumenta el dominio de ambiente continental.

1.3.1.9 Formación Necesidad. De acuerdo con la ANH¹², la Formación Necesidad, del Neógeno, está conformada principalmente por conglomerados, areniscas mal seleccionadas, algunas arcillolitas e incluso fragmentos de rocas

⁸ ESPINOSA FRANCO, Paula Alejandra y GONGORA SARMIENTO, Andrés Felipe. Aplicación De Una Metodología Propuesta Para El Diagnóstico Y El Análisis De Las Causas Raíz De Los Problemas Operacionales Durante La Perforación De Pozos En El Campo Castilla. Trabajo de grado Ingenieros de petróleos. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América, 2016. p. 30-35.

⁹ ANH; INGRAIN DIGITAL ROCK PHYSICS LAB y HALLIBURTON. Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos. Colombia: ANH, 2012. p. 52.

¹⁰ Ibid. p. 52.

¹¹ ANH. Estudio Integrado de Crudos Pesados. Colombia: 2008. p. 2.

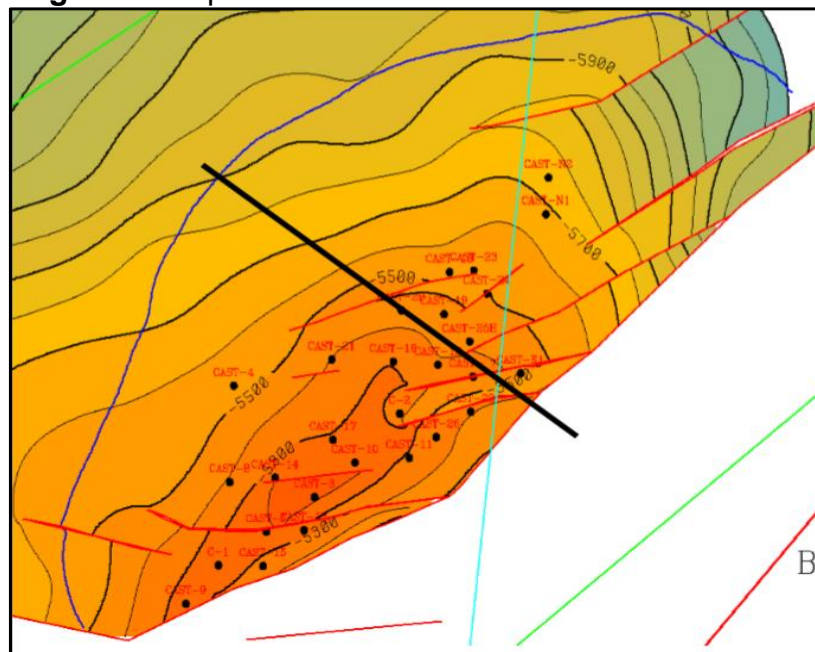
¹² Ibid. p. 2.

metamórficas. No se tiene un dato confiable de su espesor, pero se aproxima que comprende unos 400' desde la superficie. Esta unidad tiene un carácter regional, sin embargo, en la información recopilada en documentos de Ecopetrol S.A, no se registra su presencia durante la perforación en los campos de Castilla y Chichimene.

1.3.2 Geología estructural. En el trabajo de grado de Robayo y Rodriguez¹³, asocian el reservorio del Campo Castilla a una trampa estructural. Ésta consiste en un pliegue anticlinal asimétrico y elongado de 10 km de largo por 4 km de ancho. Su eje presenta una orientación N60E y esta fallado en el flanco oriental. Además, se presume que las fallas normales e inversas presentes a lo largo de todo el sistema, parecen no ser sellantes debido a que su contacto agua petróleo no presenta cambios significativos en sus flancos.

A continuación, en la **Figura 3** se muestra un mapa de la estructura presente en el campo, tomado a partir de la base de la Formación Lutita E3, siendo ésta el sello de la trampa.

Figura 3. Mapa Estructural Formación Lutita E3



Fuente: Estudio Integrado de Crudos Pesados-Cuenca de los Llanos Orientales, Agencia Nacional de Hidrocarburos.

¹³ ROBAYO PERDOMO, Juan Sebastián y RODRIGUEZ PEÑA, Lina Paola. EVALUACIÓN TÉCNICO-FINANCIERA DE LAS OPERACIONES DE PERFORACIÓN PARA LA DISMINUCIÓN DE LOS TIEMPOS NO PRODUCTIVOS DURANTE LOS VIAJES EN LOS POZOS SELECCIONADOS DEL CAMPO CASTILLA. Trabajo de grado Ingenieros de petróleos. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América, 2016. p. 34-40.

1.3.3 Geología del Petróleo

1.3.3.1 Roca generadora. La recopilación del libro Petroleum Geology of Colombia¹⁴ indica que, a pesar de tener tres unidades con alto potencial generador, la Formación K1 Inferior es considerada la principal roca generadora a lo largo de casi toda la cuenca de los Llanos Orientales. Las lutitas de origen marino-continental presentes en este intervalo alcanzan espesores de entre 50' y 100', poseen un kerogeno tipo II y III, y tienen rangos de contenido total orgánico entre 1 y 3%.

1.3.3.2 Roca Reservorio. Las areniscas de las formaciones K2, K1 Inferior y K1 Superior son los intervalos de roca reservorio en el Campo Castilla, sin embargo, la formación K1 Superior no ha sido explotada comercialmente todavía. Su porosidad oscila en rangos de 10 a 30%.

1.3.3.3 Roca sello. La Lutita E3 es el sello local por excelencia, a pesar de que las intercalaciones lutíticas de las unidades K1 Inferior y Superior actúan como sellos intraformacionales.

1.3.3.4 Migración. La roca reservorio presente en la cuenca de los Llanos Orientales ha estado bajo el aporte de hidrocarburos generado por dos pulsos: el primero va desde el Eoceno temprano hace 55 Ma hasta el Mioceno tardío hace 11 Ma; y el segundo entre el Mioceno tardío hasta el presente.

1.4 HISTORIA DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO CASTILLA

Una vez Ecopetrol asume la dirección del Campo Castilla en el año 2000, el cual producía un aproximado de 13,000 BPD; a partir de este momento se inició la ardua labor de generar un desarrollo adicional, el cual consto de una revisión geológica del yacimiento, perforación de nuevos pozos, la reingeniería de los pozos existentes, etc; con una inversión de aproximadamente 250 millones de dólares.

Esto permitió a Ecopetrol S.A. alcanzar una estabilidad de producción cercana a los 20.000 barriles por día; en el 2003 se ve reflejada la inversión inicial que se aproximaba a los 50 millones de dólares que permitirían estar por encima de los 32.000 BOPD. El plan de explotación de Ecopetrol continuo a través de los años con el fin de incrementar su producción; en el 2014 alcanzó un aproximado de 104.405 BDPD la cual fue superada en el 2015 por más de 20.000 barriles. En el año 2016 Ecopetrol S.A detuvo en su totalidad las actividades de exploración dados los bajos precios del WTI (West Texas Intermediate) donde de continuar entraría en un déficit financiero; para evitarlo fue requerido innovación y optimización en áreas administrativas, áreas productivas y evaluación de procesos.

¹⁴ SARMIENTO, Luis Fernando. Petroleum Systems. En: Petroleum Geology of Colombia. Medellín, Colombia: Fabio Cediell, 2011. p. 134-142.

1.5 MÉTODOS DE PRODUCCIÓN

El Campo Castilla es un activo petrolero el cual ha sido estudiado exhaustivamente lo que ha permitido determinar tanto las características del mismo yacimiento como las propiedades del petróleo ubicado en las formaciones K1, K2 y T2; adicional a esto cuenta con un acuífero activo de gran extensión el cual aporta energía al mismo la cual se ve reflejada en la presión estable cuando el yacimiento se encuentra en condiciones estáticas.

Dadas las condiciones del aceite, se ha clasificado en petróleo pesado y extra pesado lo cual no le permite llegar a superficie por sí mismo, aunque se tenga como mecanismo principal el acuífero. Por consiguiente, se inició su extracción con bombeo mecánico ya que es un sistema económico, ya que el campo aumento su produccion actualmente se implementó el sistema de bombeo electrosumergible.

1.6 NUMERO DE POZOS

Desde la perforación del pozo Castilla Uno (Ca-1) y con los pozos A2 que fueron el Ca-2, Ca-3 y Ca-4 con los cuales se delimito el yacimiento y se declaró la comercialidad del campo; desde su descubrimiento en la administración de Chevron se perforaron cerca de 100 pozos ubicados en el Campo Castilla Norte.

Se mantuvo así hasta el año 2004 donde Ecopetrol inicio su plan de perforación que duro hasta 2008 en cual perforo alrededor de 140 pozos de desarrollo que han sido complementados con más unidades al pasar de los años; en el año 2016 Ecopetrol S.A como administrador actual del campo perforo 27 pozos y en el año 2017 se perforaron 51 más; desde hace aproximadamente los pozos se vienen perforando en tipo “J” dadas las ventajas del mismo, alrededor del 2014 dichos ángulos de inclinación comenzaron a ser reducidos para optimizar su manejo. Provisto que las formaciones productoras o de interés son K1 y K2, es necesario llevar los pozos perforados a profundidades medidas (MD) de 9000 pies y profundidades verticales verdaderas (TVD) de 7000 pies. Actualmente Ecopetrol S.A. tiene bajo su intervención 553 pozos de los cuales 12 son CRA, 17 empleados para disposal y otros pocos abandonados dada su poca o nula rentabilidad

Cada pozo perforado tiene como objetivo principal ser comercialmente rentable y sostenible respecto a su opex, esto se ha logrado a través de los años en merito a los números presentados en la **Grafica 1** donde muestra la producción anual del Campo Castilla, lo que hace que sea una operación completamente eficaz.

Grafica 1. Produccion total por año en el Campo Castilla.



1.7 CARACTERISTICAS DEL YACIMIENTO.

Dado que en el Campo Castilla las formaciones de interés son K1 Inferior y K2, las cuales proporcionan crudo pesado y extra pesado, es esencial el análisis de estas, por ello en la **Tabla 1** se muestran las propiedades petrofísicas de las formaciones Gacheta y Une respectivamente.

Tabla 1. Propiedades petrofísicas del Campo Castilla.

PARAMETRO	UNIDAD K1	UNIDAD K2
Litofacies	Arena Laminada	Arena Homogénea
Tipo de crudo	Aceite Negro	Aceite negro
Mecanismo de empuje	Gas en Solución	Acuífero Activo
Fracturas Naturales	No	Si
Permeabilidad (md)	1-1667	465-2423
Porosidad (%)	10,8 - 28	13,9 - 23,4
Saturación de Agua Inicial (%)	20	20
Espesor Neto (ft)	39 - 109	203 - 528
Presión Actual Promedio (Psi)	2691	2691
Riesgo de Inestabilidad	Moderado	Bajo
Temperatura (°F)	193	198
Gravedad Especifica del Gas	0.906	0.906
Gravedad API	13,7	20
GOR (scf/stb)	100 - 300	100 - 300
Presión de Burbuja (Psi)	90	148

Fuente: HOYOS, Rivas; LOZA, Jaime; CALDERON, Zuly. Metodología para la selección de pozos candidatos a perforar en condiciones de bajo-balance. Aplicación al campo Castilla de Ecopetrol S.A. En: El reventón energético. Vol. 9 N°2 (Jul-2011); Pág. 67

2. DISEÑOS DE LAS BROCAS 12 ¼" DE ULTERRA CON CALIBRE DE 2.5" Y 4" EMPLEADAS EN EL CAMPO CASTILLA

En este capítulo se discute toda la información recopilada durante las corridas con los diseños anteriores; es decir, con el diseño de broca con calibre de 2.5" y de 4" trabajados por Ulterra™, los cuales se describen con sus respectivos ensamblajes de fondo (BHA). Sin embargo, para entender mejor el funcionamiento de la broca y los aspectos que pueden modificar su desempeño, es necesario hacer una revisión de las generalidades de las brocas, empezando desde su historia y evolución al largo del tiempo, como también sus tipos y funcionamiento. Se explican los dos tipos de brocas tanto de conos giratorios (tricónicas) como de cortadores fijos (PDC), se describen sus características y su clasificación IADC. Se finaliza con una descripción de las herramientas encargadas del trabajo y sus correspondientes ensamblajes de fondo corridos en los pozos C322, C342 y C361 con las brocas de calibre de 2.5" y los pozos C217, C316, y C471 con las brocas de 4" en el Campo Castilla.

2.1 COMPONENTES TEORICOS DE PERFORACION

Las brocas o barrenas son las herramientas encargadas de penetrar los estratos litológicos que se encuentran en el subsuelo durante la etapa de perforación, es decir son las responsables directas de la perforación de un pozo petrolero.

Se pueden clasificar en brocas de cuerpo fijo o con elementos rodantes de acuerdo con su diseño y principio de funcionamiento. En las brocas de cuerpo fijo se usa un bloque macizo al cual se le añaden elementos cortantes por medio de la soldadura, mientras que las de elementos rodantes constan generalmente de dos o tres conos móviles (brocas tricónicas) que giran alrededor de su eje y que tienen insertos los cuales se encargan de triturar la roca en el fondo.

Históricamente las brocas tricónicas han sido las más utilizadas en la industria petrolera debido a su gran versatilidad, sin embargo, debido a los requerimientos direccionales y la evaluación bajo simuladores se ha optado cada vez más por el uso de brocas de cortadores fijos, más específicamente brocas PDC.

En efecto, la broca está sometida a condiciones extremas de presión y temperatura que obliga a los fabricantes no solo a diseñar brocas que alcancen nuevas marcas en tasas de perforación, sino también a garantizar que se podrá llegar a término de la fase con el mínimo desgaste sobre la estructura de corte y en general sobre la herramienta en conjunto.

Acorde con esto, los ingenieros han cambiado las prácticas de perforación, pasando de forzar la broca hasta su total destrucción al método actual, que busca cuidar los elementos cortantes para conservar la eficiencia de corte a lo largo de toda la fase.

Adicionalmente las empresas fabricantes han optado por tener un representante encargado durante la perforación, que se encarga de monitorear su funcionamiento

y de controlar el desgaste causado en cada corrida. De esta manera se garantiza que la herramienta funcione de manera eficiente, teniendo como resultado una amplia recopilación de la información necesaria para mejorar continuamente su diseño. Por este motivo es importante describir los conceptos básicos y aquellos relacionados con la mecánica detrás del funcionamiento de este tipo de brocas.

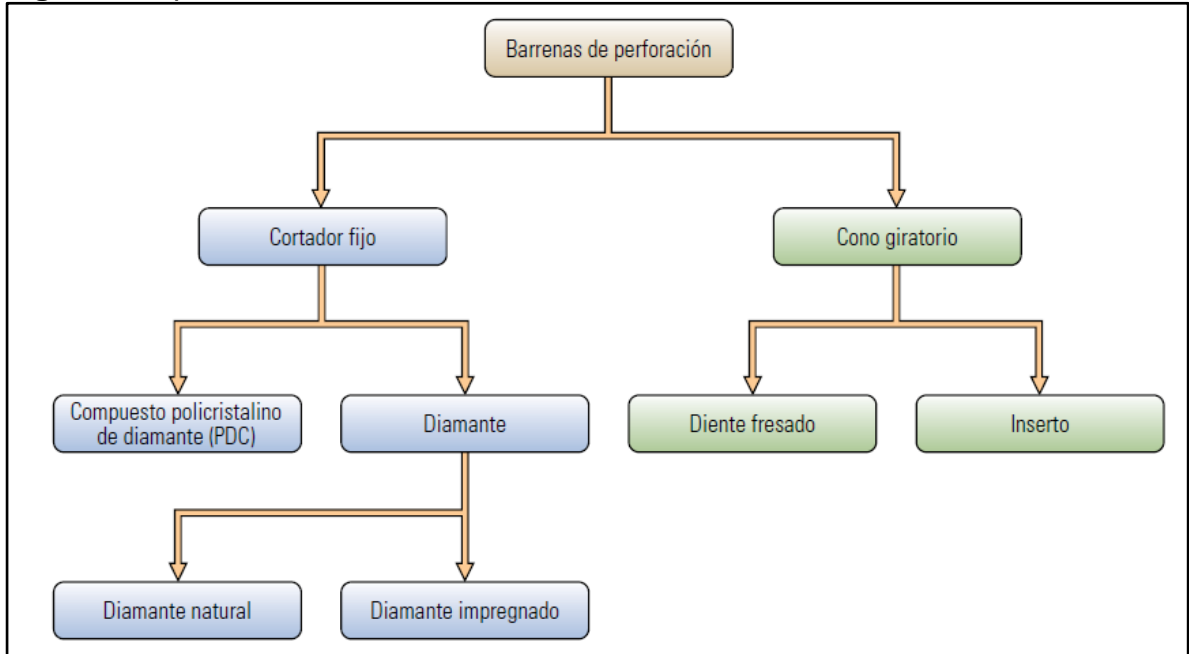
2.1.1 Tipos de brocas. Dado que las brocas es una de las herramientas más importantes en la operación de perforación en pozos petroleros; tomando como factor crítico la ROP que se desea, es indispensable tener en cuenta el tipo y diseño de la broca a emplear. Anteriormente las brocas eran seleccionadas bajo parámetros de dureza de las formaciones, la profundidad de cada intervalo pronosticado a atravesar y la hidráulica de perforación.

Hoy en día se debe hacer un análisis no solo de durabilidad, sino de aprovechamiento de las características de la broca, su resistencia a esfuerzos en el hoyo, control de flujo, resistencia a las vibraciones, etc. Todo esto va de la mano con los parámetros de perforación adecuado para obtener resultados favorables de la operación.

Teniendo como resultados preliminares un pozo en calibre y con una tortuosidad muy leve, lo cual conlleva a efectos positivos en operaciones consecuentes como la bajada de revestimiento, la cementación y la puesta en producción.

En la **Figura 4** se evidencia una rápida clasificación de las brocas las cuales se dividen en dos grandes grupos de conos giratorios y de cortadores fijos, además se puede entrar en detalle de cada grupo, teniendo en cuenta los requerimientos para los cuales se desea emplear la broca.

Figura 4. Tipos de brocas



Fuente: SCHLUMBERGER. El diseño de las barrenas: de arriba hasta abajo. Volumen 23 N°2, Houston TX, 2001, p. 6.

2.1.1.1 Brocas de conos giratorios. En principio las brocas de conos giratorios fueron diseñadas en la década de 1910 las cuales dieron paso a pensar en operaciones más complejas dada su resistencia a parámetros más agresivos, manteniendo una vida útil óptima. De esta manera se volvieron una opción para el ahorro de tiempo lo cual beneficia monetariamente a la operadora.

Se sabe que existen variaciones en las brocas de conos giratorios, la teoría básica indica que los conos cortos giran más, los cuales ocasionan un efecto de trituración en las formaciones duras; mientras que los conos con dientes o insertos largos son seleccionados cuando se conoce que son formaciones blandas.

En la **Figura 5** se muestra la relación que tienen los dientes o insertos de las brocas con la dureza de la formación presente.

Figura 5. Relación de los dientes de las brocas triconicas con la dureza de la formación.

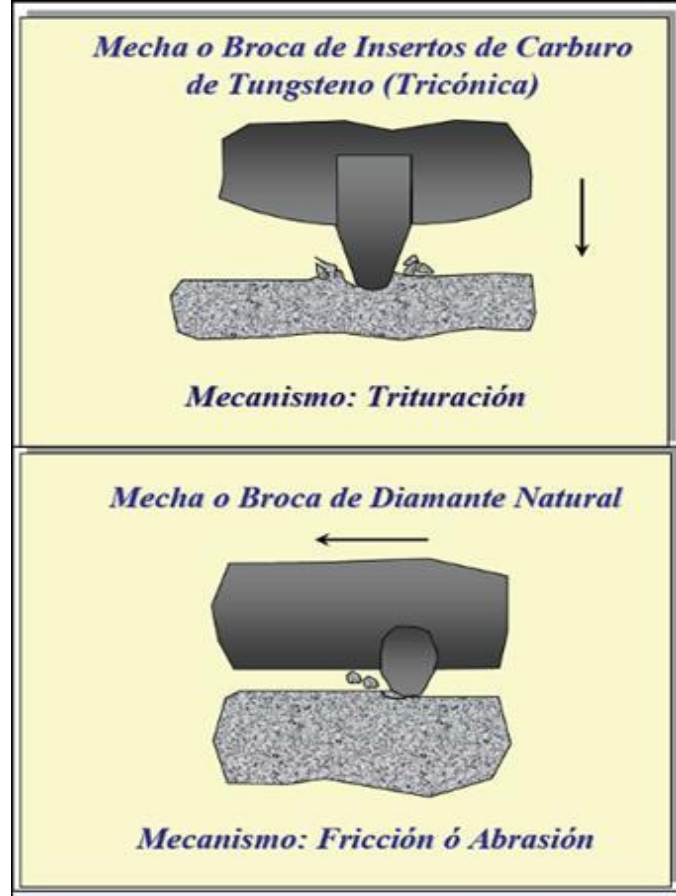


Fuente: SCHLUMBERGER, oilfield review, Bordes cortantes, 2000, p. 40.

➤ **Mecanismos de corte.** La estructura de corte de las brocas las caracteriza por ser el componente en el cual se basa la forma en que la broca pasa a través de los estratos del subsuelo. Existen dos mecanismos de corte, falla por esfuerzo o compresión y falla por esfuerzo cortantes.

En el caso de las brocas triconicas el mecanismo de corte que emplea es la falla por esfuerzo de compresión, donde la broca inserta los dientes en la formación, posteriormente con el movimiento hacia el interior de esta, da como resultado el corte la roca, en la **Figura 6** se muestra cómo se inserta el diente en la formación y como esta misma sede ante este esfuerzo.

Figura 6. Falla por esfuerzo de compresión.



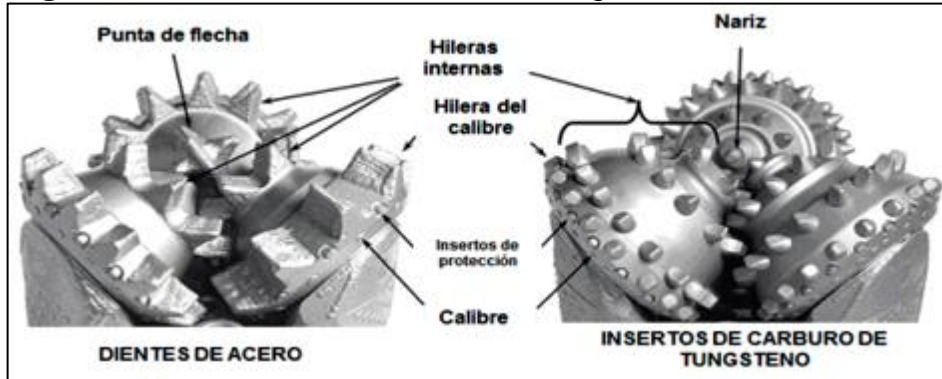
Fuente: VERA, Raysha. "mechas e hidráulica aplicada para las mismas". {En línea}. {14 febrero de 2018}.
Disponble en:
<<http://perfob.blogspot.com.co/2011/06/mechas-e-hidraulica-aplicada-para-las.html>>.

➤ **Partes de las brocas.** Es esencial entender los elementos de las brocas de perforación como un todo, una unidad. Cada unidad por sí sola no cumple con los requerimientos de una operación de perforación de pozos, por ello se hablará de cada elemento correspondiente a las brocas de conos giratorios y a las de cortadores fijos para poder así ser entendidas en su totalidad.

Las brocas de conos giratorios constan de un mayor número de elementos, los cuales son dependientes de los demás para su óptimo funcionamiento, por consiguiente, es necesaria una sinergia entre cada uno de los elementos para que la misma logre atravesar los estratos de manera correcta.

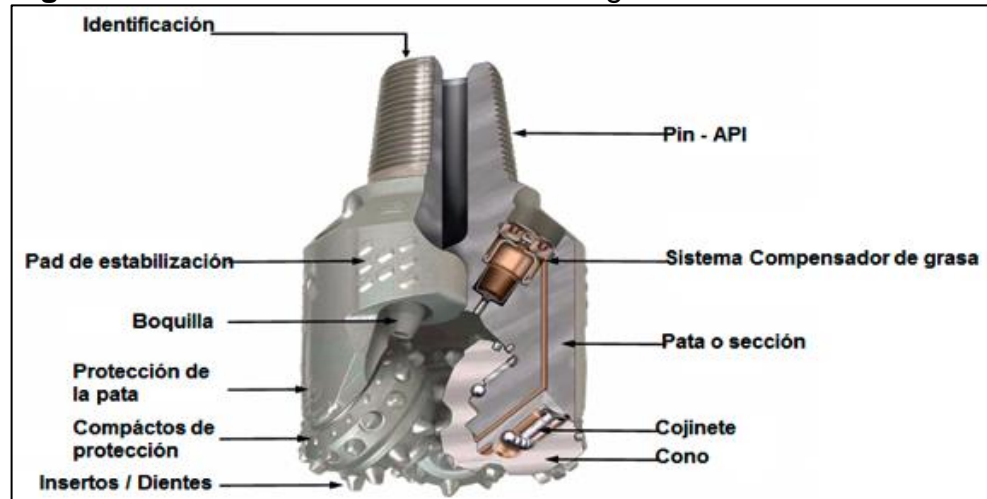
Por ello en la **Figura 7** se evidencia parcialmente los componentes de la parte superior de las misma, a diferencia en la **Figura 8** muestra su estructura interna y componentes de la sección inferior.

Figura 7. Partes de una broca de conos giratorios



Fuente: RAMOS RAMOS, Jorge Luis. Estado del arte de brocas de perforación [revista de investigación, perforación]. [Colombia]: consultado el día [11/02/2018] disponible en < <http://hdl.handle.net/20.500.11839/784>>

Figura 8. Partes de una broca con conos giratorios



Fuente: RAMOS RAMOS, Jorge Luis. Estado del arte de brocas de perforación [revista de investigación, perforación]. [Colombia]: consultado el día [11/02/2018] disponible en < <http://hdl.handle.net/20.500.11839/784>>

Como se ilustra en las **Figura 7** y **Figura 8** hay gran número de elementos que componen las brocas de conos giratorios, pero cabe resaltar tres componentes principales que son aquellos los que le dan sentido a una broca triconica y son los siguientes:

- Conos giratorios / estructura de corte: Para la identificación de los conos existen un método sencillo para el cual basta con tener una vista superior de los conos y resaltar el que tiene la nariz, partiendo de él se comienza a contar en sentido de las agujas del reloj hacia el cono número dos y finalmente el número 3.

Dado que existen distintos ambientes de trabajo y las condiciones de operación varían, se han determinado dos tipos de estructura de corte. Existen los insertos de carburo de tungsteno (TCI) y los dientes de hacer (ST).

- **Cojinetes y sellos:** Existen dos tipos de cojinetes, estos son a rodillo y a fricción donde su principal función es absorber el empuje del peso sobre la broca y mantener el cono en la sección del cabezal. Por otra parte, los sellos garantizan la hermeticidad del cojinete, manteniendo el lubricante adentro y el lodo de perforación afuera. Esto permitió incrementar la vida útil del cojinete, así como aumentar el peso sobre la broca (WOB) para atravesar formaciones de mayor dureza.
- **Cuerpo de la broca:** También llamada sección del cabezal la cual surge a partir de piezas de acero forjadas, posteriormente sometido a tratamientos químicos y térmicos donde su dureza y resistencia a la tensión y fatiga resulta beneficiosa para la operación.
- **Clasificación IADC.** La clasificación IADC para brocas de conos giratorios fijos describe 4 características principales de la herramienta usando una referencia que contiene 3 números y una letra. De esta manera, se obtiene información de su posible aplicación que depende más de su diseño y componentes que del tipo de formación que se desea perforar.

En la **Tabla 2** se muestra el primer dígito el cual identifica el tipo de estructura de corte con respecto al tipo de formación.

Tabla 2. Relación tipo de estructura de corte con respecto al tipo de formación.

Brocas con dientes de acero	Formaciones suaves con baja resistencia a la compresión y alta capacidad de perforación	1
	Formaciones duras medianas a medias con alta resistencia a la compresión	2
	Formaciones abrasivas semi abrasivas y abrasivas	3
Brocas de inserto	Formaciones suaves con baja resistencia a la compresión y alta capacidad de perforación	4
	Formaciones suaves a medianas con baja resistencia a la compresión	5
	Formaciones duras medias con alta resistencia a la compresión	6
	Formaciones Semi abrasivas y Abrasivas duras	7
	Formaciones extremadamente duras y abrasivas	8

Fuente: McGehee, D. Y., Dahlem, J. S., Gieck, J. C., Kost, B., Lafuze, D., Reinsvold, C. H., & Steinke, S. C. (1992, January 1). The IADC Roller Bit Classification System. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/23937-MS

El segundo dígito corresponde a la dureza de la formación presente la cual consta de una escala del 1-4 donde uno hace alusión a la formación más blanda y 4 se refiere a la formación más dura.

En la **Tabla 3** se muestra el tercer dígito la cual describe las distintas combinaciones de cojinetes para un trabajo determinado.

Tabla 3. Sistema de cojinetes

Cojinetes de rodillo estándar	1
Cojinetes de rodillo refrigerados por aire	2
Cojinetes de rodillo con calibre protegido	3
Cojinetes de rodillo sellados	4
Cojinetes de rodillo sellados- calibre protegido	5
Cojinetes de fricción sellados	6
Cojinetes de fricción sellados - calibre protegido	7

Fuente: McGehee, D. Y., Dahlem, J. S., Gieck, J. C., Kost, B., Lafuze, D., Reinsvold, C. H., & Steinke, S. C. (1992, January 1). The IADC Roller Bit Classification System. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/23937-MS

Por último, se muestra en la **Tabla 4** la letra que hace referencia a las distintas características disponibles, dado que se haya hecho una modificación para un mejor resultado.

Tabla 4. Características adicionales

A	Aplicación de aire
B	Sello de cojinete especial
C	Chorro central
D	Control de desviación
E	Boquillas extendidas
G	Calibre / cuerpo protegido
H	Aplicación de dirección horizontal
J	deflexión del chorro
L	Almohadillas de arrastre
M	Aplicación de motor
S	Dientes de acero estándar
T	Broca boconica
W	Estructura de corte mejorada
X	Predominantemente inserto de diente de cincel
Y	Diente de inserto cónico
Z	Otra forma de inserto

Fuente: McGehee, D. Y., Dahlem, J. S., Gieck, J. C., Kost, B., Lafuze, D., Reinsvold, C. H., & Steinke, S. C. (1992, January 1). The IADC Roller Bit Classification System. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/23937-MS

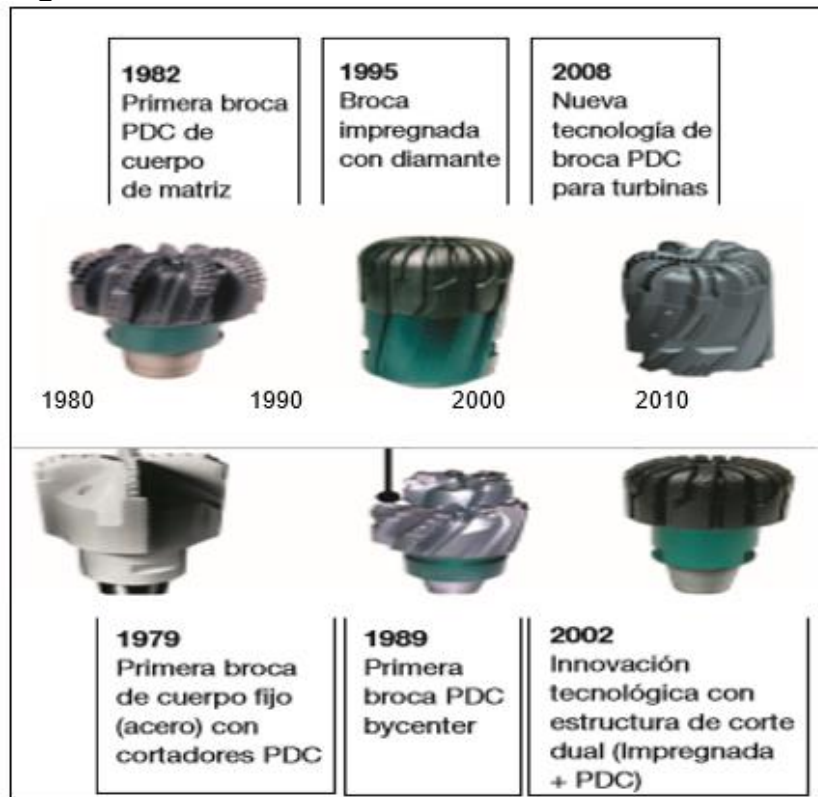
2.1.1.2 Brocas de cortadores fijos. Las brocas de diamantes policristalinos compactos o PDC por sus siglas en inglés, fueron introducidas en la industria en los 70's y están compuestas por un cuerpo fijo al cual se le añaden cortadores en forma de disco. "Estos cortadores están constituidos por una capa de diamantes policristalinos sintéticos adheridos a un sustrato de carburo de tungsteno lo cual permite fijarlo al cuerpo más efectivamente"¹⁵.

Las primeras brocas PDC usaban prácticamente el mismo diseño de cuerpo fijo, solo se reemplazaban los insertos de diamantes por los cortadores PDC, sin embargo, se tuvieron varios problemas relacionados con el régimen de flujo del lodo en fondo, que fueron críticos para la limpieza del pozo. Por lo tanto, se probaron varias configuraciones de flujo que disminuyeran el fenómeno de embotamiento, además de otras modificaciones que se enfocaron en corregir las limitaciones de desempeño ya preexistentes en las brocas de cuerpo fijo.

¹⁵ RAMOS RAMOS, Jorge Luis. Estado del arte de brocas de perforación. En: Revista De Investigacion: Perforacion. Jul 2,. vol. 4, no. 2, p. 99-114

En la **Figura 9** se ilustra una línea de tiempo de las innovaciones más significativas en el diseño de brocas PDC, desde sus inicios hasta las más especializadas usadas en turbinas de fondo.

Figura 9. Avances históricos en el diseño de brocas PDC



Fuente: RAMOS RAMOS, Jorge Luis. Estado del arte de brocas de perforación [revista de investigación, perforacion]. [Colombia]: consultado el día [11/02/2018] disponible en <<http://hdl.handle.net/20.500.11839/784>>

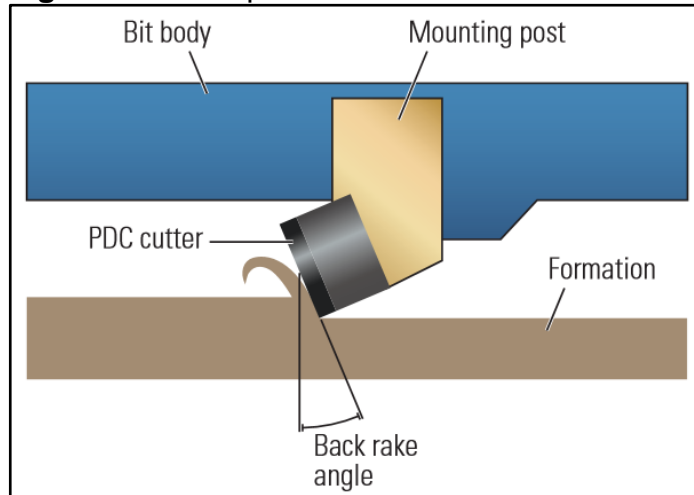
➤ **Mecanismos de corte.** El mecanismo de corte es el principio que aplica la broca para penetrar las formaciones, el esfuerzo cortante que explica la mecánica de las brocas PDC.

Como se muestra en la **Figura 10** en estas brocas el mecanismo de corte es por cizallamiento y se puede controlar la agresividad con la que los cortadores atacan la roca; este comportamiento se puede reproducir en formaciones medias a duras, en las cuales se produce una deformación del estrato antes del fallamiento de la roca.

La agresividad con la que ataca el cortador a la formación depende directamente del ángulo de entrada hacia la formación, en la imagen el back rake angle. De esta manera a medida que el ángulo formado entre el cortador y la formación, se acerca a 90° su agresividad es mayor. Sin embargo esto no significa que sea más eficiente

ya que a medida que se aumenta la agresividad, la posición del cortador es mas vulnerable y es mas probable que la soldadura falle.

Figura 10. Falla por esfuerzo cortante

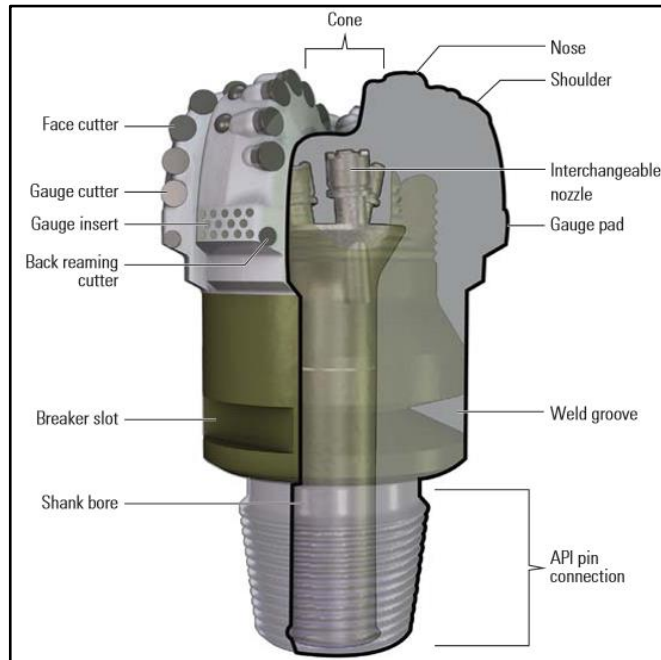


Fuente: Greg Bruton, Ron Crockett, Dave Denboer, PDC Bit Technology for the 21st Century, 2014, pag 4.

➤ **Partes de las brocas.** Se sabe que las brocas PDC son las más usadas actualmente, dado que presentan una mejor relación ROP vs durabilidad. Por lo tanto, una ventaja clara es la ausencia de partes móviles. En este tipo de broca las partes son unidas mediante soldadura a una única matriz sólida.

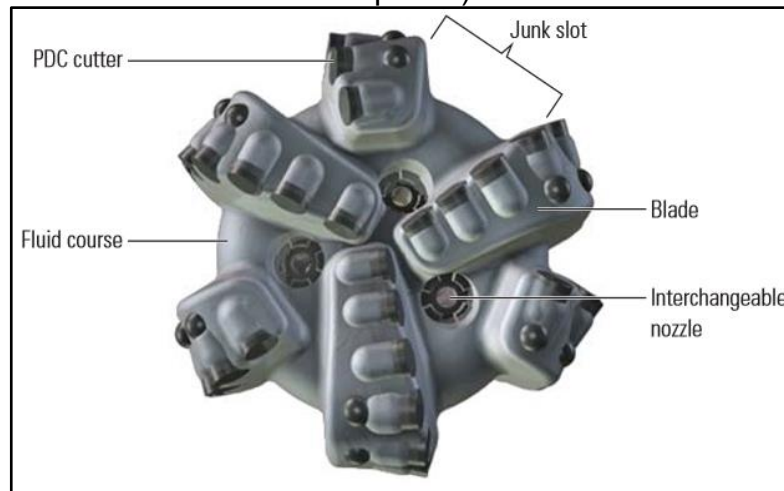
Los elementos cortantes denominados cortadores son fijados a las aletas y a medida que la roca es perforada, los ripios son transportados por medio del flujo de lodo a través de las boquillas y por la ranura de desperdicios; el tamaño de cortador, número de aletas y área de flujo en las boquillas es configurado de acuerdo con las necesidades de cada proyecto. En la **Figura 11** y **Figura 12** se muestran las partes principales de las brocas PDC.

Figura 11. Partes principales de las brocas PDC



Fuente: Greg Bruton, Ron Crockett, Dave Denboer, PDC Bit Technology for the 21st Century, 2014, pag 4.

Figura 12. Partes principales de las brocas PDC (vista de planta)



Fuente: Greg Bruton, Ron Crockett, Dave Denboer, PDC Bit Technology for the 21st Century, 2014, pag 4.

- **Shank bore.** Se refiere a la conexión roscada mediante la cual se une la estructura cortante a la sarta de perforación, está hecha de aleación de acero.
- **Estructura de corte.** Como se muestra en la vista de planta de la **Figura 12** la estructura de corte involucra todas las partes que ayudan directamente a la perforación de las formaciones, en esta se incluyen las boquillas, las aletas y los cortadores PDC.
- **Perfil de la corona.** El perfil de la corona se refiere a la forma de la estructura de corte de la broca, esta varía de acuerdo con la relación de tamaños entre la estructura interna y externa de la cara de la broca. Del perfil depende el desgaste de la estructura de corte y también la estabilidad de la broca.

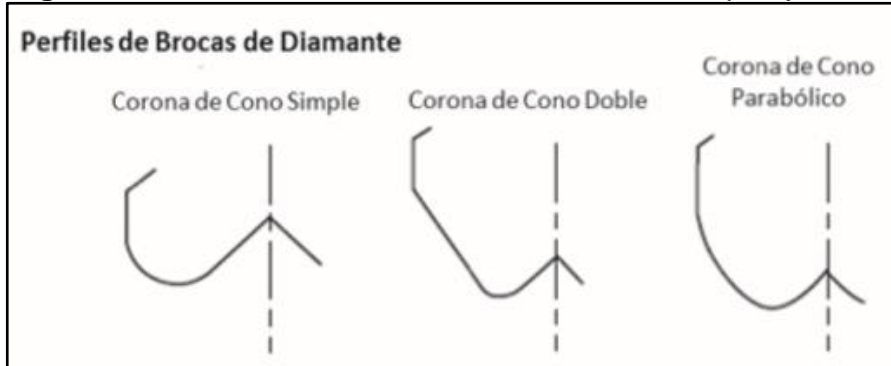
En el mercado se ofrecen diferentes formas o perfiles para la corona dependiendo del trabajo que se vaya a realizar, por ejemplo, un diseño más ahusado permite usar mayor peso sobre la broca para aumentar las ROP's; por el contrario, un perfil parabólico mejora la limpieza del pozo.

Como se muestra en la **Figura 12** las aletas que componen la corona tienen a su vez partes que cambian la interacción de la broca con la formación dependiendo de su configuración geométrica.

- **Cono** se llama a la parte interna de la aleta y se encarga de la estabilización de la broca.
- **Nariz** es la sección más pronunciada de la corona y por eso es la primera en tener contacto con la formación, también es la sección que más resiente los cambios en el WOB.
- **Hombro** es la sección que le sigue a la nariz y contiene la mayor cantidad de cortadores, de su forma depende fuertemente el perfil de la broca.
- **Calibre** esta parte de la aleta tiene el diámetro nominal de la broca y está fuertemente ligada a la calidad del hueco, muchas veces contiene cortadores especiales que permiten repasar la sección perforada hacia arriba para evitar pegas.

Al igual que las brocas de diamantes naturales, las PDC presentan 4 diseños básicos de perfil que se pueden apreciar en la **Figura 13** con ciertas modificaciones que mejoran la efectividad para cada proyecto.

Figura 13. Perfiles de la corona en brocas de cuerpo fijo



Fuente: RAMOS RAMOS, Jorge Luis. Estado del arte de brocas de perforación [revista de investigación, perforación]. [Colombia]: consultado el día [11/02/2018] disponible en < <http://hdl.handle.net/20.500.11839/784>>, Modificado por los autores

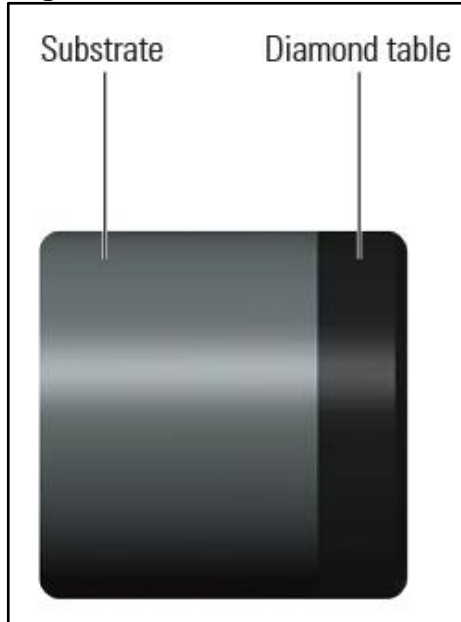
Las coronas con cono más plano distribuyen el peso sobre la broca más equitativamente sobre todos los cortadores lo que permite alcanzar mayores ROP's, sin embargo, el desgaste de los cortadores externos es mucho más pronunciado que los internos y consecuentemente no se aprovecha todo el potencial de los últimos; además este diseño presenta baja profundidad de corte en formaciones duras, lo cual implica el aumento del peso sobre la broca y una posible sobrecarga sobre los cortadores.

“Por otro lado, las coronas dobles y de perfil parabólico permiten ubicar un mayor número de cortadores en contacto con la formación, es decir que se tiene un desgaste más uniforme. Además, las fuerzas laterales causadas por el peso sobre la broca tienen un efecto de estabilización rotacional y direccional sobre la broca”¹⁶.

- **Cortadores:** Los cortadores PDC son elementos cortantes en forma de disco que se fabrican a partir de diamante sintético en polvo, unido a un sustrato de carburo mediante condiciones extremas de presión y temperatura, como se muestra en la **Figura 14**.

¹⁶ KERR, Callin Joe. PDC Drill Bit Design and Field Application Evolution. En: Journal of Petroleum Technology. Mar. vol. 40, no. 3, p. 327-332

Figura 14. Cortador PDC



Fuente: Greg Bruton, Ron Crockett, Dave Denboer, PDC Bit Technology for the 21st Century, 2014, pag 3.

El tamaño, la densidad de cortadores y el ángulo de ataque a la formación son factores que dependerán de la litología que se va a perforar.

“A medida que se aumenta el número de cortadores se disminuye el peso efectivo sobre cada cortador y por lo tanto la ROP decrece, en contraste el desgaste de cada uno se reduce”¹⁷.

Por otro lado, el ángulo de entrada del cortador busca mantener un equilibrio entre la durabilidad (menor ángulo) y la profundidad de corte (mayor ángulo) que permita optimizar la ROP sin comprometer la vida útil de la broca.

➤ **Clasificación IADC.** La clasificación IADC para brocas de cortadores fijos describe 7 características principales de la herramienta usando una referencia que contiene 3 números y una letra. De esta manera, se obtiene información de su posible aplicación que depende más de su diseño y componentes que del tipo de formación que se desea perforar.

Como se muestra en la **Tabla 5**, la letra indica el material del cual está compuesto el cuerpo de la broca.

¹⁷ Ibid., p.

Tabla 5. Material de la broca

Material del cuerpo	
Diamante Natural	D
Matriz PDC	M
Acero PDC	S
Matriz TSP	T

Fuente: Brandon, B.D., Cerkovnik, J., Koskie, E. et al. 1992. Development of a New IADC Fixed Cutter Drill Bit Classification System. Presented at the SPE/IADC Drilling Conference, New Orleans, Louisiana, 18-21 February. SPE-23940-M

En la **Tabla 6** se muestra el primer número el cual indica la densidad de los cortadores. El número no es necesariamente el número de cortadores por aleta.

Tabla 6. Densidad de los cortadores

Densidad de cortadores	
PDC	1
	2
	3
	4
Diamante	6
	7
	8

Fuente: Brandon, B.D., Cerkovnik, J., Koskie, E. et al. 1992. Development of a New IADC Fixed Cutter Drill Bit Classification System. Presented at the SPE/IADC Drilling Conference, New Orleans, Louisiana, 18-21 February. SPE-23940-M

El segundo número indica el tamaño de los cortadores en brocas PDC o en brocas de diamante el tipo de broca. Como se evidencia en la **Tabla 7**.

Tabla 7. Tamaño de los cortadores

Tamaño del cortador (mm)		
PDC	1	>24
	2	24-14
	3	14-8
	4	<8

Fuente: Brandon, B.D., Cerkovnik, J., Koskie, E. et al. 1992. Development of a New IADC Fixed Cutter Drill Bit Classification System. Presented at the SPE/IADC Drilling Conference, New Orleans, Louisiana, 18-21 February. SPE-23940-M

En la **Tabla 8** se muestra la nomenclatura la cual es empleada para definir el tipo de broca que se está usando y así reconocer sus características.

Tabla 8. Nomenclatura del tipo de las brocas

Tipo de broca		
Diamante	1	Diamante natural
	2	TSP
	3	Diamante natural y TSP
	4	Impregnada

Fuente: Brandon, B.D., Cerkovnik, J., Koskie, E. et al. 1992. Development of a New IADC Fixed Cutter Drill Bit Classification System. Presented at the SPE/IADC Drilling Conference, New Orleans, Louisiana, 18-21 February. SPE-23940-M

Por último, como se enseña en la **Tabla 9** el tercer número indica el perfil de la broca.

Tabla 9. Perfil de la broca

Perfil	
Perfil Plano	1
Perfil Corto Parabólico	2
Perfil Medio Parabólico	3
Perfil Largo Parabólico	4

Fuente: Brandon, B.D., Cerkovnik, J., Koskie, E. et al. 1992. Development of a New IADC Fixed Cutter Drill Bit Classification System. Presented at the SPE/IADC Drilling Conference, New Orleans, Louisiana, 18-21 February. SPE-23940-M

2.1.2 Hidráulica de perforación. “La hidráulica está considerablemente influenciada por las propiedades de flujo del fluido de perforación, como la densidad, viscosidad, rata de flujo, y velocidad de flujo. La cantidad de energía gastada en la broca determina el grado al cual la hidráulica puede ser optimizada, sea para la limpieza del hueco o bien para la optimización del flujo a estado laminar.”¹⁸

Caída de presión en la broca: El paso a través de la broca, representa la caída de presión más importante del sistema hidráulico, y tiene como función limpiar los cortes para evitar el embotamiento de la broca, está dada por la **Ecuación 1**.

Ecuación 1. Caída de presión en la Broca.

$$\Delta P_b = \frac{156.5 \times Q^2 \times MW}{((J_1^2) + (J_2^2) + \dots + (J_n^2))^2}$$

Fuente: BAKER HUGHES INTEQ, Manual de ingeniería, Fluidos

Donde:

ΔP_b = Caída de presión en la broca (psi)

Q = Caudal (gpm)

MW =Mud weight o densidad del lodo (lb/gal)

J = Diametro de boquilla (1/32)

¹⁸ HAWKER,Davidi; VOGT,Karen y ROBINSON,Allan.. Procedimientos Y Operaciones En El Pozo. Manual de Perforacion. Alberta, Canada: 2001. p. 58

La capacidad del fluido de remover los recortes en fondo y transportarlos hasta superficie depende del potencial hidráulico. El potencial hidráulico está dado por el producto de la caída de presión en la broca y el caudal proporcionado por las bombas .

Ecuación 2. Potencial hidráulico en la broca

$$HHP_b = \frac{\Delta P_b \times Q (\times \times \text{Caudal})}{1714(\text{Imperial}) \text{ or } 60(\text{Metric})}$$

Fuente: BAKER HUGHES INTEQ, Manual de ingeniería, Fluidos

Donde:

BHHP = Potencial hidraulico en la broca (HP)

ΔP_b = Caída de presión en la broca (psi)

Q = Caudal (gpm)

Este potencial hidráulico depende de la capacidad de la bomba, sin embargo, un aumento indiscriminado en el caudal solo aumentara las pérdidas de presión a través del sistema y la potencia necesaria para vencer la resistencia a la circulación. Por lo tanto, la mejor manera de optimizar la potencia hidráulica en la broca es mediante el diámetro de las boquillas.

Para que este criterio se pueda aplicar equitativamente en cualquier pozo se llevó a términos de potencial hidráulico por pulgada cuadrada mediante la **Ecuación 3**.

Ecuación 3. Potencial hidráulico en la broca por pulgada cuadrada.

$$HSI = \frac{HHP_b \times 1.27}{(\text{Diametro broca})^2}$$

Fuente: BAKER HUGHES INTEQ, Manual de ingeniería, Fluidos

Donde:

HSI = Potencial hidraulico en la broca por pulgada cuadrada (HP/in²)

HHP_b = Potencial hidraulico en la broca (HP)

La velocidad de salida del fluido de perforacion depende del tamaño de las boquillas en la broca , es decir que variando su diámetro se puede controlar la fuerza con la que el fluido choca con la formación. Esta fuerza de impacto también se ve afectada por el caudal bombeado y por la densidad del fluido de perforacion como se ve en la **Ecuación 4**.

Ecuación 4. Velocidad de salida de fluido

$$V_n = \frac{417.2 \times Q}{(J_1)^2 + (J_2)^2 + \dots + (J_n)^2}$$

Fuente: BAKER HUGHES INTEQ, Manual de ingeniería, Fluidos

Donde:

V_n = Velocidad de salida de fluido (ft/seg)

Q = Caudal (gpm)

J = Diametro de boquilla (1/32)

Ecuación 5. Fuerza de impacto contra la formación

$$IF = \frac{V_n \times Q \times MW}{1930}$$

Fuente: BAKER HUGHES INTEQ, Manual de ingeniería, Fluidos

Donde:

IF = Fuerza de impacto (lb)

V_n = Velocidad de salida de fluido (ft/seg)

Q = Caudal (gpm)

MW = Mud weight o densidad del lodo (lb/gal)

Mediante la **Ecuación 6** se halla el concepto de fuerza de impacto disponible por pulgada cuadrada.

Ecuación 6. Fuerza de impacto por pulgada cuadrada

$$\frac{IF}{in^2} = \frac{IF \times 1.27}{(\text{Diametro broca})^2}$$

Fuente: BAKER HUGHES INTEQ, Manual de ingeniería, Fluidos

Donde:

$\frac{IF}{in^2}$ = Fuerza de impacto por pulgada cuadrada (psi)

IF = Fuerza de impacto (lb)

La optimización de hidráulica se puede enfocar de dos maneras usando parámetros que permitan cumplir los porcentajes óptimos de pérdidas de presión a lo largo del sistema:

➤ **Máxima fuerza de impacto hidráulico (I.H)** Para maximizar la fuerza de impacto hidráulico se debe procurar que el 51% de la presión disponible en superficie sea destinada a las pérdidas por fricción al interior y exterior de la tubería, y el 49% de la presión disponible se aplique a la broca.

➤ **Máximo caballaje hidráulico (H.P.H).** Para maximizar el caballaje hidráulico se busca que el 35% de la presión en superficie corresponda a pérdidas al interior y exterior de la tubería, mientras que el 65% de la presión disponible debe aplicarse a la broca.

La configuración y orientación de las boquillas también son optimizadas para minimizar la recirculación en la cara de la broca y así evitar los fenómenos de taponamiento y erosión en la matriz.

Mediante los diferentes arreglos y tamaños de boquillas se busca generar el área de flujo óptima para cumplir con las pérdidas de presión optimizadas. Un área de flujo mayor se utiliza para aumentar el potencial hidráulico mientras que uno menor mejora el impacto hidráulico. Como se muestra en la **Ecuación 7**.

Ecuación 7. Área total de flujo (TFA)

$$TFA = \frac{J_1^2 + J_2^2 + \dots + J_n^2}{1303}$$

Fuente: BAKER HUGHES INTEQ, Manual de ingeniería, Fluidos

Donde:

TFA= Total Flow area o área total de flujo

J = Diametro de boquilla (1/32)

2.1.3 Clasificación de desgaste para las brocas según la IADC. La IADC por sus siglas en ingles es conocida como la Asociación Internacional de Contratistas de Perforación creo una clasificación estándar para las brocas desgastadas tras su uso, en la cual se hace una descripción técnica de los daños a su integridad y componentes. Esta clasificación se emplea tanto para brocas de conos giratorios como de cortadores fijos, existen variaciones para diferenciar cuando se hace alusión a un tipo de broca de la otra.

En el **Cuadro 1.** se muestra el encabezado de la clasificación que reciben las brocas después de ser corridas en los pozos, independientemente de la fase, tipo o razón para ser extraída del mismo. Consta de 8 casillas con las cuales se conoce el estado final de la broca.

Cuadro 1. Parámetros de clasificación

Estructura de corte				B	G	Comentarios	
HILERAS INTERIORES	HILERAS EXTERIORES	DESGASTE	UBICACIÓN	COJINETES /SELLOS	CALIBRE 1/16"	OTRAS CARACT.	RAZON PARA SACARLA

Fuente: Reed Hycalog PDC & Roller Cone Product Technology Reference Information

Como se observa en el costado izquierdo, en las primeras dos casillas se hace alusión al estado de la estructura de corte, tanto en las hileras interiores como exteriores. Se usan valores numéricos del 0-8 en donde el 0 indica que el cortador esta nuevo y 8 indica que el cortador está ausente tras la corrida.

La casilla número 3 se indica el tipo de desgaste que sufrió la estructura de corte, en este caso no se usan valores numéricos, por el contrario, se usan dos letras en mayúscula las cuales representan un tipo de desgaste específico, en la **Tabla 10** y la **Tabla 11** se muestran las letras que corresponden cada tipo de desgaste tanto para brocas de cortadores fijos como de conos giratorios respectivamente.

Tabla 10. Desgaste de la estructura de corte brocas PDC

Broca de cortadores fijos	
BF	Falla de Adherencia
BT	Cortadores Rotos
BU	Embolada
CT	Cortadores cincelados
ER	Erosión
HC	Dañada por Calor
JD	Daño por chatarra metálica
LN	Tobera Perdida
LT	Cortador perdido
NR	No se puede volver a correr
PN	Tobera tapada
RG	Diámetro externo desgastado
RO	Desgaste anillado
RR	Se puede volver a correr
SS	Desgaste de auto afilado
TR	"Tracking"
WO	Broca lavada
WT	Cortadores gastados
NO	No tiene características de desgaste

Fuente: Reed Hycalog PDC & Roller Cone Product Technology Reference Information

Tabla 11. Desgaste de la estructura de corte brocas triconicas

Brocas de conos giratorios			
BC	Cono Roto	LN	Tobera perdida
BF	Falla de Hueso	LT	Dientes/Cortadores perdidos
BT	Dientes/Cortadores Rotos	OC	Desgaste descentrado
BU	Broca embolada	PB	Broca deformada
CC	Cono Agrietado	PN	Tobera tapada/pasaje de flujo tapado
CD	Cono atascado	RG	Calibre redondeado
CI	Interferencia de cono	RO	Desgaste anillado
CR	Cortado de núcleos	SD	Faldón dañado
CT	Dientes/cortadores cincelados	SS	Desgaste de auto afilado
ER	Erosión	TR	Tracking
FC	Desgaste en crestas planas	WO	broca lavada
HC	Dañada por calor	WT	Dientes/cortadores desgastados
JD	Daño por chatarra metálica	NO	No tiene características de desgaste
LC	Cono perdido		

Fuente: Reed Hycalog PDC & Roller Cone Product Technology Reference Information

Para finalizar la sección de Estructura de corte se completa la casilla de ubicación, la cual especifica donde se encuentra el desgaste mencionado anteriormente, esta casilla es llenada con una letra en mayúscula que representa una sección de la broca tanto de conos giratorios como de cortadores fijos. En la **Tabla 12** se evidencia las secciones en las cuales se dividen la broca de conos giratorios; así mismo en la **Tabla 13** las secciones de la broca de cortadores fijos.

Tabla 12. Secciones de la broca triconica

CONOS GIRATORIOS		
LETRA	DEFINICION	CONO
N	Hilera de la nariz	1,2,3
M	Hilera intermedia	
G	Hilera del calibre	
A	Todas las hileras	

Fuente: Reed Hycalog PDC & Roller Cone Product Technology Reference Information

Tabla 13. Secciones de la broca PDC

CORTADORES FIJOS	
LETRA	DEFINICION
C	CONO
N	NARIZ
T	AHUSTAMIENTO
S	HOMBRO
G	DIAMETRO

Fuente: Reed Hycalog PDC & Roller Cone Product Technology Reference Information

La casilla denominada B evalúa el estado de los cojinetes y solo aplica para las brocas de conos giratorios; dado que las de cortadores fijos no los poseen, se coloca una x en esta casilla, esto es el principal indicio para saber el tipo de broca a la cual pertenece la clasificación dada. Por otro lado, en el caso de las brocas triconicas se usa la combinación de un número y una letra. El número entra en una escala de 0-8 el cual representa el estado del cojinete, donde 0 indica que esta nuevo y 8 que ya el cojinete cumplió con su vida útil. La letra por su parte hace alusión a los sellos, que se califican bajo tres letras E indica que los sellos siguen efectivos, F indica que los sellos fallaron y por último la letra N que indica que no se pudo realizar la calificación.

Siguiendo con el orden de la calificación esta la letra G junto con un número, esto indica el diámetro actual de la broca, en el caso que la broca tras su corrida haya mantenido su diámetro original se coloca una letra I (in gauge), dado sea el caso contrario y su diámetro haya sido reducido durante su corrida, dicha erosión se debe reportar usando la **Ecuación 8**.

Ecuación 8. Reducción del diámetro de la broca

$$G = X * \frac{1}{16''}$$

Fuente: Reed Hycalog PDC & Roller Cone Product Technology Reference Information

Donde:

X = diferencia entre en diámetro original y el diámetro actual de la broca

La casilla correspondiente a otras características, pertenece a un análisis secundario de la broca, para esta descripción se emplean las mismas siglas de la **Tabla 10** y la **Tabla 11** según sea el tipo de la broca.

Por último, existen diversas razones por las cuales se debe sacar la sarta de perforación del pozo, este parámetro tiene tendencia a ser informativo, cabe resaltar que tras una decisión se pueden tomar acciones correctivas de requerirse o control del proceso en el cual se encuentra la operación. En la **Tabla 14** se muestran las siglas que representan eventos que conllevan a sacar la sarta de perforación.

Tabla 14. Siglas para sacar la sarta de perforacion

PARA TODAS LAS BROCAS			
BHA	Cambiar el ensamble de fondo de pozo	HP	Problemas de pozo
DMF	Falla del motor en el pozo	HR	Horas
DSF	Falla de la sarta de perforación	PP	Presión de Bombeo
DST	Prueba de la Sarta de perforación	PR	Velocidad de perforación
DTF	Falla de la herramienta de fondo de pozo	TD	Profundidad total / Punto para tubería de revestimiento
RIG	Reparación del equipo de perforación	TQ	Torque
CM	Condición del lodo	TW	Torque excesivo
CP	Punto para sacar núcleos	WC	Condiciones climáticas
DP	Taponamiento del pozo	WO	Rotura de la sarta de perforación por fuga hidráulica
FM	Cambio de formación		

Fuente: Reed Hycalog PDC & Roller Cone Product Technology Reference Information

2.1.4 Motores de fondo y herramientas rotatorias (RSS)

2.1.4.1 Motores de fondo. Los motores de fondo son dispositivos hidráulicos que usan la energía cinética del fluido de perforación bombeado a través de la tubería para transmitir potencia directamente a la broca sin necesidad de rotar la sarta de perforación.

