

EVALUACIÓN TÉCNICO-FINANCIERA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE BROCAS
POLICRISTALINAS DE CALIBRES EXTENDIDOS CON MOTORES DE FONDO
Y HERRAMIENTAS ROTATORIAS EN LA SECCIÓN 12 ¼" DEL CAMPO
CASTILLA

JUAN DAVID SERRATO SERRATO
JOHN ALEXANDER SUAREZ MONROY

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ D.C.
2017

EVALUACIÓN TÉCNICO-FINANCIERA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE BROCAS
POLICRISTALINAS DE CALIBRES EXTENDIDOS CON MOTORES DE FONDO
Y HERRAMIENTAS ROTATORIAS EN LA SECCIÓN 12 ¼" DEL CAMPO
CASTILLA

JUAN DAVID SERRATO SERRATO
JOHN ALEXANDER SUAREZ MONROY

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

Director:
JUAN CAMILO PUERTO
Ingeniero de petróleos

Asesor:
ALEJANDRO CONTRERAS
Ingeniero de petróleos

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ D.C.
2017

NOTA DE ACEPTACIÓN

Ing. Alejandro Contreras
Presidente del Jurado

Ing. Leandro Gómez
Jurado 1

Ing. Laydy Mora
Jurado 2

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 (E):

Dr. EDGAR DAVID CEDEÑO LIGARRETO

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

Agradezco a Dios todo poderoso por darme los recursos y voluntad para poder realizar y terminar satisfactoriamente este trabajo de grado.

Doy gracias especiales a mi tío Carlos, mi tía Beatriz, mi papá Álvaro, mi mamá Esperanza y mis hermanos Carlos, Carlos Andres y Juan Camilo, que han sido siempre ese motor para hacer las cosas bien día a día y me han enseñado valiosas lecciones de vida, haciendo de mí una mejor persona, el apoyo de todos ustedes me ha llevado a cumplir mis sueños y metas.

Al ingeniero Juan Camilo Puerto por dedicarnos tiempo y paciencia para poder llevar a buen fin este trabajo y sobre todo agradecer su actitud totalmente dada hacia una explicación concreta y eficaz, convirtiéndose en un gran ejemplo profesional para mí. A Ulterra™ y todo su equipo por permitirnos realizar este trabajo en su compañía y conocer la gran familia que componen.

A mi amigo y compañero de tesis John Suarez por trabajar en equipo fuertemente junto a mí para poder realizar este trabajo y desarrollar ideas conjuntas para este proyecto. Igualmente, a la familia Monroy por darme un lugar cómodo y familiar para desarrollar el proyecto en los momentos de arduo trabajo y hacerme sentir como uno más de la familia.

Gracias igualmente al ingeniero Alejandro Contreras que siempre nos guio por los mejores estándares de calidad.

Juan David Serrato Serrato

AGRADECIMIENTOS

En primera medida, agradezco a Dios por brindarme la salud, sabiduría y paciencia para poder cumplir el sueño de ser profesional.

Agradezco al Ingeniero Juan Camilo Puerto, y en general a la compañía Ulterra™ por darnos la oportunidad de llevar a cabo nuestro trabajo de grado, brindándonos conocimientos y tiempo a lo largo de este año 2016.

Sin mi núcleo familiar no habría sido posible alcanzar este sueño, doy gracias a, mi madre por cumplir de manera ejemplar las labores de cabeza de hogar, mi tía Sonia Monroy por estar siempre presente de manera desinteresada e incondicional, en todos los ámbitos en los cuales necesité apoyo y por último, pero no menos importante, a mis dos adorados primos Mauricio y Stefany.

Gracias a mi compañero y amigo Juan David Serrato por escogerme como compañero de tesis y así poder trabajar en equipo, fuerte y establemente a lo largo de todo el desarrollo del proyecto. De igual manera a la familia Serrato en general por acogerme de manera especial en su hogar cada vez que estuve presente.

Gracias al Ingeniero Alejandro Contreras, por apoyarnos en este trabajo y contarnos anécdotas de vida, que nos serán muy útiles en nuestro camino profesional.

John Alexander Suárez Monroy

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	36
OBJETIVOS	37
1. GENERALIDADES DEL CAMPO	38
1.1 HISTORIA DEL CAMPO	38
1.2 LOCALIZACIÓN DEL CAMPO	39
1.3 MARCO GEOLÓGICO	41
1.3.1 Columna estratigráfica.	41
1.3.2 Estratigrafía.	41
1.3.3 Geología del petróleo.	45
1.3.4 Geología Estructural.	46
1.4 HISTORIA DE PRODUCCIÓN	47
1.4.1 Método de producción.	49
1.4.2 Número de pozos.	49
1.4.3 Gráfica de producción neta.	49
1.4.4 Características del yacimiento.	50
2. DISEÑO DE BROCA 12 ¼" DE ULTERRA™ CON CALIBRE CORTO Y ENSAMBLAJE DE FONDO CORRIDO EN EL CAMPO CASTILLA	52
2.1 GENERALIDADES DE LAS BROCAS	52
2.1.1 Mecanismos de corte.	53
2.1.2 Tipos de brocas.	54
2.1.3 Calificación de la Asociación Internacional de Contratistas de Perforación (IADC).	66
2.1.4 Clasificación IADC para definir el tipo broca.	73
2.1.5 Hidráulica de las brocas.	78
2.2 DISEÑO BROCA U519S 12 ¼" DE ULTERRA™ CON CALIBRE CORTO	80
2.3 MOTORES DE FONDO Y HERRAMIENTAS ROTATORIAS (RSS)	82
2.3.1 Motores de fondo.	82
2.3.2 Herramientas rotatorias (RSS-Rotary Steerable System).	91
2.4 ENSAMBLAJE DE FONDO (BHA) CORRIDO CON EL DISEÑO DE BROCA U519S 12 ¼" DE ULTERRA™ CON CALIBRE CORTO	96
2.4.1 Pozo Castilla 322.	96
2.4.2 Pozo Castilla 342.	96
2.4.3 Pozo Castilla 361.	96
3. NUEVO DISEÑO DE BROCA 12 ¼" DE ULTERRA™ CON CALIBRE EXTENDIDO	100
3.1 CALIDAD DEL HUECO	100

3.1.1 Espiralamiento.	100
3.1.2 Vibraciones.	102
3.1.3 Calibre del hueco.	109
3.2 NUEVO DISEÑO DE BROCA DE 4" EN EL GAUGE PAD	111
3.2.1 Diferencias entre el diseño de broca actual y el nuevo diseño.	111
4. IMPLEMENTAR EL NUEVO DISEÑO DE LA BROCA POLICRISTALINA CON CALIBRE EXTENDIDO EN LA SECCIÓN DE 12 ¼" DEL CAMPO CASTILLA	113
5. EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DEL NUEVO DISEÑO DE LA BROCA POLICRISTALINA CON CALIBRE EXTENDIDO EN LA SECCIÓN 12 ¼" EN EL CAMPO CASTILLA	116
5.1 CASTILLA 236	116
5.2 CASTILLA 471	120
5.3 CASTILLA 217	124
5.4 CASTILLA 316	128
5.5. EVALUACIÓN DE LOS POZOS PERFORADOS CON EL NUEVO DISEÑO CON CALIBRE EXTENDIDO	136
5.5.1 Gráfico WOB vs Formación.	136
5.5.2 Gráfico Torque vs Formación.	139
5.5.3 Gráfico Presión vs Formación.	141
5.5.4 Energía mecánica específica (MSE).	144
5.5.5 Gráfico ROP efectiva vs Formación.	154
6. COMPARACIÓN DE LOS DATOS DE TORQUE Y PESO SOBRE LA BROCA DE LOS DOS DISEÑOS DE BROCA CORRIDOS EN LA SECCIÓN DE 12 ¼" EN EL CAMPO CASTILLA	155
7. COMPARACIÓN DE LOS POSIBLES FENÓMENOS VIBRACIONALES DEL NUEVO DISEÑO DE BROCA POLICRISTALINA CON CALIBRE EXTENDIDO CONTRA EL DISEÑO DE BROCA POLICRISTALINA CON CALIBRE CORTO EN LA SECCIÓN DE 12 ¼" EN EL CAMPO CASTILLA	162
8. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RENDIMIENTOS EN ROP Y TIEMPOS TOTALES DE PERFORACIÓN DEL NUEVO DISEÑO DE BROCA POLICRISTALINA CON CALIBRE EXTENDIDO CONTRA EL DISEÑO CON CALIBRE CORTO EN LA SECCIÓN DE 12¼"	175
8.1 POZO CA322	175
8.2 POZO CA342	176
8.3 POZO CA361	177
8.4 POZO CA236	178
8.5 POZO CA471	179
8.6 POZO CA217	180
8.7 POZO CA316	181

8.8 COMPARACIÓN DE TIEMPOS TOTALES	182
8.8.1. Pozos perforados con motor de fondo y KOP somero.	183
8.8.2. Pozos perforados con motor de fondo y KOP profundo.	184
8.8.3. Pozos perforados con herramienta rotaria y KOP profundo.	184
8.9 COMPARACIÓN ROP TOTALES Y EFECTIVAS	185
8.9.1. Pozos perforados con motor de fondo y KOP somero.	185
8.9.2. Pozos perforados con motor de fondo y KOP profundo.	186
8.9.3. Pozos perforados con herramienta rotaria y KOP profundo.	186
9. EVALUACIÓN FINANCIERA	187
9.1 ANÁLISIS DE COSTOS DE INVERSIÓN (CAPEX).	188
9.1.1 Escenario 1 (Diseño de broca con calibre corto).	191
9.1.2 Escenario 2 (Diseño de broca con calibre extendido).	193
9.2 EVALUACIÓN FINANCIERA	195
9.2.1 Valor presente neto (VPN).	195
9.2.2 Tasa de interés de oportunidad (TIO).	196
9.2.3 Flujo de caja.	196
9.3 CONCLUSIÓN FINANCIERA	198
10. CONCLUSIONES	199
11. RECOMENDACIONES	201
BIBLIOGRAFÍA	202
ANEXOS	206

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Localización del Campo Castilla ubicado en la Cuenca de los Llanos Orientales, Colombia.	40
Figura 2. Columna estratigráfica generalizada del Campo Castilla ubicado en la Cuenca de los Llanos Orientales, Colombia.	42
Figura 3. Corte estructural del Campo Castilla ubicado en la Cuenca de los Llanos Orientales, Colombia.	47
Figura 4. Falla por esfuerzo de compresión.	53
Figura 5. Falla por esfuerzo cortante.	54
Figura 6. Tipos de brocas.	55
Figura 7. Brocas tricónicas.	56
Figura 8. Mecanismo de corte de una Broca tricónica.	56
Figura 9. Partes de una broca de dientes de acero.	57
Figura 10. Tipos de cojinetes.	58
Figura 11. Principio de Cizallamiento.	60
Figura 12. Tipos de perfiles de una broca de cortadores fijos.	61
Figura 13. Configuración de perfiles de las brocas PDC.	62
Figura 14. Partes de una aleta.	62
Figura 15. Partes de la aleta en una broca PDC.	63
Figura 16. Cortador PDC.	64
Figura 17. Tamaño y número de cortadores en función de dureza de la formación.	65
Figura 18. Broca PDC con todas sus partes.	65
Figura 19. Desgaste de los cortadores en brocas.	68
Figura 20. Cara del diseño U519S.	81
Figura 21. Diseño U519S.	81
Figura 22. Secciones del motor de fondo con turbina.	83
Figura 23. Turbina de potencia motores de fondo.	84
Figura 24. Partes de un PDM.	84
Figura 25. Válvula muda.	85
Figura 26. Sección de poder de un PDM.	86
Figura 27. Configuraciones Lobe.	86
Figura 28. Secciones de la unidad de transmisión.	87
Figura 29. Ángulo del Bend Housing en un PDM.	88
Figura 30. Anillo ajustable.	89

Figura 31. Ensamblaje de cojinetes.	91
Figura 32. Secciones Rotary Steerable System-Push the bit.	92
Figura 33. Activación de las almohadillas del RSS-Rotary Steerable System.	93
Figura 34. Secciones Rotary Steerable System-Point the bit.	94
Figura 35. Eje rotario del Sistema “Point the bit”.	95
Figura 36. Imagen representativa de un Caliper 3D corrido en hueco espiralado.	102
Figura 37. Modos de vibración.	104
Figura 38. Bit Bounce.	105
Figura 39. Stick Slip.	106
Figura 40. Vibración el torbellino de la broca.	107
Figura 41. Choques laterales.	108
Figura 42. Vibración de la broca o Bit Chatter.	109
Figura 43. Hueco en calibre.	110
Figura 44. Nuevo diseño de broca 12 ¼” de Ulterra™.	111
Figura 45. Comparación fichas técnicas diseño actual vs nuevo diseño.	112
Figura 46. Salida de la broca en el pozo CA236 al alcanzar la formación objetivo.	113
Figura 47. Broca con calibre largo nueva.	114
Figura 48. Broca con calibre largo usada.	114
Figura 49. Broca con calibre extendido nueva pozo CA236.	117
Figura 50. Broca con calibre extendido después de corrida pozo CA236.	117
Figura 51. Ensamblaje de fondo del pozo CA236.	119
Figura 52. Broca con calibre extendido reparada pozo CA471.	121
Figura 53. Broca con calibre extendido después de corrida en el pozo CA471.	121
Figura 54. Ensamblaje de fondo del pozo CA471.	123
Figura 55. Broca con calibre extendido reparada para el pozo CA217.	125
Figura 56. Broca con calibre extendido después de corrida en el pozo CA217.	125
Figura 57. Ensamblaje de fondo del pozo CA217.	127
Figura 58. Broca con calibre extendido reparada para el pozo CA316.	130
Figura 59. Broca con calibre extendido después de corrida en el pozo CA316.	130
Figura 60. Ensamblaje de fondo #1 de la fase 12 ¼” pozo CA316.	133
Figura 61. Ensamblaje de fondo #2 de la fase 12 ¼” pozo CA316.	134

Figura 62. Ensamblaje de fondo #3 de la fase 12 ¼" pozo CA316.	135
Figura 63. Diferencia entre curvas de MSE	149
Figura 64. Comparación entre la medida de fondo y superficie para MSE.	149
Figura 65. Comparación de eficiencia por MSE para	151
Figura 66. Estado mecánico de un pozo en el Campo Castilla.	187

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Calificación IADC de las brocas.	66
Cuadro 2. Características de desgaste en las brocas de cortadores fijos.	69
Cuadro 3. Características de desgaste en las brocas de conos giratorios.	69
Cuadro 4. Ubicación del desgaste en brocas de cuerpo fijo.	71
Cuadro 5. Ubicación del desgaste en brocas de conos giratorios.	71
Cuadro 6. Condición de calibre de la broca.	72
Cuadro 7. Calificación IADC para razón de salida.	73
Cuadro 8. Material del cuerpo de la broca.	74
Cuadro 9. Clasificación IADC para brocas PDC.	75
Cuadro 10. Clasificación IADC para brocas de cono.	77
Cuadro 11. Ángulo del Bend Housing para cada configuración del anillo ajustable.	90
Cuadro 12. BHA corrido en el pozo C322.	97
Cuadro 13. BHA corrido en el pozo C342.	98
Cuadro 14. BHA corrido en el pozo C361.	99
Cuadro 15. Tipos de espiralamiento.	101
Cuadro 16. Acta de operaciones de la broca con calibre largo.	115
Cuadro 17. Detalles de la corrida pozo CA236.	116
Cuadro 18. Parámetros de perforación promedio del pozo CA236.	118
Cuadro 19. Detalles de la corrida pozo CA471.	120
Cuadro 20. Parámetros de perforación promedio del pozo CA471.	122
Cuadro 21. Detalles de la corrida pozo CA217.	124
Cuadro 22. Parámetros de perforación promedio del pozo CA217.	126
Cuadro 23. Detalles de la corrida BHA#1 fase 12 ¼" pozo CA316.	128
Cuadro 24. Detalles de la corrida BHA#2 fase 12 ¼" pozo CA316.	129
Cuadro 25. Detalles de la corrida BHA#3 fase 12 ¼" pozo CA316.	129
Cuadro 26. Parámetros de perforación promedio del pozo CA316.	131
Cuadro 27. Convenciones posibles fenomenos vibraionales.	162

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Propiedades petrofísicas del Campo Castilla.	51
Tabla 2. Información básica de los pozos perforados con calibre largo (12¼”).	115
Tabla 3. Posibles vibraciones pozo CA322.	163
Tabla 4. Posibles vibraciones pozo CA342.	163
Tabla 5. Posibles vibraciones pozo CA361.	163
Tabla 6. Posibles vibraciones pozo CA236.	163
Tabla 7. Posibles vibraciones pozo CA471.	164
Tabla 8. Posibles vibraciones pozo CA217.	164
Tabla 9. Posibles vibraciones pozo CA316.	164
Tabla 10. Tiempos operacionales pozo CA322.	175
Tabla 11. Tiempos operacionales pozo CA342.	176
Tabla 12. Tiempos operacionales pozo CA361.	177
Tabla 13. Tiempos operacionales pozo CA236.	179
Tabla 14. Tiempos operacionales pozo CA471.	180
Tabla 15. Tiempos operacionales pozo CA217.	180
Tabla 16. Tiempos operacionales pozo CA316.	181
Tabla 17. Tiempos operacionales todos los pozos.	182
Tabla 18. Tiempos de viaje todos los pozos.	183
Tabla 19. ROP efectiva y total todos los pozos.	185
Tabla 20. Costos de servicio de perforación por hora.	189
Tabla 21. Campaña de perforación.	190
Tabla 22. Costos por pie perforados para el Pozo C322 en el área de interés.	191
Tabla 23. Costos por pie perforados para el Pozo Castilla 342 en el área de interés.	191
Tabla 24. Costos por pie perforados para el Pozo Castilla 361 en el área de interés.	192
Tabla 25. Costo por pie promedio para el diseño de broca con calibre corto en el área de interés.	192
Tabla 26. Costo de inversión para el diseño de calibre corto.	192
Tabla 27. Costos por pie perforados para el Pozo CA236 en el área de interés.	193

Tabla 28. Costos por pie perforados para el Pozo CA471 en el área de interés.	193
Tabla 29. Costos por pie perforados para el Pozo CA217 en el área de interés.	194
Tabla 30. Costos por pie perforados para el Pozo CA316 en el área de interés.	194
Tabla 31. Costo por pie promedio para el diseño de broca con calibre	194
Tabla 32. Costo de inversión para el diseño de calibre extendido.	195

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Producción neta	50
Gráfica 2. WOB nuevo diseño vs Formación.	136
Gráfica 3. Torque nuevo diseño vs Formación.	139
Gráfica 4. Presión nuevo diseño vs Profundidad.	143
Gráfica 5. MSE nuevo diseño vs Formación.	152
Gráfica 6. ROP efectiva nuevo diseño vs Formación.	154
Gráfica 7. Comparación WOB y TQ antiguo diseño (CA361) vs nuevo diseño (CA236) (perforados con RSS).	157
Gráfica 8. Comparación WOB y TQ antiguo diseño (CA342) vs nuevo diseño (CA471 y CA217) (perforados con DHM y KOP somero).	159
Gráfica 9. Comparación WOB y TQ antiguo diseño (CA322) vs nuevo diseño (CA316) (perforados con DHM y KOP profundo).	161
Gráfica 10. Posibles vibraciones pozo CA322 (Parte 1).	165
Gráfica 11. Posibles vibraciones pozo CA322 (Parte 2).	166
Gráfica 12. Posibles vibraciones pozo CA342 (Parte 1).	167
Gráfica 13. Posibles vibraciones pozo CA342 (Parte 2).	168
Gráfica 14. Posibles vibraciones pozo CA361 (Parte 1).	169
Gráfica 15. Posibles vibraciones pozo CA361 (Parte 2).	170
Gráfica 16. Posibles vibraciones pozo CA236 (Parte 1).	171
Gráfica 17. Posibles vibraciones pozo CA236 (Parte 2).	172
Gráfica 18. Posibles vibraciones pozo CA471.	173
Gráfica 19. Posibles vibraciones pozo CA217.	173
Gráfica 20. Posibles vibraciones pozo CA316.	174
Gráfica 21. Tiempos operacionales pozo CA322.	176
Gráfica 22. Tiempos operacionales pozo CA342.	177
Gráfica 23. Tiempos operacionales pozo CA361.	178
Gráfica 24. Tiempos operacionales pozo CA236.	179
Gráfica 25. Tiempos operacionales pozo CA471.	180
Gráfica 26. Tiempos operacionales pozo CA217.	181
Gráfica 27. Tiempos operacionales pozo CA316.	182
Gráfica 28. Comparación pozos DHM y KOP somero.	183
Gráfica 29. Comparación pozos DHM y KOP profundo.	184
Gráfica 30. Comparación ROP pozos perforados DHM y KOP somero.	185
Gráfica 31. Comparación ROP pozos DHM y KOP profundo.	186

Gráfica 32. Flujo de caja para el escenario 1 (diseño de broca con calibre corto).	197
Gráfica 33. Flujo de caja para el escenario 2 (diseño de broca con calibre extendido).	197

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Determinación de la distancia de las hileras internas.	67
Ecuación 2. Determinación de la distancia de las hileras externas.	68
Ecuación 3. Pérdida de presión en la broca.	78
Ecuación 4. Caballaje de fuerza hidráulica en la broca.	78
Ecuación 5. Caballaje por pulgada cuadrada del área de la broca.	79
Ecuación 6. Velocidad en las boquillas de la broca.	79
Ecuación 7. Fuerza de impacto.	79
Ecuación 8. Fuerza de impacto por pulgada cuadrada.	80
Ecuación 9. Área total de flujo.	80
Ecuación 10. Ecuación Fundamental de la dinámica.	144
Ecuación 11. Energía Mecánica Específica.	145
Ecuación 12. Ecuación de Teale calculo MSE.	146
Ecuación 13. Ecuación Koederitz calculo MSE.	147
Ecuación 14. CCS para rocas permeables.	147
Ecuación 15. CCS para rocas impermeables.	148
Ecuación 16. Eficiencia de perforación.	150
Ecuación 17. Ecuación de costo por pie.	190
Ecuación 18. Expresión matemática del valor presente neto.	195
Ecuación 19. Tasa periódica a partir de la tasa anual.	196
Ecuación 20. Cálculo del VPN para el escenario 1 (diseño de broca con calibre corto).	197
Ecuación 21. Cálculo del VPN para el escenario 2 (diseño de broca con calibre extendido).	198

ABREVIATURAS

Ø	Porosidad
\$B	Costo de la broca
\$R	Costo del equipo de perforación por hora
%	Porcentaje
*	Multiplicación
/	División
'	Pie(s)
”	Pulgada(s)
+	Adición
ΔP_b	Caída de presión a través de la broca
°	Grado(s)
°API	Gravedad API
°F	Grados Fahrenheit
ANH	Agencia Nacional de Hidrocarburos
API	Instituto Americano del Petróleo (<i>American Petroleum Institute</i>)
ATA	Área total de flujo entre las aletas de la broca
BHA	Ensamblaje de fondo (<i>Bottom Hole Assembly</i>)
bls	Barril(es)
bpd	Barriles por día
C1	Carbonera uno
C2	Carbonera dos
Carb	Carbonera
cm	Centrmetro(s)
cP	Centipoise(s)
CPP	Costo por pie
D_{boq}	Diámetro de la boquilla
DC	Collar de perforación (<i>Drill Collar</i>)
DHM	Motor de fondo (<i>Down Hole Motor</i>)
DLS	Tasa de construcción de ángulo (<i>DogLeg Severity</i>)
EOB	Final de la construcción de ángulo (<i>End Of Buildup</i>)
Ez	Estabilizador
F	Fuerza
F_d	Densidad del lodo (<i>Fluid Density</i>)
FD	Pies perforados (<i>Feets Drilled</i>)
ft	Pie(s) (<i>Feet</i>)
FV	Volúmen de la cara (<i>Face Volume</i>)
gal	galón(es)
GPM	Galones por minuto
gr	Gramo(s)
gr/cm^3	Gramos por centímetro cúbico
HHP _b	Potencia hidráulica en la broca (<i>Horse Hydraulic Power on the Bit</i>)

HNBR	Hidrogenado de Nitrilo Butadieno
hr	Hora(s)
HSI	Caballaje hidráulico de la broca por pulgada cuadrada (<i>Horse power Square Inches</i>)
HWDP	Tubería de perforación extra pesada (<i>Heavy Weight Drill Pipe</i>)
i	Tasa de interés
IADC	Asociación Internacional de Contratistas de Perforación (<i>International Association of Drilling Contractors</i>)
ICP	Instituto Colombiano del Petróleo
ID	Diámetro interno (<i>Internal Diameter</i>)
IF	Fuerza de impacto hidráulico (<i>Impact Force</i>)
IR	Área interna de la hilera de cortadores en la broca (<i>Inner Rows</i>)
Jar	Martillo de perforación
JSA	Área de flujo en la cara de la broca (<i>Junk Slot Area</i>)
KBPD	Miles de barriles por día promedio mensual
klb	miles de libras
klbs/pie	Miles de libras por pie
km	Kilómetro(s)
KOP	Profundidad de inicio de trabajo direccional (<i>Kick Off Point</i>)
lb	Libra(s)
lb/gal	Libras por galón
lb/pul²	Libras por pulgada cuadrada
long	Longitud
Lpc	Libra(s) por pulgada cuadrada
m	Masa
MBLS	Millones de barriles
md	Mili-Darcy(s)
MD	Profundidad medida (<i>Measured Depth</i>)
mm	Milímetro(s)
mt	Metro(s)
MWD	Midiendo mientras se perfora (<i>Measuring While Drilling</i>)
N/A	No aplica
NBR	Nitrilo de Butadieno
NC	Número de conexión
NMDC	Collar de perforación no magnético (<i>Non Magnetic Drill Collar</i>)
NPT	Tiempos no productivos de perforación (<i>Non Productive Times</i>)
OD	Diámetro externo (<i>Outer Diameter</i>)
OOIP	Petróleo original en sitio (<i>Original Oil In Place</i>)
OR	Área externa de la hilera de cortadores en la broca (<i>Outer Rows</i>)
P	Presión
pág	Página

PDC	Diamante policristalino compacto (<i>Polycrystalline Diamond Compact</i>)
PDM	Motor de desplazamiento positivo (<i>Positive Displacement Motor</i>)
pies/hr	Pies por hora
psi	Libra(s) por pulgada cuadrada (<i>Pound Square Inches</i>)
pul	Pulgada(s)
Q	Caudal
R_{bit}	Radio de la broca
REG	Conexión regular
rev	Revolución(es)
rev/gal	Revoluciones por galón
ROP	Tasa de penetración (<i>Rate Of Penetration</i>)
RPM	Revoluciones por minuto
RSS	Herramienta Rotaria direccional (<i>Rotary Steerable System</i>)
S. A.	Sociedad anónima
scf/stb	Volumen de gas en pies cúbicos estándar por volumen en barriles de líquido estándar
T	Temperatura
TCI	Insertos de carburo de tungsteno (<i>Tungsten Carbide Inserts</i>)
TD	Profundidad verdadera (<i>True Depth</i>)
T_d	Tiempo Perforando (<i>Time Drilling</i>)
tea	Tasa de interés anual
tem	Tasa de interés mensual
TDS	Sistema de empuje Top Drive (<i>Top Drive System</i>)
TFA	Área total de flujo (<i>Total Flow Area</i>)
TSP	Diamante termoestable (<i>Thermally St看ble Cutter</i>)
T_t	Tiempo del viaje (<i>Time Trip</i>)
TVD	Profundidad vertical verdadera (<i>True Vertical Depth</i>)
USD	Dólares norte americanos (<i>United States Dollars</i>)
USD/hr	Dólares americanos por hora
V_n	Velocidad en las boquillas de la broca
VPN	Valor Presente Neto
WOB	Peso sobre la broca (<i>Weight On Bit</i>)
WTI	Intermediario del oeste de Tejas (<i>West Texas Intermediate</i>)
XO	Sustituto (<i>Cross Over</i>)
Yto	Yacimiento

GLOSARIO

ACUÍFERO: formación geológica compuesta por una capa permeable saturada de agua sellada por capas impermeables en sus alrededores.

ACUMULACIÓN: fenómeno natural en el cual un cuerpo individual de petróleo se entrapa en un yacimiento.

ANTICLINAL: Pliegue en el que las rocas estratificadas buzan en sentido contrario a partir de un plano denominado axial. Se caracteriza por que las capas situadas en el interior de la curvatura son las más antiguas.

ARCILLA: material sedimentario detrítico no cementado constituido generalmente de silicatos con partículas de tamaño inferior a 1/256 mm, provenientes de la alteración física y química de las rocas y minerales que contienen feldespato. Los principales tipos de Arcillas son el caolín, la bentonita y la montmorillonita. Dependiendo de su tamaño de grano se pueden clasificar en dos grupos. Arcillas limosas cuando el grano oscila entre 4 y 62 micras o Arcillas finas cuando un tercio de sus partículas son de diámetro menor a 4 micras. Se les considera carbonosas cuando son ricas en materia orgánica.

ARCILLOLITA: roca sedimentaria detrítica proveniente de la consolidación y diagénesis de la acumulación de Arcilla. Su tamaño de grano se caracteriza por ser inferior a 1/256 mm. Se considera una roca compacta y sin fisilidad.

ARENA: material sedimentario detrítico no cementado formado por clastos cuyo diámetro oscila entre 1/16 micras y 4 milímetros. Están compuestas en su mayoría de cuarzo y feldespatos conteniendo además otros minerales, tomando el nombre del mineral de importancia económica. Las arenas son depositadas en las playas, depresiones y desiertos. Son transportadas por el mar y ríos, pero principalmente por el viento.

ARENISCA: roca sedimentaria clástica, proveniente de la consolidación y diagénesis de la acumulación de arena. Se caracterizan por tener tamaños de grano que oscilan entre 1/16 micras y 4 milímetros. Tras las Lutitas son las rocas sedimentarias más comunes en la corteza terrestre.

AZIMUT: es una medida angular en un sistema de coordenadas esférico y se mide desde el punto cardinal norte. El azimut de un punto hacia el Este es de 90° y hacia el Oeste de 270° sexagesimales. El término azimut solo se usa cuando se trata del norte geográfico.

BHA: la porción inferior de la sarta de perforación, que consiste (desde el fondo hacia la superficie de un pozo vertical) en la broca, la reducción para la broca, un motor de lodo (en ciertos casos), los estabilizadores, la columna de perforación

pesada, los dispositivos que operan por golpes ("tijeras o percutores") y los cruces para las diversas formas de roscas. El arreglo de fondo de pozo debe proporcionar la fuerza para que la broca fracture la roca (peso sobre la broca), sobreviva en un ambiente mecánico hostil y proporcione al perforador el control direccional del pozo. A menudo, el arreglo incluye un motor de lodo, el equipo de medición y de perforación direccional, las herramientas de adquisición de mediciones durante la perforación, las herramientas de adquisición de registros durante la perforación y otros dispositivos especiales.

BOMBA TRIPLEX: bomba alternativa de desplazamiento positivo que está configurada con tres émbolos. Las bombas triples son la configuración más común de bomba utilizada tanto en operaciones de perforación como en servicios a pozos. Las bombas utilizadas en actividades de servicios a pozos son capaces generalmente de manejar un amplio rango de tipos de fluidos, incluso fluidos corrosivos, fluidos abrasivos y lechadas con partículas relativamente grandes.

BOQUILLAS: dirige el chorro del fluido de perforación que sale a través de las brocas. Es un orificio pequeño que logra que la velocidad del fluido aumente generando un chorro de alta velocidad. Los tamaños de las boquillas se miden generalmente en 1/32 pul.

BROCA: herramienta utilizada para triturar o cortar la roca. Todo lo que se encuentra en un equipo de perforación asiste directa o indirectamente a la broca para la trituración o el corte de la roca. La broca se encuentra en la parte inferior de la sarta de perforación y debe cambiarse cuando se desgasta excesivamente y deja de avanzar.

BROCA PDC: herramienta de perforación que utiliza cortadores de un compacto de diamante policristalino (PDC) para cizallar la roca con un movimiento continuo de raspado. Estos cortadores son discos de diamante sintético de 1/8 pulgada de espesor y 1/2 a 1 pulgada de diámetro aproximadamente. Las brocas de PDC son efectivas para la perforación de formaciones de lutita, especialmente cuando se utilizan en combinación con lodos base aceite.

BUZAMIENTO: ángulo que forma la superficie de un estrato con la horizontal, medido en el plano que contiene la línea de máxima pendiente.

CABALGAMIENTO: Conjunto de capas rocosas de edad más antigua que se superponen sobre otras de edad más moderna por efecto de presiones laterales.

CALIZA: roca sedimentaria de origen químico y/o orgánico, de textura granular fina a gruesa con tamaño variable. Contiene principalmente calcita y en menor proporción dolomita, cuarzo, aragonito, siderita y materia orgánica.

CAMPO: área consistente de uno o múltiples yacimientos agrupados o relacionados con aspectos geológicos estructurales y/o condiciones estratigráficas similares. Pueden existir uno o varios yacimientos en un campo separados de manera vertical por una capa de roca impermeable o de manera horizontal separados por barreras geológicas.

CARBURO DE TUNGSTENO: también llamado carburo de wolframio. Es un compuesto cerámico de gran dureza formado a base de wolframio y carbono. Es utilizado principalmente para trabajar el acero y romper materiales muy duros.

COJINETE: es la pieza cilíndrica en donde se apoya y gira el árbol transmisor de momento giratorio de una máquina. Su función es la de disminuir el rozamiento de las superficies de contacto.

COLUMNA ESTRATIGRÁFICA: representación gráfica de las formaciones que se pueden encontrar en el subsuelo en una zona determinada, tal como se han sedimentado desde las más antiguas en la parte inferior y las más recientes en la parte superior.

COLLAR DE PERFORACIÓN: es un conjunto de tubos pesados de acero con espesor de pared gruesa, hace parte de la sarta de perforación y se ubica encima de la broca para aplicar peso sobre ella. El collar de perforación produce la carga axial requerida por la broca para mantenerse centralizada y hace más efectiva la penetración.

COLLARES DE PERFORACIÓN NO MAGNÉTICOS: son utilizados en el BHA con el fin de evitar la interferencia con aparatos electrónicos hechos para aplicaciones de perforación direccional. Se fabrican en monel el cual es una aleación comercial con razones níquel con cobre de aproximadamente dos a uno de peso; es más duro que el cobre, extremadamente resistente a la corrosión y posee una elevada resistencia al impacto.

CONCORDANTE: conjunto de estratos que representan un período de sedimentación continuo.

CONGLOMERADO: roca sedimentaria clástica, de tipo detrítico, compuesta principalmente por clastos redondeados en una matriz de arena, limo o material cementante natural. Tiene un tamaño de grano aproximado de 4 milímetros. Han sido clasificados de diversas maneras, según sus texturas o en la composición de sus cementos.

CONTRATO DE CONCESIÓN: contrato entre dos personas con el objeto de otorgar a una persona llamada concesionario, la prestación, operación, explotación, organización y/o gestión, total o parcial, de un producto, marca o servicio, o la

construcción, explotación o conservación de una obra o bien, destinados al servicio o uso público

CORAZONAMIENTO: es la operación de corte y remoción de la roca del pozo, puede ser o no parte del yacimiento, estos cortes se llaman Núcleos. Obtener núcleos proporciona información relevante para el estudio de la roca y yacimientos del subsuelo.

CRETÁCICO: tercero en antigüedad de los tres periodos en que se divide el Mesozoico. Abarca aproximadamente entre los 145,5 y los 65 millones de años de los tiempos actuales.

CUENCA: depresión de gran tamaño, cuyos terrenos están constituidos por capas de sedimentos orgánicos (vegetales y animales), depositados en épocas geológicamente pasadas.

DETRÍTICOS: 1. Partículas sólidas arrastradas y depositadas, procedentes del exterior de una cuenca. 2. Sedimentos o rocas formados predominantemente por partículas detríticas. Sinónimo: clásticos.

DELIMITACIÓN: actividad de exploración que caracteriza las fronteras del yacimiento por medio de distintas técnicas como análisis de presiones, sísmica o perforación de pozos delimitadores.

DESARROLLO: actividad que incrementa, o reduce, reservas por medio de la perforación de pozos de explotación.

DESCUBRIMIENTO: incorporación de reservas atribuible a la perforación de pozos exploratorios que prueban la presencia de hidrocarburos en las formaciones prospecto.

DEPRESIÓN: área de relieve terrestre situada por debajo del nivel de las regiones que la rodean. También se considera como depresión al relieve que se encuentra por debajo del nivel del mar.

DIAGRAMA DE POZO: un diagrama esquemático que identifica los componentes principales de la terminación instalados en un pozo. La información incluida en el diagrama de pozo se refiere a las dimensiones principales de los componentes y a la profundidad en la que éstos se localizan. Para cualquier operación de intervención, debe existir un diagrama de pozo actualizado disponible para permitir que los ingenieros y los operadores de equipos seleccionen el equipamiento más apropiado y preparen los procedimientos operativos que sean compatibles con cualquier restricción de fondo de pozo.

DISCORDANTE: es una superficie de erosión entre dos cuerpos de roca, que representa un hiato o espacio significativo en la sucesión estratigráfica.

DST: pruebas de pozo realizadas con la sarta de perforación aún dentro del pozo. Con frecuencia denominadas DST, estas pruebas se realizan usualmente con una herramienta de cierre dentro del pozo que permita que el pozo se abra y se cierre en el fondo del orificio con una válvula accionada desde la superficie. Se acostumbra a montar uno o más medidores de presión dentro de la herramienta DST que se leen e interpretan después de terminada la prueba. La herramienta incluye un empacador accionado desde la superficie que pueda aislar la formación del anillo existente entre la sarta de perforación y el encamisado, forzando así a cualquier fluido que se produzca a entrar solamente por la sarta de perforación. Al cerrar el pozo en el fondo, se minimiza el postflujo y se simplifica el análisis, especialmente para formaciones con bajas tasas de flujo. A veces, la sarta de perforación se llena con un gas inerte, usualmente nitrógeno, para realizar estas pruebas.

EMBOLADA: evento en el cual la broca y sus aletas se llenan de Arcilla impidiendo que ésta corte, se produce por la mala limpieza del pozo o una mala selección del fluido de perforación.

ENSAMBLAJE DE FONDO: es la sección de la sarta de perforación que incluye el conjunto de herramientas entre la broca y la tubería de perforación, consiste en una barra de perforación (Drill Collar), tubería pesada (Heavy Weight), estabilizadores y accesorios. El BHA o ensamblaje de fondo tiene como funciones proporcionar el peso requerido sobre la broca para hacer romper las formaciones a perforar y minimizar vibraciones y pegamentos de la sarta de perforación.

EOCENO: periodo del Paleógeno, segundo en antigüedad de las tres épocas en que se divide el Paleógeno. Abarca aproximadamente entre los 55,8 y los 33,9 millones de años antes de los tiempos actuales.

EQUIPO DE PERFORACION: la máquina utilizada para perforar un pozo. En las operaciones terrestres, el equipo de perforación incluye virtualmente todo salvo los alojamientos. Los componentes principales del equipo de perforación son los tanques de lodo, las bombas de lodo, la torre de perforación o el mástil, el malacate, la mesa rotativa o la unidad de mando superior, la sarta de perforación, el equipo de generación de potencia y el equipo auxiliar. En las áreas marinas, el equipo de perforación comprende los mismos componentes que en tierra firme, pero no los componentes de la embarcación o la plataforma de perforación propiamente dicha. El equipo de perforación a veces se conoce como "paquete de perforación", particularmente en las áreas marinas.

EROSIÓN: es el proceso de denudación de las rocas. Puede ser físico, químico y descomposición biológica.

ESPESOR TOTAL: es la medida en forma perpendicular a su extensión lateral. Hace referencia a la distancia que tiene un estrato desde su base hasta su tope.

ESPESOR NETO: espesor del estrato en el cual hay presencia de hidrocarburo. Se diferencia del espesor total debido a que el espesor neto despreja la parte del estrato saturada de agua.

ESTATOR: es la parte fija de una máquina rotativa, contiene una parte móvil (rotor) y puede estar compuesta por un imán natural o varias bobinas sobre un núcleo metálico. Es uno de los dos elementos fundamentales para transmisión de una potencia.

ESTRATIGRAFÍA: rama de la geología que estudia e interpreta los procesos registrados en las sucesiones sedimentarias, que permite conocer la naturaleza y disposición de las rocas estratificadas, también la correlación tanto de materiales como de los sucesos y la ordenación temporal correcta.

FACIES: conjunto de rocas sedimentarias o metamórficas con características determinadas, ya sean paleontológicas o litológicas que ayudan a reconocer los ambientes sedimentarios o metamórficos, respectivamente, en los que se formó la roca.

FACTOR DE RECOBRO: representa el porcentaje de la totalidad de petróleo o gas bajo la tierra en un área determinada, extraíble, con rentabilidad económica.

FALLA: fractura del terreno en la corteza terrestre a lo largo de la cual se mueven los bloques rocosos que son separados por ella. Se genera por esfuerzos compresionales, tensionales o de cizallamiento. Se pueden clasificar en tres tipos distintos, falla normal, inversa, o de rumbo.

FALLA INVERSA: falla caracterizada por el movimiento descendente del piso con respecto al techo o por el movimiento ascendente del techo con respecto al piso. En algunos casos se pueden presentar ambos movimientos. Generalmente son producto de los esfuerzos de compresión. También se le conoce como falla antitética.

FALLA NORMAL: también se conoce como falla directa. Se caracteriza por el movimiento descendente del techo con respecto al piso o el movimiento ascendente del piso con respecto al techo. En algunos casos se pueden presentar ambos movimientos. Generalmente son producto de los esfuerzos tensionales.

FORMACION: unidad litoestratigráfica fundamental. Cuerpo de rocas identificado por sus características litológicas y su posición estratigráfica.

GANCHO: el equipo de gran capacidad en forma de "J" utilizado para colgar varios otros equipos, en especial la unión giratoria y el vástago de perforación, los brazos del elevador o las unidades de mando superior. El gancho se fija a la parte inferior del bloque viajero (aparejo móvil) y permite levantar cargas pesadas con el bloque viajero. El gancho se encuentra trabado (el estado normal) o bien rota libremente, de modo que puede acoplarse o desacoplarse con los elementos posicionados en el piso de perforación, sin limitarse a una sola dirección.

GEOLOGÍA DEL PETRÓLEO: rama de la geología que estudia los aspectos relacionados a la formación de yacimientos petrolíferos y la prospección de los mismos.

GRAVEDAD API: escala arbitraria designada por el Instituto Americano del Petróleo en donde se designa por medio de la gravedad específica del hidrocarburo, la calidad y el tipo de crudo.

HIATO: hace referencia a un periodo donde no hubo depositación o se depositó el estrato, pero se erosionó completamente.

INFRAYACENTE: indica que es una formación o unidad de roca que se encuentra cubierta por otra.

INCLINACIÓN: ángulo que forma la línea de máxima pendiente de una superficie de un estrato o falla con su proyección sobre el plano horizontal.

JUNTA KELLY: es un tubo de acero pesado hueco de forma cuadrada, triangular o hexagonal. Se instala al extremo superior de la sarta de perforación, tiene roscas a la izquierda y la conexión inferior que se enrosca a la sarta de perforación. Proporciona conexión para que el fluido de perforación entre a la tubería.

KERÓGENO: parte insoluble de la materia orgánica contenida en sedimentos bituminosos. Término que agrupa los productos naturales derivados de la materia orgánica, compuestos por hidrógeno y carbono, fundamentalmente.

LAVADO DEL HUECO: también conocido como wash out, es una región ampliada del pozo, una sección de pozo con mayor calibre al de la broca. El lavado del hueco puede ser causado por el exceso de velocidad en las boquillas de la broca, en formaciones blandas o no consolidadas, puntos donde se deja la sarta estática mientras se realizan circulaciones para limpiar el hueco de los cortes perforados.

LIMOLITA: roca sedimentaria detrítica, perteneciente al grupo de las rocas clásticas formada por limo endurecido, de grano fino, no laminada. El tamaño de sus granos está entre 0,0039 y 0,062 milímetros, se compone principalmente de cuarzo, hierro, calcita y en menor proporción de Arcilla y fragmentos de otros minerales.

LUTITA: roca sedimentaria detrítica de textura pelítica, variopinta; es decir, integrada por detritos clásticos constituidos por partículas de los tamaños Arcilla y del limo (0,0006 a 0,0625 mm). Su ambiente de deposición es en llanuras de inundación de ríos, parte de distales abanicos, fondos de lagos y mares.

MARCO GEOLÓGICO: en cuanto a la industria petrolera, se le puede definir como conjunto de información geológica de un área de interés la cual normalmente contiene la estratigrafía (columna estratigráfica), rocas presentes en el área, sistema petrolífero, propiedades del yacimiento, procesos de migración y entrapamiento del petróleo y demás datos geológicos que sirven como antesala o contextualización al estudio principal. El área de cobertura dependerá de la escala a la que se esté trabajando, puede ser de manera regional o puntual.

MARTILLO DE PERFORACIÓN: es un dispositivo mecánico, hidráulico o hidromecánico que se coloca en la sarta de perforación para entregar una fuerza de impacto a otro componente de fondo de pozo, especialmente cuando se ha quedado atascado ese componente. Hay dos tipos principales, los martillos hidráulicos y mecánicos.

MESSURING WHILE DRILLING: es una práctica estándar en los pozos direccionales en donde se realizan mediciones en el fondo del pozo de las propiedades físicas (presión, temperatura y trayectoria del pozo en el espacio de tres dimensiones). La información es almacenada en la memoria durante algún tiempo para ser luego transmitido a la superficie.

MIGRACIÓN: movimiento de hidrocarburos desde la roca generadora hasta la roca almacenadora. El movimiento de hidrocarburos desde la roca generadora es denominado migración primaria.

MIOCENO: cuarta época de la era Cenozoica y primera época del periodo Neógeno. Comenzó hace 23,3 millones de años y finalizó hace 5,3 millones de años.

OLIGOCÉNO: tercera época del periodo Paleógeno, abarca desde 35,7 a 23,5 millones de años. Sucedieron un sinnúmero de colisiones de las placas de la corteza terrestre y fenómenos que contribuyeron a elevar una extensión o sistema de cadenas de montañas.

PALEOCENO: es la primera época del periodo Paleógeno de la era Cenozoica o terciaria. Abarcó un tiempo desde 65 millones de años hasta 58 millones de años.

PIN: es la unión masculina o rosca que se ve fuera de la parte de la tubería que conecta dos tubos, tiene diferentes tamaños y tipos de enroscados. La rosca que es interna en el tubo se llama caja.

POZO: hoyo o hueco profundo que se hace en tierra, especialmente para sacar agua o petróleo procedente de yacimientos subterráneos.

POZO DE DESARROLLO: pozo perforado en un área probada con el fin de producir hidrocarburos.

POZO DIRECCIONAL: es un pozo que requiere el uso de una herramienta o técnicas especiales para asegurar que la trayectoria del pozo llegue a un objetivo particular, normalmente se ubica lejos de la ubicación en superficie.

POZO EXPLORATORIO: pozo que se perfora sin conocimiento detallado de la estructura rocosa subyacente con el fin de encontrar hidrocarburos cuya explotación sea económicamente rentable.

PRESION DE PORO: presión que ejerce un fluido en los espacios porosos de la roca. También es llamada presión de la formación o presión poral, está en función de los fluidos de la formación y de las cargas que estos estén soportando.

REOLOGÍA: ciencia y estudio de la deformación y el flujo de la materia. El término también se utiliza para indicar las propiedades de un líquido dado, como en la reología de los lodos. La reología es una propiedad sumamente importante de los lodos de perforación, los fluidos de perforación de yacimiento, los fluidos de reacondicionamiento y terminación, los cementos y los fluidos y píldoras especializados. La reología del lodo se mide continuamente durante la perforación y se ajusta con aditivos o dilución para cumplir con las necesidades de la operación.

ROCA GENERADORA: roca rica en contenido de materia orgánica, que si recibe calor en grado suficiente generara petróleo o gas. Normalmente las calizas o Lutitas son rocas generadoras o rocas madre como también se les conoce. Contienen aproximadamente el 1% de materia orgánica y al menos 0,5% de carbono orgánico total. Una roca generadora rica puede contener hasta el 10% de materia orgánica.

ROCA RESERVORIO: roca con un medio poroso que puede almacenar fluidos (agua, aceite o gas). Es una roca rodeada de rocas sellos.

ROCA SEDIMENTARIA: roca que se forma por acumulación de sedimentos, los cuales son partículas de diversos tamaños que son transportadas por el agua, hielo o aire y sometidas a procesos físicos y químicos y dan lugar a materiales consolidados. Las rocas sedimentarias pueden formarse a las orillas de los ríos, en el fondo de los barrancos, valles, lagos, mares y en desembocaduras de los ríos. Se hallan dispuestas formando capas o estratos. Cubren más del 75% de las rocas en superficie en el planeta tierra.

ROCA SELLO: roca impermeable que no permite la migración de hidrocarburos. Es una roca con una permeabilidad y porosidad baja.

SARTA DE PERFORACIÓN: tubería de acero que se une para formar un tubo desde la broca hasta la plataforma de perforación. El conjunto gira para transmitir las fuerzas de empuje y rotación a la broca llevando a cabo la operación de perforación.

SECCIÓN: intervalo de perforación donde se utiliza un calibre igual de broca, este intervalo es perforado a través de las formaciones. Un pozo comprende dos o más secciones los cuales llevan los diferentes calibres de revestimientos.

SISTEMAS ROTATIVOS DIRECCIONALES: es una herramienta diseñada para perforar en forma direccional con rotación continua desde la superficie, lo que elimina la necesidad de deslizar un motor direccional. Los sistemas rotativos direccionales son desplegados generalmente durante la perforación de pozos direccionales, horizontales, o de alcance extendido.

SOMERO: relativo a zonas, aguas, medios, condiciones, etc. cerca de la superficie del agua.

SUPRAYACENTE: palabra que define la ubicación por arriba de algo, su antónimo sería Subyace que en latín sería por debajo de algo en particular.

TALADRO: también llamado torre de perforación, es el equipo utilizado para realizar la perforación del suelo hasta llegar a la trampa petrolífera. Los principales componentes de un taladro son los tanques de lodo, las bombas de lodo, la torreo mástil, el malacate, la mesa giratoria o el TDS, la sarta de perforación, el equipo de generación de energía y equipos auxiliares.

TOOLFACE: es un término utilizado a menudo para referirse a la orientación y posición del motor de fondo. Hace referencia a la herramienta que se usa para tomar medidas de inclinación y azimut. Existen dos tipos de Toolface, el gravitacional y el magnético.

TOP DRIVE: sistema de rotación que puede estar conformado por un motor eléctrico o hidráulico, se encarga de hacer rotar la sarta de perforación y la broca. Genera mayores beneficios para la operación de perforación que la junta Kelly.

TORQUE DE PERFORACIÓN: es la fuerza mecánica generada por el TDS o la mesa rotaria, necesaria o aplicada para hacer rotar la sarta de perforación para vencer las fuerzas presentes a lo largo de la trayectoria del pozo.

TORQUE Y ARRASTRE: es la fuerza que se produce entre las superficies de contacto de las conexiones de la tubería y las paredes del pozo causado por la rotación de la sarta de perforación. Estas fuerzas reducen la capacidad de hacer girar la sarta de perforación deben ser reducidas para evitar vibraciones y daños en las herramientas entre otros.

TRAMPA: en cuanto a la industria petrolera se refiere, es una estructura geológica que hace posible la acumulación y concentración del petróleo, sin posibilidad alguna de migración.

TRAMPA ESTRATIGRÁFICA: contenedor geológico sellado con capacidad para retener hidrocarburos, formado por los cambios producidos en el tipo de roca o por acuñamientos, discordancias o rasgos sedimentarios.

TRAMPA ESTRUCTURAL: se describe como una falla que pone en contacto una roca permeable con una roca porosa, produciendo un escalón donde se acumula petróleo. También puede ser un pliegue anticlinal que forma un recipiente invertido, en el que queda atrapado el petróleo.

TRANSLÚCIDO: cuerpo a través del cual pasa la luz, pero no deja ver sino confusamente lo que hay detrás de él.

TUBERÍA DE REVESTIMIENTO: tubería de gran diámetro que se pone en un pozo abierto y se cementa en su lugar. El diseñador debe tener en cuenta una gran variedad de fuerzas, tales como colapso, ráfaga y el fracaso a la tracción. La mayoría de las conexiones de los revestimientos se fabrican con roscas pin en cada extremo y de corta longitud acoplamientos. La tubería de revestimiento está diseñada para proteger las formaciones de agua dulce o aislar formaciones con diferentes gradientes de presión.

VÁLVULA MUDA: es una válvula anti retorno o válvula check. Tiene como objetivo cerrar por completo el paso del fluido en circulación en un sentido y dejar paso libre en el otro sentido del flujo.

VIAJE: es el acto de sacar la sarta de perforación o de sustituirla en el fondo del pozo. Un viaje de tubería se realiza por lo general debido a que se ha dejado de perforar de manera eficiente o para un cambio en el BHA.

VOLUMEN SHALE: es el volumen total de Arcillas presentes en una matriz de arenas. El volumen shale da el porcentaje total de Arcillas presentes en la matriz una arena.

YACIMIENTO PETROLÍFERO: es una acumulación natural de hidrocarburos en el subsuelo, contenidos en rocas porosas o fracturadas (roca reservorio). Los hidrocarburos naturales, como el petróleo crudo y el gas natural, son retenidos por formaciones de rocas suprayacentes con baja permeabilidad.

ZONA PRODUCTIVA: un yacimiento o porción de un yacimiento que contiene hidrocarburos producibles económicamente. El término deriva del hecho de que puede "producir" ganancias. El término productivo también hace alusión a la arena productiva o zona productiva. El intervalo en el que existen secciones productivas presentes es la zona productiva total; las porciones más pequeñas de la zona productiva total que satisfacen los criterios locales de zona productiva (tales como un grado mínimo de porosidad, permeabilidad y saturación de hidrocarburos) corresponden a la zona productiva neta.

RESUMEN

TITULO: “EVALUACIÓN TÉCNICO-FINANCIERA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE BROCAS POLICRISTALINAS DE CALIBRES EXTENDIDOS CON MOTORES DE FONDO Y HERRAMIENTAS ROTATORIAS EN LA SECCION 12 ¼” DEL CAMPO CASTILLA”.

El presente proyecto tiene como objetivo general evaluar técnica y financieramente la implementación de brocas policristalinas con calibres extendidos, corridas con motores de fondo y herramientas rotatorias en la sección 12 ¼" de los pozos del Campo Castilla, para lograr el objetivo, el nuevo diseño fue corrido en cuatro pozos piloto. La evaluación consiste en una parte técnica y otra financiera; la técnica evaluó los desempeños y los tiempos totales de operación del nuevo diseño con motores de fondo y herramientas rotarias, mientras que la financiera fue hecha utilizando como indicador financiero la metodología del valor presente neto (VPN).

Durante la realización del proyecto, se llevaron a cabo diferentes actividades las cuales están presentadas a lo largo del trabajo. Se describió el campo donde fue corrido el nuevo diseño de broca PDC para definir la localización de los pozos; la descripción tiene un análisis de las formaciones de la sección 12¼" de los pozos, para determinar su composición litológica y así posteriormente poder relacionarla con el desempeño de la broca en cada formación perforada.

Posteriormente, se presentan los dos tipos de broca a comparar. En primera medida, se exponen las características técnicas de la anterior broca utilizada con calibre corto y los pozos realizados con esta, luego se presenta el nuevo diseño de broca con calibre largo con sus respectivas modificaciones y la información pertinente a la comprobación de la implementación. Para analizar el comportamiento del nuevo diseño, se utilizó el método de calificación IADC y así poder determinar el desempeño de la broca con su condición de desgaste, también se tomó en cuenta las tasas de penetración, el BHA utilizado y el perfil del pozo.

Se realiza la evaluación del rendimiento y de los posibles fenómenos vibracionales presentes en las corridas de la broca con calibre extendido en los cuatro (4) pozos en función de los parámetros de perforación (revoluciones por minuto, peso sobre la broca, torque, energía mecánica específica y presión) y las distintas formaciones atravesadas. Se compara el anterior diseño de broca con calibre corto y el nuevo diseño de broca con calibre largo a partir del peso sobre la broca y torque presentados en cada caso, posteriormente se determina las ventajas técnicas en función de los tiempos totales de operación y financieras (utilizando la metodología del indicativo valor presente neto) del diseño de calibre extendido contra el diseño de calibre corto.

PALABRAS CLAVE: Brocas Policristalinas, Calibres Extendidos, Motores Fondo, Herramientas Rotatorias, Campo Castilla, Cuenca Llanos Orientales.

INTRODUCCIÓN

La constante búsqueda de cambios o mejoras tecnológicas siempre ha caracterizado la industria de la perforación, donde su objetivo general es la reducción de costos que conlleva a una optimización y mejora continua de procesos, traducidos en una disminución de tiempos totales de perforación. Factores como el incremento del desarrollo de yacimientos carbonatados, la explotación de yacimientos no convencionales y la constante ansiedad por aumentar el factor de recobro, han creado aún más la necesidad de comprender las diferentes operaciones para perforar las formaciones complejas y profundas.

El Campo Castilla, ubicado en la Cuenca de los Llanos Orientales, aporta una cuota alta a la producción de hidrocarburos nacionales, convirtiéndose en un campo altamente desarrollado, que exige un manejo general eficiente. La complejidad del campo, se ha convertido en el principal motor de búsqueda de nuevos diseños de broca que tengan mayor rendimiento en la perforación, manteniendo la calidad del hueco y una buena respuesta direccional en los pozos tipo "J" que caracterizan dicho campo.

Cualquier mejora que se presente en la eficacia de las herramientas que son utilizadas en la perforación y explotación de un campo tan representativo en la producción nacional como Castilla, impulsa el fortalecimiento y crecimiento económico del país. La creación e implementación de nuevos diseños de brocas, permite mejorar ciertas características de los diseños anteriores adaptándolos a las exigencias técnicas y económicas de cada proyecto, llevando a que sus resultados sean más óptimos y así la eficacia de ejecución de las actividades planeadas se vean reflejadas en una reducción significativa en los tiempos no efectivos, traducidos al final en tiempos totales de perforación que conlleva a valiosos beneficios monetarios para la operadora encargada del campo, en este caso Ecopetrol S.A y para la prestadora de servicios al tener la propiedad y reconocimiento de una tecnología moderna y funcional.

Este proyecto se realizó con el fin de evaluar el efecto de una broca PDC con calibre extendido, con tecnología de punta, capaz de mejorar la calidad del hueco y optimizar el desempeño de la perforación en el Campo Castilla. La validación del presente estudio fue la implementación de la broca en la perforación de cuatro (4) pozos en la sección de 12 ¼". Se evaluó la información recopilada, con el objetivo de plasmar si el nuevo diseño de broca con calibre extendido presentó ventaja significativa de manera técnica y financiera sobre la broca con calibre corto anteriormente utilizada en el campo.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar técnica y financieramente la implementación de brocas policristalinas con calibres extendidos, corridas con motores de fondo y herramientas rotatorias en la sección 12 ¼" del Campo Castilla.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Describir generalidades del Campo Castilla.
2. Describir el diseño de broca policristalina con calibre corto y la sarta utilizadas anteriormente en la perforación de pozos en la sección 12 ¼" en el Campo Castilla.
3. Describir el nuevo diseño de broca policristalina de 12 ¼" con calibre extendido.
4. Implementar el nuevo diseño de la broca policristalina con calibre extendido en la sección de 12 ¼" del Campo Castilla.
5. Evaluar el desempeño en ROP efectiva, presión, peso sobre la broca, torque y energía mecánica específica del nuevo diseño de la broca policristalina con calibre extendido en la sección 12 ¼" en el Campo Castilla.
6. Comparar los datos de torque y peso sobre la broca de la corrida del nuevo diseño de broca policristalina con calibre extendido contra la corrida del diseño de broca policristalina con calibre corto en la sección de 12 ¼" en el Campo Castilla.
7. Comparar los posibles fenómenos vibracionales del nuevo diseño de broca policristalina con calibre extendido contra el diseño de broca policristalina con calibre corto en la sección de 12 ¼" en el Campo Castilla, a través de los parámetros de perforación.
8. Realizar un análisis comparativo de los rendimientos en ROP y tiempos totales de perforación del nuevo diseño de broca policristalina con calibre extendido contra el diseño de broca policristalina con calibre corto en la sección de 12¼" en el Campo Castilla.
9. Evaluar la viabilidad financiera del proyecto, tomando como referencia el método del valor presente neto (VPN).

1. GENERALIDADES DEL CAMPO

Este capítulo contiene una breve descripción de las características generales en cuanto a historia, localización, marco geológico e historial de producción del Campo Castilla ubicado en la Cuenca de Los Llanos Orientales.

1.1 HISTORIA DEL CAMPO

Los primeros trabajos de exploración en el área de la Cuenca de Los Llanos Orientales fueron realizados por la compañía Shell en la década de los 40's en busca de yacimientos petrolíferos rentables para la explotación, mostrando resultados negativos con la perforación de pozos exploratorios.

El Campo Castilla fue descubierto por la compañía Chevron Corporation Colombia bajo el contrato de concesión Cubarral, a través del cual en el año 1969 perforó el Pozo Castilla Uno (Ca-1) con una profundidad final de 7698 pies, que determinó que era un prospecto probado, durante las actividades de delimitación del campo se perforaron los pozos Ca-2, Ca-3 y Ca-4 los cuales llegaron a una profundidad de 7860, 7912 y 7789 pies respectivamente. Estos pozos fueron perforados en un intervalo de tiempo de cinco años y sirvieron para declarar comercialidad del campo en el año 1975, dando así inicio a la etapa de producción comercial del campo bajo un nuevo contrato de asociación con el estado colombiano, siendo representado por la empresa estatal Ecopetrol S.A.

Durante 25 años el contrato de asociación se mantuvo entre Chevron y Ecopetrol S. A. y a partir del 30 de enero del 2000 Ecopetrol S. A. se hizo cargo del 100% de la operación en los campos Castilla, Castilla Norte y Castilla Este hasta la fecha¹, siendo este el primer contrato de asociación que finalizó en el país.

A partir de la apropiación del Campo Castilla por parte de Ecopetrol S. A. en un 100%, este se convirtió junto con los campos del área de Apiay en uno de los campos más representativos para la petrolera estatal, por lo que se empezó a considerar como uno de los yacimientos más estudiados y mejor conocidos en Colombia. Por esto, surgió la oportunidad de explotar sinergias operacionales, las cuales conllevaron a una reducción de costos operacionales del campo y con esto a un auge en la explotación del campo, pasando de 17 pozos existentes en el año 2000 a 70 en el año 2007. Durante el año 2008 y 2010 se perforaron cerca de 120 pozos para aumentar la producción del campo, llevándolo a su producción más alta hasta el momento. La crisis del precio del petróleo que inició a mediados del 2014 ha impactó fuertemente en la actividad de perforación del campo, llevando a que

¹ ECOPETROL S. A., Castilla, recargado. Edición No. 107. [En línea] [Bogotá, Colombia]. [Citado el 7 de julio de 2016]. Disponible en internet: <>.

estas se paralizaran en un 100% a inicios del 2016 y se reactivaran en mayo del mismo año gracias a una leve recuperación del precio y a una reducción en los costos operacionales del campo. La producción promedio en diciembre de 2015 alcanzó record, aumentando en un 16% el número de barriles de petróleo obtenidos en el año 2014, situándolo como el campo con mayor producción de Ecopetrol S. A. a nivel nacional. Se estima que contribuye con el 12% de la producción del país y el 21% de la producción directa de Ecopetrol S. A, compañía que actualmente opera el campo en su totalidad, realizando trabajos de producción y desarrollo.

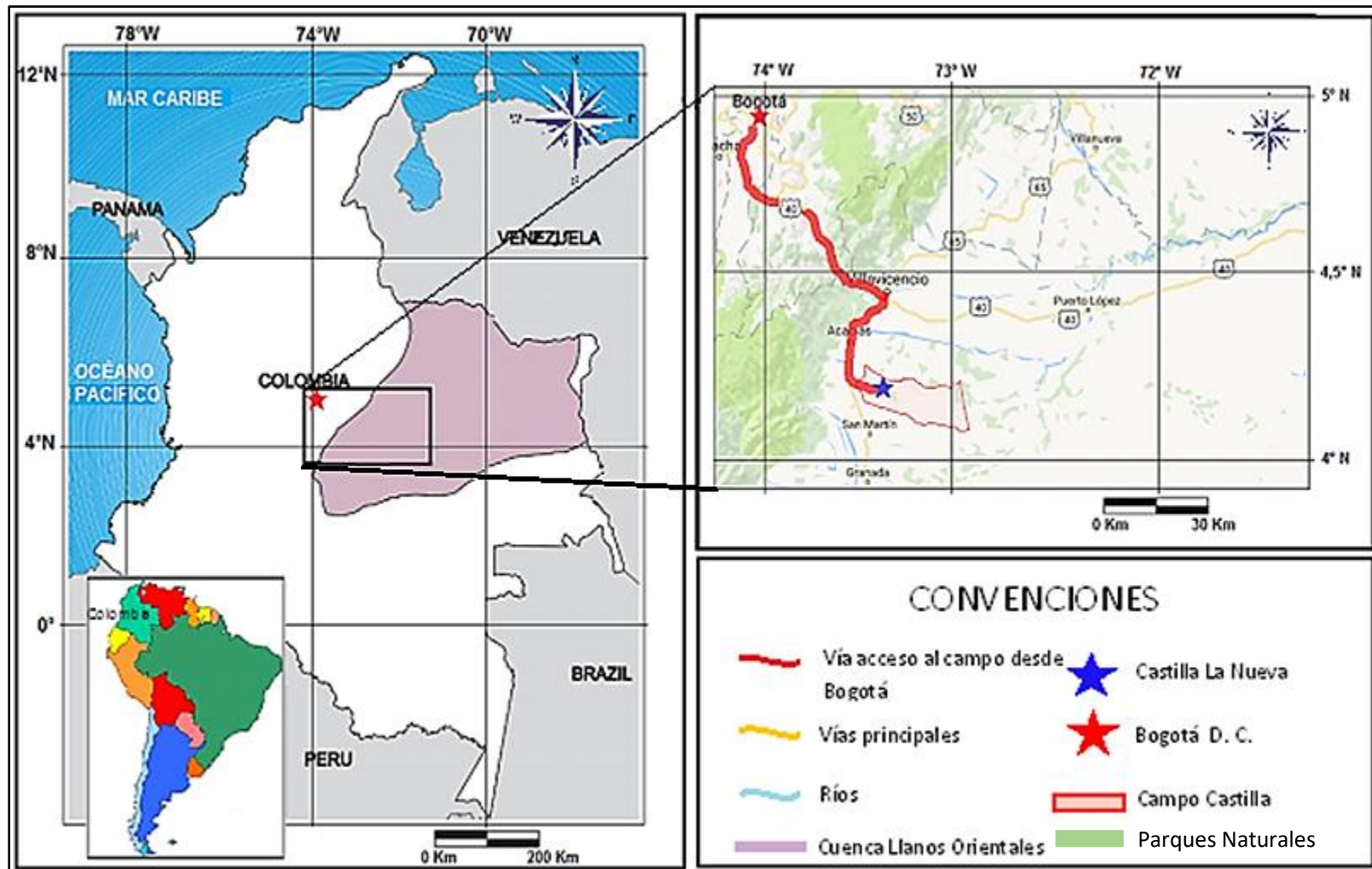
1.2 LOCALIZACIÓN DEL CAMPO

El Campo Castilla se encuentra ubicado en la república de Colombia, en la cuenca de los Llanos Orientales, en el departamento del Meta, en el bloque Cubarral, el cual cubre parte de los municipios de Castilla La Nueva y Acacias.

Para el acceso desde Bogotá por vía terrestre se debe tomar la Av. Boyacá hacia el Sur-Este de la capital del país, autopista que posteriormente se convierte en la ruta 40 (vía al llano), siguiendo su trazado y pasando por los municipios de Chipaque, Caqueza, Quetamé, Guayabetal y Pipiral hasta llegar a Villavicencio, la capital del Meta, la cual se encuentra ubicada aproximadamente a 95 Kms de Bogotá. Posteriormente se debe tomar la vía Villavicencio-Acacías hacia el sur hasta llegar al municipio de Acacias y realizar un recorrido de 8 Kms aproximadamente por la vía Acacias-Guamal, en este punto se gira en sentido Este por una vía secundaria pavimentada llegando así al municipio de Castilla La Nueva, donde se encuentra la oficina administrativa de la superintendencia de Castilla-Chichamente y la entrada principal al campo.

El campo no tiene acceso por vía aérea de manera directa, a menos de que se llegue por medio de helicóptero hasta la localización. Para llegar en avión desde Bogotá se debe tomar una aeronave en el aeropuerto internacional El Dorado para llegar primero al aeropuerto Vanguardia de la ciudad de Villavicencio, Meta. Posteriormente realizar el recorrido antes nombrado desde Villavicencio hasta el campo. (Ver **Figura 1**).

Figura 1. Localización del Campo Castilla ubicado en la Cuenca de los Llanos Orientales, Colombia.



Fuente: En línea [www.googlemaps.co]. Google Maps; Modificado por los autores.

1.3 MARCO GEOLÓGICO

En este subcapítulo se describe el marco geológico estructural y petrolero relacionado con el Campo Castilla ubicado en la Cuenca de los Llanos Orientales.

1.3.1 Columna estratigráfica. La **Figura 2**, presenta las unidades estratigráficas atravesadas por los pozos del Campo Castilla, involucra el sistema petrolero de la cuenca de los llanos orientales y sus principales procesos de migración y entrapamiento, además muestra el estado mecánico de un pozo promedio con sus respectivas secciones y profundidades.

1.3.2 Estratigrafía. A continuación, se presentan y describen cada una de las formaciones que contiene el Campo Castilla, con sus respectivas características, ordenadas cronológicamente de la formación más antigua a la formación más reciente.

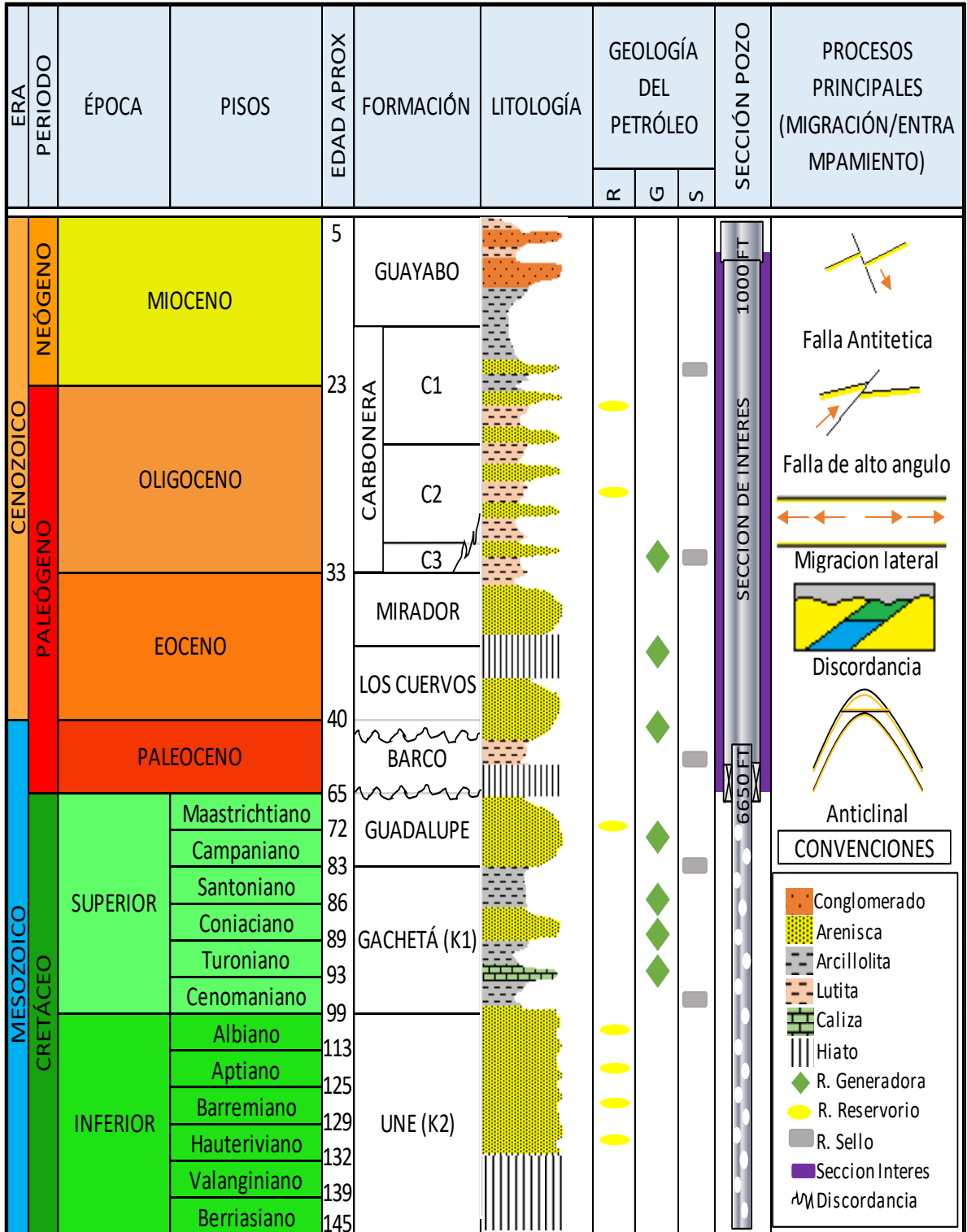
1.3.2.1 Formación Une. Conocida también como formación K2 según Ecopetrol. Esta formación tiene una edad Cretáceo Inferior, piso Aptiano Superior – Cenomaniano inferior². Se encuentra compuesta en gran parte por arena de grano medio a grueso moderadamente consolidada, en la zona cercana al tope se evidencian niveles de Lutita y a lo largo de toda la unidad se encuentran pequeñas intercalaciones de Lutita y Limolita gris verdosa. En el Campo Castilla tiene un espesor cercano a los 200 pies. Presenta un ambiente de depositación de rebose de canales fluviales de alta energía. Tiene una discordancia regional sobre el Paleozoico y un contacto concordante con la formación Gachetá (K1 inferior) que la suprayace.

1.3.2.2 Formación Gacheta. Conocida también como formación K1 inferior según Ecopetrol. Se le asigna una edad Cretáceo Superior, piso Cenomaniano – Turoniano³. En la zona del tope de la formación se tiene presencia de Lutitas, al igual que hacia su base niveles de Limolitas carbonasas. En general está compuesta por Arenisca cuarzosa de grano fino a medio de color parduzco, Limolita gris verdosa y trazas de Lutita negra en pequeñas cantidades. En el Campo Castilla el espesor aproximado de esta formación es de 160 pies. La formación Gachetá (K1 inferior) presenta una depositación continental fluvial debido a la precipitación de sustancias que se acumularon con el pasar de los años. Tiene contacto concordante con la formación Une (K2) que la infrayace.

² JULIVERT M., Amérique Latine Colombie, volumen 4, primera parte, Paris 1968, p. 98.

³Ibíd., p. 119.

Figura 2. Columna estratigráfica generalizada del Campo Castilla ubicado en la Cuenca de los Llanos Orientales, Colombia.



Fuente: ANH, Colombian Sedimentary Basins, Colombia 2007, p. 70; Modificado por los autores.

1.3.2.3 Formación Guadalupe. También conocida como formación K1 superior según Ecopetrol. Su edad pertenece al periodo Cretáceo superior, piso Coniaciano Superior – Maastrichtiano Inferior⁴. Presenta Lutita negra carbonosa en su tope y un aumento de Arenisca de grano fino y Limolita gris verdosa hacia su base. Esta formación cuenta con un espesor promedio de 150 pies en el Campo Castilla. Sus características describen un ambiente de depósitos litorales de origen deltáico. El contacto con la Formación que la infrayace, Gachetá (K1 inferior), es concordante.

1.3.2.4 Formación Barco. Según Ecopetrol, formación T2. Tiene una edad Eoceno inferior y medio⁵. Compuesta principalmente por arena cuarzosa de grano fino a medio y Limolita café en el tope, reemplazando en el cuerpo de la formación la Limolita café por Limolita gris verdosa gradualmente, hasta llegar en la base a una gran presencia de Limolita gris verdosa. Presenta contenido de minerales como la Pirita y Caolinita. En el Campo Castilla tiene un espesor de 160 pies aproximadamente. Estas arenas pueden corresponder a Areniscas fluviales de tipo canal entrelazado con intervalos de lodolita. El contacto con la Formación que la infrayace, Guadalupe (K1 superior), es discordante.

1.3.2.5 Formación Los Cuervos. Según Ecopetrol, también se le conoce como formación Lutita E4. Esta formación tiene una edad Eoceno medio- Oligoceno inferior⁶. Esta unidad se compone principalmente por Lutita, que evidencia en su tope un color marrón oscuro a moderado, con un aumento según la profundidad de Lutita verde reemplazando la Lutita marrón, hacia la base se evidencian lentes de Limolita gris verdosa y amarilla. Consta de un espesor de aproximadamente 290 pies en el Campo Castilla. El carácter marino del tope de la formación Barco (T2) indica un periodo de transgresión cuya continuación es la formación Los Cuervos (Lutita E4). Presenta un contacto discordante con la Formación Barco (T2) que la infrayace.

1.3.2.6 Formación Mirador. También llamada formación T1 por Ecopetrol. Tiene una edad Eoceno medio- Oligoceno inferior⁷. Compuesta principalmente por Arenisca de grano fino y glauconita en el tope, a lo largo de toda la unidad presenta Limolitas gris claro y en menor cantidad Limolita marrón oliva, con pequeños lentes de dolomitas. Cuenta con un espesor de 230 pies aproximadamente en el Campo Castilla. Presenta un ambiente marino somero, deltaico y continental. Presenta contacto concordante con la formación que la infrayace, Los Cuervos (Lutita E4).

⁴ *Ibíd.*, p. 265.

⁵ DE PORTA J. *Amérique Latine Colombie*, volumen 4b, décima parte, Paris 1974, p. 369.

⁶ *Ibíd.*, p. 112.

⁷ *Ibíd.*, p. 112.

1.3.2.7 Formación Carbonera. Esta formación tiene una edad Eoceno medio-Oligoceno inferior⁸. Está compuesta por arcillitas con arenas y algunos lechos de lignito en su parte superior e inferior. Las Areniscas presentan capas cuyo espesor varía desde menos de tres pies hasta los 150 pies. Evidencia un ambiente de depositación continental fluvial, y su espesor total promedio es de aproximadamente 4800 pies.

- **Lutita E3.** Este miembro está conformado predominantemente por paquetes espesos de Lutita gris verdosa con intercalaciones de arcillolita y Limolita gris de bajo espesor que se incrementan según se aumenta la profundidad. Evidencia paquetes de Pirita. Su espesor aparente es de 420 pies.
- **Unidad C3.** Este Miembro está conformado por Lutitas carbonosas, con capas de Areniscas de grano fino, entre las cuales se encuentran delgadas capas de arcillolitas, los contactos son irregulares entre la Arenisca y la arcillolitas. Alcanza un espesor promedio de 230 pies.
- **Unidad C2.** Se caracteriza por presentar niveles de arcillolita marrón, gris verdosa, y amarilla con menores intercalaciones de Limolita gris verdosa y arena hacia el tope, la Limolita y la arena disminuye en el medio, en la base se presenta Lutita. Cuenta con un espesor de 1850 pies.
- **Areniscas de Carbonera.** Compuesta principalmente por arena de grano medio con pequeños paquetes de arcillolita y Limolita gris. Presenta Pirita a lo largo del miembro. Tiene un espesor promedio de 350 pies.
- **Unidad C1, Arenisca Inferior.** Esta unidad presenta hacia su tope niveles de arcillolita marrón rojo oscuro con Limolita y arena, la cual aumenta hacia el medio y la base. Tiene niveles de carbón. En el Campo Castilla tiene un espesor promedio de 900 pies.
- **Unidad Lutita E.** Se encuentra compuesta principalmente por Lutita gris verde con pequeñas intercalaciones de arena y arcillolita gris. Tiene un espesor promedio de 130 pies.
- **Unidad C1, Arenisca Superior.** Esta unidad está conformada en su gran mayoría por arena de grano fino a medio. Hacia el tope de la unidad hay presencia de intercalaciones de arena, arcillolita naranja y gris, y en su base hay presencia de arcillolita con intercalaciones de Limolita. Contiene algunos niveles de carbón, nódulos de pirita y siderita como minerales accesorios. En el Campo Castilla tiene un espesor de 1000 pies.

⁸ Ibíd., p. 112.

1.3.2.8 Formación Guayabo. Tiene una edad Oligoceno Superior – Mioceno que se basa en la Formación Guayabo Venezuela⁹. Está constituida por presencia de conglomerados en sus partes altas que se caracterizan por su composición cuarzosa, en la parte media y en su base se encuentran capas gruesas de arena con intercalaciones menores de Arcilla. El espesor de la Formación Guayabo en el Campo Castilla varía de 1150 pies hasta 3100 pies desde superficie. Presenta una sedimentación continental lacustre. La Formación Carbonera la infrayace concordantemente, en Arenisca Superior.

1.3.3 Geología del petróleo. Estudia y analiza todos los aspectos relacionados con los hidrocarburos y la tendencia de la formación para la generación, acumulación y aislamiento del mismo. Todas estas características enfocadas en el Campo Castilla son descritas a continuación.

1.3.3.1 Roca Generadora. La formación Gachetá (K1 inferior) es la principal roca generadora en la Cuenca De Los Llanos Orientales debido a sus Lutitas marino-continetales localizadas debajo del flanco Este de la cordillera oriental. “Estas rocas poseen un Querógeno tipo II y III, rangos de total contenido de materia orgánica (TOC) entre 1 y 3% y un espesor efectivo de 150 a 300 pies”¹⁰.

1.3.3.2 Roca Almacenadora. En el Campo Castilla, las principales rocas almacenadoras están en la Formación Guadalupe (K1 superior) y la Formación Une (K2). Los valores de porosidad para Guadalupe (K1 superior) se aproximan a 19.5% y para Une (K2) porosidades entre 10.8% y 28%; gargantas porales entre 25 y 45 micrones para K1 y entre 85 y 105 micrones para K2; permeabilidades mayores a un Darcy y un promedio de 1180md para K1 y permeabilidades promedio de 1660 md para K2. La unidad Une (K2) ha sido objetivo principal de producción por Ecopetrol S. A. por su mecanismo de empuje por acuífero activo.

1.3.3.3 Roca Sello. En el Campo Castilla como tal se tiene una roca sello que proviene de “Las Lutitas cretácicas de las formaciones K1 inferior y K1 superior que pueden actuar como sellos intraformacionales”¹¹.

1.3.3.4 Migración. Se han presentado dos grandes pulsos de migración, los cuales son: el primero durante el Eoceno Superior – Oligoceno hasta el levantamiento de la Cordillera Oriental en el Plioceno y el segundo comenzó en el Mioceno hasta la actualidad. El hidrocarburo entrampado en la parte Este de la Cuenca de los Llanos

⁹ *Ibíd.*, p. 260.

¹⁰ AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS, Colombian Sedimentary Basins, Colombia 2007, p. 71.

¹¹*Ibíd.*, p. 71.

migró desde el piedemonte hasta el sitio de acumulación. El petróleo migró lateralmente siguiendo el buzamiento regional hasta alcanzar las condiciones estructurales y/o estratigráficas adecuadas para su acumulación.

1.3.3.5 Trampa. El entrapamiento de hidrocarburos “es tipo mixto estratigráfico primario, siendo la exploración de hidrocarburos en el Campo Castilla concentrada en fallas normales antitéticas adicionalmente un anticlinal limitado al Este por una falla inversa”¹². Existe evidencia de procesos de movilización entre fallas tectónicas. La estructura evidenciada en el Campo Castilla corresponde a un anticlinal asimétrico que es limitado al Este por una falla inversa debido al proceso de compresión. Las trampas las constituyen unidades estratigráficas del Cretáceo y Terciario, ayudado muy probablemente por el cabalgamiento que se presenta en los Llanos Orientales.

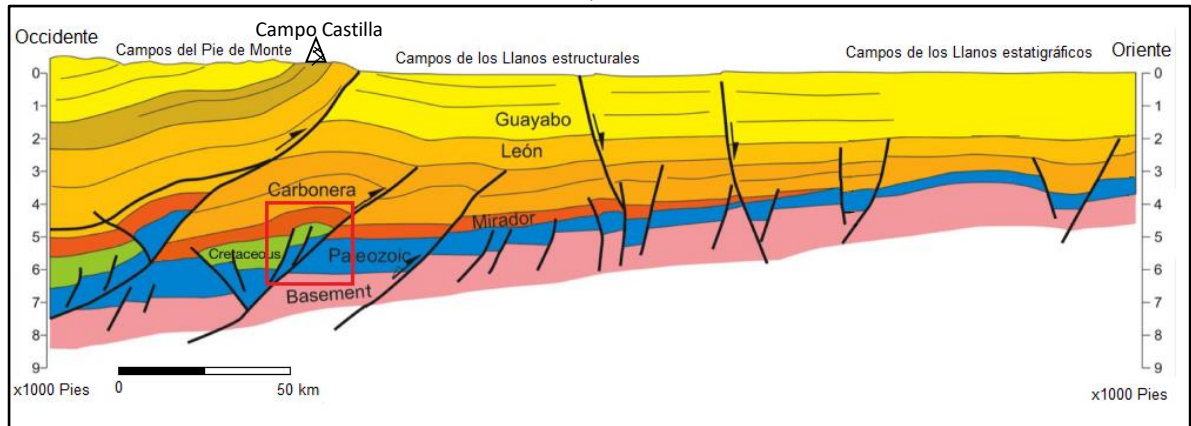
1.3.4 Geología Estructural. La cuenca de los llanos orientales se ha conformado por la unión de tres placas tectónicas, debido a esto, presenta distintas características estructurales en función de la influencia de cada una de ellas a través del tiempo geológico. El Campo Castilla se encuentra situado en dos de los tres estilos estructurales que presenta la cuenca, el primero es el piedemonte llanero caracterizado por un amplio anticlinal limitado por fallas, y el segundo la zona de depresión su-andina con fallamiento normal escalonado.

En la investigación “CUENCA LLANOS ORIENTALES, ESTUDIO INTEGRADO – CRUDOS PESADOS” elaborado por Halliburton y Landmark en asociación con la ANH (Agencia Nacional de Hidrocarburos- Colombia) se describe la estructura del yacimiento del Campo Castilla como un anticlinal asimétrico de aproximadamente 10 Km de largo por 4 Km de ancho, con una falla inversa al Este, acompañado de varias fallas internas normales e inversas no sellantes.

En el anticlinal se evidencia un conjunto de fallas inversas con saltos menores que varían entre 30 y 50 pies y fallas normales que presentan saltos que varían de 30 a 120 pies, que podrían no afectar de manera importante la estructura al no ser sellantes, esto es evidenciado a través de que el contacto agua-petróleo no presenta cambios significativos a ambos lados de estas. Todo este conjunto de elementos geológicos ha formado una trampa estructural, sin embargo, la zona de depresión también fallada, ha generado un entrapamiento estratigráfico, caracterizando la estructura del campo como mixta al tener los dos tipos de trampas posibles (Ver **Figura 3**).

¹²Ibíd., p. 71.

Figura 3. Corte estructural del Campo Castilla ubicado en la Cuenca de los Llanos Orientales, Colombia.



Fuente: ECOPETROL S. A.; Modificado por los autores.

Los límites geomorfológicos son la frontera entre Colombia y Venezuela al norte, la serranía de la Macarena y el arco del Vaupés al sur, el sistema de fallas del Guaicaramo al oeste y la placa de la Guyana al Este.

1.4 HISTORIA DE PRODUCCIÓN

La historia de producción del campo inicia con la firma del contrato de asociación Cubarral en 1975 entre Ecopetrol S. A. y Chevron Corporation Company donde acordaron a 25 años la explotación del mismo. Este contrato empezó a ser efectivo a finales de 1976 con la perforación y puesta en producción del pozo Castilla 1.

Durante los 25 años de la vigencia del contrato de asociación se extrajeron 94.0 MBLS de crudo pesado de aproximadamente 13,7 °API. En los años de 1990 y 1995 la producción del campo se mantuvo entre los 10.0 y 20.0 KBPD promedio diario mensual, alcanzando un pico de 22.0 KBPD en 1997. Al inicio del nuevo milenio se estimaban unas reservas entre los 80 y los 100 MBLS, con un factor de recobro del 7%.

Al momento del cambio de gerencia del campo al finalizar el contrato de asociación el 30 de enero de 2001, se inició una nueva era de producción, donde Ecopetrol S. A. asumió la operación de los Campos Castilla, Castilla Este y Castilla Norte. “Entre 2000 y 2003 invirtió cerca de 50 millones de dólares en trabajos ambientales, yacimientos, ingeniería, obras civiles, perforación, materiales y compra de equipos”¹³, con esto logró aumentar la producción de 20.0 KBPD a finales del 2000 a 32.0 KBPD en el año 2003. Dentro de estas inversiones se incluyeron como

¹³ ECOPETROL S. A., Castilla, recargado. Edición No. 107. [En línea] [Bogotá, Colombia]. [Citado el 12 de Julio de 2016]. Disponible en internet: <>.

proyectos de optimización “La perforación de 11 pozos, al mismo tiempo que se hacían trabajos de reacondicionamiento de pozos viejos con la instalación de bombes electrosumergibles”¹⁴.

En diciembre de 2005 se reportó una producción diaria de 52.0 KBPD con un corte de agua de 63%, además de que a finales de 2004 se incrementaron las reservas del campo sumando 340.0 MBLS. Con el pasar de los años y el incremento de los precios del petróleo WTI (West Texas Intermediate), Ecopetrol S. A. decide realizar amplias campañas de perforación y modernización de las instalaciones y levantamientos artificiales del campo, logrando en el 2007 con el “boom petrolero” una producción de 75.0 KBPD. Posteriormente en el 2009 se incrementó la producción diaria a 91.0 KBPD. Durante el 2009 y el 2010 se generó el modelo estático y dinámico que a la fecha se utiliza en el campo, a través de un estudio integrado de yacimientos con la firma International Reservoir Technologies, Inc. (IRT) en donde se tomó como base los anteriores estudios. La curva histórica de producción en el Campo Castilla siempre se ha mostrado con tendencia a aumentar.

En los años recientes, la producción del campo continuó aumentando y llegó a 120.0 KBPD en el 2013. Debido a los bajos precios del petróleo WTI (West Texas Intermediate) que empezaron a desplomarse a mediados de 2014, se implementó “Un plan de optimización de costos y mejora de rendimientos operativos, acompañados de inversiones incrementales, que generaron mayores márgenes en su productividad”¹⁵, gracias a esto a finales de 2015 se alcanzó un record de producción de 125.7 KBPD incorporando 17.0 KBPD con respecto a la producción del 2014. Esto ratifica que tan importante es el Campo Castilla “Como el mayor campo productor de Ecopetrol S. A. a nivel nacional, el cual aporta alrededor del 12% de la producción del país y el 21% de la producción directa de Ecopetrol S.A.”¹⁶.

A principios de 2016 el Campo Castilla presentó un paro del 100% de las actividades de perforación, debido a la caída de los precios del petróleo WTI (West Texas Intermediate) a los niveles más bajos en 12 años. A través de los meses siguientes el equipo de ingenieros de perforación del Campo Castilla logro obtener optimizaciones en la planeación, esto género que se diera una campaña de reactivación de perforación en mayo de 2016.

¹⁴ ECOPETROL S. A., Carta petrolera Edición 110. [En línea] [Bogotá, Colombia]. [Citado el 12 de Julio de 2016]. Disponible en internet:

<http://www.ecopetrol.com.co/especiales/carta%20petrolera%20110/rev_port.htm>.

¹⁵ ECOPETROL S. A., Campo de producción Castilla alcanzó nuevo récord de producción. Boletines 2015. [En línea] [Bogotá, Colombia]. [Citado el 12 de Julio de 2016]. Disponible en internet: <<https://goo.gl/KeUVF3>>.

¹⁶ ECOPETROL S. A., op. cit.

1.4.1 Método de producción. El Campo Castilla es un yacimiento de petróleo negro subsaturado, el cual es producido de las formaciones K2 y K1 inferior que poseen un mecanismo de empuje por agua asociado a un acuífero activo de gran tamaño que permite mantener la presión estática del yacimiento.

Debido a que el hidrocarburo no tiene la suficiente energía para llegar a superficie desde el yacimiento, en el Campo Castilla todos los pozos producen por sistema de levantamiento artificial, específicamente por bombeo electrosumergible.

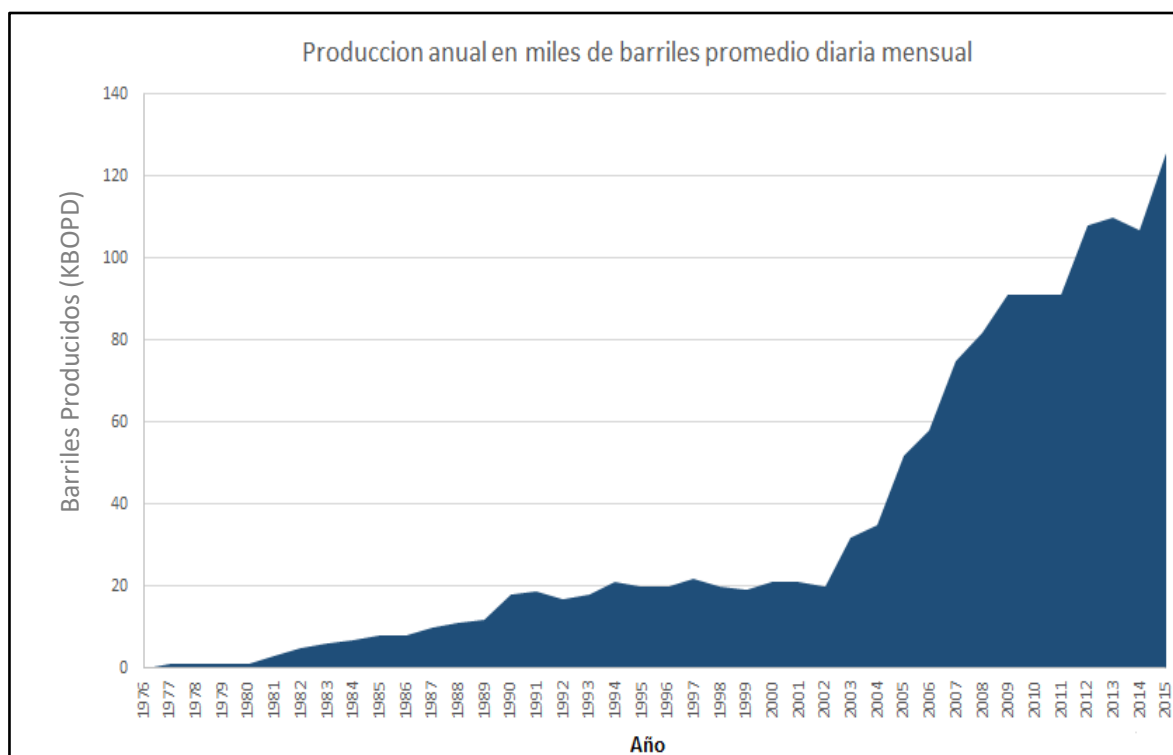
1.4.2 Número de pozos. En el Campo Castilla desde la perforación del primer pozo, se han dado varias campañas de perforación en busca de desarrollar el campo a su máximo nivel de producción. Durante los primeros tres años de su descubrimiento se perforaron cerca de diez pozos, estos en su mayoría fueron perforados en Castilla Norte. Durante el contrato de asociación Cubarral, Chevron Corporation perforó cerca de 100 pozos verticales con el objetivo de aumentar la producción del campo.

Durante los años 2004 y 2008 Ecopetrol S. A. realizó grandes campañas de perforación donde se perforaron cerca de 140 pozos de desarrollo que fueron complementados en el año 2011 con 78 pozos más. En los últimos diez años, los pozos que han sido perforados son tipo “J”, migrando desde hace dos años a pozos de menores ángulos de inclinación. En promedio los pozos son perforados a profundidades medidas (MD) de 9200 pies y profundidades verticales verdaderas (TVD) de 7000 pies. Actualmente en el Campo Castilla existen cerca de 530 pozos perforados, la mayoría de estos están destinados a producción y se han abandonado dos por su bajo índice de productividad.

1.4.3 Gráfica de producción neta. Durante la vigencia del contrato de asociación Cubarral la producción aumento moderadamente de manera proporcional al desarrollo del campo. En el año 2000 se llegó a una producción de 20.0 KBPD. Hasta el año 2004 se mantuvo un promedio de producción constante entre 20.0 y 30.0 KBPD, dándose en este año una gran campaña de perforación en el campo que logró incrementar drásticamente la producción, generando que esta se doblara en el año 2005. Durante los siguientes años la producción continuó aumentando significativamente, sobre todo en el año 2008 con una segunda gran campaña de perforación. En los años recientes se logró el record de producción a finales del 2015 con 125.7 KBPD, superando por 17.0 KBPD la cifra del año 2014.

En la **Gráfica 1**, se presenta la producción neta del Campo Castilla a partir del año 1976 cuando inició su etapa de producción comercial, año en que se firmó el contrato de asociación Cubarral entre Chevron y Ecopetrol S. A. con una participación del 50% por ambas partes.

Gráfica 1. Producción neta del Campo Castilla.



Fuente: ECOPETROL S. A.

1.4.4 Características del yacimiento. El yacimiento del Campo Castilla contiene en las formaciones K1 inferior y K2 un crudo pesado de 13,7°API, según un estudio de Halliburton y Landmark en asociación con la ANH (Agencia Nacional de Hidrocarburos- Colombia)¹⁷ 83% es cemento asfáltico y 17% son solventes. En la **Tabla 1**, se muestran las propiedades petrofísicas de las formaciones productoras del Campo Castilla.

¹⁷ AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS, HALLIBURTON-LANDMARK, Cuenca Llanos Orientales- Estudio integrado crudos pesados, Colombia 2005, p. 2.

Tabla 1. Propiedades petrofísicas del Campo Castilla.

Propiedad	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	Sí
Permeabilidad (md)	1 – 1667	465 – 2423
Porosidad (%)	10.8 – 28	13.9 – 23.4
Saturación de agua inicial (%)	20	20
Espesor Neto (pies)	39 – 109	203 – 528
Presión actual promedio (lb/pul ²)	2691	2691
Temperatura (°F)	193	198
Gravedad API	13.7	20
GOR (scf/stb)	100 – 300	100 – 300
Índice de productividad (bopd/(lb/pul ²))	0.1 – 2.0	0.1 – 2.0
Presión de burbuja (lb/pul ²)	90	148

Fuente: DATALOG S. A. S., Reporte final Pozo Castilla 160, Ecopetrol S. A., Colombia 2013, p. 277.

2. DISEÑO DE BROCA 12 ¼” DE ULTERRA™ CON CALIBRE CORTO Y ENSAMBLAJE DE FONDO CORRIDO EN EL CAMPO CASTILLA

Este capítulo contiene toda la información teórica pertinente a las brocas de perforación, el diseño de broca con calibre corto trabajado por Ulterra™ y el BHA corrido con este diseño. Se presentarán las generalidades de las brocas por medio de una corta reseña histórica, la descripción de las características generales de las brocas PDC y cónicas, sus diseños y su calificación IADC, además de la teoría correspondiente a las herramientas de trabajo direccional, complementando con el diseño de broca con calibre corto y sus correspondientes ensamblajes de fondo corridos en los pozos C322, C342 y C361 en el Campo Castilla.

2.1 GENERALIDADES DE LAS BROCAS

A menudo en la perforación de un pozo petrolero, las brocas utilizadas en el proceso, se pueden considerar como una de las herramientas menos costosas durante la operación, sin embargo, el retorno de la inversión y buena parte de la utilidad dependerá proporcionalmente de su rendimiento y de todas las demás herramientas que intervienen durante el proceso de realización del hueco. Por esta razón es importante presentar de manera resumida los antecedentes de las brocas, partiendo de su definición; “Las brocas, también conocidas en otros países como barrenas, tricónos, mechas y trípodes, son la herramienta de corte localizada al final de la sarta de perforación que se encarga de vencer la dureza de las formaciones ya sea por trituración o cizallamiento, durante la perforación de un pozo petrolero”¹⁸. Cabe resaltar, que todo el entorno que complementa al equipo de perforación, brinda asistencia de manera directa o indirecta a la broca para la realización de su objetivo.

Según el manual de selección de brocas de Schlumberger, el cual refiere demás de diseño de brocas de perforación, la primera patente de broca rotativa para formaciones duras fue presentada en 1909, año en el cual se toma como el nacimiento de las brocas modernas para la perforación de pozos petroleros. Hay que mencionar que para dicha época las brocas eran diseñadas con conos de dientes fresados interbloqueados, que lograban perforar unos pocos pies de profundidad. A mediados de la década de los años 50’s los ingenieros diseñaron las brocas cónicas que se asemejan a las que se utilizan en la actualidad, y en la década de los 70’s se crearon las primeras brocas de cortadores fijos (PDC).

Se considera que la broca de perforación moderna debe tener la capacidad de perforar las formaciones de manera rápida, proveer una buena rentabilidad para el

¹⁸ PVDSA. Barrenas e hidráulica de perforación. PDF – manual, 2001, p. 3.

control direccional y durar un tiempo extenso en el fondo del pozo sin importar si las condiciones que se presentan son extremas. El tipo de formación es el factor fundamental para la selección de la broca a utilizar, ya que existen diferentes diseños, los cuales, según sus especificaciones técnicas tendrán mejores rendimientos en distintos escenarios. Normalmente el costo de las brocas representa menos del 1,5% del costo total de la construcción de un pozo, sin embargo, la broca correcta puede mejorar inmensamente el rendimiento de la perforación, disminuyendo tiempos totales de operación, que se ven traducidos en un ahorro significativo de dinero, es decir de algunos millones de dólares, en la realización del proyecto favoreciendo de manera económica a la operadora.

2.1.1 Mecanismos de corte. Se define como el principio fundamental por medio del cual la broca atraviesa la formación. Son dos mecanismos de corte, falla por esfuerzo o compresión y falla por esfuerzo cortantes.

2.1.1.1 Falla por esfuerzo de compresión. Se presenta cuando la broca incrusta sus dientes en la formación y luego con un movimiento hacia adentro de la misma corta la roca. En la **Figura 4**, se muestra el mecanismo de corte por esfuerzo de compresión. El diente se entierra y se desplaza triturando la formación como si fueran varias palas. Se presenta en las brocas de tipo tricónico.

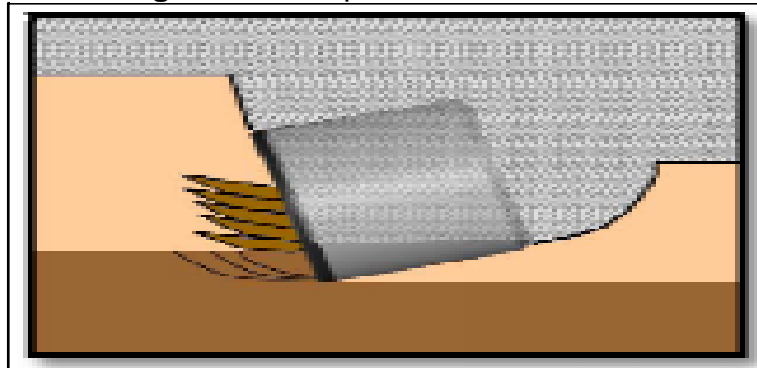
Figura 4. Falla por esfuerzo de compresión.



Fuente: SCHLUMBERGER, Selección de Barrenas en el Proceso de Construcción de Pozo, Handbook, PDF-Manual, 2002, p. 4.

2.1.1.2 Falla por esfuerzo cortante. En la **Figura 5**, se muestra el mecanismo de corte por esfuerzo cortante o cizalla, el cortador pasa sobre la formación haciendo el efecto de lija sobre ésta venciendo la resistencia de la formación.

Figura 5. Falla por esfuerzo cortante.



Fuente: GONZALEZ ANDRES, Diseño de brocas requerido para perforar el pozo direccional, PDF, 2011, p. 2.

2.1.2 Tipos de brocas. Clasificando las brocas según su diseño, se dividen en dos grandes grupos, las brocas de cortadores fijos y las brocas de conos giratorios.

La selección de la broca adecuada permite la realización de un hueco en calibre, lo cual permitirá a los ingenieros reducir la tortuosidad del mismo, y así poder bajar el revestimiento de manera más sencilla, reduciendo tiempos de viaje de tubería.

“La barrena correcta desempeña un rol esencial en la optimización de la velocidad de penetración (ROP), lo que ayuda a minimizar los costos del equipo de perforación y acorta el tiempo existente entre la puesta en marcha de un proyecto y la primera producción”¹⁹

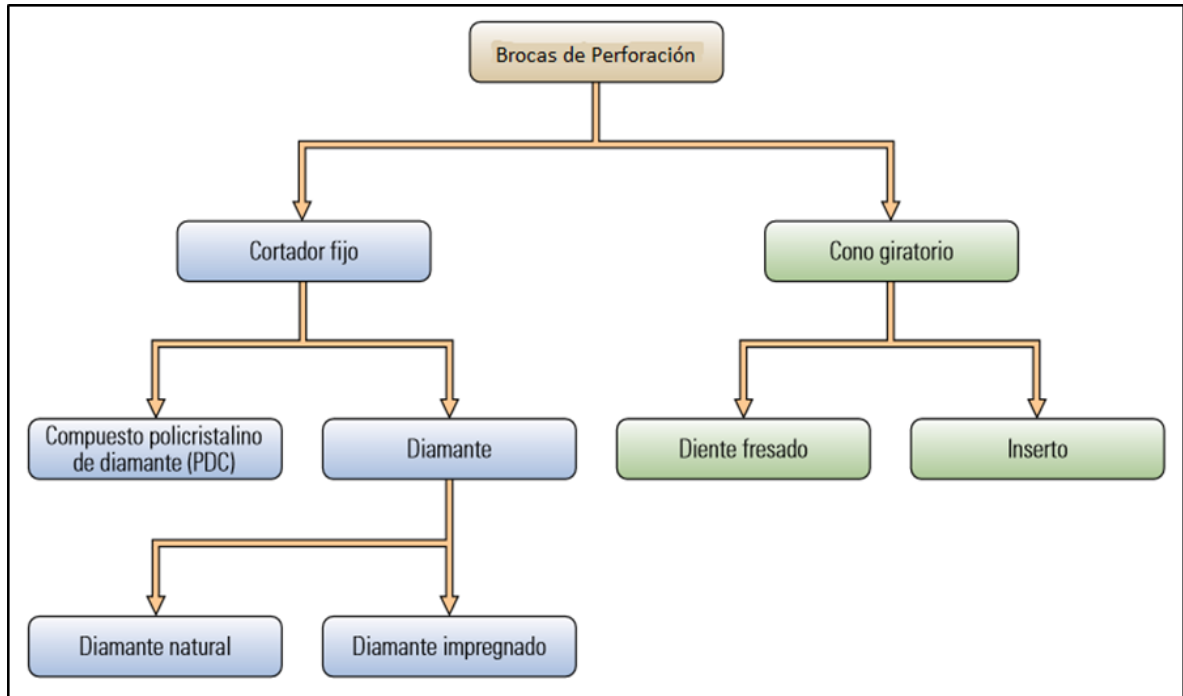
En la **Figura 6**, se evidencian los dos grandes grupos en los cuales se pueden clasificar las brocas, cortadores fijos o conos giratorios, además se pueden observar a su vez, los subgrupos que los componen.