La perforación direccional usando motor de fondo consta de intervalos de rotación y deslizamiento. Durante la rotación se utiliza la potencia generada en la mesa rotaria y toda la sarta de perforación rota normalmente, en cambio cuando se quiere generar un cambio en la dirección del hueco, la rotación de la sarta se detiene y se da inicio al intervalo de deslizamiento. Se apunta la sección doblada del motor hacia la dirección deseada y la broca rota únicamente con la potencia generada por el motor mientras que el resto de la broca se desliza sobre la formación.

Existen dos tipos de motores de acuerdo con el mecanismo motriz que utilizan:

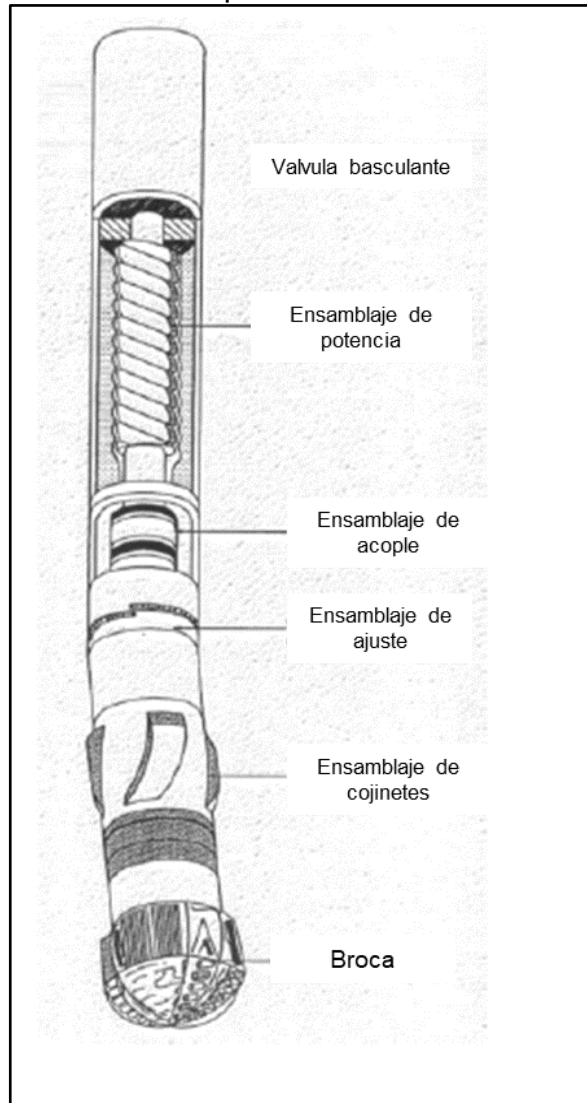
➤ **Motores por turbinas:** Los motores impulsados por turbinas son unidades multietapas de alabes que transfieren la energía rotacional generada por el paso del fluido directamente a la broca.

➤ **Motores de desplazamiento positivo:** El movimiento se genera mediante el paso de fluido de perforación a través de las cavidades progresivas que se forman entre un rotor de acero y un estator de goma.

Los motores de desplazamiento positivo permiten aumentar el torque sobre la broca, por esta razón son los más utilizados en la industria y es pertinente explicar su funcionamiento.

A continuación, en la **Figura 15** se presentan los componentes internos básicos de los motores de desplazamiento positivo.

Figura 15. Componentes básicos Motores de Desplazamiento Positivo.



Fuente: MORA, Laydy. Motores de fondo, Catedra, Perforación direccional. (Sep-2017). Modificado por los autores

- **Válvula basculante:** La válvula basculante permite el llenado de la sarta cuando se mete al hueco o el vaciado cuando se saca.
- **Ensamblaje de potencia:** El ensamblaje de potencia está compuesto por un rotor y un estator con un elastómero en la parte interior. Al tener un número desigual de lóbulos, se forman cavidades progresivas entre el rotor y el elastómero, convirtiendo la potencia hidráulica del fluido en energía mecánica a medida que el rotor es forzado a moverse. El número de etapas está dado por cuantas cavidades se forman entre el rotor y el estator, a mayor número de etapas mayor resistencia al torque.
- **Ensamblaje de acople:** El ensamblaje de acople utiliza una junta especial que permite convertir la rotación excéntrica en concéntrica, este eje está diseñado para soportar altos torques y minimizar fatigas en el resto del motor.
- **Ensamblaje de ajuste:** El ensamblaje de ajuste consiste en una serie de ranuras marcadas que permiten elegir el ángulo con el cual se piensa bajar el motor a fondo.
- **Ensamblaje de cojinetes:** El ensamblaje de cojinetes se encarga de soportar la fuerza que se le imparte al motor desde arriba para evitar sobrecargas en otros componentes de este, además debe absorber las vibraciones axiales y torsionales que se forman entre la broca y el motor.

Además de estos componentes internos, el motor cuenta con una camisa que los protege de las condiciones extremas a las que son sometidos en el hueco como se muestra en la **Figura 16**. Se puede variar el diámetro de esta camisa para que funcione como un estabilizador cercano a la broca. Con esta configuración el efecto fulcrum sobre la broca aumenta, y el BHA tiende a construir ángulo.

Figura 16. Camisa Protectora



Fuente: MORA, Laydy. Motores de fondo, Catedra, Perforacion direccional. (Sep-2017).

La velocidad de rotación del motor tiene un impacto directo en la ROP de la broca, en su desgaste y también en el control direccional del BHA.

Los motores de baja velocidad son preferidos en los trabajos de perforacion horizontal y geonavegacion gracias a los altos torques que generan, sin embargo, los altos WOB usados para la perforacion con motores de baja velocidad ocasionan mayores torques reactivos y un mayor estrés sobre la estructura de corte de la broca.

Los motores de velocidad alta trabajan con bajos WOB y ofrecen un preciso control direccional.

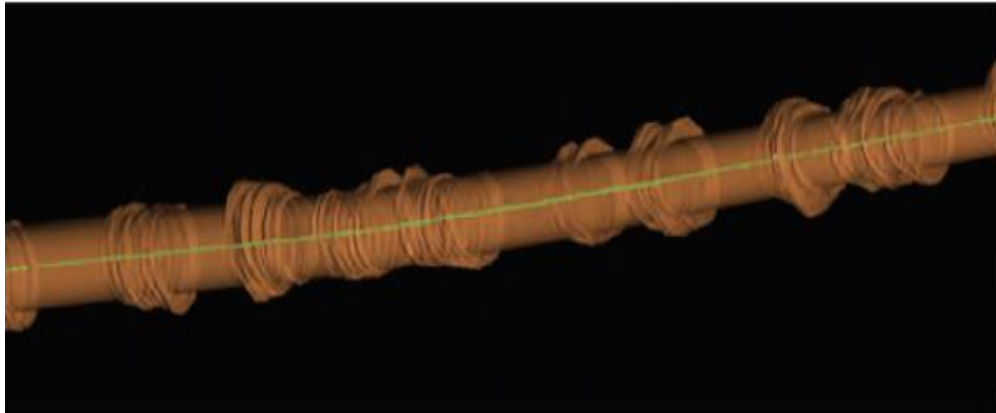
Los motores de velocidad media se utilizan en intervalos largos de deslizamiento y permiten prolongar la vida útil de la broca; normalmente estos motores usan rotores con un bypass que permite aumentar el caudal de lodo sin aumentar las revoluciones por minuto generadas por el motor.

2.1.4.2 Sistema rotatorio direccional (RSS-totary steerable system). El RSS o Sistema rotativo direccional, es el desarrollo tecnológico en temas de herramientas direccionales más reciente, en donde su principal ventaja se dio a conocer en 1997 en el campo Wytch Farm en el Reino Unido tras perforar “continuamente” 10 km; fue capaz de construir ángulo y continuar con la rotación de la sarta, lo cual no ocurre en los motores convencionales que requiere detener la rotación para deslizar y solo así construir ángulo adicionalmente se incrementaba la

ROP total, se obtenía una limpieza más profunda del pozo y una reducción del grado de tortuosidad, en la **Figura 17** se muestra un pozo perforado con un motor convencional y en **la Figura 18** uno perforado con RSS. Por otro lado, se redujeron significativamente adversidades que generaban los motores direccionales, como la corrida de registros eléctricos, evaluación de formaciones y la bajada del revestimiento. Todo esto se ve traducido en dinero ahorrado por día que se haya culminado antes de lo previsto a la operadora

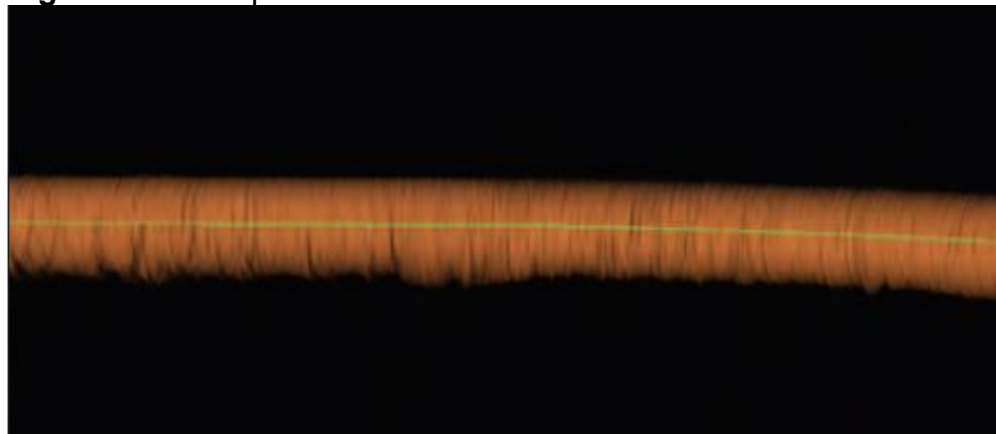
Esta herramienta integral cuenta con sistemas internos de localización en vez de elementos externos expuestos a condiciones las cuales pueden reducir la vida útil de las mismas, incrementando costos de mantenimiento y reparación. Asimismo, genera una optimización de los parámetros de perforación como lo es el WOB, incrementa las RPM's y brindando un grado de seguridad contra atascamientos del BHA que el motor convencional no era capaz de proveer.

Figura 17. Pozo perforado con motor convencional



Fuente: SCHLUMBERGER, oilfield review, Lo mejor de ambos mundos: un sistema rotativo direccional híbrido, Vol 23, No. 4, 2011, p. 39

Figura 18. Pozo perforado con RSS

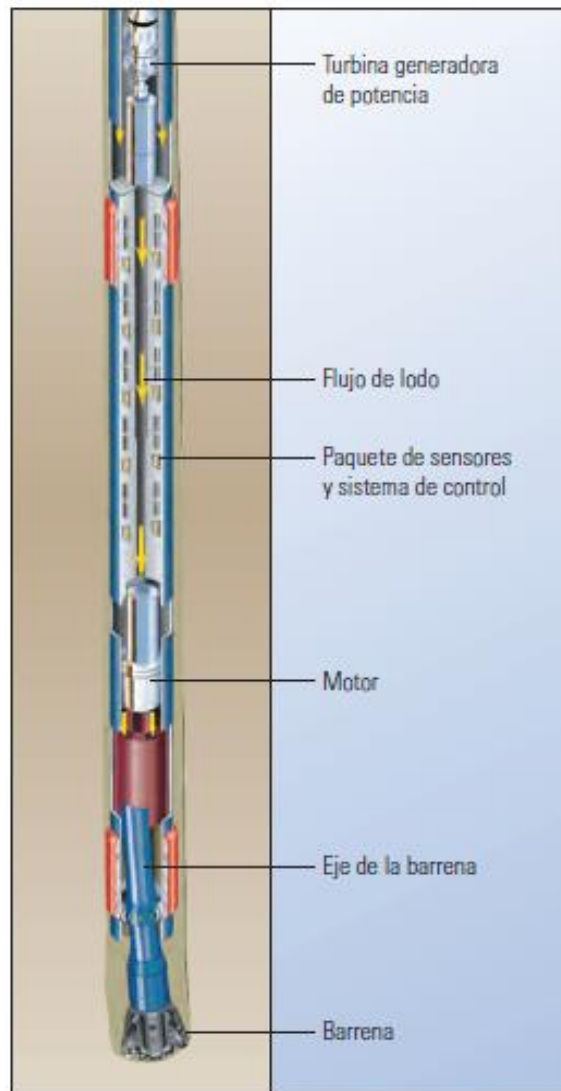


Fuente: SCHLUMBERGER, oilfield review, Lo mejor de ambos mundos: un sistema rotativo direccional híbrido, Vol 23, No. 4, 2011, p. 39

Existen dos tipos de sistemas por los cuales es posible darle la orientación requerida a la broca, los cuales han permitido el desarrollo de la continua rotación; estos son los sistemas “Point de bit” y “Push de bit.

2.1.4.3 Sistema “Point de bit”. Un sistema “Point de bit” que se puede ver en la **Figura 19** consiste en la desviación del eje de la herramienta mediante un codo respecto al eje del pozo, generando una respuesta direccional. Este sistema logra cambiar la dirección de la trayectoria del pozo, al cambiar el ángulo de orientación de la herramienta. El codo es alimentado por un servomotor el cual mantiene las mismas RPM's que la sarta de perforación, pero en sentido contrario a esta, lo cual permite mantenerse estable o sin presentar rotación mientras que el collar si rota.

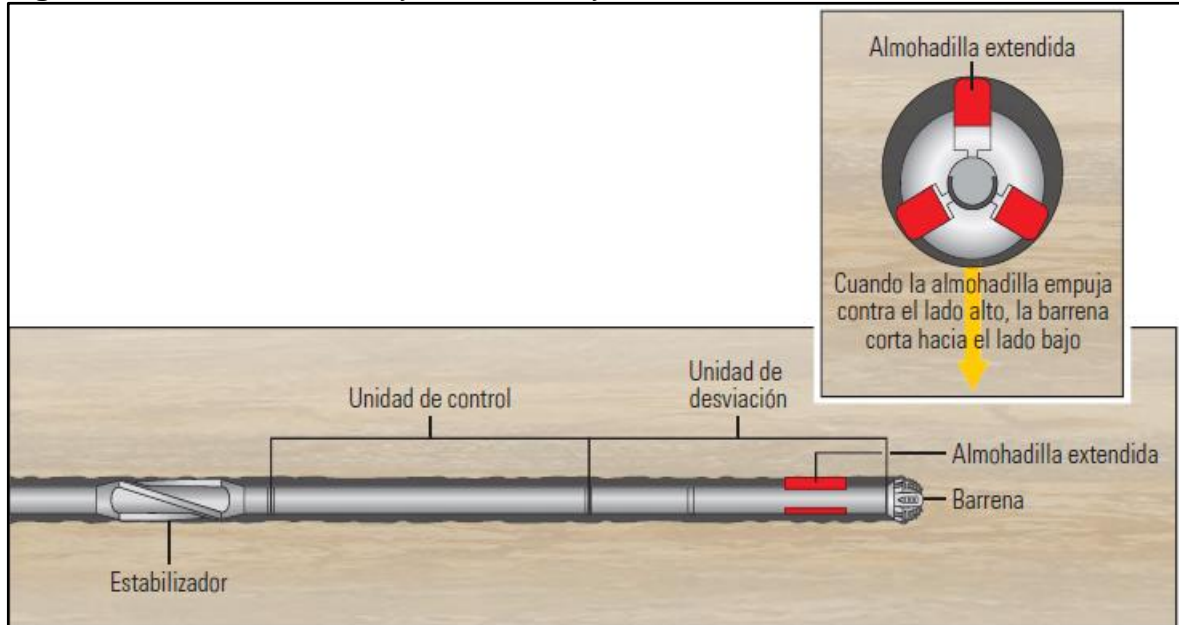
Figura 19. Secciones Rotary Steerable System-Point the bit.



Fuente: SCHLUMBERGER, oilfield review, Lo mejor de ambos mundos: un sistema rotativo direccional híbrido, Vol 23, No. 4, 2011, p. 40

2.1.4.4 Sistema “Push de bit”. Un sistema “push de bit” emplea un sistema de desviación compuesto de tres almohadillas ubicadas cerca de la broca, estas se apoyan contra la cara de la formación para aplicar una fuerza lateral y tener como resultado el empuje de la broca hacia la dirección requerida. En la **Figura 20** se muestran las secciones que componen el RSS – tipo “Push the bit”, adicionalmente una vista de planta del sistema de almohadillas accionadas por el fluido de perforación.

Figura 20. Secciones Rotary Steerable System-Push the bit.



Fuente: SCHLUMBERGER, oilfield review, Lo mejor de ambos mundos: un sistema rotativo direccional híbrido, Vol 23, No. 4, 2011, p. 40

Como se ve en la **Figura 20** anterior el sistema Push the bit consta de dos unidades claves para su óptimo funcionamiento, estas son:

- **Unidad de control:** la cual está posicionada directamente por encima de la unidad de desviación, consta de sensores, elementos electrónicos y un mecanismo de control por el cual acciona una válvula giratoria, esta regula la cantidad de lodo que se dirige a las almohadillas teniendo en cuenta la rotación de estas.
- **Unidad de desviación:** hace referencia a las almohadillas que ejercen una fuerza lateral opuesta a la que se desea llevar la broca mientras toda la sarta rota. Estas son accionadas por el fluido de perforación. "Los comandos del perforador enviados al fondo del pozo por la telemetría de pulsos del lodo dirigen la temporización y la magnitud de la actuación de la almohadilla".²⁰

2.2 DISEÑO DE LA BROCA U519S 12¼" DE ULTERRA™ CON CALIBRE DE 2.5" Y 4"

Desde hace varios años Ulterra ha estado trabajando en conjunto con Ecopetrol S.A para el desarrollo de campos maduros como lo es el caso de Castilla, con el objetivo de optimizar la operación mediante herramientas que cumplan con los requerimientos necesarios bajo condiciones operativas variables. Por ello se han actualizado los diseños de las brocas que se emplean en cada pozo, buscando

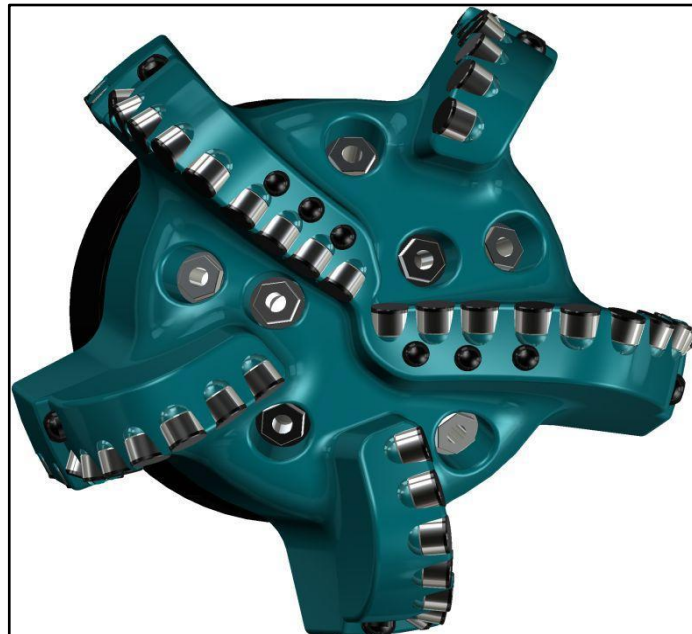
²⁰ HUTTON, Elizabeth; REGRAIN, Emmanuelle. Lo mejor de ambos mundos: un sistema rotativo híbrido. En: oilfield review. Vol. 23, N°4 (Dic de 2011): Pág. 40

mejores resultados al menos costo posible; sin comprometer la integridad de la perforación.

Dado que Ulterra viene actualizando sus diseños desde el 2015, año en el cual se implementó la broca de calibre corto y en el 2016 se rediseño con la broca de calibre más largo, existieron variaciones en las características propias de cada una, por eso se hablará de cada una para así entender la evolución en los diseños que se están empleando en el Campo Castilla.

2.2.1 Diseño de la broca con calibre de 2.5”. El diseño de la broca U519S, como se muestra en la **Figura 21**, consta de un diámetro exterior de 12.25 in, un cuerpo fabricado a partir de acero con cinco (5) aletas las cuales sirven estructura de apoyo a 54 cortadores de 19 mm cada uno, de los cuales 34 se encuentran ubicados a lo largo de la cara de la broca. Este es un diseño convencional para uso en trabajo direccional con motores de fondo y sistemas rotatorios “RSS”. Adicionalmente cuenta con un sistema hidráulico compuesto por siete boquillas.

Figura 21. Cara del diseño U519S con calibre de 2.5”



Fuente: ULTERRA, U519S, Bogotá 2012.

Adicionalmente, en la **Figura 22** se tiene una vista transversal de la broca donde se muestran el hombro y el calibre de la broca de 2.5 pulgadas de longitud, el cual cuenta con 20 cortadores de los cuales 10 se encuentran en el calibre y 5 dispuestos para rimado. Cuenta con un JSA (Junk Slot Area) de 44,63 in², que permite evacuar eficientemente los recortes generados tras la perforación; cuenta con protección TSD (Diamante Térmicamente Estable) en el calibre, para una mayor resistencia a los diversos esfuerzos presentes. Posee limitantes de corte en aletas

principales, que ayudan a minimizar la inserción total del cortador en la formación, haciendo que la estructura de corte provea menos torque al sistema y así mismo evitar su desgaste prematuro y daño por impacto. Posee un inserto de carburo de tungsteno, más amplio que los limitantes de corte, colocados a la misma altura de exposición que los cortadores de calibre, para una mayor protección de estos.

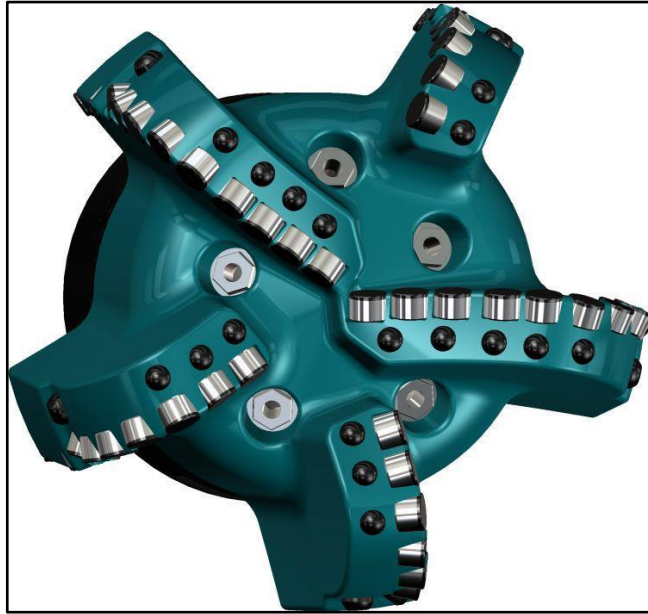
Figura 22. Diseño U519S con calibre de 2.5"



Fuente: ULTERRA, U519S, Bogotá 2012.

2.2.2 Diseño de la broca con la broca de 4”. El diseño de la broca U519S, como se muestra en la **Figura 23**, consta de un diámetro exterior de 12.25 pulgadas, un cuerpo fabricado a partir de acero con cinco (5) aletas las cuales sirven estructura de apoyo a 54 cortadores de 19 mm cada uno, de los cuales 34 se encuentran ubicados a lo largo de la cara de la broca, además cuenta con un sistema hidráulico compuesto por siete boquillas.

Figura 23. Cara del diseño U519S con calibre de 4"



Fuente: ULTERRA, U519S, Bogotá 2016.

Adicionalmente, en la **Figura 24** se tiene una vista transversal de la broca donde se muestran el hombro y el calibre de la broca de 4 pulgadas de longitud el cual cuenta con 20 cortadores, de los cuales 5 se encuentran en el calibre y 10 dispuestos para rimado. Cuenta con un JSA (Junk Slot Area) de 48,98 pul², que permite evacuar eficientemente los recortes generados tras la perforación; es un diseño convencional para uso en trabajo direccional con motores de fondo y sistemas rotatorios con protección TSD (Diamante Térmicamente Estable) en el calibre, para una mayor resistencia a los diversos esfuerzos presentes. Posee limitantes de corte en todas las aletas, que ayudan a minimizar la inserción total del cortador en la formación, haciendo que la estructura de corte provea menos torque al sistema y así mismo evitar su desgaste prematuro y daño por impacto. Posee un inserto de carburo de tungsteno, más amplio que los limitantes de corte, colocados a la misma altura de exposición que los cortadores de calibre, para una mayor protección de estos.

Figura 24. Diseño U519S con calibre de 4”



Fuente: ULTERRA, U519S, Bogotá 2016.

2.3 CORRIDAS EN EL CAMPO CASTILLA CON EL DISEÑO DE BROCA U519S 12 ¼” DE ULTERRA™ CON CALIBRE DE 2.5” Y CALIBRE DE 4”

En esta sección empieza la aplicación de los conceptos antes mencionados, dado que se expondrán los ensamblajes de fondo (BHA) implementados en los pozos C322, C342 y C361; perforados con la broca con calibre de 2.5”. Junto con los pozos C217, C316 y C471 perforados con la broca con calibre de 4”. Serán la base para posteriores análisis y sugerencias en las cuales se identifiquen aspectos que pueden optimizar la operación.

2.3.1 Broca de Uletrra con calibre de 2.5”. Inicialmente se habla de aquellos pozos que fueron perforados con el diseño de broca U519S 12 ¼” de Ulterra™ con calibre de 2.5”. Los resultados obtenidos en el Campo Castilla tras su implementación son descritos a continuación; cabe resaltar que en estos pozos fue implementado tanto el motor de fondo como el sistema rotativo direccional (RSS). Adicionalmente los BHA’s se encuentran en la sección de anexos desde el anexo A hasta el anexo C

2.3.1.1 Pozo Castilla 361

- En este pozo el TOC se encontraba ubicado a 937’ de profundidad, se inició el trabajo de drill out, se llegó al zapato del casing a 976’ y se perforó parte de la formación hasta los 988’, se detiene y se repasa 4 veces el zapato, posterior a eso se realiza el cambio de lodo.
- Se inicia la perforación de la fase de 12 ¼” con una ROP de 400 ft/hr la cual aumenta a 450 ft/hr a los 1024’ y continúa incrementando hasta llegar hasta los 550 ft/hr.
- Al llegar a 2608’ de profundidad se observó un incremento del torque de 6 a 12 klbs*ft el cual es causado por el cambio de formación de Lutita E a C1.
- Luego a 3147’ la ROP alcanzo los 600 ft/hr, donde paralelamente incremento el torque hasta registrar 17 klbs*ft, esto fue causado por las altas concentraciones de Limolita que se encuentran al ingresar en la formación C2 por lo cual la ROP fue reducida a 450 ft/hr.
- A los 3522’ se determinó el KOP según el plan direccional.
- Al llegar a los 5118’ se tomó la decisión de iniciar viaje corto sin problema alguno.
- Mas adelante a 5160’ la ROP cae abruptamente a 250 ft/hr por lo que la presión diferencial llego a los 500 psi, causado por las intercalaciones de Limolita que se encuentran en la base de la formación C2.
- Al llegar a los 6537’ se presentó un atrapamiento de la sarta, el cual se trabajó y se envió píldora de limpieza pesada.
- A la profundidad de 6774’ por órdenes de geología se controla la ROP a 50 ft/hr, la cual es reducida a 15 ft/hr a los 6819’.
- Cuando se llegó a 6837’ se dio por culminada la perforación de la fase de 12 ¼”.

- Se circulo y se envió píldora de limpieza, se inicia extracción de la sarta presentando puntos apretados los cuales se solucionaron de inmediato.

2.3.1.2 Pozo Castilla 342

- En este pozo el TOC se encontraba ubicado a 873' de profundidad y se realizó drill out hasta los 1005' donde se localizaba el zapato del casing, luego se perforo el bolsillo y 10' de formación hasta 1020', esta operación se repasó dos veces y luego se realizó el desplazamiento del lodo.
- Enseguida se inició la perforación de la fase de 12 ¼", en donde se determinaron parámetros iniciales y se incrementaron progresivamente; cada parada se repasó dos veces con reaming y sin back reaming.
- Al llegar a 1188' se dio inicio a la construcción del ángulo mediante el deslizamiento de la sarta; por lo tanto, se considera que su KOP es somero.
- A 1284' se observó un incremento del torque el cual oscilo entre 3 a 10 klb*ft el cual fue solucionado incrementando la ROP a 350 ft/hr.
- A los 2316' se envía píldora de limpieza de 40 bbls.
- Al llegar a los 3520' se observó un incremento nuevamente del torque de 6 a 13 klbs*ft con una caída de la ROP de 380 a 280 ft/hr, lo que indicaba la transición a la formación C2.
- Cuando se llega a los 5538' se detiene la perforación, se circula y se inicia viaje de acondicionamiento hasta el zapato, no se presentaron puntos apretados bajando y se continuó perforando.
- A los 6740' por órdenes direccionales se controló a 80 ft/hr para tener una mayor respuesta de las deslizadas.
- Al llegar a la profundidad de 6921' se presentó una leve perdida del fluido de perforación, lo cual dio a entender a los de geología que se había llegado al final de la sección, se bombeo píldora de limpieza y se inició viaje de acondicionamiento.

2.3.1.3 Pozo Castilla 322

- En este pozo en el cual su tope de cemento (TOC) se encontraba a 988' hasta los 1015' de profundidad, se realizó el drill out por 75 min, llegando a perforar 10' de formación hasta llegar a 1033'. Se realizaron dos repasadas por cada parada.
- A los 2100' se observaron vibraciones en la torre lo que llevo a controlar la ROP a 220 ft/hr, se determinó que la causa fue un soporte faltante por lo cual se optimizaron parámetros nuevamente.

- A los 3030' la perforación es detenida por daño en el sello en la línea del stand pipe, se modificaron parámetros de operación como lo fue la reducción del galonaje de 980 a 860 gpm, las RPM's de 80 a 60 dado que al entrar a la formación C2 con parámetros óptimos existía el riesgo de dañar la estructura de corte de la broca.
- Cuando se llegó a 4249' se inicia la construcción de ángulo (KOP); la ROP se redujo dado que el rango de deslizada estuvo de 30-45 ft por parada
- A los 5090' se tomó la decisión de detener la perforación para hacer viaje corto hasta el zapato, donde al momento de bajar, se encontraron con puntos apretados que se trabajaron con bomba.
- Según el programa de Ecopetrol a los 5290' se controla la ROP a 215 ft/hr, lo mismo ocurrió a 6170' de controlar a 150 ft/hr.
- Al llegar a los 6887' se controla la ROP a 20 ft/hr y a 6919' a 15ft/hr todo esto por orden de geología, se continuó perforado y al llegar a los 6926' geología concluyo que se culminó la fase de 12 ¼" en este pozo.
- Se bombeo píldora de limpieza y se inició viaje a superficie sin problema alguno.

En la **Tabla 15** se muestran las características, que fueron resultado de las corridas con la broca con calibre de 2.5".

Tabla 15. Descripción de los pozos perforados con broca de calibre 2.5"

PARAMETROS	POZO		
	C322	C342	C361
FASE	12 ¼"	12 ¼"	12 ¼"
PROF DE ENTRADA (MD) (ft)	1023	1010	981
PROF DE SALIDA (MD) (ft)	6926	6921	6837
RANGO PERFORADO (ft)	5903	5911	5856
INCLINACION	50.64°	48.65°	40.65°
AZIMUTH	320.8°	353.81°	300°
ROP EFECTIVA (ft/hr)	151.2	132.41	230.37
PIES ROTADOS (ft)	4786	5309	5856
PIES DESLIZADOS (ft)	1117	602	0
HERRAMIENTA DIRECCIONAL	MOTOR DE FONDO	MOTOR DE FONDO	RSS
BEND HAUSING	1.5°	1.5°	N/A
BHA	Ver anexos A-C		

2.3.2 Broca de Ulterra con calibre de 4". En esta sección se describen las herramientas de fondo usadas durante la perforación de la sección de 12 ¼" en los pozos Castilla 217, Castilla 316 y Castilla 471, perforados con la broca de calibre extendido de 4". También se hace un recuento de los eventos más relevantes durante la corrida. Adicionalmente los BHA's se encuentran en la sección de anexos desde el anexo D hasta el anexo F

2.3.2.1 Pozo Castilla 471

➤ La perforación de la sección de 12 ¼" empezó con el drill out en el TOC que se encontraba ubicado a 954', la perforación del zapato a 989' y perforación de

formación hasta 995'. Donde además al llegar a 1007' se realizaron tres repasadas hasta el zapato.

- La perforación prosigue realizando 2 repasadas con reaming por cada parada.
- Al llegar a la profundidad aproximada de 2400' se inicia el trabajo direccional, a los 2430' por orden del ingeniero de direccional se reducen las RPM para aumentar la tasa de construcción.
- A 2533' a pesar de aumentar nuevamente las RPM y el galonaje la ROP cayo y luego volvió a subir, esto debido a las intercalaciones de limolita presentes en la formación C2.
- A la profundidad de 5007' aumento la ROP, pero se observó un aumento significativo en el torque también causado por las limolitas.
- Al llegar a los 5196' se detuvo la perforación para realizar viaje hasta el zapato sin problemas subiendo o bajando. La ROP fue disminuyendo paulatinamente hasta 6528' donde se perforo con una ROP controlada por órdenes geológicas de la operadora hasta 6540'.
- Allí se paró y se tomó un chequeo de muestra, se continuó perforando con ROP controlada hasta 6546' donde se tomó otro chequeo y se decidió dejar hasta allí la sección.
- Se circulo hasta obtener retornos limpios y se realizó viaje a superficie.

2.3.2.2 Pozo Castilla 217

- La perforación del pozo se inició con el drill out del TOC que se encontró a una profundidad de 954', se encontró el zapato del casing a 1023' y se perforo formación hasta llegar a 1029'. Se hicieron tres repasadas de las anteriores operaciones y se esperó el cambio total del lodo viejo.
- Se inicia la perforación de la sección de 12 ¼" a 1030' y se continuo sin novedades hasta la profundidad del KOP del pozo a 1145' donde se aumentaron los parámetros de perforación.
- A los 1450' la ROP aumento considerablemente con los mismos parámetros hasta los 3850' donde este cayo de 210 a 150 ft/hr, se aumentó el WOB para mejorar la ROP hasta 4110'.

- Al momento de deslizar la ROP cayo considerablemente con algunos colgamientos leves, pero se continuo con la operación.
- Mas adelante a los 4647' se deslizo mejorando la ROP significativamente y se prosiguió con la operación hasta la profundidad de 5304'. Allí se decidió circular y hacer un viaje de acondicionamiento hasta el zapato.
- A los 5603' el ingeniero de perforación direccional decide disminuir el galonaje para compensar la tendencia característica de las lutitas a tumbar, a los 6400' se reducen las RPM y se mejora la respuesta direccional.
- Luego a 6573' se deslizo, a los 6722' se perforo aumentando un poco las RPM y con bajo galonaje.
- A los 6753' por órdenes del área de yacimientos se controló la ROP para terminar con esa sección a la profundidad de 6780'; se circuló en fondo y se realizó viaje de acondicionamiento, se sacó sin bomba y sin mayores percances.

2.3.2.3 Pozo Castilla 316

- Se empezó la corrida con el drill out a una profundidad TOC de 961', y se perforo el zapato y 5' de formación hasta 1010'. Se realiza una repasada por parada por los primeros 70' controlando la ROP por orden del ingeniero de lodos para evitar acumulación de arcillas.
- A la profundidad de 1462' se para la perforación por falla en la herramienta direccional MWD (Measure While Drilling) por lo que se decide sacar el BHA y se determina que la broca no presenta ningún desgaste.
- Con el nuevo BHA se reinició la operación desde los 1462' realizando varias correcciones tanto en la dirección como en la inclinación deslizando de 25' a 30' por parada para mantener la verticalidad del pozo hasta los 5182'.
- Se saco el ensamblaje de fondo; se armó y bajo el nuevo BHA con el cual se empezó a lavar desde 4508' hasta los 5182' donde se tocó fondo.
- A los 5200' se inició el trabajo direccional, se trabajó deslizando bastante para cumplir con la construcción de la curva. Se hizo control direccional para compensar la tendencia al norte de la formación lutita E4 hasta 6668' donde se controló la ROP por requerimiento geológico.
- Desde 6668 hasta 6678 ft se controló la ROP donde se dio por terminada la perforación de la sección, se envió píldora visco pesada de 70 bbls.

En la **Tabla 16** se muestran las características, que fueron resultado de las corridas con la broca con calibre de 4.0”.

Tabla 16. Descripción de los pozos perforados con la broca de calibre 4”

PARAMETROS	POZO				
	C217	C316		C471	
FASE	12 ¼ "	12 ¼ "		12 ¼ "	
PROF DE ENTRADA (MD)(ft)	1030	1010	1462	5182	995
PROF DE SALIDA (MD)(ft)	6780	1462	5182	6678	6546
RANGO PERFORADO (ft)	5750	452	3720	1496	5551
PIES ROTADOS (ft)	4554	420	3287	763	4712
PIES DESLIZADOS (ft)	1196	36	433	733	839
ROP EFECTIVA (ft/hr)	107.72	342.42	181.02	56.88	139.82
INCLINACION	34.18°	34.44°		28.59°	
AZIMUTH	254.61°	224.31°		168.46°	
HERRAMIENTA DIRECCIONAL	MOTOR DE FONDO	MOTOR DE FONDO		MOTOR DE FONDO	
BEND HOUSING	1.5°	1.5°		1.5°	
BHA	Ver anexos D-F				

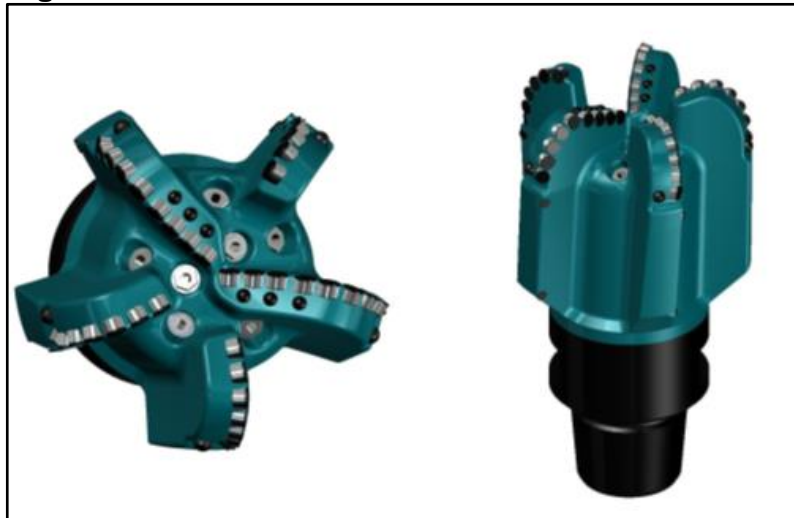
3. NUEVO DISEÑO DE BROCA 12 ¼" DE ULTERRA™ CON CALIBRE EXTENDIDO CON SU RESPECTIVO BHA

En este capítulo se hace la exposición del nuevo diseño de la broca, características y diferencias con respecto a las brocas anteriormente implementadas, lo cual repercutirá en los tiempos de viajes de la tubería.

3.1 NUEVO DISEÑO DE BROCA DE 6" EN EL GAUGE PAD

Este nuevo diseño de broca esta sobre un cuerpo elaborado en acero, consta de cinco (5) aletas, cuarenta y nueve (49) cortadores de diecinueve (19) milímetros cada uno; es decir, cinco cortadores menos que los destinados en las brocas con calibres de 2.5" y 4". Una extensión del calibre de seis (6) pulgadas y un sistema hidráulico compuesto por 7 boquillas, esta descripción se puede observar en la **Figura 25**.

Figura 25. Nuevo diseño de broca 12 ¼" de Ulterra™.



Fuente: ULTERRA, U519M, Bogotá 2018.

3.1.1 Diferencias entre los diseños de brocas anteriores y el nuevo diseño.

Actualmente Ulterra™ cuenta con 3 diseños de brocas, los cuales varían en características y en rendimiento esperado; en la **Figura 26** se pueden ver las especificaciones de cada una de ellas.

Con este nuevo diseño Ulterra™ tiene como objetivo principal, mejorar la calidad del hueco sin sacrificar la eficiencia reflejada en la ROP final, para todo ello se realizaron los siguientes cambios:

- **Extensión del calibre:** La broca estándar se inició con un calibre de 2.5", se actualizó con un diseño el cual cuenta con un calibre de 4" que mejoró la estabilidad de la sarta de perforación; ahora se espera que con un calibre de 6"

incremente el área de contacto con la formación y de esta manera mejore la calidad del hueco.

- **Numero de cortadores en el calibre:** Tanto en el diseño de la broca de 2.5" como en la de 4" en número de cortadores se mantuvo constante siendo este veinte (20). En el caso de la broca de 2.5 consta de diez (10) cortadores de calibre y cinco (5) de rimado saliendo. Caso contrario pasa con el diseño de 4" la cual posee cinco (5) de calibre y diez (10) de rimado. Todo esto fue alterado en el diseño de 6"; se determinó que no eran necesario un número tan elevado de cortadores en el calibre por lo cual la broca con calibre de 6" cuenta con 15 cortadores, cinco (5) de calibre y cinco (5) de rimado.
- **Agresividad:** El ángulo de entrada de los cortadores hacia la formación ha sido modificado continuamente para hacerla más eficaz frente a la formación.
- **Junk Slut Area:** Dado que la función del fluido de perforación es fundamental durante la operación, se está en la continua optimización del JSA, ya que se requiere que la acción de remoción de ripios sea eficiente. En el diseño de 2.5" cuenta con un área de 44.63 in² Lo cual se amplió en la de 4" con 48.98 in² y finalizó con 52.74 in² en el diseño de 6".
- **Limitadores de carga:** Se inicio en el diseño de 2.5" con limitadores de carga en dos aletas; en el diseño de 4" se le adicionaron en las otras tres aletas, quedando en las cinco (5), al determinar que dichos limitadores no estaban cumpliendo la función requerida, pero si generaban costos innecesarios, en el diseño de 6" se volvió al concepto inicial de emplearlos únicamente en 2 aletas.
- **Volumen de la cara:** Teniendo en cuenta que el volumen de la cara es la sección resultante del volumen bruto menos el área de remoción de cortes, se debe tener en cuenta el volumen de recortes que serán generados. Por ello se inició con 279,09 in³ en el diseño de 2.5" el cual fue incrementado a 271,16 pulg³ en el diseño de 4" el cual no retorno los recortes de la forma en que se esperaba, por lo anterior en el diseño de 6" se redujo a 257,25 in³.
- **Numero de boquillas:** En múltiples características, se ha evidenciado tras iteraciones de diversas variables que la configuración inicial ha arrojado resultados satisfactorios, por consiguiente, al analizar el número de las boquillas en el diseño de 2.5" el cual tiene siete (7) boquillas, fue sustituido por cinco (5) en el diseño de 4", donde al no cumplir con las expectativas se regresó al número original de 7 en el diseño de 6".

Figura 26. Comparación fichas técnicas de los tres diseños de brocas de Ulterra

U519S 12.250 in 311 mm		U519S 12.250 in 311 mm		U519S 12.250 in 311 mm	
Detail (P/N: U02382) IADC S223		Detail (P/N: U02438) IADC S223		Detail (P/N: U02969) IADC S223	
Total Cutters	54	Total Cutters	54	Total Cutters	49
Cutter Size	3/4 in / 19 mm	Cutter Size	3/4 in / 19 mm	Cutter Size	3/4 in / 19 mm
Blade Count	5	Blade Count	5	Blade Count	5
Face Cutters	34	Face Cutters	34	Face Cutters	34
Gauge Cutters	20 (10 In Gauge, 5 Up Drill)	Gauge Cutters	20 (5 In Gauge, 10 Up Drill)	Gauge Cutters	15 (5 In Gauge, 5 Up Drill)
Nozzles / Ports	7 (65 Series)	Nozzles / Ports	5 (65 Series)	Nozzles / Ports	7 (65 Series)
Gauge Length	2.500 in / 63.5 mm	Gauge Length	4.000 in / 101.6 mm	Gauge Length	6.000 in / 152.4 mm
Gauge Type	TSD & PDC & Hard Facing (Nominal)	Gauge Type	TSD & PDC & Hard Facing (Nominal)	Gauge Type	TSD & PDC & Hard Facing (Tapered)
Make-Up Length	13.87 in / 352.3 mm	Make-Up Length	15.17 in / 385.3 mm	Make-Up Length	17.29 in / 439.2 mm
Junk Slot Area	44.63 sq in / 288 sq cm	Junk Slot Area	48.98 sq in / 316 sq cm	Junk Slot Area	52.74 sq in / 340.3 sq cm
Face Volume	247.09 cu in / 4049.1 cu cm	Face Volume	271.16 cu in / 4443.5 cu cm	Face Volume	257.25 cu in / 4215.6 cu cm

Fuente: ULTERRA, U519M, Bogotá 2018.

3.2 BHA CORRESPONDIENTE A LOS POZOS DONDE SE IMPLEMENTO EL DISEÑO DE ULTERRA CON CALIBRE DE 6”.

Dado que la broca con calibre extendido es una de las herramientas que estructuran el BHA es necesario describir los demás componentes que hacen exitosa la perforación de un pozo petrolero. Por consiguiente, se realizó la recopilación de todos aquellos componentes que se emplean para la perforación de los pozos en estudio. Cabe resaltar que algunos de ellos tuvieron más de un BHA por condiciones operacionales.

3.2.2 Castilla 216

Figura 27. BHA #1 implementado en el pozo Castilla 216

TIPO	OD (in)	ID (in)	LONGITUD (FT)
DP	5.5000	4.6700	6767.14
HWDP	6.6250	3.2500	91.29
JAR	6.5000	2.7500	36.6
HWDP	6.6250	3.2500	670.46
X- OVER	6.7500	3.7500	3.08
DRILL COLAR	6.5000	2.8125	30.86
X- OVER	6.5000	2.8125	3.52
NMDR	7.6875	3.2500	27.29
MWD	8.2500	3.2500	27.9
MUD MOTOR	8.0000	3.0000	29.13
BIT	12.2500	N/A	1.48

Fuente: ULTERRA, U519M, Bogotá 2017.

3.2.3 Castilla 226

Figura 28. BHA #1 implementado en el pozo Castilla 226

	TIPO	OD (in)	ID (in)	LONGITUD (FT)
	DP	5.5000	4.6700	6186.88
	HWDP	6.5625	3.2500	274.67
	JAR	6.8125	2.7500	30.33
	HWDP	6.5625	3.2500	670.85
	X-OVER	6.5000	2.7500	3.01
	DRILL COLLAR	6.4375	2.8125	30.66
	X-OVER	6.5000	2.7500	3.61
	NMDC	7.8125	3.5000	28.75
	MWD	8.2500	2.7500	26.03
	MUD MOTOR	8.0000	2.2500	28.88
	BIT	12.2500	N/A	1.48

Fuente: ULTERRA, U519M, Bogotá 2018.

Figura 29. BHA #2 implementado en el pozo Castilla 226

	TIPO	OD (in)	ID (in)	LONGITUD (FT)
	DP	5.5000	4.6700	6186.88
	HWDP	6.5625	3.2500	274.67
	JAR	6.8125	2.7500	30.33
	HWDP	6.5625	3.2500	670.85
	X-OVER	6.5000	2.7500	3.01
	DRILL COLLAR	6.4375	2.8125	30.66
	X-OVER	6.5000	2.7500	3.61
	NMDC	7.8125	3.5000	28.75
	MWD	8.2500	2.7500	26.03
	MUD MOTOR	8.0000	2.2500	33.95
	BIT	12.2500	N/A	1.48

Fuente: ULTERRA, U519M, Bogotá 2018.

3.2.4 Castilla Norte 281

Figura 30. BHA #1 implementado en el pozo Castilla Norte 281

	TIPO	OD (in)	ID (in)	LONGITUD (FT)
	DP	5.5000	4.6700	5753
	HWDP	5.5000	4.0000	183.39
	JAR	6.5000	2.7500	2.38
	HWDP	5.5000	4.0000	827.25
	X-OVER	7.0000	2.8750	1.84
	DRILL COLLAR	6.5625	2.8125	29.66
	X-OVER	8.6250	2.8125	3.75
	NMDC	8.0000	1.9219	5.17
	MWD	8.0000	1.9219	4.35
	MUD MOTOR	8.0000	2.2500	28.92
	BIT	12.2500	N/A	1.48

Fuente: ULTERRA, U519M, Bogotá 2018.

Figura 31. BHA #2 implementado en el pozo Castilla Norte 281

	TIPO	OD (in)	ID (in)	LONGITUD (FT)
	DP	5.5000	4.6700	5748
	HWDP	5.5000	4.0000	183.39
	JAR	6.5000	2.7500	2.38
	HWDP	5.5000	4.0000	827.25
	X-OVER	7.0000	2.8750	1.84
	DRILL COLLAR	6.5625	2.8125	29.66
	X-OVER	8.6250	2.8125	3.75
	NMDC	8.0000	1.9219	5.17
	MWD	8.0000	1.9219	4.35
	MUD MOTOR	8.0000	2.2500	29.01
	BIT	12.2500	N/A	1.48

Fuente: ULTERRA, U519M, Bogotá 2018.

4. IMPLEMENTACIÓN DEL NUEVO DISEÑO DE BROCA POLICRISTALINA CON CALIBRE EXTENDIDO DE 6" EN LA SECCIÓN DE 12 ¼" DEL CAMPO CASTILLA

En este capítulo es pertinente agregar la documentación necesaria para demostrar la implementación del nuevo diseño propuesto a lo largo de la sección de 12 ¼", de los pozos C216, C226 y CN281 perforados en el Campo Castilla.

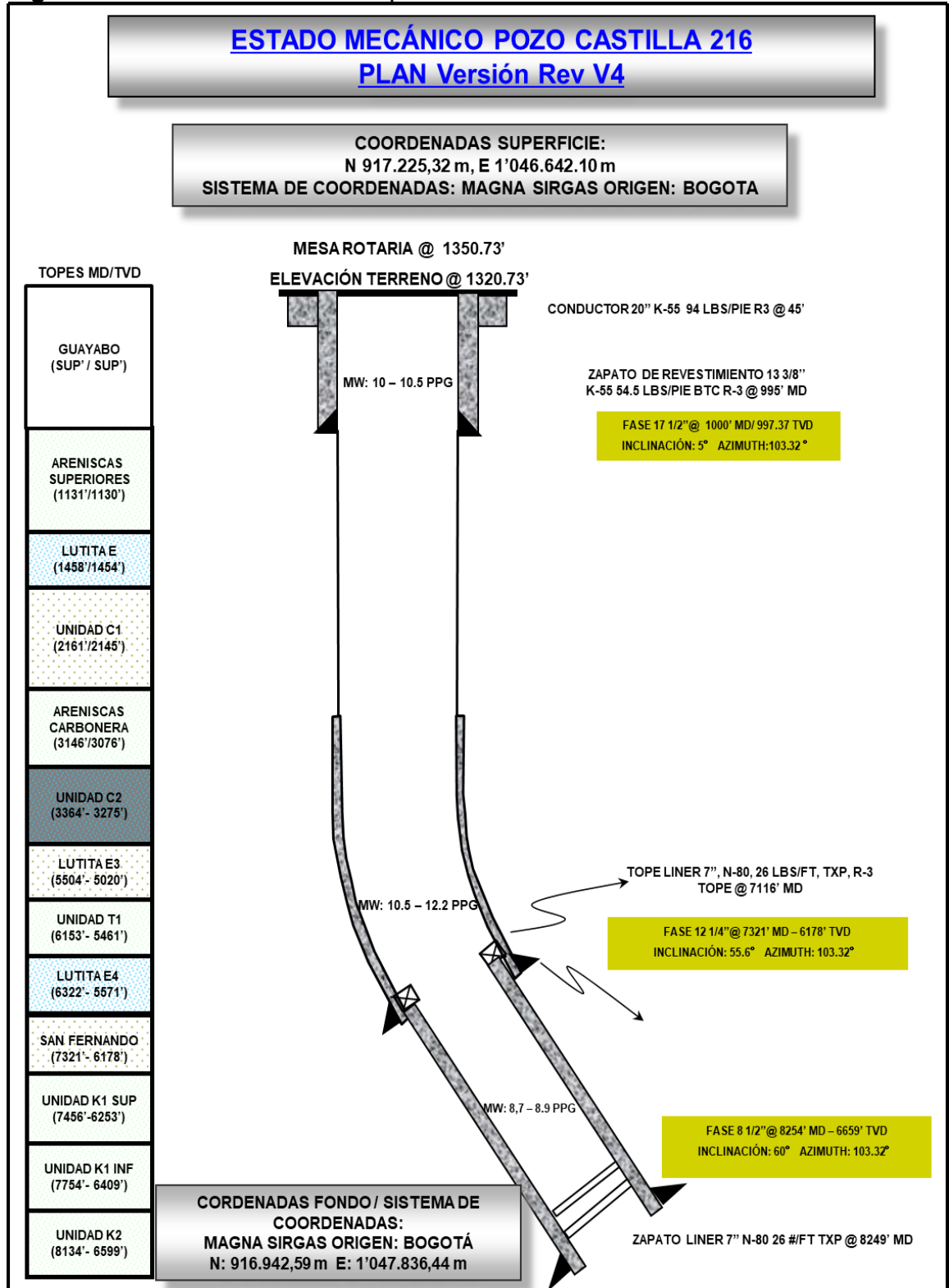
4.1 POZO CASTILLA 216

El día 10 de octubre de 2017 se dio inicio a la corrida de la broca tipo U519S en la sección de 12 ¼"; cumpliendo con el contrato estipulado entre la operadora ECOPETROL y la prestadora de servicios Ulterra, mediante el cual se suministra el servicio de alquiler de brocas y servicios complementarios para la campaña de perforación en el campo.

El trabajo direccional, fue realizado con un motor de fondo con un ángulo de desviación (Bend Housing) de 1,5°, perteneciente a la compañía Weatherford. La perforación de la fase inició en la sección vertical del pozo a una inclinación de 4,13° y un azimut de 109,74° y a una profundidad de 962 ft (TVD); y termino con una inclinación de 55,17° y un azimut de 103,5°. En este pozo la profundidad a la cual se inició el trabajo direccional (KOP) fue a los 480' es decir en la primera fase.

A continuación, en la **Figura 32** se muestra el estado mecánico del pozo Castilla 216.

Figura 32. Estado mecánico del pozo Castilla 216



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2017.

En el **Cuadro 2**, se puede observar los detalles de la corrida de la sección 12 ¼” con el BHA #1 en el pozo C216.

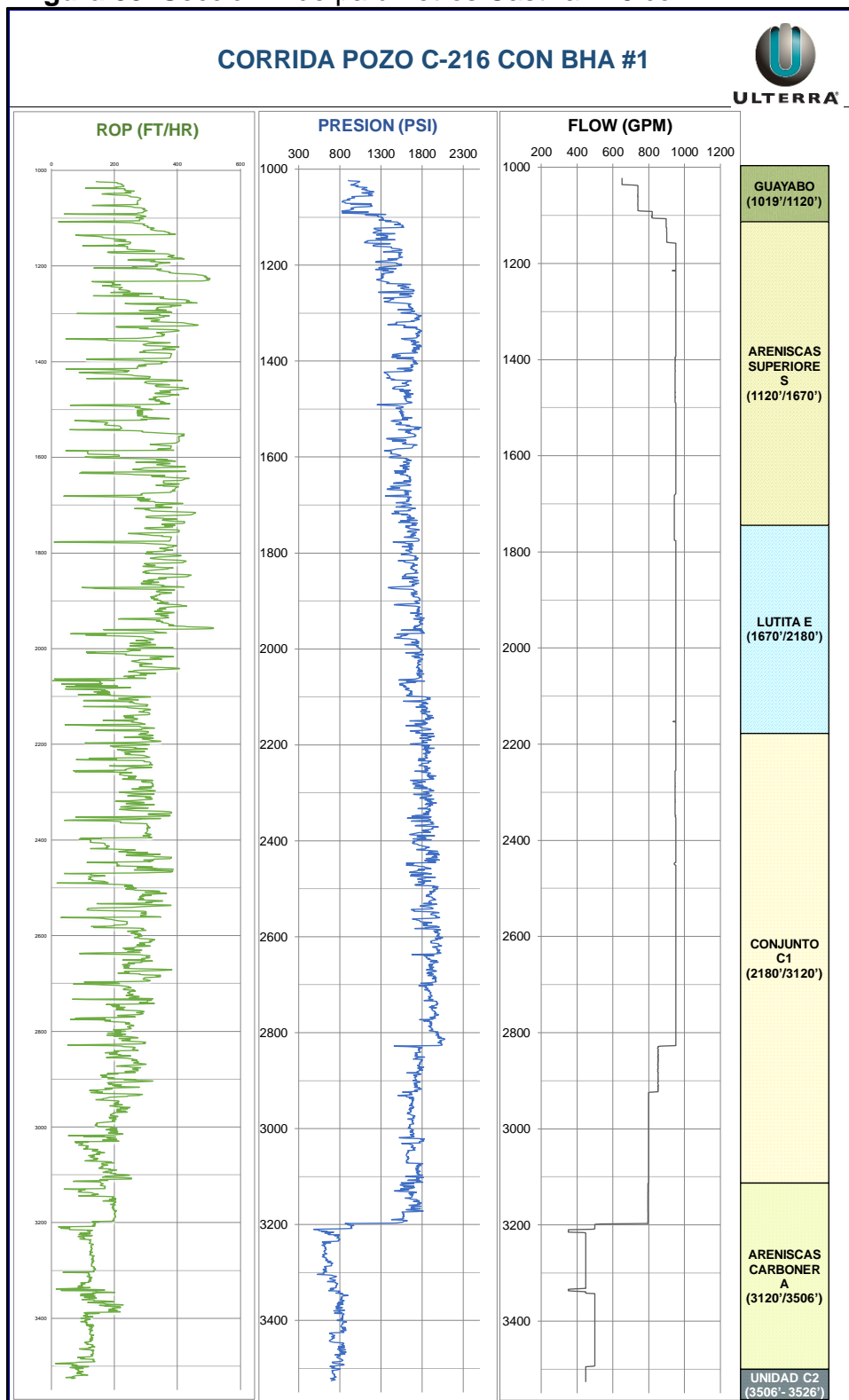
Cuadro 2. Detalles de la corrida del pozo C216 con el BHA #1

DETALLES DE LA CORRIDA					
FECHA DE ENTRADA	10-Oct-17				
FECHA DE SALIDA	12-Oct-17				
DEPTH IN (Ft)	1019				
DEPTH OUT (Ft)	3526				
FOOTAGE (ft)	2507				
HORAS EFECTIVAS (HR)	12.01				
HORAS TOTALES (Hr)	24.00				
ROP EFECTIVA (Ft/Hr)	208.74				
ROP TOTAL (FT/Hr)	104.46				
PIES ROTADOS (Ft)	2311	Hr ROTADAS	10.64	ROP Rot (ft/hr)	217.20
PIES DESLIZADOS (Ft)	196	Hr Deslizadas	1.37	ROP Sld (ft/hr)	143.07
% ROTADO/%DESLIZADO	92.2%			7.8%	
MAX WOB SLD (Klbs)	12	MAX PRES DIF SLD (psi)			350
MAX WOB ROT (klbs)	22	MAX PRES DIF ROT (psi)			600
HORAS DE DRILL OUT (hr)	1.00				
CALIFICACIÓN IADC	0 – 0 – NO – A – X – I – NO – HP				

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2017.

A continuación, se hará el análisis de los resultados tras la implementación del BHA #1 en la sección de 12 ¼” en el pozo C216

Figura 33. Sección A de parámetros Castilla 216 con BHA #1

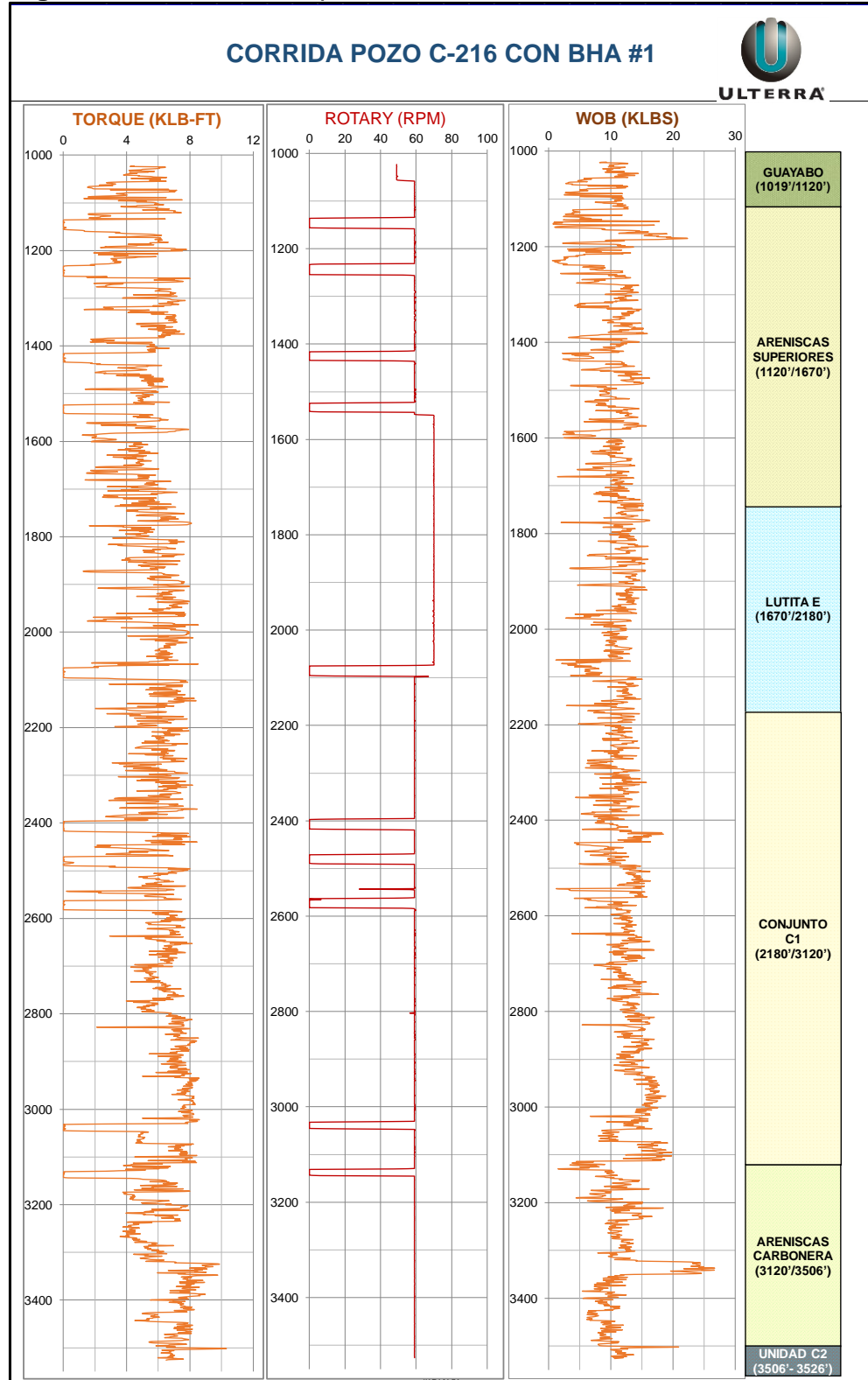


Fuente: ULTERRA, Bogotá 2017. Modificado por los autores.