Hoy en día los ordenadores potentes, “al momento de diseñar una broca pueden considerar todo el sistema de perforación y sus equipos de manera más detallada, además el diseñador puede configurar la broca más adecuada a la formación y evitar las tasas de penetración bajas o el tiempo no productivo (NPT) causado por los viajes requeridos para reemplazar las brocas ya gastadas”²⁰.

¹⁹SCHLUMBERGER, El diseño de las barrenas: desde arriba hasta abajo, Houston, TX, p. 1.

²⁰Ibíd., p. 2.

Figura 6. Tipos de brocas.



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

2.1.2.1 Brocas de conos giratorios. Este tipo de brocas son las más utilizadas en la actualidad debido a la gran variedad de diseños que las caracterizan. Pueden ser compuestas por uno o varios conos soportados por un mismo cuerpo, estos están montados sobre unos cojinetes, y tienen contacto con el fluido de perforación para llevar a cabo la operación de limpieza y además ayudar a enfriar la broca. Los cojinetes a su vez están montados en pernos. Los conos portan los dientes los cuales se entierran en la formación y al momento de rotar en su propio eje trituran las rocas; los dientes pueden ser de acero fresado o inserto de carburo de tungsteno. La **Figura 7**, ilustra una broca tricónica con diente fresado (izquierda) y una con insertos de carburo de tungsteno (derecha).

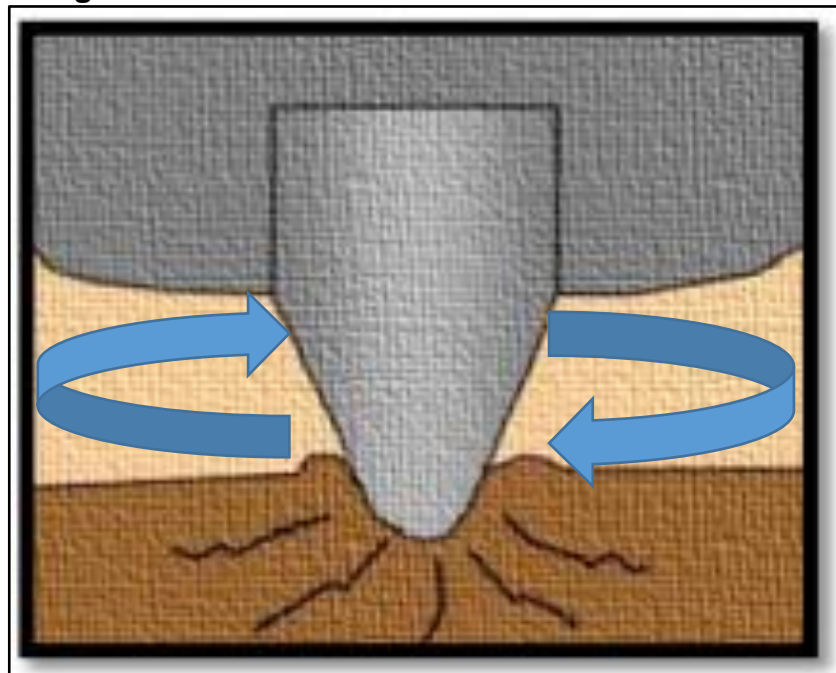
El mecanismo de corte de este tipo de broca es distinto a los dos mecanismos expuestos anteriormente, debido a que los conos giran de manera independiente al movimiento rotacional del ensamblaje de fondo (BHA). Este mecanismo se caracteriza por combinar el peso de toda la sarta, que cae sobre los cortadores, incrustando estos en la formación, con el movimiento rotacional independiente, rompiendo la formación, asemejando el funcionamiento de una pala, dando lugar a una serie de fracturas que se propagan radialmente desde el punto de contacto. En la **Figura 8**, se muestra la combinación anteriormente mencionada.

Figura 7. Brocas tricónicas.



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

Figura 8. Mecanismo de corte de una Broca tricónica.



Fuente: SCHLUMBERGER. Selección de barrenas en el proceso de construcción de un pozo TX, 2001, p. 12; Modificado por los autores.

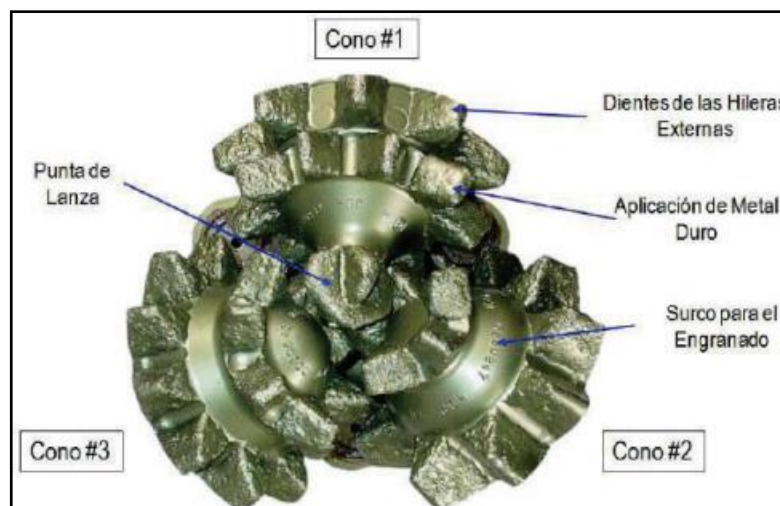
Uno de los principales objetivos de este tipo de broca es facilitar el movimiento del fluido de perforación a través de ella, que gracias a su forma, permite que este llegue de manera directa a la formación y así hacer más eficiente su labor de limpieza. Muchos de los distintos tipos de brocas tricónicas usan boquillas (jets) en la parte superior para limpiar los cortadores directamente durante la perforación, aumentando la fuerza para vencer de manera más fácil los esfuerzos de corte y de compresión de roca.

El tamaño del cortador se determina en función de la dureza de la formación. A mayor dureza menor tamaño, es decir, son variables inversamente proporcionales. Si la formación es blanda, el cortador debe ser pequeño, esto con el fin de que él pueda incrustarse lo suficiente en la formación y triturarla, en caso contrario, el cortador grande, al no tener mayor resistencia para penetrar la formación, puede remover mayor cantidad de roca al girar, realizando la operación con mayor velocidad.

- **Componentes de la Broca de conos giratorios**

- **Estructura de corte o conos:** Según esta característica, existen dos clases distintas de broca tricónica.
- ✓ **Dientes de Acero:** Brocas hechas a base de aleaciones forjadas de acero con molibdeno, níquel y cromo. Diseñadas para trabajar en distintos tipos de formaciones, no tienen problema con las diferentes durezas que se puedan presentar en el subsuelo, además se caracterizan por ser las más económicas en el mercado. En la **Figura 9**, se visualizan las partes de este tipo de broca.

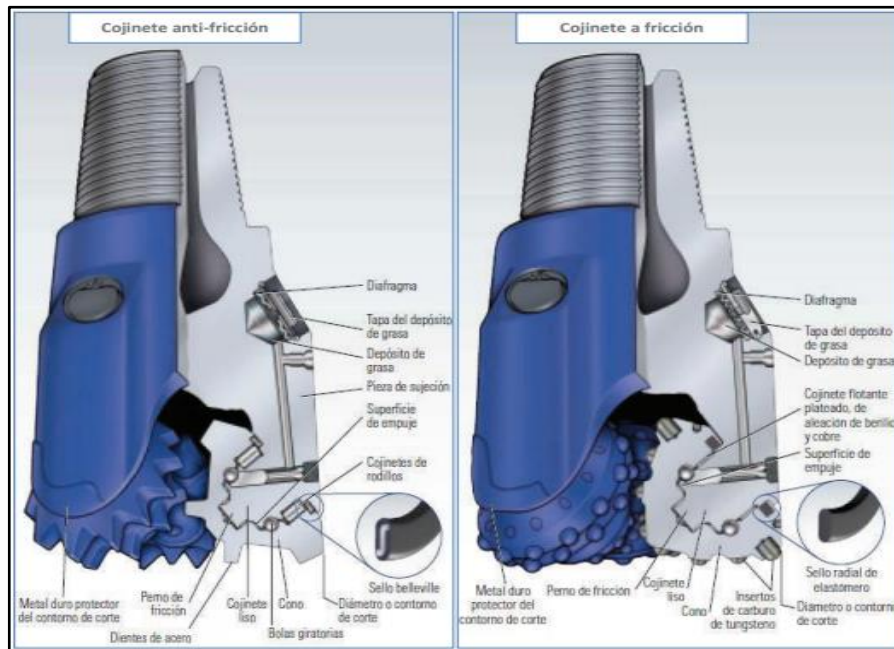
Figura 9. Partes de una broca de dientes de acero.



Fuente: SMITH BITS. Brocas de conos, diseño y tecnología.

- ✓ **DIENTES CON INSERTO DE CARBURO DE TUGSTENO:** Este tipo de brocas se caracterizan por tener incrustaciones de carburo de tungsteno. También son fabricadas a base de aleación de acero con molibdeno, níquel y cromo. Su principal ventaja es su larga vida útil debido a que el carburo de tungsteno es más resistente al desgaste que sufre la broca durante la perforación, que el acero. “Los compuestos deben ser resistentes a la abrasión, erosión y a las cargas de impacto. El carburo de tungsteno es uno de los materiales más duros conocidos. Su dureza hace que sea útil como cortador y resistente a la abrasión presente en las rocas”²¹. Los insertos son colocados a presión en los orificios previamente perforados sobre los conos. Otra parte fundamental de esta broca son los cojinetes, ya que sobre estos está montada la estructura de corte, y su función principal es permitir que los conos giren sobre sus respectivos ejes. En el mercado actual existen dos tipos de cojinetes, los anti-fricción, que se caracterizan por estar ubicados de manera que soporten la carga radial, y el cojinete a fricción, que se compone de un solo perno sólido que soporta la carga radial unido a la superficie interna del cono que se convierte en el elemento principal del cojinete. En la **Figura 10**, se pueden observar los dos tipos de cojinetes.

Figura 10. Tipos de cojinetes.



Fuente: SCHLUMBERGER. Bordes cortantes, Oilfield Review.

²¹ SCHLUMBERGER. Bordes cortantes. Smithbits manual, Houston TX, 2001, p. 1.

- **Cuerpo de una broca de conos giratorios:** Su principal función es dirigir directamente el fluido de perforación hacia el fondo del pozo para optimizar la limpieza. Esta característica fue modificada, ya que antes el fluido era dirigido hacia los conos para limpiar los mismos durante la perforación. El cuerpo de la broca está integrado por:
- ✓ **Conexión Roscada:** Une la broca con la sarta de perforación.
- ✓ **Ejes:** Sostienen los cojinetes, en donde se montan los conos. Su número varía según los conos que la broca tenga.
- ✓ **Boquillas:** También se les conoce como “Jets”, se encargan de permitir y dirigir el paso del fluido para limpiar el fondo del hueco y así poder remover los recortes.

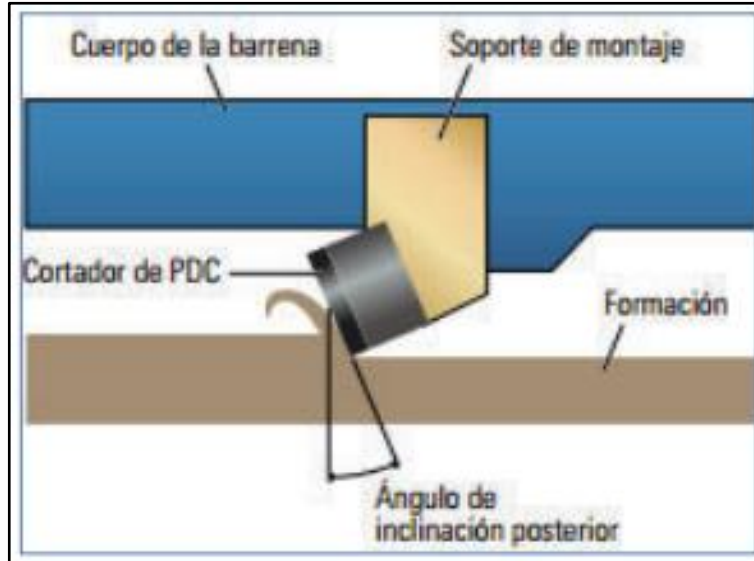
2.1.2.2 Brocas de cortadores fijos: Se diferencian de las brocas de conos giratorios principalmente porque son fabricadas con un cuerpo fijo, sin partes móviles. También se les conoce como Brocas PDC, cuyas siglas significan “Compacto de Diamante Policristalino”, sus cortadores son colocados a presión sobre el cuerpo de la broca, el número de estos y de aletas varían según el diseño, y formación en la cual la broca se vaya a utilizar. En la actualidad son el tipo de broca más utilizado gracias a su versatilidad, pues pueden perforar formaciones blandas, medias y duras, sin ningún problema, además pueden ser reutilizadas, lo cual se traduce en una ventaja económica. Su mayor desventaja es el posible atascamiento en formaciones poco consolidadas.

Sus cortadores están fabricados en diamante debido a la alta dureza, resistencia y compresión de este material, además, gracias a su buena conductividad térmica deja fluir el calor generado por la fricción al momento de penetrar las formaciones. “El diamante es el material más duro conocido por el hombre, es carbón cristalino casi puro. Es diez veces más duro que el acero, dos veces más duro y diez veces más resistente al desgaste que el carburo de tungsteno y veinte veces más resistente a la compresión que el granito, tiene el más bajo coeficiente de fricción y una excelente conductividad térmica”²²

El mecanismo de corte de este tipo de broca es por arrastre, es decir, a medida que el cortador penetra la formación, la punta de esta corta y remueve el material en forma de capas. También se le conoce como principio de cizallamiento. (Ver **Figura 11**).

²² SCHLUMBERGER, op. cit., p. 13.

Figura 11. Principio de Cizallamiento.



Fuente: SCHLUMBERGER. Tecnología de barrenas PDC para el siglo XXI Oilfield Review.

- **Componentes de la Broca de cortadores fijos**

Este tipo de broca al no tener estructuras móviles genera su propio mecanismo de corte basado en la combinación entre el peso y la rotación de la misma. Los componentes de una Broca PDC suelen ser siempre iguales, aunque se pueden presentar variaciones en los elementos de corte y el sistema hidráulico, en función de la litología a perforar.

El cuerpo, la estructura de corte y el vástago, son los tres elementos esenciales que componen este tipo de broca.

- **Cuerpo:** Puede ser llamado Corona en otros países. Este, compone la forma fundamental de la broca, y además, lleva en sí los otros dos elementos de la misma, como lo son, la estructura de corte y el vástago. Dentro de sí lleva un conducto interno, que se conoce como la hidráulica de la broca y comunica la parte superior de esta, con las boquillas presentes en su inferior. El cuerpo puede ser fabricado a base de dos materiales:
 - ✓ **Acero:** Se utiliza como componente principal de una alta aleación. Usualmente se protege con un material duro para prolongar su vida útil, puesto que tiene menor resistencia a la abrasión y a la erosión en comparación con el carburo de tungsteno, este proceso se denomina “hardfacing”. Su ventaja principal es la alta resistencia a los impactos. Como último paso en su fabricación se suelda el cuerpo al vástago y se adhieren sus respectivos cortadores.
 - ✓ **Carburo de Tungsteno:** Se fabrica a partir de carburo de tungsteno en polvo, con una aleación de cobre y níquel que actúa como aglutinante. Es un material de alta dureza, resistente a la erosión y a la abrasión, muy demandado por su

capacidad de perforar formaciones con altos valores de compresibilidad. También se le conoce como “Broca de matriz”.

El cuerpo o corona de una broca PDC consta de aletas, las cuales, dependiendo de su diseño y geometría, definen su perfil. Esta característica tiene una influencia directa en factores determinantes como la estabilidad, respuesta direccional, durabilidad, ROP, y la capacidad de limpieza de la misma. (Ver **Figura 12**).

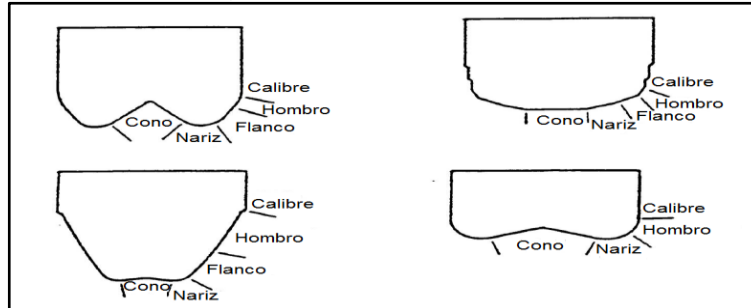
Figura 12. Tipos de perfiles de una broca de cortadores fijos.



Fuente: REED HYCALOG. Diseño de brocas de cortadores fijos.

Las variables que definen el perfil de este tipo de brocas son la longitud y posición del cono, la nariz, el hombro y el calibre (Ver **Figura 13**). La geometría óptima es escogida dependiendo de su aplicabilidad y el control direccional que se requiera; teniendo en cuenta el torque, las tasas de penetración, la estabilidad y la limpieza de la broca.

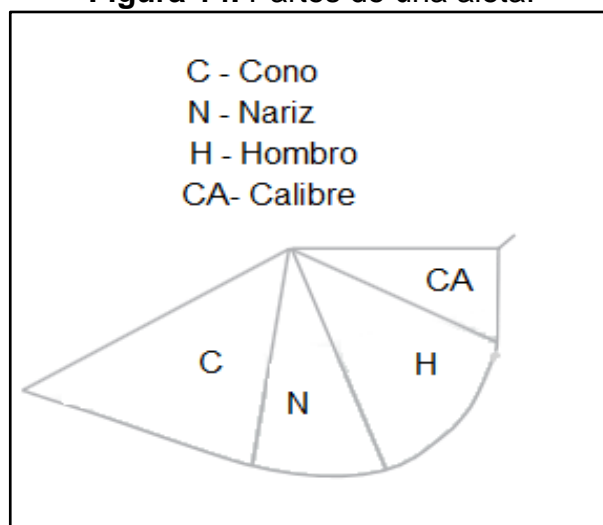
Figura 13. Configuración de perfiles de las brocas PDC.



Fuente: ULTERRA, Product portfolio, Drill bits technologies Houston, TX 2014, p. 13; Modificado por los autores.

El diseño y número de aletas de una broca tienen un gran impacto en el ensamblaje de fondo, debido a que influyen de manera directa en factores determinantes como la tasa de construcción del ángulo y la respuesta direccional. En la **Figura 14**, se evidencian las partes de una aleta que posteriormente será especificada más adelante.

Figura 14. Partes de una aleta.

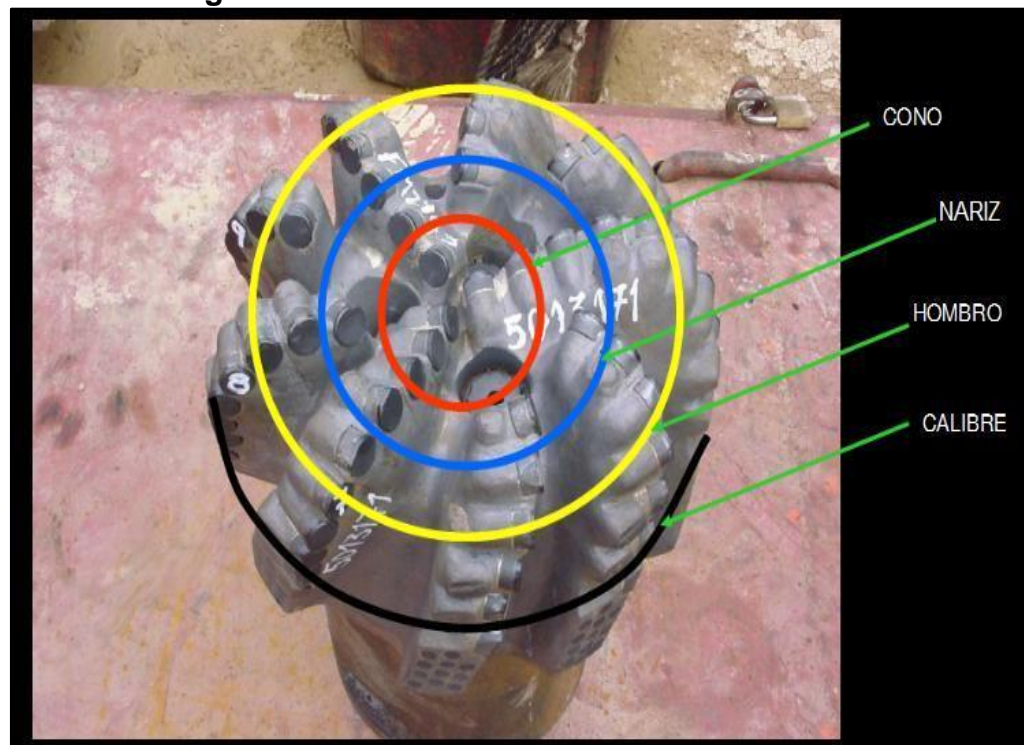


Fuente: ULTERRA, Product portfolio, Drill bits technologies, Houston, TX 2014, p. 13.

- **Cono.** El cono está en la parte inferior de la broca, estabiliza y hace que la broca genere fuerzas duales para los cortadores. El cono hace que rote sobre su propio eje siendo céntrico el movimiento. También se usa como primera área de desalajo de cortes. Su estabilidad y capacidad de desalajo dependen de las revoluciones que esté sometida la broca.
- **Flanco o adelgazamiento.** No está presente en todas las brocas PDC, solo está presente en perfiles especiales.

- **Nariz.** Está ubicada al final del cono y termina en el adelgazamiento. La nariz es la primera parte de la aleta en tener contacto con la llegada de nuevas formaciones a medida que se va perforando. La nariz es la parte que más sobresale en la broca, está hecha para soportar los cambios de cargas y presiones a medida aumenta la profundidad y cambian las formaciones durante la perforación de una sección en un pozo.
- **Hombro.** Está después de la nariz y termina en el calibre. El hombro provee estabilidad a la broca y tiene el mayor número de cortadores. En formaciones blandas la broca tiene más número de cortadores mientras en formaciones duras hay más número de aletas.
- **Calibre.** Está al final de la aleta, da el calibre o tamaño del hoyo; en otras palabras, el diámetro del hoyo visto desde planta. El calibre de la broca define el tamaño del pozo visto desde planta. (Ver **Figura 15**).

Figura 15. Partes de la aleta en una broca PDC.



Fuente: HALLIBURTON. Diseño y selección de brocas. Bit technologies Handbook, 2009, p. 28.

- **Vástago:** También se conoce como Pin, Conexión API, Espiga o Shank. Es la parte de la broca que la une con la sarta de perforación. Cuando las brocas son de cuerpo de acero el vástago se suelda al cuerpo de la broca, y cuando son de tipo matriz se suelda a la estructura del sostén. Son fabricados con acero tratado térmicamente.

- **Estructura de cortes:** La estructura de corte está constituida por cortadores de diamantes policristalinos compactos por sus siglas en ingles PDC, las estructuras de corte se colocan a presión de forma en hileras sobre las aletas de la broca. El cortador es el encargado de cizallar la formación. La vida útil de un cortador dependerá de la resistencia al impacto y la resistencia a la abrasión.

La fabricación de un cortador consta de una unión la cual forma una tabla, donde “se usan partículas de diamante, carburo de tungsteno y un adherente metálico para formar una capa de diamante sintética. Tienen forma de oblea y deben hacerse tan gruesas como estructuralmente sea posible, ya que esto aumenta la vida útil por el volumen de diamantes. La calidad de la tabla de diamante depende del espesor”²³.

Los avances tecnológicos han permitido aumentar el grosor de ésta aumentando la vida útil de los cortadores. Los sustratos de carburo de tungsteno tienen la misma forma que la tabla de diamantes y las dimensiones de la sección transversal como la tabla del diamante. Las dos partes, la tabla de diamantes y el sustrato constituyen un cortador. (Ver **Figura 16**).

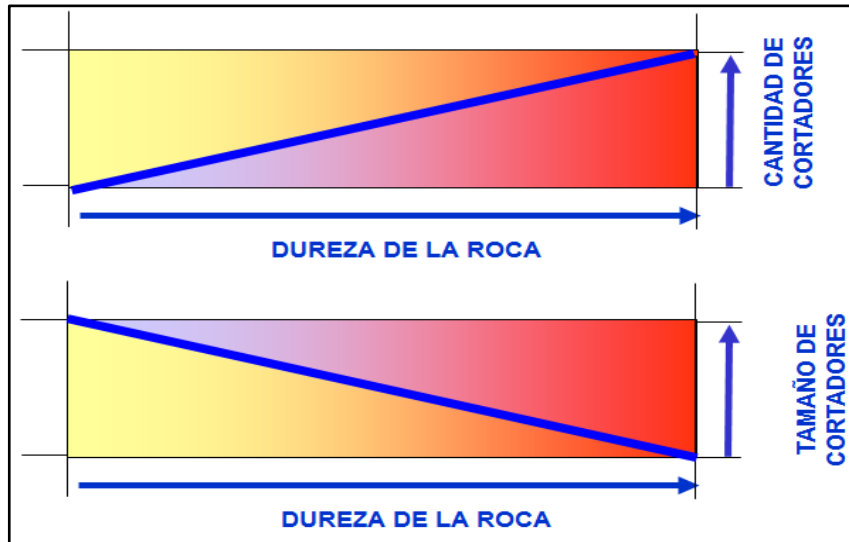
Figura 16. Cortador PDC.



Fuente: SCHLUMBERGER. Tecnología de barrenas para el siglo XXI. Oilfield Review. Modificado por los autores.

Los cortadores PDC actuales se caracterizan por tener el borde biselado en 45° para optimizar su rendimiento y alargar su vida útil. El tamaño y el número de cortadores en la estructura de corte dependen del tipo de formación que se va a perforar. Para formaciones duras, el número de cortadores es mayor y con menor tamaño, mientras que para formaciones blandas los cortadores son más grandes. (Ver **Figura 17**)

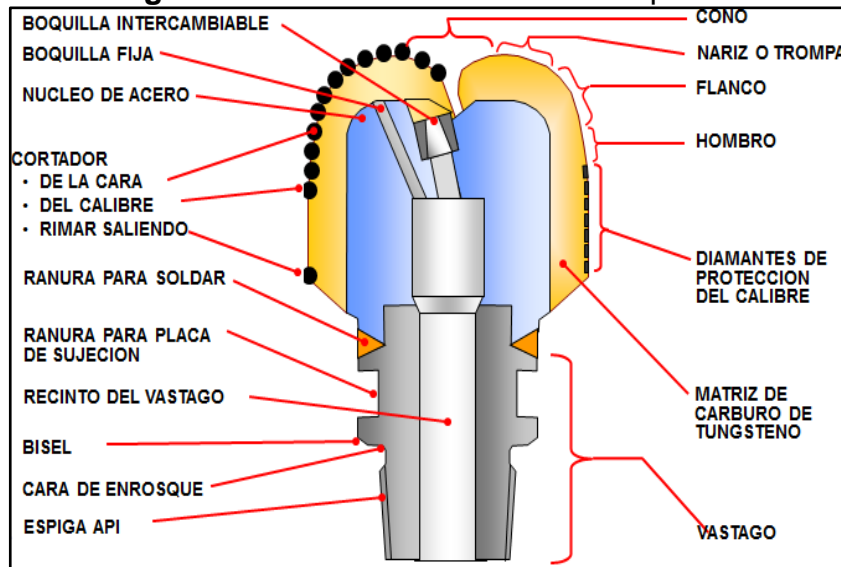
Figura 17. Tamaño y número de cortadores en función de dureza de la formación.



Fuente: REED HYCALOG. Diseño de brocas de cortadores fijos.

La configuración general de una broca PDC se evidencia en la **Figura 18.**

Figura 18. Broca PDC con todas sus partes.



Fuente: REED HYCALOG. Diseño de brocas de cortadores fijos.

2.1.3 Calificación de la Asociación Internacional de Contratistas de Perforación (IADC). En marzo de 1985, la IADC reconoció la necesidad de actualizar nuevamente el sistema de revisión de desempeño de las brocas. Con esta estandarización del análisis de desgaste y presentación de informes, fue posible crear registros de brocas que pudieran utilizarse para seleccionar las brocas y los componentes de la sarta de perforación para pozos similares a los perforados previamente. Así mismo se creó en 1987 un sistema de clasificación del desgaste de las brocas de cortadores fijos y brocas de conos giratorios, siendo revisado en 1991 y presentado a la industria petrolera en 1992.

Actualmente, conforme se corre cada diseño nuevo, los ingenieros analizan el desempeño de la broca, para luego calificarla y así lograr definir los cambios en su diseño para perforar los siguientes pozos. Este proceso se repite en sucesivos intentos para mejorar en forma incremental las tasas de penetración y la vida útil de la broca.

El código IADC se utiliza para ambos tipos de brocas, se define como una tabla donde se hace seguimiento a las brocas durante la perforación de una formación o sección.

El **Cuadro 1**, consta de ocho casillas que describen el estado de la broca. A partir de esta nomenclatura se puede describir las condiciones de desgaste de la broca una vez es sacada de pozo.

Las primeras cuatro columnas describen la estructura de corte mientras las otras describen el estado del cuerpo. El ingeniero a cargo de la broca debe realizar estos reportes para saber el estado de ésta y poder tomar decisiones al respecto.

Cuadro 1. Calificación IADC de las brocas.

CUTTING STRUCTURE				B	G	REMARKS	
1 = I	2 = O	3 = D	4 = L	5 = B	6 = G	7 = O	8 = R
Inner Rows	Outer Rows	Dull Char.	Location	Bearing /Seals	Gauge 1/16"	Other Dull.	Reason Pulled

Fuente. KATE VAN DYKE. The Bit, Fourth Edition, Unit 1, 1995.

Los ocho dígitos, los cuales componen la tabla, tienen su respectiva codificación, a continuación, se describen cada uno de los ítems.

2.1.3.1 Sistema de graduación de estructura de corte. Graduar la estructura de corte es el proceso que se lleva a cabo para realizar una estimación de que cantidad, y en qué parte, se ha desgastado la broca después del trabajo de perforación; se

considera una especie de “prueba permanente” que se realiza en campo. Una adecuada graduación, da al operador y a los distintos contratistas corregir practicas inadecuadas, en caso de ser necesario, cambiar de broca para optimizar el proceso, y la ventaja de poder tomar mejores decisiones para minimizar costos en futuras perforaciones.

La lista de códigos para el desgaste del cortador tiene en cuenta algunos factores que son exclusivos de cada tipo de broca, es decir, unos ítems propios para brocas de cortadores fijos, y otros propios para brocas de cono, pero en general el sistema de calificación se emplea para ambos tipos y el procedimiento es muy similar. La prueba se hace en torno a la base de desgaste del cortador, desgaste de los cojinetes (en caso de ser una broca de conos), y el desgaste del calibre.

Las primeras cuatro columnas se refieren a la condición de los cortadores, allí se encuentran los ítems I, O, D, y L.

- **Columna 1. (I) Hilera Interna:** Se refiere a los dos tercios interiores de los cortadores, es decir, los que no tocan el lado del agujero.
- **Columna 2. (O) Hilera Externa:** Se refiere al tercio exterior de los cortadores (cortadores del calibre).

En estas dos primeras columnas van referenciadas las mediciones de reducción de la estructura de corte debido a la pérdida, ruptura o desgaste de los cortadores. Para poder determinar el número de cortadores de la hilera interna y externa se utilizan la **Ecuación 1 y 2**

Ecuación 1. Determinación de la distancia de las hileras internas.

$$IR = R_{bit} * 0.67$$

Fuente: BAKER HUGHES, Sistema de graduación de desgaste de IADC para trépanos PDC, PDF-Manual, 1996 Austin TX, p. 3.

Donde:

IR= Área de las hileras internas (pulg)
R_{bit}= Radio de la broca (pulg)

Ecuación 2. Determinación de la distancia de las hileras externas.

$$OR = R_{bit} * 0.33$$

Fuente: BAKER HUGHES, Sistema de graduación de desgaste de IADC para trépanos PDC, PDF-Manual, 1996 Austin TX, p. 3.

Donde:

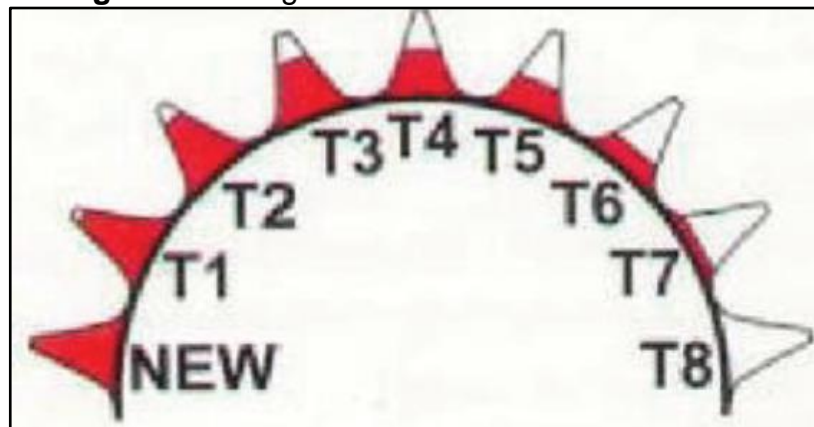
OR= Área de las hileras externas (pulg)

R_{bit}= Radio de la broca (pulg)

Una vez determinado las distancias de cada hilera se procede a contar el número de cortadores por hilera y se determina el estado de cada uno de ellos para reportarlo en la tabla IADC.

El desgaste se determina a partir de una escala lineal del ocho (desgaste total) al cero (0) (sin desgaste), es independiente el tamaño del cortador y entre seis (6) a ocho (8) significa que los cortadores están rotos o severamente astillados. Una calificación de cuatro (4) simboliza que el 50% de los cortadores siguen siendo utilizables. En la **Figura 19**, se observa la representación idónea de cómo se debería calificar el desgaste, donde el color rojo representa el estado del cortador.

Figura 19. Desgaste de los cortadores en brocas.



Fuente. SMITH TOOL. Manual de grado de desgaste de brocas.

- **Columna 3. (D) Características de desgaste:** Este describe la característica principal de daño o desgaste sufrido por el cuerpo y la estructura de corte. Se denota en siglas siendo que cada una tiene su respectivo significado.

Existen dos tablas diferentes para describir la condición de desgaste de las brocas, una es para brocas de cortadores fijos y la otra para brocas de conos giratorios. Dependiendo el diseño de la broca se toman codificaciones diferentes

porque las brocas de cortadores fijos tienen diferentes características de daño a las de conos giratorios. En el **Cuadro 2**, se encuentran las características de desgaste de las brocas de cortadores fijos.

Cuadro 2. Características de desgaste en las brocas de cortadores fijos.

Siglas	Condición de desgaste
BF	Falla de adherencia (Bond failure)
BT	Cortadores rotos (Broken cutters)
BU	Embolada (Balled up bit)
CT	Cortadores cincelados (Chipped cutters)
ER	Erosión (Erosion)
HC	Dañada por calor (Heat checking)
JD	Daño por chatarra metálica (Junk damage)
LN	Boquilla perdida (Lost nozzle)
LT	Cortador perdido (Lost cutters)
RN	No se puede volver a correr (Not run again)
PN	Boquilla tapada (Plugged nozzle or flow by areas)
PG	Diámetro externo desgastado (Guage plug)
RO	Desgaste anillado (Ring out)
RR	Se puede volver a correr (Ready to run)
SS	Desgaste de auto afilado (Self sharpening wear)
TR	“Tracking”
WO	Broca lavada (Wash Out)
WT	Cortadores gastados (Worn cutters)
NO	Sin características de desgaste (No dull characteristics)

Fuente: SCHLUMBERGER, Selección y evaluación de brocas. PDF-Manual, 2011, p. 60.

En el **Cuadro 3**, se encuentran las características de desgaste las brocas de conos giratorios.

Cuadro 3. Características de desgaste en las brocas de conos giratorios.

Siglas	Condición de desgaste
BC	Cono roto (Broken cone)
BF	Falla de pega (Bond failure)
BT	Dientes y cortadores rotos (Broken teeth)
BU	Embolamiento (Balled up bit)
CC	Cono agrietado (Craked cone)
CD	Cono arrastrado (Cone dragged)
CI	Interferencia del cono (Cone interference)
CR	Corazonamiento (Cored)
CT	Dientes astillados (Chipped teeth)
ER	Erosión (Erosion)

FC	Desgaste plano (Flat crested wear)
HC	Fatiga térmica (Heat checking)
JD	Daños por chatarra (Junk damage)
LC	Cono perdido (Lost cone)

Fuente: SCHLUMBERGER, Selección y evaluación de brocas.
PDF-Manual, 2011, p. 62.

Se pueden presentar distintos tipos de brocas desgastadas en diferentes escenarios, lo cual hace que el proceso de calificación, sea muy variable y se pueda incurrir en la subjetividad. Por lo tanto, hay que tener en cuenta ciertos parámetros que definen las anteriores siglas. A continuación, se presentan algunas aclaraciones.

“El desprendimiento de la carcasa del cono se considera como cono roto (BC). Se considera diente o inserto roto si más de un tercio (1/3) se ha perdido, sin tomar en cuenta su causa. Se considera cono fisurado (CC) si la broca presenta uno o más conos fisurados, pero los conos están completamente intactos y no separados. Se llama diente astillado (CT) si menos de un tercio (1/3) de dientes están gastados sin importar la causa. La temperatura (HC) se nota por un patrón rayado en superficie formando ángulos que tienden a ser rectos. El calibre redondeado (RG) es una condición donde la punta más exterior del elemento de corte del calibre ha perdido su filo tal, que este no es el calibre de corte nominal. Los códigos LN, SD, PN, WO no se usan en esta columna. El código (SS) exclusivo de brocas de cortadores, indica un desgaste de manera de cresta filosa. El perfil sobre huella (TR) sucede cuando los elementos de corte de una fila dada impactan en el mismo sitio del fondo del pozo con cada revolución del cono sucesivamente. (NO) es usado para indicar que el desgaste observado no se ajusta a ninguna de las condiciones de desgaste descritas, así mismo al tener un desgaste de cero (0) se debe ingresar (NO) en esta columna.”²⁴

- **Columna 4. (L) La ubicación:** Muestra la ubicación exacta de los cortadores desgastados dentro de la broca. Usa un código de letra si la broca es de cortadores fijos, y una sigla compuesta, es decir letra y número, si es de tipo cónica.

Para las brocas de cortadores fijos solo se denota la ubicación del daño o el desgaste sin tener en cuenta la aleta. La ubicación del desgaste para brocas de cuerpo fijo se denota según el tipo de perfil que tenga la broca, no todas las brocas de cuerpo fijo tienen el flanco. La ubicación de daño más común es en el

²⁴BRIONES LUNA CESAR ALEJANDRO, LEON HIDALGO RUDDY KATHERINE. Estudio de la eficiencia de las brocas usadas en las operaciones de perforación en la formación Tiyuyacu, en pozos del campo Sacha. Quito. Ecuador. 2015. p. 54.

hombro y el calibre, esto pasa porque actualmente los pozos tienen inclinaciones muy elevadas.

Existen diferentes perfiles de brocas PDC y de cuerpo fijo lo que hace que varíe las formas de la cara de la broca. Se denota con la sigla respectiva de la ubicación del daño según el **Cuadro 4**.

Cuadro 4. Ubicación del desgaste en brocas de cuerpo fijo.

Código	Ubicación en la aleta
C	Cono (Cone)
N	Nariz (Nose)
T	Flanco o adelgazamiento (Taper)
S	Hombro (Shoulder)
G	Calibre (Gauge)
A	Todas las áreas (All areas)

Fuente: SCHLUMBERGER, Sistema de clasificación y evaluación de desgaste de brocas de la asociación internacional de contratistas de perforación (IADC), PDF-Manual, 2011, p. 41.

Para las brocas de conos giratorios se denota el cono afectado y la ubicación entre el cono. (Ver **Cuadro 5**).

Cuadro 5. Ubicación del desgaste en brocas de conos giratorios.

Número del cono	Ubicación dentro del cono
1	N – hilera de la nariz
2	M – hilera media
3	G – hilera del calibre
N/A	A – todas las hileras

Fuente: SCHLUMBERGER, Sistema de clasificación y evaluación de desgaste de brocas de la asociación internacional de contratistas de perforación (IADC), PDF-Manual, 2011, p. 40.

- **Columna 5. (B) Cojinetes/Sellos:** Este ítem es exclusivo de las brocas de conos giratorios. Se refiere al desgaste de los cojinetes y al ensamblaje del sello. Es una de las columnas más difíciles de llenar, debido a que no tiene un valor exacto, si no, es un estimado. Se diferencia claramente del proceso de calificación de los cortadores, debido a que estos se pueden medir antes y después de la corrida, y calcular la diferencia, en cambio para los cojinetes, no existe un sistema para medir el desgaste de estos. Solo un ingeniero experto en perforación que sabe cuántas horas perforo la broca y las condiciones de operación puede hacer dicha estimación. Existen dos clases de cojinetes:
 - **Cojinetes no sellados:** Su escala de calificación es de cero (0) a ocho (8), donde cero (0) significa que este elemento está nuevo y ocho (8) que no sirve,

está bloqueado o está ausente. Un código 6 significa que han transcurrido 6/8 de la vida estimada del cojinete.

- **Cojinetes sellados:** En este caso, la calificación recibe una letra. Si cualquiera de los elementos en el ensamblaje ha fallado, entonces el código es F, si cualquier porción del cojinete está expuesta o desaparecida es considera ensamblaje ineficaz y se denota (F), se utiliza N si no es capaz de determinar ambos componentes. Para las brocas PDC se coloca la letra X.

2.1.3.2 Calibre. Evaluar el calibre de la broca, es de suma importancia, debido a que es la parte encargada de mantener el hueco a la medida. Una broca que haya perdido el calibre, perforara la formación con un diámetro menor al requerido, dificultando la operación de extracción de tubería, asentamiento de casing, y posteriormente, de cementación.

- **Columna 6. (G) Calibre:** La columna Calibre o ítem G se utiliza para registrar la condición del calibre de la broca, se debe registrar con la letra I si la broca permanece calibrada. De lo contrario, se registra lo descalibrado que está la broca utilizando una medida lo más cercana posible a 1/16". En una broca tricónica, se usa un anillo calibrador y la regla de los dos tercios. Se coloca el anillo calibrador sobre la broca tratando de que dos de los conos toquen el anillo en sus puntos extremos. Si la broca está bajo calibre, el anillo calibrador no tocara el tercer cono. Se mide la distancia entre el tercer cono y el anillo calibrador y se multiplica por dos tercios (2/3), se redondea con una precisión de un dieciseisavo (1/16) de pulgada para obtener el código para el desgaste en esta columna. El **Cuadro 6**, muestra ejemplos del tipo de registro que se debe hacer del calibre en su respectiva columna dentro de la calificación IADC.

Cuadro 6. Condición de calibre de la broca.

Código	Explicación
1	En calibre
1/16	Fuera de calibre hasta 1/16"
2/16	Fuera de calibre de 1/16" a 1/8"
3/16	Fuera de calibre de 1/8" a 3/16"
4/16	Fuera de calibre de 3/16" a 1/4"

Fuente: BAKER HUGHES, Sistema de graduación de desgaste de IADC para trépanos PDC, PDF-Manual, 1996 Austin TX, p. 7.

2.1.3.3 Otras características de desgaste. Tener en cuenta características secundarias de la broca es importante, pues puede tener daño o desgaste en otras partes de la broca que no han sido considerados en ítems anteriores.

- **Columna 7. (O) Comentarios:** Contiene un código de dos letras para cualquier desgaste secundario. Se utilizan los mismos códigos características de desgaste ubicadas en la casilla número tres. En esta parte de la calificación se tiene en

cuenta la broca y los cortadores como un todo. “El código (JD) indica el daño causado por basura de la misma broca. El código (SD) se refiere a daño debido al desgaste, erosión o basura que se da en el área de la pata de la broca. Un lavado (WO) se da cuando el fluido de perforación ha erosionado un pasaje desde un área de flujo interna hasta el exterior de la broca”.²⁵

- **Columna 8. (R) Razón de salida:** Esta columna es un código de dos o tres letras que indican la razón por la que el perforador sacó la broca del hueco. Utiliza siglas propias para describir lo ocurrido. (Ver **Cuadro 7**).

Cuadro 7. Calificación IADC para razón de salida.

Siglas	Razón de salida
BHA	Cambiar el ensamble de fondo (Change bottom hole)
DMF	Falla del motor en el pozo (Downhole motor failure)
DSF	Falla de la sarta de perforación (Drill string failure)
DST	Prueba de la sarta de perforación (Drill stem test)
DTF	Falla de la herramienta de fondo (Drill plug)
RIG	Reparación del equipo de perforación (Rig repair)
CM	Condición de lodo (Condition mud)
CP	Punto para sacar núcleos (Core point)
DP	Taponamiento del pozo (Drill plug)
FM	Cambio de formación (Formation change)

Fuente: BAKER HUGHES, IADC desgaste PDC. Hughes Christisen Manual, USA. 2010, p. 10.

2.1.4 Clasificación IADC para definir el tipo broca. La IADC (Asociación Internacional de Contratistas de Perforación) ha desarrollado un sistema estándar para clasificar brocas mediante un código. Al leer este código, el perforador puede evaluar las brocas de diferentes fabricantes y seleccionar la broca más adecuada para el escenario presente.

Este sistema de clasificación es un punto de partida sencillo y útil para comparar brocas de diferentes fabricantes y seleccionar la idónea.

2.1.4.1 Clasificación IADC para definir el tipo de diseño de las brocas PDC. En 1990 la IADC adoptó un sistema para clasificar brocas de diamante natural, PDC. La clasificación para brocas PDC es de cuatro dígitos, éstos definen el tipo de material que es fabricado el cuerpo, al tipo de formación que fue diseñada, la estructura de corte y el perfil de la broca.

²⁵ Ibid. p. 56.

- **Tipo de cuerpo de la broca:** En el primer dígito de la clasificación se encuentra el material del que está hecho el cuerpo de la broca. (Ver **Cuadro 8**).

Cuadro 8. Material del cuerpo de la broca.

Código	Material
M	Matriz (Matrix)
S	Acero (Steel)
D	Diamante (Diamond)

Fuente: BAKERHUGHES, Inteq Navi-Drill™ motor handbook, edición 11, p. 171.

- **Segundo parámetro:** Numero entre uno (1) y ocho (8), donde las brocas con uno (1) perforan las formaciones más suaves y las calificadas con ocho (8) perforan las más duras.
 - **Densidad de cortadores:** En una broca PDC la escala va de uno (1) a cuatro (4), de manera directamente proporcional al número de cortadores.
 - **Densidad de diamantes:** Para brocas de diamante natural, o TSP que usan los códigos seis (6) significa que tienen menos de tres (3) piedras por quilate, siete (7) que tienen de tres (3) a siete (7) piedras por quilate y ocho (8) más de siete (7) piedras por quilate.
- **Tamaño o tipo de cortador:** Este ítem varía en función del tipo de broca. Si la broca es de diamante natural o TSP, Este numeral indica el tipo de broca. El número uno (1) indica diamantes naturales, el dos (2) TSP, el tres (3) híbridas (combinación entre diamantes naturales y TSP), y el cuatro (4) aplica para brocas con diamantes impregnados. Si la broca es de cortadores fijos PDC, el número se refiere al tamaño del cortador, donde uno (1) es el más grande tres (3) el más pequeño.
- **Estilo del cuerpo:** Escala de uno (1) a cuatro (4), que representa de manera directamente proporcional la longitud del perfil de la broca

En el **Cuadro 9**, están los diferentes tipos de códigos para identificar el tipo de formación para el cual fue diseñada la broca PDC de manera resumida, al mismo tiempo está la densidad y el tamaño de los cortadores en milímetros, correspondiente a la clasificación IADC y el estilo del cuerpo o perfil. Para formaciones semiduras a extremadamente dura los cortadores están clasificadas según su material.

Cuadro 9. Clasificación IADC para brocas PDC.

IADC: BROCA PDC								
Material del cuerpo	Densidad de cortadores (1-4)		Tamaño o tipo de cortador		Estilo del cuerpo			
"M" Matriz "S" Acero "D" Diamante	1	MUY SUAVE	2	PDC, 19 mm	1	Flanco o dimensión: Corta "Espina de pescado"		
			3	PDC, 13 mm				
			4	PDC, 8 mm				
		2	SUAVE	2			PDC, 19 mm	
				3			PDC, 13 mm	
				4			PDC, 8 mm	
	3	SUAVE A MEDIO	2	PDC, 19 mm	2	Flanco o dimensión: Perfil corto		
			3	PDC, 13 mm				
			4	PDC, 8 mm				
		4	MEDIO	2			PDC, 19 mm	
				3			PDC, 13 mm	
				4			PDC, 8 mm	
	Densidad de diamantes (6-8)				3	Flanco o dimensión: Perfil medio		
	6	MEDIO A FUERTE	1	Diamante natural				
			2	TSP				
			3	Combinación				
	7	FUERTE	1	Diamante natural			4	Flanco o dimensión: Perfil largo
			2	TSP				
			3	Combinación				
	8	MUY FUERTE	1	Diamante natural				
4			Diamantes impregnados					

Fuente. SMITH TOOL. Manual grado de desgaste.

2.1.4.2 Clasificación IADC para definir el tipo de diseño de las brocas de conos. Esta clasificación está conformada por cuatro dígitos, los cuales representan el tipo de dientes que la broca tiene, ya sean de acero o carburo de tungsteno. La aplicación de este código se hace de la siguiente manera:

- **Serie de la estructura cortante:** El primer dígito describe el tipo de broca y la formación que puede perforar, va de uno (1) a ocho (8). Esta escala se divide en dos grandes grupos, menores o iguales a tres (3), se utilizan para brocas con dientes de acero, y numerales mayores a tres (3) son para denotar brocas con insertos de carburo de tungsteno. Dentro de cada grupo, la escala es

directamente proporcional a la dureza de la formación que la broca puede perforar.

- **Tipo de estructura de corte:** Para definir de mejor manera el grado de dureza de la formación que la broca es capaz de perforar, el sistema divide cada serie en cuatro (4) tipos, donde la uno (1) es la formación más suave, y la cuatro (4) es la más dura.
- **Tipo de cojinete y protección del calibre:** Esta escala va del uno (1) al siete (7) donde se describe los cojinetes y el tipo de protección del calibre que tiene la broca. Del uno (1) al cinco (5) para cojinetes de rodillos, y seis (6) y siete (7) para cojinetes lisos o de fricción.
- **Características disponibles:** Dígito opcional, es una de las 16 letras que indica características especiales o poco comunes que una broca pudiese tener. En dado caso que la broca tenga varias características especiales, el fabricante usará el código para el parámetro más importante.

En el **Cuadro 10**, se muestra la clasificación IADC completa para las brocas de conos.

Cuadro 10. Clasificación IADC para brocas de cono.

IADC: BROCA DE CONO			
	<i>Series de la estructura cortante</i>	<i>Tipo de estructura de corte</i>	<i>Tipo de cojinete y protección al calibre</i>
DIENTES DE ACERO	1	SUAVE	1
			2
			3
			4
	2	MEDIO	1
			2
			3
			4
	3	DURO	1
			2
			3
			4
DIENTES DE INSERTOS DE CARBURO DE TUNGSTENO	4	SUAVE	1
			2
			3
			4
	5	SUAVE A MEDIO	1
			2
			3
			4
	6	MEDIO	1
			2
			3
			4
7	DURO	1	
		2	
		3	
		4	
8	MUY DURO	1	
		2	
		3	
		4	
			Cojinete de rodillo abierto estándar (1)
			Cojinete de rodillo abierto estándar, refrigerado por aire (2)
			Cojinete de rodillo abierto estándar con protección de calibre (3)
			Cojinete de rodillo sellado (4)
			Cojinete de rodillo sellado con protección de calibre (5)
			Cojinete de fricción sellado (6)
			Cojinete de fricción sellado con protección de calibre (7)
			A: Aplicación aérea (cojinete con toberas de aire) B: Sello del cojinete especial C: Jet centrado D: Control de desviación E: Jets extendidos (longitud total) G: Protección del calibre/cuerpo (adicional) H: Aplicación horizontal/dirección J: Deflexión del jet L: Almohadillas de agarre M: Aplicación del motor S: Modelo estándar de los dientes de acero T: Broca de dos conos W: Estructura de corte mejorada X: Predominio de insertos de dientes de cincel Y: Predominio de insertos de dientes cónicos Z: Insertos de otras formas

Fuente: SMITH TOOL. Manual de grado de desgaste.

2.1.5 Hidráulica de las brocas. El término hidráulica se refiere a la operación donde un fluido se utiliza para transferir presión. Al transferir la presión, se puede calcular las caídas de presión y así mejorar las tasas de penetración.

Parte de la presión que es transferida a través de la perforación se gasta en la broca y el área que está por delante de ésta; la caída de presión tiene el objetivo de limpiar los cortes, evitando la aglomeración de estos en el cuerpo y la cara de la broca.

2.1.5.1 Pérdida de presión en la broca. La pérdida de presión en la broca se define a partir de la **Ecuación 3**, permitiendo obtener la presión circulante que se consume en la broca.

Ecuación 3. Pérdida de presión en la broca.

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

Fuente: MISWACO. Manual de fluidos de perforación, Capítulo 5 Reología e hidráulica, p. 25.

Donde:

- ΔP_b = Caída de presión a través de la broca (psi)
- Q= Caudal de las bombas (gpm)
- F_d = Densidad del fluido de perforación (Lb/gal)
- J= Diámetro de las boquillas de la broca (1/32 pulg)

2.1.5.2 Caballaje de fuerza hidráulica en la broca. Se define a través de la **Ecuación 4**, calcula el total de caballos de fuerza hidráulica disponibles a lo largo de la cara de la broca. Los caballos de fuerza hidráulica son una unidad de trabajo que realiza el fluido de perforación al entrar en movimiento.