Partiendo de los parámetros observados en la **Figura 33**, se evidencia una reducción en el caudal desde los parámetros óptimos que son 950 gpm a 800 gpm, este parámetro se manejó de esta forma desde los 2800' hasta los 3200' de profundidad, lo cual fue resultado de prevenir una pérdida de fluido de perforación, sin embargo, pasando los 3200' de profundidad la causa que llevo a una reducción del caudal fue una pérdida de fluido. Lo anterior repercute en la presión, donde a pesar de tener un comportamiento moderadamente uniforme, las reducciones de caudal ocasionan caídas de presión. Por último, la ROP efectiva presenta fluctuaciones dado que el intervalo que abarca la medición es muy corto y al presentarse múltiples intercalaciones no es claro su comportamiento; salvo durante los espesores donde fue requerido reducción de caudal.

En la **Figura 34** se puede ver la continuación de los parámetros obtenidos tras la primera corrida con el nuevo diseño con calibre extendido de 6".

Figura 34. Sección B de parámetros Castilla 216 con BHA #1



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2017. Modificado por los autores.

Al realizar el análisis de los siguientes parámetros presentes en la **Figura 34**, encontramos múltiples puntos donde las RPM's son reducidas en su totalidad al igual que el torque al cual se le puede atribuir problemas en la limpieza del espacio anular o un exceso en el contacto que tiene el ensamblaje de fondo con la formación, sin embargo, el WOB no presenta este comportamiento. Lo anterior, se atribuye a la operación de deslizamiento de las herramientas de fondo para la construcción de ángulo. El WOB es uno de los parámetros claves en el trabajo direccional, ya que así la desviación del motor puede dirigir al pozo hacia donde se desea.

El pozo Castilla 216 fue uno de los cuales requirió más de un BHA para culminar la etapa de perforación de la fase de 12 ¼" en el **Cuadro 3** se observan los detalles de la segunda corrida en este pozo.

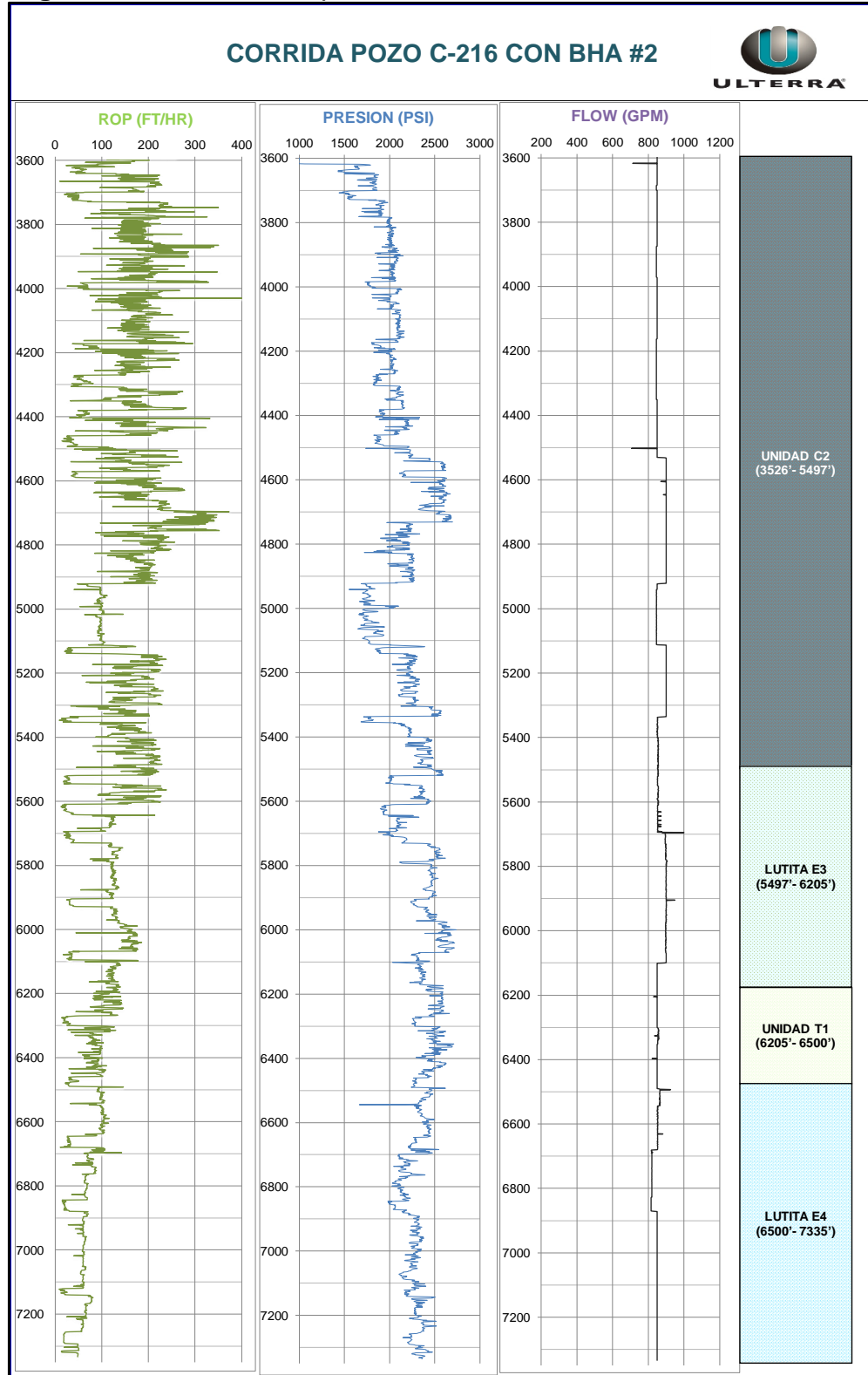
Cuadro 3. Detalles de la corrida del pozo C216 con el BHA #2

DETALLES DE LA CORRIDA					
FECHA DE ENTRADA	14-Oct-17				
FECHA DE SALIDA	21-Oct-17				
DEPTH IN (Ft)	3616				
DEPTH OUT (Ft)	7335				
FOOTAGE (ft)	3719				
HORAS EFECTIVAS (HR)	48.84				
HORAS TOTALES (Hr)	74.00				
ROP EFECTIVA (Ft/Hr)	76.15				
ROP TOTAL (FT/Hr)	50.26				
PIES ROTADOS (Ft)	3190	Hr ROTADAS	30.62	ROP Rot (ft/hr)	104.18
PIES DESLIZADOS (Ft)	529	Hr Deslizadas	18.22	ROP Sld (ft/hr)	29.03
% ROTADO/%DESLIZADO	85.8%			14.2%	
MAX WOB SLD (Klbs)	12	MAX PRES DIF SLD (psi)			200
MAX WOB ROT (klbs)	18	MAX PRES DIF ROT (psi)			600
HORAS DE DRILL OUT (hr)					
CALIFICACIÓN IADC	0 - 1 - BT - G - X - I - NO - TD				

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2017.

A continuación, se hará el análisis de los resultados tras la implementación del BHA #2 en la sección de 12 ¼" en el pozo C216

Figura 35. Sección A de parámetros Castilla 216 con BHA #2

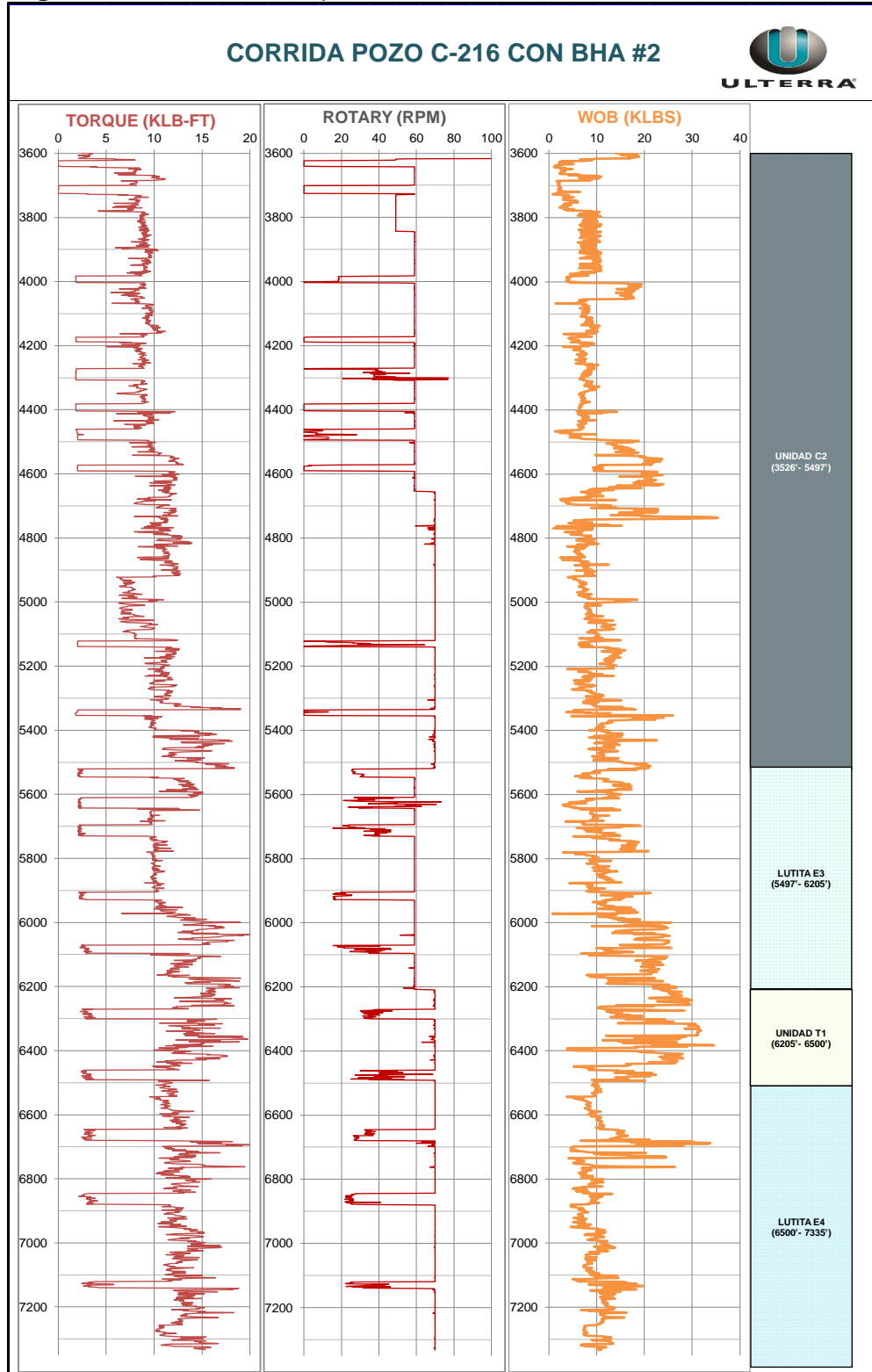


Fuente: ULTRERRA, Bogotá 2017. Modificado por los autores.

Los parámetros que se ilustran en la **Figura 35** muestran un comportamiento más estable en lo que concierne al galonaje, presenta ligeras variaciones durante las transiciones de las formaciones, esto para ajustar condiciones operativas como la limpieza del hueco, que de mantener un alto caudal se puede lavar la formación y perder el diámetro original del pozo. En el caso de la presión que tiende a mantener el mismo comportamiento del caudal, existen unos puntos en los cuales esto no se cumple, es decir, mientras que el caudal es alto la presión disminuye como se observa cerca de los 4600' y 5000'; esto se puede atribuir al efecto de jetting el cual consta de realizar la perforación por medio de la potencia hidráulica generada por las bombas y el fluido de perforación. Por último, la ROP efectiva mantiene un valor elevado en la mayoría de la unidad C2, donde al correlacionarla con la presión se evidencia un incremento considerable, posiblemente a una falencia en la limpieza del hueco; al acercarse a la base de esta se evidencia una reducción de los parámetros. Desde la unidad lutita E3, pasando por la unidad T1 hasta la base de la unidad lutita E4 la ROP efectiva fue baja posiblemente a las intercalaciones de limolitas presentes, adicionalmente la base de la lutita E4 es considerada la formación objetivo para la sección 12 ¼" en los pozos del Campo Castilla.

La siguiente sección de los parámetros obtenidos durante la segunda corrida se pueden observar en la **Figura 36**.

Figura 36. Sección B de parámetros Castilla 216 con BHA #2

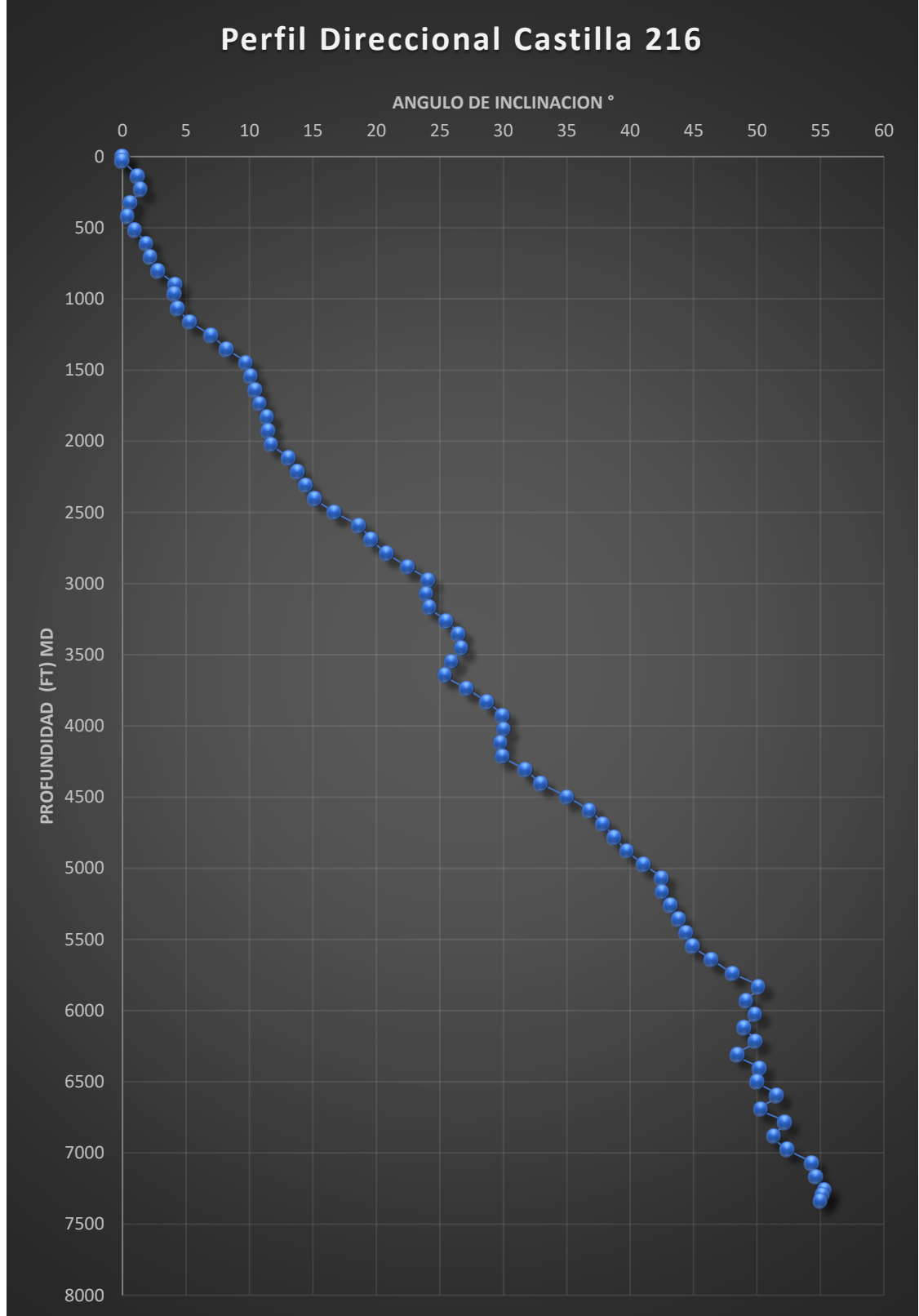


Fuente: ULTERRA, Bogotá 2017. Modificado por los autores.

Los parámetros que se muestran en la **Figura 36** muestran eventos diferentes. Iniciando por el WOB el cual tiene un comportamiento ascendente desde el inicio de la sección y tiene como valor máximo la unidad T1, donde al ver la gráfica de torque presenta un incremento paralelo, esto, posiblemente a la acumulación de energía torsional, la cual se presentó también cerca de los 6700' en la unidad lutita E4; la cual requirió un rango de aplicabilidad mucho más elevado que para perforar las demás formaciones; adicionalmente se presentan picos de WOB en medio de la unidad C2 en la unidad T1 y lutita E4; esto produjo una reducción mínima en la RPM's, lo que indica que posiblemente la profundidad a la cual el cortador debía estar enterrado en la formación excedió el ideal lo que generó una acumulación de torque en el BHA. Por otro lado, las RPM's fluctúan bastante, tanto por deslizamiento de las herramientas de fondo, como el "roquear" la tubería, esto quiere decir que se rota por secciones la tubería, lo cual se hace para no perder el tool face del motor de fondo. Por último, el torque mantiene un comportamiento similar a las RPM's tanto en el deslizamiento como mantener el tool face, este parámetro se reduce corroborando que la sarta este libre y se pueda verificar la orientación de la herramienta; de incrementarse el torque mientras que las RPM's disminuyen o han mantenido un valor constante indicaría una acumulación de energía torsional en algún punto del BHA.

Este pozo hace caso al tipo de perfil direccional, tipo J el cual ha sido el determinado por Ecopetrol S.A para obtener beneficios económicos, siempre manteniendo la calidad e integridad de un pozo petrolero. En la **Grafica 2** se puede evidenciar el perfil direccional real del pozo Castilla 216.

Grafica 2. Perfil direccional del pozo Castilla 216



Reporte de corrida

- Al iniciar la perforación de la sección 12 ¼" del pozo Castilla 216, el KOP ya había sido iniciado a 480' en la fase de 17 ½".
- Se realizó el trabajo de drill out desde el TOC que se encontró a 987' hasta llegar al zapato a 1012'; se perforo parte de formación hasta llegar a 1019' y se repasó tres veces. Se realizo cambio de agua por lodo para continuar con la perforación.
- Al acercarse a los 1201' se inicia a perforar con parámetros al máximo del programa los cuales son: galonaje a 950 gpm, WOB 10-22 Klbs, RPM de 60 y torque de 4-8 Klbs*ft.
- Al llegar a los 2800' el caudal fue reducido a 800 gpm con el objetivo de evitar pérdidas de fluido, a pesar de esto a los 3191' se presentaron perdidas del fluido de perforación para lo cual se bombeo una píldora LCM observando retornos parciales, se continuo la perforación hasta los 3398' donde se circuló reciprocando la sarta de perforación para realizar chequeo de fluido, se observó pérdidas de 220 barriles por hora.
- Se continuó perforando hasta los 3506' donde se circuló y se realizó chequeo de fluido; se tomaron muestras para determinar la llegada al tope de la formación C2, se bombeo 100 bls de píldora LCM para iniciar viaje a superficie sin problemas.
- Se armo y bajo el siguiente BHA #2 hasta 3506' con el cual se continuó perforando; al llegar a los 4539' se tomó la decisión de incrementar las RPM de 60 a 70 y el caudal de 850 a 900 gpm, para así optimizar la ROP, a lo cual el pozo aporto una respuesta positiva reflejada en la ROP instantánea.
- Al llegar a los 5303' se circuló hasta obtener retornos limpios bombeando una píldora viscosa; posteriormente, se realizó viaje corto para verificar el diámetro del pozo desde la profundidad actual (5303') hasta los 3920'.
- A 3920' se evidencio 20 klb de overpull, se verifico sarta libre sin éxito, se trabaja reduciendo galonaje y se tensiona hasta 220 klb, se observa movimiento de la sarta bajando y subiendo reiteradamente a una tasa de 3 ft/min retirando una parada, liberando la sarta a los 3838', se realizó repasada de la parada #31 y se circuló hasta obtener retornos limpios.
- Se decidió bajar hasta 5303' y perforó con control direccional desde 5303' hasta 5398' en donde se repasó una vez cada parada, se continuó perforando con control direccional la unidad C2 hasta 5497', continua la perforación de la unidad Lutita E3 desde la profundidad actual hasta 6205', se llegó a la base de la formación T1 a los 6555'.

➤ Una vez perforada la unidad Lutita E4 que abarca desde los 6555' hasta 7335' se perforo con una ROP entre 20 y 50 ft/hr para evitar pérdidas de fluido. Una vez geología definió TD, se inició viaje a superficie sin problemas.

En las **Figura 37** y **Figura 38** se puede observar el diseño de Ulterra con calibre de 6" tras su implementación en la sección de 12 ¼" del pozo Castilla 216.

Figura 37. Vista de Planta de la broca con calibre de 6"- Castilla 216



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2017.

Figura 38. Vista del calibre de la broca con calibre de 6"- Castilla 216



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2017.

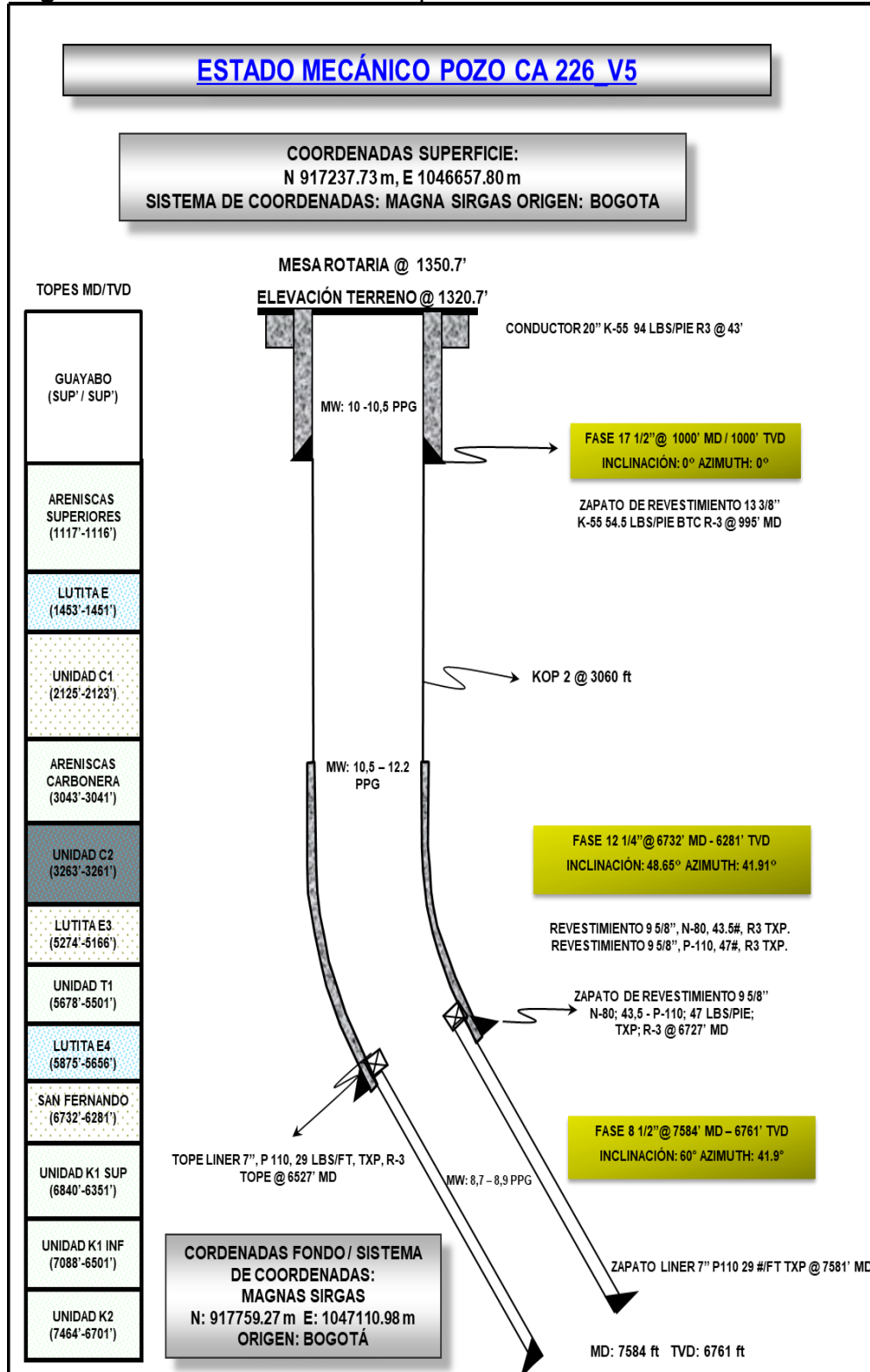
4.2 POZO CASTILLA 226

El día 22 de enero de 2018 se dio inicio a la corrida de la broca tipo U519S en la sección de 12 1/4"; cumpliendo con el contrato estipulado entre la operadora ECOPEPETROL y la prestadora de servicios Ulterra, mediante el cual se suministra el servicio de alquiler de brocas y servicios complementarios para la campaña de perforación en el campo.

El trabajo direccional, fue realizado con un motor de fondo con un ángulo de desviación (Bend Housing) de 1,5°, perteneciente a la compañía Weatherford. La perforación de la fase inició en la sección vertical del pozo a una inclinación de 5,06° y un azimut de 2,6° y a una profundidad de 913 ft (TVD). se mantuvo verticalidad hasta la profundidad de inicio de trabajo direccional (KOP) a 2945'. Sin embargo, durante la corrida con el BHA #1 no se llegó a la profundidad donde se inicia el trabajo direccional por lo cual salió con una inclinación de 0.75° y un azimut de 183,83°. Este tramo de la sección de 12 1/4" finalizó a una profundidad de 2795'. Este pozo se finalizó con una inclinación de 46,96° y un azimut de 41,24°.

A continuación, en la **Figura 39** se muestra el estado mecánico del pozo Castilla 226.

Figura 39. estado mecánico del pozo Castilla 226



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018.

En el **Cuadro 4**, se puede observar los detalles de la corrida de la sección 12 ¼” con el BHA #1 en el pozo C216

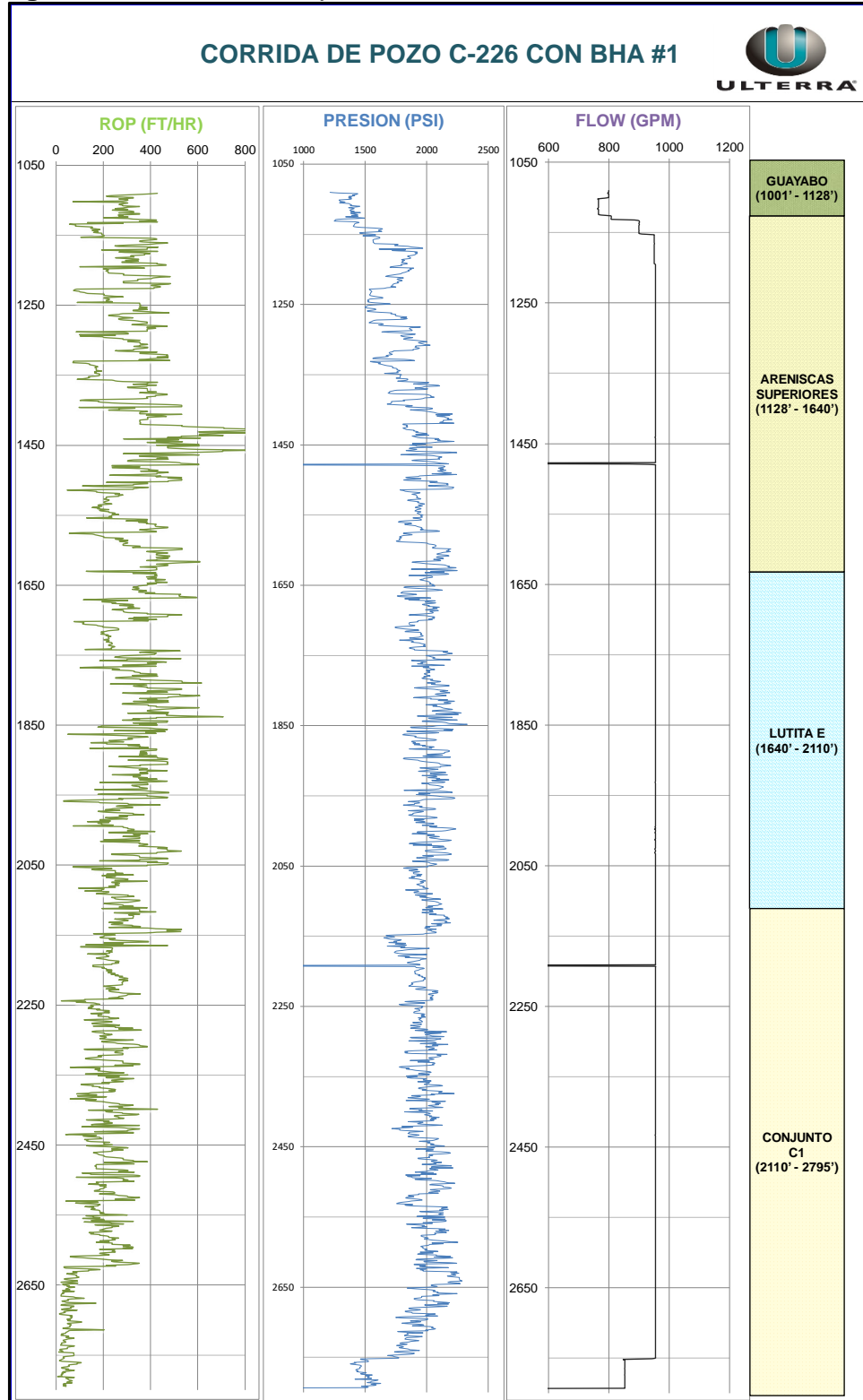
Cuadro 4. Detalles de la corrida del pozo C226 con el BHA #1

DETALLES DE LA CORRIDA					
FECHA DE ENTRADA	22-Jan-18				
FECHA DE SALIDA	23-Jan-18				
DEPTH IN (Ft)	1001				
DEPTH OUT (Ft)	2795				
FOOTAGE (ft)	1794				
HORAS EFECTIVAS (HR)	10.75				
HORAS TOTALES (Hr)	21.50				
ROP EFECTIVA (Ft/Hr)	166.88				
ROP TOTAL (FT/Hr)	83.44				
PIES ROTADOS (Ft)	1640	Hr ROTADAS	9.89	ROP Rot (ft/hr)	165.82
PIES DESLIZADOS (Ft)	154	Hr Deslizadas	0.86	ROP Sld (ft/hr)	179.07
% ROTADO/%DESLIZADO	91.4%			8.6%	
MAX WOB SLD (Klbs)	15	MAX PRES DIF SLD (psi)			350
MAX WOB ROT (klbs)	25	MAX PRES DIF ROT (psi)			550
HORAS DE DRILL OUT (hr)	2.00				
CALIFICACIÓN IADC	0 - 0 - NO - A - X - I - PN/BU - WO				

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018.

A continuación, se hace el análisis de los resultados tras la implementación del BHA #1 en la sección de 12 ¼” en el pozo C226

Figura 40. Sección A de parámetros Castilla 226 con BHA #1

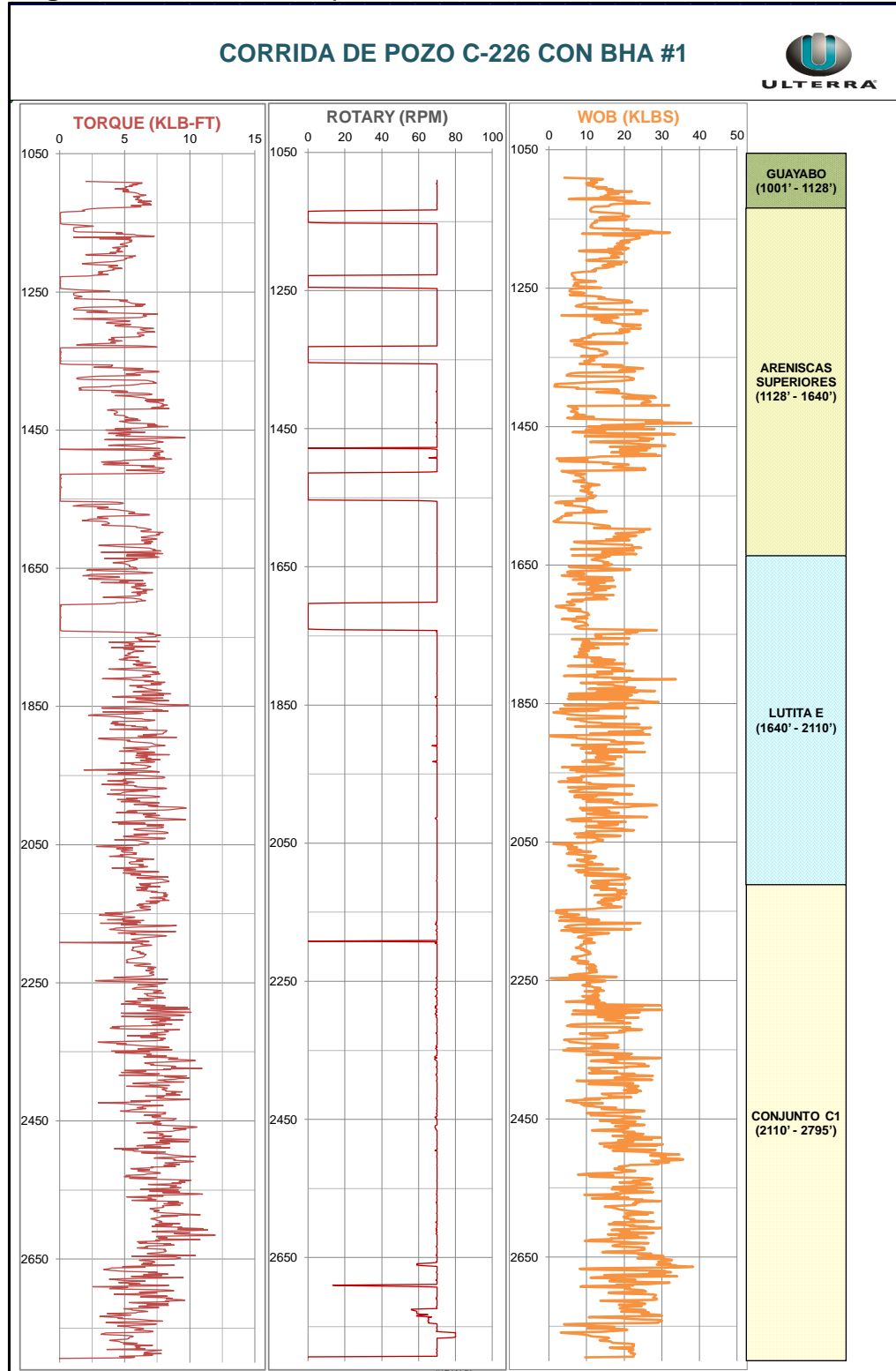


Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018. Modificado por los autores.

Los parámetros presentes en la **Figura 40** mostraron un comportamiento estable; el caudal tras el trabajo de drill out se mantuvo constante durante toda la sección lo que indica que el galonaje aplicado era el óptimo para la perforación. La presión también mantiene un valor constante, presenta fluctuaciones dado que los ripsos pueden presentar cierta resistencia al fluido de perforación para ascender, pero esta fuerza resulta momentánea, por lo tanto, no muestra variaciones significativas. Por último, la ROP presenta fluctuaciones en las transiciones entre las formaciones y un descenso al finalizar la sección para evitar embotamiento de la broca por falta de tiempo de circulación. Cabe resaltar dos puntos en los cuales el caudal y la presión caen abruptamente a cero, esto resulta de un error durante la toma de datos.

La sección restante de los parámetros obtenidos tras la primera corrida se puede observar en la **Figura 41**.

Figura 41. Sección B de parámetros Castilla 226 con BHA #1



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018. Modificado por los autores.

La segunda sección de parámetros presentes en la **Figura 41** muestran valores constantes a lo largo de la corrida; el WOB presenta pequeños picos, los cuales se pueden atribuir a espesores de arenas sueltas que permitieron acelerar la perforación. Con respecto a las RPM's se puede evidenciar el comportamiento normal de operaciones de deslizamiento de las herramientas de fondo; al final de la sección muestra una pequeña fluctuación, posiblemente por una leve acumulación de energía torsional en algún punto en el BHA. Por último, el torque se acomoda al comportamiento de la RPM's reduciéndose este durante el deslizamiento de las herramientas de fondo.

El pozo Castilla 226 fue uno de los cuales requirió más de un BHA para culminar la etapa de perforación de la fase de 12 ¼" en el **Cuadro 5** se observan los detalles de la segunda corrida en este pozo.

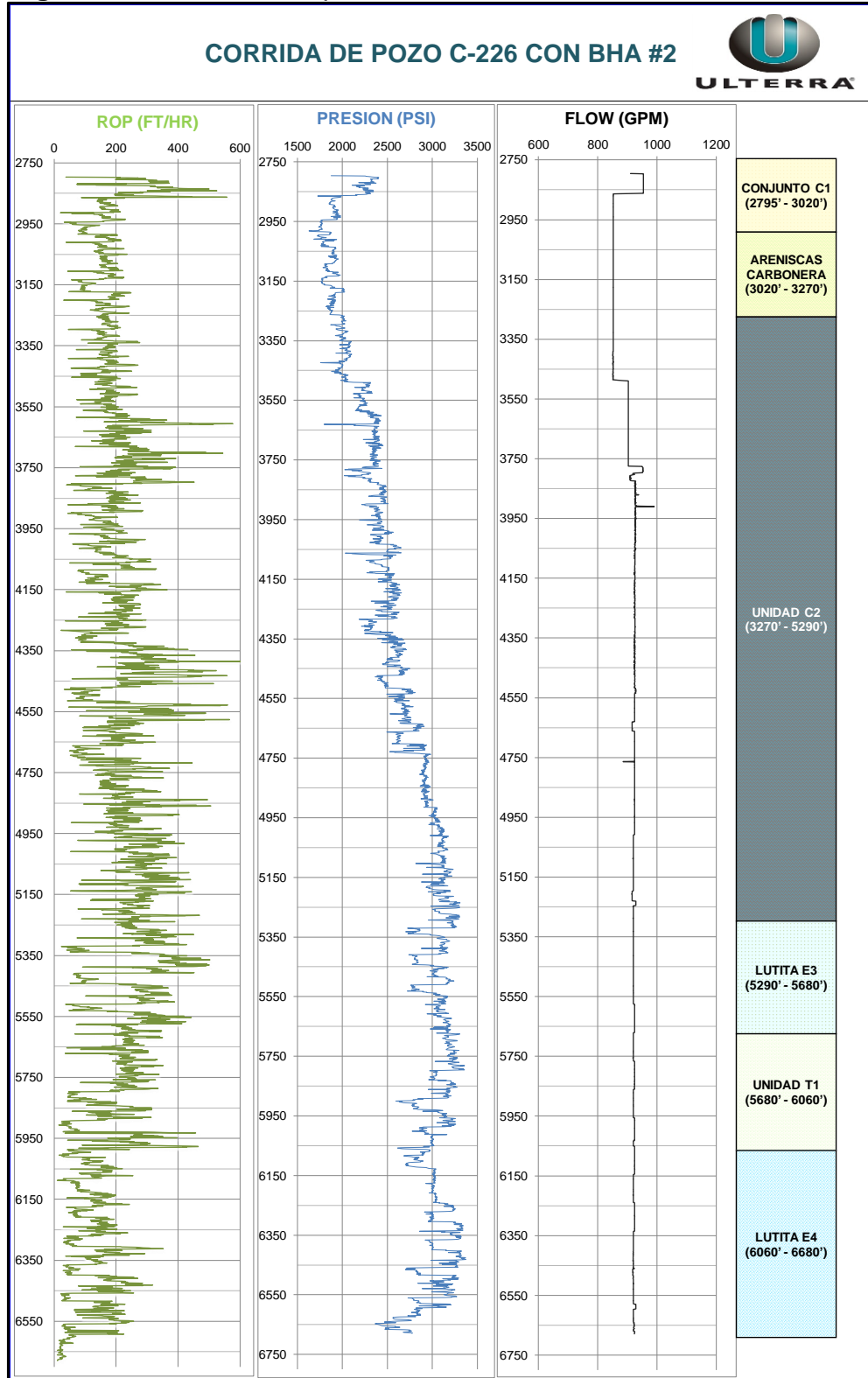
Cuadro 5. Detalles de la corrida del pozo C226 con el BHA #2

DETALLES DE LA CORRIDA					
FECHA DE ENTRADA	23-Jan-18				
FECHA DE SALIDA	28-Jan-18				
DEPTH IN (Ft)	2795				
DEPTH OUT (Ft)	6680				
FOOTAGE (ft)	3885				
HORAS EFECTIVAS (HR)	33.38				
HORAS TOTALES (Hr)	59.00				
ROP EFECTIVA (Ft/Hr)	116.39				
ROP TOTAL (FT/Hr)	65.85				
PIES ROTADOS (Ft)	3177	Hr ROTADAS	22.65	ROP Rot (ft/hr)	140.26
PIES DESLIZADOS (Ft)	708	Hr Deslizadas	10.73	ROP Sld (ft/hr)	65.98
% ROTADO/%DESLIZADO	81.8%			18.2%	
MAX WOB SLD (Klbs)	18	MAX PRES DIF SLD (psi)			350
MAX WOB ROT (klbs)	25	MAX PRES DIF ROT (psi)			550
HORAS DE DRILL OUT (hr)	N/A				
CALIFICACIÓN IADC	0 - 0 - NO - A - X - I - NO - TD				

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018.

A continuación, se hará el análisis de los resultados tras la implementación del BHA #2 en la sección de 12 ¼" en el pozo C226.

Figura 42. Sección A de parámetros Castilla 226 con BHA #2

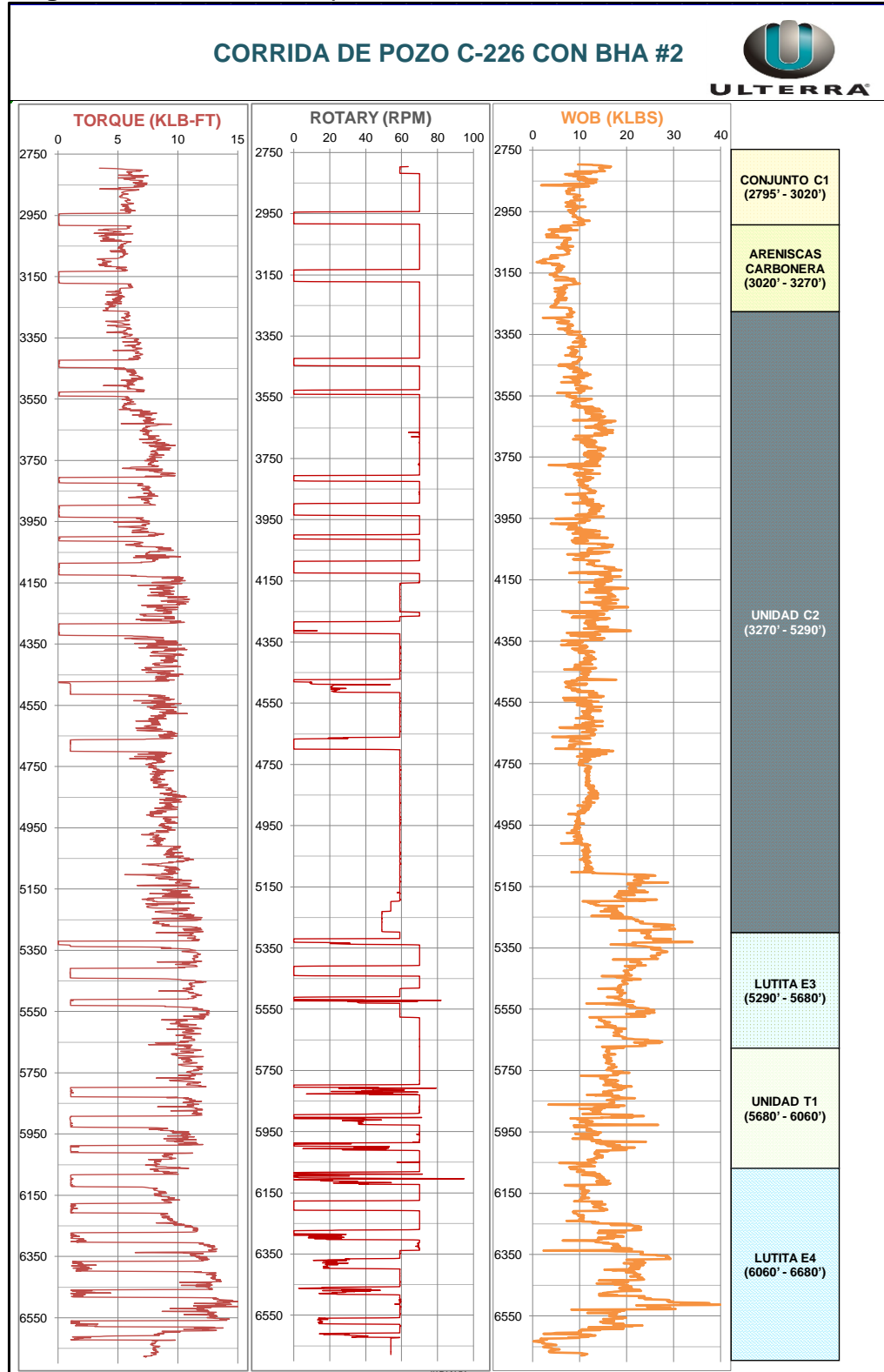


Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018. Modificado por los autores.

En la **Figura 42** no se aprecia un comportamiento uniforme de los parámetros presentes; en primer lugar, el caudal inicio con valores bajos, al llegar a los parámetros óptimos según el programa de perforación se mantuvo constante hasta el final de la perforación. Por otro lado, la presión tuvo un comportamiento creciente a lo largo de la sección, donde al final se mostraron valores elevados atribuidos posiblemente a la mala limpieza del pozo. Tomando como punto de análisis el galonaje el cual fue constante, es posible que no haya sido el correcto para realizar una óptima remoción de los ripios generados por la perforación. Analógicamente esto se puede corroborar con la ROP efectiva de la sección, al iniciar con valores elevados y al final tener un comportamiento opuesto a la presión, obteniendo así valores muy bajos. Lo anterior es el resultado de múltiples esfuerzos incensarios a los ideales para perforar; un factor adicional era que la profundidad hacia el final de la sección correspondía a la totalidad de la fase de 12 ¼" a 6680' de profundidad.

La sección restante de los parámetros obtenidos tras la segunda corrida se puede observar en la **Figura 43**.

Figura 43. Sección B de parámetros Castilla 226 con BHA #2

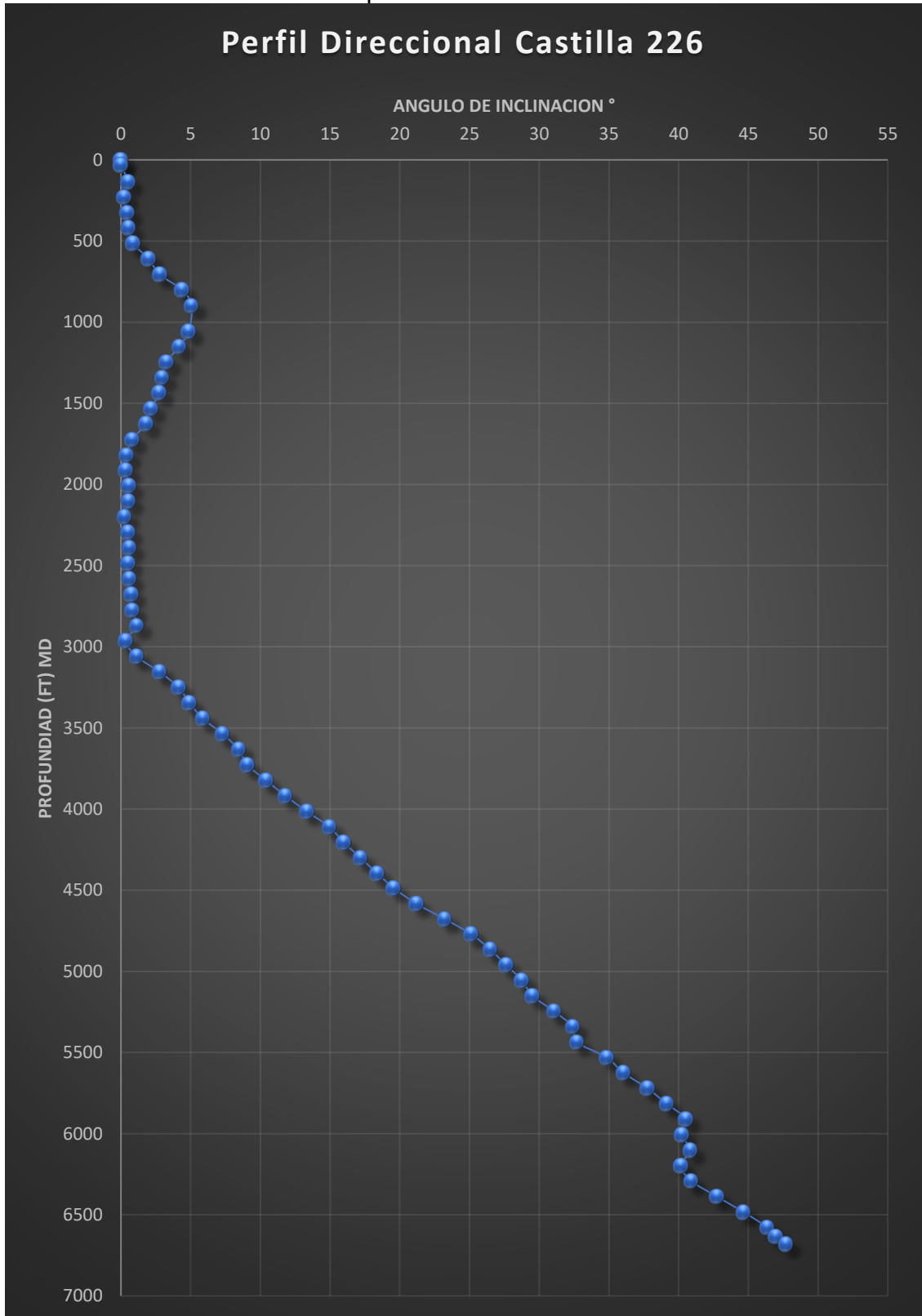


Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018. Modificado por los autores.

Los parámetros que se muestran en la **Figura 43** también muestra variaciones durante la perforación de esta sección. El WOB inicio con valores bajos, hasta la base de la formación C2, partiendo de ese punto en adelante el peso aplicado sobre la broca fue incrementado ya que son unidades con un grado de dureza superior; un claro ejemplo se presenta en las unidades lutita E3 y E4. Las RPM's mostraron un comportamiento errático, atribuido a deslizamiento de las herramientas de fondo y a "roquear" la tubería, lo cual fue explicado anteriormente. Por último, el torque se comportó de la misma forma que las RPM's, el cual obtuvo caídas durante los mismos espesores donde se realizaron deslizadas y donde se roqueo la tubería.

Este pozo hace caso al tipo de perfil direccional, tipo J el cual ha sido el determinado por Ecopetrol S.A para obtener beneficios económicos, siempre manteniendo la calidad e integridad de un pozo petrolero. En la **Grafica 3** se puede evidenciar el perfil direccional real del pozo Castilla 226.

Grafica 3. Perfil direccional del pozo Castilla 226



Reporte de corrida

- La perforación de la sección de 12 ¼" del pozo Castilla 226 se inició con el trabajo de drill out desde el TOC que se encontraba ubicado a 913' y se perforó hasta los 992' sin problema, se realizó prueba de integridad del revestimiento, se llegó al final del zapato a los 998' sin problema; se esperó a que se realizara el desplazamiento de agua por lodo nuevo; se continuó perforando hasta los 1010' de profundidad, esta operación se repasó tres veces.
- Se inició la perforación de la sección en los 1010' de profundidad, a los 1150' el galonaje llegó al máximo permitido por el programa de perforación siendo este de 950 gpm, y se perforó así hasta los 2624' donde se presentó un incremento en la presión pasando de 1900 a 2100 psi.
- Por lo cual, se toma la decisión de levantar la sarta de perforación, repasar y circular hasta normalizar la presión, la cual posiblemente fue causada por una sobrecarga en los recortes en el anular.
- una vez se estabiliza se reanuda la perforación, pero se observa una caída de la ROP la cual venía a 200 ft/hr a los 60-80 ft/hr instantáneos; el comportamiento del torque es errático, al mismo tiempo que la ROP es baja, sin embargo, se continúa perforando desde 2624' hasta 2689', durante este intervalo la presión cayó hasta 1700 psi fuera de fondo.
- A los 2689' se tomó la decisión de deslizar 3' lo que mostró un incremento del WOB hasta 20 klbs, posterior a la prueba del motor deslizando se continúa perforando desde 2692' hasta 2750' donde el caudal fue reducido para no inducir pérdidas por la proximidad al tope de la formación Areniscas Carboneras.
- se continuó perforando hasta llegar a los 2795' pero al observar que desde los 2624' la ROP no incrementa y se mantiene sobre los 20-50 ft/hr instantáneos, se toma la decisión de sacar a superficie para revisar herramientas direccionales y broca; se realizó viaje a superficie sin problemas.
- Al salir el motor se observa un washed out, adicionalmente el estabilizador y la broca se encontraban embotados.
- Se arma y se baja el BHA #2 para esta sección con los ajustes necesarios para reanudar la perforación desde 2795' hasta 2865' con un incremento en la ROP instantánea de 250-350 ft/hr en ese punto se controla ROP por programa de perforación a no más de 150 ft/hr con el fin de evitar inducir pérdidas en la formación Arenisca Carbonera.
- Se continúa perforando desde 2865' hasta los 2945' donde por programa direccional es el punto de inicio de construcción de ángulo KOP, se sigue con la

perforación hasta los 3804' donde se presenta una caída de presión de 400 psi, se levantó la sarta y se verificó presión fuera de fondo la cual cayó de 2100 psi a 1700 psi

- se suspende caudal para revisar bomba por bomba, una de ellas presentó problemas para levantar la presión, se continuó trabajando con las otras dos bombas bajo caudal y presión permitidas.
- Al llegar a los 5102' se bombearon tren de píldoras dispersas para minimizar posible embotamiento del ensamblaje de fondo y se inició viaje hasta el zapato.
- A los 4032' se presentó un punto apretado que se trabajó mecánicamente; este presentó un overpull máximo de 50 klbs sin éxito, por lo cual se inició el back reaming hasta 3679' desde este punto hasta los 2150' no se presentaron problemas.
- Al momento de bajar se presentó apoyo a los 2786' por lo cual se bajó circulando con 840 gpm hasta los 5102'.
- se continuó perforando hasta los 6592' donde se controló ROP a no más de 150 ft/hr por órdenes de geología, se perforó bajo estas condiciones hasta 6622' donde se controla ROP a 20 ft/hr y continuó perforación bajo estas condiciones hasta 6670' donde se controló ROP a 10 ft/hr y se perforó hasta 6680' que fue el punto donde geología determino que era el TD, se inicia viaje a superficie sin problemas.

En las **Figura 44** y **Figura 45** se puede observar el paralelo antes y después de la implementación del diseño de Ulterra con calibre de 6" en la sección de 12 ¼" del pozo Castilla 226.

Figura 44. Vista de Planta de la broca con calibre de 6"- Castilla 226



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018

Figura 45. Vista del calibre de la broca con calibre de 6"- Castilla 226



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018

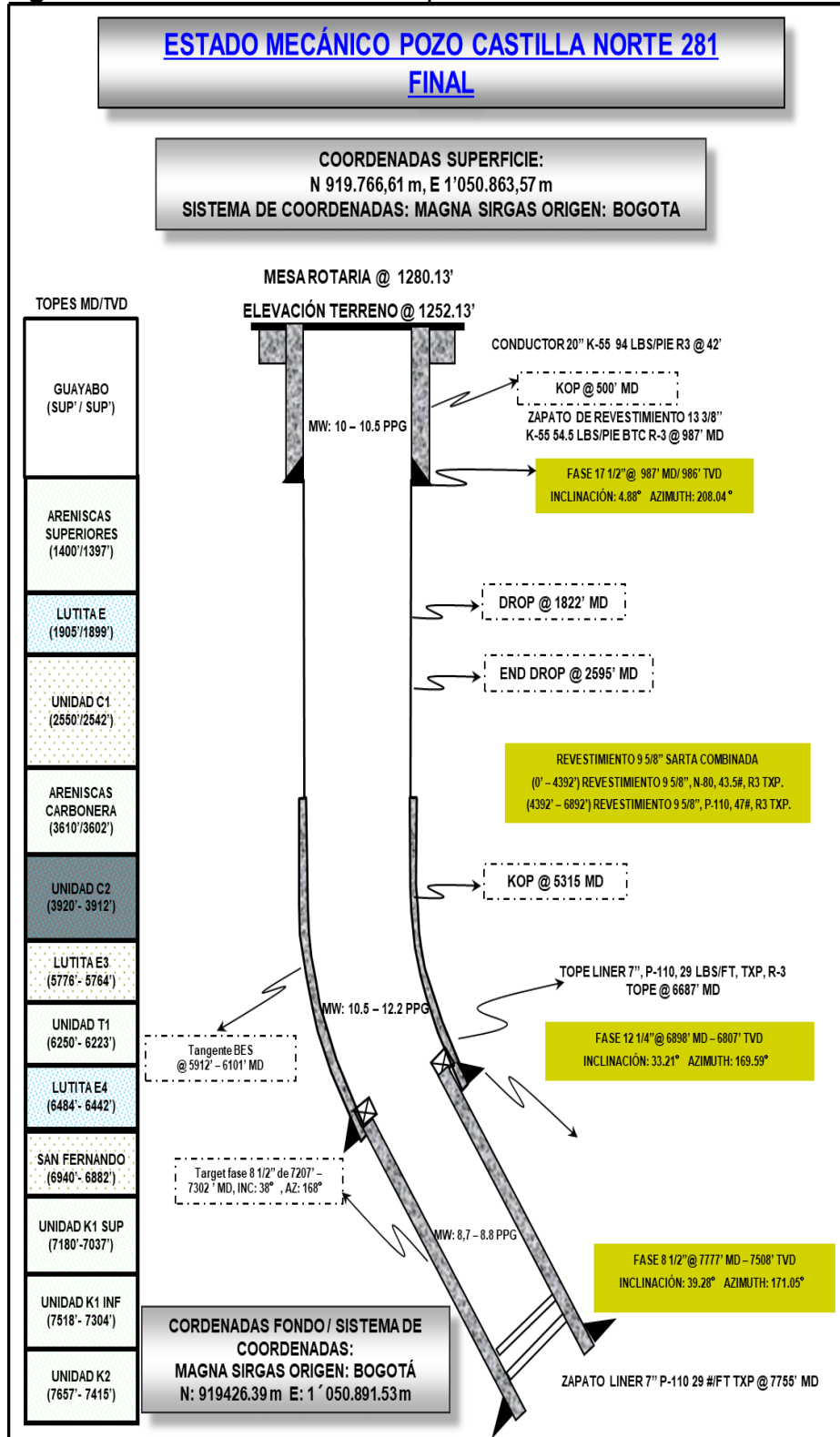
4.3 POZO CASTILLA NORTE 281

El día 10 de octubre de 2017 se dio inicio a la corrida de la broca tipo U519S en la sección de 12 1/4"; cumpliendo con el contrato estipulado entre la operadora ECOPETROL y la prestadora de servicios Ulterra, mediante el cual se suministra el servicio de alquiler de brocas y servicios complementarios para la campaña de perforación en el campo.

El trabajo direccional, fue realizado con un motor de fondo con un ángulo de desviación (Bend Housing) de 1,5°, perteneciente a la compañía Weatherford. La perforación de la fase inició en la sección vertical del pozo a una inclinación de 5,18° y un azimut de 206,93° y a una profundidad de 942 ft (TVD). Se evidencio que la formación mostro una tendencia a construir ángulo, por lo que se requirió un KOP adicional para mantener la sección vertical hasta el KOP donde realmente se aspiraba iniciar el trabajo direccional. La profundidad establecida en el plan de perforación para comenzar la construcción del ángulo respectivo era a los 5315'. La fase finalizó con una inclinación de 31,6°, un azimut de 271,2.

A continuación, en la **Figura 46** se muestra el estado mecánico del pozo Castilla Norte 281.

Figura 46. Estado mecánico del pozo Castilla Norte 281



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018.

En el **Cuadro 6**, se pueden observar los detalles de la corrida de la primera sección de la fase 12 ¼” del pozo CN281.