Ecuación 4. Caballaje de fuerza hidráulica en la broca.

$$HHP_b = \frac{Q * \Delta P_b}{1740}$$

Fuente: MISWACO. Manual de fluidos de perforación, Capítulo 5 Reología e hidráulica, p. 26.

Donde:

- HHP_b= Caballaje de fuerza hidráulica en la broca
- Q= Caudal de las bombas (gpm)
- ΔP_b = Caída de presión a través de la broca (psi)

2.1.5.3 Caballaje por pulgada cuadrada del área de la broca. Se determina a través de la **Ecuación 5**, convierte el total de caballos de fuerza hidráulica disponibles en la broca por pulgada cuadrada en la cara de ésta.

Ecuación 5. Caballaje por pulgada cuadrada del área de la broca.

$$\frac{HHP_b}{pul^2} (HSI) = \frac{HHP_b * 1.27}{\text{Diámetro de la broca}}$$

Fuente: MISWACO. Manual de fluidos de perforación, Capítulo 5 Reología e hidráulica, p. 26.

Donde:

HSI= Caballaje por pulgada cuadrada del área de la broca

HHP_b= Caballaje de fuerza hidráulica en la broca

2.1.5.4 Velocidad en las boquillas. Calcula la velocidad a la cual se mueve el fluido de perforación a través de las boquillas de la broca por medio del caudal sometido. (Ver **Ecuación 6**).

Ecuación 6. Velocidad en las boquillas de la broca.

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

Fuente: MISWACO. Manual de fluidos de perforación, Capítulo 5 Reología e hidráulica, p. 26.

Donde:

V_n= Velocidad en las boquillas de la broca (ft/seg)

Q= Caudal de las bombas (gpm)

J= Diámetro de las boquillas de la broca (1/32 pulg)

2.1.5.5 Fuerza de impacto. Proporciona la fuerza total en libras que ejerce el fluido de perforación sobre la cara de la formación por el caudal a través de las boquillas de la broca. (Ver **Ecuación 7**).

Ecuación 7. Fuerza de impacto.

$$IF = \frac{V_n * Q * F_d}{1930}$$

Fuente: MISWACO. Manual de fluidos de perforación, Capítulo 5 Reología e hidráulica, p. 27.

Donde:

V_n= Velocidad en las boquillas de la broca (ft/seg)

Q= Caudal de las bombas (gpm)

F_d= Densidad del fluido de perforación (Lb/gal)

2.1.5.6 Fuerza de impacto por pulgada cuadrada del área de la broca. Convierte a través de la **Ecuación 8**, la fuerza total de impacto en la fuerza disponible por pulgada cuadrada del área de la cara de la broca.

Ecuación 8. Fuerza de impacto por pulgada cuadrada.

$$\frac{IF}{pul^2} = \frac{IF * 1.27}{(Diámetrodelabroca)^2}$$

Fuente: MISWACO. Manual de fluidos de perforación, Capítulo 5 Reología e hidráulica, p. 27.

Donde:

IF= Fuerza de impacto

2.1.5.7 Área total de flujo (TFA). Se determina a través de la **Ecuación 9**, calcula el área total de flujo del fluido de perforación a través de la broca, hacia la cara de la formación. Un alto TFA mejora la capacidad de limpieza de la broca, mientras que un TFA menor mejora el impacto hidráulico generado sobre la formación aumentando la ROP.

Ecuación 9. Área total de flujo.

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

Fuente: MISWACO. Manual de fluidos de perforación, Capítulo 5 Reología e hidráulica, p. 28.

Donde:

TFA= Área total de flujo (pulg²)

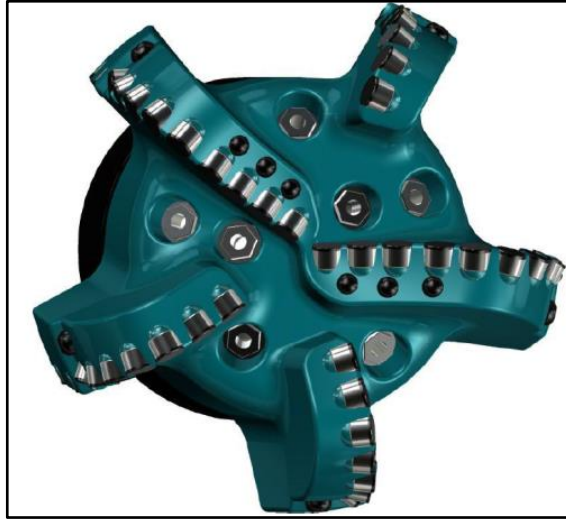
J= Diámetro de las boquillas de la broca (1/32 pulg)

2.2 DISEÑO BROCA U519S 12 ¼" DE ULTERRA™ CON CALIBRE CORTO

Durante las campañas de perforación 2014 y 2015 en el Campo Castilla, Ulterra™ ha estado presente de la mano de Ecopetrol S. A. en la línea de brocas en diferentes proyectos, los cuales ha ejecutado con el diseño de broca U519S 12 ¼" con calibre corto. Es importante conocer a través de la descripción el diseño que se ha trabajado en los proyectos anteriores en el campo y que aún se trabaja, para poder tener un punto de partida de los aspectos y características que Ulterra™ decidió cambiar en su nuevo diseño con calibre largo.

El diseño de la broca U519S 12 ¼" tiene un diámetro de 12,25 pul, su cuerpo está fabricado en acero con cinco (5) aletas que poseen 34 cortadores de 19 mm en la cara de la broca, pertenecientes a la última tecnología UTechXT™ de grado Premium y un sistema hidráulico compuesto por siete boquillas. (Ver **Figura 20**)

Figura 20. Cara del diseño U519S.



Fuente: ULTERRA, U519S, Bogotá 2012.

En la **Figura 21**, se puede apreciar el hombro y el calibre de la broca, que cuenta con un JSA (Junk Slot Area) de $44,63 \text{ pul}^2$ que permite una adecuada evacuación de los cortes que se van generando. Tiene un calibre de $2,5 \text{ pul}$ que posee 20 cortadores de los cuales 10 están en el calibre y 5 son utilizados para rimar saliendo. También pertenece a la Serie MS, diseño convencional para uso en trabajo direccional con motores y sistemas rotatorios con protección TSD (Diamante Térmicamente Estable) en el calibre, para una mayor durabilidad.

Figura 21. Diseño U519S.



Fuente: ULTERRA, U519S, Bogotá 2012.

Como característica secundaria de diseño, la broca posee limitantes de corte en la parte externa de cada aleta, elementos adicionales que brindan estabilidad y durabilidad a la estructura de corte principal, sobre todo en litologías de arenas y limolitas.

Posee la protección de carburo de tungsteno y polvo de diamante en el calibre, para evitar su desgaste prematuro. Adicional a esto, 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, particularmente cuando se utiliza motor con un Bend Housing mayor a 0°. Protege el revestimiento y reduce daño por impacto a los cortadores en el calibre, manteniéndolos sin contacto directo, mientras perfora el zapato y los accesorios de este (tapones, collar flotador, etc.).

2.3 MOTORES DE FONDO Y HERRAMIENTAS ROTATORIAS (RSS)

Los motores de fondo y las herramientas rotatorias (RSS) son herramientas direccionales que permiten a los ingenieros de ejecución del pozo dar una trayectoria adecuada a este en el subsuelo a través del posicionamiento de la broca en distintas direcciones, buscando llegar de una forma óptima a la formación objetivo de la perforación. Existen dos tipos de herramientas que cumplen esta función.

2.3.1 Motores de fondo. Son una herramienta direccional “utilizada para accionar la broca de perforación u otras herramientas de fondo de pozo durante las aplicaciones de perforación direccional o perforación de alto rendimiento”²⁶. Su principio de funcionamiento se basa en convertir la energía hidráulica del lodo de perforación que se bombea a fondo en potencia mecánica para hacer rotar la broca, ya sea a través de un motor de desplazamiento positivo (PDM) o una turbina. En aplicaciones direccionales esta capacidad de convertir un tipo de energía en otro, es usada para la construcción de ángulo por medio del modo de deslizamiento, eliminando así “el movimiento giratorio de la sarta”.

A partir de la dificultad del trabajo direccional se selecciona el motor, teniendo en cuenta la rigidez y el ángulo de inclinación de la unidad articulada, para que haga conjunto con la broca que es seleccionada basándose en el tipo y dureza de formación que se espera perforar.

Para conservar la integridad del motor de fondo, este debe ser corrido bajo unos parámetros establecidos como presiones diferenciales internas bajas, WOB dentro

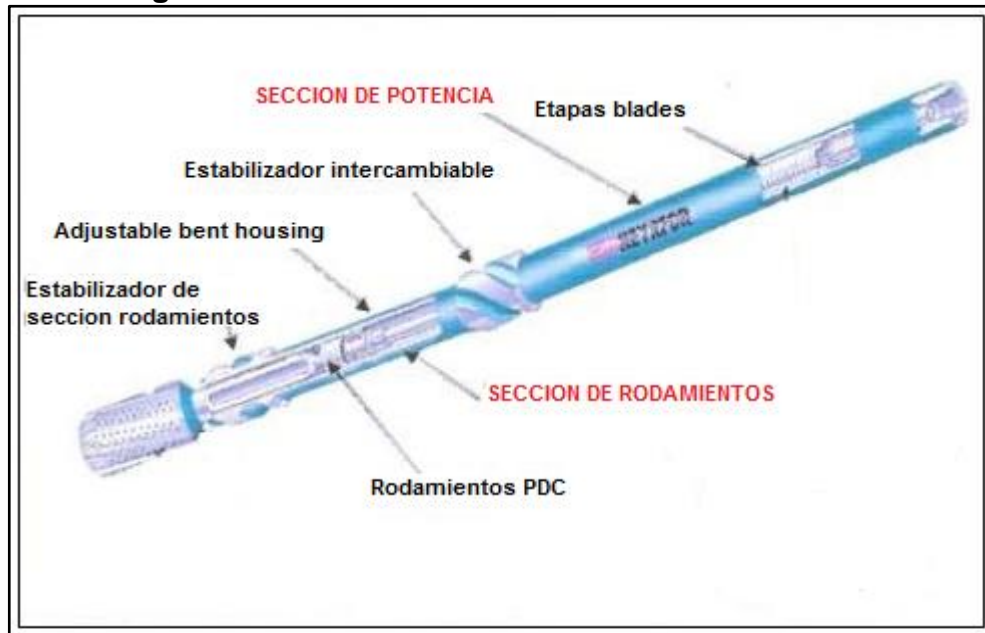
²⁶SCHLUMBERGER, Oilfield Glossary, Español. [En línea] [Bogotá, Colombia]. [Citado el 18 de Julio de 2016]. Disponible en internet:

<http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/p/positive_displacement_motor.aspx>

de un rango óptimo y con el mejor balance hidráulico de las boquillas. Tener en cuenta estas recomendaciones puede optimizar la tasa de penetración y mejorar la vida útil de la broca y el motor de fondo.

2.3.1.1 Motores de fondo con turbina. Es una unidad axial multietapa que es muy eficiente en formaciones semiduras a duras. La turbina transforma la energía hidráulica del fluido de perforación en energía mecánica que se usa para rotar la broca. Se compone de dos secciones principales, la de rodamiento y la de potencia (Ver **Figura 22**).

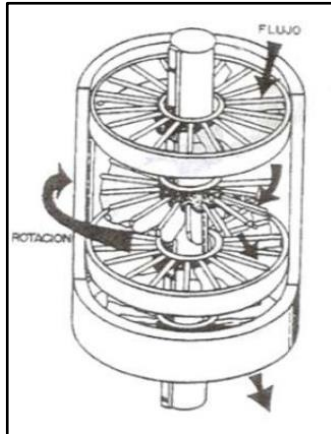
Figura 22. Secciones del motor de fondo con turbina.



Fuente: EDUARDO VALERA. Motores de fondo; Modificado por los autores.

- **Sección de potencia.** Esta sección es la encargada de proveer la energía mecánica necesaria para poder dar rotación a la broca de perforación. A través de la turbina se transforma la energía hidráulica del fluido de perforación que es bombeado a fondo en energía mecánica que permite la rotación de la broca cuando se requiere trabajar en modo deslizar. Dependiendo del requerimiento de energía se pueden tener turbinas con configuraciones de una etapa o multietapas (dos o tres), permitiendo mayor energía mecánica de rotación según aumenta la cantidad de etapas. (Ver **Figura 23**).

Figura 23. Turbina de potencia motores de fondo.



Fuente: EDUARDO VALERA. Turbina motores de fondo.

- **Sección de rodamientos.** Es la encargada de soportar las fuerzas axiales que se le transmiten a través del eje, desde la sección de potencia a la broca de perforación.

2.3.1.2 Motores de desplazamiento positivo (PDM's). Los motores de fondo PDM al igual que los de turbina son impulsados por el lodo de perforación, los cuales convierten la energía hidráulica del fluido de perforación bombeado a través del motor de fondo en energía mecánica que permite la rotación de la broca por medio de un motor helicoidal de dos etapas que genera movimiento giratorio de un rotor que se encuentra en configuración con un estator.

En la **Figura 24**, se muestra el esquema de un PDM. Los motores de fondo de desplazamiento positivo constan de cuatro secciones: ensamblaje de válvulas mudas, sección de poder, unidad de transmisión y ensamblaje de cojinetes que va junto al eje de accionamiento.

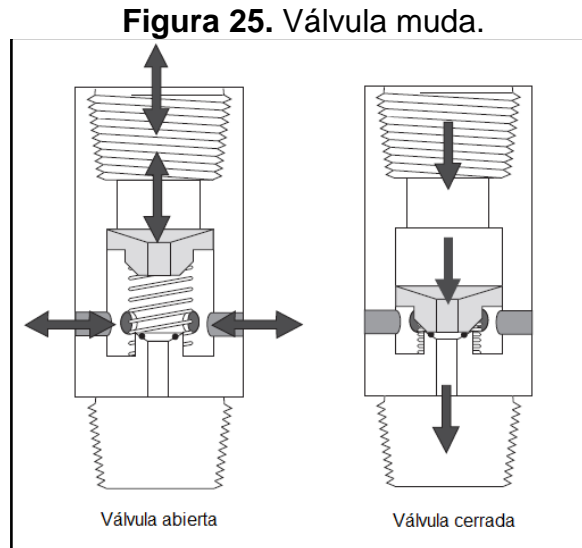
Figura 24. Partes de un PDM.



Fuente: JUAN JOSE GONZALEZ, Downhole motor, Septiembre de 2015, p. 2; Modificado por los autores.

- **Ensamblaje de válvulas mudas.** Permite el paso de fluido de perforación a través del motor. Consta de una válvula muda que opera de dos modos: el primero es cuando se desea que pase lodo hacia la sección de poder y la válvula se configura de modo que el pistón se cierre hacia abajo, obstaculizando los puertos que van al espacio anular, haciendo que todo el flujo del lodo vaya

directo al motor de fondo. El segundo es cuando el pistón sube colocando la válvula en posición abierta abriendo los puertos de flujo hacia el espacio anular. (Ver **Figura 25**).



Fuente: ANADRILL, Directional drilling training manual.
Diciembre de 1996, p. 210.

Esta sección no es indispensable para el funcionamiento del motor, sin embargo, es preferible el uso de la válvula porque permite llenar la tubería de perforación de lodo y hacer viajes en el pozo con los puertos del espacio anular abiertos hacia la formación, permitiendo sacar la tubería seca.

- **Sección de poder.** El principio de funcionamiento de la sección de potencia de los motores de fondo está basado en una unidad de cavidades progresivas compuesta por un estator y un rotor, que en conjunto generan una fuerza por el movimiento generado por la energía hidráulica que mueve el rotor dentro del estator. La rotación es excéntrica. (Ver **Figura 26**).

El número de rotores y estatores tienen configuraciones llamadas Lobe. Las configuraciones son el número de aletas que tiene el rotor contra el número de cavidades que tiene el estator. Las etapas son el número de cada aleta del rotor en dar una vuelta entera. La sección de potencia se clasifica según la configuración Lobe y el número de etapas que compongan la sección. “La diferencia entre el número de Lobe resulta en la excentricidad entre la rotación axial del rotor y las fuerzas axiales del estator”²⁷.

²⁷ WEATHERFORD, Mud lubricated drilling motors, handbook, segunda edición, enero de 2012, p. 13.

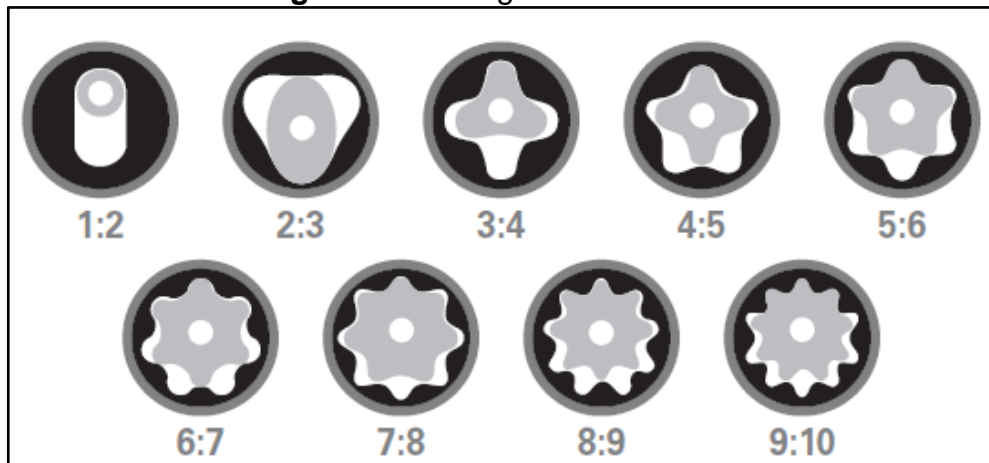
Figura 26. Sección de poder de un PDM.



Fuente: HALLIBURTON, Sperry Drill technical information handbook, directional drilling, tercera edición, 2012, p. 289; Modificado por los autores.

La configuración Lobe define los parámetros que usa el motor, entre menor sea el Lobe, mayor va a ser la capacidad del motor de generar revoluciones por minuto (RPM), mientras que entre mayor sea el Lobe, mayor es el torque entregado por el motor, pero tendrá menos RPM. Para efectos de selección del motor se debe tener en cuenta las condiciones bajo las cuales funcionara el mismo para poder hacer una buena elección de la configuración y lograr un nivel equitativo entre RPM y torque. (Ver **Figura 27**).

Figura 27. Configuraciones Lobe.



Fuente: HALLIBURTON, Sperry Drill technical information handbook, directional drilling, tercera edición, 2012, p. 287.

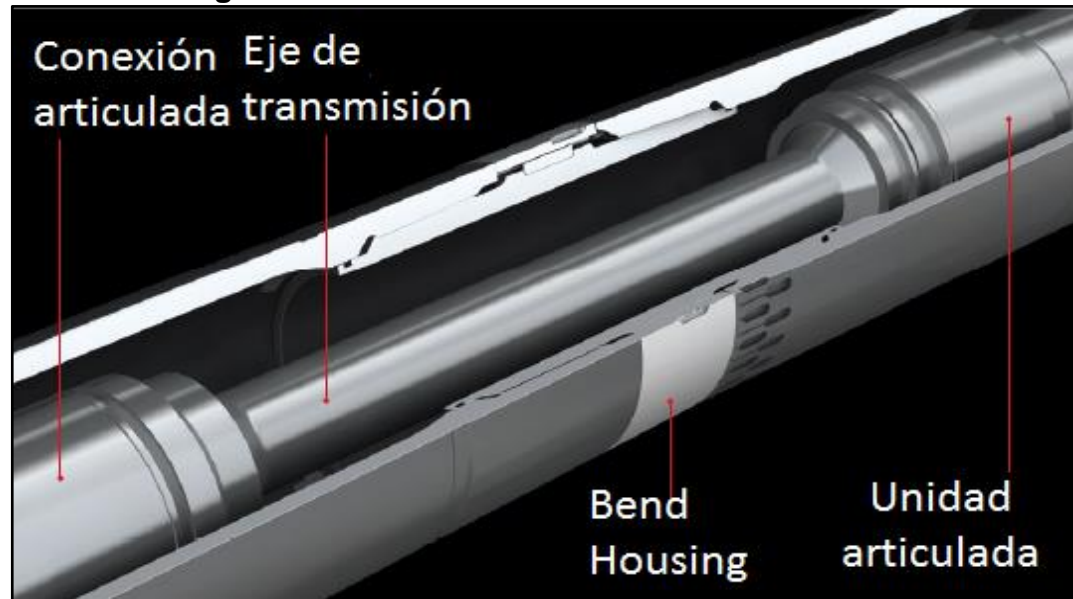
“Los estatores son hechos de elastómeros, algunos son fabricados con Caucho de Nitrilo Butadieno (NBR) y otros de Caucho de Nitrilo Hidrogenado Butadieno (HNBR)²⁸”.

La geometría del Lobe y el movimiento excéntrico del rotor son diseñados para minimizar la presión de contacto, la fricción al moverse el rotor y la vibración para evitar el daño del elastómero del estator.

- **Unidad de transmisión.** Es la encargada de transferir el torque y la velocidad rotacional generada por la sección de poder hacia la sección giratoria, la cual entregará la energía de rotación a la broca. Esta transmisión de energía es realizada a través de la conversión del movimiento excéntrico del rotor en movimiento concéntrico que es llevado hasta la broca, esta acción también compensa la vibración causada por el movimiento excéntrico del rotor y la excentricidad de la sección ajustable.

Como tal la unidad de transmisión (Ver **Figura 28**) está compuesta por cuatro secciones, una conexión articulada, una sección ajustable (Bend Housing), el eje de transmisión y una unidad articulada en la parte inferior.

Figura 28. Secciones de la unidad de transmisión.

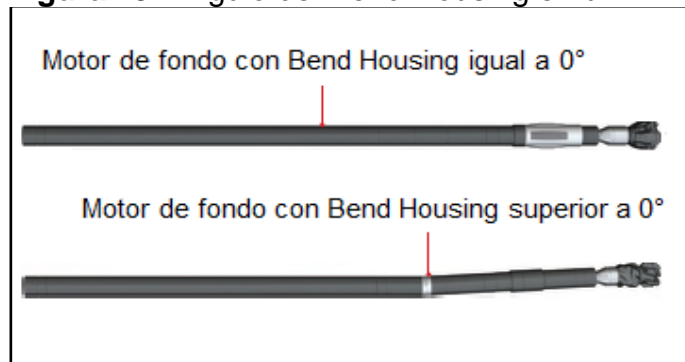


Fuente: HALLIBURTON, Sperry Drill technical information handbook, directional drilling, tercera edición, 2012, p. 293; Modificado por los autores.

²⁸ WEATHERFORD, Mud lubricated drilling motors, handbook, segunda edición, enero de 2012, p. 13.

En la **Figura 29**, se puede observar que los motores de fondo poseen en su sección ajustable un cambio de dirección, que es medido a través del ángulo que hace dicho desvío con la horizontal marcada por la parte superior del motor. Este ángulo es ajustable según los requerimientos direccionales y se le llama Bend Housing, puede adquirir valores entre 0° y 3° . Esta gama de valores permite realizar distintos trabajos direccionales ya sea tumbando o construyendo ángulo en el pozo. En aplicaciones de campo es importante tener en cuenta que los motores con un Bend Housing mayor a 1.83 no se deben rotar, ya que puede llegar a bajar su eficiencia y hasta dañarlos.

Figura 29. Ángulo del Bend Housing en un PDM.



Fuente: HALLIBURTON, Sperry Drill technical information handbook, directional drilling, tercera edición, 2012, p. 269; Modificado por los autores.

El ángulo del Bend Housing es ajustado a través de un anillo que permite usar el motor con las diferentes configuraciones según se requiera en la operación. (Ver **Figura 30**).

A partir del anillo del Bend Housing, el PDM se puede ajustar de 0° a 3° según la configuración determinada por el plan de perforación direccional. Cada recuadro del anillo ajustable tiene una referencia para determinar a qué Bend Housing está el motor de fondo. (Ver **Cuadro 11**).

Figura 30. Anillo ajustable.



Fuente: HALLIBURTON, Sperry Drill technical information handbook, directional drilling, tercera edición, 2012, p. 293; Modificado por los autores.

Cuadro 11. Ángulo del Bend Housing para cada configuración del anillo ajustable.

Configuración	Ángulo del Bend Housing (°)
A	0,00
B	0,39
C	0,78
D	1,15
E	1,50
F	1,83
G	2,12
H	2,38
I	2,60
J	2,77
K	2,90
L	2,97
M	3,00

Fuente: WEATHERFORD, Mud lubricated drilling motors, handbook, segunda edición, enero de 2010, p. 197.

2.3.1.4 Sección de cojinetes. La sección de cojinetes tiene la función de soportar el peso del rotor y las cargas reactivas aplicadas sobre la broca, además de hacer girar directamente la broca a través del eje de accionamiento. Los cojinetes están articulados por una cantidad de bolas metálicas que existen en muchos tamaños y tipos de materiales.

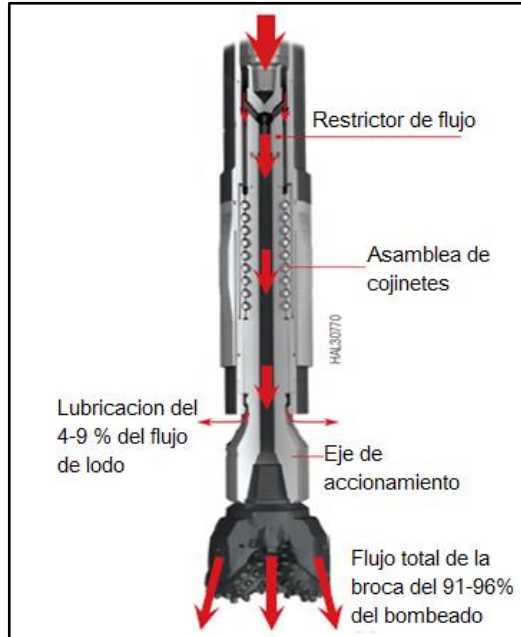
La sección de cojinetes se compone por: cojinetes de empuje, cojinetes radiales y el eje de accionamiento. El fluido de perforación y el aceite lubricado en los cojinetes lubrican cada cojinete realizando restricciones de flujo. (Ver **Figura 31**).

Los cojinetes radiales contienen bolas metálicas que se encargan de absorber las cargas laterales del eje de accionamiento, con este fin son instaladas por encima y debajo de la asamblea de cojinetes.

El restrictor de flujo consiste en una camisa rotatoria con un espacio anular entre el ensamblaje de cojinetes y una sección interna del motor. En este desvío de flujo se genera que el ensamblaje de cojinetes sea lubricado por el fluido de perforación con un porcentaje del flujo entre el cuatro (4) y el nueve (9) por ciento (%) del total del bombeado a fondo.

El eje de accionamiento transmite las cargas axiales y torsionales a la broca. Son fabricados con materiales capaces de maximizar las cargas axiales y torsionales sobre la broca para dar el torque y las RPM generadas por la sección de poder.

Figura 31. Ensamblaje de cojinetes.



Fuente: HALLIBURTON, Sperry Drill technical information handbook, directional drilling, tercera edición, 2012, p. 196; Modificado por los autores.

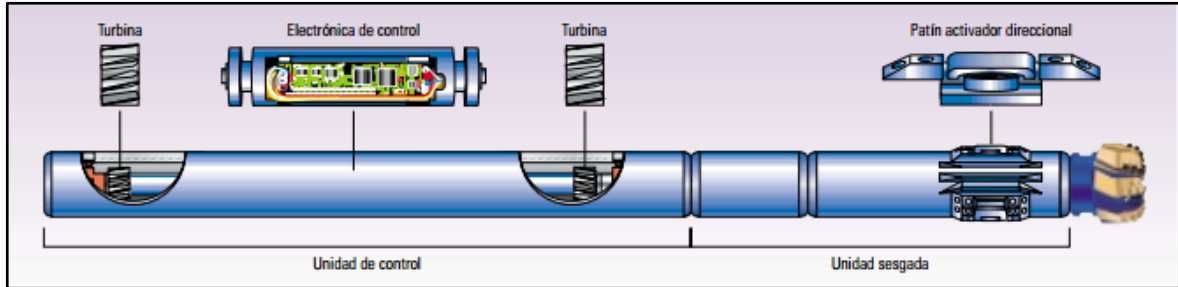
2.3.2 Herramientas rotatorias (RSS-Rotary Steerable System). Son herramientas de control direccional que permiten desviar la trayectoria del pozo a través de la manipulación de la dirección en la que perfora la broca. A diferencia de los motores de fondo, estas permiten la construcción de ángulo mientras toda la sarta se encuentra en rotación, permitiendo que se tengan mayores tasas de penetración (ROP).

En la práctica estas herramientas ofrecen ciertas ventajas con respecto a los motores de fondo debido a que la continua rotación de la sarta de perforación permite mejorar el transporte de cortes perforados a la superficie que resulta en un mejor rendimiento hidráulico, una mejor transferencia de peso por la misma razón y reduce la tortuosidad debido a un modelo más estable de operación.

La continua rotación de la sarta durante el trabajo direccional es lograda a través de dos tipos de sistemas de orientación de la broca dentro de la herramienta rotatoria, el sistema "Push the bit" y "Point the bit".

2.3.2.1 Sistema "Push the bit". El funcionamiento del sistema "Push the bit" se basa en desviar la dirección de la broca a través de unas almohadillas accionadas hidráulicamente que se apoyan sobre la pared del pozo contraria a la dirección que se quiera tomar. Se encuentra compuesto por dos secciones, una unidad sesgada y una unidad de control. (Ver **Figura 32**).

Figura 32. Secciones Rotary Steerable System-Push the bit.



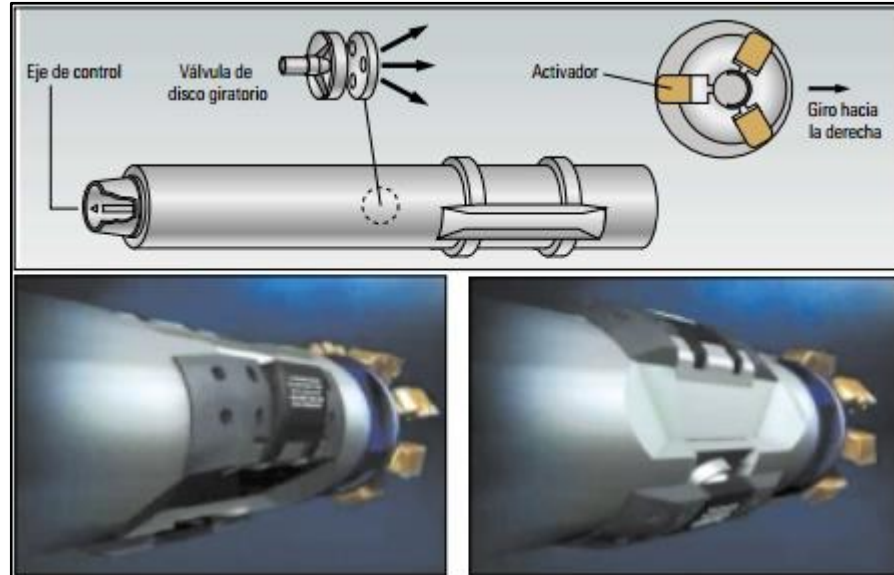
Fuente: SCHLUMBERGER, oilfield review, Power Drive, 2000, p. 25.

- **Unidad sesgada.** Se encuentra ubicada directamente sobre la broca, es la encargada de aplicar una fuerza lateral sobre la formación en el sentido opuesto de la trayectoria a tomar mientras toda la columna gira.

La unidad sesgada tiene unas almohadillas externas, que son activadas por el flujo de lodo controlado a través de una válvula, que utiliza la diferencia de presión de lodo que hay entre el interior y el exterior de la unidad sesgada. La válvula de tres vías de disco rotativo acciona las almohadillas al dirigir el lodo en forma sucesiva a la cámara del pistón de cada almohadilla, a medida que rota para alinearse con el punto de empuje deseado en el pozo, que es el punto opuesto a la trayectoria deseada. Una vez que una almohadilla pasa el punto de empuje, la válvula corta el paso de lodo y los evacua a través de una compuerta diseñada para esto. Las almohadillas se extienden no más de 1 cm durante cada revolución de la unidad. Un eje conecta la válvula rotativa con la unidad de control para regular la posición del punto de empuje.

En la **Figura 33**, se observan las partes de la unidad sesgada y como se activan las almohadillas de las herramientas rotatorias a través del flujo de lodo por la válvula de disco giratorio.

Figura 33. Activación de las almohadillas del RSS-Rotary Steerable System.



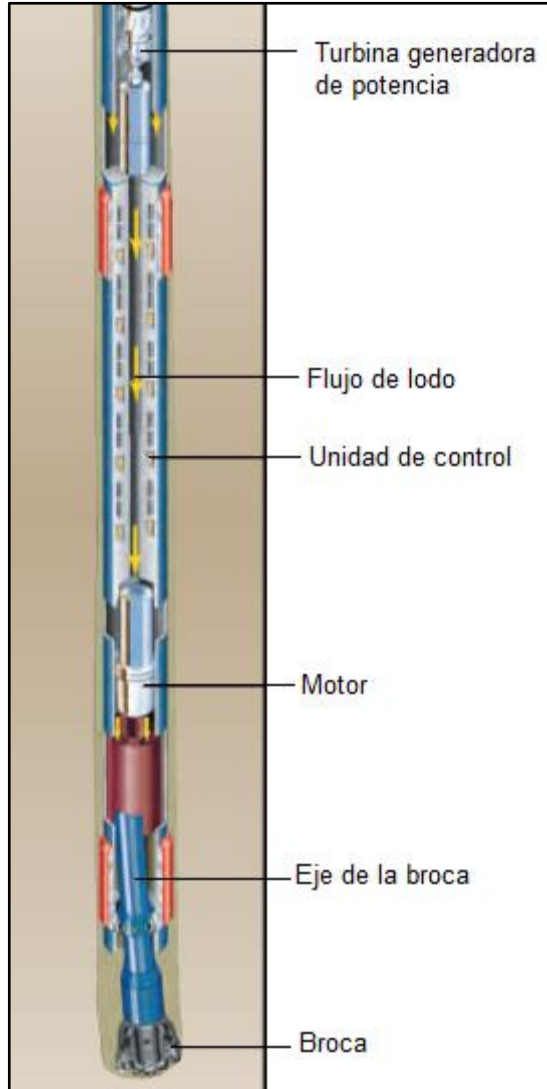
Fuente: SCHLUMBERGER, oilfield review, Power Drive, 2000, p. 25.

- **Unidad de Control.** Se encuentra ubicada detrás de la unidad sesgada, contiene dispositivos electrónicos, sensores y un mecanismo de control que proporcionan la magnitud y la dirección promedio de las cargas del lado de la broca, necesarias para alcanzar la trayectoria deseada.

La unidad de control está montada sobre cojinetes que le permiten rotar libremente alrededor del eje de la sarta de perforación. Por medio de su propio sistema de activación, se puede dirigir a la unidad de control para que mantenga un ángulo de giro determinado, o ángulo de orientación de la herramienta con respecto a la roca de formación. Los sensores del acelerómetro y magnetómetro de tres ejes proporcionan información relativa a la inclinación y al azimut de la broca, además de la posición angular del eje de impulso.

2.3.2.2 Sistema “Point the bit”. El sistema “Point the bit” trabaja desviando la trayectoria de la broca bajo el mismo principio del “Bend Housing” del motor de fondo, ubicándolo dentro de una camisa exterior, dando la dirección deseada mientras la sarta está en rotación continua. Cuenta con una unidad de control que tiene las mismas funciones que en el sistema “Push the bit” y un eje rotario. (Ver **Figura 34**).

Figura 34. Secciones Rotary Steerable System-Point the bit.



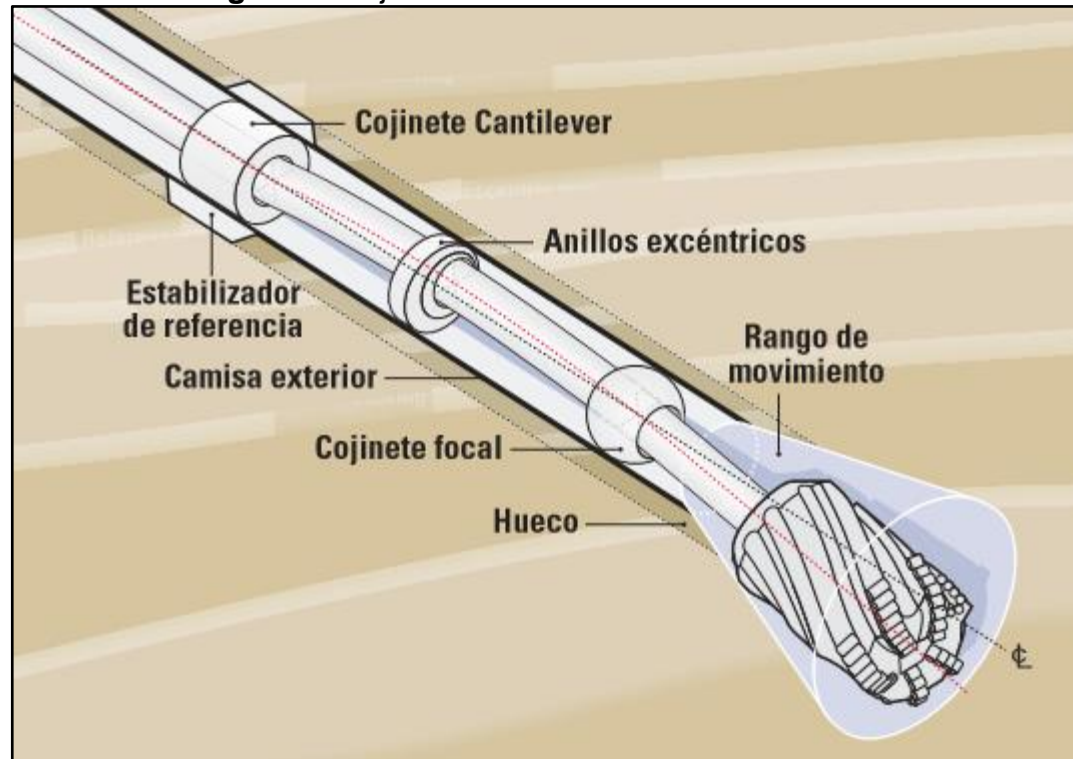
Fuente: SCHLUMBERGER, oilfield review, Vol 23, No. 4, 2000, p. 40; Modificado por los autores.

- **Eje rotario.** Es el encargado de dar la dirección a la broca a través de un sistema compuesto por cojinete Cantilever, anillos excéntricos y cojinete focal, que en conjunto actúan como un codo interno (Ver **Figura 35**), donde el cojinete Cantilever sostiene en la parte superior el eje de transmisión que conecta a la broca, los anillos excéntricos mueven el eje de transmisión fuera del centro de la herramienta, ocasionando que el eje de transmisión se doble y el cojinete focal convierte esa desviación en una dirección desde el eje de la broca.

Este conjunto está incluido dentro de la camisa de la herramienta que se encuentra inmediatamente arriba de la broca. La orientación de este codo interno

está controlada por un servomotor que gira a la misma velocidad que la sarta de perforación, pero en sentido contrario. Esto permite que el ángulo de la herramienta permanezca sin rotar mientras la sarta gira.

Figura 35. Eje rotario del Sistema “Point the bit”.



Fuente: HALLIBURTON, sperry drilling services, Geo-Pilot, 2007, p.1.

- **Unidad de control.** Está compuesta por sensores y herramientas electrónicas que controlan la desviación de la herramienta a través de comandos de pulso negativo y monitorean la trayectoria que se está realizando.

2.3.3 Efecto “Fulcrum”. En pozos con una inclinación de tres (3) grados o más fuera de la vertical, los Drill Collars que se encuentran por encima del Near Bit se encorvarán hacia el lado inferior, forzando la broca hacia el lado superior aumentando el ángulo del pozo a medida que la perforación progresa. Esto se conoce como el efecto Fulcrum. La selección adecuada del diámetro de Drill Collars puede controlar la velocidad de aumento del ángulo con este conjunto de fondo. Cuanto más flexible sea el conjunto que se encuentra por encima del punto de apoyo, más rápido puede aumentar el ángulo del pozo. La aplicación del peso excesivo causará que el conjunto de fondo se doble más en dirección de la encorvadura inicial.

2.4 ENSAMBLAJE DE FONDO (BHA) CORRIDO CON EL DISEÑO DE BROCA U519S 12 ¼” DE ULTERRA™ CON CALIBRE CORTO

Entendiendo los conceptos básicos de las herramientas direccionales, que afectan de manera importante el rendimiento de la broca, se puede exponer que tipo de ensamblaje de fondo se utilizó en los pozos realizados por Ulterra™ con broca de calibre corto en el Campo Castilla.

Este diseño de broca se ajusta para trabajar con motor de fondo o con herramienta rotatoria según sea el requerimiento del ensamblaje de fondo. Para efectos de esta investigación, los pozos de comparación fueron perforados con ambas tecnologías, pero de los tres pozos corridos con este diseño dos ensamblajes incluían un motor de fondo y un ensamblaje una herramienta rotatoria (RSS).

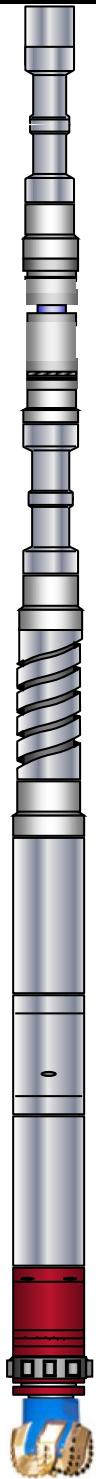
A continuación, se presentarán los BHA´s utilizados en la perforación de los pozos con el diseño de broca con calibre corto en el Campo Castilla.

2.4.1 Pozo Castilla 322. En este pozo la broca de 12 ¼” entro a una profundidad de 1.023 ft (MD) y salió a una profundidad de 6.926 ft (MD), realizando un trabajo de perforación direccional con una inclinación de 50,64° en un intervalo de 5.903 ft (MD). Para este trabajo se utilizó el BHA presentado en el **Cuadro 12**, donde se muestran gráficamente las herramientas que se incluyeron en la operación. Como herramienta de control direccional se corrió un motor de fondo con un Bend Housing de 1,5° y una configuración de lóbulos 6/7.

2.4.2 Pozo Castilla 342. En este pozo la sección de 12 ¼” se realizó a partir de 1.010 ft (MD) y se dio por terminada a la profundidad de 6.921 ft (MD), en donde la broca en conjunto con el ensamblaje direccional que se presenta en el **Cuadro 13**, dieron al pozo una inclinación de 48,65° en un intervalo de 5.911 ft (MD). La herramienta utilizada para el trabajo direccional fue un motor de fondo con un Bend Housing de 1,5° y una configuración de lóbulos 6/7.

2.4.3 Pozo Castilla 361. En esta corrida la broca de 12 ¼” entro a una profundidad de 981 ft (MD) y terminó la sección a una profundidad de 6.837 ft (MD), dejando el hueco con una inclinación de 40,65°, este trabajo direccional se realizó en un intervalo de 5.856 ft (MD) y con el ensamblaje de fondo del **Cuadro14**. En este pozo se bajó un ensamblaje con una herramienta rotatoria (RSS) de tipo “Push The Bit” que era la encargada de realizar el trabajo direccional, mostrando la capacidad de adaptación de la broca a cualquier herramienta de control direccional.

Cuadro 12. BHA corrido en el pozo C322.

	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	

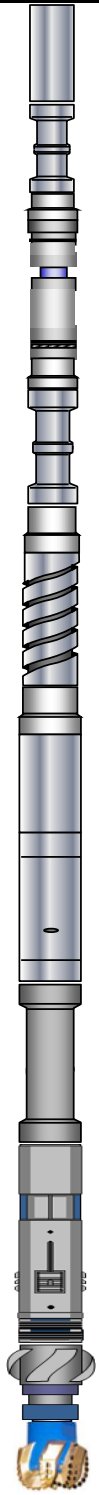
Fuente: Ecopetrol S. A. Reporte final de la sección 12 ¼" C322.

Cuadro 13. BHA corrido en el pozo C342.

	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.

Cuadro 14. BHA corrido en el pozo C361.

	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.

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

En este capítulo se presenta la teoría pertinente a calidad del hueco, característica que se espera mejorar con la implementación del nuevo diseño de broca con calibre extendido realizado por Ulterra™ a Ecopetrol para el desarrollo de la presente campaña 2016 de perforación en el Campo Castilla.

Posteriormente se expone el diseño de la nueva broca y las principales características que fueron modificadas con respecto al diseño anterior, para poder optimizar los tiempos de viaje de tubería.

3.1 CALIDAD DEL HUECO

La calidad del hueco puede ser un factor fundamental en el tiempo y costo total de la construcción y el completamiento de un pozo, determinando, en la mayoría de veces, el éxito de la operación. Un claro ejemplo se evidencia en los pozos realizados costa afuera (Offshore), que han venido tomando mucha importancia en los últimos años, ya que la extensión de sus alcances es directamente proporcional a la calidad de ellos mismos.

La razón fundamental del porque la calidad del hueco es de suma importancia se debe, a que los resultados de ésta buena práctica, han tenido un impacto de gran alcance en las operaciones individuales llevadas a cabo en los distintos pozos, ayudando a reducir los tiempos de viaje de tubería mientras se perfora, facilita la colocación y cementación del revestimiento y proporciona trabajos de workover más sencillos. Esto tan solo en el área de construcción, completamiento y mantenimiento del pozo, pues se ha demostrado que una buena calidad del hueco, también tiene impacto positivo en otras áreas.

Esta característica, es definida por la conjunción de diferentes variables, entre otras están, las propiedades tixotrópicas del lodo, la configuración de la sarta, el desarrollo y la ejecución del plan direccional, el diseño de la broca utilizada, las formaciones a atravesar y de más, pero para fin de este proyecto, se enfocará la calidad hacia el rendimiento de la broca, con esto se quiere decir que solo se tendrá en cuenta el espiralamiento, las vibraciones y el calibre, como parámetros fundamentales para la definición de calidad del hueco.

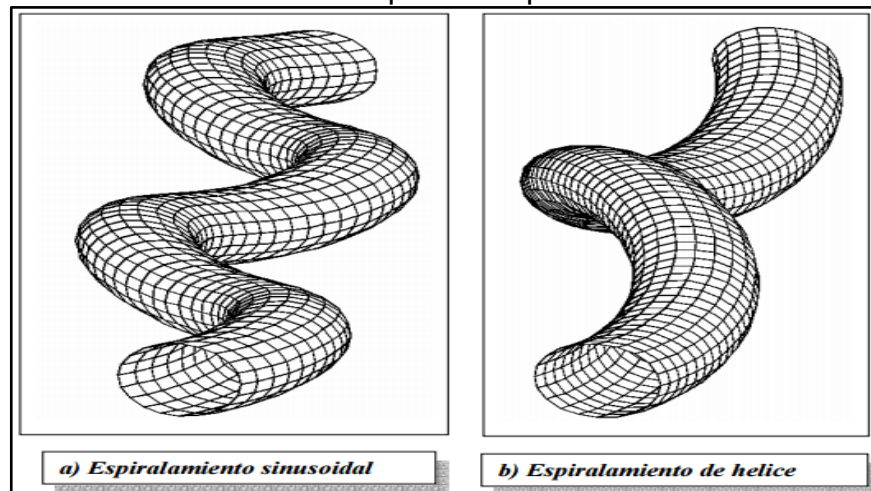
3.1.1 Espiralamiento. La calidad del hueco, normalmente es relacionada solo con su rugosidad y estabilidad, no obstante, estudios recientes han demostrado que el espiralamiento es el problema principal que caracteriza generalmente un hueco de mala calidad y que al tener acciones específicas enfocadas a este problema su grado de afectación se reduce drásticamente.

El ingeniero civil belga, Arthur Lubinski (1910-1996) en su publicación “*Straight-Hole Drilling in Crooked-Hole Country*” hecha en 1951, habló por primera vez de espiralamiento, y se refirió a las perforaciones ya realizadas que presentaban este problema, como huecos torcidos.

A partir del estudio realizado por Lubinski, este término ha tenido varios sinónimos dentro de la industria y se ha intentado buscar solución a este problema de distintas maneras sin lograr un resultado positivo, sin embargo, la implementación de herramientas direccionales como los motores de fondo y los RSS, ha generado un gran aumento de la calidad del hueco, reduciendo el espiralamiento drásticamente a partir del mejoramiento de aspectos de la perforación como reducción de las vibraciones, prolongación de la vida útil de la broca, necesidad de menor torque, optimización del proceso de cementación y demás, generando un impacto económico positivo.

El espiralamiento entonces se puede definir como el principal fenómeno presente en un hueco de mala calidad, caracterizado por dar al mismo una forma sinusoidal o helicoidal (dependiendo del tipo de espiralamiento presentado, Ver **Cuadro 15**) alrededor de la línea central de su trayectoria, con variaciones de diámetro a distintas profundidades generando puntos apretados, y patas de perro (Dog leg) severas. Este fenómeno se puede presentar por incremento de torque, pérdida de calibre y estabilidad de la broca, cargas de compresión axial por encima de un valor crítico y de más factores que aún se encuentran en estudio.

Cuadro 15. Tipos de espiralamiento.



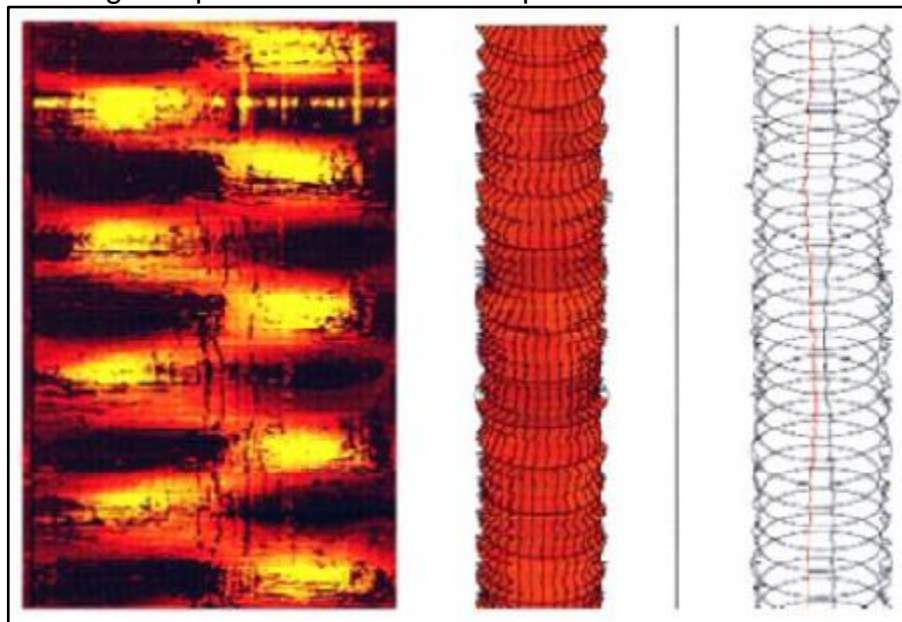
Fuente: MISKA. Casing and tubing design. Petroleum Well Construction. CD-Rom.

El espiralamiento sinusoidal se asocia para bajas cargas de compresión y el helicoidal para altas cargas compresivas. Ambos casos presentes en pozos de alta inclinación u horizontales.

La geometría inadecuada del hueco es un área irrelevante en muchas ocasiones, pero es importante determinar realmente, si el espiralamiento es prevalente a lo largo de su trayectoria para poder tomar medidas correctivas con respecto a este.

El espiralamiento del hueco, en muchas ocasiones es complejo de detectar debido a que las mediciones de ángulo y Azimut, mientras se realiza el trabajo direccional, se hacen cada 30 o 90 pies, según lo considere el ingeniero encargado de la operación, mostrando una variación de la trayectoria muy pequeña, enmascarando el problema real, sin embargo, una forma de tirabuzón o de ola, puede ser vista de manera clara por un registro Caliper ya sea 2D o 3D. (Ver **Figura 36**)

Figura 36. Imagen representativa de un Caliper 3D corrido en hueco espiralado.



Fuente: SPE. Gage Design – Effects of Gage Pad Length. 2006.

La calificación de la broca después de la perforación del hueco, puede ser otro método efectivo de detección de espiralamiento, pues está puede mostrar desgaste cóncavo.

Cuando se perfora formaciones poco abrasivas, el espiralamiento del hueco es detectado por un incremento de torque, el cual puede ser generado por la inestabilidad de las paredes del pozo, pérdida de calibre de la broca y cambios bruscos en la inclinación o dirección del hueco. El espiralamiento genera que los viajes de tubería sean más difíciles, de igual manera la toma de registros y la colocación y cementación del revestimiento.

3.1.2 Vibraciones. La perforación de un pozo requiere de la combinación de una serie de herramientas que son ensambladas como un conjunto en la sarta de perforación, por medio de la cual se logra comunicación física con la superficie y se

construye el hueco. Para hacer efectiva la perforación deben aplicarse fuerzas de peso y rotación sobre la roca para poder cortar la misma, estas fuerzas tienen una respuesta reactiva por parte de la formación que genera que en algunos casos se den vibraciones de todos los componentes de la sarta.

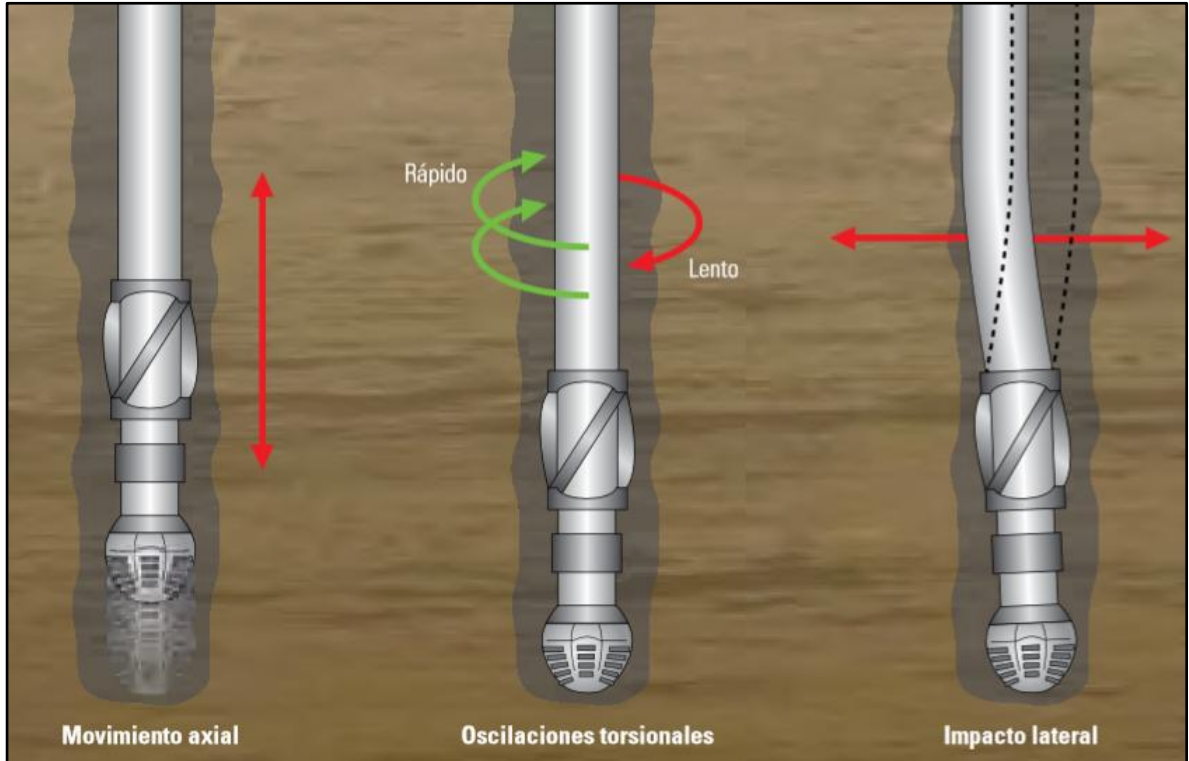
El efecto de corte que realiza la broca en la formación genera una transferencia de energía al motor, BHA y la tubería de perforación. De igual manera el contacto de la formación con cada una de las herramientas del BHA transfiere energía a lo largo de toda sarta de perforación que si no es controlada adecuadamente puede desencadenar una vibración nociva para la operación. Algunos resultados del daño por vibraciones son: daño en conexiones, cortadores de las brocas dañados y perdidos, fallas en el motor de fondo y las herramientas MWD/LWD, torque excesivo en las conexiones, daños en los estabilizadores, bajo control direccional, colgamiento del motor de fondo y hasta daños en herramientas de superficie.

La combinación de las vibraciones generadas por la broca, el motor de fondo y el BHA llevan a que se den los modos de vibración.

3.1.2.1 Modos de vibración. Existen tres modos de vibración presentes en la sarta de perforación: Axial, Lateral y Torsional; estos modos describen la dirección que toma la sarta al momento de la vibración. (Ver **Figura 37**).

- **Axial.** Las vibraciones axiales generan un movimiento paralelo a la sarta de perforación, es decir hacia arriba y hacia abajo en el hueco, es producida por las fuerzas tensionales y compresivas ejercidas sobre la sarta de perforación.
- **Lateral.** Este modo de vibración genera un movimiento perpendicular a la sarta de perforación, es decir hacia las paredes del pozo. Se caracteriza por mover la sarta de perforación de un lado al otro dentro del hueco y es producida por los esfuerzos ejercidos sobre la sarta para vencer las formaciones.
- **Torsional.** El modo torsional genera que se dé una rotación irregular en la broca ya que este se produce por la resistencia a la rotación dentro del pozo, es el resultado del peso sobre la broca y torque producido por las formaciones que se van perforando.

Figura 37. Modos de vibración.

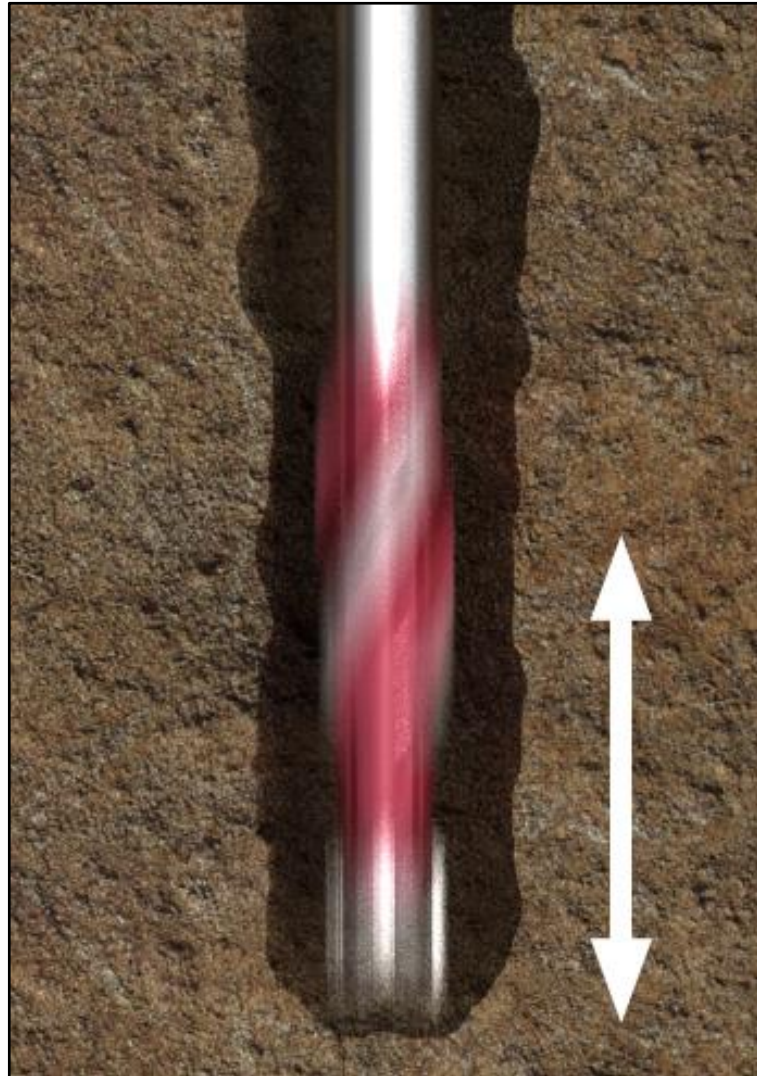


Fuente: SCHLUMBERGER. Diseño de las brocas, Oildfield Review, 2011, p. 5.

3.1.2.2 Fenómenos vibratorios. Los modos de vibración se combinan durante la perforación generando nueve diferentes fenómenos vibratorios.

- **Bit Bounce.** Presenta dos modos de vibración, el axial y el lateral; es típico encontrarlo en formaciones muy duras. Es causado debido a fluctuaciones en el peso sobre la broca, cuando es sometida a cargas de impacto. El Bit Bounce genera un efecto de rebote de la sarta contra la formación, perjudicando severamente la broca y el BHA por los choques laterales y axiales de este con las formaciones. Este fenómeno se puede ver en brocas tricónicas y PDC. (Ver **Figura 38**).

Figura 38. Bit Bounce.



Fuente: WEATHERFORD, Mud lubricated drilling motors, handbook, segunda edición, enero de 2010, p. 30.

- **Stick Slip.** Es originado cuando la broca para de rotar, pero el resto de la sarta continúa en rotación, esto genera que se dé una acumulación de energía potencial, la cual es liberada en el momento que la broca vuelva a rotar. El modo de vibración es torsional, por lo que genera que se libere la acumulación de energía en una rápida rotación de la sarta para volver a su lugar. (Ver **Figura 39**).

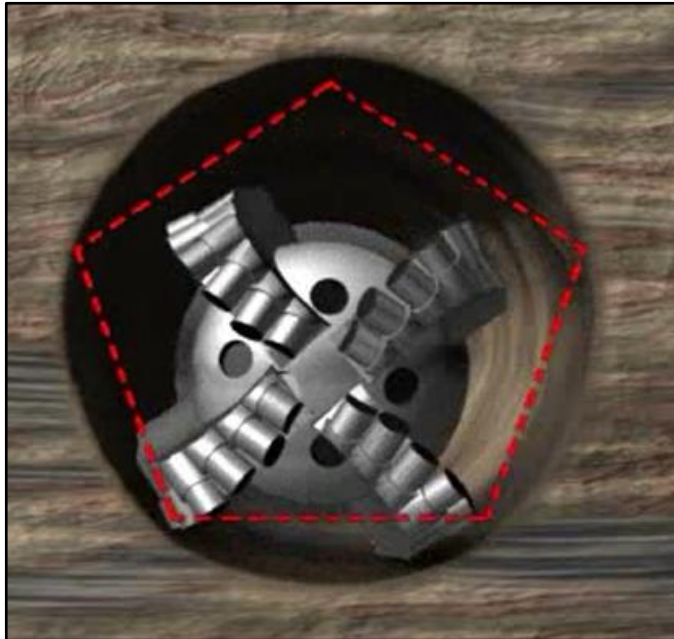
Figura 39. Stick Slip.



Fuente: WEATHERFORD, Mud lubricated drilling motors, handbook, segunda edición, enero de 2010, p. 32.

- **Torbellino de la broca o Bit Whirl.** Esta vibración está presente en brocas PDC. Se evidencian vibraciones laterales de alto impacto y torsionales. La acción de corte entre los cortadores de la broca y las formaciones generan una vibración creada a causa de la agresividad de los cortadores laterales de la broca en la penetración de formaciones duras a intermedias. Esta vibración desencadena en una rotación excéntrica de la broca en el hueco y junto con un bajo WOB, aumentan el calibre del pozo. Con un calibre del hueco más grande, la broca rota formando un pentágono en el fondo del pozo, disminuyendo la tasa de penetración y comprometiendo la integridad del BHA. (Ver **Figura 40**).

Figura 40. Vibración el torbellino de la broca.



Fuente: HALLIBURTON. Vibration mitigation, Sperry Drilling Services PDF-manual, 2010, p. 32.

Este fenómeno vibratorio puede dañar la estructura de corte de la broca y reducir su vida útil por las cargas de impacto ocasionadas por el movimiento rápido en varias direcciones.

- **Torbellino del BHA o BHA Whirl.** Es el resultado de altos esfuerzos torsionales y vibraciones laterales. Al igual que en el torbellino de la broca, se desencadena una rotación excéntrica, pero en este fenómeno se ve afectado directamente el BHA, generando desplazamientos laterales y choques contra la formación incrementando la fricción en el fondo del pozo. Pueden ocasionar severos daños en las uniones de las herramientas y en los estabilizadores. El BHA Whirl es comúnmente encontrado en configuraciones del tipo péndulo, hoyos con diámetro aumentado y en áreas con problemas por el lavado de las paredes del hueco.
- **Choques laterales o Lateral Shocks.** Es la combinación del Bit Bounce o Bit Whirl y el BHA Whirl. Cuando se produce entran dos modos de vibración en la sarta: el axial y el lateral. Genera que los componentes del BHA choquen contra la cara del pozo, dañando el BHA y la broca de perforación. El contacto con la cara del pozo resulta en lapsos de inestabilidad combinado con fluctuaciones del peso sobre la broca y el torque. Los choques laterales son comunes en BHA con pocos estabilizadores. (Ver **Figura 41**).

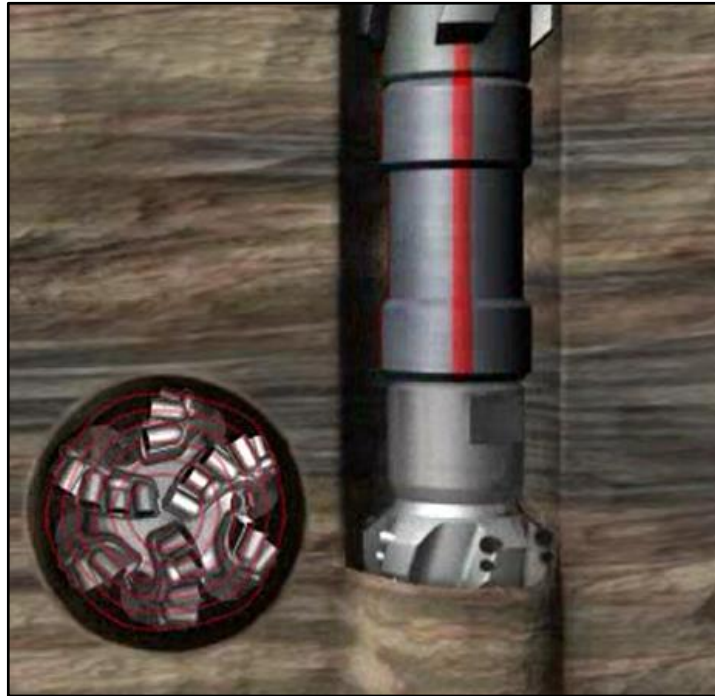
Figura 41. Choques laterales.



Fuente: WEATHERFORD, Mud lubricated drilling motors, handbook, segunda edición, enero de 2010, p. 35

- **Bit Chatter.** Es la combinación de los modos de vibración torsional y lateral, se presenta frecuentemente en brocas PDC. Este fenómeno genera una rotación excéntrica de la broca, generado por la resistencia de la formación a ser perforada. Comienza con la vibración de los cortadores a causa de las fuerzas laterales sufridas durante el recorrido de corte de cada uno de ellos. (Ver **Figura 42**).

Figura 42. Vibración de la broca o Bit Chatter.



Fuente: HALLIBURTON. Vibration mitigation, Sperry Drilling Services PDF-manual, 2010, p.35.

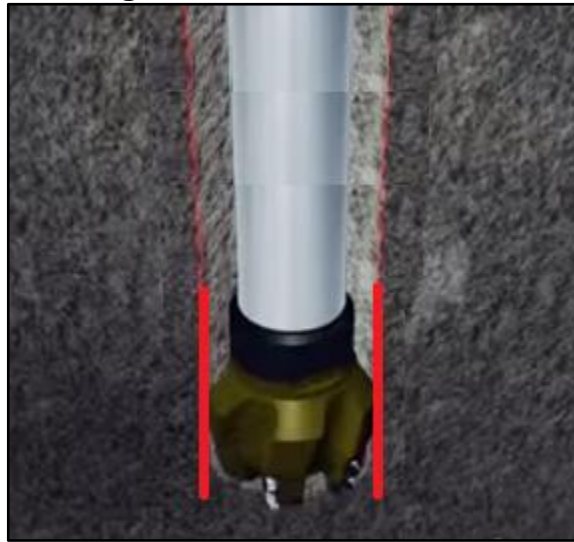
- **Resonancia torsional o Torsional Resonance.** Es un fenómeno muy común en brocas PDC generando que esta rote por segmentos y no continuamente. Es causado por el torque reactivo que desarrollan las formaciones en su resistencia a ser perforadas.
- **Resonancia paramétrica o Parametric Resonance.** Combina los tres modos de vibración en la sarta de perforación: axial, lateral y torsional; por las fuerzas que genera cambia la dirección de la broca fácilmente, dificultando el trabajo y control direccional del pozo.
- **Mixta o Modal Coupling.** Se presentan simultáneamente los tres tipos de modos de vibración axial, torsional y lateral. Genera choques laterales muy fuertes del BHA, gran aumento del calibre del pozo y poco control del trabajo direccional.

3.1.3 Calibre del hueco. Es definido como la medida en pulgadas (in) del diámetro del cilindro ideal construido por la broca y el BHA, a través de las formaciones que conforman el subsuelo para poder llegar al objetivo de producción en fondo. La perforación de pozos de petróleo se realiza de un calibre mayor en superficie a un calibre menor en la fase de producción, y esta medida del calibre del hueco es dada idealmente por el diámetro de la broca que perfora la fase, pero se presentan escenarios donde el calibre del hueco es diferente al diámetro de la broca. Se

pueden presentar dos situaciones: hueco fuera de calibre y hueco en calibre, las cuales son generadas por diferentes causas como las vibraciones, formaciones poco consolidadas, pesos inadecuado del lodo, entre otras.

3.1.3.1 Hueco en calibre. El escenario ideal es que el hueco quede en calibre como se observa en la **Figura 43**, es decir que, el diámetro del hueco sea igual al diámetro de la broca con la que se perfora dicha fase. Este escenario depende de la suma de varios factores como la mitigación de las vibraciones, consolidación de las formaciones, pesos del lodo y prácticas correctamente aplicadas.

Figura 43. Hueco en calibre.



Fuente: ULTERRA, Ulterra's Bit technology;
Modificado por los autores.

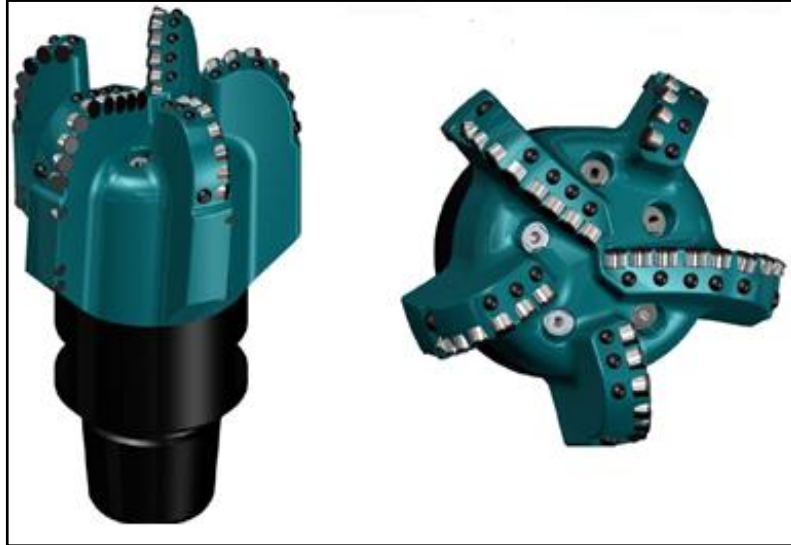
3.1.3.2 Hueco fuera de calibre. Cuando el diámetro del hueco es diferente al diámetro de la broca se tiene un hueco fuera de calibre, que puede estar dentro de esta categoría por dos escenarios distintos, un hueco derrumbado o lavado y un hueco apretado.

- **Hueco derrumbado o lavado.** Esta situación se presenta cuando el hueco se derrumba y el calibre del mismo termina siendo mayor al diámetro de la broca con que se está perforando la sección. Puede presentarse por la perforación en formaciones poco consolidadas y choques laterales de la sarta de perforación contra la cara de las formaciones.
- **Hueco apretado.** Al contrario de la situación anterior, cuando hay un hueco apretado el calibre del hueco es menor al diámetro de la broca, esto puede darse por hinchamiento de Arcillas o acumulación de cortes en el pozo.

3.2 NUEVO DISEÑO DE BROCA DE 4" EN EL GAUGE PAD

Esta nueva broca se caracteriza por tener un cuerpo fabricado en acero, con cinco (5) aletas, 54 cortadores de 19 mm distribuidos en toda la broca, una extensión del calibre de cuatro (4) pulgadas y un sistema hidráulico constituido con cinco (5) boquillas. (Ver **Figura 44**).

Figura 44. Nuevo diseño de broca 12 ¼" de Ulterra™.



Fuente: ULTERRA, U519M, Bogotá 2016.

3.2.1 Diferencias entre el diseño de broca actual y el nuevo diseño. En la página siguiente, se presentan las fichas técnicas de las dos brocas en estudio (la broca de calibre corto y la broca de calibre largo). (Ver **Figura 45**).

Con la implementación del nuevo diseño de broca, Ulterra™ espera aumentar su agresividad, reducir las vibraciones y mejorar la calidad del hueco, significativamente. Para esto se cambiaron las siguientes características;

- **Extensión del calibre:** Se pasó de una extensión de 2,5" a una de 4" en el calibre. Al aumentar el área de contacto, entre la broca y la formación, se espera optimizar su estabilidad, mejorando la conformación del hueco.
- **Numero de cortadores en el calibre:** El número de cortadores (20 cortadores) en esta parte de la broca no cambio, sin embargo, su distribución si fue modificada. Anteriormente se tenía diez (10) cortadores de calibre y cinco (5) de rimar saliendo, en el nuevo diseño estos valores fueron intercambiados, es decir ahora se tiene cinco (5) de calibre y diez (10) de rimar saliendo. Con este cambio se espera optimizar las repasadas del hueco para disminuir su cantidad y tiempo.
- **Agresividad:** Los ángulos de entrada de los cortadores a la formación y el número de boquillas fueron cambiados para aumentar su capacidad de corte.

- **Junk Slot Area:** Debido al aumento de la agresividad, se decidió cambiar la extensión de área de remoción de cortes de 44,63 pul² a 48,98 pul² para que su evacuación sea más rápida.
- **Limitadores de Corte:** En el diseño actual se trabajaba con limitadores de corte en dos aletas, en el nuevo se adicionan limitadores de corte en las cinco (5) aletas, para evitar el enterramiento de la herramienta.
- **Volumen de la cara:** El volumen de la cara está relacionado de manera directamente proporcional con la extensión del área de remoción de cortes, lo cual provocó un aumento de 247,09 pulgadas cuadradas a 271,16 pulgadas cuadradas. La relación de volumen de la cara es utilizada como parámetro de comparación en función del tamaño con respecto a otras brocas.
- **Número de Boquillas:** Se modificó el número de boquillas eliminando dos (2). Con esto se busca tener una apertura igual de todas las boquillas de la broca manteniendo el comportamiento hidráulico y optimizando la labor de limpieza del hueco con una uniformidad de presión presente en cada una de las boquillas.

Figura 45. Comparación fichas técnicas diseño actual vs nuevo diseño.

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

Fuente: ULTERRA, U519M, Bogotá 2016.

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

En este capítulo se presentan los documentos e imágenes que comprueban la implementación de la broca con calibre extendido en la sección de 12 ¼" de los pozos del Campo Castilla.

Este nuevo diseño fue implementado en la perforación de la segunda sección (12 ¼") de los pozos CA236, CA471, CA217 Y CA316; en respectivo orden cronológico, realizados en la presente campaña de perforación en el Campo Castilla.

La broca tipo U519S Serial 29428 fue implementada el 15 de Mayo del 2016 en la perforación de la segunda sección del pozo CA236 (ver **Figura 46**), cumpliendo el contrato que tiene como objeto el suministro de brocas y herramientas complementarias en relación con las mismas, para la presente campaña de perforación en el Campo Castilla.

Figura 46. Salida de la broca en el pozo CA236 al alcanzar la formación objetivo.



Fuente: ULTERRA, 2016.

La corrida de la broca tuvo una duración de ocho (8) días, entrando (Drill Out) a una profundidad de 1003 ft y terminando la perforación de esta sección el día 22 de Mayo del 2016 a una profundidad de 6876 ft, llegando a la formación objetivo.

En la **Figura 47**, se muestran las fotos de la broca antes de ser corrida, y en la **Figura 48**, se muestran las fotos de la broca después de la perforación de la sección.

Figura 47. Broca con calibre largo nueva.



Fuente: ULTERRA, 2016.

Figura 48. Broca con calibre largo usada.



Fuente: ULTERRA, 2016.

A continuación, se muestra el acta de operaciones de la corrida de la broca como constancia de la información presentada en el párrafo anterior. (Ver **Cuadro 16**).

Cuadro 16. Acta de operaciones de la broca con calibre largo.

<u>ACTA DE INICIO DE OPERACIONES</u>										
El día 15 DE MAYO DE 2016 se reunieron en la locación del pozo CASTILLA 236 los abajo firmantes para dar inicio a la corrida de BROCA DE 12 1/4" , Tipo U519S Serial 29428 servicio relacionado en el contrato No. xxxxxxx, cuyo objeto es: "SERVICIO CON SUMINISTRO Y/O ALQUILER DE BROCAS Y BOQUILLAS, HERRAMIENTAS PARA MEJORAR EL DESEMPEÑO DE LA BROCA Y SUMINISTRO DE SERVICIOS COMPLEMENTARIOS EN RELACION CON LAS MISMAS".										
<u>ACTA DE CORRIDA DE BROCA</u>										
El día 22 DE MAYO DE 2016 se reunieron en la locación del pozo CASTILLA 236 el Ing. _____ y el Ing. _____ para dar constancia de la corrida de la broca utilizada en la sección de 12 1/4" .										
<u>ACTA DE FINALIZACION DE OPERACIONES</u>										
El día 22 DE MAYO DE 2016 se reunieron en la locación del pozo CASTILLA 236 los abajo firmantes para dar fin a la corrida de BROCA DE 12 1/4" , Tipo U519S Serial 29428 , servicio relacionado en el contrato No. xxxxxxx, cuyo objeto es: "SERVICIO CON SUMINISTRO Y/O ALQUILER DE BROCAS Y BOQUILLAS, HERRAMIENTAS PARA MEJORAR EL DESEMPEÑO DE LA BROCA Y SUMINISTRO DE SERVICIOS COMPLEMENTARIOS EN RELACION CON LAS MISMAS".										
BIT N°	Tipo	Serie N°	Fecha Entrada	Fecha Salida	Prof. Entrada	Prof. Salida	Pies Perf	Hrs Efc.	ROP	Calificación
								Hrs w/con.		
3	U519S	29428	15-may-16	22-may-16	1003	6876	5873	35,00	167,80	0-0-NO-A-X-I-NO-TD
								74,00	79,36	
En constancia firman:										
_____ ING. COMPANY MAN						_____ ING. DE BROCAS				

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

Esta es una muestra de los documentos que comprueban la implementación de la broca en la perforación de cuatro (4) pozos en el Campo Castilla. Se toma como ejemplo el pozo CA236, debido a que fue el primer proyecto ejecutado con el nuevo diseño de broca con calibre largo. En la **Tabla 2**, se presenta de manera resumida la información básica de los cuatro (4) pozos perforados con la broca en mención.

Tabla 2. Información básica de los pozos perforados con calibre largo (12 1/4").

Pozo	Fecha de entrada	Prof. de entrada (ft)	Fecha de salida	Intervalo perforado (ft)	Calificación Broca
CA236	15/05/16	1003	22/05/16	5873	0-0-NO-A-X-I-NO-TD
CA471	28/06/16	995	03/07/16	5551	0-1-WT-G-X-I-NO-TD
CA217	21/07/16	1030	26/07/16	5750	0-1-WT-S-X-I-NO-TD
CA316	26/08/16	1010	31/08/16	5668	0-1-BT-G-X-I-ER-TD

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016; Modificado por los autores.

5. EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DEL NUEVO DISEÑO DE LA BROCA POLICRISTALINA CON CALIBRE EXTENDIDO EN LA SECCIÓN 12 ¼" EN EL CAMPO CASTILLA

En este capítulo, se podrá ver el desempeño del nuevo diseño de broca con calibre largo implementada en la perforación de cuatro pozos en el Campo Castilla en la sección 12 ¼". Este desempeño se ilustra comparando las principales variables operativas como la ROP efectiva, peso sobre la broca, presión, torque y energía mecánica específica durante la perforación de toda la sección mediante un análisis por formaciones atravesadas para tener una mejor visualización de los datos. Los pozos que son analizados fueron realizados durante la presente campaña de perforación que ejecuta Ecopetrol S. A. en el Campo Castilla. Los pozos en mención son en orden cronológico: CA236, CA471, CA217 Y CA316.

5.1 CASTILLA 236

El pozo Castilla 236, fue el primer pozo realizado con el nuevo diseño de broca con calibre extendido, corrida en la fase de 12¼". Para llevar a cabo el proyecto se utilizó el taladro WDI 825™ perteneciente a Weatherford, que utiliza 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 95% y una presión de operación máxima de 4500 psi. La corrida de la fase inició a las 19:00 horas del 15 de Mayo del 2016, llegando a la formación objetivo a una profundidad de 6876 ft a las 23:42 del 22 de Mayo del 2016. En la **Cuadro 17**, se pueden observar los detalles de la corrida de la sección de 12 ¼" del pozo CA236.

Cuadro 17. Detalles de la corrida pozo CA236.

DETALLES DE LA CORRIDA					
FECHA DE ENTRADA	15/05/2016				
FECHA DE SALIDA	22/05/2016				
DEPTH IN (Ft) (MD)	1003				
DEPTH OUT (Ft) (MD)	6876				
FOOTAGE (ft)	5873				
HORAS EFECTIVAS (HR)	35				
HORAS TOTALES (Hr)	74,00				
ROP EFECTIVA (Ft/Hr)	167,80				
ROP TOTAL (FT/Hr)	79,36				
PIES ROTADOS (Ft)	5873	Hr ROTADAS	35	ROP Rot (ft/hr)	167,80
PIES DESLIZADOS (Ft)	0	Hr Deslizadas	0	ROP Sld (ft/hr)	0,00
% ROTADO/% DESLIZADO	100,0%		0,0%		
MAX WOB SLD (Klbs)	0	MAX PRES DIF SLD (psi)		0	
MAX WOB ROT (klbs)	38	MAX PRES DIF ROT (psi)		50	
HORAS DE DRILL OUT (hr)	1,00				
CALIFICACIÓN IADC	0 - 0 - NO - A - X - I - NO - TD				

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

La broca utilizada para perforar la fase de 12 ¼" es de tipo U519S serial 29428 con un calibre activo de 4" de extensión. Según la clasificación de inventario de Ulterra™ el código IADC que recibió fue S223 y un número de parte U02438. La broca entró

en calidad de nueva (Figura 49) y presentó poco desgaste en toda su estructura (Figura 50).

Figura 49. Broca con calibre extendido nueva pozo CA236.



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

Figura 50. Broca con calibre extendido después de corrida pozo CA236.



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

En general la calificación que obtuvo la broca posterior a la corrida fue bastante buena. Se puede observar que no sufrió desgaste visible tanto en los cortadores internos como en los externos, tampoco presentó características de desgaste visible primario ni secundario en ninguna sección conservando su calibre. Al final de la sección la broca salió del pozo al alcanzar la formación objetivo.

El trabajo direccional, fue realizado con una herramienta rotaria (RSS) modelo Autotrack™ perteneciente a la compañía Baker Hughes. La perforación de la fase inició en la sección vertical del pozo a una inclinación de 0,77°, un azimut de 215,85° y a una profundidad de 1003 ft (TVD), se mantuvo verticalidad hasta la profundidad de inicio de trabajo direccional (KOP) a 4065 ft, donde se empezó a construir ángulo de inclinación a una de tasa (DLS) de 0,2°/100ft aumentándolo gradualmente hasta una tasa de construcción (DLS) máxima de 4,11°/100ft; en consecuencia, el promedio de la tasa (DLS) en la sección fue de 0,93°/100ft. La fase finalizó con una inclinación de 45,51°, un azimut de 347,35°, a 6691,47 ft (TVD) y 6876 ft (MD). El EOB del pozo está a 7100 ft (MD) y 6896 ft (TVD), profundidades pertenecientes a la perforación de la fase de 8½" del pozo.

La broca fue corrida con los parámetros óptimos determinados previamente por Ulterra™ en conjunto con los ingenieros direccionales y el Company Man que se pueden observar a continuación en la **Cuadro 18**.

Cuadro 18. Parámetros de perforación promedio del pozo CA236.

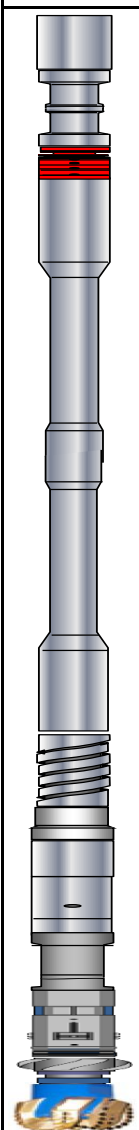
INFORMACIÓN DE PARAMETROS									
UNIDAD LITOLÓGICA	DEPTH IN (ft)	DEPTH OUT (ft)	FOOTAGE (ft)	HR Efec	ROP Efec (FT/HR)	WOB (Klbs)	PRESION (PSI)	TQ (KLb/FT)	MSE(PSI)
GUAYABO	1003	1022	19	0,22	86,36	10-15.	1457,4	4-7.	2150
ARENISCA SUP	1022	2547	1525	5,99	254,59	10-25.	2540,4	8-11.	3900
LUTITA E	2547	2786	239	1,07	223,36	20-35.	2737,4	7-11.	5300
C1	2786	3362	576	1,88	306,38	20-32.	2708,8	8-11	6700
ARENISCA CARB	3362	3566	204	0,42	485,71	20-35.	2968,4	7-12.	7500
C2	3566	5387	1821	10,33	176,28	20-38.	3401,7	7-14.	9850
E3	5387	6080	693	4,32	160,42	20-35.	3533,6	6-11.	9600
T1	6080	6240	160	1,34	119,40	20-30.	3385,2	7-12.	6200
E4	6240	6876	636	9,43	67,44	10-25.	3627,6	4-10.	50000

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

Con base en esta información, se evidencia que en la formación Arenisca Carbonera, la broca presentó su máxima ROP efectiva promedio, al igual que en la formación Lutita E4, tuvo su mínima ROP. Este comportamiento se puede asociar a la composición litológica de cada estrato, puesto que, la formación Arenisca Carbonera presenta el mayor porcentaje de arena de las formaciones atravesadas durante la perforación del pozo y, por el contrario, la Lutita E4, el mayor porcentaje shale.

El peso sobre la broca se ve afectado por la litología presente y por la inclinación del hueco, esto se puede evidenciar en los datos presentados en la tabla anterior, la formación guayabo a causa de su baja dureza requiere poco peso sobre la broca para poder ser perforada, contrario a la Lutita E, Lutita E3, Formación C1 y C2, donde debido a su consolidación y composición litológica intercalada de arcillolita, Lutita y Limolita se debe incrementar el peso sobre la broca. La presión tiene un comportamiento normal, asociado al aumento de la profundidad, basado en una relación directamente proporcional. Esto se ha de esperar debido al aumento de la presión hidrostática ejercida por el lodo de perforación. El ensamblaje de fondo (BHA) utilizado en la perforación del pozo CA236, se muestra en la **Figura 51**.

Figura 51. Ensamblaje de fondo del pozo CA236.



Tipo	OD (in)	ID (in)	Longitud (ft)
DP	5,0000	4,2800	5842,53
HWDP	6,6250	3,0000	92,47
Hydra Jar	6,5000	2,7500	32,52
HWDP	6,6250	3,0000	745,98
DC	6,5000	2,8125	92,16
X-Over	8,0000	2,8750	3,73
Sub Float	8,0000	2,8750	2,43
MWD	8,3500	2,7500	19,02
X-Over	9,5000	3,0000	3,6
AUTOTRACK	11,8600	2,5000	8,32
Bit	12,2500	12,2500	1,28

Fuente: ECOPETROL S. A. Reporte final de la sección 12 ¼" C236.

5.2 CASTILLA 471

El pozo Castilla 471, fue perforado por el taladro Pace-x 43™ que pertenece a la compañía Nabors, este tiene top drive como medio de rotación y empuje, posee una potencia de 1500 hp en el malacate y tres (3) bombas triplex con una eficiencia del 95% y una presión de operación máxima de 4200 psi. La perforación de la fase inició a las 13:00 horas del 28 de Junio del 2016, alcanzando la formación objetivo a una profundidad de 6546 ft a las 16:35 horas del 3 de Julio del 2016. En el **Cuadro 19**, se pueden observar los detalles de la perforación de la segunda fase del pozo CA471, perteneciente a la sección de 12 ¼”.

Cuadro 19. Detalles de la corrida pozo CA471.

DETALLES DE LA CORRIDA					
FECHA DE ENTRADA	28/06/2016				
FECHA DE SALIDA	3/07/2016				
DEPTH IN (Ft)	995				
DEPTH OUT (Ft)	6546				
FOOTAGE (ft)	5551				
HORAS EFECTIVAS (HR)	39,7				
HORAS TOTALES (Hr)	78,50				
ROP EFECTIVA (Ft/Hr)	139,82				
ROP TOTAL (FT/Hr)	70,71				
PIES ROTADOS (Ft)	4712	Hr ROTADAS	20,98	ROP Rot (ft/hr)	224,59
PIES DESLIZADOS (Ft)	839	Hr Deslizadas	18,72	ROP Sld (ft/hr)	44,82
% ROTADO/% DESLIZADO	84,9%			15,1%	
MAX WOB SLD (Klbs)	15	MAX PRES DIF SLD (psi)			200
MAX WOB ROT (klbs)	30	MAX PRES DIF ROT (psi)			500
HORAS DE DRILL OUT (hr)	1,50				
CALIFICACIÓN IADC	0 - 1 - WT - G - X - I - NO - TD				

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

El código IADC de la broca utilizada es S223 y según la clasificación de inventario de Ulterra™ su número de parte es U02438. La broca que entró como reparada (Ver **Figura 52**) es de tipo U519S con calibre activo de 4” de extensión. En la **Figura 53**, se puede evidenciar que tuvo poco desgaste en todas sus áreas después de terminar la perforación de la fase.

La calificación que se le dió a la broca, muestra que tuvo una corrida buena. Se puede observar que no sufrió desgaste alguno en los cortadores internos y que tuvo un mínimo desgaste en los externos, presentó señales de desgaste en los cortadores pertenecientes al calibre de la broca y contrario a esto en el resto de su estructura no presentó mayor daño, a pesar del desgaste de los cortadores del calibre la broca permanece calibrada. Al final de la sección la broca salió del pozo al alcanzar la formación objetivo.

Figura 52. Broca con calibre extendido reparada pozo CA471.



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

Figura 53. Broca con calibre extendido después de corrida en el pozo CA471.



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

La herramienta direccional que se usó en la perforación del pozo CA471, fue un motor de fondo con un ángulo de desviación (Bend Housing) de 1,5° modelo QLE6750™ propiedad de Weatherford.

La perforación de la segunda fase inició realizando trabajo direccional con una inclinación de 3,15°, un azimut de 209,16° y una profundidad vertical total de 994,5 ft, debido a que la profundidad de inicio de trabajo direccional se realizó en la primera sección, a diferencia del pozo CA236. Se tuvo una tasa de construcción de ángulo promedio (DLS) de 1,65°/100ft, con un máximo de 1,88°/100ft. La fase no presentó inconvenientes mayores, sin embargo, por decisión del equipo direccional se decide reparar dos (2) veces por cada parada, para mantener el calibre del hueco. La tasa de penetración efectiva de la broca (ROP), presentó una variación entre 100 ft/hora y 250 ft/hora, debido a las intercalaciones de Limolita y Lutita que caracterizan algunas de las formaciones presentes en la perforación del pozo. Se registró una tasa de penetración efectiva promedio de 70,71 ft/hora, y una tasa de penetración total de 139,82 ft/hora. La sección finalizó con una inclinación de 28,59°, azimut de 168,46°, a 6318 ft (TVD) y 6546 ft (MD). El EOB del pozo está a 7000 ft (MD) y 6708 ft (TVD), profundidades pertenecientes a la perforación de la fase de 8½" del pozo.

La broca fue corrida con los parámetros óptimos presentados en la **Cuadro 20**.

Cuadro 20. Parámetros de perforación promedio del pozo CA471.

INFORMACION DE PARAMETROS									
UNIDAD LITOLÓGICA	DEPTH IN (ft)	DEPT H OUT	FOOT AGE (ft)	HR Efec	ROP Efec (FT/HR)	WOB (Klbs)	PRESIO N (PSI)	TQ (KLb/ FT)	MSE(PSI)
GUAYABO	995	1030	35	0,18	194,44	5-20.	754,45	2-6.	9000
ARENISCA SUP	1030	2688	1658	4,90	338,37	5-20.	1921	6-9.	15000
LUTITA E	2688	2977	289	1,22	236,89	5-15.	2332,68	7-9.	25000
C1	2977	3136	159	0,75	212,00	10-20.	2397,65	7-10.	28000
ARENISCA CARB	3136	3424	288	1,31	219,85	10-20.	2385,16	6-9.	25000
C2	3424	5416	1992	12,69	156,97	10-25.	2868,68	7-10.	35000
LUTITA E3	5416	5877	461	6,84	67,40	10-22.	3096,23	8-12.	60000
T1	5877	6022	145	2,13	68,08	5-20.	3247,56	9-12.	56000
LUTITA E4	6022	6546	524	9,68	54,13	5-15.	3509,82	8-11.	89000

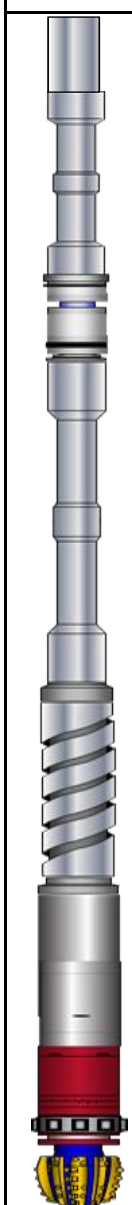
Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

Con base en la información anterior, se puede evidenciar que la broca presentó su mayor tasa de penetración efectiva (ROP) en la formación Arenisca Superior, y su menor tasa de penetración efectiva (ROP) en la formación Lutita E4. Al igual que en la perforación del pozo CA236, las variaciones de la tasa de penetración se

presentaron en función de la litología de manera directamente proporcional con el contenido de arena de cada estrato.

El peso sobre la broca en este pozo es menor al peso sobre la broca del CA236, esto ocurre en consecuencia a una disminución de la tasa de construcción de ángulo y de la inclinación total, derivando en un menor trabajo direccional. El ensamble de fondo (BHA) utilizado en la perforación del pozo CA471, se muestra en la **Figura 54**.

Figura 54. Ensamblaje de fondo del pozo CA471.



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" C471.

5.3 CASTILLA 217

El pozo Castilla 217, fue el tercer proyecto realizado con el nuevo diseño de broca con calibre extendido, corrida en la fase de 12¼" del pozo. Para llevar a cabo el proyecto se utilizó el taladro Pace-x 43™ perteneciente a Nabors, 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 95% y una presión de operación máxima de 4200 psi. La corrida de la fase inició a las 3:30 horas del 21 de junio del 2016, llegando a la formación objetivo a una profundidad de 6780 ft a las 23:30 del 26 de junio del 2016. En la **Cuadro 21**, se pueden observar los detalles de la corrida de la sección de 12 ¼" del pozo CA217.

Cuadro 21. Detalles de la corrida pozo CA217.

DETALLES DE LA CORRIDA					
FECHA DE ENTRADA	21/07/2016				
FECHA DE SALIDA	26/07/2016				
DEPTH IN (Ft)	1030				
DEPTH OUT (Ft)	6780				
FOOTAGE (ft)	5750				
HORAS EFECTIVAS (HR)	53,38				
HORAS TOTALES (Hr)	88,00				
ROP EFECTIVA (Ft/Hr)	107,72				
ROP TOTAL (FT/Hr)	65,34				
PIES ROTADOS (Ft)	4554	Hr ROTADAS	24,86	ROP Rot (ft/hr)	183,19
PIES DESLIZADOS (Ft)	1196	Hr Deslizadas	28,52	ROP Sld (ft/hr)	41,94
% ROTADO/%DESLIZADO	79,2%			20,8%	
MAX WOB SLD (Klbs)	15	MAX PRES DIF SLD (psi)			200
MAX WOB ROT (klbs)	25	MAX PRES DIF ROT (psi)			550
HORAS DE DRILL OUT (hr)	1,50				
CALIFICACIÓN IADC	0 - 1 - WT - S - X - I - NO - TD				

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

La broca utilizada para perforar la fase de 12 ¼" es de tipo U519S serial 29428 con un calibre activo de 4" de extensión. Según la clasificación de inventario de Ulterra™ el código IADC que recibió fue S223 y un número de parte U02438. La broca fue reparada para iniciar la perforación (Ver **Figura 55**) y presentó desgaste normal tanto en sus cortadores como en los hombros (Ver **Figura 56**).

Figura 55. Broca con calibre extendido reparada para el pozo CA217.



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

Figura 56. Broca con calibre extendido después de corrida en el pozo CA217.



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

La broca a pesar de haber sido reparada dos veces, sigue estando en calibre y presentando una buena calificación mostrando un desgaste normal, tanto en sus cortadores como en el hombro. No presentó desgaste secundario, y alcanzó la formación objetivo.

El trabajo direccional fue realizado con un motor de fondo (DHM) tipo Sperry Drill™ perteneciente a Halliburton. La perforación de la fase inició en la sección vertical del pozo a una inclinación de 0,68°, un azimut de 36,35° y a una profundidad de 1030 ft (TVD), no se generó inclinación hasta la profundidad de inicio de trabajo direccional (KOP) a 1145 ft, el KOP se inició a una tasa (DLS) de 0,25°/100ft aumentándolo gradualmente hasta una tasa de construcción (DLS) máxima de 2,05°/100ft; en consecuencia, el promedio de la tasa (DLS) en la sección fue de 0,91°/100ft. La fase finalizó con una inclinación de 34,18°, un azimut de 254,51°, a 6416 ft (TVD) y 6780 ft (MD). El EOB del pozo está a 6924,68 ft (MD) y 6533,68 ft (TVD), profundidades pertenecientes a la perforación de la fase de 8½" del pozo.

La broca fue corrida con los parámetros óptimos presentados en la **Cuadro 22**.

Cuadro 22. Parámetros de perforación promedio del pozo CA217.

INFORMACION DE PARAMETROS									
UNIDAD LITOLÓGICA	DEPTH IN (ft)	DEPT H OUT (ft)	FOOT AGE (ft)	HR Efec	ROP Efec (FT/HR)	WOB (Klbs)	PRESION (PSI)	TQ (Klb/ FT)	MSE(PSI)
ARENISCA SUP	1030	2676	1646	7,65	215,16	10-25.	2676	5-8.	12000
LUTITA E	2676	2978	302	1,50	201,33	10-22.	2957	6-9.	21000
C1	2978	3165	187	1,03	181,55	10-20.	3111	6-9.	21000
ARENISCA CARB	3165	3345	180	0,82	219,51	10-22.	3226	5-8.	18000
C2	3345	5447	2102	17,90	117,43	10-25.	3233	9-12.	28000
LUTITA E3	5447	5976	529	7,13	74,19	5-18.	2808	8-12.	39000
T1	5976	6150	174	3,78	46,03	5-18.	2979	8-12.	42000
LUTITA E4	6150	6780	630	13,57	46,43	5-12.	3130	10-14.	54000

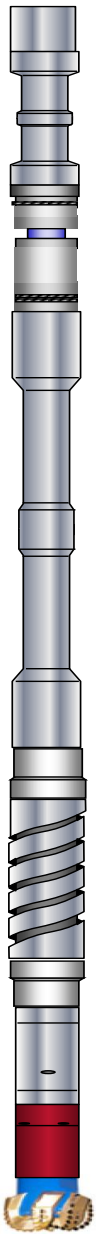
Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

La tasa de penetración (ROP) continúa comportándose de manera esperada. La presión muestra una variación anormal entre la formación C2 y Lutita E3, en el reporte final de perforación, se encuentra la orden de circulación en fondo para realizar viaje de acondicionamiento hasta el zapato del casing anterior a una profundidad de 5300 ft y una reducción de 900 gpm a 850 gpm.

Se puede observar que el peso sobre la broca que se maneja en este pozo es menor al del CA236, pero es mayor que el utilizado en el CA471, debido a que el trabajo direccional realizado en este pozo se encuentra en un punto medio entre los dos pozos mencionados anteriormente.

El ensamblaje de fondo (BHA) utilizado en la perforación del pozo CA217, se muestra en la **Figura 57**.

Figura 57. Ensamblaje de fondo del pozo CA217.

	Tipo	OD (in)	ID (in)	Longitud (ft)
	DP	5,5000	4,7800	5762
	HWDP	5,5000	3,2500	366,75
	Jar	6,5000	2,7500	29,91
	HWDP	5,5000	3,2500	489,26
	X-Over	6,5000	2,3750	3,65
	DC	6,5000	2,7500	61,32
	X-Over	6,7901	2,7500	2,65
	MWD	8,1500	3,2500	34,5
	Mud Motor	8,0000	5,2500	28,81
	Bit	12,2500	-	1,28

Fuente: ECOPETROL S. A. Reporte final de la sección 12 ¼" C217.

5.4 CASTILLA 316

El pozo Castilla 316, ha sido el pozo más reciente perforado con el nuevo diseño de broca con calibre extendido, corrida en la fase de 12¼". Este proyecto fue realizado con el taladro Pace-X 43 perteneciente a 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. Siendo las 10:35 horas del 26 de Agosto de 2016 se inició con la corrida de la fase a una profundidad de 1010 ft (MD). La perforación de esta sección se vio retrasada por eventos planeados y no planeados ajenos al desempeño de la broca, debido a esto la fase se perforó con tres (3) BHA's distintos para poder llegar a la profundidad de la formación objetivo, más adelante se explica en detalle los eventos de la fase. A las 21:00 horas del 31 de Agosto de 2016 se da por terminada la perforación de la fase al llegar a la formación objetivo a una profundidad de 6678 ft (MD). En el Cuadro 23, Cuadro 24 y Cuadro 25, se pueden observar los detalles de la corrida de cada uno de los tres (3) BHA's que se utilizaron para la sección de 12¼" del pozo CA316.

La broca utilizada para perforar la fase de 12¼" es de tipo U519S serial 29428 con un calibre activo de 4" de extensión. Según la clasificación de inventario de Ulterra™ el código IADC que recibió fue S223 y un número de parte U02438. La broca entró como reparada (Ver **Figura 58**) y al finalizar la corrida de la fase (Ver **Figura 59**) sale con una calificación que demuestra que fue poco su desgaste en la perforación de la sección, debido principalmente a su corto intervalo perforado.

Cuadro 23. Detalles de la corrida BHA#1 fase 12¼" pozo CA316.

DETALLES DE LA CORRIDA					
FECHA DE ENTRADA	26-Aug-16				
FECHA DE SALIDA	26-Aug-16				
DEPTH IN (Ft)	1010				
DEPTH OUT (Ft)	1462				
FOOTAGE (ft)	452				
HORAS EFECTIVAS (HR)	1,32				
HORAS TOTALES (Hr)	4				
ROP EFECTIVA (Ft/Hr)	342,42				
ROP TOTAL (FT/Hr)	113,00				
PIES ROTADOS (Ft)	420	Hr ROTADAS	1,02	ROP Rot (ft/hr)	412
PIES DESLIZADOS (Ft)	36	Hr Deslizadas	0,3	ROP Sld (ft/hr)	120
% ROTADO/%DESLIZADO	92%			8%	
MAX WOB SLD (Klbs)	15	MAX PRES DIF SLD (psi)			250
MAX WOB ROT (klbs)	20	MAX PRES DIF ROT (psi)			500
HORAS DE DRILL OUT (hr)	1,5				
CALIFICACIÓN IADC	0-0-NO-A-X-I-NO-DTF				

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

Cuadro 24. Detalles de la corrida BHA#2 fase 12 ¼” pozo CA316.

DETALLES DE LA CORRIDA					
FECHA DE ENTRADA	26-Aug-16				
FECHA DE SALIDA	28-Aug-16				
DEPTH IN (Ft)	1462				
DEPTH OUT (Ft)	5182				
FOOTAGE (ft)	3720				
HORAS EFECTIVAS (HR)	20,55				
HORAS TOTALES (Hr)	36,5				
ROP EFECTIVA (Ft/Hr)	181,02				
ROP TOTAL (FT/Hr)	101,92				
PIES ROTADOS (Ft)	3287	Hr ROTADAS	14,03	ROP Rot (ft/hr)	234
PIES DESLIZADOS (Ft)	433	Hr Deslizadas	6,52	ROP Slid (ft/hr)	66
% ROTADO/%DESLIZADO	88%			12%	
MAX WOB SLD (Klbs)	15	MAX PRES DIF SLD (psi)			250
MAX WOB ROT (klbs)	30	MAX PRES DIF ROT (psi)			550
HORAS DE DRILL OUT (hr)	N/A				
CALIFICACIÓN IADC	0-0-NO-A-X-I-NO-BHA				

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

Cuadro 25. Detalles de la corrida BHA#3 fase 12 ¼” pozo CA316.

DETALLES DE LA CORRIDA					
FECHA DE ENTRADA	29-Aug-16				
FECHA DE SALIDA	31-Aug-16				
DEPTH IN (Ft)	5182				
DEPTH OUT (Ft)	6678				
FOOTAGE (ft)	1496				
HORAS EFECTIVAS (HR)	26,3				
HORAS TOTALES (Hr)	36				
ROP EFECTIVA (Ft/Hr)	56,88				
ROP TOTAL (FT/Hr)	41,56				
PIES ROTADOS (Ft)	763	Hr ROTADAS	4,01	ROP Rot (ft/hr)	190
PIES DESLIZADOS (Ft)	733	Hr Deslizadas	22,29	ROP Slid (ft/hr)	33
% ROTADO/%DESLIZADO	51%			49%	
MAX WOB SLD (Klbs)	15	MAX PRES DIF SLD (psi)			250
MAX WOB ROT (klbs)	30	MAX PRES DIF ROT (psi)			550
HORAS DE DRILL OUT (hr)	N/A				
CALIFICACIÓN IADC	0-1-BT-G-X-I-ER-TD				

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

La calificación que obtuvo la broca demuestra que al finalizar la sección no presentó desgaste en las hileras internas de cortadores y se calificaron como nuevos, en cambio en las hileras externas se presenta un mínimo desgaste. Se observaron cortadores rotos y desgastados en mayor parte en el calibre que fueron la principal característica de desgaste que afectó la broca, a pesar de esto se conserva en calibre. Adicionalmente presenta erosión como desgaste secundario y sale a superficie al alcanzar la formación objetivo, a diferencia de los BHA#1 donde sale por daño en la herramienta direccional y el BHA#2 donde sale por cambio de BHA.