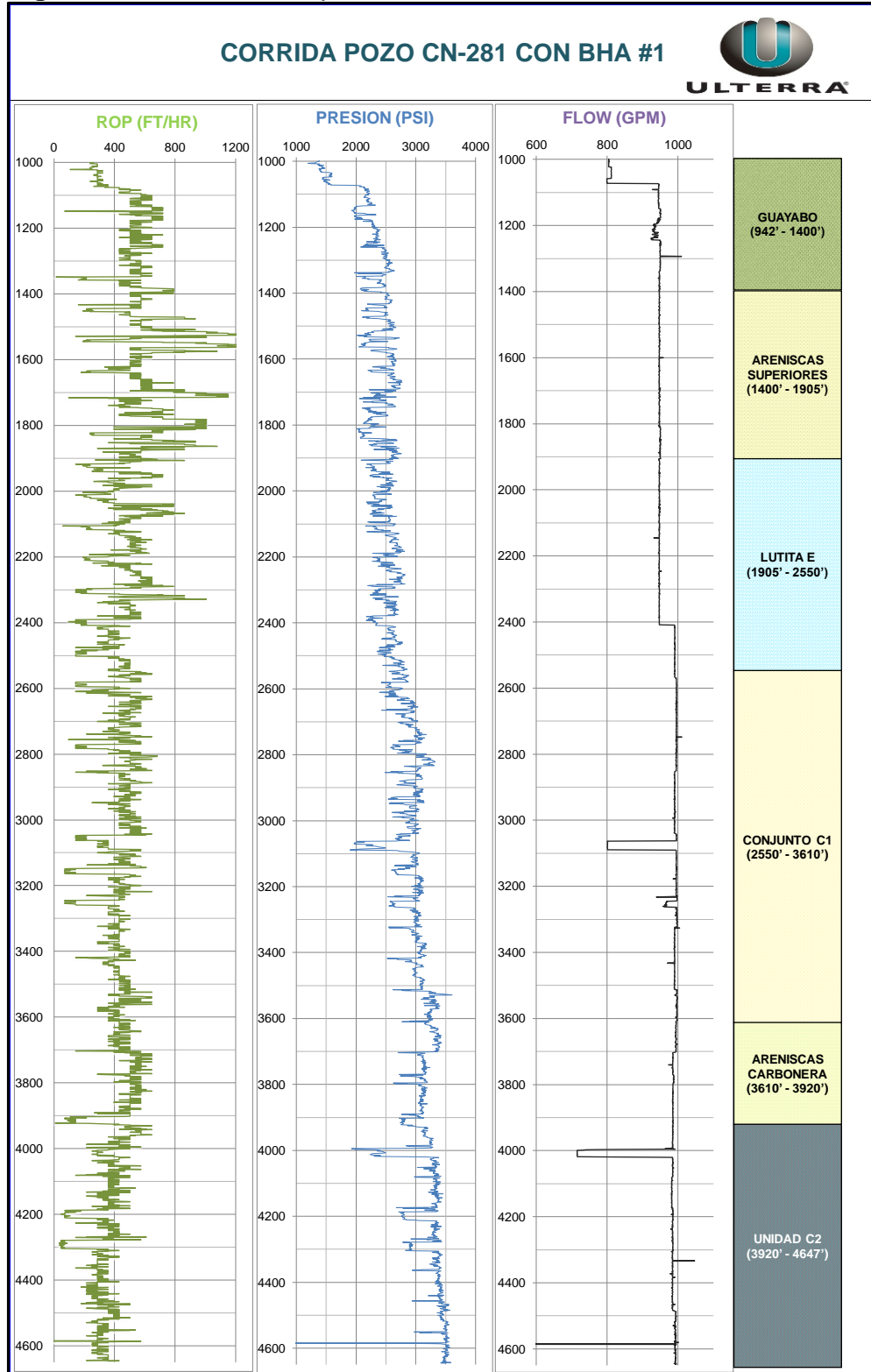
Cuadro 6. Detalle de la corrida pozo Castilla Norte 281 con el BHA #1

DETALLES DE LA CORRIDA					
FECHA DE ENTRADA	5-Feb-18				
FECHA DE SALIDA	7-Feb-18				
DEPTH IN (Ft)	992				
DEPTH OUT (Ft)	4647				
FOOTAGE (ft)	3655				
HORAS EFECTIVAS (HR)	10.98				
HORAS TOTALES (Hr)	25.50				
ROP EFECTIVA (Ft/Hr)	332.88				
ROP TOTAL (FT/Hr)	143.33				
PIES ROTADOS (Ft)	3376	Hr ROTADAS	8.71	ROP Rot (ft/hr)	387.60
PIES DESLIZADOS (Ft)	279	Hr Deslizadas	2.27	ROP Sld (ft/hr)	122.91
% ROTADO/%DESLIZADO	92.4%			7.6%	
MAX WOB SLD (Klbs)	12	MAX PRES DIF SLD (psi)			200
MAX WOB ROT (klbs)	30	MAX PRES DIF ROT (psi)			700
HORAS DE DRILL OUT (hr)	1.50				
CALIFICACIÓN IADC	0 – 1 – WT – A – X – I – NO – BHA				

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018.

A continuación, se hará el análisis de los resultados tras la implementación del BHA #1 en la sección de 12 ¼” en el pozo CN281

Figura 47. Sección A de parámetros Castilla Norte 281 con el BHA #1

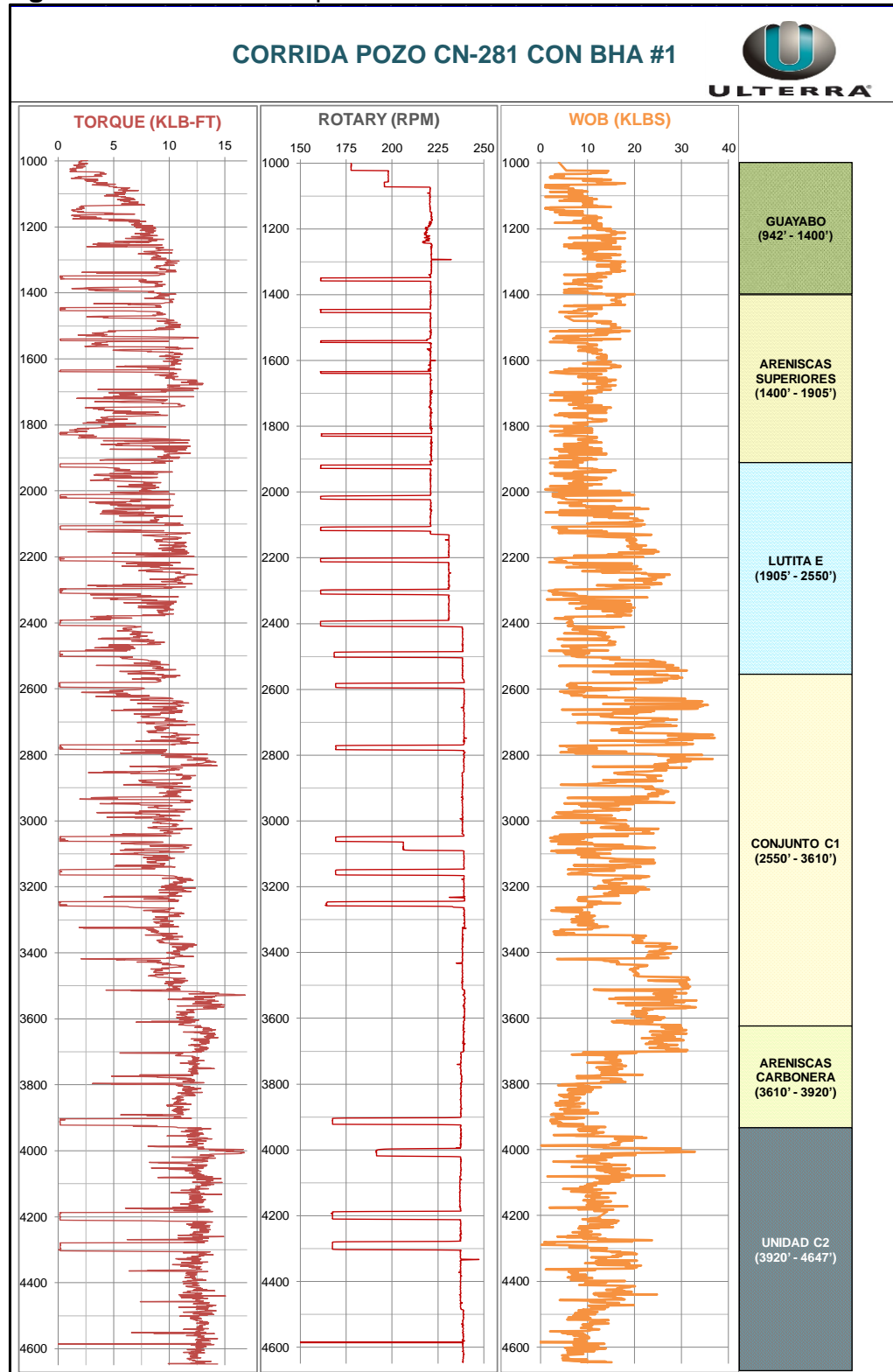


Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018. Modificado por los autores.

En los parámetros que se muestran en la **Figura 47** mostraron datos constantes durante la corrida con el BHA #1. El caudal fue uno de los parámetros que presentaron rangos de datos más constantes, se presentó un ligero incremento, el cual pudo haber sido para optimizar la perforación y asegurar limpieza de pozo; adicionalmente se muestran caídas abruptas en el caudal donde se evidencia poco espesor de formación, esto indicaría errores durante la toma de datos. La presión tuvo un comportamiento creciente desde el inicio de la fase hasta llegar a la mitad de la unidad C2, posiblemente se presentó una ligera acumulación de ripios lo que generó el incremento de presión. Por último, la ROP tuvo un comportamiento decreciente a lo largo de la perforación, sin embargo, las fluctuaciones de los datos fueron mínimas, lo que indica que el ajuste de parámetros fue óptimo para la perforación.

La sección restante de los parámetros obtenidos tras la primera corrida se puede observar en la **Figura 48**.

Figura 48. Sección B de parámetros Castilla Norte 281 con BHA #1



Fuente: ULTRERRA, Bogotá 2018. Modificado por los autores.

En la siguiente sección de parámetros ilustrados en la **Figura 48** mostraron rangos de variaciones más extensos. El WOB se puede generalizar diciendo que tuvo un comportamiento creciente durante esta sección; ya que las unidades superiores poseen una dureza menor, no fue requerido aplicarle mucho peso sobre la broca los cuales van entre 5 y 20 klbs, lo cual, al llegar a formaciones más profundas, la perforación requirió de valores más elevados los cuales van desde 15 hasta 35 klbs. En este caso las RPM's tras tener un crecimiento progresivo a lo largo de la corrida, evidencian comportamientos relacionados a "roquear" la tubería dado que era necesario verificar el tool face del motor de fondo. Por último, el torque presentó un comportamiento similar a las RPM's, no obstante, existieron puntos donde el torque aumentó mientras que las revoluciones por minuto se mantenían constantes; pero al correlacionar con el WOB muestra altos valores, esto se puede atribuir a la acumulación de energía torsional dado que la profundidad del cortador excede la ideal.

El pozo Castilla Norte 281 fue uno de los cuales requirió más de un BHA para culminar la etapa de perforación de la fase de 12 ¼" en el **Cuadro 7** se observan los detalles de la segunda corrida en este pozo.

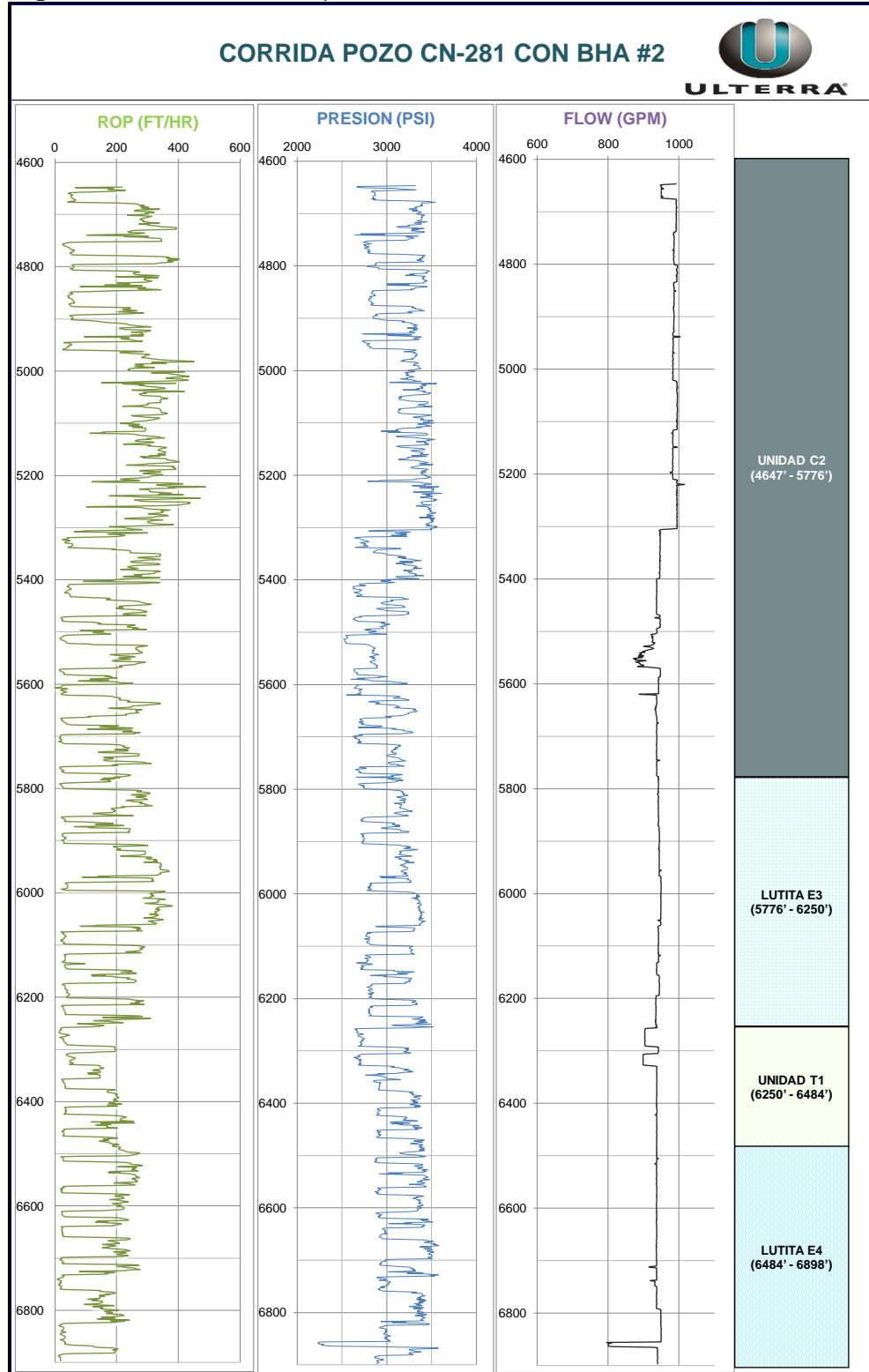
Cuadro 7. Detalle de la corrida pozo Castilla Norte 281 con el BHA #2

DETALLES DE LA CORRIDA					
FECHA DE ENTRADA	7-Feb-18				
FECHA DE SALIDA	10-Feb-18				
DEPTH IN (Ft)	4647				
DEPTH OUT (Ft)	6898				
FOOTAGE (ft)	2251				
HORAS EFECTIVAS (HR)	31.25				
HORAS TOTALES (Hr)	49.00				
ROP EFECTIVA (Ft/Hr)	72.03				
ROP TOTAL (FT/Hr)	45.94				
PIES ROTADOS (Ft)	1591	Hr ROTADAS	7.36	ROP Rot (ft/hr)	216.17
PIES DESLIZADOS (Ft)	660	Hr Deslizadas	23.89	ROP Sld (ft/hr)	27.63
% ROTADO/%DESLIZADO	70.7%			29.3%	
MAX WOB SLD (Klbs)	18	MAX PRES DIF SLD (psi)			150
MAX WOB ROT (klbs)	30	MAX PRES DIF ROT (psi)			600
HORAS DE DRILL OUT (hr)	N/A				
CALIFICACIÓN IADC	0 - 1 - WT - A - X - I - BU - TD				

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018.

A continuación, se hará el análisis de los resultados tras la implementación del BHA #2 en la sección de 12 ¼" en el pozo CN281.

Figura 49. Sección A de parámetros Castilla Norte 281 con el BHA #2

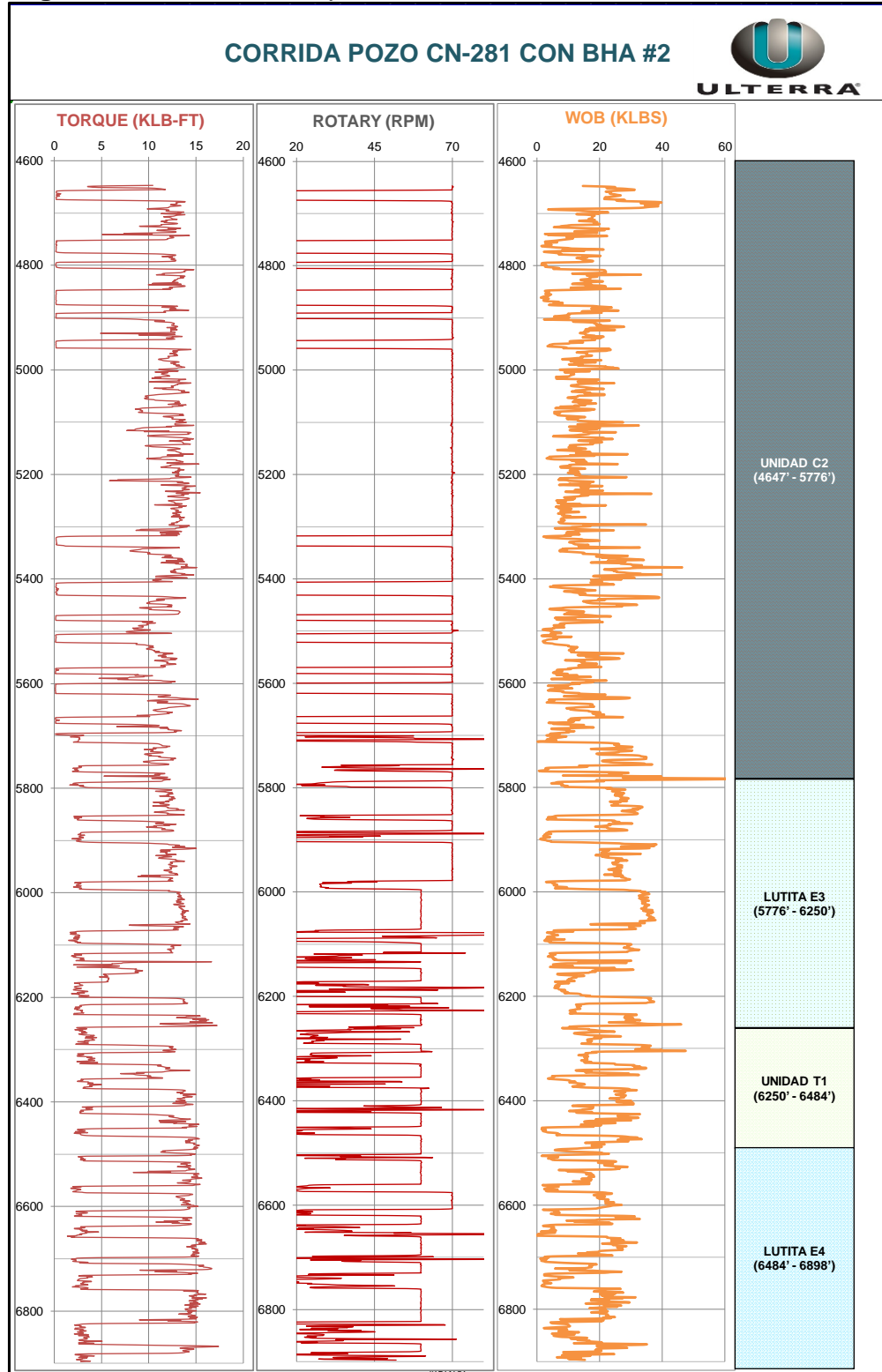


Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018. Modificado por los autores.

Los parámetros presentados en la **Figura 49** muestran un comportamiento relativamente constante. El caudal presentó un solo punto en el cual fue reducido a 5300' para estabilizar tanto la ROP como la presión, ya que presentaban valores elevados o muy fluctuantes. En el caso de la presión mostraba un crecimiento progresivo por lo cual fue reducida mediante el galonaje, tras su respectiva reducción la presión tomo valores más estables los cuales oscilan entre 2500 y 3500 psi desde la mitad de la unidad C2 hasta casi el final de la unidad lutita E4, los cuales continuaron constantes a lo largo de la sección. En el caso del WOB la sección inició con valores elevados, sin embargo, fluctuaban en gran medida por lo cual al reducir el galonaje, la ROP efectiva tomo rangos de menor magnitud, los cuales se mantuvieron constantes.

La sección restante de los parámetros obtenidos tras la segunda corrida se puede observar en la **Figura 50**.

Figura 50. Sección B de parámetros Castilla Norte 281 con BHA #2

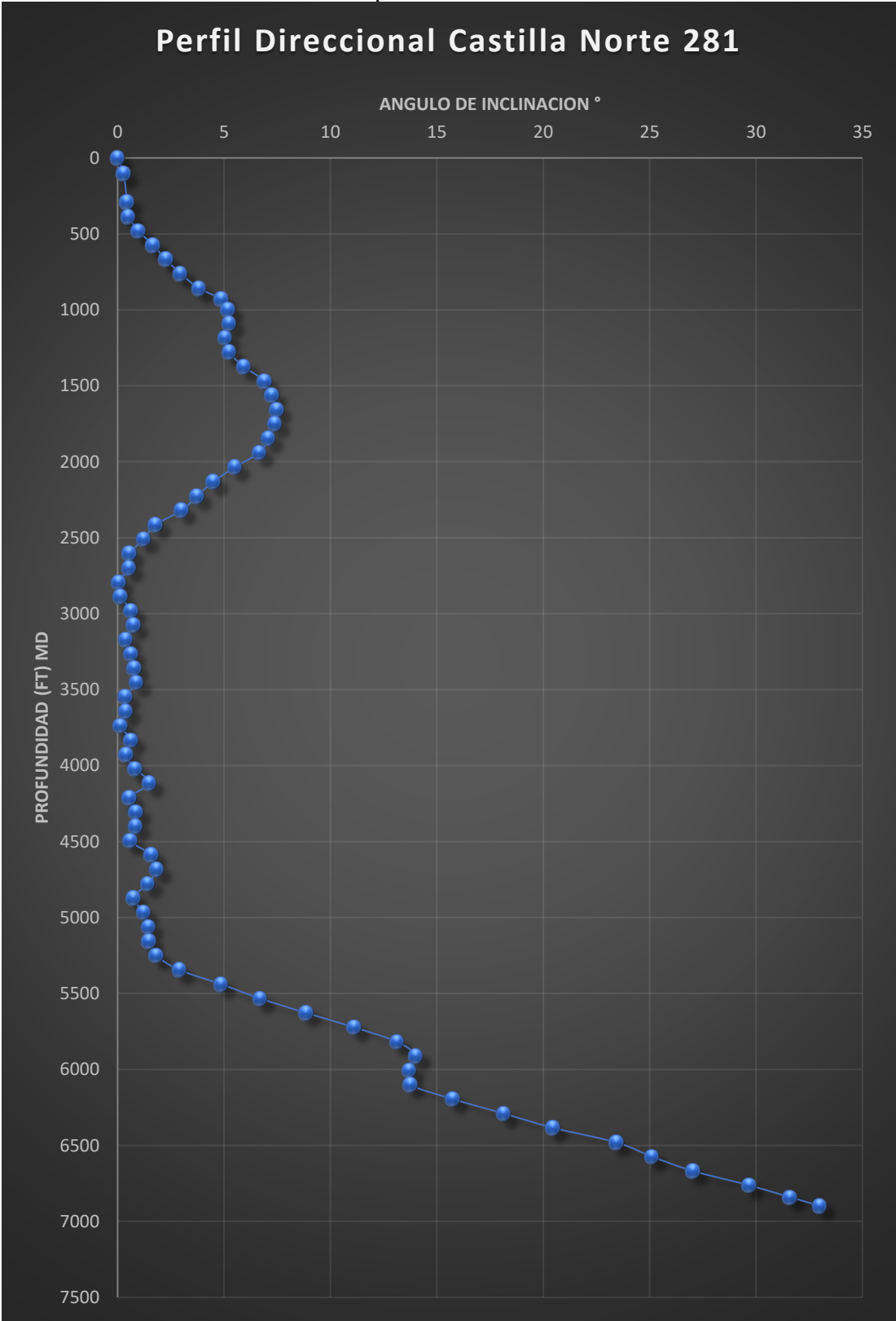


Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018. Modificado por los autores.

Por otro lado, en la **Figura 50** la perforación de la sección restante mostró variaciones en los parámetros de RPM y torque principalmente. El WOB fue un parámetro que mantuvo cierta uniformidad refiriéndose al rango implementado en las formaciones finales de la fase de pozo; se registró un pico muy elevado al ingresar a la formación lutita E3 a 5800' el cual pudo haber sido un error durante la medición. En el caso de la RPM se evidencia un número elevado de deslizadas, así como recuperación del tool face del motor. Por último, el torque presentó fluctuaciones al punto de ser considerado errático, este no fue controlado mediante otro parámetro, sin embargo, no excedió límites al punto de generar un problema operacional.

Este pozo hace caso al tipo de perfil direccional, tipo J el cual ha sido el determinado por Ecopetrol S.A para obtener beneficios económicos, siempre manteniendo la calidad e integridad de un pozo petrolero. En la **Grafica 4** se puede evidenciar el perfil direccional real del pozo Castilla Norte 281.

Grafica 4. Perfil direccional del pozo Castilla Norte 281



Reporte de corrida

- La perforación de la sección de 12 ¼" del pozo Castilla Norte 281 se inició con el trabajo de drill out desde el TOC que se encontraba ubicado a 942', se perforo hasta 982' donde se realizó prueba de integridad del revestimiento; se continuo drill out hasta 996' donde se encontraba el zapato; esta operación se repasó tres veces, paralelamente al repasado del zapato se realizó el desplazamiento del lodo.
- Se resalta que el KOP se inició en la fase anterior a una profundidad de 533'.
- Se inicio la perforación de la sección, a partir de 1075' de profundidad se incrementan al máximo parámetros según programa de perforación hasta llegar a 4647' sin problema alguno.
- se bombean píldoras y se circula hasta obtener retornos limpios para realizar viaje a superficie el cual estaba programado. Se inicio viaje a superficie para cambio de BHA sin problemas.
- Se arma y se baja el BHA #2 desde superficie hasta los 4647' sin problemas.
- Se reanuda la perforación desde la profundidad actual hasta 5992' donde se redujeron las RPM's de 70 a 60 con objetivo de contrarrestar tendencia de giro hacia la derecha en la formación Lutita E3.
- se continúa perforando rotando y deslizando hasta los 6131' donde se presenta una falla en el motor A del top drive, se circuló con 800 gpm y 2200 psi, una vez se corrige la falla se continuó perforando hasta 6898'.
- geología determino que se había llegado a TD, se bombea píldora y se circula hasta obtener retornos limpios para iniciar viaje a superficie sin problemas.

En la **Figura 51** y **Figura 52** se puede observar el paralelo antes y después de la implementación del diseño de Ulterra con calibre de 6" en la sección de 12 ¼" del pozo Castilla Norte 281.

Figura 51. Vista de Planta de la broca con calibre de 6"- Castilla Norte 281



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018

Figura 52. Vista del calibre de la broca con calibre de 6"- Castilla Norte 281



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018

5. ANALISIS DE LA PRESENCIA DE FENOMENOS VIBRACIONALES EN LA BROCA POLICRISTALINA DE CALIBRE EXTENDIDO IMPLMETADA EN LA SECCION 12 ¼" EN EL CAMPO CASTILLA

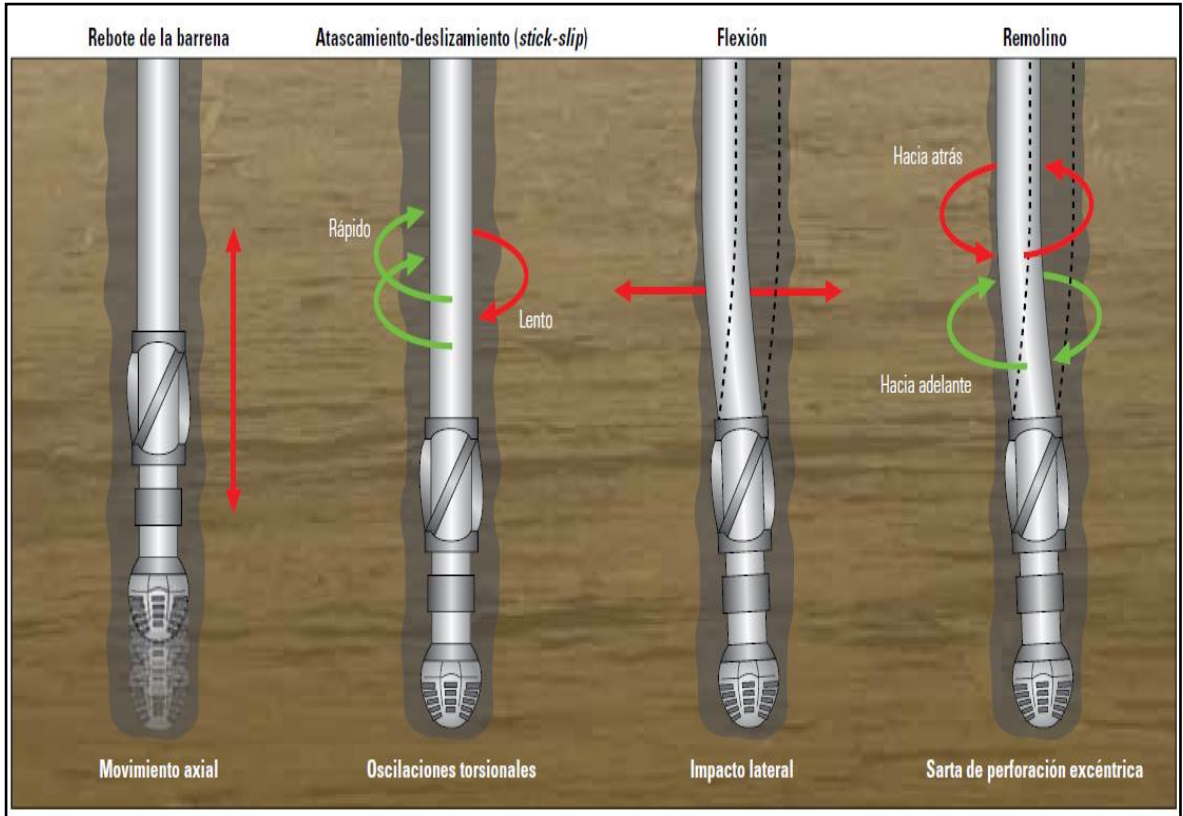
En este capítulo se analiza la presencia de fenómenos vibracionales durante la perforación de la sección de 12 ¼" asociadas a la broca, es decir que se estudian de forma cualitativa indicios de vibraciones en la calificación de desgaste IADC. Adicionalmente, se hace uso del MSE (Mechanical Specific Energy) como medida industrial para la evaluación de desempeño de la broca y como indicador cuantitativo principal para valorar la optimización de los parámetros de perforación, utilizados durante la corrida. Para el desarrollo del estudio, es necesario definir brevemente el concepto de MSE y su relación con los parámetros de perforación.

5.1 VIBRACIONES

Dado que las vibraciones son un fenómeno directamente relacionado con la tortuosidad del pozo es necesario discutir su concepto, sus tipos y como detectarlas para tomar las respectivas acciones correctivas en superficie. En primer lugar, se definen las vibraciones como todo movimiento oscilatorio de cualquier cuerpo, ajeno a su posición de referencia; durante la perforación, se considera vibración a cualquier movimiento de la broca o de la sarta diferente a la rotación ejercida por el taladro. Es importante prevenir la generación de fenómenos vibracionales para evitar posibles daños sobre la estructura de corte de la broca, además estas perturbaciones pueden causar problemas como picos de torque, colgamientos y finalmente pueden significar un aumento en los viajes de acondicionamiento, que implican un retraso en la operación de perforación. las vibraciones constan de dos componentes, la frecuencia a la cual indica el número de veces que se movió en un segundo la cual se mide en Hercios (Hz) o ciclos por segundo y la amplitud que hace referencia a la intensidad de esta la cual se puede medir por la aceleración, velocidad o desplazamiento. Para la medición de las vibraciones se emplean magnetómetros y acelerómetros electrónicos, los cuales miden 2 componentes que permiten evaluar la severidad de la vibración; la frecuencia indica el número de veces que la herramienta se movió en ciclos por segundo y la amplitud hace referencia a la intensidad del movimiento, la cual se puede medir a través de la aceleración, velocidad o desplazamiento.

Las vibraciones se clasifican en tres tipos principalmente, axiales, laterales o rotacionales. En la **Figura 53** se muestran los diferentes tipos de vibración que se pueden generar en fondo; se clasifican en movimiento axial, oscilaciones torsionales, vibraciones laterales, y excentricidad en la sarta de perforación.

Figura 53. Efecto sobre la sarta de perforación bajo la influencia de las vibraciones



Fuente: SCHLUMBERGER. Diseño de las brocas, Oilfield Review, 2011, p. 5.

Se sabe que todo pozo es independiente de los demás por más que se encuentren en el mismo campo, por ello determinar datos puntuales para clasificar los rangos de severidad no es posible, a continuación, en el **Cuadro 8** se muestran rangos en los cuales se puede determinar de manera cualitativa la severidad de las vibraciones previamente analizando las características que se puedan evidenciar.

Cuadro 8. Clasificación de la severidad de las vibraciones según su tipo

Axial Vibrations (g – RMS)		(Log Scales: (0-4))	
	0 - 1	Low	No problem over time
	1 < 2	Medium	> 25 hours, medium risk of failure
	2 < 4	High	> 12 hours, high risk of failure
	> 4	Severe	> ½ hour, severe risk of failure
Lateral Vibrations (g – RMS)		(Log scales: 0-6)	
	0 – 1.0	Low	No problem over time
	1.0 < 3.0	Medium	> 25 hours, medium risk of failure
	3.0 < 6.0	High	> 12 hours, high risk of failure
	> 6.0	Severe	> ½ hour, severe risk of failure
Tortional Vibrations (ft-lbs RMS)		(Log scales: 0-3000)	
	< 1500	Low	No problem over time
	1500-2500	Medium	> 25 hours, medium risk of failure
	2500-3000	High	> 12 hours, high risk of failure
	> 3000	Severe	> ½ hour, severe risk of failure
StickSlip Ration (Stick_RT/RPM)		Log scales: 0-200 rpm)	
<50%	0 – 0.5	Low	No problem over time
50%<100%	0.5 – 1.0	Medium	> 25 hours, medium risk of failure
100%<150%	1.0 – 1.5	High	> 12 hours, high risk of failure
>150%	> 1.5	Severe	> ½ hour, severe risk of failure

Fuente: Roger B. Gobbie, NSA shocks & vibrations quick reference guide,2005, pag 17.

Dado que existen tipos de vibraciones las cuales se manifiestan de manera particular, es necesario tener una serie de actividades primarias para el control de estas, en el **Cuadro 9** se muestra los tipos de vibraciones que se pueden presentar durante la operación de perforación y las primeras medidas para mitigarlas.

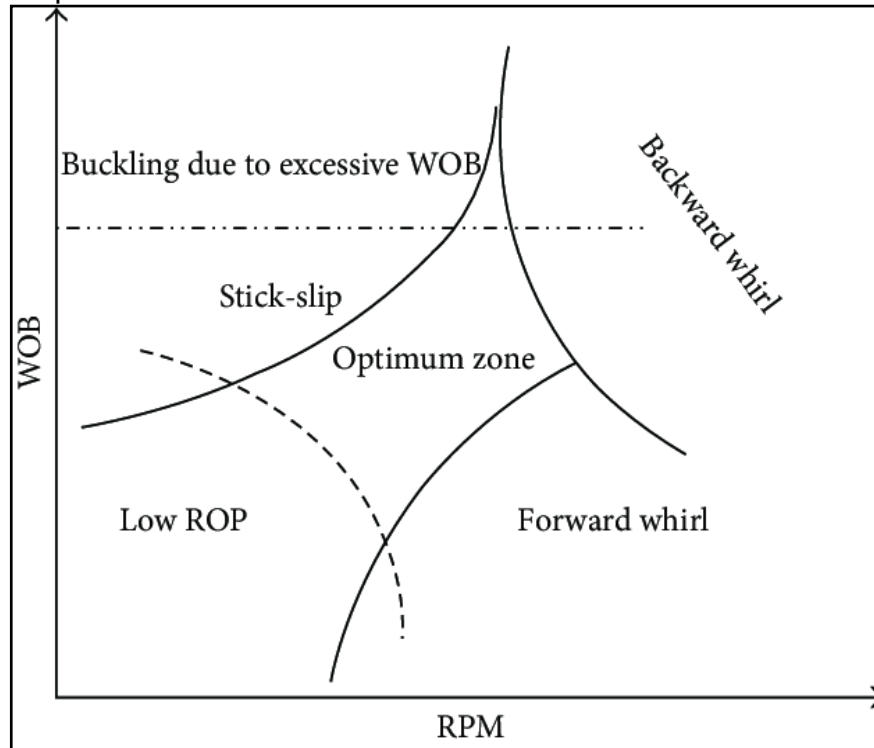
Cuadro 9. Tipos de vibraciones y sus posibles soluciones

Tipo de vibración	Diagnostico en tiempo real	Ambiente típico	Solución potencial	Otras soluciones
Stick-slip (Torsional)	Fluctuaciones largas de torque en superficie (periodos de 3-10 segundos) y grandes choques en el fondo del pozo	Pozos de ángulos elevados o brocas PDC agresivas con alto WOB, con profundidad mayor a 3000 ft	<ul style="list-style-type: none"> • Incrementar RPM • Reducir el WOB 	Parar la perforación, levantar de fondo y liberar todo el torque de la sarta, reanudar la perforación con altas RPM o bajo WOB.
Rotación del BHA (Lateral - Torsional)	grandes choques en el fondo del pozo, constantes niveles elevados de vibración y vibraciones superficiales	Pozos verticales u horizontales, BHA's pendulares y no estabilizados.	<ul style="list-style-type: none"> • Reducir las RPM • Incrementar WOB 	Parar la perforación, levantar de fondo y liberar todo el torque de la sarta, reanudar la perforación con bajas RPM. Modelar un BHA para un futuro para velocidades rotatorias críticas.
Rotación de la broca (Lateral-Torsional)	grandes choques en el fondo del pozo, vibraciones constantes pueden o no estar presentes	Estructura de corte de la broca agresiva, herramientas direcciones "push the bit", áreas de roca dura y pozos con poco ángulo	<ul style="list-style-type: none"> • Reducir las RPM • Incrementar WOB 	Parar la perforación, levantar de fondo y liberar todo el torque de la sarta, reanudar la perforación con bajas RPM. Modelar un BHA/broca para un futuro para velocidades rotatorias críticas.
Rebote de la broca (Axial)	Sacudida en la unidad de Top drive o Kelly, fluctuaciones en superficie de WOB en el gancho de carga	Pozos verticales, brocas tricónicas en formaciones duras.	<ul style="list-style-type: none"> • Reducir RPM • Reducir WOB 	Modificar el BHA con una válvula choque en fondo o usar un compensador en el motor.
Choques laterales (Lateral)	Vibraciones medias a altas con golpes altos ocasionalmente.	Pozos verticales con brocas bicentricas o rocas duras.	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de las RPM • Incrementar el WOB 	Parar la perforación, levantar de fondo y liberar todo el torque de la sarta, reanudar la perforación con bajas RPM

Fuente: Roger B. Gobbie, NSA shocks & vibrations quick reference guide,2005, pag

En la **Figura 54** se verá una relación directa de los parámetros WOB y RPM que son los principales actores al momento de resolver los problemas relacionados con las vibraciones.

Figura 54. Relación de los parámetros WOB y RPM respecto a las vibraciones



Fuente: Zhu, Xiaohua; Tang, Liping; Yang, Qiming. "A Literature Review of Approaches for Stick-Slip Vibration Suppression in Oilwell Drillstring", 2014. pag 7

5.2 ENERGÍA MECÁNICA ESPECÍFICA (MSE)

La energía mecánica específica o MSE por sus siglas en inglés, es una medida de eficiencia en la perforación que determina la energía requerida para remover una cantidad definida de roca, es decir que a medida que su magnitud disminuye la perforación se vuelve más eficiente, la ROP aumenta y el gasto de energía es optimizado. Este concepto es un índice que relaciona varios parámetros de perforación como WOB, Torque, RPM y ROP, sin embargo, para simplificar la simulación y optimización de todos estos parámetros, se definieron todos en función del WOB. A continuación, **Ecuación 9** define el MSE en función de los parámetros de perforación independientes.

Ecuación 9. Energía Mecánica Especifica (MSE)

$$MSE = \frac{WOB}{Area} + \frac{2\pi * RPM * Torque}{Area * ROP}$$

Fuente: Hamrick, Todd Robert, Optimization of Operating Parameters for Minimum Mechanical Specific Energy in Drilling, 2011.pag 10

Donde:

MSE =Energía Mecánica Específica (psi)

WOB =Peso Sobre la Broca (lb)

RPM =Revoluciones Por Minuto

Torque =Torque rotacional (in-lb)

Area de la broca =Area (in²)

ROP =Tasa de penetración (in/hr)

La perforación se considera totalmente eficiente, cuando los valores registrados del MSE igualan a los de la resistencia a la compresión de la roca en confinamiento. Esta propiedad de la roca depende de la presión de poro dentro de la misma y por lo tanto es calculada para rocas permeables en la **Ecuación 10** e impermeables en la **Ecuación 11**.

Ecuación 10. CCS Rocas Permeables

$$CCS = \left(UCS + \Delta P * 2\Delta P * \frac{\text{sen}(AFI)/180}{1 - \text{sen}(AFI)/180} \right) \quad \Delta P = ECD - Pp$$

Fuente: Dupriest, F. Koedritz, L. Maximizing drill rates with realtime surveillance of mechanical specific energy, SPE 92194, año 2005.

Donde:

CCS =Resistencia a la compresión de la roca en confinamiento (psi)

UCS =Resistencia a la compresión de la roca sin confinar (psi)

ΔP =Diferencial de presión (psi)

ECD =Densidad equivalente del lodo (psi)

Pp =Presion de poro (psi)

AFI =Angulo de friccion interna (rad)

Ecuación 11. CCS Rocas Impermeables

$$CCS = \left(UCS + \Delta Psk * 2\Delta P * \frac{\text{sen}(AFI)/180}{1 - \text{sen}(AFI)/180} \right)$$

$$\Delta Psk = ECD - Ppsk$$

$$Ppsk = Pp - \frac{OB - ECD}{3}$$

Fuente: Dupriest, F. Koedritz, L. Maximizing drill rates with realtime surveillance of mechanical specific energy, SPE 92194, año 2005.

Donde:

CCS =Resistencia a la compresión de la roca en confinamiento (psi)

UCS =Resistencia a la compresión de la roca sin confinar (psi)

ΔP =Diferencial de presión (psi)

ECD =Densidad equivalente del lodo (psi)

Pp =Presion de poro (psi)

AFI =Angulo de friccion interna (rad)

Esta propiedad puede ser generalizada en la zona, de modo que la operadora Ecopetrol tomó un único registro de resistencia a la compresión, que se aplica para el análisis de la eficiencia en la perforación de los tres pozos estudiados en el proyecto.

La resistencia a la compresión de la roca en la cuenca sedimentaria del Campo Castilla fue tomada por un software de Ulterra el cual toma registro de los distintos valores que se van presentando a lo largo de las unidades litológicas, estos valores se pueden observar en el **Tabla 17**. Es importante tener en cuenta la compresibilidad de cada una de las formaciones, dado que por sí solo la curva de MSE indica el aprovechamiento de la energía proporcionada por el top drive y el motor de fondo, una vez estas curvas se alejan entran en juego los distintos parámetros, que vienen siendo la única forma adicional de la física de determinar si se presentaron vibraciones durante la corrida de la broca con calibre de 6”.

Tabla 17. Datos de compresibilidad por formación en el Campo Castilla

FORMACION	PROFUNDIDAD (ft)	COMPRESIBILIDAD (kPsi)
Guayabo	1000-1100	4--5
Areniscas Superiores	1100-1650	3--7
Lutita E	1650-2100	4--6
Unidad C1	2100-3050	4,3--10
Areniscas Carbonera	3050-3300	4,7--8
Unidad C2	3300-5300	5--11
Lutita E3	5300-5680	4--8
Unidad T1	5680-6050	4,5-11
Lutita E4	6050-6700	4,5-12

Fuente: Ulterra, Bogotá, 2018

5.3 ANÁLISIS CUALITATIVO Y CUANTITATIVO DE LA POSIBLE PRESENCIA DE FENOMENOS VIBRACIONES DURANTE LA CORRIDA DEL NUEVO DISEÑO CON CALIBRE DE 6”.

El análisis teórico antes presentado se referencia para verificar de manera cualitativa evidencias de fenómenos vibracionales basándose en los reportes finales y fotográficos del estado final de la broca. Por otro lado, también se define, mediante el estudio del comportamiento de los parámetros de perforación, la posible generación de vibraciones a lo largo de la perforación de la fase de 12 ¼” de los pozos C216, C226 y CN281 del Campo Castilla.

Cabe resaltar que la teoría de desgaste para la clasificación IADC de las brocas se explica en el Capítulo 2.

5.3.1 Castilla 216. El pozo Castilla 216 presento dos corridas. La primera abarco desde 1019’ hasta los 3526’ de profundidad. La calificación IADC luego de la corrida puede observarse en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Calificación IADC de la broca, Castilla 216, BHA #1

0 – 0 – NO – A – X – I – NO – HP

Fuente: ULTERRA, Bogotá ,2017

La calificación anterior cumple con el orden según la IADC, el primer dígito indicado con un cero hace alusión a los cortadores de las hileras interiores, los cuales no muestra ningún tipo de daño o desgaste. El segundo dígito corresponde a los cortadores de las hileras exteriores donde tampoco se presentó ningún tipo de daño o desgaste; el tipo de daño o desgaste que sufrieron se representa en el tercer espacio donde al no haber alguno se indica con un “NO” para indicar que no existe desgaste alguno. La cuarta posición indica la ubicación en la cual se presentó el daño la letra “A” hace alusión a todas las partes de la broca. La ubicación donde está presente una “X” indica que se trata de una broca PDC ya que en este espacio se inicia el grado de desgaste de los sellos y cojinetes, pero esto es solo de las brocas triconicas. La siguiente casilla corresponde al diámetro final de la broca, en este caso al contener una “I” indica que el diámetro no sufrió ningún desgaste; el siguiente indicado con un “NO” indica que no se presenta un desgaste secundario. Por último, “HP” indica que se presentaron problemas en el pozo por lo cual fue necesario sacar el BHA a superficie.

En las **Figura 55** y **Figura 56** se puede evidenciar el estado en el cual la broca llego a superficie tras su primera corrida.

Figura 55. Sección A del estado final de la broca tras la primera corrida en el pozo C216



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2017

Figura 56. Sección B del estado final de la broca tras la primera corrida en el pozo C216



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2017

Posterior a la segunda corrida, la cual abarco desde 3616' hasta 7335' la broca obtuvo una calificación según la IADC que se observa en el **Cuadro 11**.

Cuadro 11. Calificación IADC de la broca, Castilla 216, BHA #2

0 – 1 – BT – G – X – I – NO – TD

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2017

La información anterior indica que la broca, mientras los cortadores de la hilera interna permanecieron intactos, los de la hilera externa presento desgaste o daño en los cortadores; el tipo se muestra en las letras “BT” que indica cortadores rotos, esto lo sufrieron aquellos que se encontraban en el diámetro de la broca. La “X” se presenta dado que se trata de una broca PDC, sin embargo, el diámetro no resulto afecto de ninguna forma. Adicionalmente la broca no presenta ningún desgaste secundario y fue llevada a superficie al llegar a la formación objetivo.

En las **Figura 57** y **Figura 58** se puede evidenciar el estado en el cual la broca llego a superficie tras su segunda corrida.

Figura 57. Sección A del estado final de la broca tras la segunda corrida en el pozo C216



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2017

Figura 58. Sección B del estado final de la broca tras la segunda corrida en el pozo C216



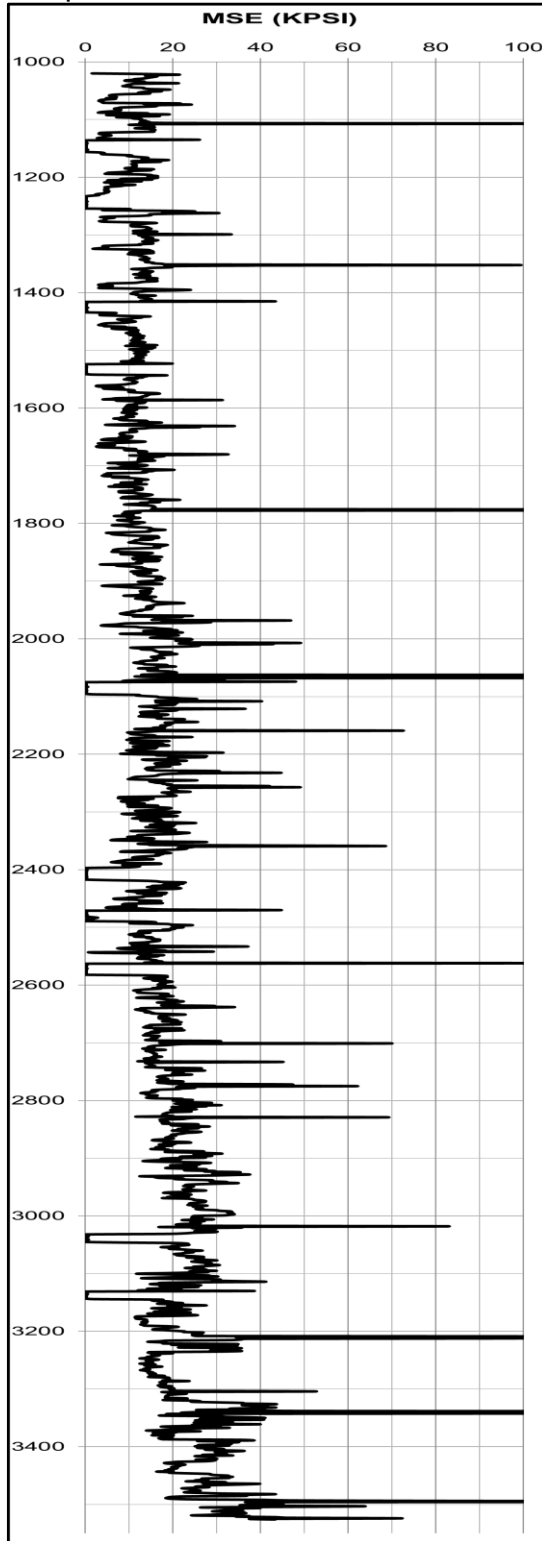
Fuente: ULTERRA, Bogotá 2017

➤ **Análisis vibracional.** Analizando de forma cualitativa el estado final de la broca tras haber culminado la perforación de la fase 12 ¼" del pozo C216, se evidencia en la calificación que, durante la corrida, la broca sufrió ruptura de los cortadores ubicados en el calibre de esta, sin embargo, estos cortadores tienen como único objetivo brindar durabilidad al calibre mas no son parte activa de la estructura de corte que remueve formación. Esta alteración se puede observar en la **Figura 57** en las aletas #1 y #2.

La ubicación de estos cortadores en el perfil de la broca indica que sufrieron impactos laterales; no obstante, los cortadores principales, los cuales cuentan con un diámetro de 19 mm no muestran daño alguno, por lo que el evento de vibración lateral fue puntual y de baja magnitud. Cabe resaltar que los cortadores de las brocas son diseñados para el raspado de la formación mas no impactos contra ella.

En las **Figura 59** y **Figura 60** se puede observar la gráfica de la energía mecánica específica MSE de la broca para el pozo C216.

Figura 59. Gráfica MSE con el BHA #1, pozo C216



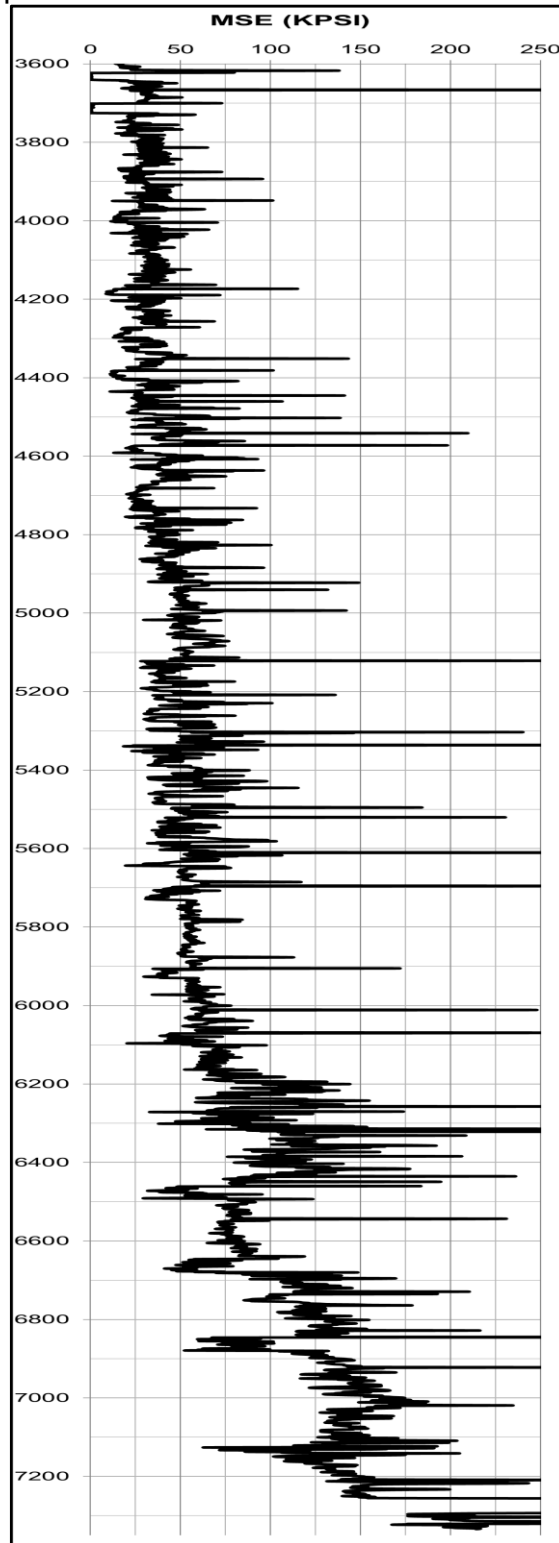
Fuente: ULTERRA, Bogotá 2017

De acuerdo con la gráfica anterior y el estado final de broca tras la perforación de la primera sección de la fase de 12 ¼"; donde al realizar la comparación con el análisis de compresibilidad de la roca. Se determina que en esta sección la cual abarca las unidades Guayabo, Areniscas Superiores, Unidad Lutita E, Unidad C1, Areniscas Carboneras y 20' de la Unidad C2, es decir, unidades las cuales el porcentaje de arcilla y arenas juntos superan el 90%, no se evidenciaron fluctuaciones elevadas de MSE lo que indica que los fenómenos vibracionales no tuvieron la magnitud necesaria para que la broca las percibiera en su estructura de corte o en el cuerpo de la misma; cabe resaltar que las vibraciones se pudieron presentar en otra parte de la sarta, donde debido a su lejanía con las herramientas de fondo pasaron desapercibidas.

Al final de la sección se muestra un ligero incremento del MSE, esto se debe a que la configuración de parámetros con los cuales se venía no era el adecuado para perforar la Unidad C2 ya que esta cuenta con un porcentaje de Limolita, el cual las unidades antecesoras no poseían. Por lo tanto, es necesario acomodar los parámetros de perforación para perforar de la mejor forma esta unidad mediante la reducción de RPM's, reducción del WOB, reducción de galonaje y presión.

Otro evento al cual se le pueden atribuir estos incrementos en el MSE en la sección posterior a los 3200' de profundidad, serían las altas pérdidas del fluido de perforación que se presentaron, esto obliga a un desbalance de parámetros los cuales son poco óptimos para la perforación; sin embargo, necesarios para remediar el problema y mantener la integridad misma del pozo.

Figura 60. Gráfica MSE con el BHA #2, pozo C216



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2017.

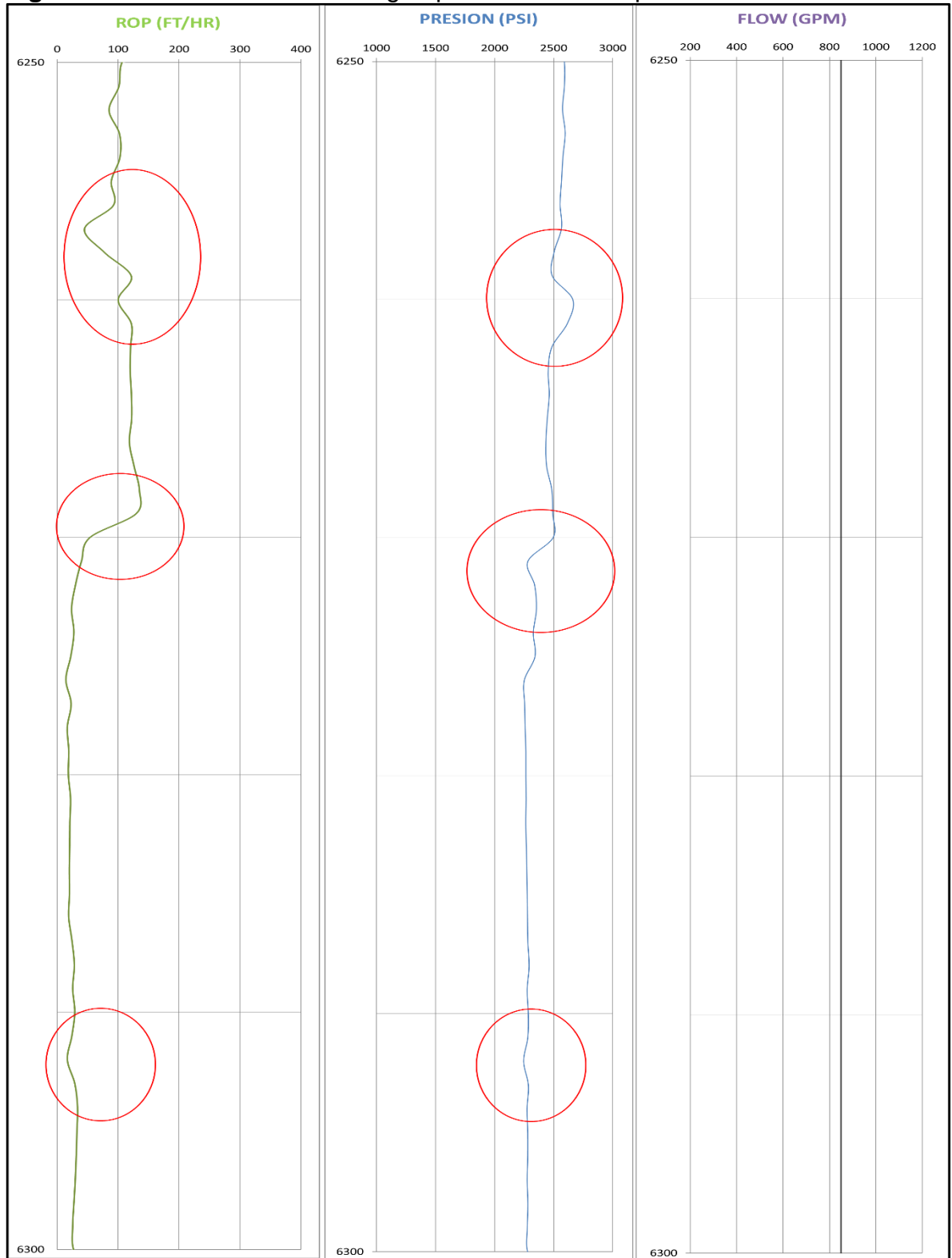
Cuando se culmina la segunda sección de la fase 12 ¼" del pozo C216 se observa que durante la perforación de la Unidad C2 y la Lutita E3 el MSE se comportó de manera constante, sin embargo, la perforación de estas unidades no es completamente eficiente dado que progresivamente va incrementando el porcentaje de Limolita y Lutita, las cuales son de dureza mayor a la arena y la arcilla.

Por otro lado al entrar en la Unidad T1 y hasta la base de la Lutita E4 la curva del MSE se incrementó significativamente, alejándose cada vez más de los datos de compresibilidad de la roca, lo que indicaba que toda la energía del sistema no se concentraba en el centro de la broca. Esto se debió a alto porcentaje de deslizadas que se requirieron tanto para llegar a la inclinación final como para mantener el control direccional que se extendió a lo largo de toda la sección 12 ¼".

Por otro lado, se puede inferir que se presentaron vibraciones torsionales en distintos puntos de la corrida; de 6365' a 6378' otro punto es 6687' a 6698' y por último de 6881' a 6891'; estas vibraciones son netamente del análisis de parámetros ya que se presentan altos WOB y un torque fluctuante más la estructura de corte de la broca no los refleja.

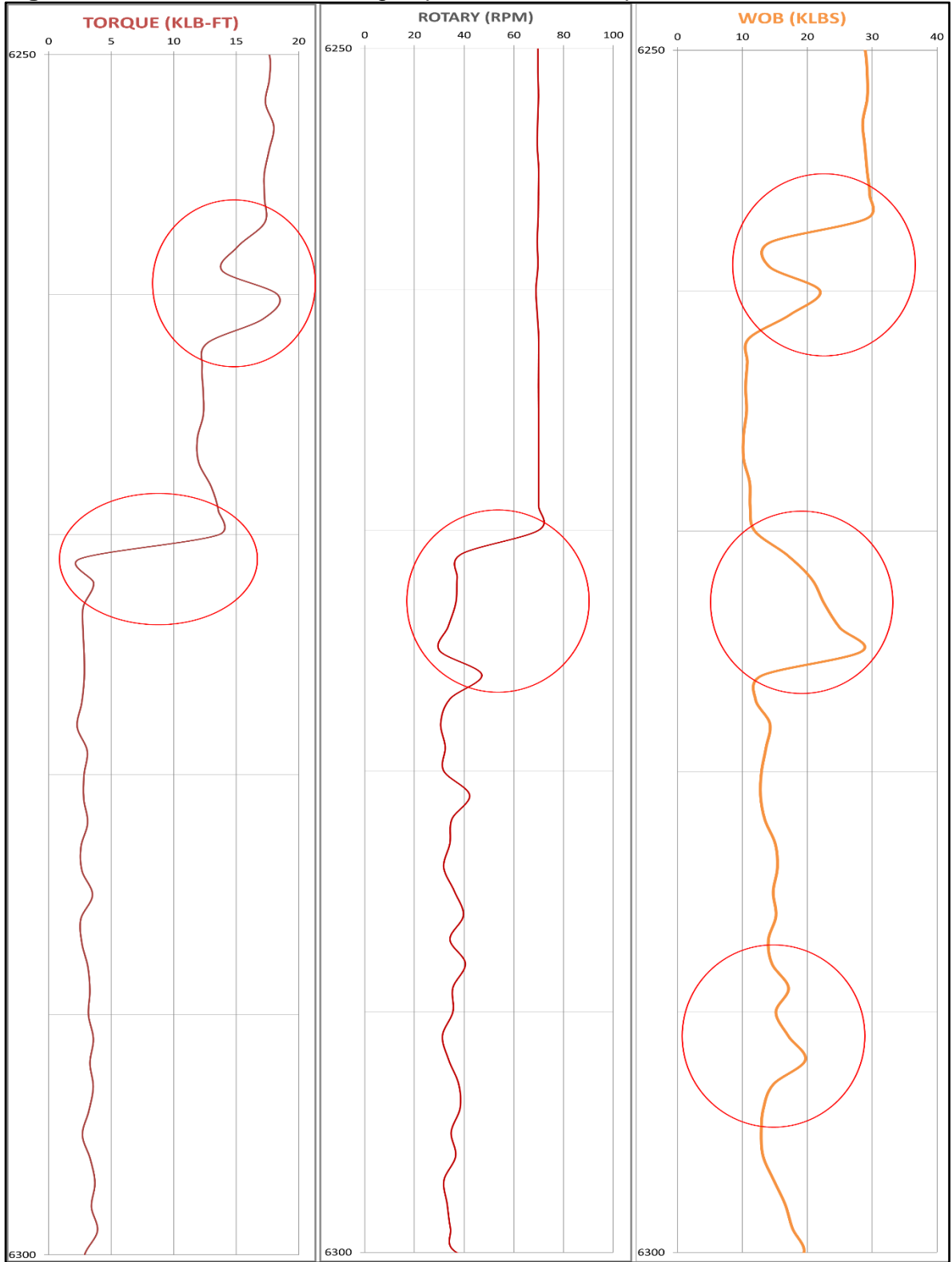
En las **Figura 61** y **Figura 62** se puede observar los parámetros y en las secciones donde posiblemente se presentaron fenómenos vibratoriales.

Figura 61. Sección A del MSE según parámetros en el pozo C216



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2017.

Figura 62. Sección B del MSE según parámetros en el pozo C216



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2017.

5.3.2 Castilla 226. El pozo Castilla 226 presento dos corridas. La primera abarco desde 1001' hasta los 2795' de profundidad. La calificación IADC luego de la corrida puede observarse en el **Cuadro 12**.

Cuadro 12. Calificación IADC de la broca, Castilla 226, BHA #1

0 – 0 – NO – A – X – I – PN/BU – WO

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018

Tras la primera corrida en este pozo, la estructura de corte no sufrió daño o desgaste alguno; esto se indica en los primeros cuatro espacios. Siguiendo a la siguiente ubicación la “X” corresponde a brocas PDC; el diámetro tampoco conto con desgaste o daño por tanto se presenta la letra “I”. Como característica adicional se presentó que la broca se encontró embotada, adicionalmente se evidencio taponamiento en las boquillas. Por último, la broca debió salir a superficie por una ruptura en la sarta de perforación.

En las **Figura 63** y **Figura 64** se puede evidenciar el estado en el cual la broca llego a superficie tras su primera corrida.

Figura 63. Sección A del estado final de la broca tras la primera corrida en el pozo C226



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018

Figura 64. Sección B del estado final de la broca tras la primera corrida en el pozo C226



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018

Posterior a la segunda corrida, la cual abarco desde 2795' hasta 6680' la broca obtuvo una calificación según la IADC que se observa en el **Cuadro 13**.

Cuadro 13. Calificación IADC de la broca, Castilla 226, BHA #2

0 – 0 – NO – A – X – I – NO – TD

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018

Tras culminar la fase de 12 ¼" la broca obtuvo una calificación IADC presentada anteriormente, la cual indica que tanto los cortadores de las hileras como externas no presentaron daño o desgaste alguno, en ninguna de las secciones de la broca. El diámetro de la broca permaneció intacto tras las dos corridas. Tampoco presento desgaste secundario y la razón por la cual fue llevada a superficie es que se llegó a la formación objetivo.

En las **Figura 65** y **Figura 66** se puede evidenciar el estado en el cual la broca llego a superficie tras su primera corrida.

Figura 65. Sección A del estado final de la broca tras la segunda corrida en el pozo C226



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018

Figura 66. Sección B del estado final de la broca tras la segunda corrida en el pozo C226

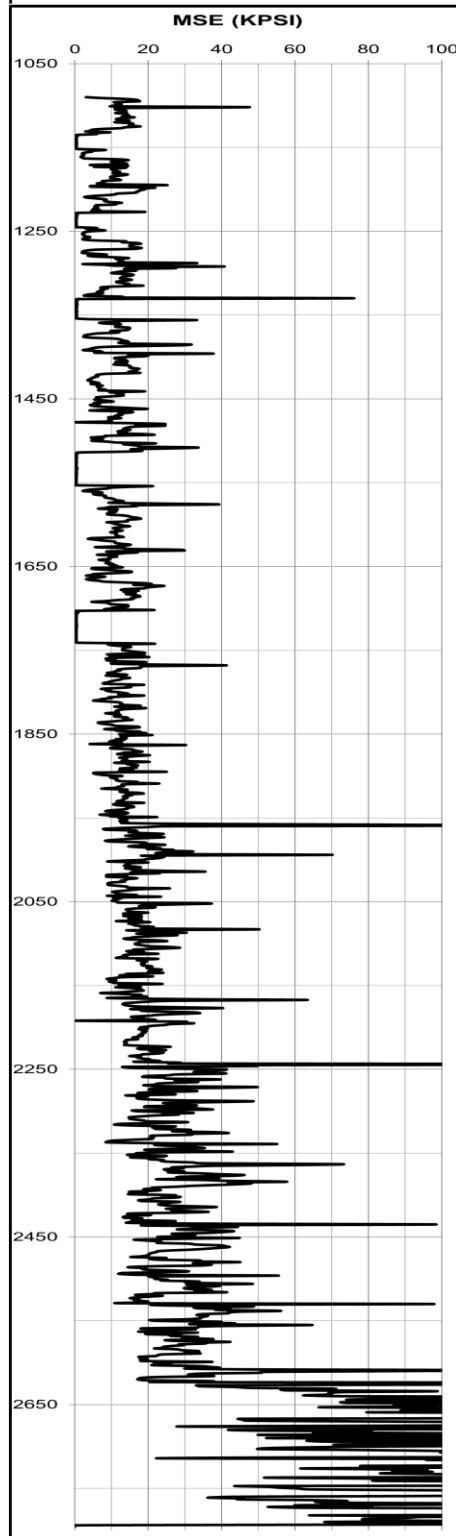


Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018

➤ **Análisis vibracional.** Analizando de forma cualitativa el estado final de la broca tras haber culminado la perforación de la fase 12 ¼” del pozo C226, la calificación mostro que la estructura de corte, el diámetro y el calibre no sufrieron daño alguno ocasionado por fenómenos vibracionales durante la corrida.

En las **Figura 67** y **Figura 68** se puede observar la gráfica de la energía mecánica específica MSE de la broca para el pozo C226.

Figura 67. MSE con BHA #1,
pozo C226

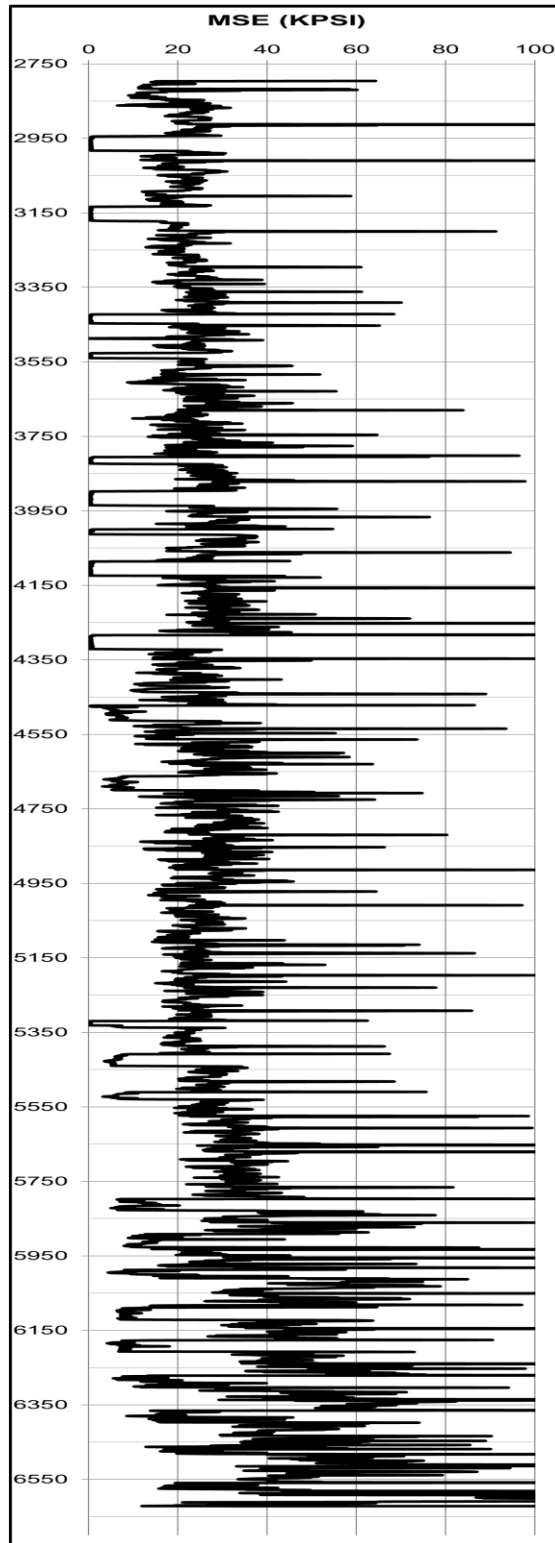


Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018

De acuerdo con la gráfica anterior y el estado final de broca tras la perforación de la primera sección de la fase de 12 ¼"; correlacionándolo con los demás parámetros se evidencia que durante la perforación no evidenciaron fenómenos vibracionales ya que teóricamente las vibraciones laterales se evidenciaría daño en la estructura de corte, la cual en este caso gracias a los registros fotográficos no presenta daño en esta; tampoco se presentaron vibraciones torsionales ya que un parámetro claro para evidenciarlas es el torque, el cual a lo largo de toda la sección se mantuvo dentro de un rango entre 5-10 klb-ft, adicionalmente la nariz de la estructura de corte se mantuvo intacta. Por ultimo las vibraciones axiales no tuvieron oportunidad de presentarse ya que el WOB no presento fluctuaciones abruptas a lo largo de la perforación de la sección, por último, la presión tampoco mostro fluctuaciones fuertes a lo largo de corrida.

En la sección final el incremento de la curva del MSE se debió principalmente a la abrupta caída de la ROP, donde al ser un parámetro inversamente proporcional a la MSE, genera que este incremente su valor. Esta caída de la tasa de penetración ocurrió a razón de una falla en el motor de fondo lo que no permitía la transmisión total de energía hidraulica al motor.

Figura 68. MSE con BHA #2, pozo C226

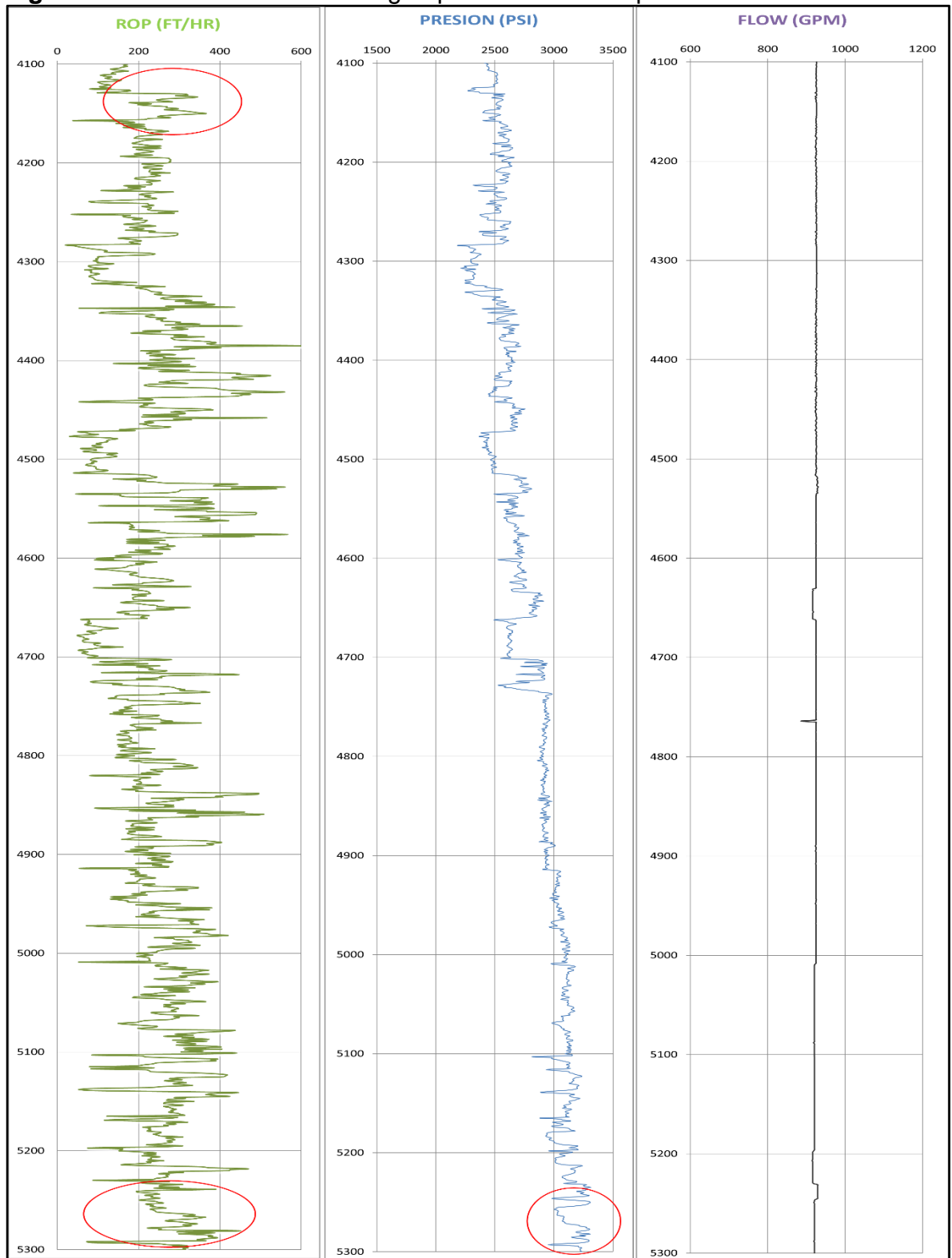


Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018

Siguiendo con la segunda sección de la fase de 12 ¼" del pozo C226 de la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. se evidencia que la broca no sufrió daño por vibraciones cercanas o en la broca misma; sin embargo al realizar el análisis de los demás parámetros se puede inferir que entre 4150' y 4250' al evidenciar una ligera reducción y posterior incremento de las RPM's siendo este apoyado con un ligero incremento de presión, torque y WOB, se generó una acumulación de energía torsional a lo que se le puede llamar un "stick-slip" de baja magnitud. Esto mismo ocurrió a los 5175' hasta los 5275' se evidencia el mismo fenómeno en las RPM's y en la presión, torque y WOB. Por otro lado, no se presentaron vibraciones axiales ya que partiendo del WOB las fluctuaciones no fueron lo suficientemente severas para afectar la estructura de corte de la broca, esto se respalda con la presión, la cual en puntos donde se incrementaba el peso sobre la broca, la presión no mostraba fluctuación alguna. Por último, no se evidenciaron vibraciones laterales sobre o por la broca principalmente a que la integridad del cuerpo de la broca no fue alterada. Sin embargo, este último tipo de vibraciones se presenta con mayor fuerza en los estabilizadores y en las juntas.

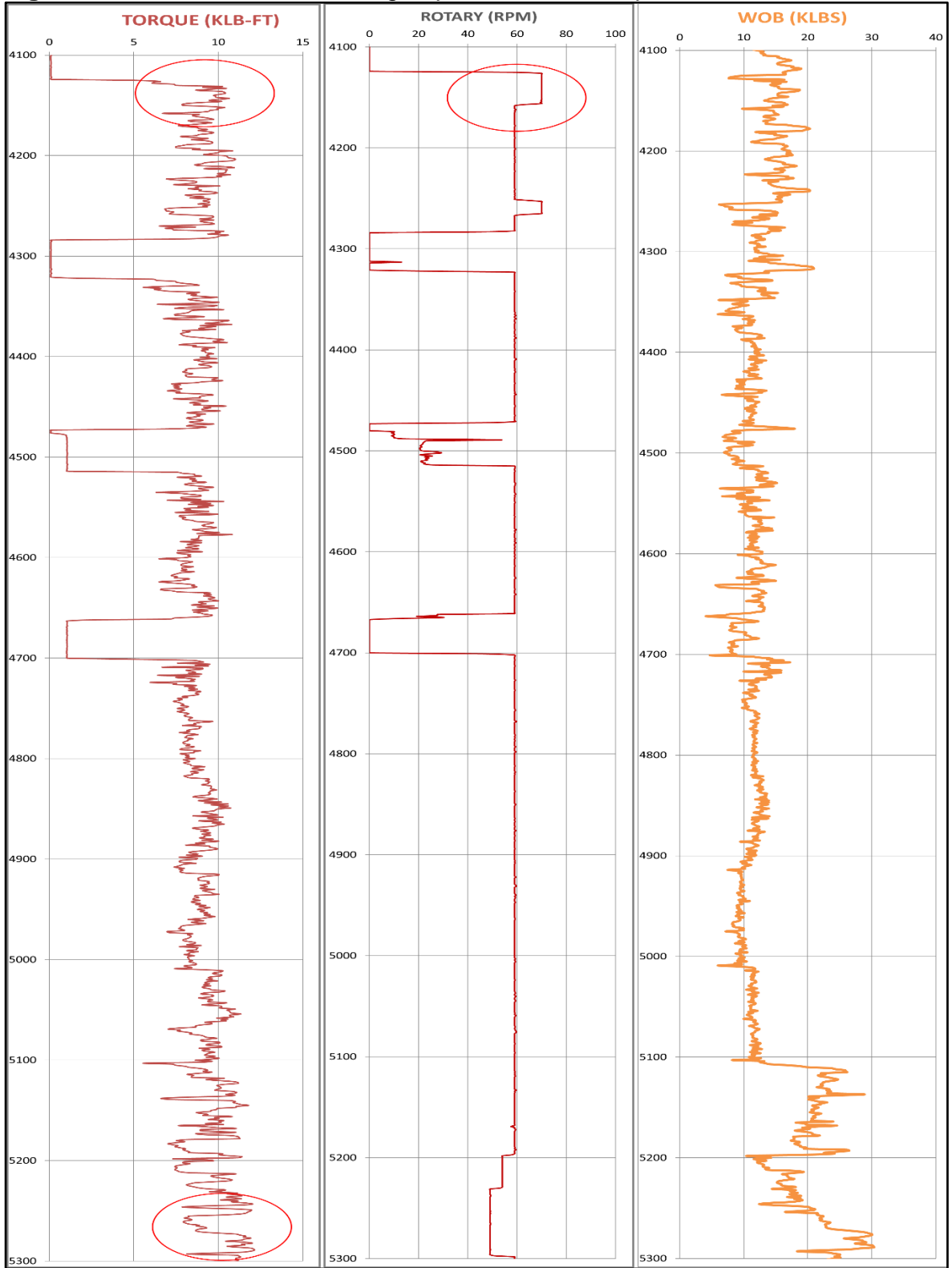
En las **Figura 69** y **Figura 70** se puede observar los parámetros y en las secciones donde posiblemente se presentaron fenómenos vibratoriales.

Figura 69. Sección A del MSE según parámetros en el pozo C226



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018

Figura 70. Sección B del MSE según parámetros en el pozo C226



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018

5.3.3 Castilla Norte 281. El pozo Castilla Norte 281 presento dos corridas. La primera abarco desde 992' hasta los 4647' de profundidad. La calificación IADC luego de la corrida puede observarse en el **Cuadro 14**.

Cuadro 14. Calificación IADC de la broca, Castilla Norte 281, BHA #1

0 – 1 – WT – A – X – I – NO – BHA

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018

En este caso según la calificación IADC la broca presento un desgaste o daño en los cortadores de las hileras interiores, este fue un desgaste uniforme ya que se presentó en todas las secciones de la broca, sin embargo, las hileras interiores de la estructura de corte si sufrieron desgaste alguno. Se refiere a una broca PDC por lo cual sigue presente la "X". el diámetro de la broca se mantuvo constante. La broca no presenta características secundarias de desgaste y fue llevada a superficie ya que era requerido un cambio en el ensamblaje de fondo. Sin embargo, en la evidencia fotográfica no se muestra desgaste alguno en ninguno de los cortadores de la estructura de corte, posiblemente la calificación se dio de esta forma por un tecnicismo comúnmente presentado en la práctica por el cual se determina que una broca una vez haya ingresado al pozo no puede ser denominada 0-0, la cual se reserva únicamente para brocas nuevas, por lo tanto, para fines prácticos se le asigna esta calificación.

En las **Figura 71** y **Figura 72** se puede evidenciar el estado en el cual la broca llego a superficie tras su primera corrida.

Figura 71. Sección A del estado final de la broca tras la primera corrida en el pozo CN281



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018

Figura 72. Sección B del estado final de la broca tras la primera corrida en el pozo CN281



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018

Posterior a la segunda corrida, la cual abarco desde 4647' hasta 6898' la broca obtuvo una calificación según la IADC que se observa en el **Cuadro 15**.

Cuadro 15. Calificación IADC de la broca, Castilla Norte 281, BHA #2

0 – 1 – WT – A – X – I – BU – TD

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018

Una vez la broca sale a superficie por segunda vez al llegar a la formación objetivo, se evidencio que el desgaste inicial se mantuvo constante en todas las secciones de la broca. El diámetro no mostro alteraciones en su medida original.

En las **Figura 73 y Figura 74** se puede evidenciar el estado en el cual la broca llego a superficie tras su segunda corrida.

Figura 73. Sección A del estado final de la broca tras la segunda corrida en el pozo CN281



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018

Figura 74. Sección B del estado final de la broca tras la segunda corrida en el pozo CN281

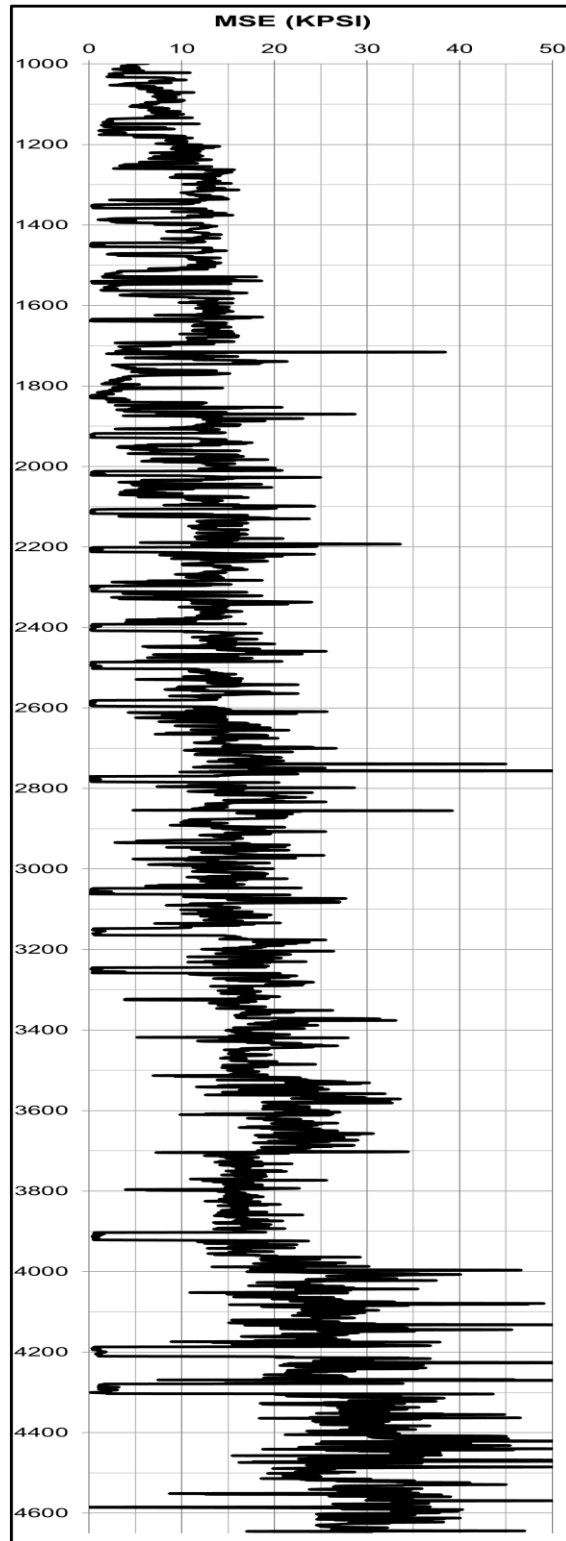


Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018

➤ **Análisis vibracional.** Analizando de forma cualitativa el estado final de la broca tras haber culminado la perforación de la fase 12 1/4" del pozo CN281, la calificación mostro desgaste de los cortadores en la hilera interna de la estructura de corte, posiblemente por abrasión o falta de lubricación; mas no precisamente por efectos de los fenómenos vibracionales.

En las **Figura 75** y **Figura 76** se puede observar la gráfica de la energía mecánica específica MSE de la broca para el pozo CN281.

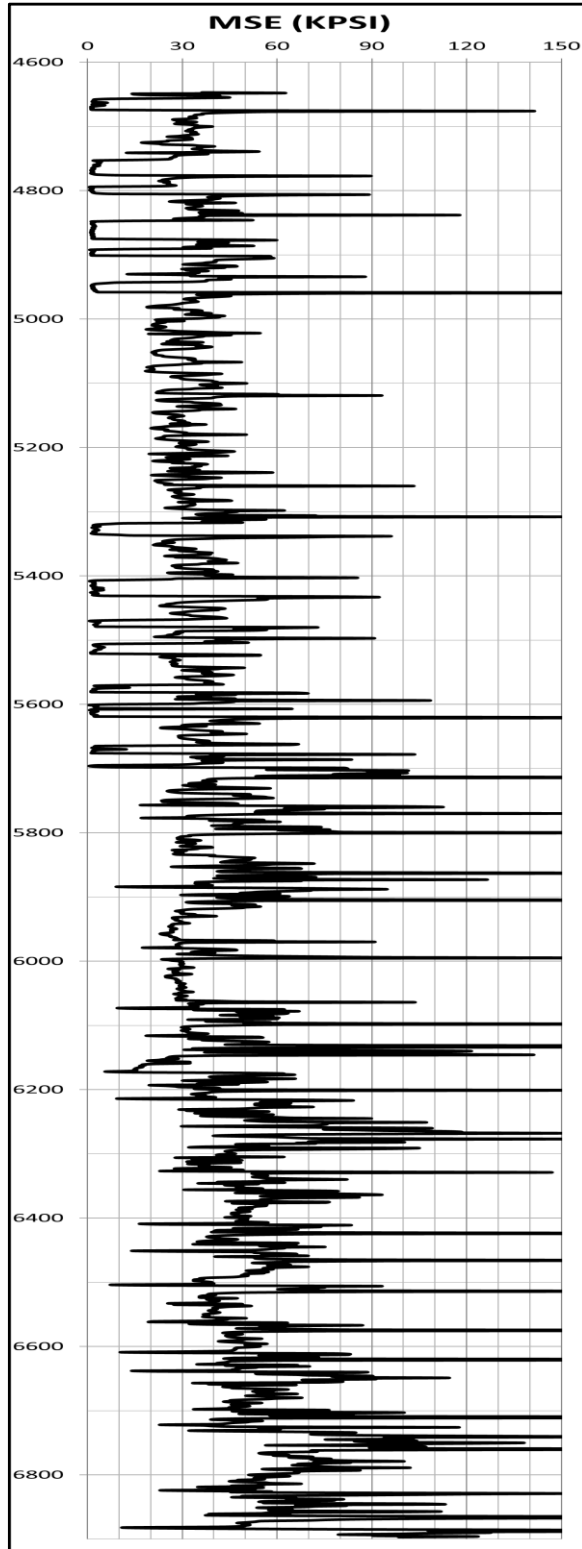
Figura 75. MSE con BHA #1, pozo CN281



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018

De acuerdo con la gráfica anterior y el estado final de broca tras la perforación de la primera sección de la fase de 12 ¼" se puede analizar que la magnitud de las vibraciones se mantuvo en rangos mínimos en este pozo. Sin embargo, se puede inferir mediante los demás parámetros que a los 1690' se presentó una caída precipitada del WOB lo cual tuvo repercusión en la ROP efectiva, siendo esta reducida proporcional a la reducción del peso sobre la broca, adicionalmente se muestra un incremento leve de la presión; todo lo anterior puede ser traducida en una vibraciones axiales, dado que se presenta un daño en los cortadores de la hilera externa, siendo esto lo primero en contactar con la formación, por otro lado a los 2650' se presentó un incremento del peso sobre la broca, donde al correlacionarlo con la presión y el torque se incrementan ligeramente, lo que indica la presencia de vibraciones torsionales de baja magnitud; a los 4000' de profundidad se evidencio el mismo fenómeno vibracional, el cual posiblemente se generó a una reducción significativa del caudal. Finalmente, en esta sección mediante parámetros no se evidencia la presencia de vibraciones laterales representativas.

Figura 76. MSE con BHA #2, pozo CN281



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018

Basados en la gráfica anterior y entrando al detalle con respecto a los demás parámetros, se evidencia una tendencia a fluctuaciones erráticas en múltiples parámetros. Durante la perforación de la Unidad C2, el WOB fluctúa debido a que esta unidad está compuesta por minerales de una mayor dureza, lo cual es necesario modificar la combinación de los parámetros, sin embargo, no se puede determinar claramente la presencia o no de fenómenos vibracionales. Por otro lado, a partir del KOP el cual estaba planeado a 5315' los parámetros actúan de manera errática dado que la operación que predominó en esta sección fue la del deslizamiento de las herramientas de fondo lo que dificulta diferenciar efectos del deslizamiento a las vibraciones.

Por último, en el **Cuadro 16** se muestra un resumen de las vibraciones que se evidenciaron cualitativamente como de forma deductiva mediante los parámetros de perforación.

Cuadro 16. Resumen de la presencia de fenómenos vibracionales

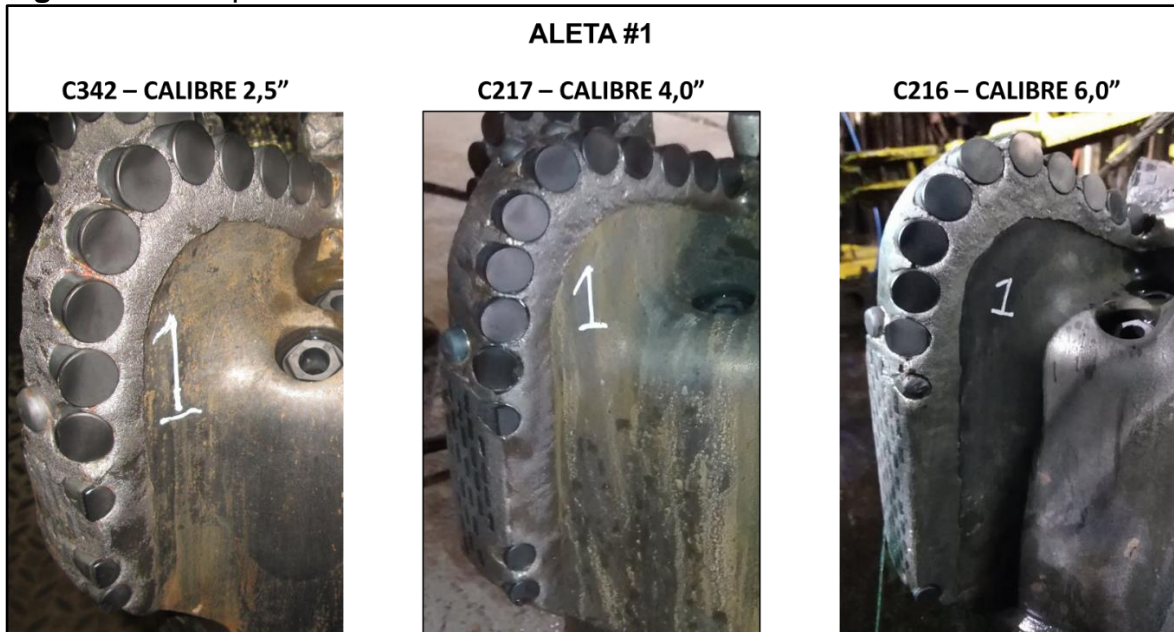
POZO	PROFUNDIDAD (FT)	TIPO DE VIBRACION	AFECTACION DIRECTA A LA BROCA
C216	1351-1354	LATERAL	En el calibre de la broca
	3210-3213	TORSIONAL	NO
	6256-6302	LATERAL	En el calibre de la broca
	6365-6378	TORSIONAL	NO
	6687-6698	TORSIONAL	NO
	6881-6891	TORSIONAL	NO
C226	4150-4250	Torsional	NO
	5175-5275	Torsional	NO
C281	En la primera sección de la corrida no se presentaron vibraciones claras. En la segunda corrida el deslizamiento de las herramientas de fondo dificultó su identificación.		

5.4 COMPARACION DE LA POSIBLE PRESENCIA DE FENÓMENOS VIBRACIONALES

Dado que la presencia de los fenómenos vibracionales es un problema operacional el cual va ligado a la mala calidad del hueco; es necesario comparar tanto cualitativamente mediante el desgaste físico de la broca, como cuantitativamente por medio de los parámetros, los intervalos donde posiblemente se presentó algún fenómeno vibracional y los efectos del calibre extendido en los pozos C217 y C216; contrastándolos contra la broca de calibre estándar en el pozo C342 los cuales fueron seleccionados ya que poseían los valores de ROP más bajos.

5.4.1 Análisis cualitativo. Tomando como referencia la evidencia fotográfica presentada desde la **Figura 77** hasta la **Figura 81** se observa el grado de daño y/o desgaste que cada broca sufrió tras haber finalizado la corrida.

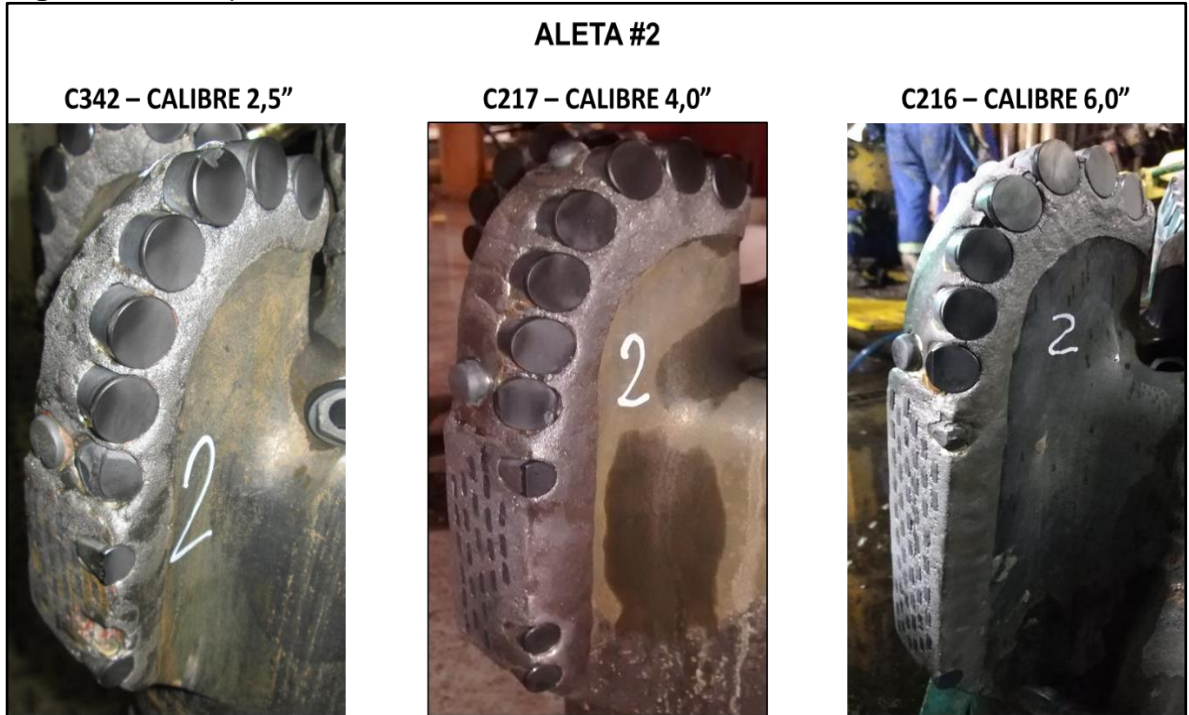
Figura 77. Comparación de la aleta #1 con los distintos calibres



Fuente: Reportes finales, pozos C342, C271 y C216

Iniciando con la aleta #1 se observa que la estructura principal de corte se mantuvo intacta, sin embargo, en la de calibre de 6" el cortador ubicado en la hilera del calibre sufrió daño, posiblemente por algún fenómeno vibracional; en el caso de la broca con calibre de 4" se observa un astillamiento del cortador del calibre el cual viene preaplanado para mantener el diámetro de la broca.

Figura 78. Comparación de la aleta #2 con los distintos calibres



Fuente: Reportes finales, pozos C342, C271 y C216

En el caso de la aleta #2 se observa la tendencia definida en donde la broca estándar con calibre de 2.5" presenta daño en uno de los cortadores de la estructura principal de corte, adicionalmente los cortadores del calibre presentan astillamiento y pérdida parcial del mismo. En el caso de la broca con calibre de 4" se evidencia únicamente un leve astillamiento en el cortador del calibre, caso similar en la broca con calibre de 6" donde el cortador que protege el calibre sufrió un impacto posiblemente por un fenómeno vibracional de tipo lateral.

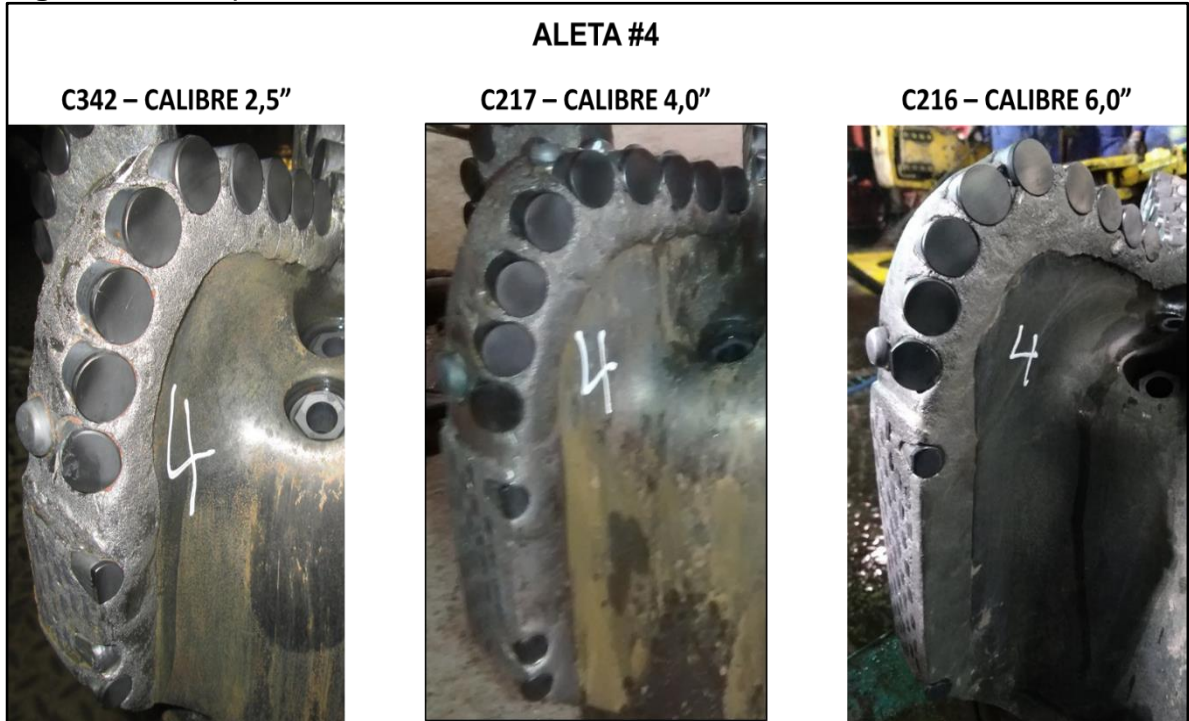
Figura 79. Comparación de la aleta #3 con los distintos calibres



Fuente: Reportes finales, pozos C342, C271 y C216

Analizando la aleta #3 se evidencia que en la única broca donde se presentó un daño fue en la estándar con calibre de 2.5" en uno de los cortadores del calibre que fue afectado por impacto y un leve astillamiento del cortador superior; por otro lado, la estructura principal de corte, así como los cortadores del calibre se mantuvieron intactos en las brocas con calibre de 4" y 6".

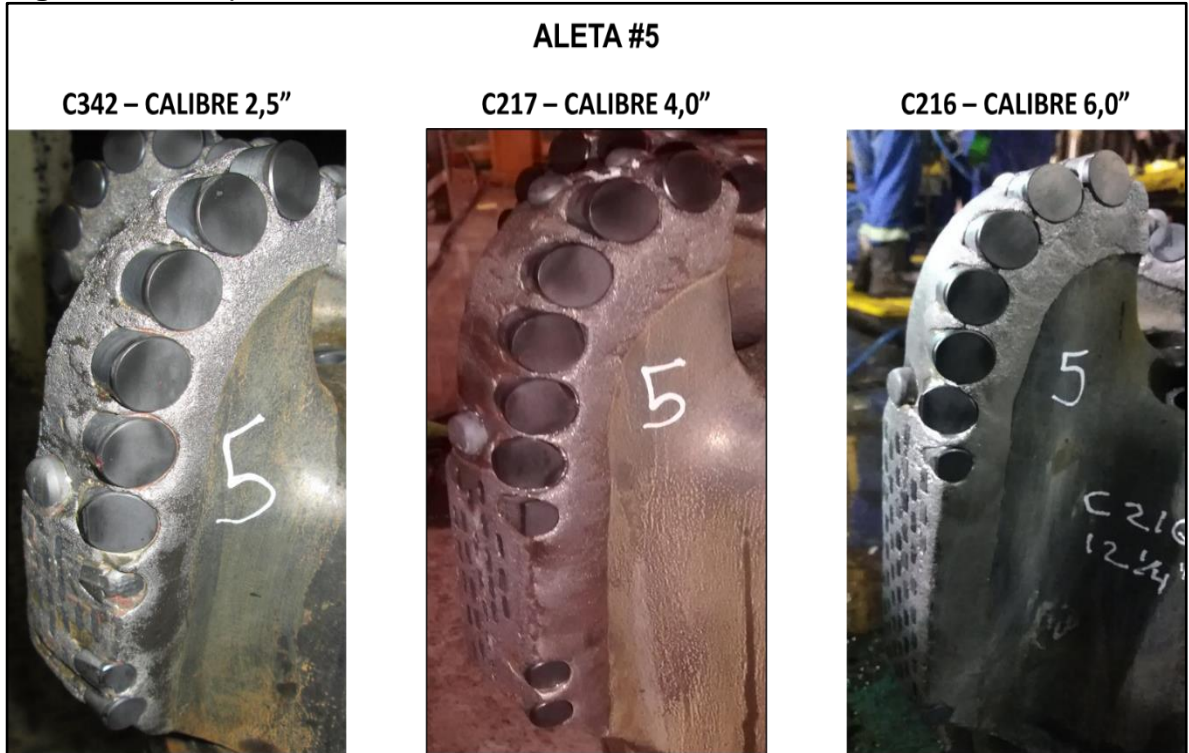
Figura 80. Comparación de la aleta #4 con los distintos calibres



Fuente: Reportes finales, pozos C342, C271 y C216

Comparando los estados de la aleta #4 en las distintas brocas se observa una condición mucho más severa que en la aleta #3 donde los cortadores ubicados en el calibre presentan daños y pérdida total del mismo de gran magnitud, posiblemente por vibraciones severas de tipo lateral; sin embargo, en las brocas con calibres extendido este fenómeno no se apreció ni en los cortadores del calibre ni en la estructura principal de corte.

Figura 81. Comparación de la aleta #5 con los distintos calibres



Fuente: Reportes finales, pozos C342, C271 y C216

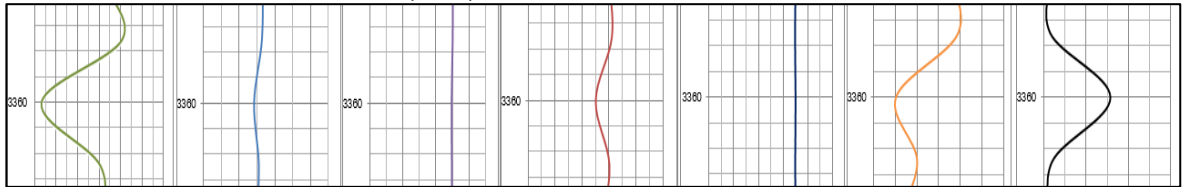
Por último, en la aleta #5 se repite el escenario anterior en donde la broca estándar con calibre de 2.5" presenta afectaciones severas en la zona del calibre, llegando a la pérdida total de uno de los cortadores ubicados en ese lugar, es posible que la extensión en la longitud del calibre, lo cual acarrea una mayor área de contacto con la formación evita que se presentara este daño en las brocas con calibre de 4" y 6".

5.4.2 Análisis cuantitativo. Según el análisis de los parámetros reportados en los pozos con diseños anteriores, se determinaron los intervalos en donde se presenta un patrón que sea atribuible a posibles fenómenos vibratorios y el tipo de vibración observada.

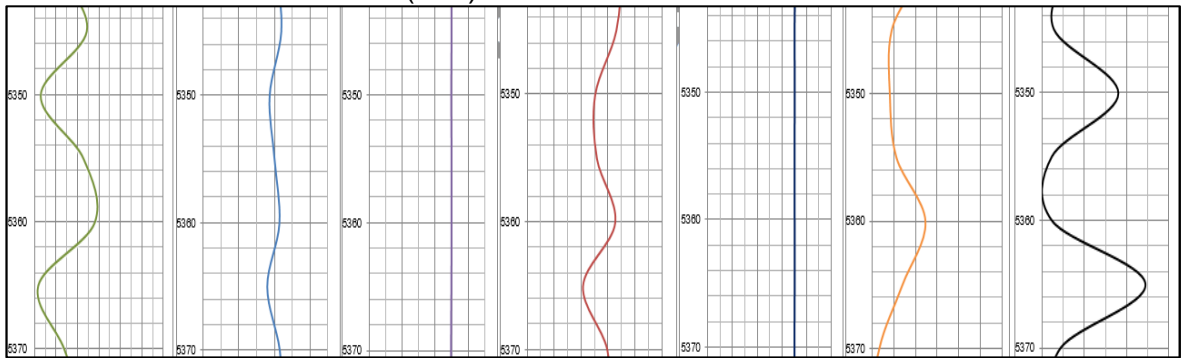
5.4.2.2 Pozo C342



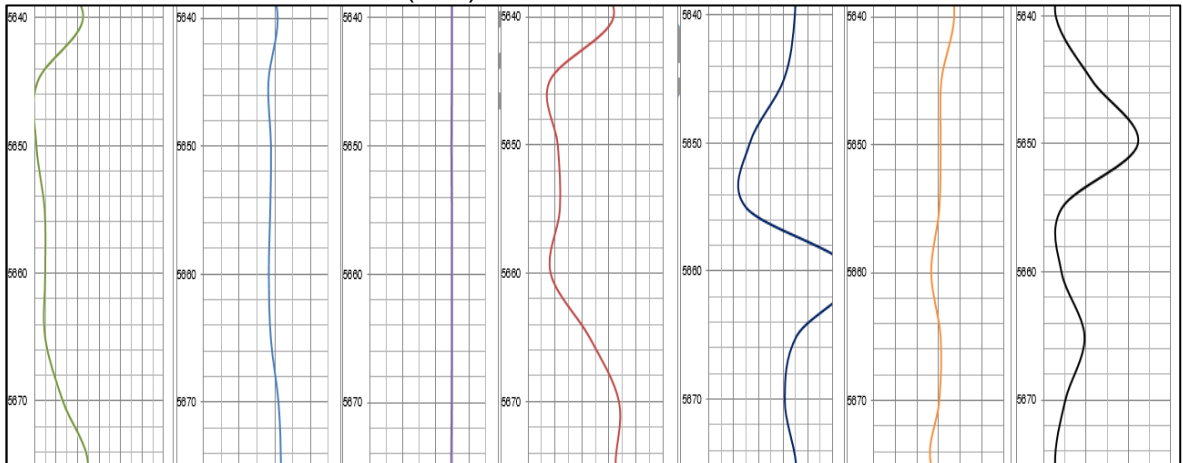
Vibración lateral 3354-3366 (12ft)



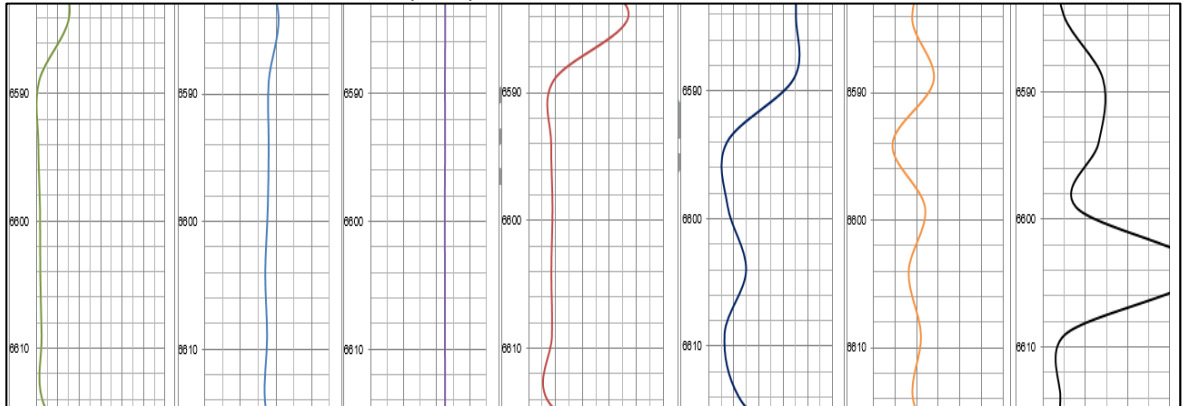
Vibración lateral 5344-5370 (26ft)



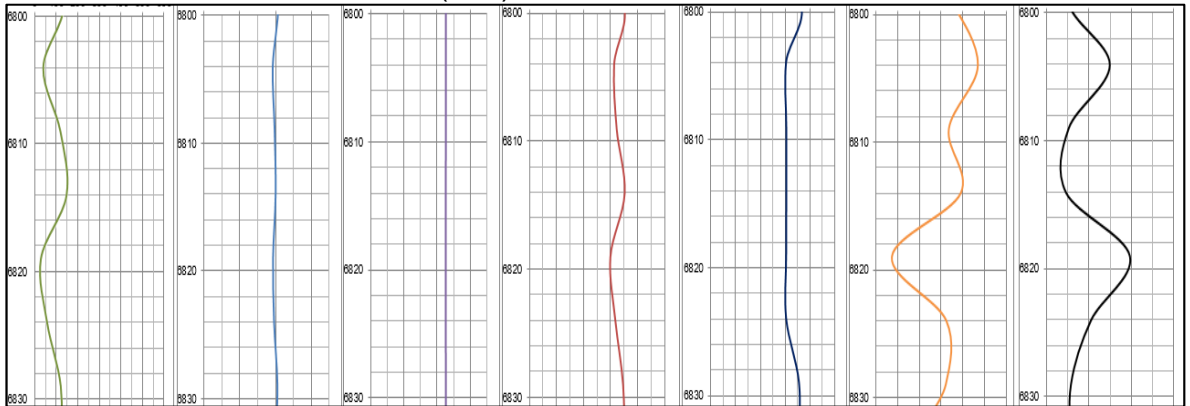
Vibración lateral 5640-5672 (30ft)



Vibración lateral 6584-6610 (26ft)



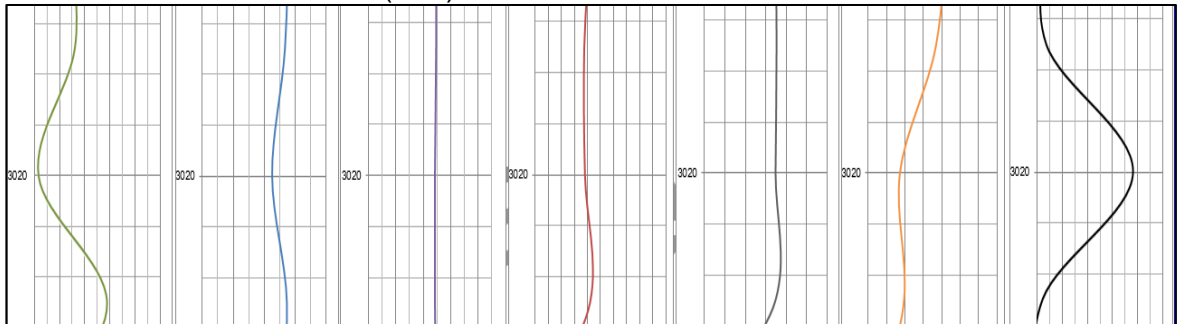
Vibración torsional 6800-6830 (30ft)



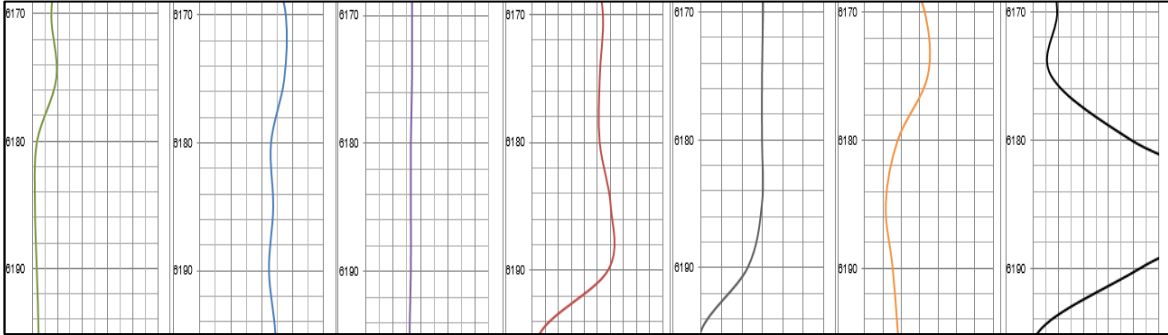
5.4.2.3 Pozo C217



3012-3024 Vibración axial (12ft)



6174-6194 Vibración lateral (20ft)



Por último, en el **Tabla 18** se resumen las tres corridas, donde se implementaron los distintos diseños de Ulterra y las afectaciones tras la extensión del calibre.

Tabla 18. comparación vibracional de los intervalos extraídos de los parámetros

POZO	CALIBRE (IN)	PROFUNDIDAD (FT)	TIPO DE VIBRACION	AFECTACION DIRECTA A LA BROCA
C342	2,5	3354-3356	TORSIONAL	En el calibre de la broca
		5344-5370	LATERAL	En el calibre de la broca
		5640-5672	LATERAL	En el calibre de la broca
		6584-6610	LATERAL	En el calibre de la broca
		6800-6830	TORSIONAL	En el calibre de la broca
C217	4	3012-3024	AXIAL	NO
		6174-6194	LATERAL	NO
C216	6"	1351-1354	LATERAL	En el calibre de la broca
		3210-3213	TORSIONAL	NO
		6256-6260	LATERAL	En el calibre de la broca
		6365-6378	TORSIONAL	NO
		6687-6698	TORSIONAL	NO
		6881-6891	TORSIONAL	NO

En conclusión, la comparación de la posible presencia de los fenómenos vibracionales indica que durante la implementación de la broca estándar con calibre de 2.5" las vibraciones afectaron significativamente la broca, lo cual se pudo comprobar tanto cualitativa como cuantitativamente. Por otro lado, en el primer diseño de calibre extendido (4") la reducción fue significativa en ambos métodos de comprobación, cabe recalcar que este diseño cuenta con limitadores de carga en todas las aletas. Por último, la broca con calibre de 6" al no contar con esta característica en todas las aletas de su diseño y en busca de una optimización de la ROP presento un comportamiento intermedio entre la estándar y la de 4".

6. EVALUACION DE DESEMPEÑO DEL NUEVO DISEÑO DE LA BROCA POLICRISTALINA CON CALIBRE EXTENDIDO DE 6" CON LAS BROCAS DE CALIBRE DE 2.5" Y 4" EN LA SECCIÓN 12 ¼" EN EL CAMPO CASTILLA

En este capítulo se evaluó el desempeño del nuevo diseño de broca con calibre extendido de 6" a lo largo de la sección de 12 ¼" en los pozos perforados durante la actual campaña de perforación que ejecuta Ecopetrol S.A. en el Campo Castilla. Los pozos en mención son en orden cronológico: CA216, CA226 Y CN281.

6.1 CASTILLA 216

El pozo Castilla 216, cronológicamente fue el primer pozo al cual se le implemento en nuevo diseño de broca con calibre extendido en la fase de 12 ¼". La perforación se desarrolló con un taladro perteneciente a la compañía Nabors que utiliza top drive como medio de rotación y empuje, con una potencia de 1000 hp en el malacate y tres (3) bombas triplex con una eficiencia del 95% y una presión de operación máxima de 4500 psi.

Tras su primera corrida, la calificación de la broca según la IADC fue 0-0-NO-A-X-I-NO-HP. La broca no presento un desgaste evidente lo cual era de esperarse dado que la sección no había sido culminada en su totalidad. Tanto los cortadores de la estructura interna como externa no evidencian desgaste alguno, lo mismo ocurre con el cuerpo de la misma broca, la integridad del calibre se mantuvo intacta; la broca salió a superficie antes de los pensado dado que se presentó un problema no identificado en el pozo.

La corrida de la broca se realizó siguiendo el plan de parámetros, previamente establecido en el acuerdo entre Ulterra™, los ingenieros direccionales y el Company Man que se pueden observar a continuación en el **Cuadro 17**.

Cuadro 17. Parámetros de perforación promedio del pozo C216 con el BHA #1

INFORMACIÓN DE PARAMETROS									
UNIDAD LITOLÓGICA	DEPTH IN (ft)	DEPTH OUT (ft)	FOOTAGE (ft)	HR Efec	ROP Efec (FT/HR)	WOB (Klbs)	TQ (Klb/FT)	FLOW GPM	SPP (psi)
GUAYABO	1019	1120	101	0.45	224.4	5-10	3-5	820	1050
ARENISCAS SUPERIORES	1120	1670	505	1.96	280.6	8-20	4-6	820-950	1050-1500
UNIDAD LUTITA E	1670	2180	510	1.85	275.7	10-20	6-8	950	1450-1550
UNIDAD C1	2180	3120	940	4.42	212.7	10-20	6-8	800-950	1300-1600
ARENISCAS CARBONERAS	3120	3506	386	3.1	124.5	10-20	6-8	500-800	700-1300
UNIDAD C2	3506	3526	20	0.23	87.0	8-12	6-8	450-500	600-700

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2017.

Teniendo como referencia la información anterior, se observa de en los primeros estratos correspondientes a Guayabo, Areniscas Superiores, la unidad Lutita E, la

ROP efectiva supera los 200 ft/hr. Esto gracias a la composición de estos estratos, al entrar a las Areniscas Carboneras la ROP efectiva se ve reducida en un 45% aproximadamente, esto pudo ocurrir por las trazas cuarzosas que presenta esta formación; al entrar a la Formación C2 la ROP efectiva es reducida por encima del 70% dado que presenta intercalaciones de limolitas lo cual puede perjudicar la estructura de corte de la broca si se entra atravesada con parámetros óptimos.

El peso sobre la broca requerido para atravesar cada formación varía según su composición. En el caso de Guayabo el WOB se mantiene bajo, mientras que en las formaciones Areniscas Superiores, Lutita E, unidad C1 y Areniscas Carbonera, el WOB debió ser incrementado para mantener la ROP efectiva según el plan de perforación. Esto cambio al llegar a la formación C2, el rango con el que se manejó este parámetro fue reducido para evitar inconvenientes antes mencionados.

Posterior a la corrida con el BHA #2 y según la calificación basados en la IADC que resulto 0-1-BT-G-X-I-NO-TD. La broca presento un desgaste en la estructura de corte, específicamente a los cortadores internos; aquellos que están ubicados en la hilera del calibre. Estos sufrieron ruptura, posiblemente por un exceso de WOB en formaciones de composición dura o vibraciones, las cuales se vieron reflejadas en el estado final de la broca. Sin embargo, el calibre no sufrió daño o desgaste alguno. Finalmente, la broca salió a superficie ya que se llegó a la profundidad establecida correspondiente a la sección 12 ¼”.