Figura 58. Broca con calibre extendido reparada para el pozo CA316.



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

Figura 59. Broca con calibre extendido después de corrida en el pozo CA316.



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

La herramienta direccional que se usó en la perforación del pozo CA316, fue un motor de fondo con un ángulo de desviación (Bend Housing) de 1,5° modelo STAB 6740™ propiedad de National Oilwell Varco. La perforación de la fase de 12¼" inició con una inclinación de 3,14° y un azimut 237,60° a una profundidad de 1010 ft (MD).

Durante la perforación se tuvieron que realizar varias correcciones tanto en la dirección como en el ángulo del pozo deslizando 25-30 ft por parada para poder mantener la verticalidad del pozo hasta la profundidad de inicio de trabajo direccional (KOP) que estuvo planeado a 5200 ft (MD), afectando así el desempeño de la herramienta viéndose reflejado en la ROP final de la sección. Al tener la profundidad de inicio de trabajo direccional tan profundo se observaron tasas de construcción bastante altas (DLS) con un promedio de 2,44°/100ft y un máximo de 3,97°/100ft, adicional a esto como medida preventiva se tuvo que deslizar entre 45-60 ft por parada para poder cumplir el plan direccional y corregir una fuerte tendencia al norte (2.3°/100 ft en Lutita E4). La perforación hasta la profundidad de inicio de trabajo direccional estuvo marcada por unas tasas de penetración altas (ROP) que variaron entre 90 ft/hora y 300 ft/hora, pero después de la profundidad de inicio de trabajo direccional (KOP) se registraron tasas de penetración (ROP) mucho más bajas entre los 40 ft/hora y 90 ft/hora, por esto se tuvo una tasa de penetración efectiva promedio (ROP efectiva) de 117,66 ft/hora y una tasa de penetración total (ROP total) de 74,09 ft/hora. La sección finalizó con una inclinación de 34,44° y un azimut de 224,31°, a 6606 ft (TVD) y 6678 ft (MD). El EOB del pozo está a 7123,97 ft (MD) y 6960,33 ft (TVD), profundidades pertenecientes a la perforación de la fase de 8½" del pozo.

Los parámetros de corrida de la broca presentados en la **Cuadro 26**, fueron los más óptimos integralmente para poder cumplir con satisfacción el objetivo del pozo, estos fueron determinados previamente por Ulterra™ y modificados en tiempo real por el conjunto de ingenieros direccionales y el Company Man encargado.

Cuadro 26. Parámetros de perforación promedio del pozo CA316.

INFORMACIÓN DE PARAMETROS									
UNIDAD LITOLÓGICA	DEPTH IN (ft)	DEPTH OUT (ft)	FOOTAGE (ft)	HR Efec	ROP Efec (FT/HR)	WOB (Klbs)	Torque (KLb/FT)	Presion (psi)	MSE (psi)
Arenisca sup.	1462	1720	258	1,53	168,63	15-20	4-8.	1988,90	7000
LUTITA E	1720	2580	860	2,4	358,33	15-20	8-10.	2157,89	16000
UNIDAD C1	2580	3710	1130	5,09	222,00	20-25	8-12.	2524,88	19000
ARENISCA CARBONERA	3710	4050	340	3,67	92,64	20-25	8-12.	2880,27	29000
UNIDAD C2	4050	5182	1132	8,43	134,28	25-30	8-12.	3052,44	45000
UNIDAD C 2	5182	5505	323	3,56	90,73	15-20	10-14.	2909,89	58000
LUTITA E3	5505	6012	507	7,62	66,54	15-20	8-14.	2957,56	74000
UNIDAD T1	6012	6195	183	3,22	56,83	20-25	8-14.	3069,62	118000
LUTITA E4	6195	6678	483	11,9	40,59	20-25	8-14.	3133,90	115000

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

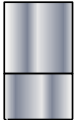
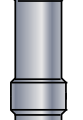


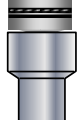
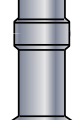
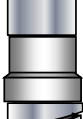
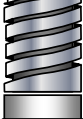
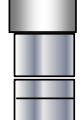
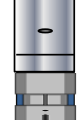


A través de los parámetros se puede evidenciar que uno de los de mayor variación durante la perforación de la sección es la tasa de penetración efectiva (ROP efectiva), se puede evidenciar que en las formaciones más someras se tuvo unas tasas de penetración altas a pesar del elevado porcentaje de deslizamiento de la sarta para corregir el ángulo y la dirección, contrario a esto, la tasa de penetración se ve seriamente afectada en las formaciones posteriores a la profundidad de inicio de trabajo direccional (KOP), esto se explica a que se aumentó hasta el 50% el porcentaje deslizado de la sarta para poder realizar el alto trabajo direccional con una tasa de construcción (DLS) de 3°/100ft a 3,9°/100ft.

Se resalta que el peso sobre la broca disminuye a la profundidad de 5182 ft, esto debido a un control en la tasa de penetración para poder realizar el alto trabajo direccional con un buen desempeño, posteriormente se aumenta a causa de la intercalación de rocas calcáreas y a la alta tasa de construcción de ángulo para ajustarse al plan direccional y llevar el pozo hasta 34,44°.

La perforación del pozo CA316, fue realizado por tres (3) BHA's distintos debido al cambio de herramientas direccionales. El primer cambio realizado fue no planeado, ya que el mismo día de inicio de la perforación se tuvo que sacar el BHA#1 de la fase por falla en la herramienta direccional (MWD), posterior al cambio de la herramienta se prosiguió con la perforación a las 2:00 horas del 27 de Agosto, realizando trabajos según lo planeado hasta la profundidad de 5182 ft (MD), donde por planeación se decidió ejecutar un cambio de BHA para la zona de construcción de ángulo, armando y bajando el BHA#3 de la fase, en este se realizó un cambio en la configuración direccional al desconectar el estabilizador de 1 1/4" que estaba por encima del motor de fondo, con el fin de permitir una mejor respuesta direccional.

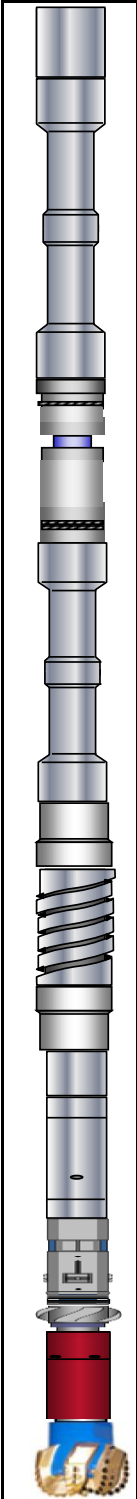
A continuación, en la **Figura 60**, se muestra el BHA#1 de la fase, en la **Figura 61**, se presenta el BHA#2 de la fase y en la **Figura 62**, el BHA#3 de la fase. Se resaltan en color amarillo los cambios que se le realizaron a los BHA's, todos estos ensamblajes de fondo fueron utilizados en la perforación del pozo CA316.

Figura 60. Ensamblaje de fondo #1 de la fase 12 ¼" pozo CA316.

Tipo	OD (in)	ID (in)	Longitud (ft)
	5,5000	4,7800	472,4
	6,6250	3,2500	366,98
	6,9375	2,9130	30,29
	6,6250	3,2500	458,54
	6,7500	2,2500	4
	6,5000	2,8750	30,54
	6,5000	2,8125	3,6
	7,8750	3,5000	29,35
	8,2500	3,0625	27,8
	8,0000	2,8125	7,64
	8,0000	5,2500	29,57
	12,2500	-	1,28

Fuente: ECOPEPETROL S. A. Reporte final de la sección 12 ¼" CA316.

Figura 61. Ensamblaje de fondo #2 de la fase 12 ¼" pozo CA316.



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.

Figura 62. Ensamblaje de fondo #3 de la fase 12 ¼" pozo CA316.

	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	

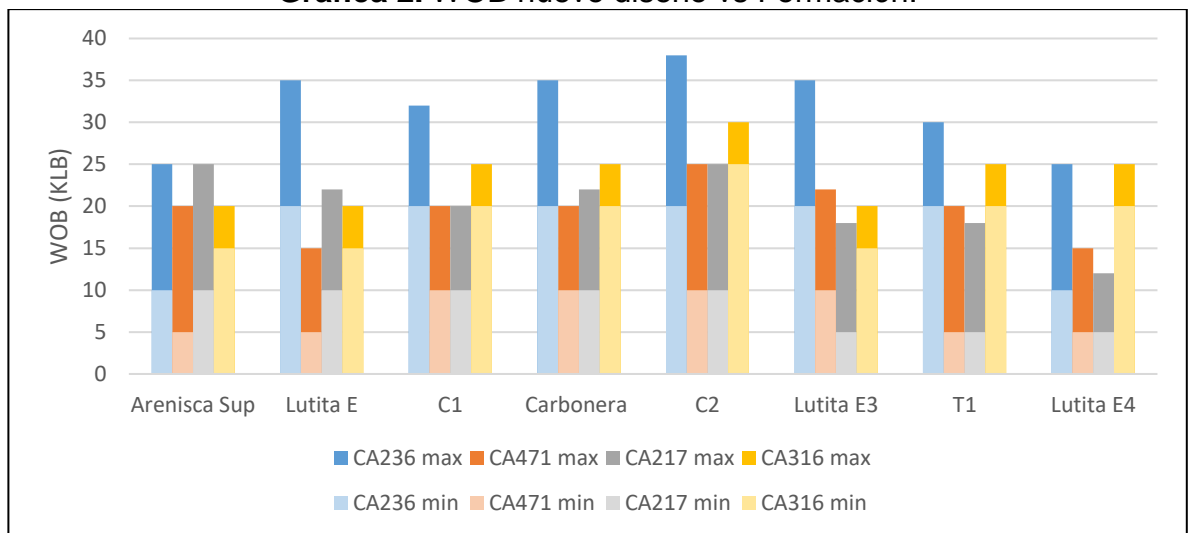
Fuente: ECOPEPETROL S. A. Reporte final de la sección 12 ¼" CA316.

5.5. EVALUACIÓN DE LOS POZOS PERFORADOS CON EL NUEVO DISEÑO CON CALIBRE EXTENDIDO

La evaluación del desempeño del nuevo diseño de broca con calibre extendido fue realizada a partir de la comparación de la tasa de penetración en función de las formaciones atravesadas en la perforación de los cuatro (4) pozos realizados con el nuevo diseño. La combinación óptima del peso sobre la broca (WOB), torque, presión y la energía mecánica específica (MSE), derivan en una tasa de penetración efectiva (ROP efectiva) mayor que en una combinación de parámetros deficiente.

5.5.1 Gráfico WOB vs Formación.

Gráfica 2. WOB nuevo diseño vs Formación.



En la **Gráfica 2**, se observa el peso sobre la broca (WOB) en función de cada formación atravesada por los pozos realizados con el nuevo diseño de broca. Los tonos oscuros de cada color hacen referencia al WOB máximo y los tonos claros al WOB mínimo, para poder ilustrar el rango de operación del respectivo parámetro.

En la formación Arenisca Superior se observa que los pozos CA236 y CA217, tuvieron el mayor peso sobre la broca, probablemente ocasionado por la presencia de 10% de Limolita compacta, en una formación comúnmente predominada por intervalos de Arenisca y Arcilla (CA236: 60% Arenisca, 30% Arcilla - CA217: 40% Arenisca, 50% Arcilla). En los pozos CA471 y CA316, se observa un peso de trabajo menor y similar debido a la semejanza litológica con intervalos homogéneos de Arenisca y Arcilla, como comúnmente se caracteriza la formación a lo largo del campo.

Al evaluar la Lutita E, se observan mayores pesos sobre la broca para el CA236 y el CA217, probablemente por la presencia de Limolita, comúnmente ausente a estas

profundidades en los pozos perforados de la zona (CA236: 10% Limolita, 10% Lutita, 60% Arcilla, 20% Arenisca y CA217: 10% Limolita, 90% Arcilla) en donde predomina la Lutita, Arcilla y Arenisca. Los pozos CA471 y CA316, presentan pesos sobre la broca menores debido a que solo se evidenciaron intervalos usuales de Arcilla y Arenisca. A su vez, es importante resaltar diferencias en los tamaños de las herramientas direccionales del pozo CA236, que con mayores diámetros externos, incrementa las áreas de contacto de la tubería con el hueco, induciendo fenómenos de arrastre y/o colgamiento ocasionando incrementos de peso sobre la broca. A su vez, los pozos CA316, CA217 y CA471, muestran menores pesos sobre la broca, debido posiblemente al uso de ensamblajes direccionales con menores diámetros externos.

Las herramientas de mayores dimensiones dentro de la tubería de perforación, fueron las camisas estabilizadoras de los motores, que con tres distintas configuraciones, evidenciaron diferentes comportamientos en la transmisión de peso, reflejando en el CA316 (diámetro de estabilizador 11 $\frac{3}{4}$ "), mayor rango en comparación con el CA217 y CA471 (diámetros externos de camisa de 11 $\frac{1}{2}$ " y 11 $\frac{1}{4}$ " respectivamente), ocasionando fenómenos de arrastre y/o colgamiento.

En la formación C1 el pozo CA236, registró el mayor peso sobre la broca, probablemente como consecuencia del diámetro externo mayor de las herramientas direccionales utilizadas. A nivel litológico se evidenció presencia inusual de un 10% de Limolita (intervalo comúnmente caracterizado por Arcilla y Arenisca). Evaluando los pozos con motor de fondo en su BHA se observa que el CA316, trabajó con mayor peso sobre la broca con respecto a los pozos CA217 y CA471, ya que posiblemente la sarta tuvo una tendencia marcada a recostarse en las paredes de la formación por la robustez de su camisa estabilizadora (11 $\frac{3}{4}$ ").

Adicionalmente, los pozos CA217 y CA471, tuvieron un rango idéntico a pesar de unas intercalaciones de Limolita inesperadas en el CA217 y una diferencia de $\frac{1}{4}$ " en el diámetro externo de sus herramientas direccionales, por esta situación el pozo CA471, tuvo mayor tasa de penetración.

Evaluando los pozos en la formación Arenisca Carbonera, se evidencia una tendencia que probablemente sea inversamente proporcional al espacio anular en las herramientas direccionales, es decir que, entre menos diámetro presente en la herramienta, los rangos de peso sobre la broca en esta formación serán mayores, presentando una tendencia notable de apoyo de la tubería en la cara de la formación.

En la formación C2 se presentó una semejanza en la tendencia de comportamiento de todos los pozos con respecto a la formación C1, lo que permite concluir que posiblemente la variación de los rangos de peso sobre la broca entre pozos se haya dado por las mismas razones que en la formación C1, se resalta un aumento en

todos los rangos posiblemente relacionado a una presencia inusual de intercalaciones de Limolitas compactas a lo largo de la formación.

Es importante resaltar que a la profundidad de la formación Lutita E3 todos los pozos evaluados han iniciado trabajo direccional y para mejorar la respuesta de las herramientas en la construcción de ángulo se decide disminuir el peso sobre la broca. Así mismo, debido a la presencia de herramienta rotaria en el ensamblaje de fondo del pozo CA236, se mantiene la tendencia de mayores rangos de peso sobre la broca en esta formación.

A su vez, entre los pozos perforados con motor de fondo se debe considerar que el pozo CA316, tuvo un cambio de BHA que provocó una disminución de los rangos utilizados y un comportamiento aislado en este parámetro en cuestión, adicionalmente entre los pozos CA471 y CA217, la diferencia de pesos probablemente podría estar explicada en un mayor porcentaje de Lutita en el CA471, que genera que la cara del motor (Tool Face) se mueva al intentar hacer el trabajo direccional, debido al torque reactivo generado por la resistencia que opone la formación al ser cortada.

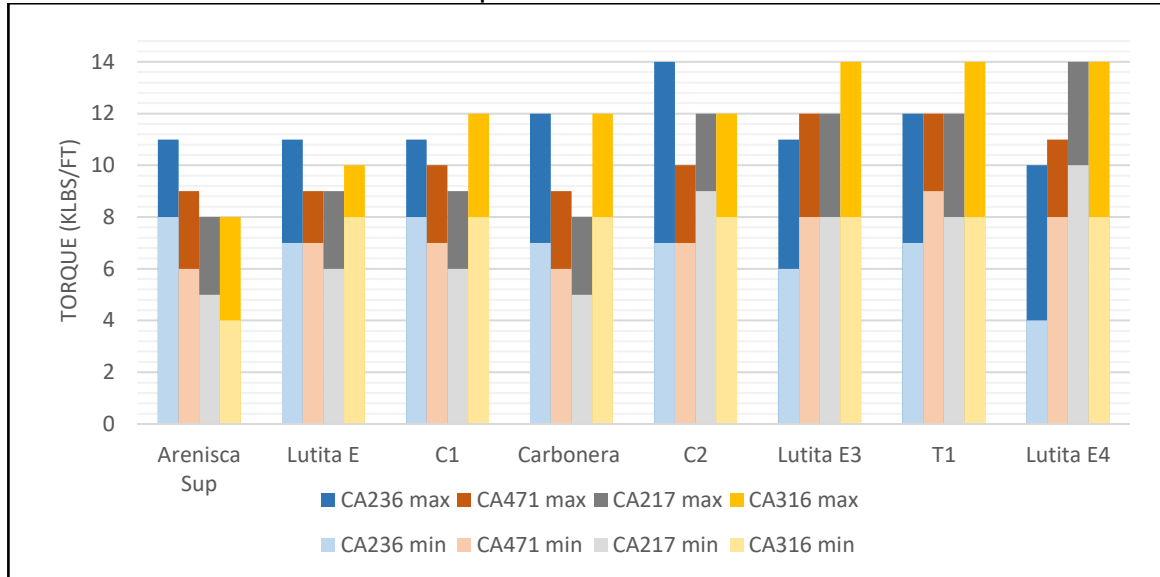
Debe resaltarse el alto trabajo direccional que realiza el pozo CA316, en las formaciones T1 y Lutita E4, en las cuales se evidencian mayores rangos de peso sobre la broca entre los pozos perforados con motor de fondo. Adicionalmente a esto, el pozo CA471, tiene un mayor rango que el CA217, en ambas formaciones, produciendo mayor tasa de penetración en estas. Al igual que en las anteriores formaciones se presenta un mayor peso sobre la broca en el CA236, posiblemente por una mayor cantidad de puntos de contacto de la tubería con la formación.

Para efectos de un análisis pozo a pozo es claro que el CA236, a través de todas las formaciones tuvo los mayores valores de peso sobre la broca, posiblemente generado por la utilización de herramienta rotaria (RSS) en el ensamblaje de fondo. A su vez, probablemente el peso sobre la broca en todos los pozos fue modificado formación por formación en función de la litología a perforar y el trabajo direccional. Paralelamente a partir de Lutita E3 (sección donde se realizó el trabajo direccional) se presenta una disminución gradual en el peso sobre la broca, por órdenes direccionales, pues la posición de la cara del motor en las Lutitas es demasiado inestable, debido al torque mencionado anteriormente.

Entre los pozos perforados con motor de fondo se debe resaltar que el CA471 y CA217, tuvieron un perfil direccional similar y un comportamiento semejante en peso sobre la broca. A través de todas las formaciones se observa que el CA316, tiene mayores pesos sobre la broca entre los pozos perforados con motor de fondo, sobre todo en las tres últimas formaciones en las que se realizó un trabajo direccional agudo para alcanzar la inclinación del pozo planeada.

5.5.2 Gráfico Torque vs Formación.

Gráfica 3. Torque nuevo diseño vs Formación.



En la formación Arenisca Superior se evidencia que el pozo CA236 tuvo el mayor torque con respecto a los otros, probablemente por el uso de herramienta rotaria (RSS) con un diámetro de camisa estabilizadora mayor que los demás pozos en su ensamblaje de fondo. A su vez entre los pozos perforados con motor de fondo, se observa que el pozo CA316 tuvo un torque muy similar al CA217, a pesar de que en teoría el CA217 debería presentar un torque superior por una mayor inclinación y peso sobre la broca, esto posiblemente estuvo asociado al diámetro de la camisa estabilizadora del motor, el cual fue mayor en el CA316, lo que probablemente generó más puntos de contacto entre el ensamblaje de fondo y la formación, igualando los rangos de torque de ambos pozos.

Evaluando los pozos CA471 y CA217 que manejaron perfiles direccionales similares, es importante resaltar el mayor torque presentado en el CA471, sin importar que este tuvo un peso sobre la broca y un diámetro de la camisa estabilizadora menor; este comportamiento puede ser sustentado por una mayor tasa de construcción de ángulo (CA471: 0,95°/100ft y CA217: 0,75°/100ft), la cual afectó la calidad del hueco negativamente.

En la formación Lutita E se observa que el pozo CA236 continúa teniendo el mayor rango con respecto a los demás, posiblemente por la misma razón que en la formación anterior. Paralelamente, el pozo CA316 presentó el mayor torque de los pozos perforados con motor de fondo, comportamiento que puede asociarse al giro en azimut (211° a 160°) que este tuvo en la formación. Adicional a esto, cabe resaltar el comportamiento de los pozos CA471 y CA217, que a pesar de tener diferentes pesos sobre la broca y similares revoluciones por minuto en fondo,

reportaron rangos semejantes de torque, probablemente ocasionado por la presencia de Limolita en el CA217.

En las formaciones C1 y Arenisca Carbonera el comportamiento del torque es similar. El pozo CA316 presenta un torque alto en estas dos formaciones, debido a la dificultad que tuvo para mantener verticalidad, presentando tasas de construcción de ángulo promedio de 0,75, que sumado con la variación en azimut generan espiralamiento. El CA236 tiene rangos similares al pozo anteriormente mencionado, sin embargo, su razón fundamental posiblemente sea su alto peso sobre la broca. A su vez, se observa una particularidad en el comportamiento del pozo CA471 que evidencia mayores valores de torque a los observados en el CA217. La principal razón por la cual se evidencia este incremento en los valores de Torque, se debe probablemente al trabajo direccional realizado en el CA471 en la formación C1 y Arenisca Carbonera, construyendo desde 5.54° hasta 12.74°, mientras que el CA217 mantuvo una inclinación promedio de 12.57° a similar profundidad.

Para la formación C2 se evidencia una particularidad en el pozo CA217 al presentar un torque alto, ya que este presenta un comportamiento inversamente proporcional al peso sobre la broca, contrario a los rangos normales que se evidencian en los otros pozos, probablemente asociado a una presencia inusual de un 30% de Limolita que también afectó la tasa de penetración de la broca.

Considerando que en la formación Lutita E3 hay una disminución del peso sobre la broca para todos los pozos, se observa un comportamiento de torque asociado a esta disminución para el CA236. Evaluando el comportamiento de los pozos CA471, CA217 y CA316 se evidencia que hay una igualdad en los rangos de torque en los dos primeros, probablemente debido a la similitud de su perfil direccional y un mayor torque en el tercero, posiblemente generado por el alto trabajo direccional realizado en esta formación.

En la formación T1 se evidencian unos rangos de torque similares en todos los pozos, a excepción del CA316 que presentó mayores valores, probablemente por la alta tasa de construcción de ángulo que se presentó en esta formación. Evaluando los pozos CA236, CA471 y CA217, se observa una similitud en los valores de torque, quizás asociados a los diferentes porcentajes de Limolita (CA236: 10%, CA471: 20%, CA217: 40%).

En la formación Lutita E4 el comportamiento de los rangos de torque de los pozos CA236, CA471 y CA217, posiblemente podría estar asociado a los diferentes porcentajes de Limolita (CA236: 0%, CA471: 20%, CA217: 30%), cuya presencia provoca una mayor dificultad para perforar la formación y un aumento en la respuesta de torque. El pozo CA316 presenta altos valores de torque posiblemente debido a la presencia del fenómeno de colgamiento y arrastre.

En el pozo CA236 el torque tuvo rangos similares en las formaciones Arenisca Superior, Lutita E y C1, posiblemente debido al comportamiento de las revoluciones por minuto, las cuales se modificaron para dar una maniobrabilidad natural al ensamblaje direccional, induciendo por efecto gravitacional una caída de inclinación. En las formaciones Arenisca Carbonera y C2 se observa un aumento gradual del torque, que posiblemente fue generado por un aumento del peso sobre la broca. En la Formación Lutita E3 y Lutita E4 se registra una caída del torque posiblemente ocasionado por la disminución de peso sobre la broca y revoluciones por minuto en fondo. A la profundidad de la formación T1 se evidencia aumento de torque posiblemente generado por la inclinación del pozo en esta formación.

Entre los pozos perforados con motor de fondo hay que tener en cuenta los perfiles direccionales similares en KOP e inclinación final; los pozos CA471 y CA217, evidencian un comportamiento similar de aumento proporcional de torque con respecto a la profundidad, probablemente relacionado con el aumento gradual de inclinación. Para el caso del CA316, con diferente perfil direccional, se evidencia aumento de torque con respecto a la profundidad posiblemente por un aumento gradual de peso sobre la broca. Adicionalmente se evidencia aumento de torque en la formación Lutita E3 con un mantenimiento en los valores mínimos y máximos como consecuencia de la aguda tasa de construcción de ángulo, la cual deriva en el fenómeno de colgamiento y arrastre.

5.5.3 Gráfico Presión vs Formación.

El comportamiento de la presión en todos los pozos suele tener una tendencia de crecimiento proporcional a la profundidad, esto debido al peso de la columna hidrostática del lodo de perforación. Sin embargo, se presentan algunos decrecimientos en ciertas profundidades, por esta razón se analiza el comportamiento de este parámetro en función de cada una de las formaciones.

Aproximadamente en los primeros 300 pies perforados (Arenisca Superior) el pozo CA236, presentó una presión mayor con respecto a los pozos comparados, probablemente, una de las posibles causas para esta variación se presenta por la configuración de las boquillas, debido a que el pozo en mención utilizó una menor área total de flujo (TFA= 0,89), con una proporción de 4*15/32" – 1*16/32". Los demás pozos, manejaron una configuración de boquillas con un área total de flujo (TFA= 1,19) mayor (4*18/32"-1*16/32"), evidenciando una presión menor.

Sin embargo, entre 1400 pies y 2100 pies aproximadamente, la tendencia cambia significativamente, pasando el pozo CA217, a tomar el lugar de mayor presión debido a una disminución de este parámetro presentada por el pozo CA236, el cual era el que tenía mayor valor de presión en los primeros 300 pies, comportamiento causado probablemente por decisión del ingeniero direccional, quien disminuyó rápidamente el peso sobre la broca para no estrellarla con estos estratos de alta

dureza. Al sobrepasar estas intercalaciones, se aumenta el galonaje y el peso sobre la broca, aumentando la tasa efectiva de penetración, restaurando la tendencia normal de presión.

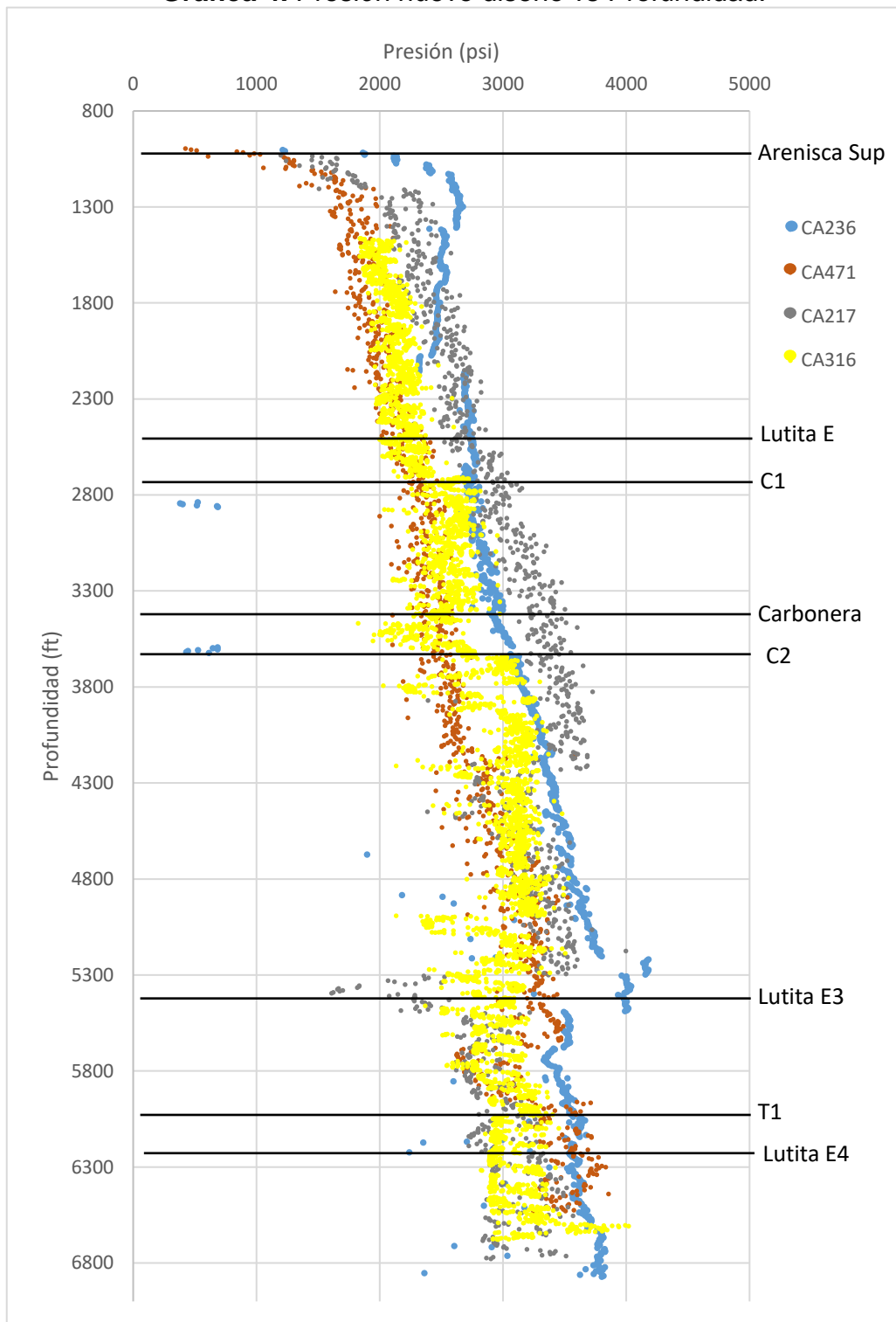
Las intercalaciones composicionales mencionadas anteriormente también se presentaron en el pozo CA217, sin embargo, este no se vio afectado por ellas debido a que tuvieron menor proporción y además, la utilización del motor de fondo para construcción de ángulo, requirió el mantenimiento de la presión diferencial evidenciado en un aumento leve del peso sobre la broca para su correcto funcionamiento, ya que a esta profundidad ya se estaba deslizando intermitentemente cada 100 pies. Los otros dos pozos tuvieron un comportamiento normal, el pozo CA316, tuvo una presión un poco mayor que pozo el CA471, posiblemente por el trabajo direccional que en este pozo ya se realizaba.

En las formaciones Lutita E, Arenisca C1 y Arenisca Carbonera, se presentó un comportamiento normal de la presión en todos los pozos, a excepción del CA316, el cual, en esta última formación tuvo una disminución significativa de la presión posiblemente causada por una baja del galonaje en este punto.

En la formación Arenisca C2 los pozos presentaron tendencia normal de la presión, no obstante, al entrar a la Lutita E3 todos presentaron una disminución de presión importante. En el pozo CA217, esta reducción se presentó un poco más temprano que los demás debido a que la formación C2 presentó intercalaciones de Arcilla en su base en este punto, adicionalmente, se disminuye el peso sobre la broca y el galonaje por requerimientos direccionales, para que Lutita E3 no tumbe demasiada inclinación en las zonas deslizadas, realizadas aproximadamente cada 100 pies a partir de los 5400 pies. El pozo CA316, posiblemente fue el que más reducción presentó, debido a la disminución del peso sobre la broca en este punto por la entrada del BHA#3 de la fase, teniendo en cuenta que se mantuvo el peso del lodo en un rango de 12-12,2 (ppg) con los mismos valores trabajados con el BHA#2 de la fase.

En las siguientes formaciones (Unidad T1 u Lutita E4) presentaron una tendencia normal en este parámetro.

Gráfica 4. Presión nuevo diseño vs Profundidad.



5.5.4 Energía mecánica específica (MSE).

5.5.4.1 Fuerzas reactivas. Son la capacidad de absorber una fuerza y aplicar más fuerza en otra dirección. Las características que determinan las fuerzas reactivas son:

- Las fuerzas reactivas dependen de las fuerzas activas.
- Las fuerzas activas se anulan al igual que las reactivas.
- Las fuerzas reactivas son incapaces por sí mismas de producir movimiento.

“Denominando “ F ” como la resultante de las fuerzas activas ejercidas o aplicadas sobre un punto en un cuerpo y “ R ” como la fuerza reactiva generada por el vínculo entre estas dos por un enlace el cual se encuentra sometido, da la ecuación fundamental de la dinámica”²⁹. (Ver **Ecuación 10**).

Ecuación 10. Ecuación Fundamental de la dinámica.

$$F + R = m * a$$

Fuente: GASTEIZ Victoria. Estática. Escuela Universitaria de Ingeniería [En línea] [Bogotá, Colombia]. [Citado el 18 de julio de 2014]. Disponible en: <<http://www.vc.ehu.es/ingme/est.pdf>>.

Donde:

F = Magnitud de las fuerzas activas
 R = Magnitud de la fuerza reactiva
 m = Masa
 a = Aceleración

La tercera ley de Newton asocia las fuerzas reactivas con el principio de acción y reacción, todo cuerpo que sea sometido a una fuerza por otro cuerpo, el cuerpo sometido produce una reacción sobre el otro.

²⁹ BEER, Ferdinand P., EISENBERG Elliot R., JOHNSTON Russell Jr. Mecánica vectorial para ingenieros, octava edición, McGraw-Hill Interamericana 2007, p. 67.

5.5.4.2 Energía mecánica específica (MSE). José Fernández ³⁰ enuncia que la Energía Mecánica Específica se usa para mejorar el rendimiento de perforación con resultados mixtos y se define como la energía necesaria para excavar un volumen unitario de roca. Es un parámetro muy útil, que puede considerarse como indicativo de la eficiencia en un trabajo de perforación.

La Energía Mecánica Específica combina cada uno de los parámetros registrados en la perforación, y puede expresarse en la **Ecuación 11**.

Ecuación 11. Energía Mecánica Específica.

$$MSE = \frac{F}{A} + \frac{2\pi * RPM * TQ}{A * ROP} = et + er$$

Fuente. GALERA FERNÁNDEZ, José. Correlación Entre Los Parámetros De Perforación Y las Propiedades Geomecánicas Del Terreno (en línea). Citado 17 de abril de 2012. Disponible en internet: <http://subterra-ing.com/pdf/P-G-2006_Correlacion-Parametros-perforacion.pdf> Pág. 1.

Dónde:

MSE = energía mecánica específica (psi)

F = presión sobre la broca (kN)

A = área de perforación (m²)

RPM = velocidad de rotación (rps)

TQ = torque (kN*m)

ROP = velocidad de penetración (m/s)

et = componente de presión (psi)

er = componente de rotación (psi)

La primera variable de la ecuación corresponde al componente de presión y la segunda variable la componente de rotación. La Energía Mecánica Específica tiene las mismas dimensiones que la presión.

El mínimo valor adquirido por la energía es una medida de la eficiencia mecánica máxima de una herramienta concreta y en unas condiciones específicas. Sin embargo, la Energía Mecánica Específica no disminuye de forma indefinida; existe un momento en que un aumento de la presión sobre la broca provoca una

³⁰ GALERA FERNÁNDEZ, José. Correlación Entre Los Parámetros De Perforación Y Las Propiedades Geomecánicas Del Terreno (en línea). Citado 17 de abril de 2012. Disponible en internet: <http://subterra-ing.com/pdf/P-G-2006_Correlacion-parametros-perforacion.pdf>.

sobrecarga y atascamiento de esta, reduciéndose la eficiencia y causando un nuevo aumento de la Energía Mecánica Específica.

- **Ecuaciones de MSE.** Existen diferentes modelos para la obtención de la Energía Mecánica Específica, se diferencian principalmente por la información que requieren para poder aplicarlas, pero la tendencia de respuesta de estas es muy similar.
- **Ecuación de Teale.** Se emplea para determinar una eficiencia de MSE del 35% y es muy práctica de utilizar ya que solo requiere de los parámetros de perforación (ver **Ecuación 12**).

Ecuación 12. Ecuación de Teale calculo MSE.

$$MSE = 0.35 * \left(\frac{WOB}{A} + \frac{120 * RPM * TQ * \pi}{A * ROP} \right)$$

Fuente. DUPRIEST, F. KOEDRITZ, L. maximizing drill rates with real-time surveillance of mechanical specific energy, SPE 92194, año 2005.

Dónde:

MSE = Energía Mecánica Específica. (psi)

WOB = Peso sobre la broca. (lbf)

RPM = Revoluciones por minuto. (rpm)

A = Área transversal del hueco. (pulg.²)

ROP = Caudal de penetración. (ft/hr)

TQ = Torque (ft-lb)

Factor de eficiencia. = 0.35

“El factor de eficiencia se plantea debido a que el máximo rendimiento ha sido estimado entre el 30 y 40 %, de esto surge el factor de eficiencia como un valor intermedio del 35% que se usa de forma uniforme”³¹.

A pesar de que este valor puede no ser preciso, debido a que el cambio se realiza de forma uniforme, aún puede ser utilizado eficazmente como una herramienta para observar gráficamente las tendencias de la Energía Mecánica Específica.

- **Ecuación de Koederitz.** Tiene el mismo funcionamiento que la ecuación de Teale, su diferencia es que muestra la respuesta del comportamiento de la

³¹ DUPRIEST, F. KOEDRITZ, L. maximizing drill rates with real-time surveillance of mechanical specific energy, SPE 92194, año 2005.

energía en zonas en donde se está deslizando tubería, brindando una mejor lectura de la eficiencia de perforación, su única restricción es que para empelarla se necesita una información adicional de motor como se ve en la **Ecuación 13**.

Ecuación 13. Ecuación Koederitz calculo MSE.

$$MSE = \left(\frac{4 * WOB}{\pi * D^2} + \frac{480 * (RPM + KN * Q) * \left(\frac{TQMAX}{\Delta P MAX} \right) * \Delta P / 1000 \pi}{D^2 * ROP} \right)$$

Fuente. DUPRIEST, F. KOEDRITZ, L. maximizing drill rates with real-time surveillance of mechanical specific energy, SPE 92194, año 2005.

Dónde:

MSE = Energía Mecánica Específica. (psi).

WOB = Peso sobre la broca. (klbf).

RPM = Revoluciones por minuto. (rpm).

D = Diámetro de la broca. (Pulg).

ROP = Caudal de penetración. (ft/hr).

KN = Razón volumétrica de velocidad de motor. (rev/gal).

Q = Tasa total de flujo. (gal/min).

TQMAX = Torque máximo – motor. (ft-lb).

ΔP MAX = Presión diferencial máxima – motor. (psi).

ΔP = Presión diferencial. (psi).

- **Ecuación de la Compresibilidad de la Roca con Confinamiento (CCS).** Como punto de referencia de un 100% de eficiencia en la perforación y la MSE, se debe partir de la CCS, ya sea para rocas permeables como se ve en la **Ecuación 14**, o para rocas impermeables como se ve en la **Ecuación 15**. Y a partir de estos datos se realiza la comparación con los datos obtenidos de MSE. La variable de la presión de poro corresponde a la presión ejercida por el fluido a los espacios porosos y la presión de poro de Skempton corresponde a una corrección de los valores de presión para las rocas impermeables.

Ecuación 14. CCS para rocas permeables.

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

Fuente. DUPRIEST, F. KOEDRITZ, L. maximizing drill rates with real-time surveillance of mechanical specific energy, SPE 92194, año 2005.

Dónde:

CCS = Resistencia a la compresión de la roca confinada. (psi)

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

ECD = Densidad equivalente del lodo. (psi)

Pp = Presión de poro. (psi)
 AFI = Ángulo de fricción interna. (Radianes)

Ecuación 15. CCS para rocas impermeables.

$$CCS_{sk} = \left(UCS + \Delta P_{sk} * 2\Delta P_{sk} * \frac{\frac{\text{Sen AFI}}{180}}{1 - \frac{\text{Sen AFI}}{180}} \right) \quad \Delta P_{sk} = ECD - P_{psk}$$

$$P_{psk} = P_p - \frac{OB - ECD}{3}$$

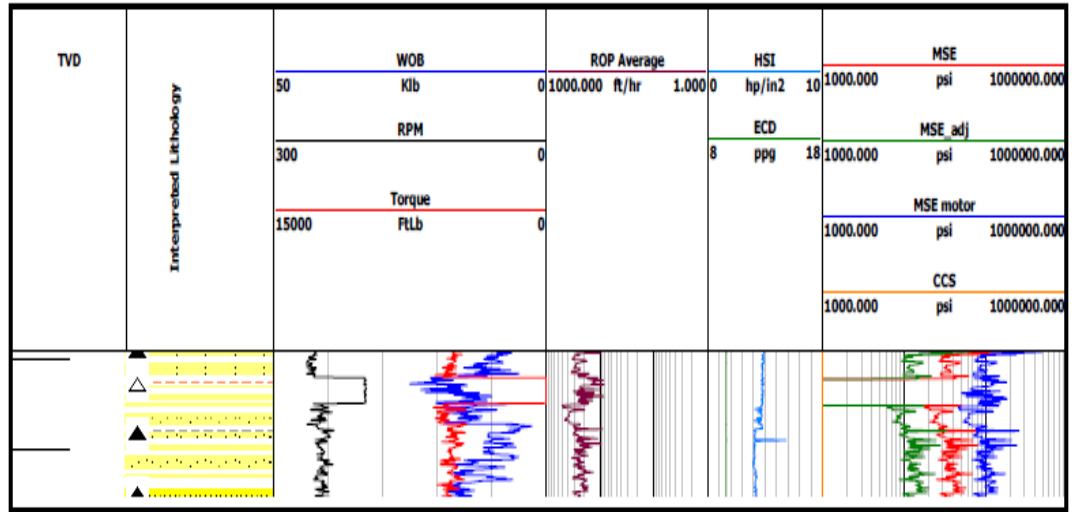
Fuente. DUPRIEST, F. KOEDRITZ, L. maximizing drill rates with real-time surveillance of mechanical specific energy, SPE 92194, año 2005.

Dónde:

CCS = Resistencia a la compresión de la roca confinada. (psi)
 UCS = Resistencia a la compresión de la roca sin confinamiento. (psi)
 ECD = Densidad equivalente del lodo. (psi)
 Pp = Presión de poro. (psi)
 Ppsk = Presión de poro de Skempton. (psi)
 AFI = Angulo de fricción interna. (Radianes)
 OB = Presión de sobrecarga. (psi)

- **Diferencia entre curvas de MSE.** Mediante la comparación grafica de las fórmulas para el cálculo de la Energía Mecánica Específica, como puede observarse en la **Figura 63**, la línea de color rojo corresponde a la ecuación de Teale y la línea de color azul corresponde a la ecuación Koederitz, se puede ver que la ecuación de Koederitz continua mostrando el comportamiento de la operación de perforación en momento cuando las otras fórmulas dejan de hacerlo, un ejemplo de esto es cuando se esta deslizando tubería; dando como resultado la selección de una sola para la realización de análisis posteriores, la cual corresponde a la **Ecuación 13**.

Figura 63. Diferencia entre curvas de MSE

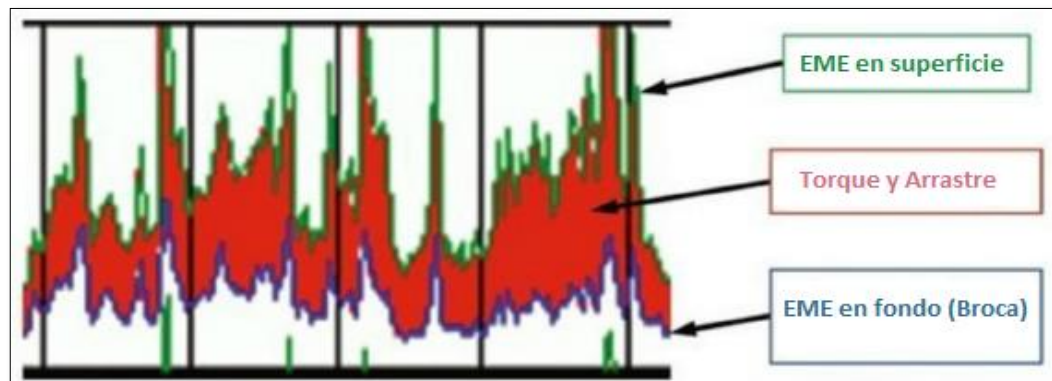


Fuente. PESSIER, R. WALLACE S., OUESLATI H., Drilling Performance Is a function of Power at the Bit and Drilling Efficiency, JPT, año 2012 Modificado por los autores.

- **EFICIENCIA PERFORACIÓN POR ENERGÍA MECÁNICA ESPECÍFICA.**

El primero en plantear el cálculo de la MSE y observar la relación entre la misma, con la resistencia a la compresión fue Teale; en muchos casos un alto valor de Energía Mecánica Específica no es necesariamente una señal de bajo desempeño de la broca, pero si es un indicativo de un alto torque y arrastre en el pozo; así como de menor cantidad de energía que llega a la broca como se ve en la **Figura 64**.

Figura 64. Comparación entre la medida de fondo y superficie para MSE.



Fuente. PESSIER, R. WALLACE S., OUESLATI H., Drilling Performance Is a Function of Power at the Bit and Drilling Efficiency, JPT, año 2012 Modificado por los autores.

La correlación entre MSE y la resistencia de la roca, ha sido utilizada para evaluar la eficiencia de perforación. Para lo cual se emplea la **Ecuación 16**.

Ecuación 16. Eficiencia de perforación.

$$Eficiencia\ de\ perforación = \frac{MSE\ minima}{MSE\ actual} * 100 = \frac{CCS}{MSE} * 100$$

Fuente. TEALE, R. The Concept of Specific Energy in Rock Drilling, Año 1965.

Dónde:

MSE = energía mecánica específica (psi)

CCS = resistencia a la compresión con confinamiento (psi)

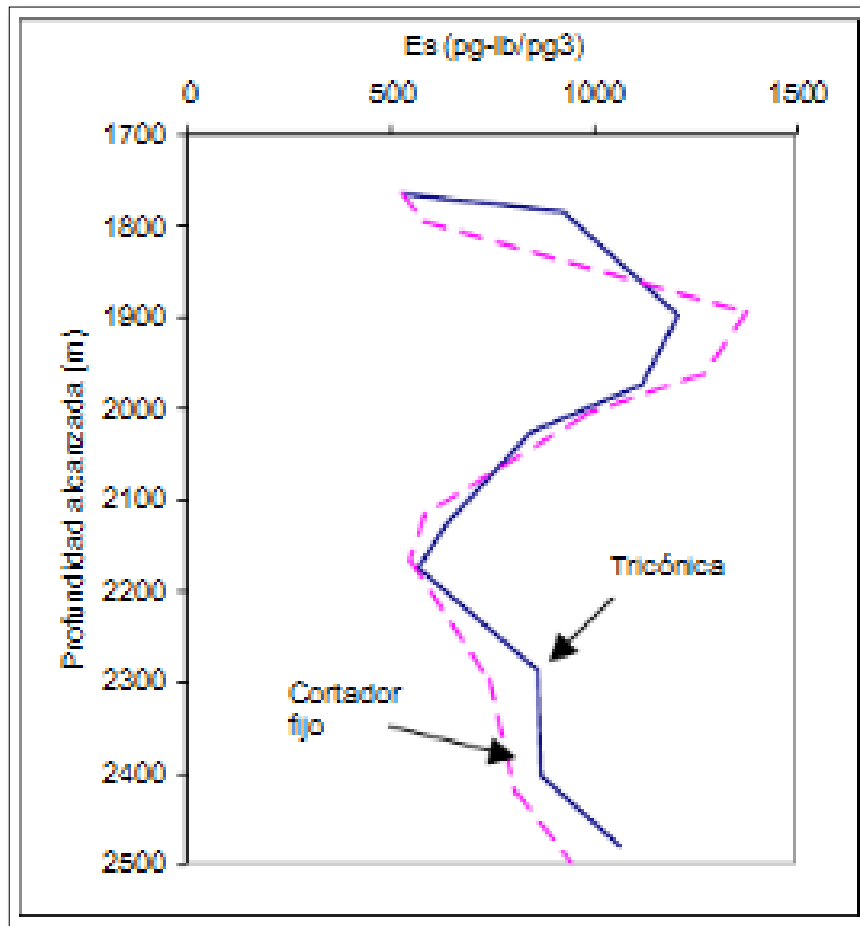
“La eficiencia de perforación llega a su máxima expresión en el momento en que la Energía Mecánica Específica sea igual a la resistencia a la compresión de la roca”³².

- **La energía mecánica específica como criterio para la selección de brocas.**
No existe un criterio generalizado para realizar la selección del tipo de broca, por lo que generalmente esto se realiza a partir de experiencias previas del comportamiento de cada tipo de broca en litologías conocidas. Debido a esto se han propuesto varias metodologías para este fin, pero es de interés el uso de la Energía Mecánica Específica como método de selección. El procedimiento para realizarlo es el siguiente:
 - Recopilar y organizar información de pozos de correlación, sobre todo registros de brocas y registros geofísicos.
 - Calcular la MSE para cada intervalo perforado y para cada broca.
 - Graficar los datos de obtenidos anteriormente en una gráfica de profundidad vs MSE.
 - Seleccionar la broca utilizando la gráfica construida.

Con el fin de decidir cuál es la broca más efectiva el criterio a considerar, es la broca que requiere menos energía (ver **Figura 65**).

³² TEALE, R. The Concept of Specific Energy in Rock Drilling, Año 1965.

Figura 65. Comparación de eficiencia por MSE para distintos tipos de brocas.

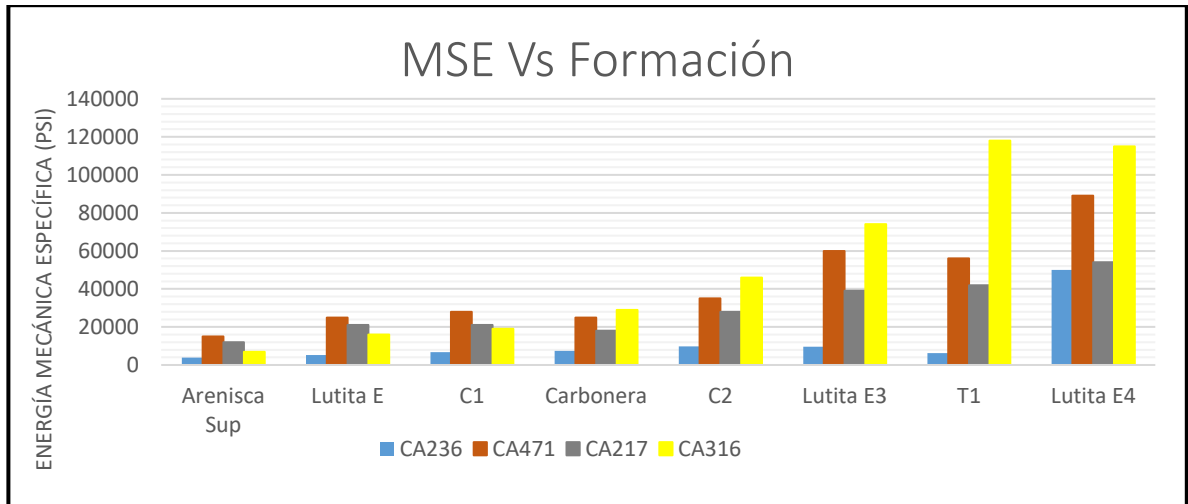


Fuente. PEMEX, Guía para la selección de barrenas (en línea), citado 17 de abril de 2012. Disponible en internet: <http://es.scribd.com/doc/39922670/Seleccion-de-Barrenas>

Para el caso ilustrado en la figura anterior, es claro que la broca que requiere menor energía para perforar el intervalo (1750-2500) metros, es la broca de cortadores fijos, por lo cual este es la que debería ser seleccionada, por su baja energía en comparación con la tricónica.

5.5.4.3 Gráfico MSE vs Formación.

Gráfica 5. MSE nuevo diseño vs Formación.



La energía mecánica específica, se puede definir a grandes rasgos como la energía necesaria para perforar un volumen unitario de roca. Es un parámetro de gran utilidad debido a que se usa para mejorar el rendimiento de la perforación con resultados conjuntos, pudiéndose considerar como un indicativo de la eficiencia del trabajo de perforación. Se ve afectada por diferentes factores, como desviación del pozo, desgaste de la broca, dureza de la roca y de mas, sin embargo, las principales variables que caracterizan este parámetro son el peso sobre la broca (WOB), las revoluciones por minuto (RPM) y el torque.

Como se puede observar en la **Gráfica 5**, la energía mecánica específica muestra una tendencia en los cuatro pozos de aumento con respecto a la profundidad de la perforación, sin embargo, se presentan algunas pequeñas disminuciones en algunos pozos y otros cambios bruscos de energía al pasar de una formación a otra. La gráfica muestra de manera evidente que el pozo con menor energía mecánica específica fue el CA236, esto se debe a que fue el único que tuvo en su ensamble de fondo una herramienta rotaria (RSS) como herramienta direccional, la cual permite que la sarta aproveche mejor la energía ya que la construcción del perfil del pozo en todo momento es trabajada mientras esta rota, contrario a los demás, en los cuales la utilización de motor de fondo obliga a parar las revoluciones por minuto (RPM) para deslizar la broca y poder construir el ángulo, disminuyendo la tasa de penetración efectiva y por lo tanto aumentando la MSE. Por esta razón el análisis comparativo será centrado en los pozos en los cuales se trabajó con motor de fondo ya que no se puede realizar una comparación entre dos tipos distintos de herramienta direccional.

En la formación Arenisca Superior el pozo CA471, fue el que menor aprovechamiento de la energía presentó, esto pudo haber sido consecuencia del

trabajo direccional que a esta profundidad ya se realizaba puesto que su punto de inicio de desviación se ejecutó en la primera sección, además el torque que este mismo pozo presentó en esta formación fue el más alto de los otros tres pozos. El pozo CA217, fue el segundo que menos eficiencia tuvo, esto debido a la misma razón que el pozo anterior, sin embargo, ocupó este lugar porque su punto de inicio de desviación se encuentra a unos pies más de profundidad en esta formación. El perfil direccional de estos dos pozos, al ser muy similar, marcó una conducta constante de sus MSE's en toda la gráfica. El pozo CA316, al ser completamente vertical en esta formación, fue el que presentó mayor eficiencia. Este mismo comportamiento de estos tres pozos se mantuvo en las formaciones Lutita E3 y C1.

En la formación Carbonera el pozo CA316, presentó un aumento importante en su MSE como consecuencia del aumento significativo que también presentó en el peso sobre la broca que se le aplicó en esta formación derivando en un aumento importante de torque. Esto provocó que este pozo pasara a ser el pozo con menor aprovechamiento de la energía. Este comportamiento pudo haberse presentado por el diámetro del estabilizador presente en su sarta, ya que es el más robusto.

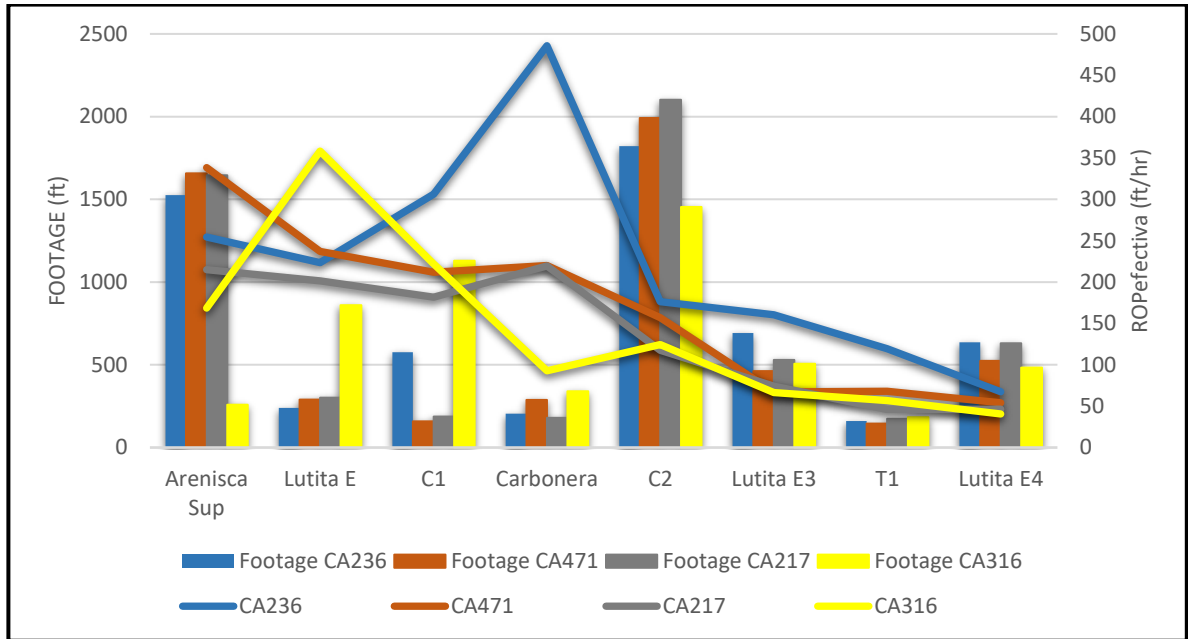
En las formaciones siguientes, C2, Lutita E3, T1 y Lutita E4, el comportamiento descrito anteriormente continuó, no obstante, la ineficiencia del pozo CA316, aumentó bastante por la conjunción de distintas variables que lo afectaron. El cambio de ensamblaje de fondo asociado a la falla de un sensor, el alto trabajo direccional hecho en estas formaciones, la robustez del diámetro del estabilizador, la presencia del fenómeno de arrastre y el desgaste que ya tenía la broca después de haber perforado casi cuatro pozos, provocaron que su MSE creciera mucho más que en los otros tres.

La disminución de la ineficiencia presentada en el pozo CA471, al pasar de la formación Lutita E3, a la formación T1 puede ser sustentada en la disminución que este tuvo en el peso sobre la broca al pasar de una formación a otra.

En la formación Lutita E4 todos presentaron su mayor MSE sin importar en que proporción. Esto puede explicarse basado en el comportamiento directamente proporcional que tienen las pérdidas de energía a través del sistema con respecto a la profundidad, ya que al tener más tubería en la sarta la energía puede disiparse de distintas maneras, ya sea por medio de la fricción del lodo con la tubería como los puntos de contacto entre la formación y la sarta y demás fenómenos.

5.5.5 Gráfico ROP efectiva vs Formación.

Gráfica 6. ROP efectiva nuevo diseño vs Formación.



El rendimiento en la tasa de penetración efectiva (ROP efectiva) es tal vez el parámetro de medición más significativo para las compañías operadoras, esto debido a que muestra que tan rápida es la broca durante la perforación de las formaciones sin incluir los tiempos ajenos a esta acción. En los cuatro pozos perforados con el nuevo diseño de broca con calibre extendido se puede observar que a partir de C2 todos los pozos presentan una tasa de penetración efectiva (ROP efectiva) con valores muy cercanos y con tendencia a decrecer.

El pozo CA236, como se observa en la gráfica fue el que mejor desempeño presentó, esto puede explicarse a que este pozo se perforó con herramienta rotaria (RSS) a diferencia de los otros con motor de fondo (DHM), es decir, toda la sección se perforó con rotación, además de que el pozo CA236, tuvo los mayores valores de peso sobre la broca (WOB) y el menor valor de energía mecánica específica (MSE). El pozo CA316, fue el de menor desempeño sobre todo en la formación Carbonera donde la tasa de penetración efectiva (ROP efectiva) fue la menor de los cuatro pozos por una diferencia amplia, al igual que en las formaciones Lutita E3, T1 y Lutita E4 donde no fue muy diferente a los pozos CA217 y CA471. Este bajo desempeño de la tasa de penetración efectiva se puede justificar porque en el CA316, se tuvo el mayor porcentaje deslizado (36%) de los cuatro pozos y adicional a esto tuvo la mayor energía mecánica específica (MSE) sustentado en un posible efecto de arrastre en la sección direccional de pozo.

6. COMPARACIÓN DE LOS DATOS DE TORQUE Y PESO SOBRE LA BROCA DE LOS DOS DISEÑOS DE BROCA CORRIDOS EN LA SECCIÓN DE 12 ¼” EN EL CAMPO CASTILLA

A continuación, se realiza un análisis evaluativo de los diseños de broca de calibre corto y extendido a través de la comparación de los parámetros de peso sobre la broca (WOB) y Torque (TQ) medido en superficie para cada uno de los pozos en estudio. Para efectos del análisis se realizó una gráfica que relaciona los datos pie a pie de cada uno de los parámetros de los siete pozos en estudio, haciendo análisis por separado para los pozos perforados con herramienta rotaria (RSS) y motor de fondo (DHM). Tanto el peso sobre la broca (WOB) como el torque y la tasa de penetración se encuentran en función de la profundidad, los cambios de formación son demarcados por líneas divisorias que indican el tope de cada una de estas.

En la **Gráfica 7**, se encuentran relacionados los parámetros de peso sobre la broca (WOB), torque (TQ) y tasa de penetración (ROP) en función de la profundidad de los pozos perforados con herramienta rotaria (RSS). El pozo CA236, fue perforado con el nuevo diseño de broca con calibre extendido y el pozo CA361, con el diseño de broca con calibre corto, ambos pozos tienen su KOP en la formación C2, es decir, presentan perfiles direccionales semejantes.

En la formación Arenisca Superior se puede observar que el peso sobre la broca para el CA236, posee valores mayores, posiblemente debido a los limitadores de corte en las cinco (5) aletas del nuevo diseño de la broca en comparación con las dos (2) aletas que los poseían en el diseño anterior, estos limitadores generan que la broca deba tener mayor peso sobre ella para poder tener contacto entre los cortadores y la formación y así poder ejercer la acción de corte. Los datos de torque en Arenisca Superior permiten evidenciar que el pozo CA361, posee los valores mayores, probablemente causado por tener más RPM totales debido a un motor de fondo integrado en su ensamblaje de fondo para una mejor ROP. Adicionalmente, se observa para ambos pozos un aumento de torque aproximadamente a 1500 ft; para el CA236, posiblemente ocasionado por un giro en azimut del pozo y para el pozo CA361, a una profundidad de 1450 ft, probablemente por un “Nudge” de 6,9° para alejar el pozo de otro y evitar la colisión.

Para la formación Lutita E, se evidencia torque y peso sobre la broca mayores en el pozo CA236, probablemente generados por una presencia de Limolita que no es comúnmente encontrada en esta formación.

El pozo CA236, sigue manteniendo los mayores valores de peso sobre la broca y torque en la formación C1 y Arenisca Carbonera, probablemente atribuible a la composición litológica de la formación (10% de Limolita).

Es importante resaltar que en la formación C2 en ambos pozos se controla ROP para no estrellar la broca con las intercalaciones de Limolita consolidada, es importante mencionar que a partir de la formación C2 se empieza a hacer trabajo direccional para construcción de inclinación del pozo. Adicionalmente, los valores de peso sobre la broca y torque evidencian una tendencia de crecimiento gradual con respecto a la profundidad, esto podría asociarse con la inclinación que va tomando el pozo al avanzar en profundidad.

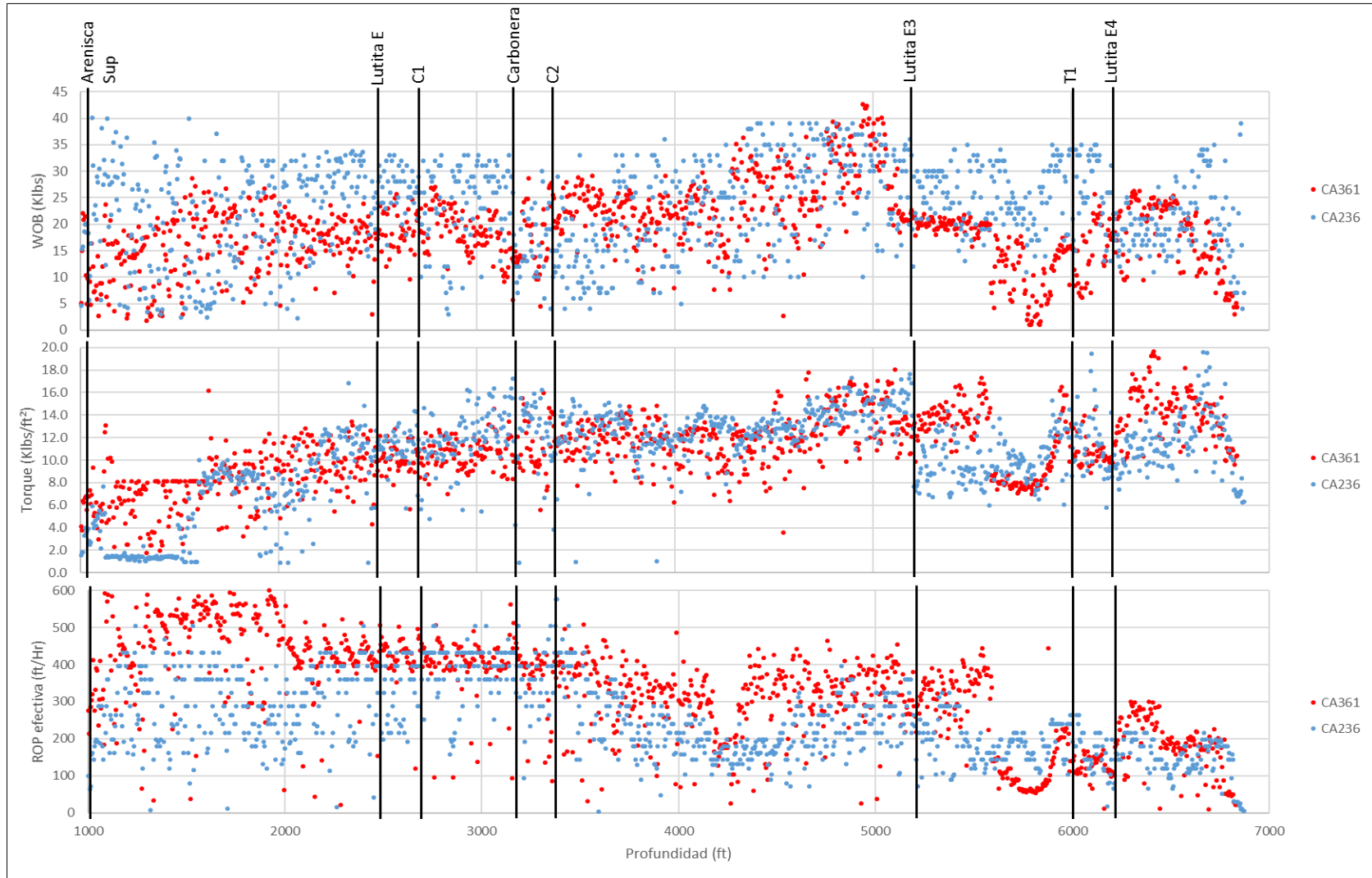
En Lutita E3 se observa una disminución de torque y de peso sobre la broca en ambos pozos, posiblemente generado por el cambio de litología a la entrada de la formación. Adicionalmente se evidencia una particularidad en los valores de WOB y torque en el pozo CA361, en donde a 5600 ft aproximadamente, se empieza a evidenciar un comportamiento descendiente de TQ y WOB por una disminución en las RPM en fondo y WOB por requerimientos direccionales.

Los valores de peso sobre la broca para el pozo CA236, son los mayores en la formación T1, lo que probablemente generó que se lograra una semejanza en los valores de tasa de penetración de ambos pozos a pesar de que en la mayoría de las formaciones había estado por debajo del CA361. Adicionalmente, pese a que el CA361, tuvo menor peso sobre la broca, sus revoluciones por minuto en fondo mayores le permitieron tener valores similares de torque al pozo CA236.

En la formación Lutita E4 se evidencian mayores valores de peso sobre la broca para el pozo CA361, posiblemente generado por la presencia de Limolita. A su vez se observan unos picos altos de peso sobre la broca y torque en el pozo CA361, a una profundidad aproximada de 6400 ft, este comportamiento pudo haber sido consecuencia de un atrapamiento de la sarta a esta profundidad.

Cabe resaltar que durante la mayoría de las formaciones perforadas la tasa de penetración de la broca con calibre corto fue mayor a la de la broca con calibre largo.

Gráfica 7. Comparación WOB y TQ antiguo diseño (CA361) vs nuevo diseño (CA236) (perforados con RSS).



En la **Gráfica 8**, se ilustra la relación para los pozos CA342, CA471 y CA217, los cuales fueron perforados con motor de fondo (DHM) y tuvieron un KOP somero, aproximadamente a 1000 ft.

En la formación Arenisca Superior se observa que los pozos CA471 y CA217, perforados con broca de 4" poseen los mayores valores de peso sobre a broca, a pesar de tener una composición litológica similar a la del CA342, estos valores de peso sobre la broca posiblemente se comportan de esa manera debido a los limitadores de corte en las cinco (5) aletas del nuevo diseño de la broca en comparación con las dos (2) aletas que los poseían en el diseño anterior. Adicionalmente se observa una tendencia marcada de mayores valores de torque para el CA342, en esta formación, posiblemente causado por un giro azimutal del pozo.

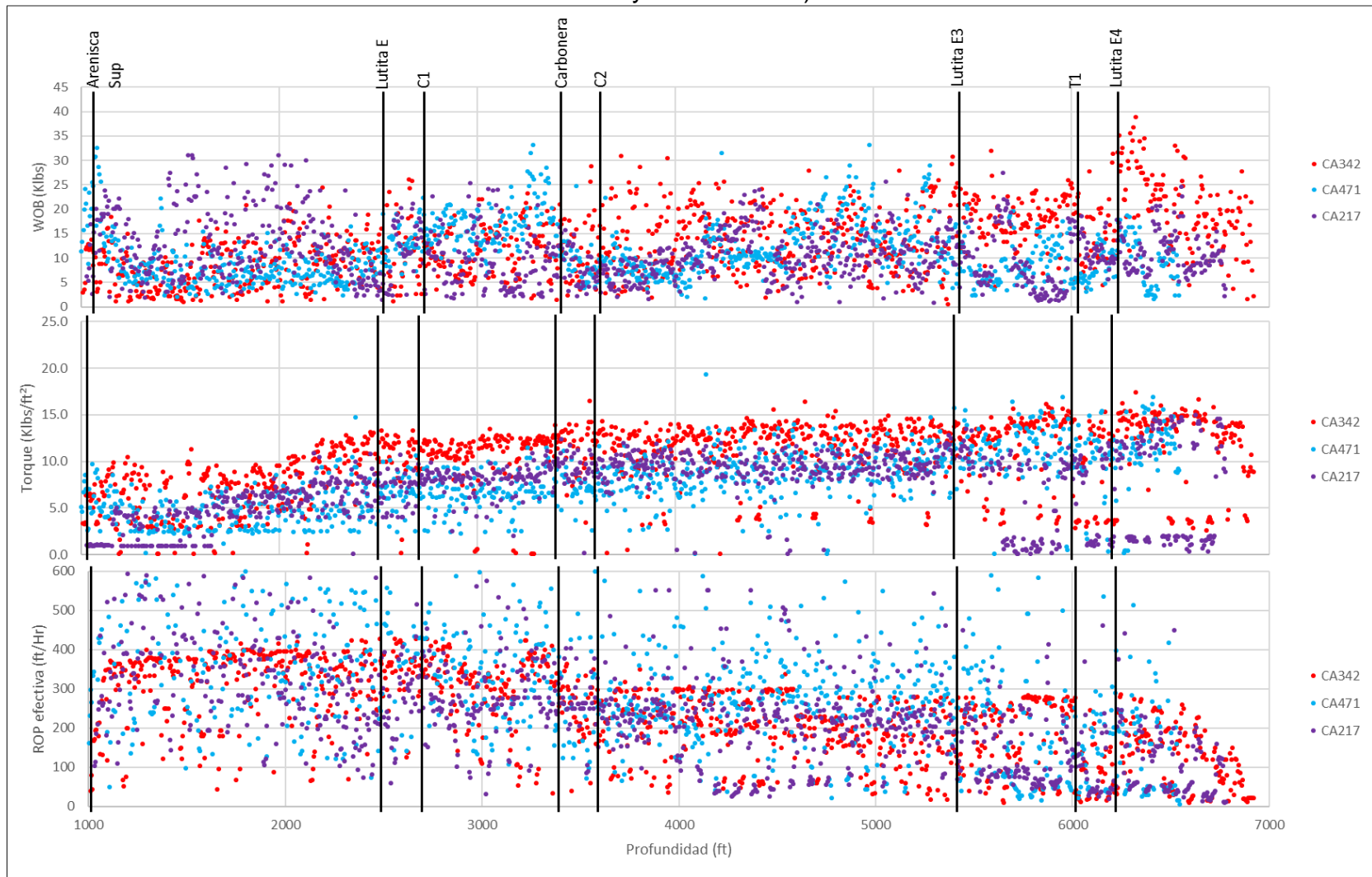
En Lutita E se evidencia mayor peso sobre la broca en el pozo CA342, probablemente generado por presentar el mayor porcentaje de Limolita de los pozos comparados. Además, el comportamiento de los valores de torque puede estar asociado a los diferentes pesos sobre la broca.

La formación C1 y C2 tienen comportamientos similares de peso sobre la broca y torque. Para estas formaciones se presenta mayor contenido de Limolita inusual en el pozo CA342, a pesar de esto se observa una paridad en los valores de peso sobre la broca, posiblemente justificada en un mayor requerimiento de WOB en el diseño de 4" por sus limitadores de corte en todas las aletas. A su vez, los valores de torque posiblemente podrían estar asociados a la composición litológica de la formación en cada pozo y a sus tasas de construcción de ángulo (tasa de construcción promedio aproximada: CA342= 1,23°/100ft; CA471=0,8°/100ft y CA217=0,91°/100ft).

En Arenisca Carbonera el peso sobre la broca de los pozos perforados con el diseño de calibre extendido disminuyo gradualmente, esto debido posiblemente a requerimientos direccionales para corregir una tendencia natural de la formación a levantar inclinación en estos pozos. Adicionalmente, los valores de torque en esta formación para todos los pozos posiblemente podrían estar asociados a las tasas de construcción de ángulo y la composición litológica de la formación.

A partir de la formación Lutita E3 se observa que tanto el peso sobre la broca como el torque, se comportan en función de los requerimientos direccionales para poder llevar los pozos a su ángulo final de inclinación (CA342= 49,71°; CA471= 28,59° y CA217= 34,5°).

Gráfica 8. Comparación WOB y TQ antiguo diseño (CA342) vs nuevo diseño (CA471 y CA217) (perforados con DHM y KOP somero).



En la **Gráfica 9**, se puede observar la comparación de los pozos perforados con motor de fondo con un KOP profundo, aproximadamente entre 4500 ft y 5000 ft, es decir, presentan un perfil direccional similar.

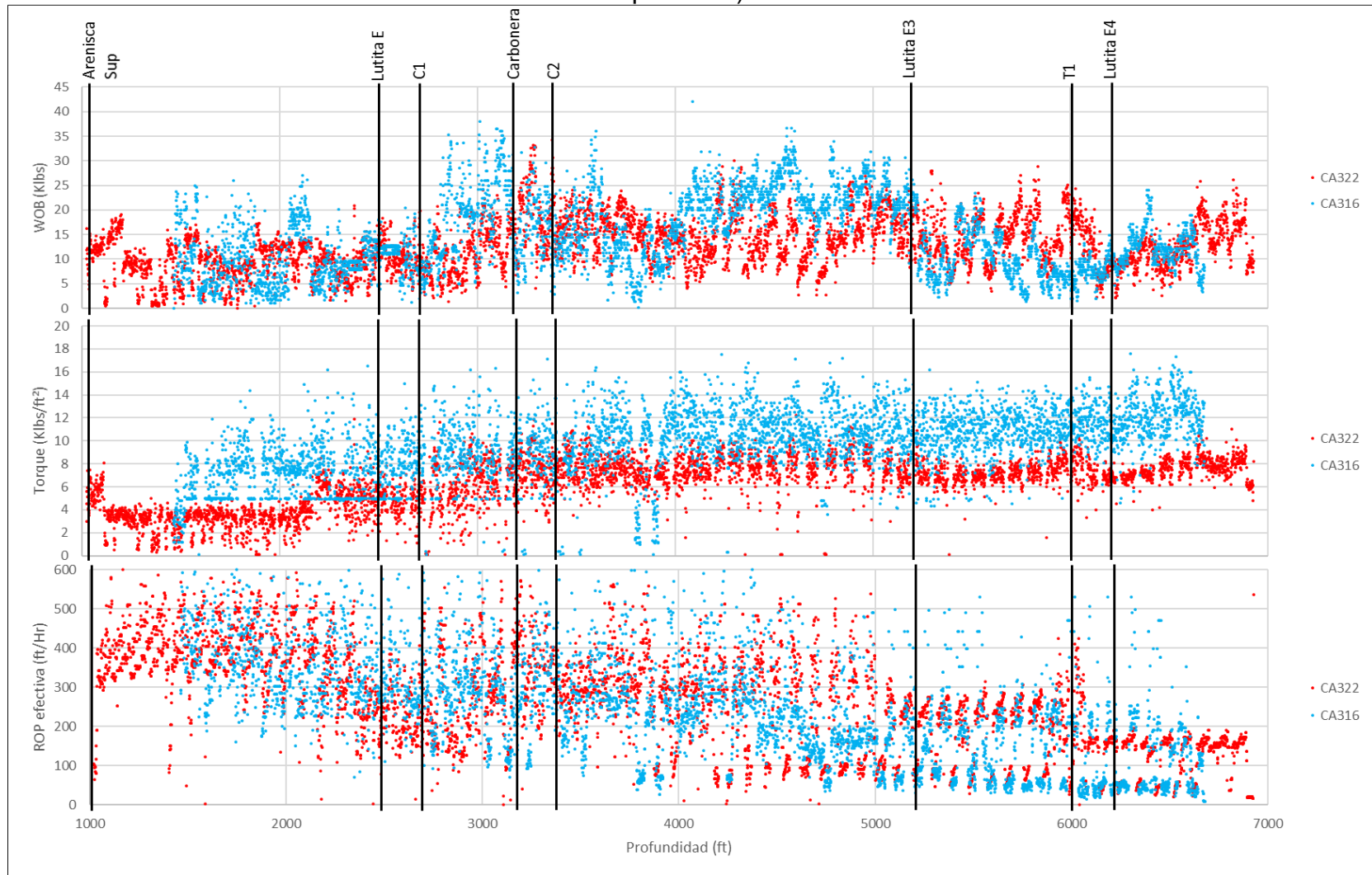
Es importante resaltar que durante toda la perforación en ambos pozos se controló ROP por requerimientos direccionales. En el pozo CA316, se tuvo que corregir en gran medida la verticalidad del pozo hasta la formación C2 donde tenía su KOP.

En las formaciones Arenisca Superior, C1 y C2 se observan ciertos puntos de la formación donde el peso sobre la broca es mayor para el pozo CA316, estos aumentos probablemente están asociados a las intercalaciones de Limolita inusual que presentaron estas formaciones y que generan una caída en la ROP, debido a esta disminución de la tasa de penetración, se aumenta el peso sobre la broca para recuperar la ROP; El pozo CA316, evidencia que estos aumentos de peso sobre la broca, provocan que el pozo se desvíe considerablemente, alcanzando en ocasiones ángulos de inclinación de 5° en una zona que debería ser completamente vertical. A su vez en las formaciones Lutita E y Arenisca Carbonera se observa una paridad en los valores de peso sobre la broca para ambos pozos, teniendo en cuenta que el CA316, debería presentar mayor WOB por los limitadores de corte en las cinco (5) aletas de su broca, dicha semejanza de valores probablemente se generó debido a la presencia de Limolita en el CA322.

En las tres (3) últimas formaciones (Lutita E3, T1 y Lutita E4), que es donde se concentra el trabajo direccional de ambos pozos, se puede observar una disminución en el peso sobre la broca de los dos, posiblemente por un control de ROP para la construcción adecuada del ángulo del pozo. Adicionalmente el pozo CA316, presenta un menor WOB en la formación T1 y al final de la formación Lutita E3, esta disminución de peso sobre la broca, probablemente se haya generado por requerimientos direccionales.

En la gráfica de torque se puede observar fácilmente que a través de todas las formaciones el pozo CA316, posee los mayores valores, teniendo en cuenta que ambos pozos trabajaron con revoluciones totales muy semejantes y en ciertas formaciones con similares pesos sobre la broca, probablemente este comportamiento sea generado por el diámetro externo de la camisa estabilizadora del ensamblaje de fondo, que tiene mayor diámetro que la del pozo CA322.

Gráfica 9. Comparación WOB y TQ antiguo diseño (CA322) vs nuevo diseño (CA316) (perforados con DHM y KOP profundo).



7. COMPARACIÓN DE LOS POSIBLES FENÓMENOS VIBRACIONALES DEL NUEVO DISEÑO DE BROCA POLICRISTALINA CON CALIBRE EXTENDIDO CONTRA EL DISEÑO DE BROCA POLICRISTALINA CON CALIBRE CORTO EN LA SECCIÓN DE 12 ¼” EN EL CAMPO CASTILLA

En este capítulo se realiza un análisis del comportamiento de los parámetros de perforación para poder determinar las profundidades en las cuales posiblemente se presentaron fenómenos vibracionales de magnitud significativa, que pudieron haber afectado directamente la calidad del hueco.

A continuación, en las **Tabla 3** a la **Tabla 9**, se resume el comportamiento de los parámetros y se define cual podría ser el fenómeno de vibración al cual estuvo expuesta la sarta y la broca en ese punto. Adicionalmente, se presenta un conjunto de gráficas para cada pozo de los intervalos de profundidad donde posiblemente se presentaron los fenómenos vibracionales.

Este análisis de vibraciones es realizado en búsqueda de una comparación entre el diseño de broca anteriormente usado y el nuevo, para poder evaluar el impacto de las modificaciones del actual diseño sobre la mitigación de las vibraciones durante la operación de perforación, uno de los principales objetivos de Ulterra™.

Para una correcta interpretación de las tablas anteriores, en el **Cuadro 27**, se presentan las convenciones de los resúmenes presentados para todos los pozos.

Cuadro 27. Convenciones posibles fenomenos vibraionales.

CONVENCIONES	
↑	Sube
↓	Baja
↑-	Sube y vuelve al valor anterior
↓-	Baja y vuelve al valor anterior
↑↓	Sube y Baja
↓↑	Baja y Sube
↑↓↑	Sube, Baja y Sube
↓↑↓	Baja, Sube y Baja
=	Constante
↑↓↑↓	Fluctuante
↑↓↑↓-	Fluctua y vuelve al valor inicial

Tabla 3. Posibles vibraciones pozo CA322.

POZO CA322									
Profundidad	Footage	COMPORTAMIENTO							POSIBLE FENOMENO VIBRACIONAL
		RPM FONDO	RPM SUP	TORQUE	WOB	MSE	ROP	PRESION	
1426-1438	12	↓-	↓-↓-	↑↓↑↑	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑-	↓-	Lateral
2352-2368	16	↓-	↓-	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↓	↓-	Stick/Slip
2615-2623	8	↑-	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑	↑-↑	Stick/Slip
2850-2860	10	↓-	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↓	↓-	Lateral
3208-3216	8	↑-	↓-	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑	↑↓	↑	Lateral
3259-3266	7	↑↓↑↑↓	↓-	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑	↑	↓	↑	Lateral
3700-3725	25	↓-	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↓-	Stick/Slip
5880-5915	35	↓-	↑↓↑↑↓	↑-	↑↓↑↑↓	↓	↑↓↑↑↓	↓-	Lateral

Tabla 4. Posibles vibraciones pozo CA342.

POZO CA342									
Profundidad	Footage	COMPORTAMIENTO							POSIBLE FENOMENO VIBRACIONAL
		RPM FONDO	RPM SUP	TORQUE	WOB	MSE	ROP	PRESION	
2210-2300	90	↑↓↑↑↓	↑-	↓-	↓-	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↓-	Stick/Slip
3925-3965	40	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↓-	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↓-	↓-	Lateral
4685-4715	30	↑↓↑↑↓	↓-	↑	↑	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↓-↓-	Lateral
5535-5555	20	↓-	↓↑	↓-	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	=	Lateral
5635-5680	45	↓	↑↓↑↑↓-	↓-	↑↓↑↑↓	↑-	↓-	↑↓↑↑↓	Lateral
6110-6140	30	=	↓-	↓-	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↓-	↑↓↑↑↓	Lateral
6484-6524	40	=	↓-	↓-	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↓-	↓-	Lateral

Tabla 5. Posibles vibraciones pozo CA361.

POZO CA361									
Profundidad	Footage	COMPORTAMIENTO							POSIBLE FENOMENO VIBRACIONAL
		RPM FONDO	RPM SUP	TORQUE	WOB	MSE	ROP	PRESION	
1267-1342	75	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	Stick/Slip
1987-2012	25	=	↑-	↓-	↑↓	↑-	↓-	↓↑	Lateral
3313-3343	30	↓	↑-	↑↓↑↑↓	↑↓	↑	↑↓↑↑↓	↑↓↑↓	Lateral
3734-3794	60	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	Stick/Slip
4624-4654	30	↓-	=	↑↓-	↑↓	↑↓	↑↓↑↑↓	↓-	Lateral
5876-5911	35	↓-↓-	↑	↑	↑	↑↓-	↓↑	↑↓↑↑↓	Lateral
6076-6111	35	↓-	=	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑	↑↓↑↑↓	↓-	Stick/Slip
6256-6291	35	↑↓↑↑↓	=	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	Stick/Slip
6536-6572	36	↑↓↑↑↓	=	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	Stick/Slip

Tabla 6. Posibles vibraciones pozo CA236.

POZO CA236									
Profundidad	Footage	COMPORTAMIENTO							POSIBLE FENOMENO VIBRACIONAL
		RPM FONDO	TORQUE	WOB	MSE	ROP	PRESION		
1313-1348	35	↓-	↑-	↑↓↑↑↓	↑-	↓↑↓	↑↓↑↑↓	Lateral	
2383-2450	67	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	Stick/Slip	
3448-3460	12	↓-	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↓-	↑↓↑↑↓	Lateral	
3540-3560	20	↓-	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	Lateral	
6050-6120	70	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	Stick/Slip	
6670-6700	30	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	↑↓↑↑↓	Stick/Slip	

Tabla 7. Posibles vibraciones pozo CA471.

POZO CA471									
Profundidad	Footage	COMPORTAMIENTO							POSIBLE FENOMENO VIBRACIONAL
		RPM FONDO	RPM SUP	TORQUE	WOB	MSE	ROP	PRESION	
5516-5530	14	↑-	↓↑	↓↑	↑↓	↓↑	↓↑	↓-	Lateral
6355-6365	10	↑-	↓↑	↑↓	↓	↓	↑-	↓	Lateral

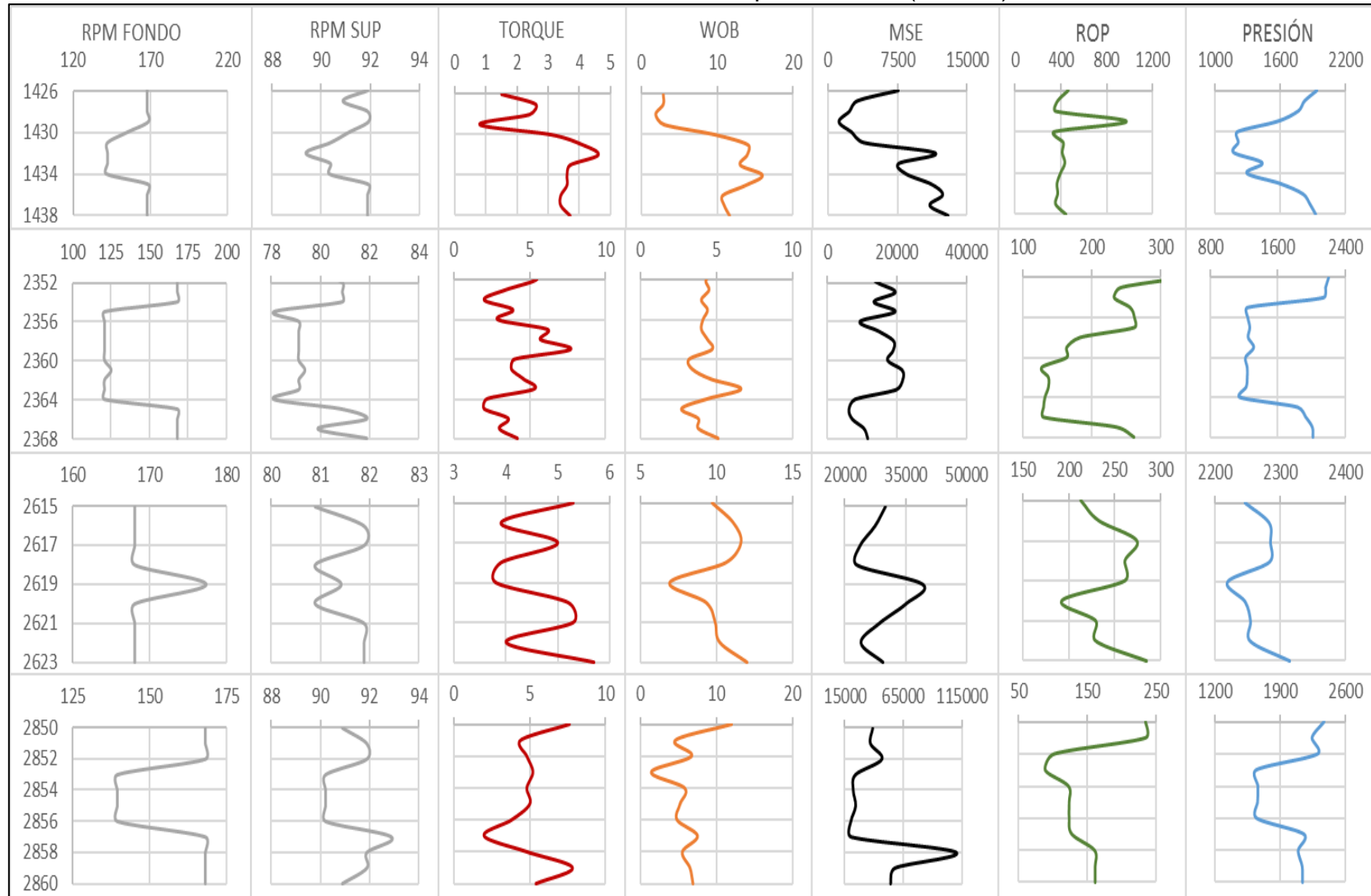
Tabla 8. Posibles vibraciones pozo CA217.

POZO CA217									
Profundidad	Footage	COMPORTAMIENTO							POSIBLE FENOMENO VIBRACIONAL
		RPM FONDO	RPM SUP	TORQUE	WOB	MSE	ROP	PRESION	
3100-3115	5	↓-	↓-	↓↑	↓↑↓↑	↓↑↓↑	↓↑↓	↓-	Lateral
5320-5350	30	↓-	↓	↓↑	↑-	↑↓	↓↑↓	↓-	Lateral

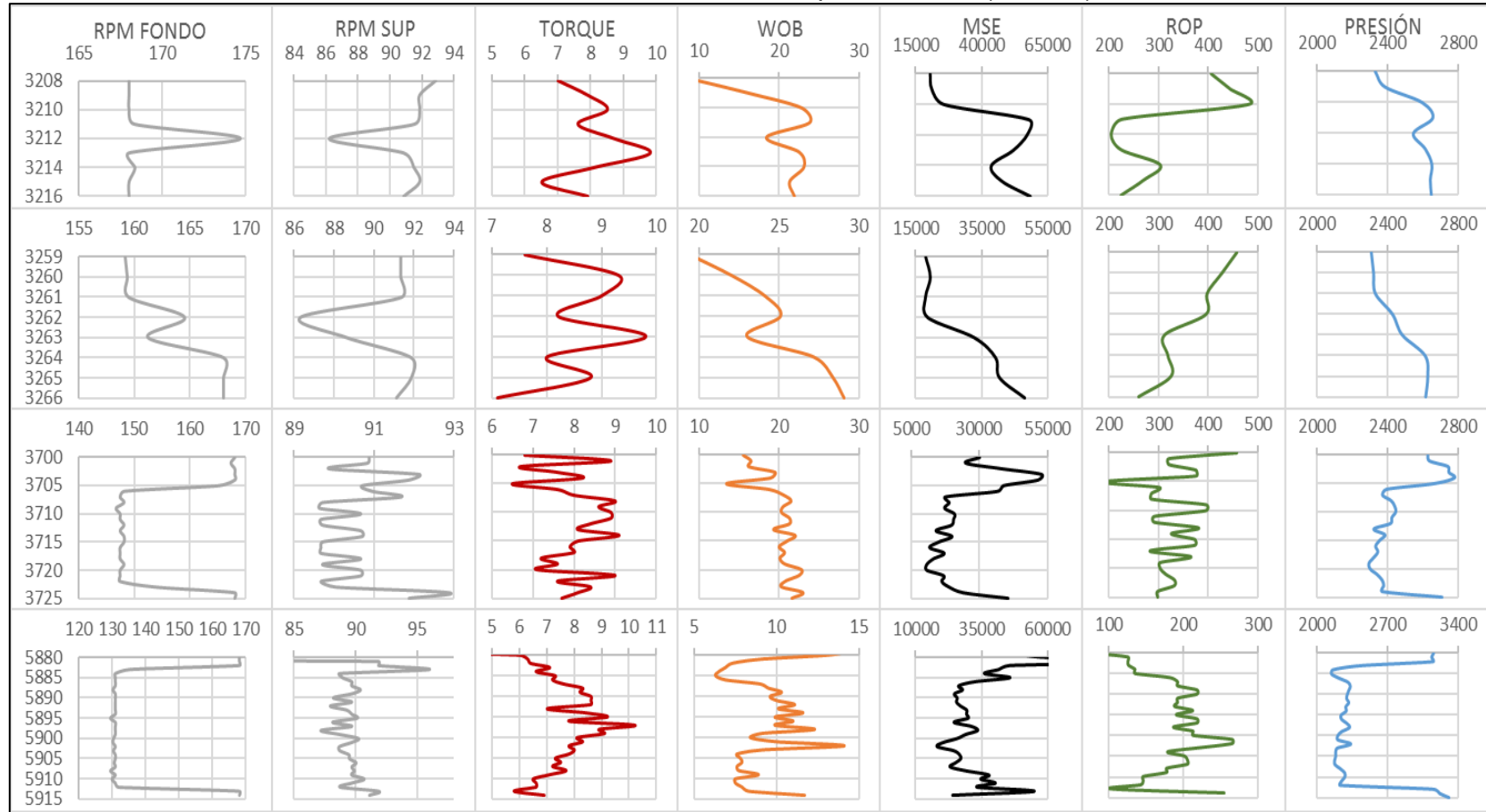
Tabla 9. Posibles vibraciones pozo CA316.

POZO CA316									
Profundidad	Footage	COMPORTAMIENTO							POSIBLE FENOMENO VIBRACIONAL
		RPM FONDO	RPM SUP	TORQUE	WOB	MSE	ROP	PRESION	
3890-3900	10	=	↓↑↓↑	↓↑↓↑	↓↑↓↑	↓↑↓↑	↓↑↓	↓↑↓↑	Stick/Slip
6070-6090	20	↓↑↓↑	↓-	↓↑↓↑	↓↑↓↑	↓↑↓↑	↓↑↓↑	↓-	Stick/Slip

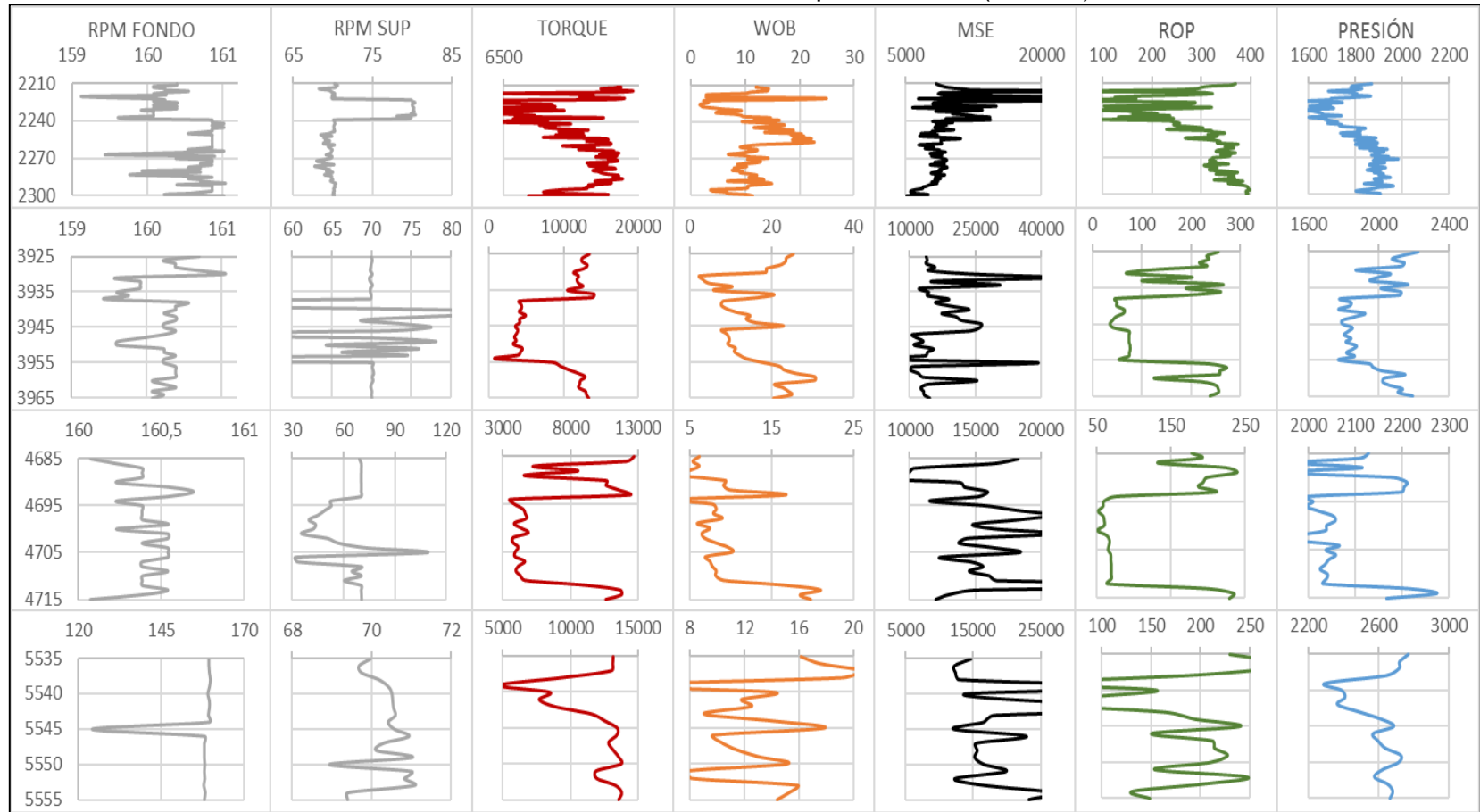
Gráfica 10. Posibles vibraciones pozo CA322 (Parte 1).



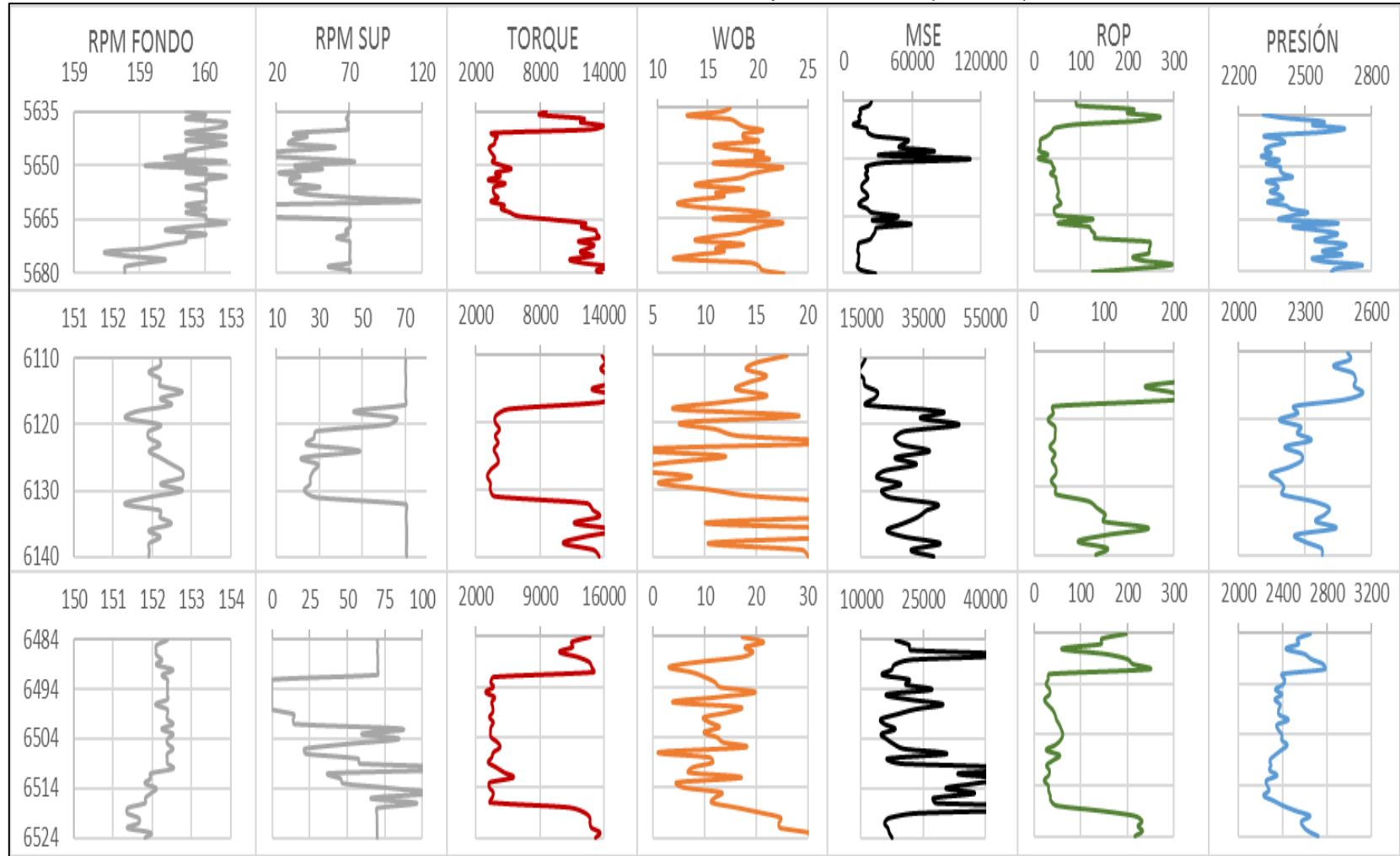
Gráfica 11. Posibles vibraciones pozo CA322 (Parte 2).



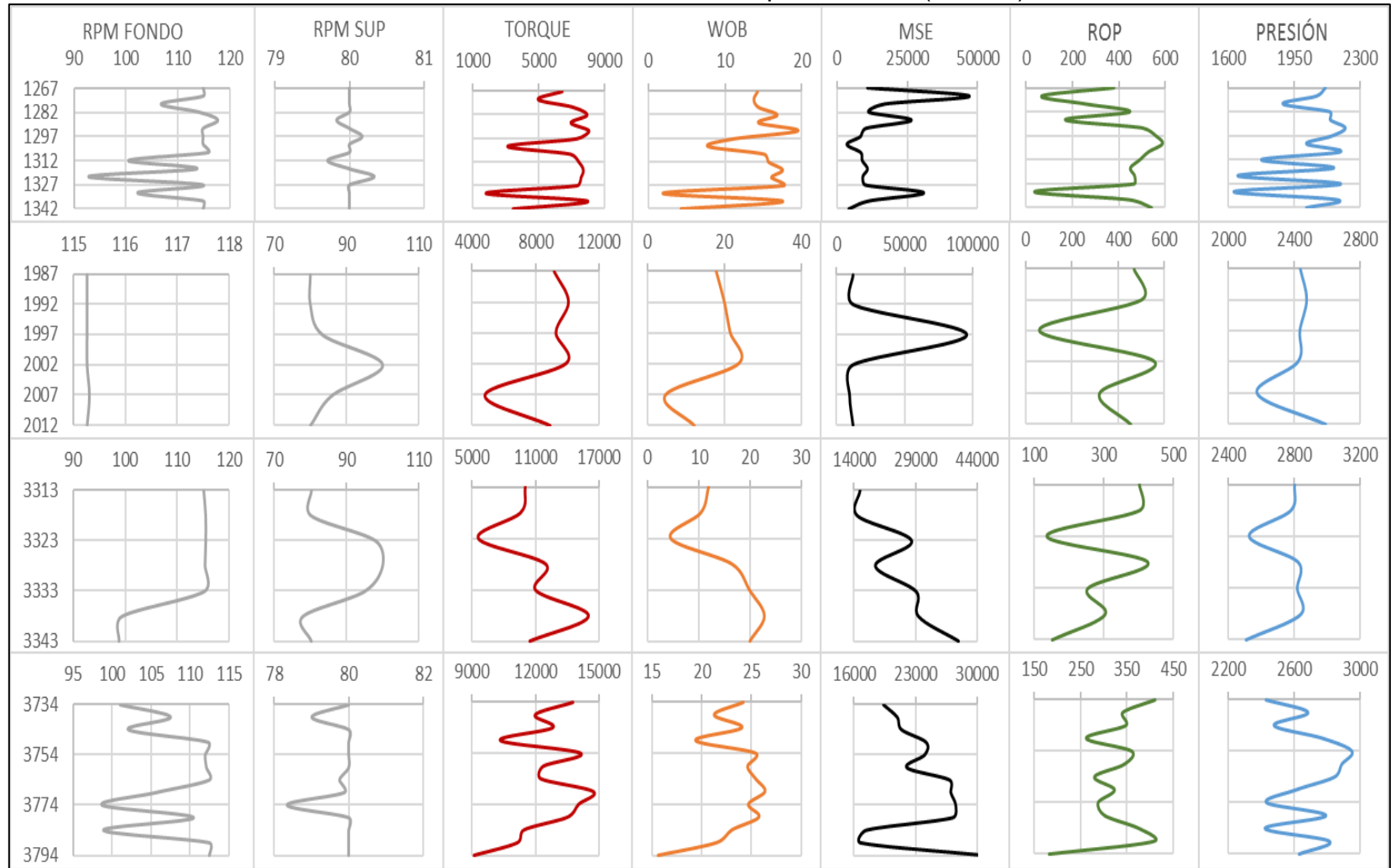
Gráfica 12. Posibles vibraciones pozo CA342 (Parte 1).