La corrida de la broca se realizó siguiendo el plan de parámetros, previamente establecido en el acuerdo entre Ulterra™, los ingenieros direccionales y el Company Man; los cuales proporcionan una estimación de un mínimo daño en las herramientas de fondo, completando la perforación. Lo anterior se pueden observar a continuación en el **Cuadro 18**.

Cuadro 18. Parámetros de perforación promedio del pozo C216 con el BHA #2

INFORMACIÓN DE PARAMETROS									
UNIDAD LITOLÓGICA	DEPT H IN (ft)	DEPTH OUT (ft)	FOOTAG E (ft)	HR Efec	ROP Efec (FT/HR)	WOB (Klbs)	TQ (KLb/FT)	FLOW GPM	SPP (psi)
C2	3616	5497	1881	17.1 2	109.9	6-15	8-12	850-900	1350-2100
LUTITA E3	5497	6205	708	9.7	73.0	8-18	10-12	850-900	1900-2200
T1	6205	6500	295	4.99	59.1	10-18	11-13	850	1950-2200
LUTITA E4	6500	7335	835	17.0 3	49.0	6-15	12-14	850	1950-2200

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2017.

Teniendo en cuenta que las formaciones Lutita E3, unidad T1 y Lutita E4 son las restantes para culminar la fase de 12 ¼” la ROP es el parámetro crítico para tener precisión y seguir el plan direccional previamente establecido, de ir a una tasa de penetración muy elevada existe el riesgo de generar perdidas del fluido de perforación, dañar la estructura de corte de la broca y crear una brecha muy elevada entre lo que está planeado y lo real. Posterior a la unidad C2 se muestra como la

ROP efectiva es controlada por debajo de los 100 ft/hr para no sobrepasar el límite de la sección.

El WOB de las unidades restantes es el parámetro independiente que hace parte de aquellos que regulan la ROP efectiva, como se muestra en el **Cuadro 18** los rangos manejados en estas formaciones no sobrepasan las 14 kLb/ft que se ve reflejado en el control de la ROP antes mencionado.

6.2 CASTILLA 226

El pozo Castilla 226, es el segundo pozo al cual se le implemento la broca con calibre de 6", el cual fue perforado por el taladro perteneciente a la compañía Nabors, este tiene top drive como medio de rotación y empuje, posee una potencia de 1000 hp en el malacate y tres (3) bombas triplex con una eficiencia del 97% y una presión de operación máxima de 4500 psi.

Tras su primera corrida, la broca obtuvo una calificación según la IADC de 0-0-NO-A-X-I-PN/BU-WO. La broca no presento un desgaste evidente lo cual es de esperarse dado que la sección no había sido culminada en su totalidad. Tanto los cortadores de la estructura interna como externa no evidencian desgaste alguno, lo mismo ocurre con el cuerpo de la misma broca, la integridad del calibre se mantuvo intacta; la broca salió a superficie antes de los pensado dado que se presentó una falla en el motor de fondo.

La corrida de la broca se realizó siguiendo el plan de parámetros, previamente establecido en el acuerdo entre Ulterra™, los ingenieros direccionales y el Company Man que se pueden observar a continuación en el **Cuadro 19**.

Cuadro 19. Parámetros de perforación promedio del pozo C226 con el BHA #1

INFORMACIÓN DE PARAMETROS									
UNIDAD LITOLOGICA	DEPTH IN (ft)	DEPTH OUT (ft)	FOOTAGE (ft)	HR Efec	ROP Efec (FT/HR)	WOB (Klbs)	TQ (KLb/FT)	FLOW GPM	SPP (psi)
GUAYABO	1001	1128	127	0.78	162.8	5-15	3-5	800	1180
ARENISCAS SUPERIORES	1128	1640	512	1.81	282.9	5-22	4-7	950	1650-1700
UNIDAD LUTITA E	1640	2110	470	1.59	295.6	5-22	4-7	950	1700-1750
UNIDAD C1	2110	2795	685	6.57	104.3	5-25	7-9	850 - 950	1400-2000

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018.

En las primeras unidades se observa un ritmo elevado de la ROP efectiva al atravesar cada una de las formaciones; rango que va desde los 100 ft/hr hasta casi 300 ft/hr. Lo que redujo el tiempo de perforación de cada estrato, en ninguna de las unidades antes mostradas supero dos horas de perforación. Lo que aporta en gran medida al ahorro de días de operación.

El WOB en esta primera sección de la fase muestra rangos de aplicabilidad mucho más elevados de los que se emplearon en el C216, lo que indica que se presentaron

variaciones en la composición de estas unidades, sin embargo, el ideal era mantener una alta ROP efectiva por consiguiente se llevó este parámetro cerca de los límites superiores del peso que se le puede aplicar a la broca.

Posterior a la segunda sección de la fase de 12 ¼” del pozo C226; y observando la calificación según la IADC que fue 0-0-NO-A-X-I-NO-TD. La broca no presentó daño o desgaste alguno tanto en los cortadores internos como externos; el cuerpo y el calibre mantuvieron su integridad; tampoco se presentó desgaste en el diámetro de esta, lo que a primera impresión indica que el pozo quedó con el diámetro requerido. La broca salió a superficie dado que llegó a la formación objetivo establecido para la sección de 12 ¼”.

La corrida de la broca se realizó siguiendo el plan de parámetros, previamente establecido en el acuerdo entre Ulterra™, los ingenieros direccionales y el Company Man; los cuales proporcionan una estimación de un mínimo daño en las herramientas de fondo, completando la perforación. Lo anterior se pueden observar a continuación en el **Cuadro 20**.

Cuadro 20. Parámetros de perforación promedio del pozo C226 con el BHA #2

INFORMACIÓN DE PARAMETROS									
UNIDAD LITOLÓGICA	DEPTH IN (ft)	DEPTH OUT (ft)	FOOTAGE (ft)	HR Efec	ROP Efec (FT/HR)	WOB (Klbs)	TQ (KLb/FT)	FLOW GPM	SPP (psi)
UNIDAD C1	2795	3020	225	1.68	133.9	5-20	6-8	850-950	1730-2100
ARENISCAS CARBONERAS	3020	3270	250	1.9	131.6	5-12	6-8	850	1730-1800
UNIDAD C2	3270	5290	2020	12.36	163.4	15-20	8-12	850-920	1800-2800
LUTITA E3	5290	5680	390	2.48	157.3	15-25	8-12	920	2800
UNIDAD T1	5680	6060	380	3.83	99.2	15-25	8-12	920	2800-2900
LUTITA E4	6060	6680	620	11.13	55.7	5-20	8-12	920	2900

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018.

Una vez corrida la broca con calibre extendido en la sección restante se observa una variación de los parámetros con los cuales se decidió atravesar cada estrato. dicha variación va ligada a la composición de cada unidad geología. Durante las formaciones unidad C1, Areniscas Carboneras, Unidad C2 y la Lutita E3 presentaron ROP efectiva por encima de los 100 ft/hr. Una vez se inició la perforación de la unidad T1 la ROP efectiva fue controlada a razón de ajustarse al plan de perforación. Sin embargo, estos últimos dos estratos se atravesaron con una mayor tasa que en el pozo C216. No obstante, esto no afectó la calidad de la operación al finalizar la sección.

Con respecto al WOB aplicado en las formaciones de esta sección se sigue presentando rangos elevados, los cuales también podrían estar relacionado a variaciones en la composición de los estratos. Sin embargo, en la formación Lutita E4, se estima que el peso aplicado sobre la broca se acerque al límite inferior, dado

que es necesario tener precisión a la profundidad a la cual se desea dar por terminada la perforación de la fase de 12 ¼”.

6.3 CASTILLA NORTE 281

El pozo Castilla Norte es el último pozo en el cual se implementó la broca con calibre extendido de 6”. Este pozo fue perforado con un taladro perteneciente a Independence, que maneja top drive como medio de rotación y empuje, con una potencia de 1500 hp en el malacate y tres (3) bombas triplex con una eficiencia del 96% y una presión de operación máxima de 4600 psi. La corrida de la fase inició a las 19:30 horas del 5 de febrero del 2018, llegando a la formación objetivo a una profundidad de 6898 ft, el día 10 de febrero del 2018.

Al finalizar la primera sección de la fase, la broca presentó una calificación según la IADC de 0-1-WT-A-X-I-NO-BHA. Lo cual indica un desgaste uniforme de los cortadores en todas las secciones de esta; cortadores internos, cortadores externos, los cortadores en la hilera del calibre y en la hilera de la nariz. Por otro lado, el diámetro y el calibre no presentaron daño o desgaste alguno. La broca salió a superficie por seguimiento del plan de perforación que requería cambiar el BHA.

La corrida de la broca se realizó siguiendo el plan de parámetros, previamente establecido en el acuerdo entre Ulterra™, los ingenieros direccionales y el Company Man que se pueden observar a continuación en el **Cuadro 21**.

Cuadro 21. Parámetros de perforación promedio del pozo CN281 con el BHA #1

INFORMACIÓN DE PARAMETROS									
UNIDAD LITOLÓGICA	DEPTH IN (ft)	DEPTH OUT (ft)	FOOTAGE (ft)	HR Efec	ROP Efec (FT/HR)	WOB (Klbs)	TQ (KLb/FT)	FLOW GPM	SPP (psi)
GUAYABO	992	1400	408	1.04	392.3	4-18	4-7	950	1250-2000
ARENISCAS SUPERIORES	1400	1905	505	1.02	495.1	10-20	4-7	950	2000-2100
UNIDAD LUTITA E	1905	2550	645	1.91	337.7	10-25	5-8	950	2100-2350
UNIDAD C1	2550	3610	1060	3.12	339.7	10-25	7-10	990	2350-2550
ARENISCAS CARBONERAS	3610	3920	310	0.82	378.0	10-25	7-11	990	2550
UNIDAD C2	3920	4647	727	3.07	236.8	10-30	7-11	990	2550-2800

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018.

Esta sección de la fase de 12 ¼” fue perforada en muy pocas horas efectivas; dado que la ROP efectiva alcanzó tasas de penetración de casi 500 ft/hr. Desde la formación Guayabo hasta las Areniscas Carboneras superaron los 300 ft/hr, sin embargo, al llegar a la unidad C2 el comportamiento se mantiene, reduciendo los parámetros de perforación dado que esta unidad presenta intercalaciones de Limolita, la cual consta de una composición mucho más dura. Por consiguiente, podría generar daños o desgaste en la estructura de corte de la broca.

Como se mencionó anteriormente el WOB es uno de los principales parámetros directamente relacionado con las ROP efectiva de una corrida, en este caso la relación de ambos parámetros es clara, al evidenciar valores de aplicabilidad de hasta de 30 klbs. Igualmente fue requerido un mayor peso para mantener una ROP efectiva durante la perforación de la unidad C2 lo que confirma la teoría; su composición es más dura.

Una vez se finaliza la segunda sección de la fase de 12 ¼” del pozo Castilla Norte 281, al obtener una calificación de adicional al desgaste que se presentó en la primera sección no se evidencio daño adicional. Sin embargo, el cuerpo y el calibre no presentaron desgaste alguno. Finalmente, la broca salió a superficie dado que llegó a la formación objetivo de la sección 12 ¼”.

La corrida de la broca se realizó siguiendo el plan de parámetros, previamente establecido en el acuerdo entre Ulterra™, los ingenieros direccionales y el Company Man; los cuales proporcionan una estimación de un mínimo daño en las herramientas de fondo, completando la perforación. Lo anterior se pueden observar a continuación en el **Cuadro 22**.

Cuadro 22. Parámetros de perforación promedio del pozo C226 con el BHA #2

INFORMACIÓN DE PARAMETROS									
UNIDAD LITOLÓGICA	DEPTH IN (ft)	DEPTH OUT (ft)	FOOTAGE (ft)	HR Efec	ROP Efec (FT/HR)	WOB (Klbs)	TQ (KLb/FT)	FLOW GPM	SPP (psi)
UNIDAD C2	4647	5776	1129	11.56	97.7	15-25	8-12	950-990	2550-2700
LUTITA E3	5776	6250	474	6.68	71.0	15-25	8-12	950	2600-2650
UNIDAD T1	6250	6484	234	4.4	53.2	15-25	10-14	900-950	2500-2700
LUTIRA E4	6484	6898	414	8.61	48.1	15-25	10-14	900-950	2550-2800

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2018.

En la sección restante la ROP efectiva es controlada por debajo de los 100 ft/hr ya que se llegó a la profundidad a la cual se inició el trabajo direccional KOP. Se realizó trabajo de deslizamiento, por lo cual es necesario tener controlada la ROP; Dado que la construcción del ángulo comenzó a una profundidad avanzada, las tasas de inclinación cada 100’, se debía construir más grados en menos pies.

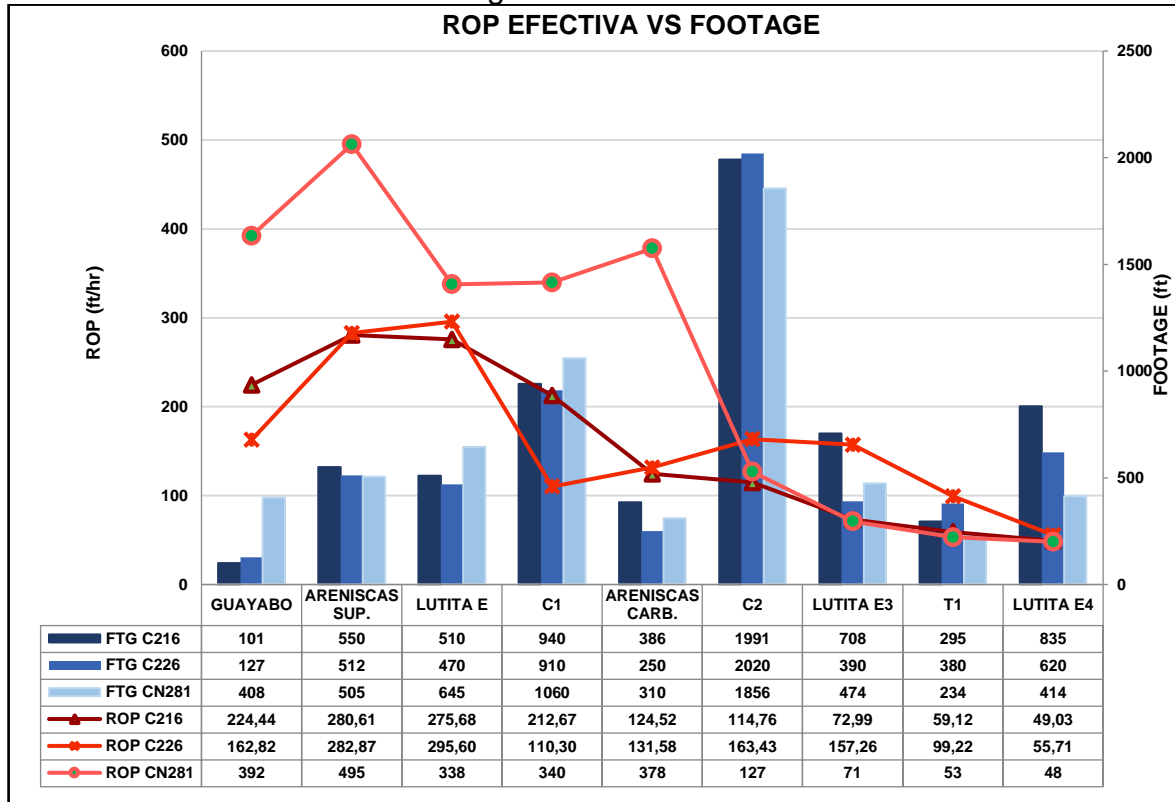
Esto también se ve reflejado en el WOB dado que para que el trabajo de deslizamiento sea eficiente se debe incrementar el peso sobre la broca para que el brazo del motor funcione correctamente.

6.4 ANALISIS COMPARATIVO DE LOS POZOS PERFORADOS CON EL NUEVO DISEÑO CON CALIBRE EXTENDIDO DE 6”

El análisis del desempeño obtenido en durante la perforación de la fase de 12 ¼” en el campo castilla en los pozos C216, C226 y CN281 se realiza basándose en los parámetros principales como lo es la ROP efectiva, las horas efectivas, WOB, torque y presión. Estos serán confrontados con las distintas unidades litológicas que se perforaron.

6.4.1 Gráficos de ROP efectiva vs Footage. La ROP efectiva junto con el MSE son los parámetros más importantes para la evaluación de desempeño de una broca; a pesar de su variabilidad el comportamiento de estos parámetros permite tener una idea clara de la eficiencia de corte en la herramienta, al no ser afectados por tiempos ni factores diferentes a los de la perforación. No obstante, para las empresas operadoras y posibles clientes, la ROP es el factor decisivo para la elección de una broca y para la preferencia de una empresa proveedora. A continuación, se presenta un análisis de la ROP efectiva junto con el MSE en los tres pozos con perforados con calibre extendido de 6”.

Grafica 5. ROP efectiva vs Footage

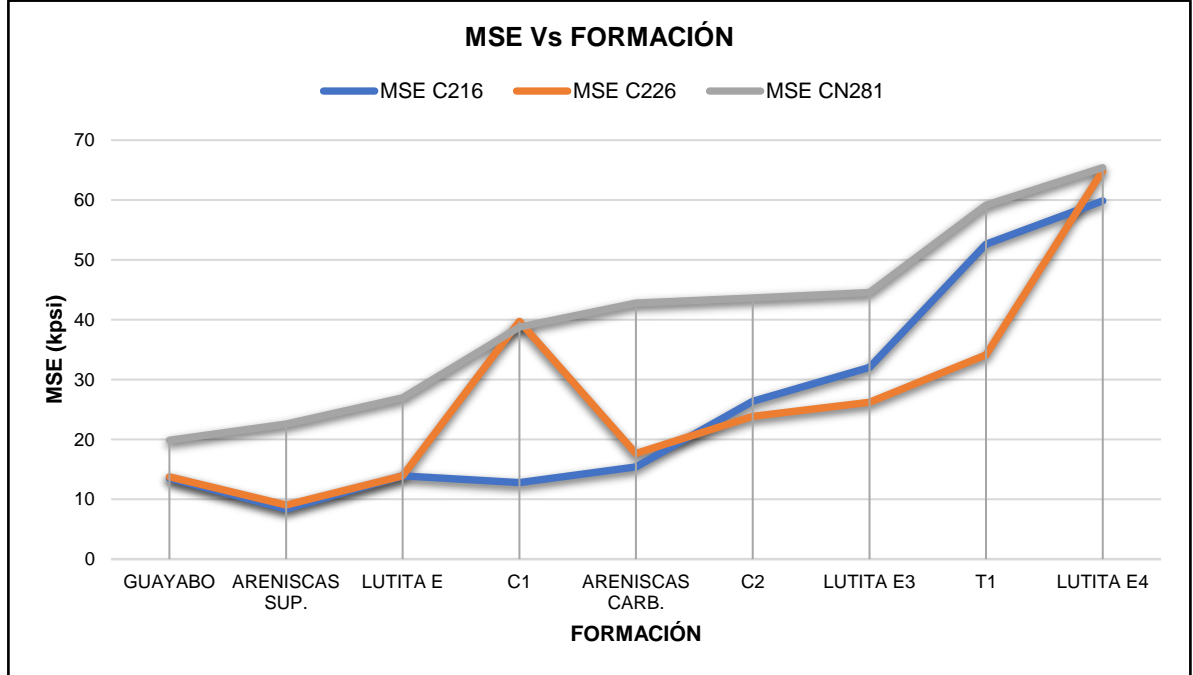


Al iniciar la perforación, en la Formación Guayabo, los tres pozos presentan una ROP controlada para evitar golpes de las herramientas direccionales que todavía están dentro del casing. Una vez se confirma que todo el BHA está debajo del zapato, se aumentan los parámetros de perforación al máximo permitido por el programa, para mejorar la ROP de manera satisfactoria. Sin embargo, en la Formación C1 el pozo C226 registro una ROP inusualmente baja, causada por un problema con el motor direccional, por el cual fue sacado a superficie para ser reemplazado.

Como se muestra en la **Grafica 6** esta perturbación ocasiono un aumento brusco en el MSE de esa sección a comparación de los otros dos pozos, por lo cual la perforación se volvió ineficiente. Mas adelante, los pozos C216 y C226 controlaron caudales para entrar a la Formación de Areniscas Carbonera, causando una disminución en el desempeño de esa sección.

Es importante resaltar que la **Grafica 6** expone un comportamiento normal del parámetro de MSE; que incrementa de forma continua a medida que el pozo alcanza mayores profundidades.

Grafica 6. MSE vs Formación



Además, se observa una diferencia muy clara entre los valores del pozo CN281 a los otros dos; posiblemente se debe al carácter más agresivo de los parámetros aplicados a lo largo de la perforación en general.

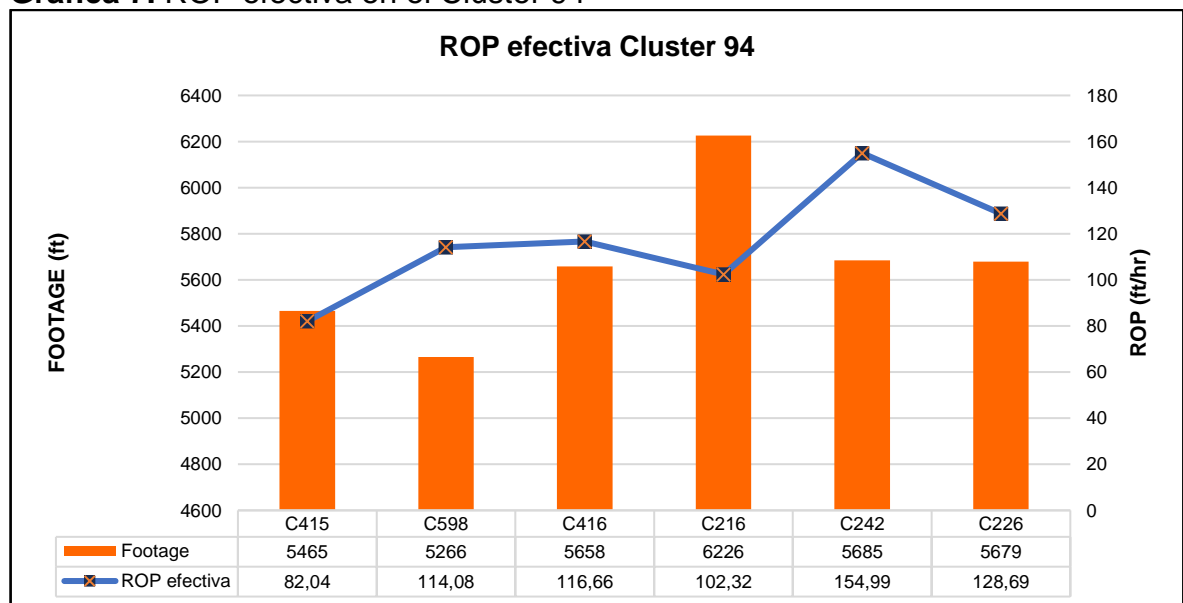
En la Unidad C2 se puede ver que hay una reducción de la ROP en los tres pozos; esta disminución se puede atribuir a la dureza de la formación compuesta por limolitas, que no solo opone mayor resistencia al corte, sino que puede comprometer la integridad de la estructura de corte de la broca, en consecuencia, se recomienda disminuir los parámetros de perforación a la entrada de la formación.

Durante la perforación de la Lutita E3 se limitaron las RPM y se aumentó el trabajo direccional para contrarrestar la fuerte tendencia de la formación de girar a la derecha, por lo cual se evidenció una declinación en el desempeño; esta restricción permaneció hasta el final de la corrida por requerimientos direccionales, es decir con ROP controlada hasta culminar el plan de perforación para esta sección.

6.4.2 Análisis ROP efectiva por Cluster. El desempeño de una broca no solo depende de las características de la misma o de los parámetros de perforación utilizados en la corrida; el espesor, la composición mineralógica y las propiedades petrofísicas presentes en las formaciones que la broca pretende atravesar, influyen directamente en la ROP efectiva obtenida durante la perforación. Por esta razón, es necesario hacer un análisis de la ROP de cada pozo dentro del Cluster al cual pertenecen para generar una comparación más equitativa del desempeño del nuevo diseño.

A continuación, se presentan las gráficas de ROP efectiva vs Footage para cada uno de los Cluster a los cuales pertenecen los pozos C216, C226 y CN281.

Gráfica 7. ROP efectiva en el Cluster 94

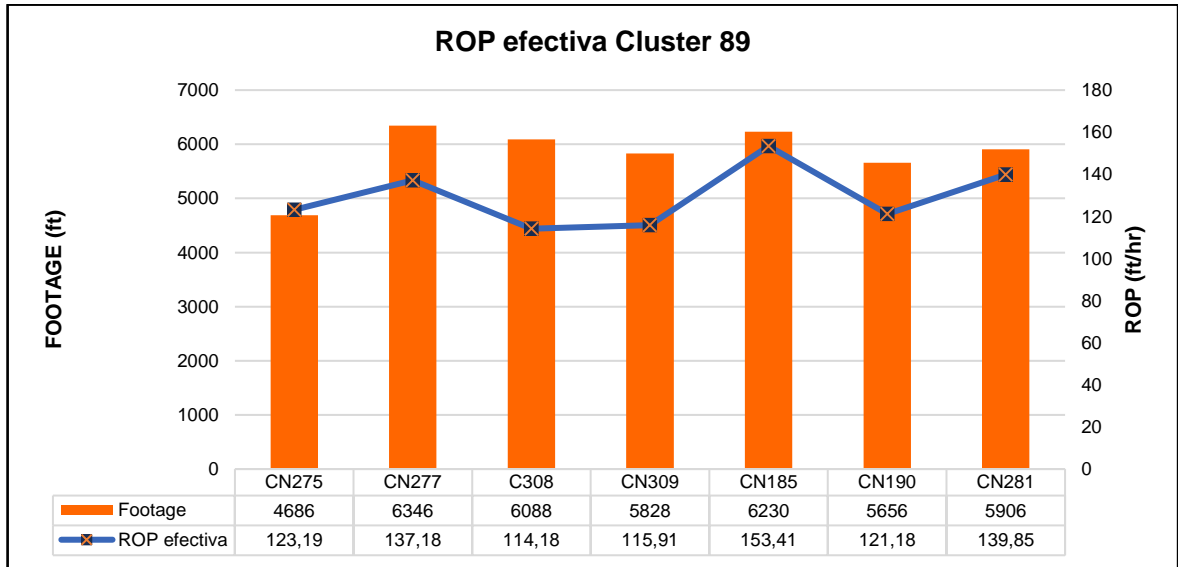


El Cluster 94 del Campo Castilla está compuesto por 6 pozos de los cuales 2 fueron perforados por brocas con calibre de 6" y cuenta con un promedio de ROP efectiva de 116.46 ft/hr. El pozo C216 registró una ROP efectiva 12% menor que el promedio del Cluster, un 34% menor que la ROP efectiva del mejor pozo y una ROP 20% mejor que el peor pozo del Cluster.

Por su parte el pozo C226 obtuvo una ROP efectiva 10.5% mayor que el promedio del Cluster, un 17% menor que la ROP del mejor pozo y una ROP 56% mayor que la registrada en el peor pozo del Cluster.

De este análisis se puede concluir que el desempeño en el pozo C226 se puede considerar superior, al ser el segundo mejor de su Cluster a pesar de los eventos presentados durante su perforación; en cambio el desempeño de la broca en el pozo C216 obtuvo resultados muy inferiores a los de su Cluster a causa del incidente de pérdida de fluido durante la perforación.

Grafica 8. ROP efectiva en el Cluster 89

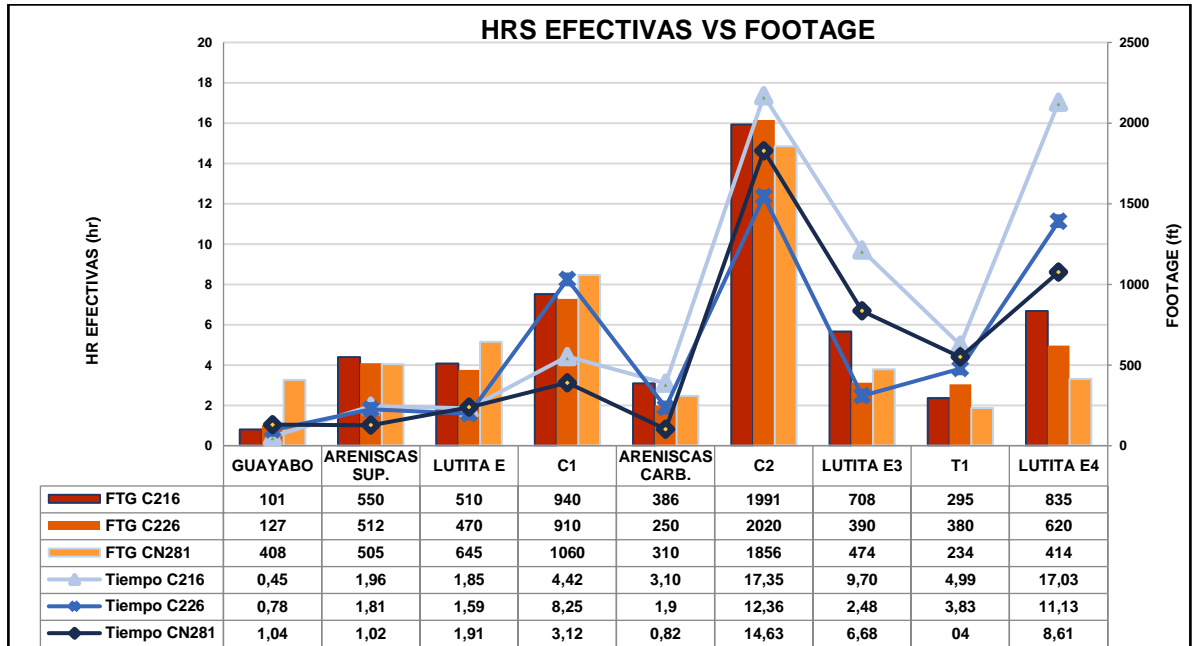


El pozo CN281 pertenece al Cluster 89 del Campo Castilla y presenta un promedio de ROP efectiva de 129.27 ft/hr; este arreglo incluye 7 pozos de los cuales solo uno fue perforado con una broca con calibre de 6". El pozo CN281 obtuvo una ROP efectiva 8.2% mayor al promedio del Cluster, un 8.8% menor que la ROP del mejor pozo y un 22.5% mejor que el peor pozo. Por lo cual se concluye que es el segundo mejor pozo del Cluster y su desempeño fue satisfactorio.

Es importante resaltar que, aunque la ROP del pozo CN281 fue mucho mayor que la del C226, el pozo C226 presento una ventaja en desempeño con respecto a su Cluster muy superior a la obtenida por los otros dos pozos de estudio.

6.4.3 Gráfico Horas efectivas vs Formación.

Gráfica 9. Horas efectivas vs Formación



La grafica de horas efectivas nos permite hacer un análisis de la rapidez con la que se perfora cada formación teniendo en cuenta los espesores de cada una; de esta manera se busca tener una visión más global del desempeño de la broca durante las corridas y se pueden identificar más fácilmente las afectaciones que tuvo la perforacion.

Como se puede ver en la **Gráfica 9**, el tiempo de perforación del pozo C216 se mantuvo en el promedio a lo largo de las primeras formaciones de la corrida, y teniendo en cuenta los espesores perforados, se puede concluir que fue superior al pozo C226 que presenta los mismos tiempos; más adelante en la Unidad C1 los tiempos de perforación aumentan en parte porque las formaciones tienen un espesor mayor, pero también son afectadas por la dureza creciente de rocas con mayor contenido lutítico. Al llegar a la Unidad C2 el pozo C216 es el que más tiempo tomo para atravesarla a pesar de no ser el de mayor espesor, de esto se puede concluir que la reducción de parámetros como el WOB y la presión durante la perforación repercutieron negativamente en la ROP. Esta tendencia de mayores tiempos se mantuvo hasta el final de la corrida debido a que las formaciones subsecuentes también tienen alto contenido de limolitas.

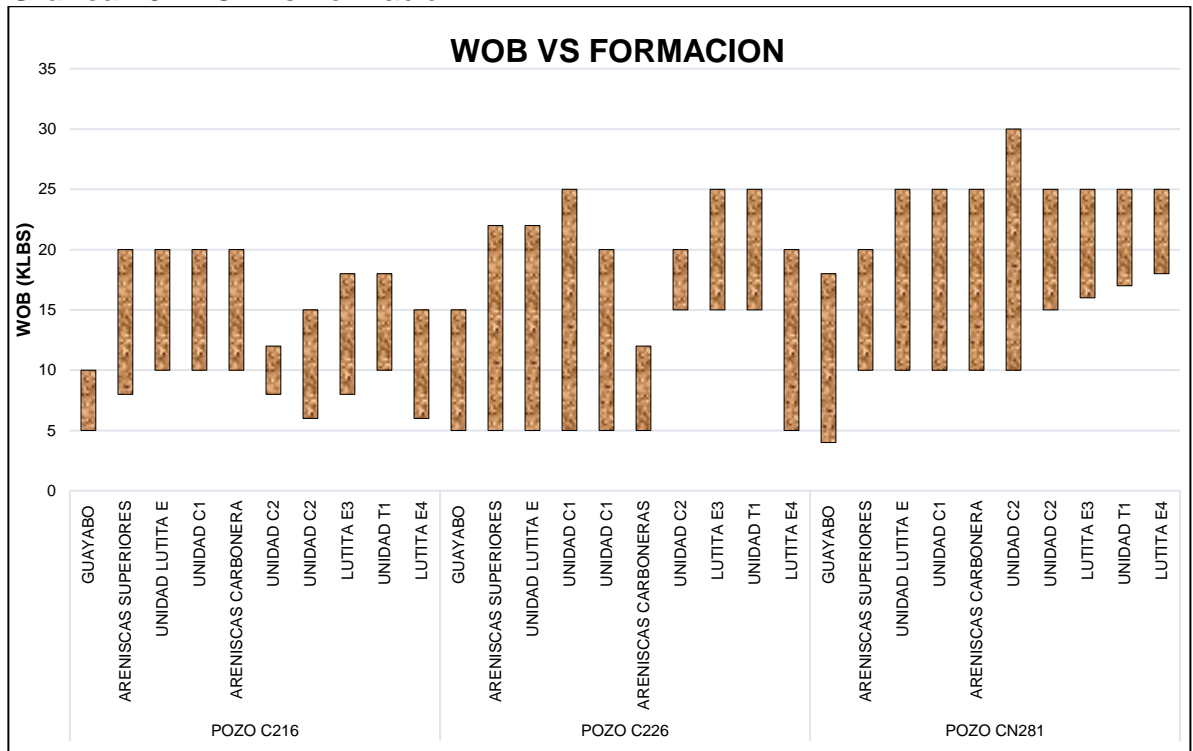
El pozo C226 muestra un comportamiento similar al C216 durante las tres primeras formaciones atravesando espesores ligeramente menores, no obstante, la formación que mayor efecto tuvo sobre el desempeño de este pozo fue la Unidad C1, en donde por una falla en el motor direccional, tuvo que sacar el BHA a superficie para realizar la reparación; de allí en adelante se aumentaron los

parámetros y la perforación se volvió más agresiva, mejorando satisfactoriamente la ROP en el resto de la corrida. Al llegar a la Lutita E4 el equipo de geología ordenó un control excesivo de ROP para alcanzar el objetivo, por tal motivo el tiempo empleado en esta formación, fue superior que en los otros dos pozos.

En el pozo CN 281 presenta tiempos menos a los otros dos durante las primeras formaciones, acorde con las ROP muy superiores alcanzadas por este pozo. Sin embargo, en la Unidad C2 pierde su ventaja contra el pozo C226 posiblemente porque en esta formación el pozo CN281 alcanzó su KOP y empezó a trabajar más intensamente su perfil direccional con ROP más controladas.

6.4.4 Gráfico WOB vs Formación

Gráfica 10. WOB vs Formación



Como se puede ver en la gráfica anterior, la unidad de Guayabo es perforada usando WOB relativamente bajos; esto con el fin de cuidar las herramientas de fondo que aún se encuentran dentro del revestimiento de la fase anterior.

Debido a la experiencia obtenida en pozos ya perforados dentro del campo, se ha llegado a la conclusión que las formaciones de Areniscas Superiores, Lutita E y la Unidad C1 no presentan mayores retos durante su perforación; por lo tanto, en estas unidades se decide aumentar el WOB para mejorar la ROP.

En el pozo C216 se puede observar cómo se decidió aumentar considerablemente el WOB durante la perforación de las formaciones Areniscas Superiores, Lutita E,

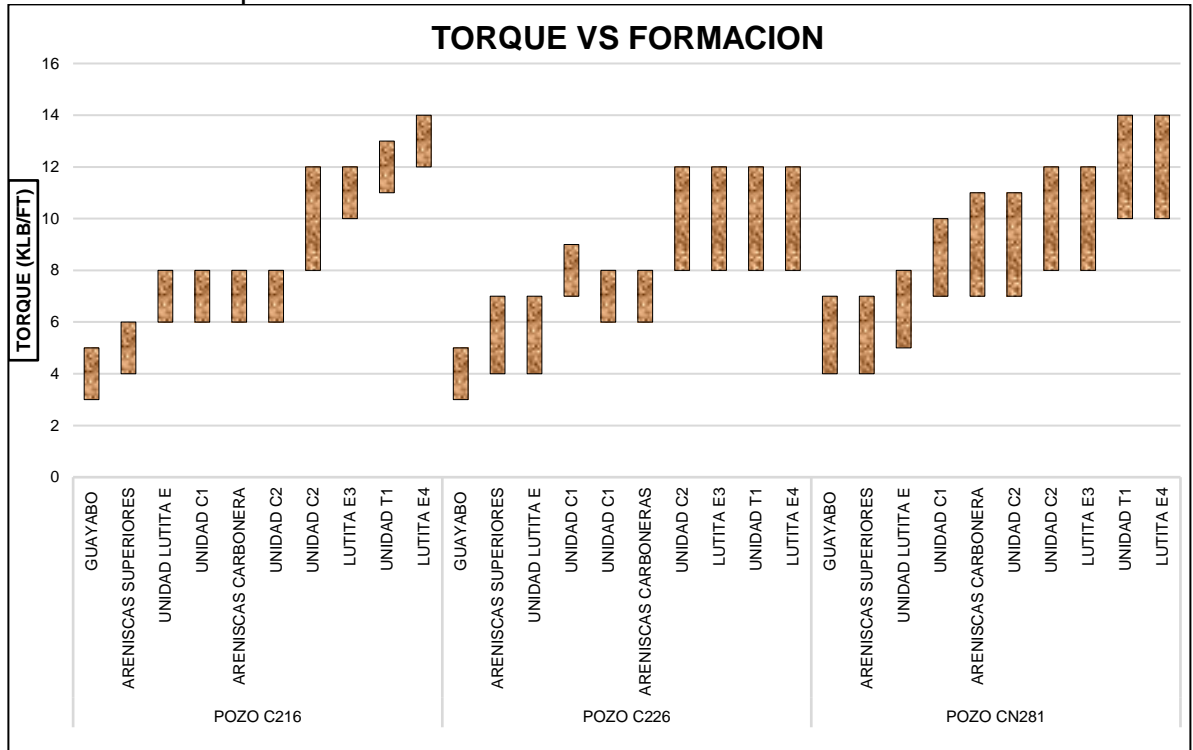
Unidad C1 y Areniscas Carbonera para mejorar la ROP; sin embargo, al entrar en la Unidad C2, se decidió reducir el WOB para evitar daños en la estructura de corte de la broca causados por la dureza superior de la limolita presente en la formación. Posteriormente en la Lutita E3 y la Unidad T1 se permitió aumentar el WOB porque el contenido de limolitas disminuyó, y por último en la Lutita E4 se mantuvo un WOB relativamente bajo, por esta razón la ROP cayó en este intervalo.

Los datos del pozo C226 muestran una estrategia de perforación más agresiva, lo que permitió aumentar considerablemente la ROP a comparación del pozo C216 sin comprometer significativamente el estado de la broca. Esto es un buen indicio de la resistencia de la broca ya que soportó el aumento del WOB en formaciones con mayor contenido de limolitas presentes en el pozo C226. De hecho, se muestra en la gráfica como se aumentó el WOB incluso en la Unidad C2, para contrarrestar la caída en la ROP característica de formaciones con alto contenido de limolitas. Finalmente, en la Unidad T1 y la Lutita E4 el porcentaje de limolitas incremento, y el WOB se mantuvo y disminuyó respectivamente, lo que se tradujo en una caída de la ROP al final de la corrida.

El pozo CN281 reporta menor porcentaje de limolitas en las formaciones superiores, y su WOB fue el más agresivo de los tres pozos, por lo tanto, la ROP durante su perforación fue la más alta a lo largo de todas las formaciones conservando un comportamiento estable en comparación con los otros dos pozos.

6.4.5 Gráfico Torque vs Formación

Gráfica 11. Torque vs Formación



El torque es un parámetro muy importante durante la perforación ya que está directamente relacionado con la rotación eficiente de la sarta, los torques erráticos normalmente indican algún atrapamiento de la sarta por mala limpieza en el pozo, mientras que un pico súbito puede ser un indicador clave de una pega. En el gráfico podemos ver cómo este parámetro aumenta a medida que se va perforando, esto se debe a que el arrastre también aumenta a medida que más tubería entra en contacto con la formación.

Durante la perforación del pozo C216 las primeras formaciones presentan valores de torque relativamente bajos, incluso después del KOP el comportamiento del torque permanece bajo; esto se debe a que el máximo valor de DLS es de 2.03°/100ft, además el giro máximo reportado en el survey no supera los 3.35°; por lo tanto, el pozo se puede clasificar como poco tortuoso y se puede determinar que su calidad del hueco es buena. En un análisis más puntual, se puede atribuir el aumento del torque en la Unidad C2, a la dureza superior característica de la unidad compuesta por limolitas que se mantuvo hasta el final de la corrida.

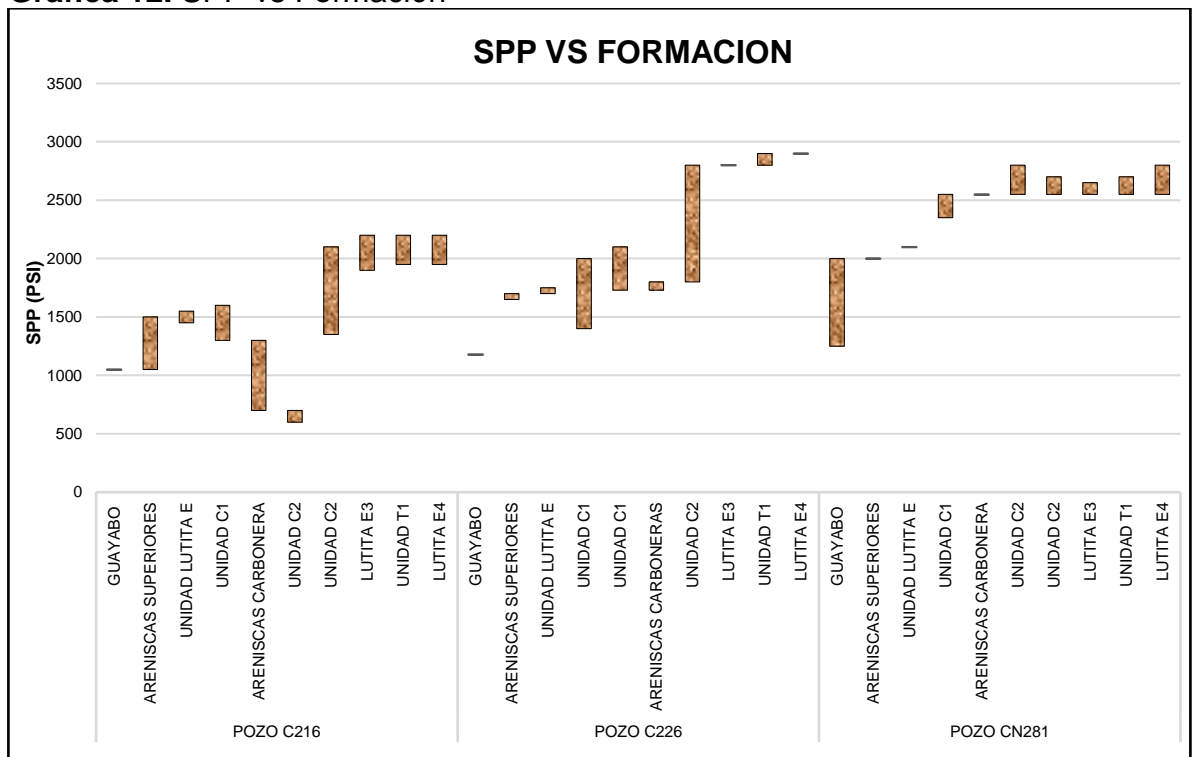
En el pozo C226 hubo un incremento en el torque desde la Unidad C2 que se mantuvo hasta el fin de la corrida, causada por el mayor porcentaje de limolitas en esas formaciones, y como respuesta al aumento de WOB aplicado por el equipo de perforación. A su vez el aumento en el trabajo de construcción de ángulo durante la

corrida del BHA #2 y la inclinación final de 46.96° provocan un aumento en la superficie de contacto con la formación, y por lo tanto un aumento en el torque de las formaciones atravesadas usando este BHA.

Finalmente, el torque durante la perforación del pozo CN281 registra los valores más altos de los tres pozos, en parte por el manejo de WOB más elevado; pero más importante esto se debe al uso de una camisa más grande para el motor de fondo. Al tener una camisa de 11 7/8", se reduce el espacio anular entre la camisa y la formación y por lo tanto es más probable que se arrastre contra las paredes del pozo y aumente el torque registrado.

6.4.6 Gráfico Presión vs Formación

Gráfica 12. SPP vs Formación



El Stand Pipe Pressure es la presión tomada a la entrada del pozo, es decir la máxima presión impartida por las bombas hacia el fondo, a medida que la perforación se hace más profunda, la presión necesaria para mover la columna de lodo es mayor; por esta razón se muestra en la gráfica que los datos de presión presentan una tendencia incremental hacia las formaciones más profundas.

En un análisis más exhaustivo del pozo C216 se registró un comportamiento normal de la presión hasta entrar a la unidad de Areniscas Carbonera, donde se ve una caída en este parámetro causada por una pérdida de fluido durante la perforación de 220 bph, la presión mantuvo baja hasta entrar a la Unidad C2 y bombear una píldora de LCM. Durante la corrida con el BHA #2 se aumentó la presión y en general

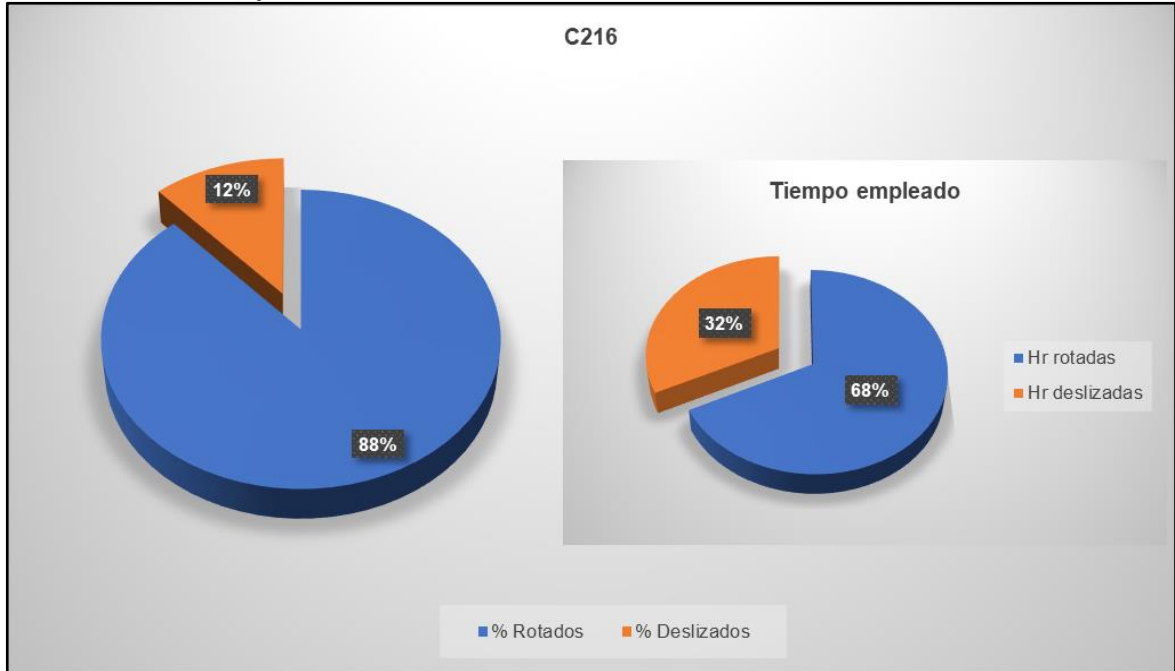
los parámetros de perforación para mejorar la ROP con resultados favorables, sin embargo, un problema con el funcionamiento de la bomba #1 provocó una caída de 300 psi en la presión durante un viaje corto a 3494'. El resto de la corrida se llevó a cabo sin mayores incidentes.

Durante la perforación del pozo C226 se registraron rangos de presión más elevados que en el pozo C216, atribuible al mayor WOB promedio aplicado a lo largo de la perforación; no obstante, durante la perforación de la Unidad C1 se presentó un aumento anómalo de la presión que se normalizó levantando la sarta y circulando. Mas adelante el caudal se reduce y la presión decae al entrar a la formación de Areniscas Carbonera, esto con el fin de evitar pérdidas de circulación. A 3804' en la Unidad C2 se observó una caída de presión de 400 psi originada por problemas de operación relacionados a la bomba #1 y se decidió proseguir la perforación con 2 bombas. El resto de la corrida transcurrió con un control eficiente de la presión.

La corrida del Pozo CN281 registro los mayores rangos de presión acorde con los mayores rangos de WOB de los tres pozos perforados con calibre extendido de 6", sin embargo, los rangos tienen poca variación, lo cual indica un buen control de la presión y una corrida sin anomalías. Solo durante la perforación de la Lutita E3 se redujo el caudal con el fin de contrarrestar la tendencia direccional de la formación.

6.4.7 Gráficos del Trabajo direccional. Si bien el trabajo direccional es muy importante porque permite maniobrar la broca para llegar al objetivo propuesto por el área de yacimientos en el plan de explotación; se procura que el porcentaje deslizado en la corrida sea mínimo, no solo para evitar una reducción significativa en la ROP del pozo, sino también para disminuir la posibilidad de aparición de doglegs demasiado altos. En consecuencia, la proporción de deslizamiento a lo largo de la corrida es vital para la evaluación de desempeño de una broca. A continuación, se realiza el análisis del trabajo direccional requerido en cada uno de los pozos para finalizar la fase de 12 ¼" en el campo castilla

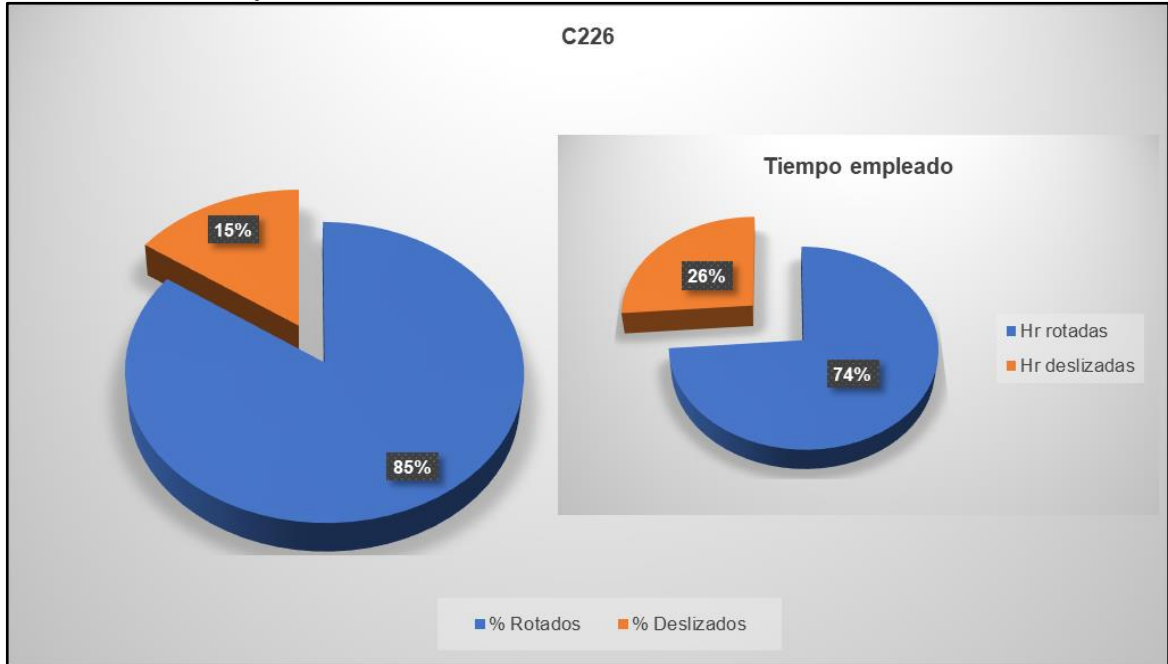
Grafica 13. Trabajo direccional Castilla 216



Como se observa en la gráfica anterior en el pozo C216 fue en el cual se realizó en menor proporción la operación de deslizamiento de las herramientas de fondo, posiblemente por la precaución de implementar un nuevo diseño; adicionalmente las distintas unidades litológicas permitieron un desarrollo normal de la perforación, acorde con la óptima combinación de parámetros de perforación seleccionados para este pozo. Cabe resaltar que en este pozo el KOP fue somero, lo cual amplió el rango para llegar a la inclinación final; esto conlleva a un rango de trabajo direccional menor en cada una de las paradas.

Por otro lado, el tiempo deslizando fue mayor ya que fue necesario incrementar el ángulo de inclinación constantemente, pero a una razón de $^{\circ}/100\text{ft}$ muy baja, el cual tuvo una implicación significativa, ya que, al mantener control direccional durante toda la corrida de la fase de $12 \frac{1}{4}''$, la tasa de penetración se vio reducida; esto permitió que la trayectoria del pozo mantuviera su rumbo y que el grado de tortuosidad se mantuviese bajo desde el inicio de la perforación.

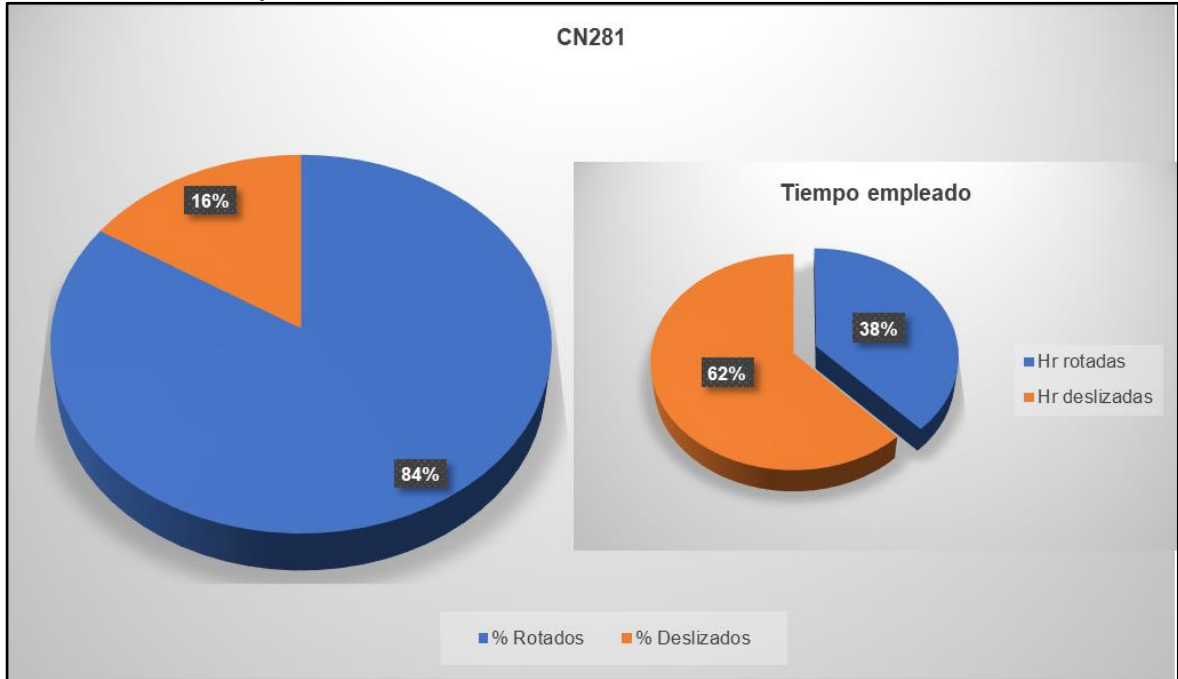
Grafica 14. Trabajo direccional Castilla 226



En el caso del pozo C226 tras adquirir experiencia con el nuevo diseño de broca con calibre de 6", se planteó el objetivo de optimizar tanto el tiempo como los parámetros de perforación. En primera medida en este pozo el KOP fue planeado a una mayor profundidad que el pozo C216; lo cual indicaba que el trabajo direccional necesario para llegar al ángulo de inclinación predeterminado necesitaba ser mayor en cada una de las paradas; esto se evidencia en el ligero incremento del porcentaje que se deslizo en este pozo. No obstante, se mantiene cierta proporción ya que la inclinación final de este era menor que en el anterior pozo.

Por otro lado, gracias a que el trabajo direccional fue más agresivo, la tasa de construcción de ángulo fue elevada, lo que implica que se emplea menos tiempo para alcanzar la inclinación deseada; por lo tanto, se dice que el tiempo fue optimizado, lo que, tras analizar el ahorro global de tiempo, generara un ahorro de recursos económicos.

Grafica 15. Trabajo direccional Castilla Norte 281



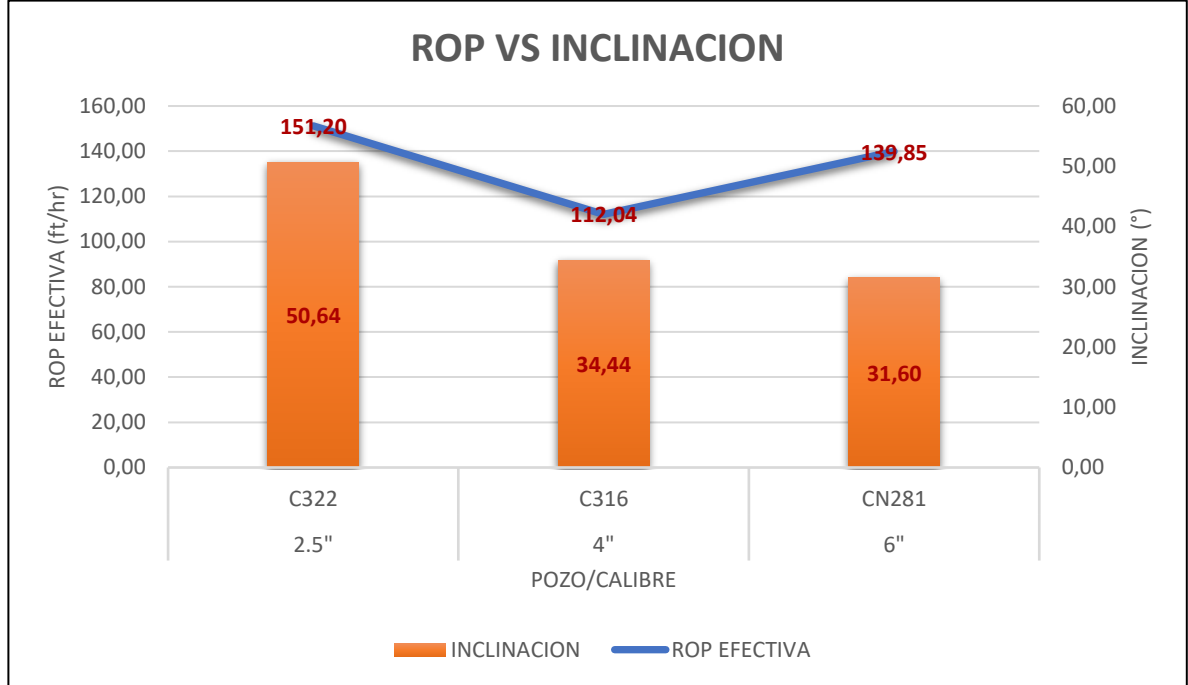
En el pozo CN281 se presentaron situaciones contrarias a lo que indica la teoría, el KOP más profundo se encontraba en este pozo, sin embargo, el ángulo final de inclinación era mucho menor que los otros dos. Lo que indica que tendría un comportamiento similar a los demás siempre y cuando se mantengan las proporciones de $^{\circ}/100$ ft, punto de KOP e inclinación final. Se evidencia que el trabajo direccional fue mucho más agresivo en comparación con los demás pozos, a pesar de ello el porcentaje de deslizamiento fue mayor; posiblemente por la tendencia a girar a la derecha de la Lutita E3. Además, teniendo en cuenta que el espesor destinado para llegar a la inclinación final era menor era necesario deslizar mayor porcentaje de cada parada.

Por otro lado, el tiempo también se vio afectado dado que fue necesario deslizar las herramientas de fondo durante mucho más tiempo del que se empleó rotando la sarta. Cabe resaltar que al deslizar se debe mantener control de los múltiples parámetros de perforación tanto para guiar al pozo a las coordenadas de fondo deseadas como para mantener la integridad del pozo estable.

6.4.8 Gráfico ROP efectivas vs KOP

Teniendo en cuenta que no todos los pozos tienen el mismo perfil direccional, es necesario hacer un análisis de las afectaciones causadas en el desempeño de la broca

Grafica 16. ROP efectiva vs KOP



En la **Grafica 16** se muestra como la diferencia en los perfiles direccionales de cada pozo y más específicamente la variación en el KOP, tiene una relación directa con el desempeño de la broca. Como se explicó en el numeral anterior, los pozos con KOP más profundo deben realizar mayor trabajo direccional que los de KOP somero para alcanzar la inclinación final del plan direccional, sin embargo, los de KOP profundo no deben limitar su ROP en las formaciones superiores, por lo cual su desempeño se ve favorecido. Como lo expone la gráfica, los tres pozos fueron perforados con profundidades de KOP crecientes, y así mismo el desempeño de la broca mejoró proporcionalmente. En contraste, cuando el pozo CN281 llegó al KOP, su ROP decayó abruptamente, para poder suplir los requerimientos direccionales dispuestos en el plan de perforación

7. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CORRIDA DE LA BROCA CON CALIBRE DE 6" CON LAS CORRIDAS DE LAS BROCAS ANTERIORMENTE IMPLEMENTADAS

En este capítulo se comparan de forma cuantitativa los resultados obtenidos tras la corrida de los pozos con calibres de 2.5", 4" y de 6".

Para llevar a cabo la comparación, se cotejan los tiempos operacionales de cada pozo individualmente, haciendo énfasis en los tiempos de viaje; además, se debe hacer un análisis de los valores de ROP efectiva para evaluar el desempeño de cada diseño. Posteriormente los tiempos de viaje son comparados entre los pozos perforados con los diseños anteriores y los perforados con el nuevo diseño; esto con el propósito de evaluar los efectos de la implementación de una broca con gauge pad más largo, que finalmente es el objetivo de este proyecto de grado. En este análisis no se tomaron en cuenta los resultados obtenidos en el pozo C361 ya que este fue perforado con sistema RSS afectando significativamente el desempeño de la broca en este pozo.

Como se afirmó en el capítulo anterior es importante recalcar que no todos los pozos tienen el mismo perfil direccional, y estas diferencias en especificaciones como el KOP y el ángulo final de inclinación pueden afectar seriamente el desempeño de la broca y por ende en los tiempos totales de perforación. Por lo tanto, para tener una comparación significativa se conformaron dos grupos de evaluación que someten a comparación pozos con KOP similares. Sin embargo, se presenta una compilación de todos los pozos en estudio en la **Tabla 19**.

Tabla 19. Compilación de las características de los pozos en estudio

CARACATERISTICA	C322	C342	C361	C217	C316	C471	C216	C226	CN281
HERRAMIENTA DIRECCIONAL	DHM	DHM	RSS	DHM	DHM	DHM	DHM	DHM	DHM
FOOTAGE	5903	5911	5856	5750	5668	5551	6316	5679	5906
FT DESLIZADOS	1117	602	0	1196	1202	839	725	862	938
FT ROTADOS	4786	5309	5856	4554	4470	4712	5501	4817	4967
KOP	4249	1472	3522	1145	5200	700	280	2945	5190
INCLINACION	50.64°	48.65°	40.65°	34,18	34,44	28,59	55,17	46,96	31,6
ROP DESLIZANDO	71	35,41	0	41,94	41,29	44,82	37	74,37	35,85
ROP ROTANDO	205	192,1	230,4	183,2	234,5	224,6	133,3	148	309,1
ROP EFECTIVA	151,2	132,4	230,4	107,7	117,8	139,8	102,3	128,7	140,12
ROP TOTAL	80,9	77,78	95,22	65,34	74,09	70,71	63,53	70,55	79,28

El grupo de pozos con KOP somero está conformado de la siguiente manera:

Tabla 20. Pozos con KOP Someros.

Pozo	Footage (ft)	Inclinación inicial/final (°)		KOP (ft) y Formación	
C342	5911	0.51	48.65	1472	Areniscas Superiores
C471	5551	3.15	28.59	700	Guayabo
C217	5750	0.68	34.18	1145	Areniscas Superiores
C216	6316	4.13	55.17	480	Guayabo
C226	5679	5.06	46.96	2945	Unidad C1

Aunque el pozo C226 cuenta con un KOP medianamente profundo, fue incluido en el análisis de los pozos someros porque el comportamiento de su desempeño se ajusta más al de los pozos someros y por lo tanto es más aplicable en esta comparación.

El grupo de pozos con KOP profundo está conformado de la siguiente manera:

Tabla 21. Pozos con KOP Profundos.

Pozo	Footage (ft)	Inclinación inicial/final (°)		KOP (ft) y Formación	
C322	5903	0.2	50.64	4249	Unidad C2
C316	5668	3.14	34.44	5200	Unidad C2
CN281	5906	5.18	31.6	5190	Unidad C2

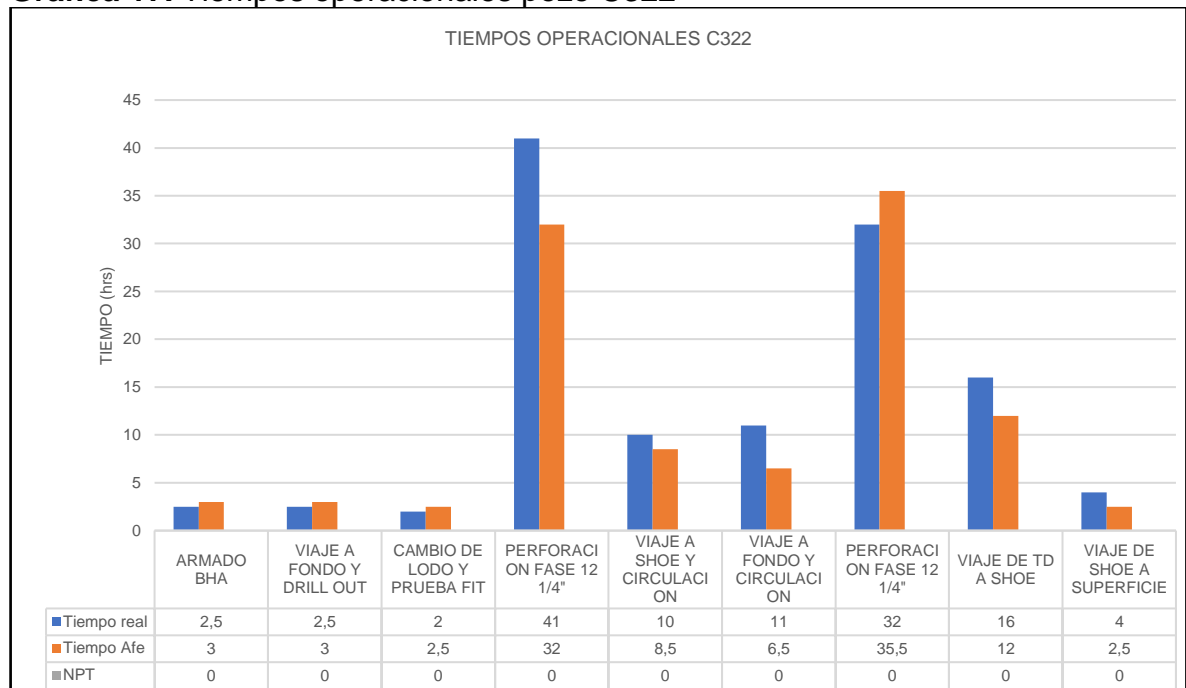
7.1 TIEMPOS OPERACIONALES DE LOS POZOS CON BROCA DE CALIBRE 2.5"

En esta sección se analizan los tiempos empleados para cada una de las operaciones planeadas y no planeadas que ocurrieron durante la perforación de los pozos C322 y C342; en este caso el último pozo el C361 no fue incluido en el análisis, dado que cuenta con un sistema direccional rotatorio, lo cual es una ventaja frente a los pozos donde se empleó motor de fondo. Adicionalmente se enuncian los efectos generados por los tiempos no productivos y que implicación económica pudo ocasionar.

A continuación, se entra en detalle de cada una de las operaciones que se realizaron en campo para perforar la sección 12 ¼" de los pozos antes mencionados.

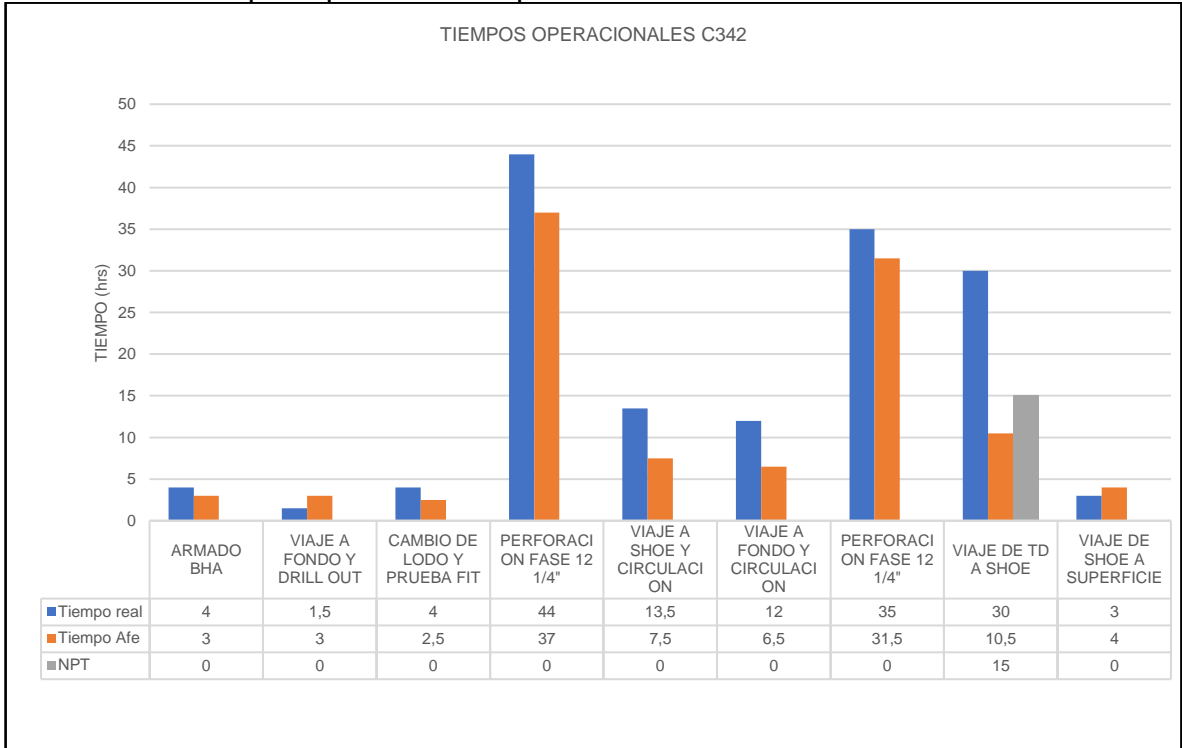
7.1.1 Pozo C322. Los datos del primer pozo indican que las actividades preliminares a la perforación tomaron menos tiempo del establecido en el programa de perforación, una vez se inicia la perforación de la sección de 12 ¼” se evidencia que se destinó más tiempo del planeado en casi todas las operaciones, lo que posiblemente sea atribuido a que las distintas unidades litológicas en conjunto con los parámetros de perforación no mantuvieron la sinergia necesaria, y de esta manera se generó un grado de tortuosidad alto, es decir el pozo se movió de su propio eje. Esto se evidencia en que en tres de los cuatro viajes se destinara más tiempo del planeado; únicamente en las actividades preliminares se logró un ligero ahorro de tiempo, sin embargo, no fue suficiente para subsanar todo el gasto extra de los demás viajes. En la **Grafica 17** se puede observar en detalle el tiempo que se empleó en realidad con respecto al AFE.

Grafica 17. Tiempos operacionales pozo C322



7.1.2 Pozo C342. El pozo C342, tiene un comportamiento similar al anterior, ya que las actividades preliminares a la perforación de la fase de 12 ¼” se lograron culminar incluso antes de los pensado. Al iniciar la perforación se evidencia que se destina más tiempo para perforar las formaciones iniciales, caso contrario que en la segunda sección. Sin embargo, los viajes no fueron favorables ya que en trayectos al zapato o hacia superficie los tiempos destinados fueron mayores, lo que indica que el hueco quedo con un grado de tortuosidad significativo, representando un obstáculo para la sarta de perforación. En la **Grafica 18** se puede observar en detalle el tiempo que se empleó en realidad con respecto al AFE.

Grafica 18. Tiempos operacionales pozo C342

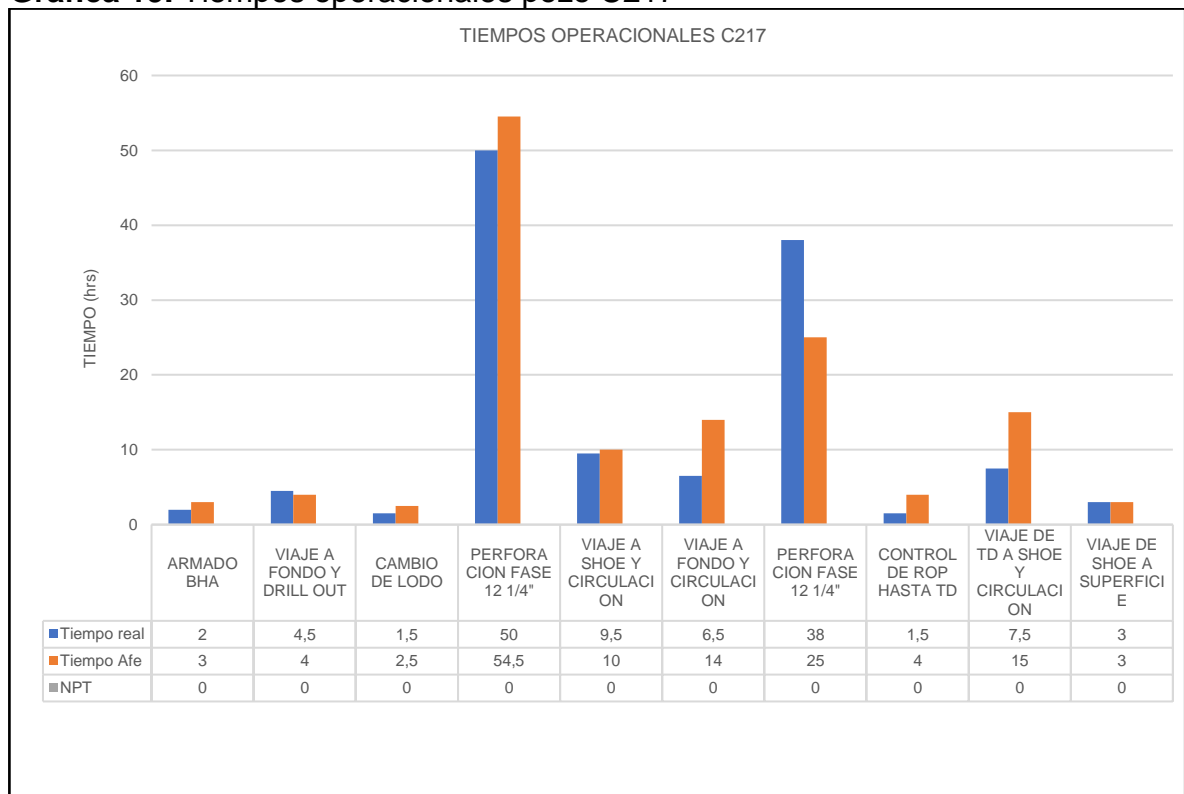


7.2 TIEMPOS OPERACIONALES DE LOS POZOS CON BROCA DE CALIBRE 4"

Al implementar una broca con calibre 1.5" más extenso, el comportamiento esperado sería que el grado de tortuosidad sea reducido parcialmente ya que opone cierta resistencia al efecto del motor de fondo; esto se convierte en un movimiento más restringido lo que concentra la energía en el centro de la broca y no en su diámetro, siendo esta la causa de incrementar el grado de tortuosidad del pozo.

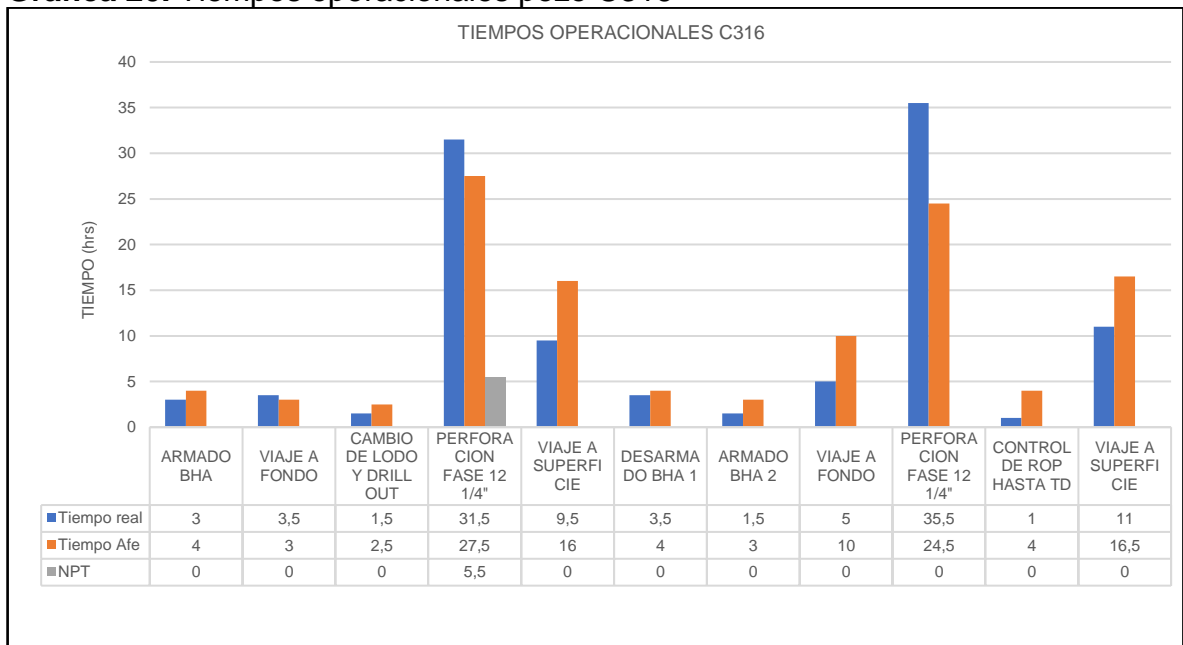
7.2.1 Pozo C217. En el caso del pozo C217, se observa que durante el primer viaje a fondo se presentó algún tipo de restricción, por lo cual se empleó más tiempo del planeado; cabe resaltar que dicho viaje es la resultante de la fase anterior, ya que no solo se perforo, sino que existieron más actividades implicadas. Una vez se culmina la perforación de la primera sección se inicia el viaje al zapato y posteriormente nuevamente a fondo. En estos viajes se corrobora la teoría del calibre extendido, ya que el tiempo empleado fue menor al planeado, lo que indica que el grado de tortuosidad fue menor y permito a la sarta subir sin mayores restricciones. Este mismo comportamiento se evidencia en el viaje de TD hasta el zapato, por consiguiente, la sección conservo el diámetro de la broca; por último, el viaje final que iba desde el zapato hasta superficie se sale de la tendencia teórica; sin embargo, como bajando las herramientas de fondo se presentó el mismo fenómeno, se le puede atribuir a cierto grado de tortuosidad en la fase anterior. En la **Grafica 19** se puede observar en detalle el tiempo que se empleó en realidad con respecto al AFE.

Grafica 19. Tiempos operacionales pozo C217



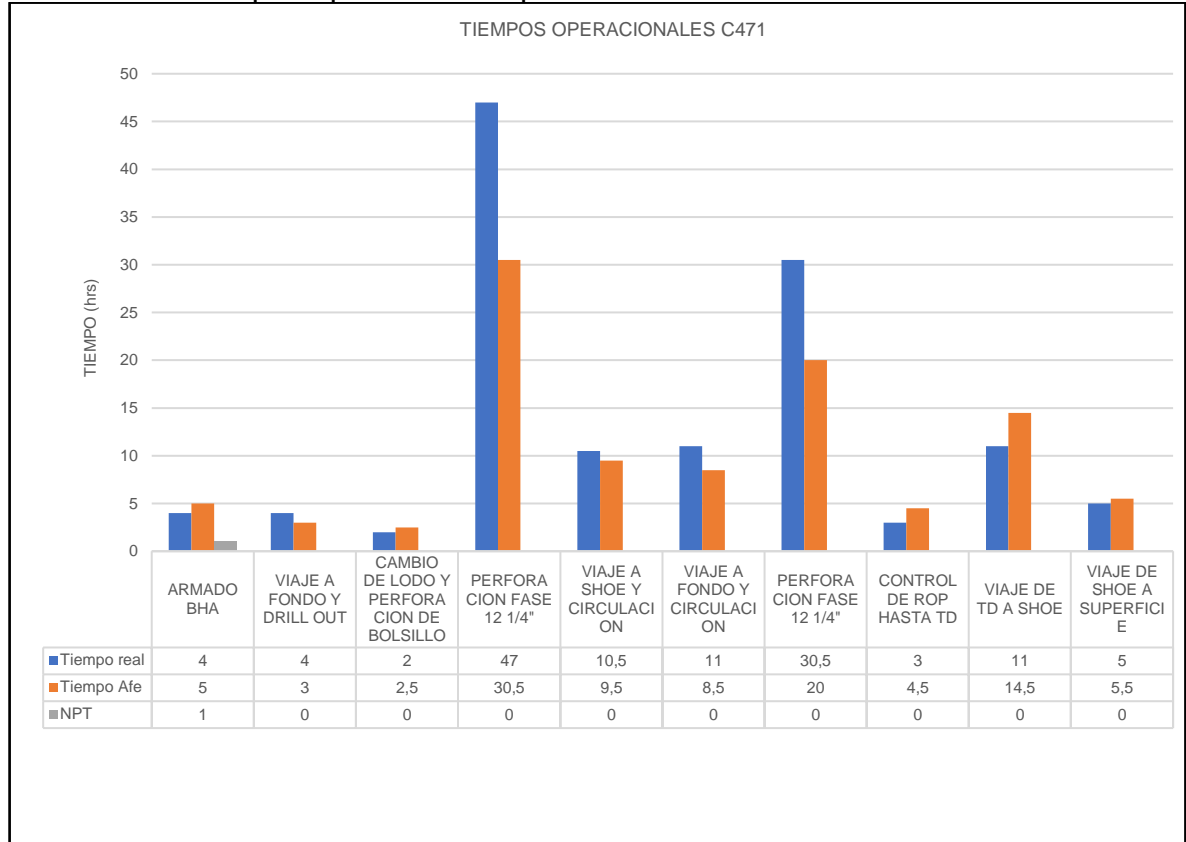
7.2.2 Pozo C316. En este caso el viaje a fondo empleó más tiempo del establecido por el plan direccional, posiblemente al tener mayor precaución con las herramientas de fondo para no impactar con el revestimiento de la sección anterior, dado que este fenómeno no se presentó en el viaje del zapato hasta superficie. Por otro lado, se evidencia que se destinó más tiempo para perforar las unidades litológicas, obviando el hecho de que este pozo tenía un KOP profundo. Este exceso de tiempo perforando, se ve compensado en el ahorro de tiempo en los viajes, ya que todos presentan el comportamiento esperado de ser menor al planeado. En la **Grafica 20** se puede observar en detalle el tiempo que se empleó en realidad con respecto al AFE.

Grafica 20. Tiempos operacionales pozo C316



7.2.3 Pozo C471. En el caso del ultimo pozo donde se implementó la broca con calibre extendió de 4", se evidencia un comportamiento distinto a la teoría, ya que posterior a la perforación de la primera sección la cual también implico más tiempo del establecido por el programa de perforacion, los viajes al zapato y de regreso a fondo requirieron más tiempo del planeado. Una vez se culmina la perforación de la segunda sección, la tendencia se acomoda ligeramente a la teoría, ya que por más tiempo extra que se haya destinado a la perforacion, los viajes se realizaron con mayor velocidad lo que permitió un ahorro en el tiempo y a su vez de recursos económicos. En la **Grafica 21** se puede observar en detalle el tiempo que se empleó en realidad con respecto al AFE.

Grafica 21. Tiempos operacionales pozo C471



7.3 TIEMPOS OPERACIONALES DE LOS POZOS CON BROCA DE CALIBRE 6"

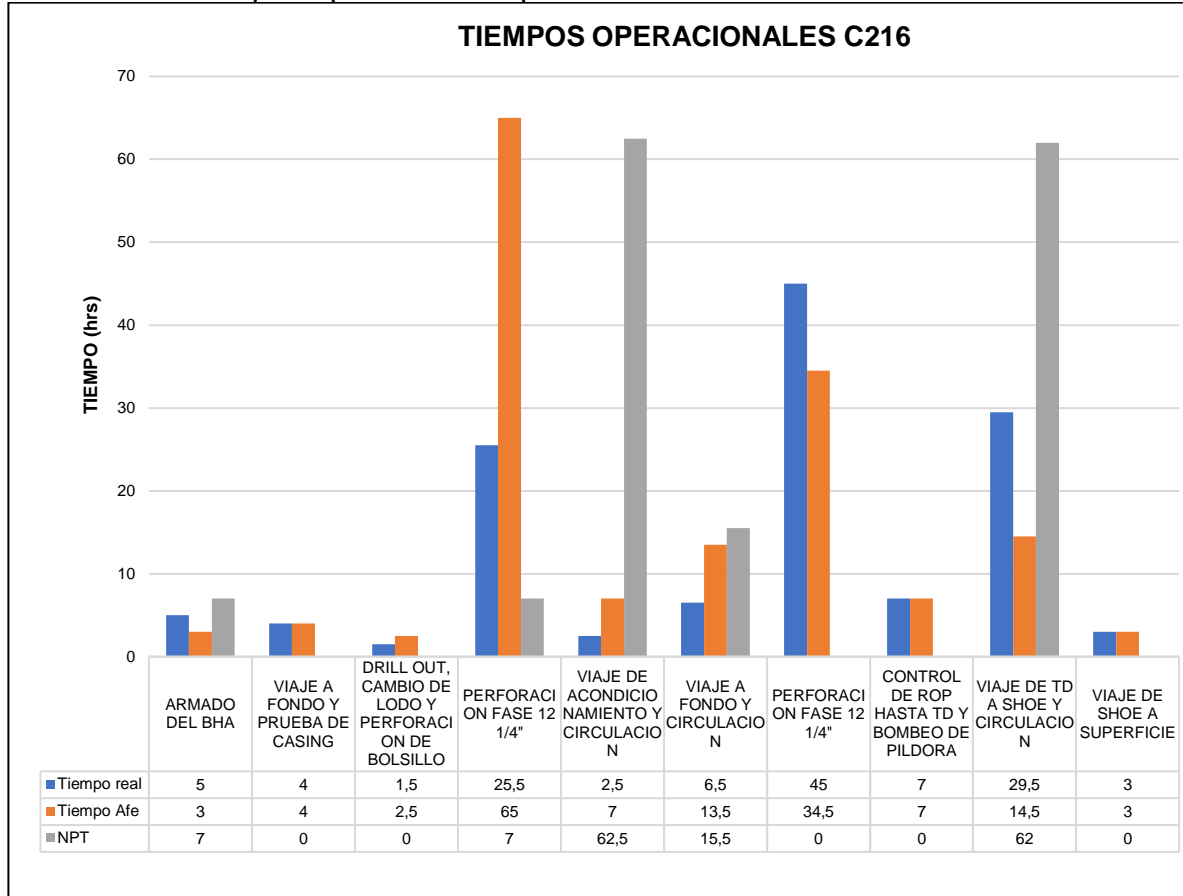
Teóricamente una broca con calibre de mayor longitud mantiene un área mayor en contacto con la formación; consecuentemente se obtiene una mayor estabilidad frente a los diversos esfuerzos del motor y por lo tanto se logra focalizar más eficientemente la energía proveniente de los parámetros de perforación. Esta modificación permite reducir la excentricidad del movimiento característico del BHA y de esta manera mejorar la calidad de hueco a lo largo de la perforación. Se realiza el análisis del nuevo diseño con calibre extendido de 6" en tres pozos del Campo Castilla, donde se evalúa la calidad del hueco mediante el tiempo de los viajes. Cabe resaltar que tanto en el pozo C216 como en el C226 se presentaron problemas operacionales que incrementaron sustancialmente el tiempo final de los viajes; en el primero se presentaron problemas con la reología del lodo, es decir, las características del lodo no removían correctamente los rípios generados por la perforación lo que resultó en un embotamiento de la broca; el segundo pozo tuvo un problema con el motor de fondo, el cual tuvo una ruptura, lo que no permitía transferir toda la potencia hidráulica del lodo a la broca, esto también demora y genera tiempos no productivos.

7.3.1 Pozo C216. En este pozo es pertinente dividir el análisis de los tiempos operacionales en dos secciones. En la primera se toman aquellas actividades que se encontraban contempladas en el AFE del pozo; durante la perforación usando el BHA #1 se alcanzó un ahorro de tiempo del 60% con respecto al AFE, gracias a que las unidades superiores constan de una dureza baja, lo que permite perforar a altas tasas de penetración. En contraste, la perforación usando el BHA #2 terminó con un tiempo real un 23% superior al planeado, a causa del excesivo control direccional aplicado durante la perforación de la Unidad C2, Lutita E3, Unidad T1 y la Lutita E4, esto con el fin de cumplir las especificaciones del plan direccional.

Haciendo referencia al tiempo de los dos viajes posteriores a la perforación con el BHA #1, se alcanzó una reducción del 64% y 56% respectivamente, no obstante, en el viaje final del TD al zapato, se reportó un tiempo 51% mayor al propuesto por el AFE afectada en parte por una restricción mecánica, compuesta por cemento para control de pérdidas, presentada en la formación de Areniscas Carbonera.

El segundo análisis hace alusión a los tiempos no productivos los cuales se presentaron únicamente durante los viajes; de acuerdo con lo discutido en la descripción de la corrida, este pozo presentó un evento de pérdida total del fluido de perforación, el cual tuvo como resultante el embotamiento de la broca y los estabilizadores. Adicionalmente, el lodo no cumplió con una de sus funciones principales, la cual es llevar los ripios generados por la broca a través del espacio anular hasta superficie, por lo que obligó al equipo de perforación a realizar una corrida de reacondicionamiento la cual costó 62.5 horas; adicionalmente, en el viaje a fondo después de cambiar el BHA se reportó una pega por empaquetamiento que significó 15.5 horas, y por último en el viaje del TD al zapato se presentaron dos NPT causados por una restricción mecánica por cemento y por el bombeo de píldoras LCM que generaron un retraso de 62 horas.

Grafica 22. Tiempos operacionales pozo C216



7.3.2 Pozo C226. En el pozo C226 los tiempos reales reportados en casi todas las operaciones fueron menores que los propuestos por el AFE, lo que implica un desarrollo eficiente del plan de perforacion. Asi mismo, los tiempos totales durante la perforacion usando los BHA #1 y #2, en comparación con el AFE, lograron obtener una reducción de tiempo del 20% y 7% respectivamente.

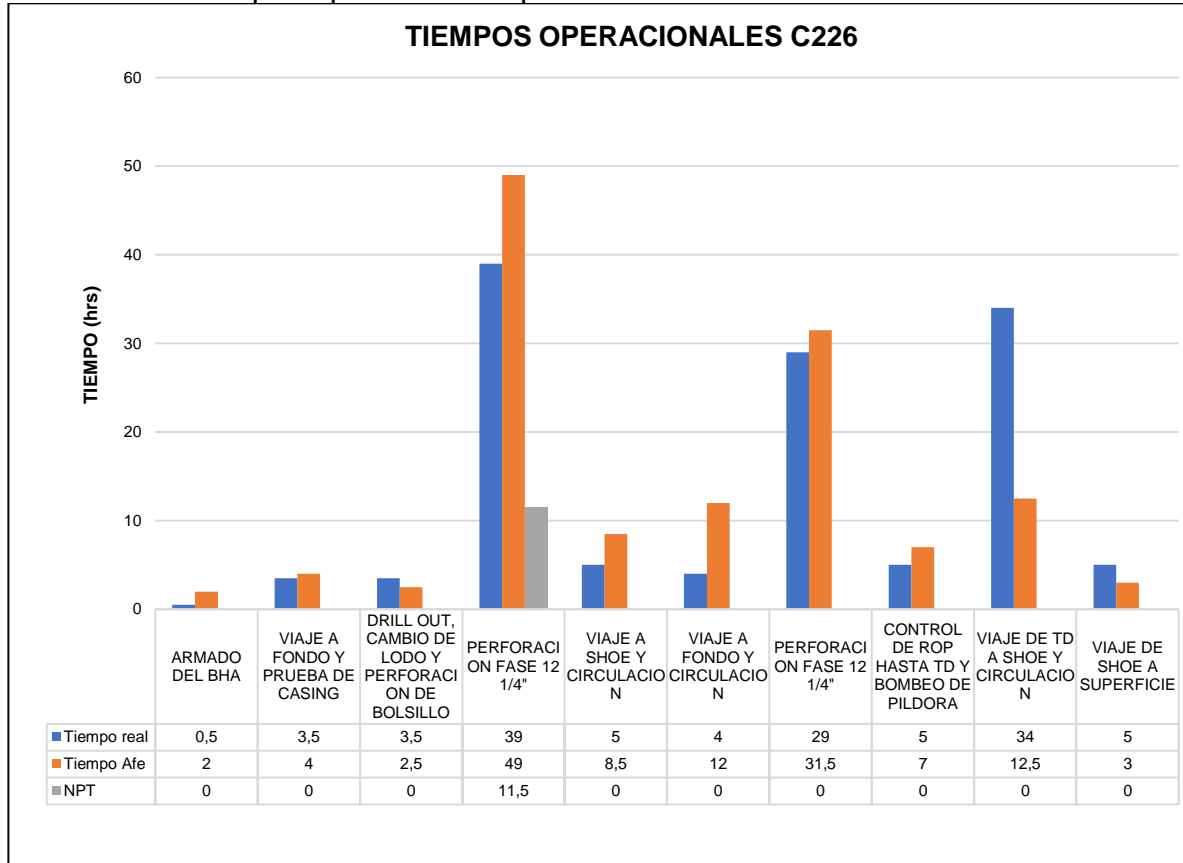
A su vez los viajes después de la perforacion de la primera sección tuvieron resultados positivos con respecto a la disminución de tiempos, sin embargo, en el viaje final, el tiempo real fue mucho mayor que lo esperado debido a los puntos apretados encontrados durante la sección perforada con el BHA #2.

Los tiempos de viaje después de la perforacion de la primera sección alcanzaron una disminución del 41% para el viaje de bajada y del 66% para el de subida, demostrando que el mejoramiento en la calidad de hueco, supero las posibles afectaciones causadas por el washed out del motor durante la corrida.

No obstante, en el viaje de TD a superficie se presentaron puntos apretados, que ocasionaron que el tiempo real fuera un 63% mayor al planeado en consecuencia de los tiempos invertidos en el acondicionamiento. Este aumento en los tiempos es

un indicio de un aumento en la tortuosidad a lo largo del hueco perforado con el BHA #2 atribuible a la aplicación de parámetros más agresivos durante la perforación.

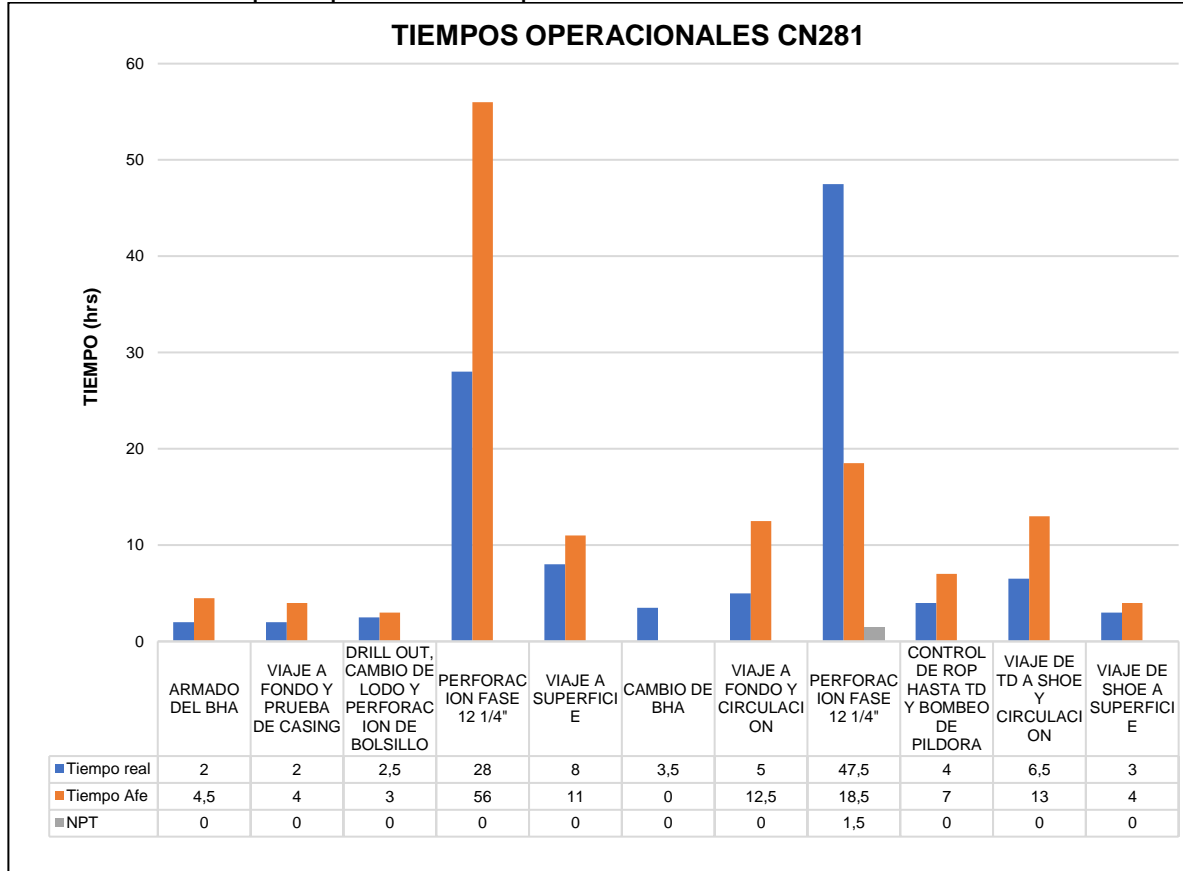
Grafica 23. Tiempos operacionales pozo C226



7.3.3 Pozo CN281. En el último, pozo perforado con la broca con calibre extendido de 6" se puede observar la mejor tendencia de los tres pozos presentes, iniciando con la perforación de la primera sección, el ahorro de tiempo fue del 50% y con una alta eficiencia dado que los tiempos de viaje siguientes se realizaron en menos tiempo del que se encontraba indicado. Por otro lado, en la perforación de la segunda sección se observa que el tiempo que se empleó perforando superó al del AFE hasta en un 60%, a causa del excesivo control direccional aplicado en la Lutita E3.

A pesar de reportar un desempeño inferior durante la perforación con el BHA #2, se puede inferir que la calidad del hueco se mantuvo a lo largo de toda la corrida ya que los viajes finales hasta superficie se realizaron en 50% menos tiempo del previamente establecido.

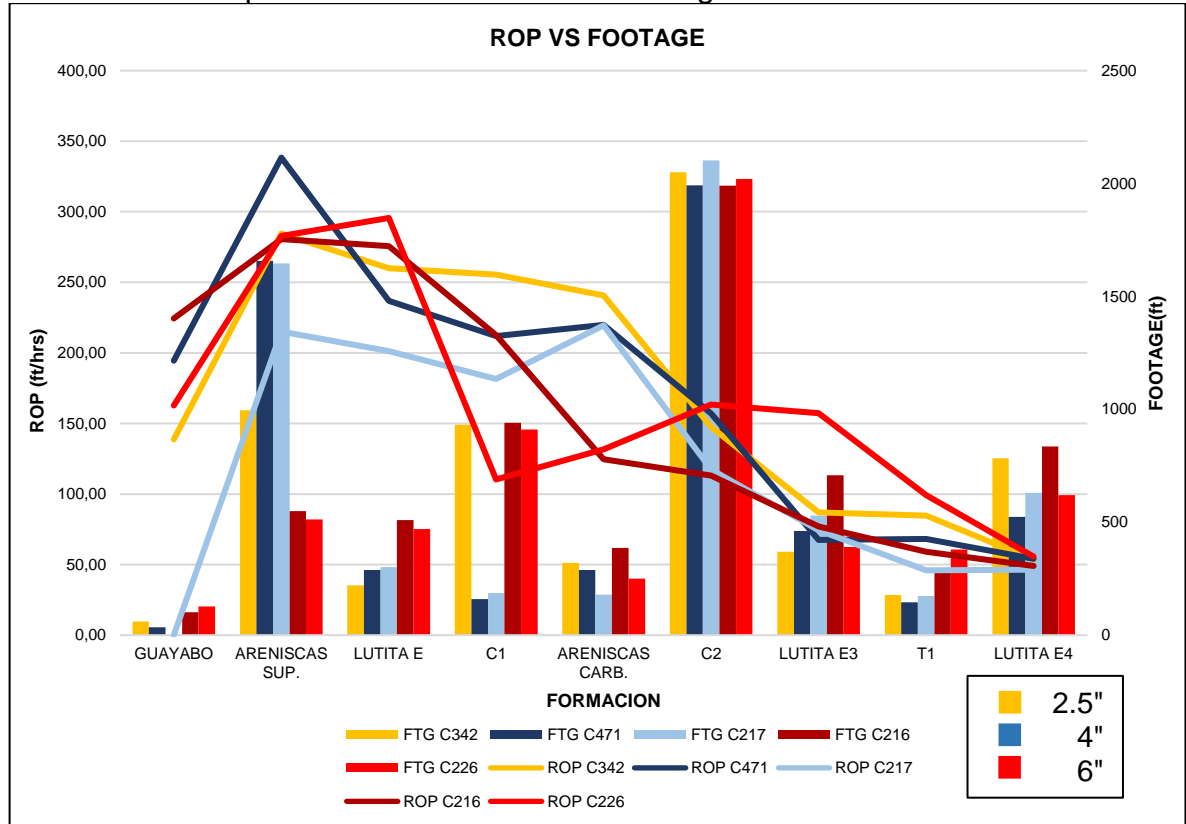
Grafica 24. Tiempos operacionales pozo CN281



7.5 COMPARACION ROP EFECTIVA

7.5.1 ROP efectiva de los pozos con KOP somero

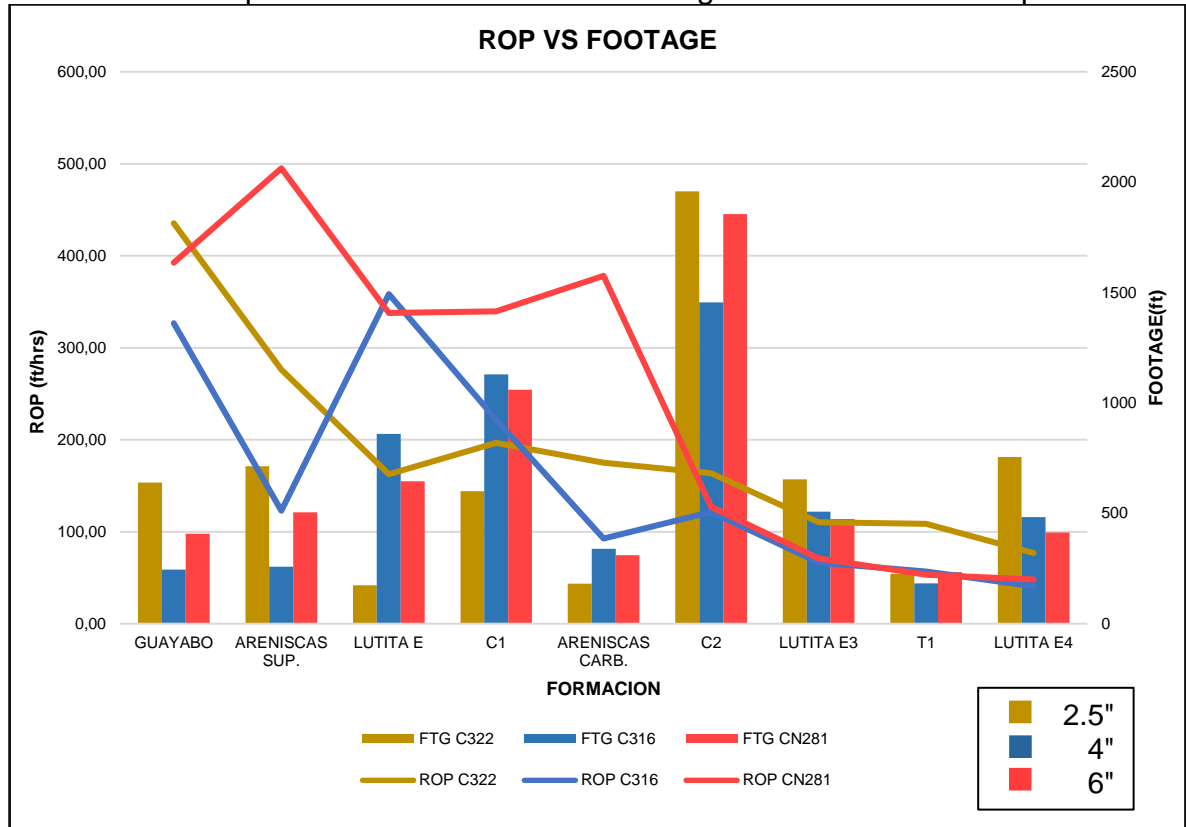
Grafica 25. Comparación ROP efectiva vs Footage en Pozos con KOP somero.



Como se muestra en la **Grafica 25** la ROP efectiva se ve levemente afectada a medida que se aumentan los calibres de la broca; la ROP de las brocas con calibre de 2.5" en color amarillo es un 6,5% mayor que sus contrapartes de 4" de color azul y un 12,1% mayor que la broca con calibre de 6" de color rojo, sin embargo, esta diferencia no se puede atribuir enteramente al desempeño de la broca; los eventos ocurridos durante la perforación de los pozos con calibre de 6" como la pérdida de fluidos de perforación y el daño en herramientas direccionales, afectaron significativamente los resultados de la ROP durante la corrida. También se debe resaltar la diferencia en el comportamiento de la ROP del pozo C226 que posiblemente fue afectado por la diferencia en la profundidad del KOP a los de los KOP más someros.

7.5.2 ROP efectiva de los pozos con KOP profundo

Grafica 26. Comparación ROP efectiva vs Footage en Pozos con KOP profundo.

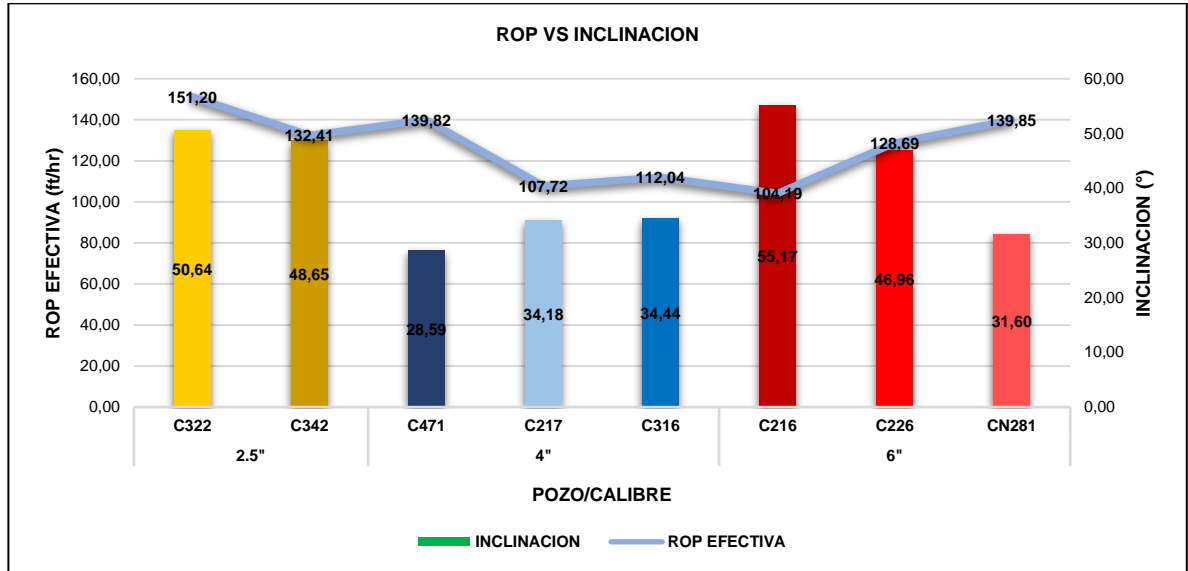


De la **Grafica 26** se debe resaltar que, en las formaciones como Guayabo, Areniscas Superiores, Lutita E, Unidad C1 y Areniscas Carbonera no se muestra una tendencia definida en el comportamiento de la ROP como si se muestra en la gráfica de los pozos con KOP someros, debido a que estas formaciones fueron perforadas con altos parámetros. En contraste la ROP obtenida desde la Unidad C2 en adelante muestra una tendencia similar en los tres pozos, con una diferencia de desempeño entre el pozo perforado con la broca con calibre de 2.5" y el de 4" del 37,2%, y con el de 6" del 28%. La diferencia en desempeño de esta sección es atribuible a la mayor maniobrabilidad de la broca con calibre de 2.5" por lo que se puede realizar el trabajo direccional con ROP más alta. Aunque el desempeño a lo largo de la sección de construcción fue mucho mayor usando la broca con calibre de 2.5", su superioridad a lo largo de toda la corrida no es tan significativa; el calibre de la broca estándar obtuvo una ROP 25.9% por encima a la broca con calibre de 4" y un 7,5% contrastándola con la broca de 6", por lo tanto, se puede afirmar que en la broca con calibre de 6" logró mejorar el potencial de ROP para los diseños de calibres extendidos. Se debe destacar que la ROP de los pozos con KOP profundos es mucho mayor que la de los pozos con KOP someros antes de llegar al KOP en la Unidad C2; pero desde la Unidad C2 en adelante los desempeños se invierten, y son la ROP de los pozos con KOP someros las más altas. En general, el pozo con

mejor desempeño durante la perforación de la fase fue el CN281 generando un ahorro de tiempo del 50% al planeado en el AFE.

7.5.3 ROP efectiva vs Inclinación en cada calibre

Grafica 27. ROP efectiva vs Inclinación en cada calibre



Para tener una comparación acertada del desempeño de los pozos, es necesario tener en cuenta la inclinación final del pozo como una característica direccional que puede afectar significativamente el desempeño durante la perforación; como se muestra en la **Grafica 27**, el calibre de 4" presenta una disminución significativa del 15% de la ROP efectiva a pesar de que su plan direccional planteaba ángulos finales un 35% menores en promedio a comparación del calibre de 2.5".

En cambio, en el caso de 6" se muestra que su inclinación promedio solo presenta una diferencia del 10% en comparación con los de 2.5" y que su ROP solo presenta una reducción en promedio del 12%. Analizando más específicamente cada calibre se ve que en los calibres de 2.5" y de 4" no se presenta una tendencia definida de comportamiento entre inclinación y ROP efectiva; sin embargo, en el calibre de 6" si se nota relación inversamente proporcional entre la inclinación y la ROP.

Por otro lado, al evaluar los resultados obtenidos entre los pozos C342 y C226 que presentan las inclinaciones finales más cercanas entre si además de una semejanza en sus KOP, se puede concluir que la afectación causada por la implementación de brocas con calibre extendido en pozos con planes direccionales similares es poco significativa.

Así mismo al comparar el pozo CN281 con los pozos perforados con calibre de 4", se muestran incluso una mayor inclinación en el pozo con calibre de 6", el cual presenta un mejor desempeño que cualquiera de los pozos.

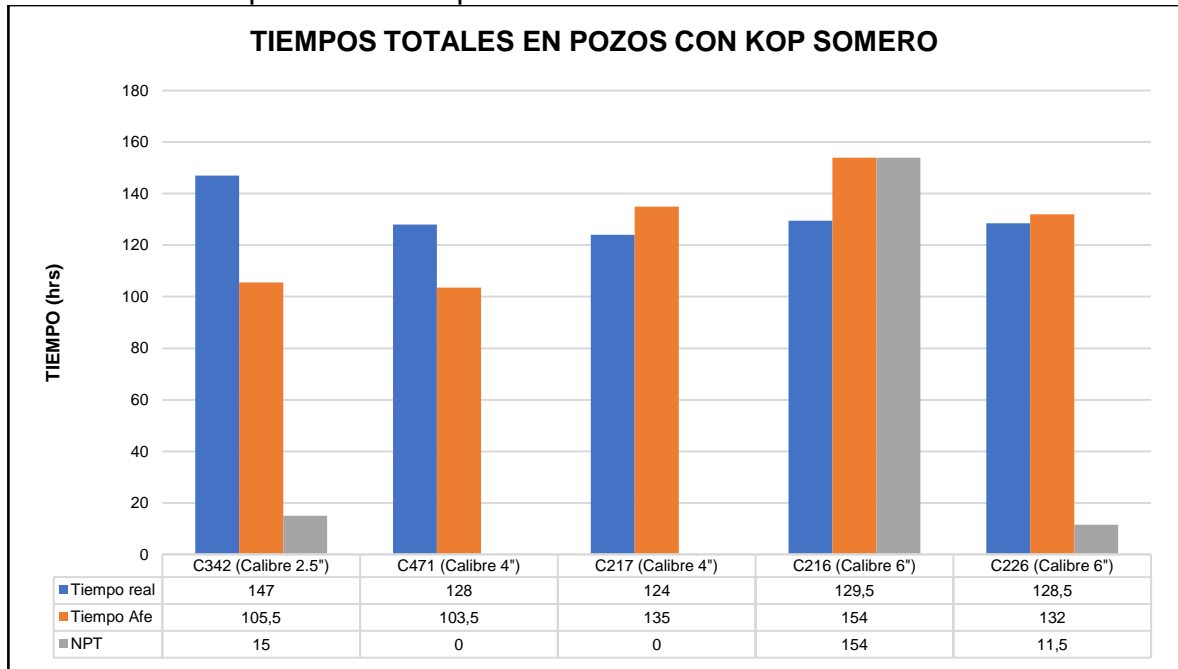
7.6 COMPARACION TIEMPOS TOTALES Y TIEMPO DE VIAJE

A continuación, se presenta la comparación de tiempos totales y tiempos de viaje de los pozos agrupados por KOP similares. Es importante aclarar que los pozos donde se implementaron brocas con calibre de 4" presentan una diferencia de aproximadamente 400' menos de espesor en la fase de estudio y por lo tanto, sus resultados en tiempos totales y de viajes se ven favorecidos en comparación con las brocas de los otros diseños.

7.6.1 Pozos con KOP Somero

➤ **Tiempos Totales.** En la **Grafica 28** se muestra la comparación de los tiempos de totales obtenidos tras la implementación de las brocas con diferentes calibres, en los pozos con KOP somero.

Grafica 28. Tiempos totales en pozos con KOP somero.



En la gráfica se puede ver que la implementación de brocas con calibre extendido de 6" está directamente ligada a una disminución en los tiempos totales con respecto a su plan de perforación propuesto.

En el caso de las brocas con calibre de 4" se puede ver que el pozo C471 obtuvo un tiempo total 19% mayor que el propuesto mientras que el C217 logró generar una reducción en tiempo total del 8% con respecto al AFE. En cambio, en las brocas con calibre de 6", el pozo C216 alcanzó una reducción del 16% y el pozo C226 presentó una mejoría del 2% con respecto al tiempo estipulado en el AFE. De esto se puede concluir que los tiempos totales obtenidos tras la corrida en pozos con

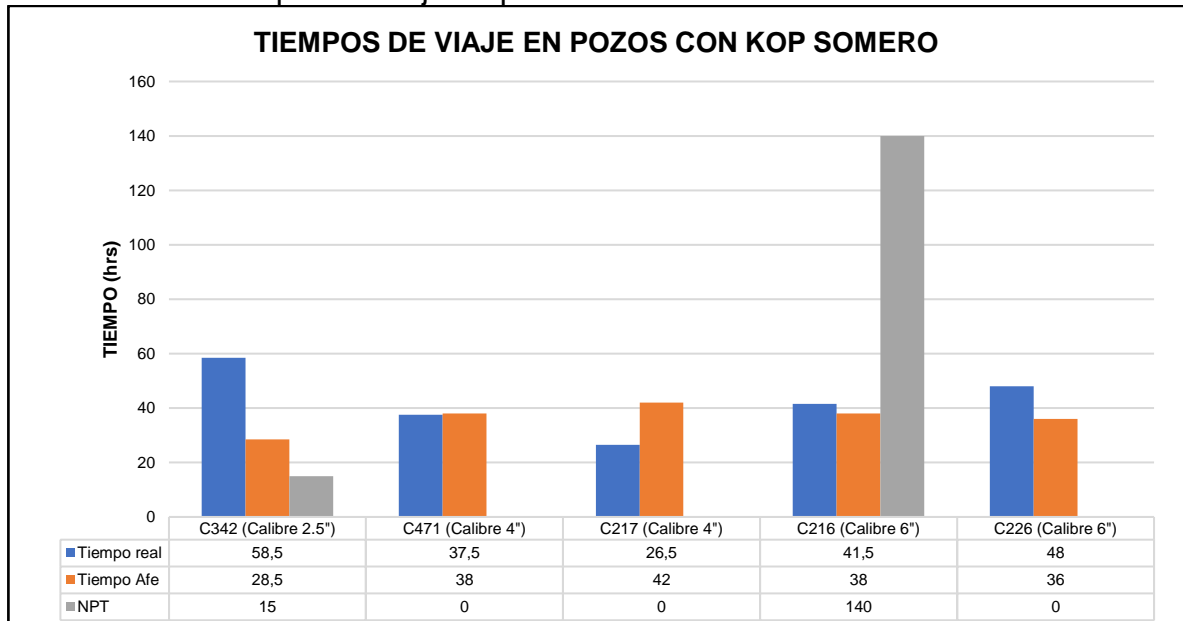
KOP somero se vieron beneficiados de la implementación de las brocas con calibre de 6”

Por otro lado, al realizar el análisis de los eventos ocurridos en el pozo C216 se puede concluir, que el aumento en los NPT’s del pozo fue ocasionado por demoras durante la perforación y los viajes, ajenas al desempeño de la broca, para remediar una pérdida total de fluido de perforación. Para el pozo C226 los NPT’s fueron ocasionados por una falla en el motor de fondo a la profundidad de 2800’ que afectó negativamente la ROP durante la perforación de la Unidad C1, y obligo a sacar el BHA hasta superficie para efectuar el cambio de motor. Adicionalmente, se presentaron fallas para mantener presión en una de las bombas, causando demoras en la operación y por último el excesivo control de ROP ordenado por el equipo de geología durante el final de la sección para definir el TD, conllevó a un aumento significativo en el tiempo total de perforación.

Es importante considerar que a pesar de que la reducción en el tiempo total no fue significativa; la ROP efectiva del pozo es la segunda mejor reportada del Cluster 94, por lo tanto, es apresurado afirmar que el desempeño de la broca con calibre de 6” corrida en este pozo no fue satisfactorio.

➤ **Tiempos de viaje.** En la **Grafica 29** se muestra la comparación de los tiempos de viaje obtenidos tras la implementación de las brocas con diferentes calibres, en los pozos con KOP somero.

Grafica 29. Tiempos de viaje en pozos con KOP somero.



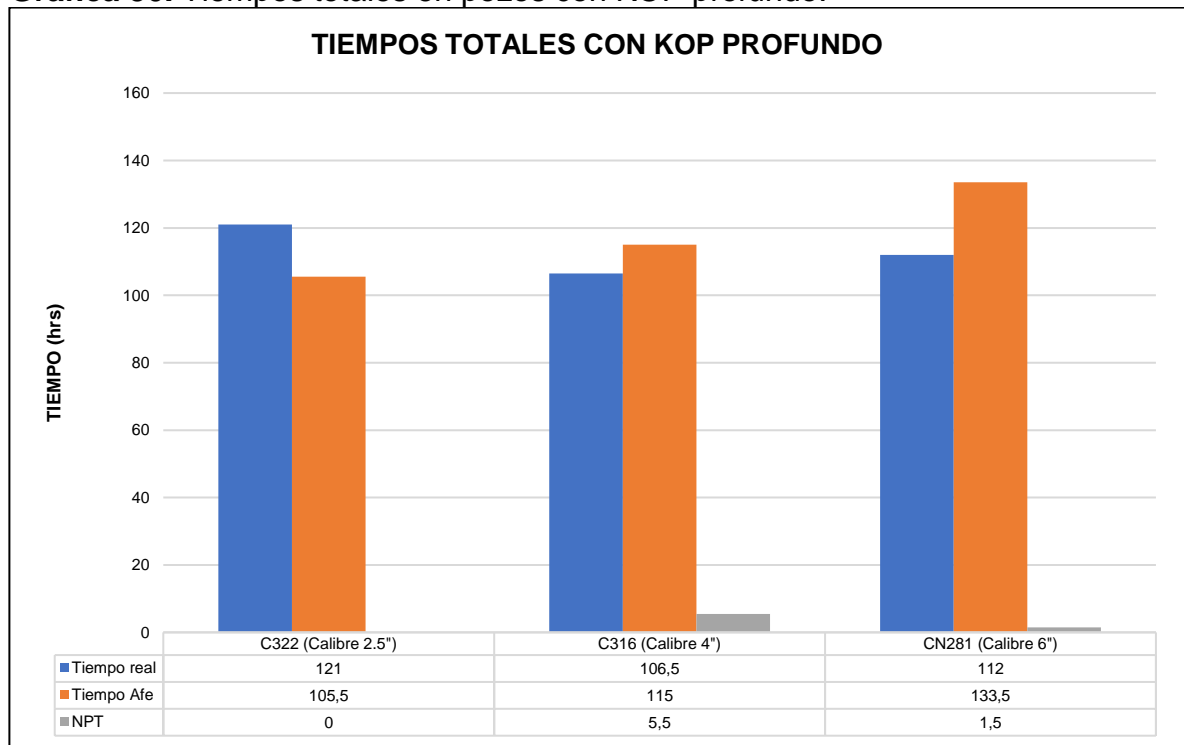
En la **Grafica 29** se puede observar que se genera una reducción considerable en los tiempos de viaje mediante la implementación de las brocas con calibre de 4”; no obstante, los tiempos de viaje en los pozos perforados con las brocas con calibre de 6” fueron más altos que los de la broca con calibre de 4”. En el pozo

C216 estos tiempos de viaje estuvieron un 8% por encima de lo planeado, y se vieron afectados directamente por las pérdidas de fluido ocurridas durante la perforación de la Formación de Areniscas Carbonera, que no solo representaron una inversión de tiempo en enviar píldoras de LCM, sino que implicaron restricciones en los viajes posteriores causadas por el cemento bombeado para el control de pérdidas totales de fluido de perforación. El tiempo de viajes en el pozo C226 excedió el tiempo propuesto en el AFE por un 25%, parte de esta demora fue causada por un punto apretado a la profundidad de 2786', esta restricción fue causada posiblemente por los problemas derivados por la falla del motor direccional registrada a los 2800'.

7.6.2 Pozos con KOP profundo

➤ **Tiempos Totales.** En la **Grafica 30** se muestra la comparación de los tiempos de totales obtenidos tras la implementación de las brocas con diferentes calibres, en los pozos con KOP somero.

Grafica 30. Tiempos totales en pozos con KOP profundo.



Se puede observar en la gráfica que los tiempos totales de los pozos perforados con calibre extendido, emplearon menos tiempo del estipulado por el AFE. Aunque en este caso los tiempos reportados en los pozos perforados usando la broca con calibre de 4" nuevamente fueron menores a los tiempos obtenidos durante la corrida de la broca con calibre de 6", la reducción de tiempo respecto al AFE fue más significativa en los pozos perforados usando brocas con calibre de 6". En las brocas

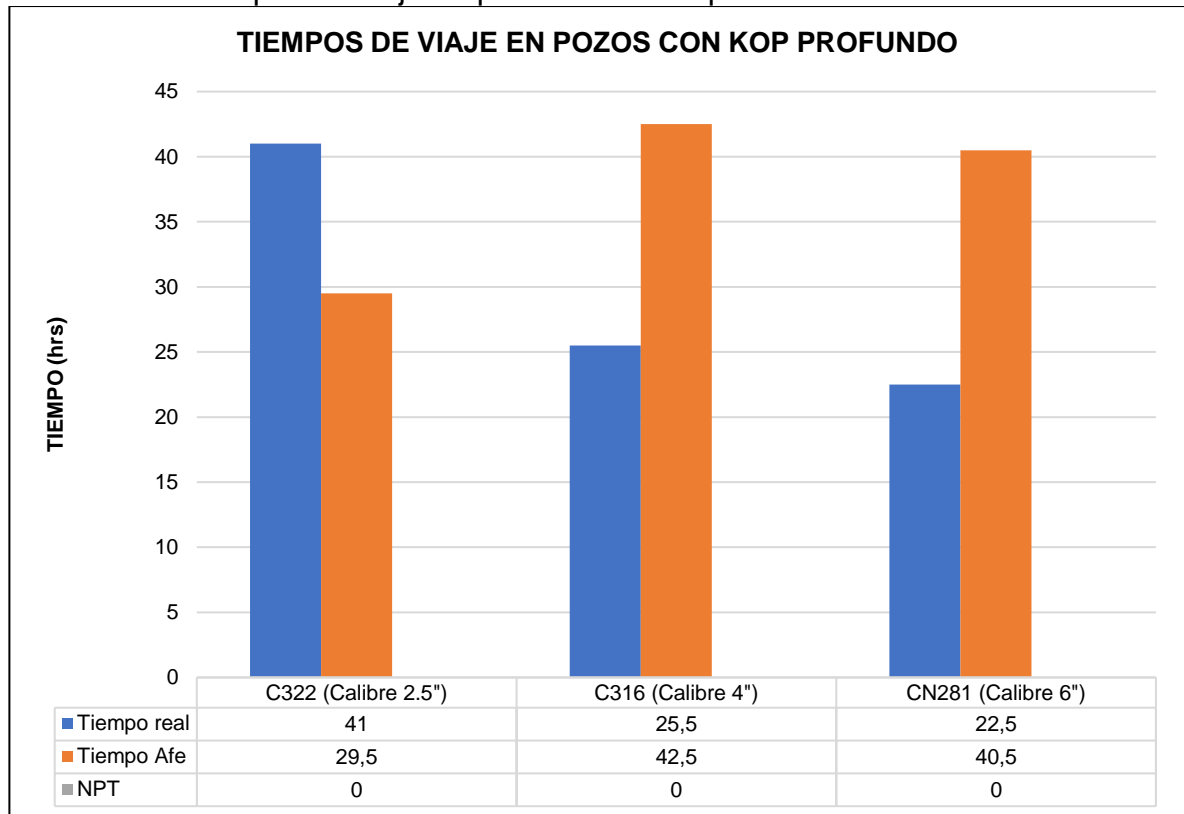
con calibre de 4" la reducción de tiempos fue del 7% mientras que la reducción usando la broca con calibre de 6" fue del 16%, es decir que mediante la implementación de las brocas de 6" se puede lograr una ventaja respecto al AFE dos veces mejor que usando brocas de 4"

A pesar de haber empleado un mayor tiempo para la perforación, tanto rotando como deslizando, el pozo C316 tuvo un tiempo total menor que el pozo C322 en 14,5 horas; por lo cual se infiere que el ahorro de tiempo se generó en los viajes. Adicionalmente, el pozo C316 tuvo un problema en el MWD por el cual se tuvo que sacar a superficie y reemplazar el BHA prematuramente; generando NPT y un aumento en los tiempos totales.

La perforación del pozo CN281 después de haber alcanzado el KOP empleó un mayor tiempo total que el pozo C316, esto es atribuible al mayor trabajo direccional requerido desde la Unidad C2 para cumplir el plan direccional propuesto; además, este trabajo direccional fue realizado con ROP limitada para compensar la fuerte tendencia de la Lutita E3 a girar a la derecha, aumentando el tiempo de perforación de estas unidades en casi 14 horas.

➤ **Tiempos de viaje.** A continuación, en la **Grafica 31** se muestra la comparación de los tiempos de viaje obtenidos tras la implementación de las brocas con diferentes calibres, en los pozos con KOP profundo.

Grafica 31. Tiempos de viaje en pozos con KOP profundo.



En la gráfica se puede observar una disminución en los tiempos de viaje de los pozos a medida que el calibre de la broca es más largo.

El pozo C322 reporta un tiempo real 28% mayor al tiempo propuesto en el AFE, es decir que los viajes fueron más tortuosos de lo esperado, en parte porque se reportaron puntos apretados que fueron trabajados con back reaming representando 5 horas de diferencia en el viaje corto con los demás pozos; una vez alcanzado el TD, el viaje a superficie tomo más tiempo de lo planeado generando una demora de casi 6 horas en esta operación.

El pozo C316 tuvo un resultado positivo, logrando disminuir en un 40% los tiempos en comparación a los propuestos en el AFE, así mismo no se registraron eventos de puntos apretados en los viajes; implicando un mejoramiento en la calidad de hueco.

El pozo CN281 no registro ninguna demora en los viajes relacionada con el desempeño de la broca, solo se reportó un incidente con el cable del malacate que no afecto significativamente los tiempos de viaje del pozo. El ahorro de tiempo durante los viajes fue del 44% con respecto al AFE, lo cual refleja el mejoramiento en la calidad de hueco esperado al iniciar el proyecto; cabe mencionar, además, que este pozo tuvo el mejor desempeño de los tres durante la perforacion. Por lo tanto, se puede afirmar que la implementación del nuevo diseño de broca con calibre de 6" obtuvo resultados satisfactorios en los pozos con KOP profundo.

8. EVALUACION FINANCIERA

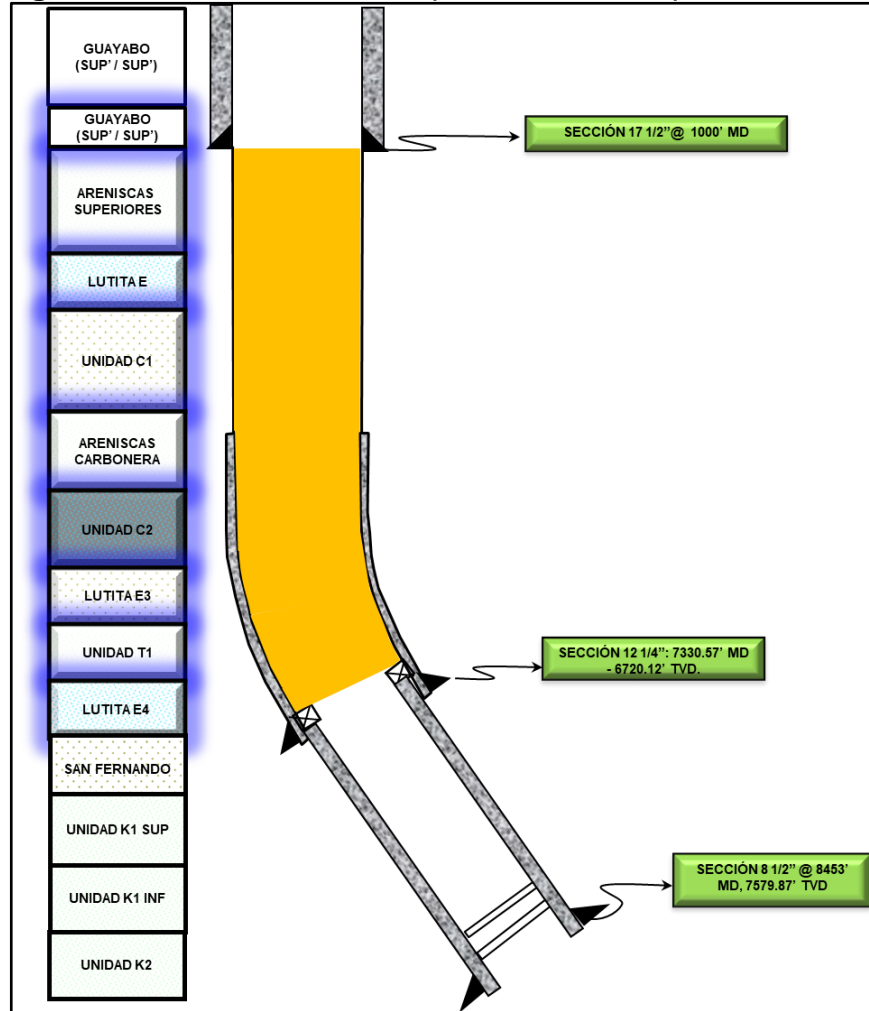
La operadora estatal Ecopetrol S.A desde sus inicios ha participado en los proyectos de investigación, exploración y desarrollo de los campos de hidrocarburos; esto conlleva a estar en la constante búsqueda de herramientas y servicios vanguardistas que permitan realizar de forma eficiente cada una de las ramas que componen esta industria, siempre y cuando cumpla o supere los estándares de calidad y seguridad.

El Campo Castilla conocido como uno de los reservorios que aporta la mayor cantidad de petróleo en Colombia, es un objetivo claro para implementar técnicas y herramientas resultantes de análisis e investigaciones; por ellos Ulterra™ como empresa prestadora de servicios siempre ha estado en la labor de diseñar y producir brocas, las cuales permitan realizar la operación de perforación con mayor facilidad. Por lo anterior Ecopetrol S.A ha contratado los servicios y herramientas de Ulterra™ para culminar satisfactoriamente la tarea de perforar el subsuelo para así extraer el hidrocarburo.

El presente proyecto resalta el desempeño obtenido del nuevo diseño de broca de Ulterra con calibre de 6" en la sección de 12 ¼" del campo presente, empleada en tres pozos a los cuales se les aplico una serie de filtros para su selección, estos pozos son: Castilla 216, Castilla 226 y Castilla Norte 281. La segunda sección corresponde a las unidades de Guayabo, Areniscas Superiores, Lutita E, Unidad C1, Arenisca Carbonera, Unidad C2, Lutita E3, Unidad T1 y la Lutita E4. Debido a que estas unidades poseen intercalaciones de minerales bastante notoria con respecto a su dureza por lo tanto dificulta el trabajo direccional requerido para llegar a las coordenadas de fondo.

A continuación, en la **Figura 82** se evidencia el área del estudio de un pozo petrolero tipo J.

Figura 82. Perfil actual de los pozos en el Campo Castilla



En la figura anterior está resaltado el espesor correspondiente a la sección 12 1/4" generalizada para el Campo Castilla, adicionalmente se muestran las unidades antes mencionadas que son aquellas las cuales se planea atravesar en la fase.

La evaluación financiera del presente trabajo de grado se realiza desde el punto de vista de la operadora Ecopetrol S.A, para la cual se emplea como única unidad monetaria el dólar norteamericano (USD). Se tiene conocimiento de la tasa interna de oportunidad de la operadora la cual es del 12% nominal anual con periodo de vigencia de un año; adicionalmente cuenta con doce periodos mensuales y como indicador financiero se utiliza el costo anual uniforme equivalente (CAUE), donde para determinar la viabilidad del proyecto se plantean la simulación de una campaña de perforación; donde se muestra el desempeño haciendo alusión al tiempo de viaje en cada una de las brocas.

Se establecieron factores como el número de periodos que dura la campaña de perforación, la profundidad a la cual llegarían los pozos, las horas destinadas de operación y los costos de operación (CAPEX).

8.1 ANÁLISIS DE COSTOS DE INVERSION (CAPEX)

Dado que Ecopetrol S.A por cuestiones logísticas no provee todas las herramientas y/o equipos necesarios para realizar la perforación de un pozo petrolero, por lo tanto, es necesario que entren en juego las prestadoras de servicios, las cuales proveen a la operadora de las herramientas y personal calificado para operarlas. Esto conlleva a unos costos antes de iniciar la perforación.

Como se analiza la relación directa de la operadora Ecopetrol S.A y la prestadora de servicios Ulterra, se determina que el nuevo diseño que provee la compañía asociada a la operadora representa aproximadamente entre el 1% y el 5% del costo total de operación. Cabe resaltar que por más que no implique un costo elevado, conlleva a beneficios económicos para la operadora; es importante destacar que Ecopetrol S.A no realiza ningún tipo de inversión en brocas, las herramientas empleadas son netamente alquiladas por el tiempo que dura la perforación del pozo. El beneficio económico se realiza mediante una perforación mucho más estable, reduciendo el grado de tortuosidad del pozo, lo que una actividad inmediatamente siguiente a la perforación como lo es la subida de las herramientas de fondo a superficie que se logre realizar con menos obstáculos.

Ya que el objetivo principal del nuevo diseño de broca con calibre extendido de 6" es lograr una reducción en los costos de operación presentes de Ecopetrol S.A, se toma como punto de partida, el valor de todas aquellas herramientas y servicios necesarios para llevar a cabo la perforación a los cuales se les halla el costo por hora, esto se realiza con el único objetivo de mantener las unidades constantes, ya que los tiempos de viaje de tubería están dados en horas; cabe resaltar que los costos de herramientas y equipos se mantendrá constante a lo largo de la simulación de la campaña de perforación.

Una vez se hayan analizado los costos para cada uno de los calibres se determina el costo por pie (CPP) para cada uno de los diseños con distintas longitudes de calibre inicialmente con los tres pozos donde se implementó la broca con calibre de 2.5", siguiendo con los tres pozos perforados con la broca con calibre de 4" y, por último, los tres pozos cuya fase 12 ¼" se realizó con la broca con calibre de 6". En la **Tabla 22** se observan los costos de los distintas herramientas y servicios tanto globales como por hora; estos últimos se determinan al considerar que la perforacion se realiza en 18 días o 432 horas, para tener las unidades constantes, los cuales se mantendrán constantes a lo largo de toda la simulación.

Tabla 22. Costos de operación (USD)

EQUIPOS Y SERVICIOS	Costo total	Costo por hora
Equipo de perforacion	951.499,00	2.202,54
Estabilizadores	2.826,00	6,54
Hts especiales de fondo	11.263,00	26,07
martillos	10.379,00	24,03
Aseguramiento calidad	5.864,00	13,57
Cementacion	118.027,00	273,21
Comunicaciones	11.641,00	26,95
Corrida de liner hanger	11.452,00	26,51
Corrida de tubulares	34.130,00	79,00
Fluido de perforacion, etc	277.309,00	641,92
Inspeccion tubulares	13.137,00	30,41
Profesionales de supervision e ingenieria	28.584,00	66,17
Perforación direccional	215.398,00	498,61
Reparacion y mantenimiento de tubulares	14.792,00	34,24
seguridad	29.522,00	68,34
Registros electricos	21.841,00	50,56
Tratamiento de cortes	186.906,00	432,65
Unidad geologica	79.500,00	184,03
PARCIAL	2.024.070,00	4.685,35
Cabezal de pozo y herramientas	50.801,00	117,59
Equipos de flotacion y accesorios	58.825,00	136,17
Liner hanger y accesorios	128.863,00	298,29
Revestimiento	361.493,00	836,79
Materiales consumibles de perforación	622.354,00	1.440,63
PARCIAL	1.222.336,00	2.829,48
Servicio de planeacion y seguimiento	7.457,00	17,26
servicios especiales de perforacion	3.881,00	8,98
Viaticos	2.299,00	5,32
Servicios adicionales de gerenciamiento	29.841,00	69,08
PARCIAL	43.478,00	100,64
TOTAL	3.289.884,00	7.615,47

Fuente: ECOPETROL S.A. Programa de perforación, definición y ejecución.

De ser necesario algún tipo de aclaración sobre la fuente de los resultados presentados en la tabla anterior, consultar en los anexos la formula con la cual se determinó cada uno de los ítems mencionados.

Como se indicó anteriormente se determina el costo por pie de cada uno de los pozos antes perforados; esto se realiza mediante la **Ecuación 12**. Para así realizar la simulación de la campaña de perforación la cual se puede ver en la **Tabla 23**, esta consta de dos pozos perforados cada mes; donde se planea que cada uno perfora un espesor de 5900’.

Ecuación 12. Ecuación de costo por pie

$$CPP = \frac{\$B + \$R(T_d + T_t)}{FD}$$

Fuente: WEATHERFORD, Mud lubricated drilling motors, handbook, segunda edición, p. 320.

Donde:

CPP= Costo por pie (USD)

\$B= Costo de alquiler de la broca (USD)

\$R= Costo del equipo de perforación por hora (USD/hr)

Td= Tiempo de perforación (hr)

Tt= Tiempo del viaje (hr)

FD= Pies perforados (pies)

Tabla 23. Escenario de la campaña de perforación

PERIODO (MENSUAL)	# DE POZOS A PERFORAR
1	2
2	2
3	2
4	2
5	2
6	2
7	2
8	2
9	2
10	2
11	2
12	2

8.1.1 Costo por pie con el diseño de broca con calibre de 2.5”. El diseño estándar de Ulterra, el cual cuenta con un calibre de 2.5” fue implementado en los pozos C322, C342 y C361, los cuales mantienen una armonía con respecto a la forma y equipos destinados para su perforación; todos llegaron a la profundidad objetivo según el plan de perforación.

Para el presente trabajo se realiza una simulación tomando como base el costo por pie de los pozos anteriormente mencionados, posterior se introduce a la campaña planteada al inicio del capítulo. El costo por pie de los pozos donde se corrió la broca con calibre de 2.5” se puede observar en el **Cuadro 23**.

Cuadro 23. Costo por pie de los pozos donde se implementó la broca con calibre de 2.5”

	CALIBRE 2.5"		
	C322	C342	C361
Costo de alquiler de la broca (USD)	15.000	15.000	15.000
Costo por hora del equipo de perforacion (USD)	7615,5	7615,5	7615,5
Tiempo perforando (Hrs)	80	88,5	73,5
Tiempo de viaje (Hrs)	41	58,5	36,5
Footage (ft)	5903	5911	5856
Costo por pie (USD)	158,64	191,93	145,61

Fuente: ULTERRA, C322, C342 y C361 DWOP

8.1.1.1 Costo por pie promedio para la broca con calibre de 2.5”. En este estudio el costo por pie promedio se haya para obtener una base sólida con la cual se pueda realizar la simulación de la campaña de perforación; los datos proporcionados por los pozos fueron sometidos a criterios de selección, por lo cual el pozo C361 fue extraído del presente análisis, al tener una herramienta direccional distinta al motor de fondo, este es un común denominador necesario para que se mantenga sinergia con respecto a los resultados finales.

En el **Cuadro 24** se observa el resultado promedio del costo por pie, al correr una broca con un calibre de 2.5”

Cuadro 24. Costo por pie promedio de los pozos donde se implementó la broca con calibre de 2.5”

POZO	C322	C342
CPP (USD)	158.64	191.93
CPP PROMEDIO (USD)	175.28	

Fuente: ULTERRA, Castilla, 2016.

8.1.1.2 Simulación de la campaña de perforación con la broca con calibre de 2.5”. En la **Tabla 24** se puede observar los costos para dos pozos dentro de la campaña de perforación vigente, durante los 12 meses del año, al implementar la broca estándar con calibre de 2.5”.

Tabla 24. Costo de inersion con la broca de calibre 2.5"

PERIODO	ESPEROR A PERFORAR (FT)	# DE POZOS	CPP (USD/FT)	COSTO DE PERFORACION DE LA CAMPAÑA
1	5.900	2	175,28	2.068.359,44
2	5.900	2	175,28	2.068.359,44
3	5.900	2	175,28	2.068.359,44
4	5.900	2	175,28	2.068.359,44
5	5.900	2	175,28	2.068.359,44
6	5.900	2	175,28	2.068.359,44
7	5.900	2	175,28	2.068.359,44
8	5.900	2	175,28	2.068.359,44
9	5.900	2	175,28	2.068.359,44
10	5.900	2	175,28	2.068.359,44
11	5.900	2	175,28	2.068.359,44
12	5.900	2	175,28	2.068.359,44

Fuente: ULTERRA, Castilla, 2016.

8.1.2 Costo por pie con el diseño de broca con calibre extendido de 4".

Durante la implementación de la broca de calibre extendido de 4" en la fase de 12 ¼" se evidencia un ahorro aproximado de entre 9 y 11% con respecto a los pozos donde se implementó la broca con calibre de 2.5". en el **la Figura 82**.

8.1.3 Cuadro 25 se evidencia el costo por pie en los pozos C217, C316 y C471. Cabe resaltar que todos los pozos llegaron a la formación objetivo; las unidades de intereses se pueden ver en **la Figura 82**.

Cuadro 25. Costo por pie de los pozos donde se implementó la broca con calibre de 4"

	CALIBRE 4"		
	C217	C316	C471
Costo de alquiler de la broca (USD)	15.000	15.000	15.000
Costo por hora del equipo de perforacion (USD)	7615,5	7615,5	7615,5
Tiempo perforando (Hrs)	97,5	83,5	90,5
Tiempo de viaje (Hrs)	26,5	23	37,5
Footage (ft)	5750	5668	5551
Costo por pie (USD)	166,84	145,74	178,31

Fuente: ULTERRA, C217, C316 y C471 DWOP

8.1.3.1 Costo por pie promedio ponderado para la broca con calibre de 4”. El costo por pie en el caso de los pozos donde se implementó la broca con calibre extendido de 4” obtuvo un campo de estudio mucho más amplio, ya que se tienen disponible los tres pozos, lo cual genera una menor incertidumbre con respecto a la tendencia que puede tomar el costo por pie promedio, sin embargo, se puede evidenciar un ahorro cercano al 7%, donde al aplicarlo en un proyecto ya masificado representa millones de dólares ahorrados. En el **Cuadro 26** se puede evidenciar el costo por pie promedio resultante de los pozos C217, C316 y C471.

Cuadro 26. Costo por pie promedio de los pozos donde se implementó la broca con calibre de 4”

POZO	C217	C316	C471
CPP (USD)	166.84	145.74	178.31
CPP PROMEDIO (USD)	163.63		

Fuente: ULTERRA, Castilla, 2016.

8.1.3.2 Simulación de la campaña de perforación con la broca con calibre de 4”. En el **Tabla 25** se puede observar los costos para dos pozos dentro de la campaña de perforación vigente, durante los 12 meses del año, al implementar la broca estándar con calibre de 4”.

Tabla 25. Costo de inersión con la broca de calibre 4”

PERIODO	ESPERAR A PERFORAR (FT)	# DE POZOS	CPP (USD/FT)	COSTO DE PERFORACION DE LA CAMPAÑA
1	5.900	2	163,63	1.930.808,63
2	5.900	2	163,63	1.930.808,63
3	5.900	2	163,63	1.930.808,63
4	5.900	2	163,63	1.930.808,63
5	5.900	2	163,63	1.930.808,63
6	5.900	2	163,63	1.930.808,63
7	5.900	2	163,63	1.930.808,63
8	5.900	2	163,63	1.930.808,63
9	5.900	2	163,63	1.930.808,63
10	5.900	2	163,63	1.930.808,63
11	5.900	2	163,63	1.930.808,63
12	5.900	2	163,63	1.930.808,63

Fuente: ULTERRA, Castilla, 2016.

8.1.4 Costo por pie con el diseño de broca con calibre extendido de 6”

En los pozos donde se implementó la broca con calibre extendido de 6”, también se alcanzó un amplio campo de estudio, ya que los tres pozos cumplían con los criterios de selección necesarios para ser partícipes del análisis financiero, sin embargo, no se obtuvieron las tendencias que se esperaba; dado que en el caso

del pozo C216 se presentaron problemas con el fluido de perforación, lo que comprometió la integridad del hueco, esto empleó más tiempo del planeado tanto para la perforación como para los viajes a superficie. Con respecto al pozo C226 inicialmente mantuvo tendencia a ser reducido, pero se presentó un washout en el motor, esto implicó tiempo extra de viaje, el cual no estaba pronosticado, lo que a su vez incrementó el costo por pie final. No obstante, el pozo C281 fue el que más se acopló a la tendencia pensada de ahorro de tiempo y costo por pie. Lo anterior se puede observar en el **Cuadro 27**, cabe resaltar a que pesar de los problemas presentados, en todos los pozos la fase de 12 ¼" fue culminada en su totalidad.

Cuadro 27. Costo por pie de los pozos donde se implementó la broca con calibre de 6"

	CALIBRE 6"		
	C216	C226	CN281
Costo de alquiler de la broca (USD)	15.000	15.000	15.000
Costo por hora del equipo de perforación (USD)	7615,47	7615,47	7615,47
Tiempo perforando (Hrs)	88	80,5	89,5
Tiempo de viaje (Hrs)	41,5	48	22,5
Footage (ft)	6316	5679	5906
Costo por pie (USD)	158,52	174,96	146,96

Fuente: ULTERRA, C216, C226 y CN281 DWOP

8.1.4.1 Costo por pie promedio ponderado para la broca con calibre de 6". El costo por pie promedio fue el indicador claro acerca de la viabilidad del proyecto, ya que, al evaluar una nueva tecnología, los problemas presentados no son tan relevantes, pero si pueden causar una mala calificación y dudar de ser implementada en un futuro. Cabe resaltar que tomando el pozo con el costo más bajo y compararlo con los pozos más económicos de los demás calibres, bajo los criterios de selección se obtiene un ahorro aproximado al 8% con respecto a ambos calibres. Lo que, viendo desde una vista macro, el ahorro de dinero sería más que significativo manteniendo el mismo beneficio.

Cuadro 28. Costo por pie promedio de los pozos donde se implementó la broca con calibre de 6”

POZO	C216	C226	CN281
CPP (USD)	158,52	174,96	146,96
CPP PROMEDIO (USD)	160,14		

Fuente: ULTERRA, Castilla, 2018.

8.1.4.2 Simulación de la campaña de perforación con la broca con calibre de 6”. En el **Tabla 26** se puede observar los costos para dos pozos dentro de la campaña de perforación vigente, durante los 12 meses del año, al implementar la broca estándar con calibre de 6”.

Tabla 26. Costo de inersion con la broca de calibre 6”

PERIODO	ESPEROR A PERFORAR (FT)	# DE POZOS	CPP (USD/FT)	COSTO DE PERFORACION DE LA CAMPAÑA
1	5.900	2	160,14	1.889.710,01
2	5.900	2	160,14	1.889.710,01
3	5.900	2	160,14	1.889.710,01
4	5.900	2	160,14	1.889.710,01
5	5.900	2	160,14	1.889.710,01
6	5.900	2	160,14	1.889.710,01
7	5.900	2	160,14	1.889.710,01
8	5.900	2	160,14	1.889.710,01
9	5.900	2	160,14	1.889.710,01
10	5.900	2	160,14	1.889.710,01
11	5.900	2	160,14	1.889.710,01
12	5.900	2	160,14	1.889.710,01
13	5.900	2	160,14	1.889.710,01

8.2 EVALUACION FINANCIERA

Una vez se determinó que los diseños de broca proporcionado por Ulterra no generaban ganancias monetarias sino ahorro de dinero. Se llego a la conclusión entre el asesor financiero y los proponentes que el mejor indicador financiero sería el costo anual uniforme equivalente (CAUE). El cual será aplicado a los tres diseños antes mencionados.

8.2.1 Costo anual uniforme equivalente (CAUE). “El costo anual uniforme equivalente representa la cantidad que financieramente es el promedio, ya sea en ganancia, si es positiva, o en pérdida, si es negativa, que se logra al llevar a cabo ese proyecto”. Es de entenderse que en este proyecto al no tener ingresos por la operación de perforación el CAUE siempre será negativo. la finalidad de emplear este indicador es la determinación de con cuál de los diseños antes estudiados resulta menos costosa la operación.

En la **Ecuación 13** se puede observar cómo se determinó el costo anual uniforme equivalente en cada una de las simulaciones realizadas.

Ecuación 13. Costo anual uniforme equivalente

$$CAUE = \left(\frac{(1+i)^n * i}{(1+i)^n - 1} \right)$$

Donde:

CAUE= Costo Anual Uniforme Equivalente

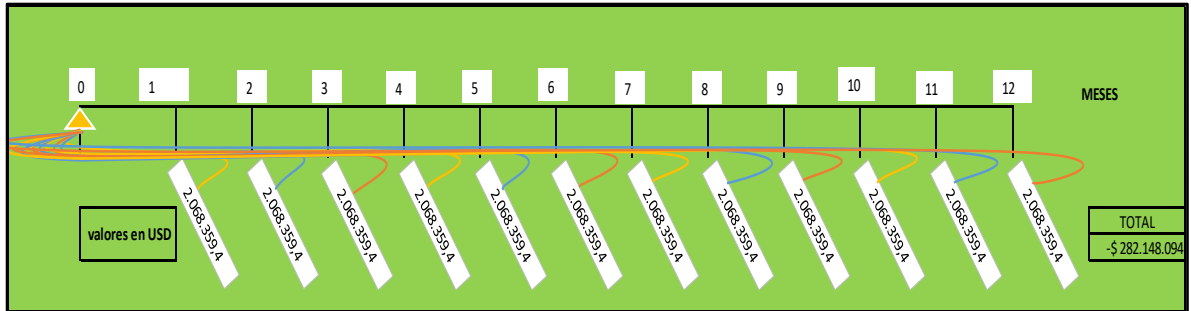
i= Tasa interna de oportunidad

n= Numero de periodos

8.2.2 Tasa interna de oportunidad. “La tasa de interés de oportunidad es la tasa de interés más alta que un inversionista o grupo de inversionistas sacrifican con el objeto de realizar un proyecto determinado”, para realizar la evaluación financiera se utilizó una tasa interna de oportunidad del 11% anual.

8.2.2.1 Simulación con broca de calibre de 2.5”. Inicialmente se plantea el escenario de la campaña de perforación, incluyendo el costo por cada dos pozos como se muestra en la **Figura 83**.

Figura 83. Costo por cada dos pozos llevados a valor presente, determinado con el calibre de 2.5”



Para determinar el precio de los pozos a perforar, se simula mediante el indicador financiero costo anual uniforme equivalente CAUE. Donde se determina el costo hoy día de toda la campaña de perforación con la broca estándar con calibre de 2.5” a continuación se observa la simulación y los resultados finales. El valor presente resultante de la campaña se puede observar en la **Ecuación 14**

Ecuación 14. Calculo del valor presente neto con la broca de 2.5”

$$\begin{aligned}
 VPN &= 0 + \frac{(-1) * (2.068.359)}{(1 + 1\%)^1} + \frac{(-1) * (2.068.359)}{(1 + 1\%)^2} + \frac{(-1) * (2.068.359)}{(1 + 1\%)^3} \\
 &+ \frac{(-1) * (2.068.359)}{(1 + 1\%)^4} + \frac{(-1) * (2.068.359)}{(1 + 1\%)^5} + \frac{(-1) * (2.068.359)}{(1 + 1\%)^6} \\
 &+ \frac{(-1) * (2.068.359)}{(1 + 1\%)^7} + \frac{(-1) * (2.068.359)}{(1 + 1\%)^8} + \frac{(-1) * (2.068.359)}{(1 + 1\%)^9} \\
 &+ \frac{(-1) * (2.068.359)}{(1 + 1\%)^{10}} + \frac{(-1) * (2.068.359)}{(1 + 1\%)^{11}} + \frac{(-1) * (2.068.359)}{(1 + 1\%)^{12}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 VPN &= 0 + (-2.047.605) + (-2.027.605) + (-2.007.529) + (-1.987.653) \\
 &+ (-1.967.973) + (-1.948.488) + (-1.929.196) + (-1.910.095) \\
 &+ (-1.891.183) + (-1.872.459) + (-1.853.920) + (-1.835.564)
 \end{aligned}$$

$$\mathbf{VPN = -\$23.279.546 USD}$$

Una vez hallado el valor presente VPN con la broca estándar con calibre de 2.5” se halla el costo anual equivalente CAUE, es decir, se determina una anualidad la cual indica el costo por periodo que en este caso Ecopetrol S.A debe asumir.

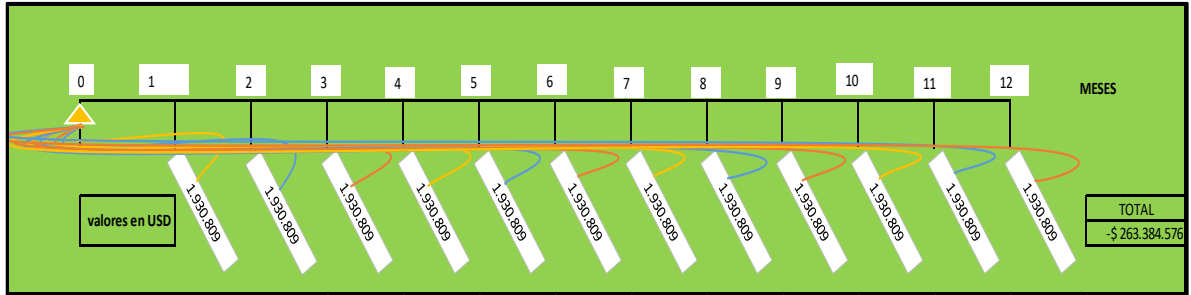
Ecuación 15. Valor del Costo anual uniforme equivalente empleando la broca con calibre de 2.5”

$$\mathbf{CAUE = -23.279.546 \left\{ \frac{\{[(1 + 1\%)^{12}] * 1\%\}}{\{[(1 + 1\%)^{12}] - 1\}} \right\}}$$

$$\mathbf{CAUE = 2.068.359 USD/mes}$$

8.2.2.2 Simulación con broca de calibre extendido de 4”. Inicialmente se plantea el escenario de la campaña de perforación, incluyendo el costo por cada dos pozos como se muestra en la **Figura 84**.

Figura 84. Costo por cada dos pozos llevados a valor presente, determinado con el calibre de 4”



Para determinar el precio de los pozos a perforar, se simula mediante el indicador financiero costo anual uniforme equivalente CAUE. Donde se determina el costo hoy día de toda la campaña de perforación con la broca con calibre extendido de 4”, a continuación, se observa la simulación y los resultados finales. El valor presente resultante de la campaña se puede observar en la **Ecuación 16**

Ecuación 16. Calculo del valor presente neto con la broca de 4”

$$\begin{aligned}
 VPN &= 0 + \frac{(-1) * (1'930.808)}{(1 + 1\%)^1} + \frac{(-1) * (1'930.808)}{(1 + 1\%)^2} + \frac{(-1) * (1'930.808)}{(1 + 1\%)^3} \\
 &+ \frac{(-1) * (1'930.808)}{(1 + 1\%)^4} + \frac{(-1) * (1'930.808)}{(1 + 1\%)^5} + \frac{(-1) * (1'930.808)}{(1 + 1\%)^6} \\
 &+ \frac{(-1) * (1'930.808)}{(1 + 1\%)^7} + \frac{(-1) * (1'930.808)}{(1 + 1\%)^8} + \frac{(-1) * (1'930.808)}{(1 + 1\%)^9} \\
 &+ \frac{(-1) * (1'930.808)}{(1 + 1\%)^{10}} + \frac{(-1) * (1'930.808)}{(1 + 1\%)^{11}} + \frac{(-1) * (1'930.808)}{(1 + 1\%)^{12}} \\
 VPN &= 0 + (-1.911.692) + (-1.892.764) + (-1.874.024) + (-1.855.469) \\
 &+ (-1.837.098) + (-1.818.909) + (-1.800.900) + (-1.783.069) \\
 &+ (-1.765.415) + (-1.747.936) + (-1.730.630) + (-1.713.495) \\
 VPN &= -\$21.731.401 USD
 \end{aligned}$$

Una vez hallado el valor presente VPN con la broca estándar con calibre de 4” se halla el costo anual equivalente CAUE, es decir, se determina una anualidad la cual indica el costo por periodo que en este caso Ecopetrol S.A debe asumir.

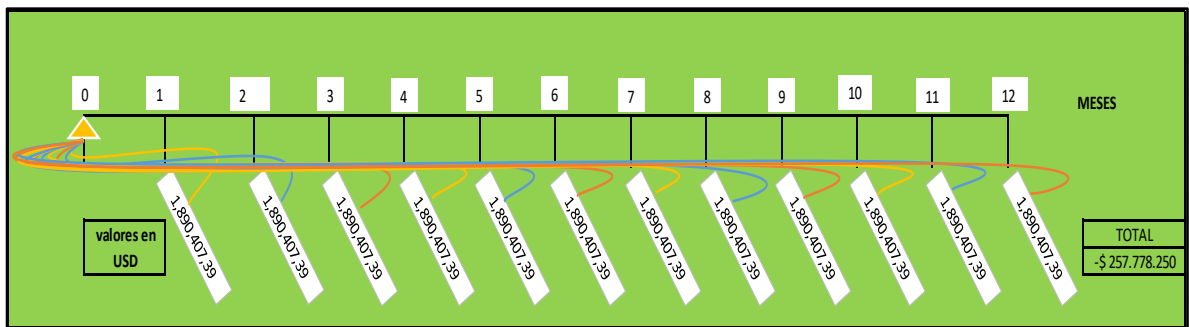
Ecuación 17. Valor del Costo anual uniforme equivalente empleando la broca con calibre de 4”

$$CAUE = 21'731.401 \left\{ \frac{\{[(1 + 1\%)^{12}] * 1\%\}}{\{[(1 + 1\%)^{12}] - 1\}} \right\}$$

$$CAUE = 1.930.808 \text{ USD/mes}$$

8.2.2.3 Simulación con broca de calibre extendido de 6”. Inicialmente se plantea el escenario de la campaña de perforación, incluyendo el costo por cada dos pozos como se muestra en la **Figura 85**.

Figura 85. Costo por cada dos pozos llevados a valor presente, determinado con el calibre de 6”



Para determinar el precio de los pozos a perforar, se simula mediante el indicador financiero costo anual uniforme equivalente CAUE. Donde se determina el costo hoy día de toda la campaña de perforación con la broca con calibre extendido de 6” a continuación, se observa la simulación y los resultados finales. El valor presente resultante de la campaña se puede observar en la **Ecuación 18**.

Ecuación 18. Calculo del valor presente neto con la broca de 6”

$$\begin{aligned}
 VPN &= 0 + \frac{(-1) * (1.889.710)}{(1 + 1\%)^1} + \frac{(-1) * (1.889.710)}{(1 + 1\%)^2} + \frac{(-1) * (1.889.710)}{(1 + 1\%)^3} \\
 &+ \frac{(-1) * (1.889.710)}{(1 + 1\%)^4} + \frac{(-1) * (1.889.710)}{(1 + 1\%)^5} + \frac{(-1) * (1.889.710)}{(1 + 1\%)^6} \\
 &+ \frac{(-1) * (1.889.710)}{(1 + 1\%)^7} + \frac{(-1) * (1.889.710)}{(1 + 1\%)^8} + \frac{(-1) * (1.889.710)}{(1 + 1\%)^9} \\
 &+ \frac{(-1) * (1.889.710)}{(1 + 1\%)^{10}} + \frac{(-1) * (1.889.710)}{(1 + 1\%)^{11}} + \frac{(-1) * (1.889.710)}{(1 + 1\%)^{12}} \\
 \\
 VPN &= 0 + (-1.871.000) + (-1.852.475) + (-1.834.134) + (-1.815.974) + (-1.797.994) \\
 &+ (-1.780.192) + (-1.762.567) + (-1.745.115) + (-1.727.837) \\
 &+ (-1.710.730) + (-1.693.792) + (-1.677.022) \\
 \\
 VPN &= -\$21.268.833 USD
 \end{aligned}$$

Una vez hallado el valor presente VPN con la broca estándar con calibre de 6” se halla el costo anual equivalente CAUE, es decir, se determina una anualidad la cual indica el costo por periodo que en este caso Ecopetrol S.A debe asumir.

Ecuación 19. Valor del Costo anual uniforme equivalente empleando la broca con calibre de 6”

$$\begin{aligned}
 CAUE &= 21.268.833 * \left\{ \frac{\{[(1 + 1\%)^{12}] * 1\%\}}{\{[(1 + 1\%)^{12}] - 1\}} \right\} \\
 \\
 CAUE &= 1.889.710 USD/mes
 \end{aligned}$$

Por último, en la **Tabla 27** se muestra un resumen del costo anual equivalente con cada uno de los calibres implementados en el Campo Castilla

Tabla 27. Resumen financiero con las anualidades correspondientes a cada calibre

SIMULACION FINANCIERA		
CALIBRE (pulg)	VPN (-USD)	CAUE (-USD)
2,5	22'279.546	-2.068.359,44
4	21'731.401	-1.930.808,63
6	22'050.666	-1.889.710,01

8.3 CONCLUSIÓN FINANCIERA

Al confrontar los distintos calibres implementados en el Campo Castilla para el presente trabajo de grado, se determinó que el proyecto financieramente si es viable. Como se ve en la **Tabla 27** mediante el indicador financiero costa anual uniforme equivalente (CAUE), que determino que la anualidad a pagar al emplear la broca con calibre de 6” es 41.098 USD más económica que la anteriormente implementada con calibre de 4” (es decir un 2.13% menos), y 178.649 USD (es decir

8.63% menos) más económica que la de calibre estándar de 2.5". Lo cual indica que técnicamente también es viable al confirmar la teoría planteada, un calibre de mayor longitud proporciona una perforación más estable, reduciendo considerablemente el grado de tortuosidad, lo cual se comprueba en la práctica mediante los tiempos de viaje a superficie. Cabe resaltar que a pesar de que en dos de los tres pozos en estudio se presentaron problemas operacionales ajenos a la broca, esto no impidió obtener resultados satisfactorios tanto para Ecopetrol S.A como operadora del campo en ahorro de recursos económicos, como para Ulterra comercialmente.

Concluyendo así que el nuevo diseño de broca con calibre extendido de 6" es una herramienta tentativa para ser implementada en una campaña de perforación a gran escala, donde al mantener costos operativos y de alquiler de la misma constante, el ahorro de dinero será mucho más evidente y desde la parte de ingeniería tener la certeza de que la broca se encuentra en la capacidad de superar condiciones operacionales de gran complejidad, donde siempre y cuando exista una sinergia con los demás componentes del BHA y los equipos de superficie, el pozo resultará exitoso.

9. CONCLUSIONES

- El avanzado estado de explotación del Campo Castilla implica que las actuales campañas de perforación se encuentren orientadas al desarrollo y aumento en la producción del campo; por lo tanto, es considerado un candidato predilecto para la implementación de proyectos que permitan reducir los costos operativos relacionados a la producción de hidrocarburos.
- Después de evaluar los resultados obtenidos por la broca con el calibre de 4" y con el fin de mejorar el desempeño de las brocas con calibre extendido de 6", la empresa prestadora de servicios Ulterra optimizó los ángulos de entrada de los cortadores a la formación y el número de boquillas pasando de cinco a siete para generar un mayor potencial de ROP respecto a los otros diseños.
- Tomando en primera instancia los registros fotográficos obtenidos tras la corrida de los tres pozos con calibre de 6", se evidencia la ausencia parcial o total de cualquier tipo de desgaste causado por fenómenos vibracionales. En vista de que el nuevo diseño presenta mayor área de contacto con la formación es notorio el incremento en la estabilidad de la broca.
- El comportamiento del MSE obtenido en el pozo CN281, se muestra un aumento del 35% en el gasto de energía promedio con respecto al pozo C216, por lo cual se demuestra que una perforación que presenta mayor ROP no necesariamente significa un aprovechamiento eficiente de la energía proporcionada por equipos y/o sistemas tanto de superficie como de fondo.
- Los resultados obtenidos en los pozos estudiados indican que el desempeño de las brocas durante la perforación se ve afectado un máximo de 12% por el calibre de 6"; sin embargo, si estos son comparados con los de su cluster, se demuestra que su desempeño está dentro del promedio, e incluso supera la ROP promedio por 7% en el caso del pozo CN281 y por 9% en el caso del pozo C226.
- Después del análisis del comportamiento en los tiempos de viaje y los tiempos operacionales en cada pozo, se obtuvo que la implementación del nuevo diseño de broca obtuvo mejores resultados para mejorar la calidad del hueco, en los pozos con KOP profundo que en aquellos que tuvieron un KOP somero.
- Una comparación netamente lineal de los tiempos totales logrados tanto con KOP profundo como con KOP somero, indica que las brocas con calibre de 4" tienen una ventaja del 4% y del 2% respectivamente en contraste con el nuevo diseño; no obstante, al evaluar toda la operación, y teniendo en cuenta que el espesor promedio de la sección fue 400' mayor en los pozos que implementaron la broca con calibre de 6", se hace evidente que el tiempo total empleado en la perforación de estos fue aprovechado de manera más eficiente y por lo tanto, se logró mejorar la calidad de hueco.

➤ Basados en las simulaciones realizadas para cada uno de los calibres presentados por Ulterra se nota una clara ventaja del nuevo diseño con calibre de 6" frente a sus contrapartes de 2.5" y 4", ya que al emplear el indicador financiero costo anual uniforme equivalente se determinó que el nuevo diseño presenta un ahorro de 178.649 USD con respecto a la broca estándar con calibre de 2.5" y 41.098 USD frente a la broca con calibre extendido de 4" generado por la reducción proporcional de los tiempos de viaje que reducen el tiempo global de la operación.

10. RECOMENDACIONES

- Buscar la optimización en la calidad del hueco a través del diseño de brocas PDC con calibres extendidos mayores a 6" corridas con control direccional eficiente e implementarlas en el Campo Castilla
- Analizar los efectos de la tecnología Split Blade en brocas PDC con calibres extendidos, en la limpieza de la misma broca y en el mejoramiento en la calidad del hueco en el Campo Castilla.
- Analizar los efectos de la tecnología FastBack en brocas PDC con múltiples calibres, en la remoción de ripios generados tras la perforación.
- Evaluar la durabilidad y resistencias de cortadores de alto impacto en brocas PDC con múltiples calibres contra formaciones que presenten una resistencia a esfuerzos cortantes mayor.

BIBLIOGRAFIA

AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Eastern Llanos Basin. Colombia, 2007. p. 2.

_____. Estudio Integrado de Crudos Pesados. Colombia: 2008. p. 2.

_____. Llanos Orientales Open Round Colombia. Colombia: 2010.

_____. INGRAIN DIGITAL ROCK PHYSICS LAB y HALLIBURTON. Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos. Colombia: ANH, 2012. p. 3-52.

AYALA, Diego; BENITEZ, Alina y VALENCIA, Raúl. Optimización de la Tasa de Penetración Mediante el Análisis de las Vibraciones Al Perforar, Caso De Estudio Ecuador. En: FUENTES: EL REVENTON ENERGETICO. Jul, 2017. vol. 15, no. 1, p. 27-40.

BAKER HUGHES. Reference Manual Drilling Fluids. 2006. p. 475-518

BESSION, Alain, et al. Bordes Cortantes. En: Oilfield Review. Invierno, 2001. vol. 12, no. 3, p.38-63.

BRICEÑO GUARUPE, Luis Alberto. Heavy Oil in Colombia and Other Investments Opportunities. En: World Heavy Oil Congress 2009. (5 nov: Isla Margarita, Venezuela). ANH. 2009. p. 19-29.

BRUTON, Greg, et al. PDC Bit Technology for the 21st Century. En: Oilfield Review. Summer, 2014. vol. 26, no. 2, p. 48-57.

CENTALA, Prabhakaran, et al. El diseño de las barrenas: desde arriba hasta abajo. En: Oilfield Review. Summer, 2001. vol. 23, no. 2, p. 4-19.

CERKOVNIK, Jerry, et al. Development of a New IADC Fixed Cutter Drill Bit Classification System. En: IADC/SPE drilling Conference. New Orleans, Louisiana: SPE, 1992. p. 841-848.

DOSUNMU, Adewale; EMUDIAGA, Odesa David y VICTOR, Ossia C. Torsional and Lateral Vibrations of Polycrystalline Diamond Compact PDC Bits in Directional Drilling. En: SPE Nigeria Annual Conference and Exhibition. Lagos, Nigeria: SPE, 2016.

DUARTE DIAZ, Paula Daniela y PRADA FONSECA, María Angelica. Propuesta De Una Metodología De Análisis Causa Raíz Para El Diagnóstico De Las Causas De

Los Problemas Durante La Perforación Del Pozo A En El Campo Castilla. Trabajo de grado Ingenieros de petróleos. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América. 2016. p. 27-33.

ESPINOSA FRANCO, Paula Alejandra y GONGORA SARMIENTO, Andrés Felipe. Aplicación De Una Metodología Propuesta Para El Diagnóstico Y El Análisis De Las Causas Raíz De Los Problemas Operacionales Durante La Perforación De Pozos En El Campo Castilla. Trabajo de grado Ingenieros de petróleos. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América, 2016. p. 30-35.

FELCZAK, Edwin, et al. Lo mejor de ambos mundos: un sistema rotativo direccional híbrido. En: Oilfield Review. Winter, 2011. vol. 23, no. 4, p. 36-45-

GONZALES, Rossana. Motores de Fondo. Disponible en: <http://perfob.blogspot.com/>. Colombia: 2012.

HAMRICK, Todd Robert. Optimization of Operating Parameters for Minimum Mechanical Specific Energy in Drilling. Tesis de Doctorado. Estados Unidos: West Virginia University, College of Engineering and Mineral Resources, 2011. p. 3-10.

HAWKER, David; VOGT, Karen y ROBINSON, Allan. Procedimientos y Operaciones en el Pozo. Manual de Perforacion. Alberta, Canada: Datalog, 2001. p. 58.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Documentacion. Presentacion de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigacion. NTC 1486. Sexta actualizacion. Bogotá D.C.: El Instituto 1998.

_____.Referencias bibliograficas, contenido, forma y estructura. NTC 5613. Bogota D.C.: El Instituto1998.

_____.Referencias bibliograficas, contenido, forma y estructura. NTC 4490. Bogota D.C.: El Instituto1998.

KERR, Callin Joe. PDC Drill Bit Design and Field Application Evolution. En: Journal Of Petroleum Technology. Mar, 1988. vol. 40, no. 3, p. 327-332.

KOEDERITZ, William L. y WEIS, Jeff. A Real-Time Implementation of MSE. En: National Technical Conference and Exhibition. Houston: American Association of Drilling Engineers, 2005.

KOST, Bill, et al. The IADC Roller Bit Classification System. En: IADC/SPE Drilling Conference. New Orleans, Louisiana: SPE, 1992. p. 801-848.

LLANES PARDO, Maria Jose. EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA MECÁNICA DE BROCA HÍBRIDA EN LA PERFORACIÓN DE LA SECCIÓN 8½" EN EL PIEDEMONTES LLANERO. Trabajo de grado Ingenieros de petróleos. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América, 2017. p. 40-58.

MACPHERSON, John. The Science of Stick-Slip. [diapositivas]. Baker Hughes, 2010. 17 diapositivas.

RAMOS RAMOS, Jorge Luis. Estado del arte de brocas de perforación. En: Revista De Investigación: Perforación. Jul, 2011. vol. 4, no. 2, p. 99-114.

ROBAYO PERDOMO, Juan Sebastián y RODRIGUEZ PEÑA, Lina Paola. EVALUACIÓN TÉCNICO-FINANCIERA DE LAS OPERACIONES DE PERFORACIÓN PARA LA DISMINUCIÓN DE LOS TIEMPOS NO PRODUCTIVOS DURANTE LOS VIAJES EN LOS POZOS SELECCIONADOS DEL CAMPO CASTILLA. Trabajo de grado Ingenieros de petróleos. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América, 2016. p. 34-40.

SARMIENTO, Luis Fernando. Petroleum Systems. En: Petroleum Geology of Colombia. Medellín, Colombia: Fabio Cediell, 2011. p. 134-142.

SCHLUMBERGER. Selección De Barrenas En El Proceso De Construcción De Pozos. [diapositivas]. 103 diapositivas.

SUÁREZ, Diego Fernando, et al. Metodología para la selección de pozos candidatos a perforar en condiciones de bajo balance. Aplicación al campo Castilla de Ecopetrol S.A. En: Fuentes: El Reventón Energético. Jul, 2011. vol. 9, no. 2, p.63-71.

ULTERRA. Ficha Técnica Broca 12.250 in | Calibre 2.5". a.

_____. Ficha Técnica Broca 12.250 in | Calibre 6". Colombia: b.

_____. Ficha Técnica Broca 12.250 in | Calibre 4". Colombia: c.

ULTERRA y ECOPETROL. Rock Destruction Analysis. Colombia:

_____. Reporte Final Pozo C217 Sección 12.25 Broca U519S. Colombia: 2014a.

_____. Reporte Final Pozo C316 Sección 12.25 BHA #1 Broca U519S. Colombia: 2014b.

_____. Reporte Final Pozo C316 Sección 12.25 BHA #2 Broca U519S. Colombia: 2014c.

_____. Reporte Final Pozo C316 Sección 12.25 BHA #3 Broca U519S. Colombia: 2014d.

_____. Reporte Final Pozo C322 Sección 12.25 Broca U519S. Colombia: 2014e.

_____. Reporte Final Pozo C342 Sección 12.25 Broca U519S. Colombia: 2014f.

_____. Reporte Final Pozo C361 Sección 12.25 Broca U519S. Colombia: 2014g.

_____. Reporte Final Pozo C216 Sección 12.25 BHA #1 Broca U519S.: Reportes Finales Calibre 6". Colombia: 2017a.

_____. Reporte Final Pozo C216 Sección 12.25 BHA #2 Broca U519S.: Reportes Finales Calibre 6". Colombia: 2017b.

_____. Reporte Final Pozo C226 Sección 12.25 BHA #1 Broca U519S.: Reportes Finales Calibre 6". Colombia: 2018a.

_____. Reporte Final Pozo C226 Sección 12.25 BHA #2 Broca U519S.: Reportes Finales Calibre 6". Colombia: 2018b.

_____. Reporte Final Pozo CN281 Sección 12.25 BHA #1 Broca U519S.: Reportes Finales Calibre 6". Colombia: 2018c.

_____. Reporte Final Pozo CN281 Sección 12.25 BHA #2 Broca U519S.: Reportes Finales Calibre 6". Colombia: 2018d.

_____. Reporte Final Pozo C471 Sección 12.25 Broca U519S.: Colombia: 2014h.

ANEXOS

ANEXO A

BHA CORRIDO EN EL POZO CASTILLA 322

	Tipo	OD (in)	ID (in)	Longitud (ft)
	DP	5,0000	4,0000	5905,86
	HWDP	5,0000	3,0000	92,11
	X-Over	7,3130	2,8100	2,64
	Jar	6,5000	2,7500	32,25
	X-Over	7,2500	2,8100	2,6
	HWDP	5,0000	3,0000	735,64
	X-Over	7,5000	2,8100	2,64
	DC	6,5630	2,8100	89,88
	X-Over	6,5630	2,7500	3,64
	SHOC	8,0000	3,7500	15,31
	HCIM COLLAR	8,0000	1,5000	5,2
	PWD	8,0000	1,5000	4,37
	X-Over	8,0000	3,7500	1,83
	FLOAT SUB	8,0000	3,7500	3
	Motor	8,0000	5,2500	29,03
Bit	12,2500	-	1,15	

Fuente: Ecopetrol S. A. Reporte final de la sección 12 ¼" C322.

ANEXO B

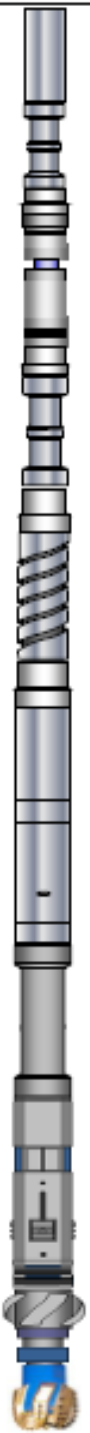
BHA CORRIDO EN EL POZO CASTILLA 342

	Tipo	OD (in)	ID (in)	Longitud (ft)
	DP	5,5000	4,7800	5928,92
	HWDP	5,5000	4,0000	92,21
	X-Over	7,5000	2,8100	2,68
	Jar	6,5000	2,7500	31,96
	X-Over	7,5000	2,8100	2,58
	HWDP	5,5000	4,0000	737,59
	X-Over	7,5000	2,2500	2,71
	DC	6,5000	2,8100	29,99
	X-Over	6,6250	2,8100	3,68
	NMD Collar	8,2500	3,0000	30,31
	HEL (MWD)	8,2500	3,0620	28,52
	Motor	8,0000	-	28,7
	Bit	12,2500	-	1,15

Fuente: Ecopetrol S. A. Reporte final de la sección 12 ¼" C342.

ANEXO C











BHA CORRIDO EN EL POZO CASTILLA 361

	Tipo	OD (in)	ID (in)	Longitud (ft)
	DP	5,5000	4,7800	5852,7
	HWDP	5,5000	4,0000	90
	X-Over	6,5000	3,2500	5
	Jar	6,5000	2,7500	33
	X-Over	6,5000	3,2500	5
	HWDP	5,5000	4,0000	630
	X-Over	6,5000	3,2500	5
	DC	6,5000	2,8100	90
	X-Over	6,4600	2,8100	2,84
	NMD Collar	8,0000	2,8100	31,02
	Upper Saber Sub	8,2500	2,8100	1,53
	MWD Telescope	8,3000	2,8800	25,17
	Lower Saber Sub	8,3250	2,8800	1,25
	SNMDC	8,0000	2,8100	12,05
	Top Sub	8,2500	3,0000	3,83
	VORTEX	9,6300	-	32,02
	Filter Sub	9,6300	-	4,84
POWER DRIVE	9,1300	-	13,75	
Bit	12,2500	-	1,15	

Fuente: Ecopetrol S. A. Reporte final de la sección 12 ¼" C361.

ANEXO D

BHA CORRIDO EN EL POZO CASTILLA 217

Tipo	OD (in)	ID (in)	Longitud (ft)
	5,5000	4,7800	5762
	5,5000	3,2500	366,75
	6,5000	2,7500	29,91
	5,5000	3,2500	489,26
	6,5000	2,3750	3,65
	6,5000	2,7500	61,32
	6,7901	2,7500	2,65
	8,1500	3,2500	34,5
	8,0000	5,2500	28,81
	12,2500	-	1,28

Fuente: Ecopetrol S. A. Reporte final de la sección 12 ¼" CA316.

ANEXO E

BHA #1 CORRIDO EN EL POZO CASTILLA 316

Tipo	OD (in)	ID (in)	Longitud (ft)
DP	5,5000	4,7800	472,4
HWDP	6,6250	3,2500	366,98
Jar	6,9375	2,9130	30,29
HWDP	6,6250	3,2500	458,54
X-Over	6,7500	2,2500	4
DC	6,5000	2,8750	30,54
X-Over	6,5000	2,8125	3,6
NMDC	7,8750	3,5000	29,35
MWD	8,2500	3,0625	27,8
STB	8,0000	2,8125	7,64
Mud Motor	8,0000	5,2500	29,57
Bit	12,2500	-	1,28

Fuente: Ecopetrol S. A. Reporte final de la sección 12 ¼" CA316.

BHA #2 CORRIDO EN EL POZO CASTILLA 316

	Tipo	OD (in)	ID (in)	Longitud (ft)
	DP	5,5000	4,7800	4191,61
	HWDP	6,6250	3,2500	366,98
	Jar	6,9375	2,9130	30,29
	HWDP	6,6250	3,2500	458,54
	X-Over	6,7500	2,2500	4
	DC	6,5000	2,8750	30,54
	X-Over	6,5000	2,8125	3,6
	NMDC	7,8750	3,5000	29,35
	MWD	8,2500	3,0625	28,6
	STB	8,0000	2,8125	7,64
	Mud Motor	8,0000	5,2500	29,57
Bit	12,2500	-	1,28	

Fuente: Ecopetrol S. A. Reporte final de la sección 12 ¼" CA316.

BHA #3 CORRIDO EN EL POZO CASTILLA 316

	Tipo	OD (in)	ID (in)	Longitud (ft)
	DP	5,5000	4,7800	5599,11
	HWDP	6,6250	3,2500	366,98
	Jar	6,9375	2,9130	30,29
	HWDP	6,6250	3,2500	550,25
	X-Over	6,7500	2,2500	4
	DC	6,5000	2,8750	30,54
	X-Over	6,5000	2,8125	3,6
	NMDC	7,8750	3,5000	29,35
	MWD	8,2500	3,0625	28,6
	Mud Motor	8,0000	5,2500	34
Bit	12,2500	-	1,28	

Fuente: Ecopetrol S. A. Reporte final de la sección 12 ¼" CA316.

ANEXO F

BHA CORRIDO EN EL POZO CASTILLA 471

Tipo	OD (in)	ID (in)	Longitud (ft)
DP	5,5000	4,7800	5445,3
HWDP	5,5000	3,2500	366,7
Jar	6,5000	2,7500	29,92
HWDP	5,5000	3,2500	546,31
X-Over	6,6250	2,7500	3,23
DC	6,5000	2,8125	60,37
X-Over	6,5000	2,8125	2,46
NMDC	8,1250	3,0625	29,75
MWD HEL	8,3333	2,7500	29,09
Mud Motor	9,6250	-	29,14
Bit	12,2500	-	1,28

Fuente: Ecopetrol S. A. Reporte final de la sección 12 ¼" CA471.

ANEXO G

DETERMINACION DEL COSTO POR HORA DEL EQUIPO DE PERFORACIÓN

$$\text{Costo por hora} = \frac{\text{Costo del ítem seleccionado}}{432 \text{ horas (18 días)}}$$
$$\text{Costo por hora del equipo de perforación} = \frac{951.499,00 \text{ USD}}{432 \text{ horas}} = 2.202,54 \frac{\text{UDS}}{\text{hora}}$$