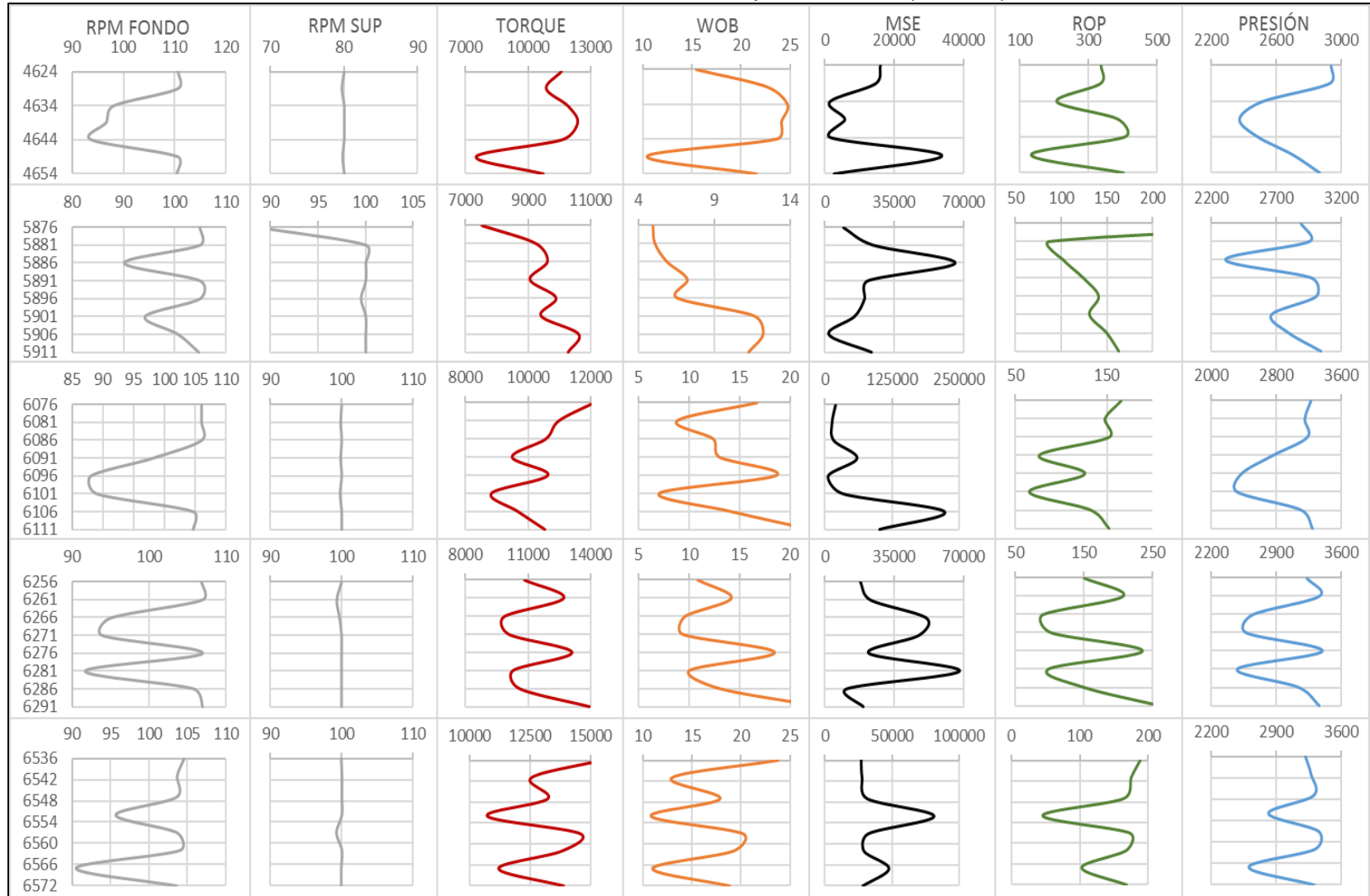
Gráfica 13. Posibles vibraciones pozo CA342 (Parte 2).



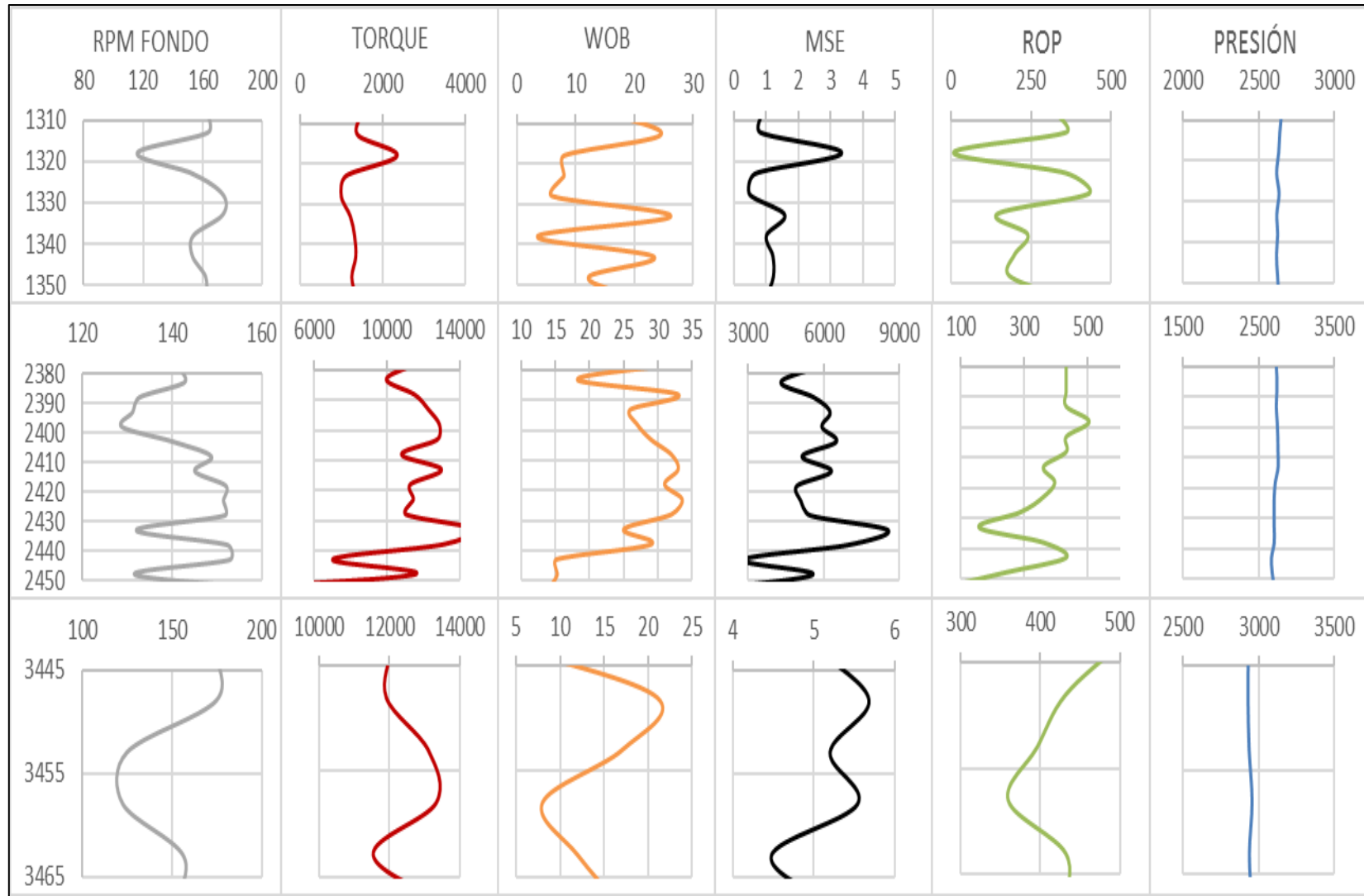
Gráfica 14. Posibles vibraciones pozo CA361 (Parte 1).



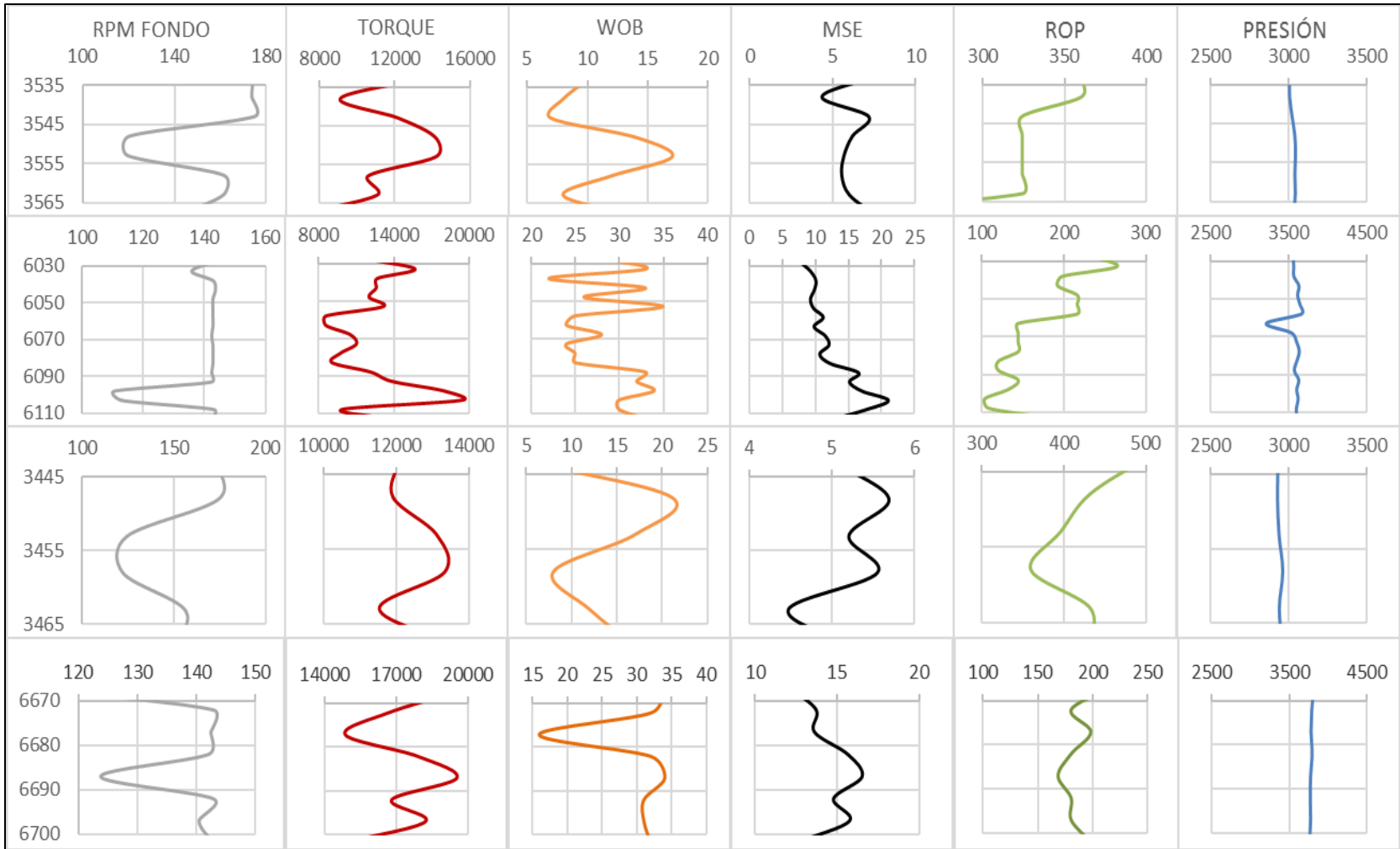
Gráfica 15. Posibles vibraciones pozo CA361 (Parte 2).



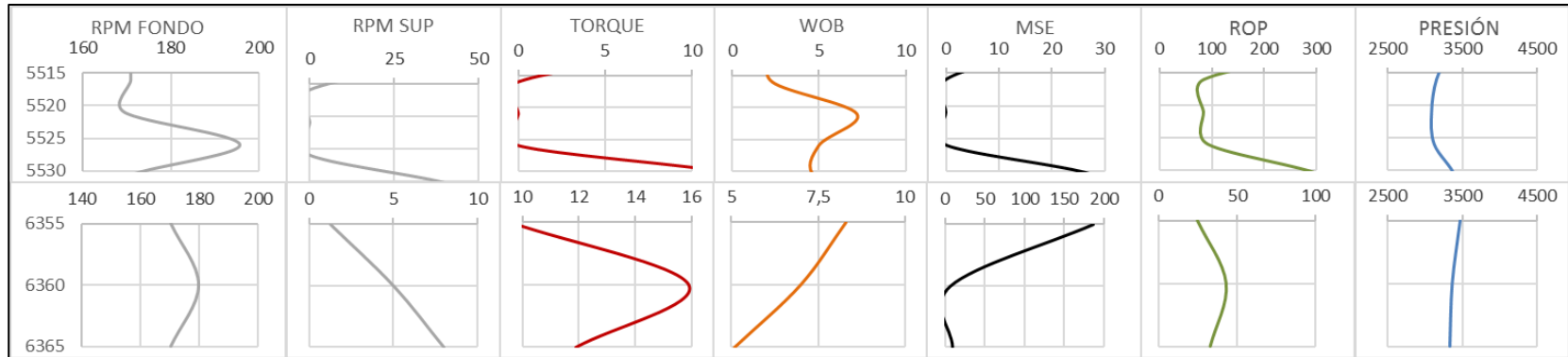
Gráfica 16. Posibles vibraciones pozo CA236 (Parte 1).



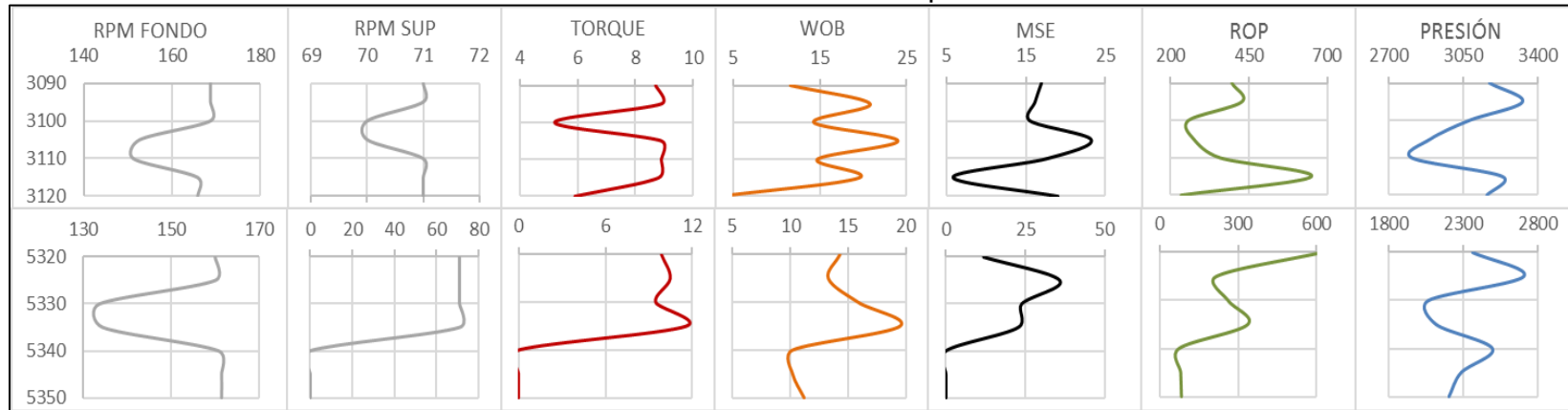
Gráfica 17. Posibles vibraciones pozo CA236 (Parte 2).



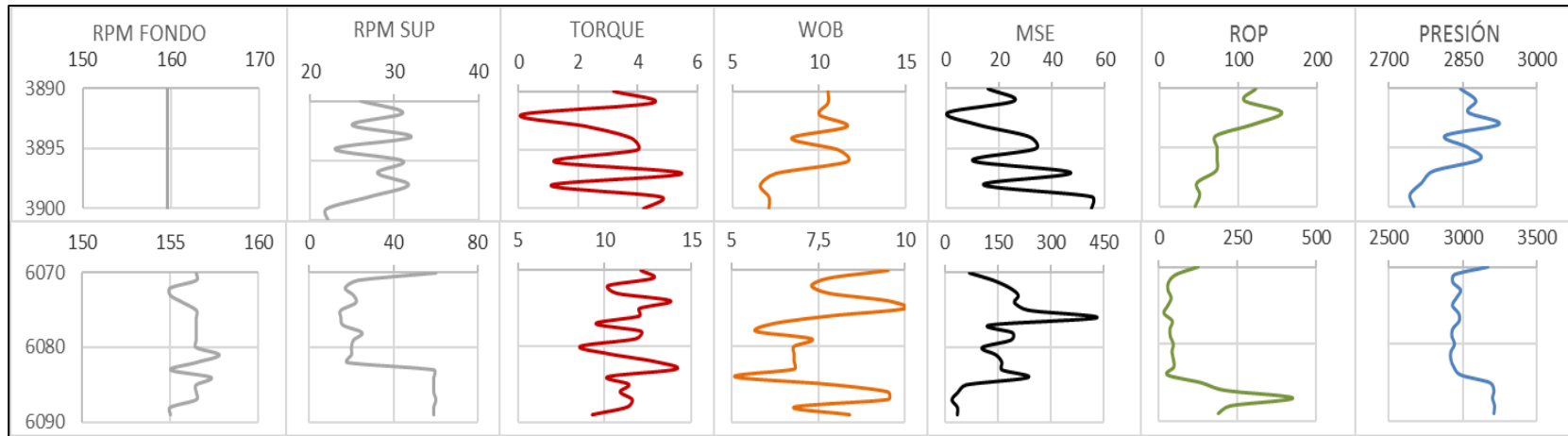
Gráfica 18. Posibles vibraciones pozo CA471.



Gráfica 19. Posibles vibraciones pozo CA217.



Gráfica 20. Posibles vibraciones pozo CA316.



8. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RENDIMIENTOS EN ROP Y TIEMPOS TOTALES DE PERFORACIÓN DEL NUEVO DISEÑO DE BROCA POLICRISTALINA CON CALIBRE EXTENDIDO CONTRA EL DISEÑO CON CALIBRE CORTO EN LA SECCIÓN DE 12¼”

En este capítulo, se realiza un análisis comparativo de los tiempos totales de operación y las tasas de penetración de todos los pozos en estudio. Para realizar un análisis válido, se crearon tres grupos de pozos, con las mismas herramientas direccionales y KOP´s a profundidades similares. En el desarrollo del capítulo se presentan los tiempos de realización de cada una de las operaciones por pozo y las ROP´s tanto efectivas como totales de cada uno, por último, se grafican y realizan los análisis relacionados con los hallazgos de cada uno de los grupos de pozos, haciendo énfasis en la comparación de rendimiento del diseño de broca con calibre corto contra la de calibre extendido.

8.1 POZO CA322

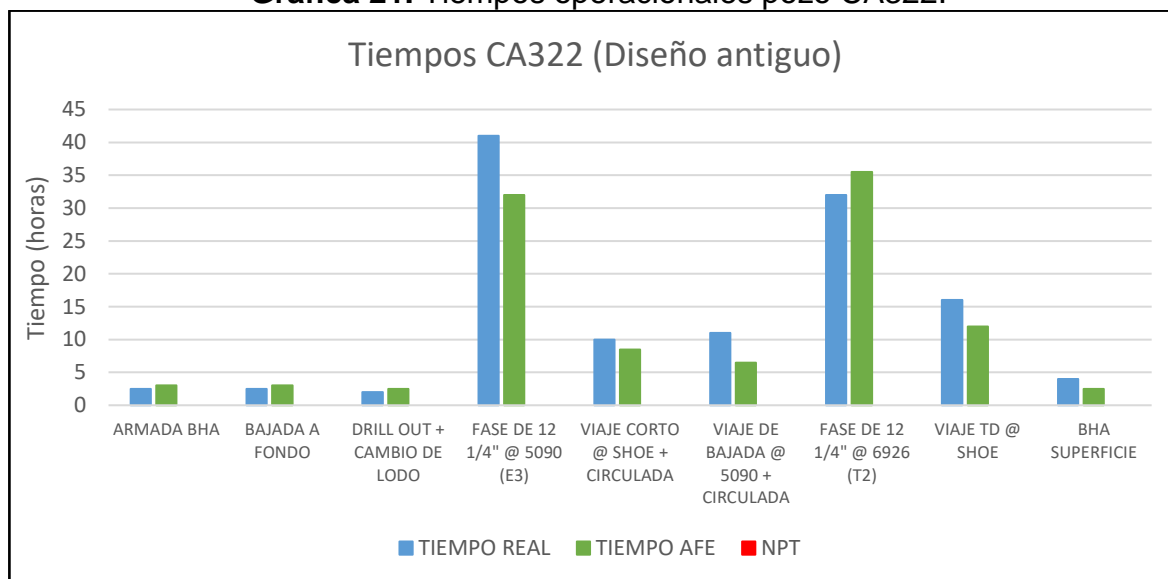
La operación de perforación en el pozo CA322, fue llevada a cabo con completa normalidad y sin tiempos no productivos durante la fase. Es importante resaltar que este pozo fue perforado con motor de fondo y un KOP a 4249 ft que se considera profundo. En la **Tabla 10**, se pueden observar los tiempos planeados (AFE) y reales de la ejecución de este pozo, adicionalmente se observa que no hubo NPT alguno. Para una mejor visualización la **Gráfica 21**, es la representación de la tabla anteriormente mencionada.

Tabla 10. Tiempos operacionales pozo CA322.

POZO CA322									
	ARMADA BHA	BAJADA A FONDO	DRILL OUT + CAMBIO DE LODO	FASE DE 12 1/4" @ 5090 (E3)	VIAJE CORTO @ SHOE + CIRCULADA	VIAJE DE BAJADA @ 5090 + CIRCULADA	FASE DE 12 1/4" @ 6926 (T2)	VIAJE TD @ SHOE	BHA SUPERFICIE
TIEMPO REAL	2,5	2,5	2	41	10	11	32	16	4
TIEMPO AFE	3	3	2,5	32	8,5	6,5	35,5	12	2,5
NPT	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

Gráfica 21. Tiempos operacionales pozo CA322.



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

8.2 POZO CA342

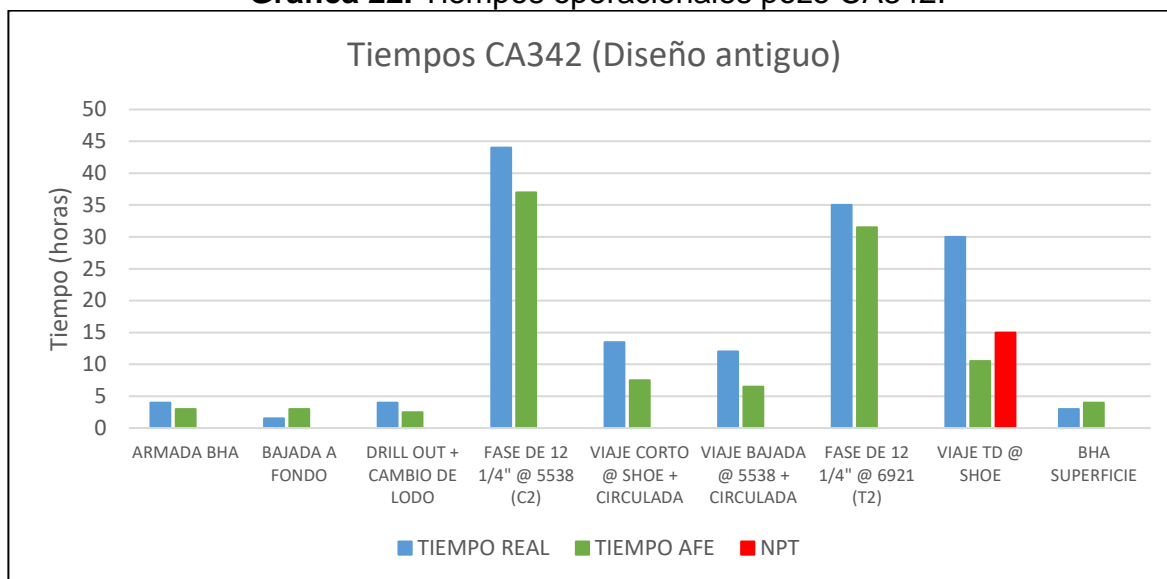
La perforación del pozo CA342, no presentó mayores inconvenientes en su ejecución, a excepción de un tiempo no productivo de 15 horas ocasionado por un viaje de acondicionamiento desde 5000 ft hasta fondo cuando se planeaba salir hasta el zapato por la alta tortuosidad del hueco. Se debe mencionar que este pozo fue perforado con motor de fondo y un KOP a 1472 ft, considerado somero. En la **Tabla 11** y la **Gráfica 22**, se presentan los datos de tiempos reales, planeados y no productivos de la operación total de la sección de 12 1/4" para este pozo.

Tabla 11. Tiempos operacionales pozo CA342.

POZO CA342									
	ARMADA BHA	BAJADA A FONDO	DRILL OUT + CAMBIO DE LODO	FASE DE 12 1/4" @ 5538 (C2)	VIAJE CORTO @ SHOE + CIRCULADA	VIAJE BAJADA @ 5538 + CIRCULADA	FASE DE 12 1/4" @ 6921 (T2)	VIAJE TD @ SHOE	BHA SUPERFICIE
TIEMPO REAL	4	1,5	4	44	13,5	12	35	30	3
TIEMPO AFE	3	3	2,5	37	7,5	6,5	31,5	10,5	4
NPT	0	0	0	0	0	0	0	15	0

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

Gráfica 22. Tiempos operacionales pozo CA342.



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

8.3 POZO CA361

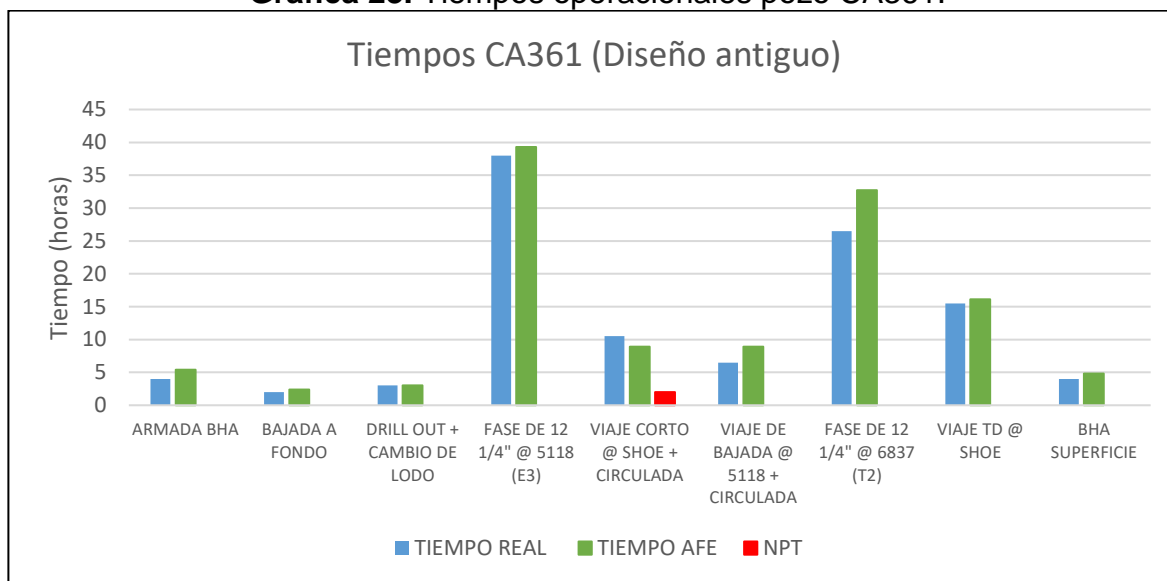
Durante la sección de 12 ¼" del pozo CA361, se realizaron operaciones con total normalidad, a excepción de un tiempo no productivo de 2 horas que se presentó durante la operación de viaje corto al zapato, generado al esperar que el lodo se densificara de 11,2 ppg a 11,8 ppg para poder circular el hueco. Este pozo fue perforado con motor de fondo + Herramienta Rotaria con KOP a 3522 ft. En la **Tabla 12** y la **Gráfica 23**, se observan los tiempos en horas de cada una de las operaciones.

Tabla 12. Tiempos operacionales pozo CA361.

POZO CA361									
	ARMADA BHA	BAJADA A FONDO	DRILL OUT + CAMBIO DE LODO	FASE DE 12 1/4" @ 5118 (E3)	VIAJE CORTO @ SHOE + CIRCULADA	VIAJE DE BAJADA @ 5118 + CIRCULADA	FASE DE 12 1/4" @ 6837 (T2)	VIAJE TD @ SHOE	BHA SUPERFICIE
TIEMPO REAL	4	2	3	38	10,5	6,5	26,5	15,5	4
TIEMPO AFE	5,4	2,4	3	39,3	8,9	8,9	32,7	16,1	4,8
NPT	0	0	0	0	2	0	0	0	0

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

Gráfica 23. Tiempos operacionales pozo CA361.



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

8.4 POZO CA236

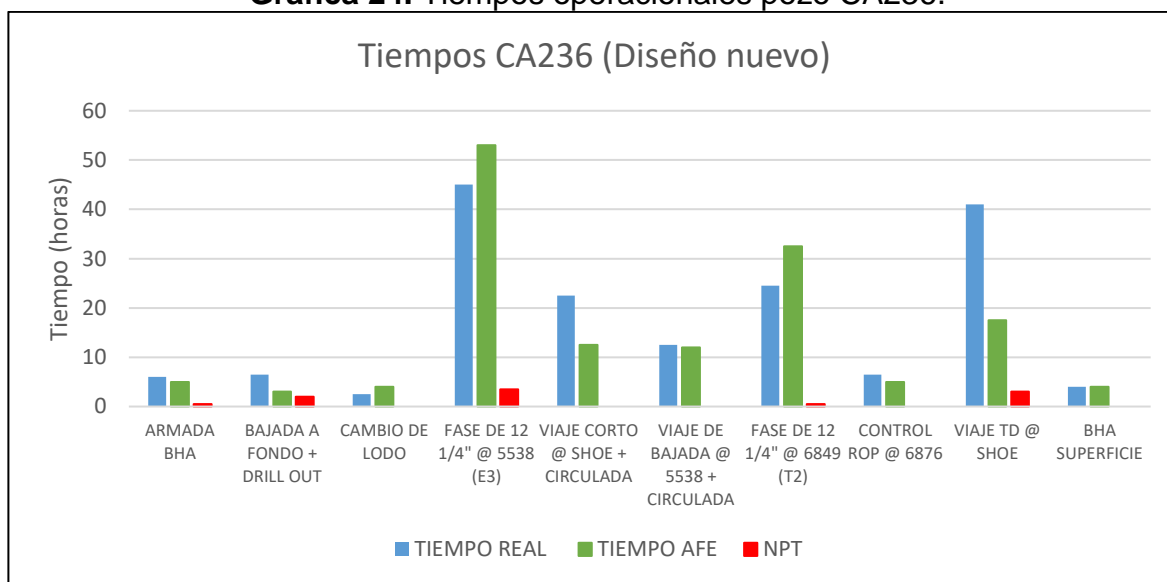
Durante la perforación del pozo CA236, se presentaron una serie de tiempos no productivos que tuvieron grandes repercusiones en el desarrollo del pozo, la mayoría de estos NPT's fueron provocados por la dificultad de las bombas para mantener la presión, generando múltiples revisiones a lo largo de toda la sección, aportando la mayoría de los NPT's. A su vez, durante la perforación de la fase hasta 5538 ft se presentó un problema de comunicación con la herramienta rotaria (RSS) generando pérdida de 30 minutos en el envío de "Down Link" para que la herramienta respondiera. Adicionalmente, realizando el viaje de fondo al zapato hubo una tormenta eléctrica que interrumpió durante 1 hora las operaciones en el taladro. Los viajes en este pozo fueron bastante complicados debido a que se tuvo que sacar tubería con "Back Reaming" en un 70% de las operaciones, provocado por una mala reología del lodo, que no tuvo un buen desempeño durante toda la sección, aumentando los tiempos de viaje por razones ajenas al rendimiento de la broca. Este pozo fue perforado con herramienta rotaria (RSS) y un KOP a 4065 ft, considerado profundo. En la **Tabla 13** y la **Gráfica 24**, se presentan los tiempos de desarrollo de cada una de las operaciones en este pozo.

Tabla 13. Tiempos operacionales pozo CA236.

POZO CA236										
	ARMADA BHA	BAJADA A FONDO + DRILL OUT	CAMBIO DE LODO	FASE DE 12 1/4" @ 5538 (E3)	VIAJE CORTO @ SHOE + CIRCULADA	VIAJE DE BAJADA @ 5538 + CIRCULADA	FASE DE 12 1/4" @ 6849 (T2)	CONTROL ROP @ 6876	VIAJE TD @ SHOE	BHA SUPERFICIE
TIEMPO REAL	6	6,5	2,5	45	22,5	12,5	24,5	6,5	41	4
TIEMPO AFE	5	3	4	53	12,5	12	32,5	5	17,5	4
NPT	0,5	2	0	3,5	0	0	0,5	0	3	0

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

Gráfica 24. Tiempos operacionales pozo CA236.



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

8.5 POZO CA471

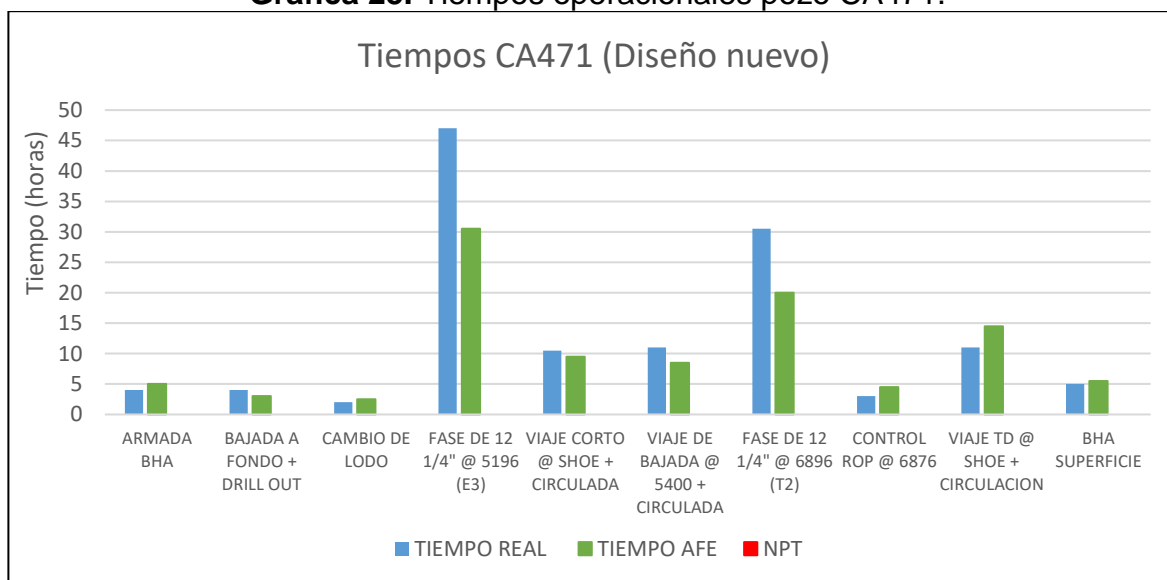
La perforación del pozo CA471, solo presentó una hora de tiempo no productivo, a raíz de una falla de comunicación con el "MWD-HELL" durante la armada del ensamblaje de fondo, el resto de las operaciones durante la ejecución de esta sección fueron realizadas con completa normalidad. Es importante tener en cuenta durante la comparación de desempeños que este pozo fue perforado con motor de fondo y un KOP a 700 ft, considerado somero. En la **Tabla 14** y **Gráfica 25**, se pueden observar los respectivos tiempos por cada una de las operaciones realizadas durante la sección.

Tabla 14. Tiempos operacionales pozo CA471.

POZO CA471										
	ARMADA BHA	BAJADA A FONDO + DRILL OUT	CAMBIO DE LODO	FASE DE 12 1/4" @ 5196 (E3)	VIAJE CORTO @ SHOE + CIRCULADA	VIAJE DE BAJADA @ 5400 + CIRCULADA	FASE DE 12 1/4" @ 6896 (T2)	CONTROL ROP @ 6876	VIAJE TD @ SHOE + CIRCULACION	BHA SUPERFICIE
TIEMPO REAL	4	4	2	47	10,5	11	30,5	3	11	5
TIEMPO AFE	5	3	2,5	30,5	9,5	8,5	20	4,5	14,5	5,5
NPT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

Gráfica 25. Tiempos operacionales pozo CA471.



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

8.6 POZO CA217

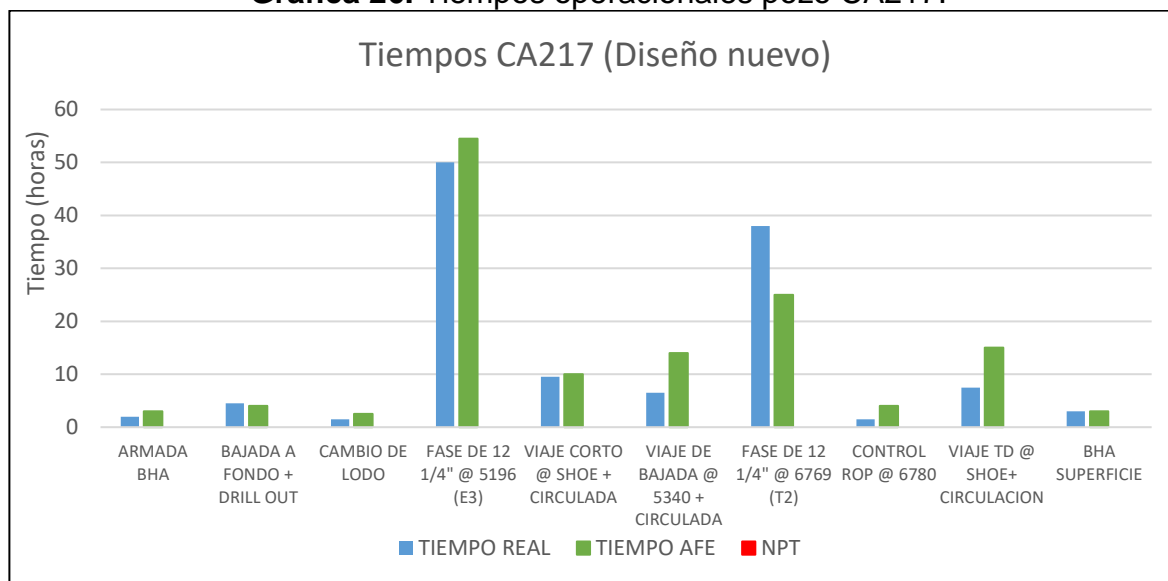
El pozo CA217, al igual que el CA322, no presentó tiempos no productivos, desarrollando toda la sección con completa normalidad. La perforación de este pozo fue realizada con motor de fondo y con un KOP a 1145 ft, considerado somero. En la **Tabla 15** y la **Gráfica 26**, se presentan los tiempos en horas que tomaron las operaciones en este pozo.

Tabla 15. Tiempos operacionales pozo CA217.

POZO CA217										
	ARMADA BHA	BAJADA A FONDO + DRILL OUT	CAMBIO DE LODO	FASE DE 12 1/4" @ 5196 (E3)	VIAJE CORTO @ SHOE + CIRCULADA	VIAJE DE BAJADA @ 5340 + CIRCULADA	FASE DE 12 1/4" @ 6769 (T2)	CONTROL ROP @ 6780	VIAJE TD @ SHOE+ CIRCULACION	BHA SUPERFICIE
TIEMPO REAL	2	4,5	1,5	50	9,5	6,5	38	1,5	7,5	3
TIEMPO AFE	3	4	2,5	54,5	10	14	25	4	15	3
NPT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

Gráfica 26. Tiempos operacionales pozo CA217.



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

8.7 POZO CA316

La perforación del pozo CA316, fue la que mayor cantidad de operaciones planeadas tenía inicialmente, se planeó un cambio de ensamblaje de fondo a 5182 ft, adicional a esto, presentó 5,5 horas de tiempo no productivo debido a la falla de conexión con la herramienta direccional, lo que obligó a realizar un viaje inesperado a superficie para poder chequear y cambiar la herramienta. Este pozo fue perforado con motor de fondo y un KOP a 5200 ft, considerado profundo. En la **Tabla 16** y la **Gráfica 27**, se presentan los tiempos de cada una de las operaciones en este pozo.

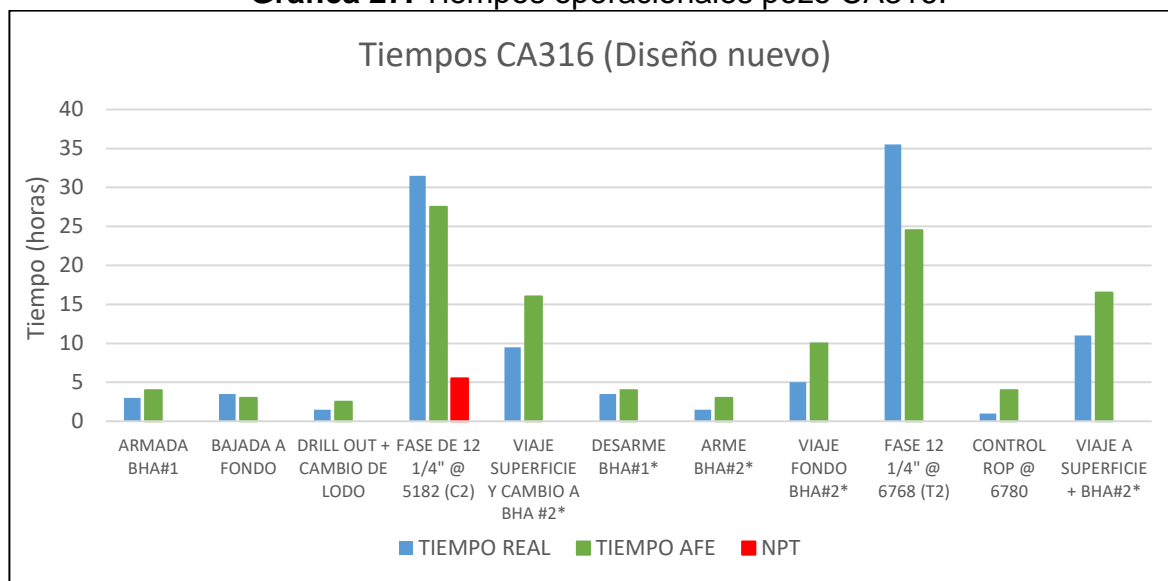
Tabla 16. Tiempos operacionales pozo CA316.

POZO CA316											
	ARMADA BHA#1	BAJADA A FONDO	DRILL OUT + CAMBIO DE LODO	FASE DE 12 1/4" @ 5182 (C2)	VIAJE SUPERFICIE Y CAMBIO A BHA #2*	DESARME BHA#1*	ARME BHA#2*	VIAJE FONDO BHA#2*	FASE 12 1/4" @ 6768 (T2)	CONTROL ROP @ 6780	VIAJE A SUPERFICIE + BHA#2*
TIEMPO REAL	3	3,5	1,5	31,5	9,5	3,5	1,5	5	35,5	1	11
TIEMPO AFE	4	3	2,5	27,5	16	4	3	10	24,5	4	16,5
NPT	0	0	0	5,5	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

*Nombre asignado por planeación para los BHA que debido a una falla pasaron a tomar el nombre de BHA#2 para el BHA#1 y BHA#2 para el BHA#3, a partir de 452 ft, profundidad donde se presentó dicha falla.

Gráfica 27. Tiempos operacionales pozo CA316.



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

8.8 COMPARACIÓN DE TIEMPOS TOTALES

A continuación, se realiza la comparación de los tiempos totales de todos los pozos en estudio, realizando tres (3) grupos diferentes, los cuales se definen por tener características similares en cuanto al perfil y herramientas direccionales, esto con el fin de poder realizar un análisis válido al tener condiciones similares con brocas diferentes. En la **Tabla 17**, se presentan los tiempos reales, planeados y no productivos de todos los pozos, al igual que en la **Tabla 18**, los tiempos de viajes por pozo.

Tabla 17. Tiempos operacionales todos los pozos.

TIEMPOS TOTALES							
POZO	CA322	CA342	CA361	CA236	CA471	CA217	CA316
TIEMPO REAL	121	147	110	171	128	124	106,5
TIEMPO AFE	105,5	105,5	121,5	148,5	103,5	135	115
NPT	0	15	2	9,5	1	0	5,5

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

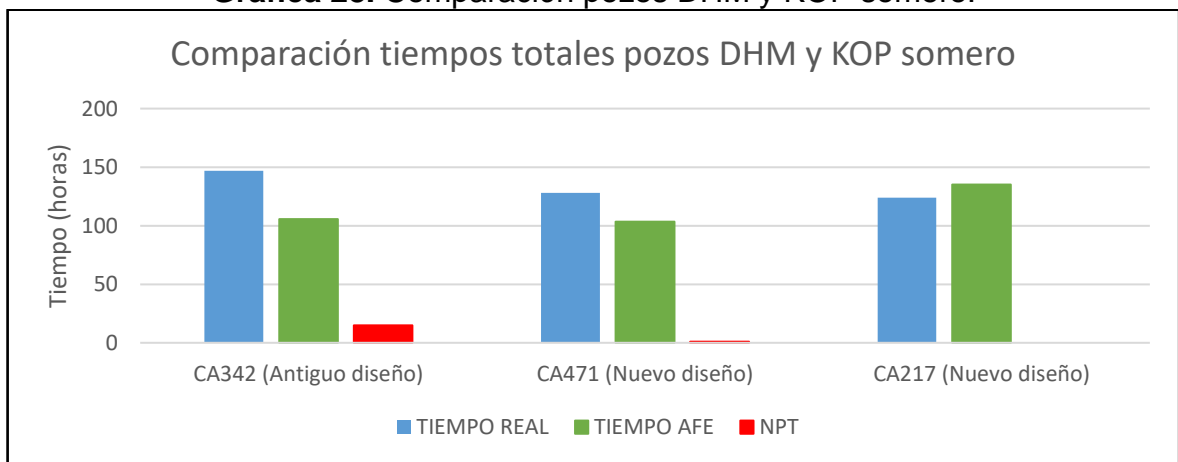
Tabla 18. Tiempos de viaje todos los pozos.

TIEMPOS DE VIAJE					
POZO	VIAJE CORTO @ ZAPATO 13 3/8" + CIRCULADA	VIAJE REGRESO @ FONDO + CIRCULADA	VIAJE TD @ ZAPATO + CIRCULADA	VIAJE ZAPATOS @ SUP + QUIEBRE BHA	TIEMPO TOTAL DE VIAJES
322 Real	10	11	16	4	41
322 AFE	8,5	6,5	12	2,5	29,5
342 Real	13,5	12	30	3	58,5
342 AFE	7,5	6,5	10,5	4	28,5
361 Real	10,5	6,5	15,5	4	36,5
361 AFE	8,9	8,9	16,1	4,8	38,7
236 Real	22,5	12,5	41	4	80
236 AFE	12,5	12	17,5	4	46
471 Real	10,5	11	11	5	37,5
471 AFE	7,5	6,5	9,5	4	27,5
217 Real	9,5	6,5	7,5	3	26,5
217 AFE	7	8,5	13	3	31,5
316 Real	6,5	5	8,5	3	23
316 AFE	7	8,5	10,5	3	29

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

8.8.1. Pozos perforados con motor de fondo y KOP somero. En la **Gráfica 28**, se puede observar la representación de los tiempos totales de los pozos CA342 (perforado con el diseño antiguo), CA471 y CA217 (Ambos perforados con el nuevo diseño de broca), que tienen en común el uso de motor de fondo como herramienta direccional y un KOP somero.

Gráfica 28. Comparación pozos DHM y KOP somero.

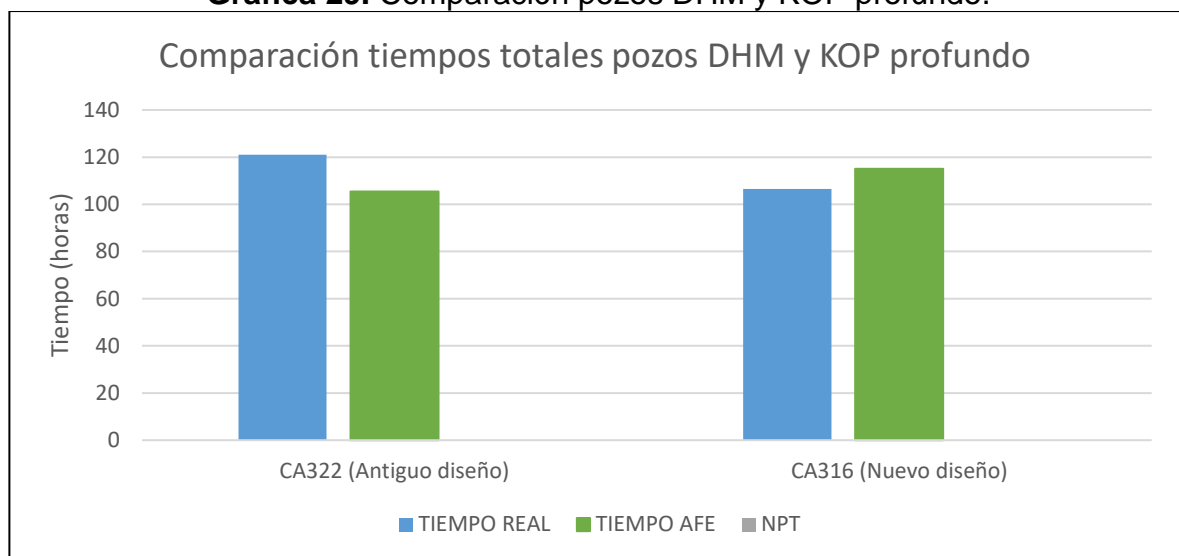


Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

Analizando la gráfica se puede observar que los pozos perforados con el nuevo diseño presentaron mejores tiempos totales de operación, esto posiblemente generado por un ahorro aproximado del 36% y 46% en los tiempos totales de viaje de los pozos CA471 y CA217, respectivamente.

8.8.2. Pozos perforados con motor de fondo y KOP profundo. En la **Gráfica 29**, se pueden observar los tiempos totales de los pozos CA322 (perforado con el diseño antiguo) y CA316 (perforado con el nuevo diseño de broca), que tienen en común el uso de motor de fondo como herramienta direccional y un KOP considerado profundo.

Gráfica 29. Comparación pozos DHM y KOP profundo.



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

En la gráfica se puede observar que efectivamente al igual que en la comparación anterior el pozo perforado con la broca de 4" en el calibre (calibre extendido) tuvo mejores rendimientos en tiempos de operación total, gracias a una disminución de tiempos de viaje en el CA316, de aproximadamente el 44% con respecto al CA322.

8.8.3. Pozos perforados con herramienta rotaria y KOP profundo. Debido a los múltiples inconvenientes presentados en el pozo CA236, provocados por el mal desempeño del fluido de perforación, la realización de una comparación de los tiempos totales de operación de estos pozos no sería válida, pues factores ajenos al desempeño de la broca están afectando los tiempos de viajes de la sarta.

8.9 COMPARACIÓN ROP TOTALES Y EFECTIVAS

A continuación, se presenta la **Tabla 19**, donde se relacionan las ROP totales y efectivas de todos los pozos en estudio.

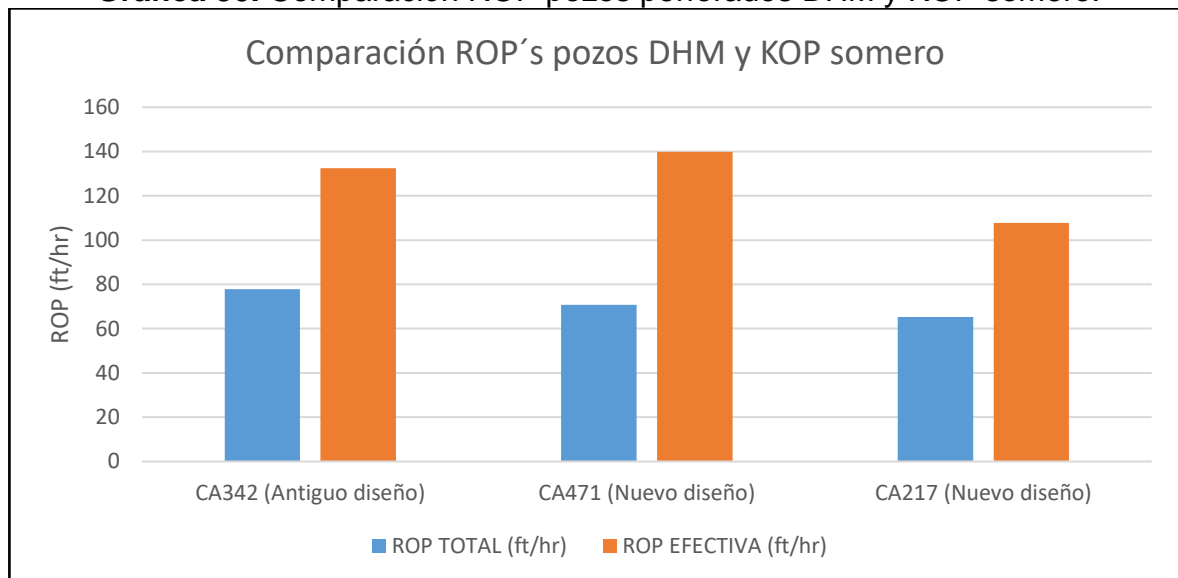
Tabla 19. ROP efectiva y total todos los pozos.

POZO	ROP TOTAL (ft/hr)	ROP EFECTIVA (ft/hr)
CA322	80.9	151.2
CA342	77.78	132.41
CA361	95.22	230.37
CA236	79.36	167.8
CA471	70.71	139.82
CA217	65.34	107.72
CA316	74	117.6

Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

8.9.1. Pozos perforados con motor de fondo y KOP somero. En la **Gráfica 30**, se presenta el rendimiento en ROP de los pozos CA342, CA471 y CA217.

Gráfica 30. Comparación ROP pozos perforados DHM y KOP somero.

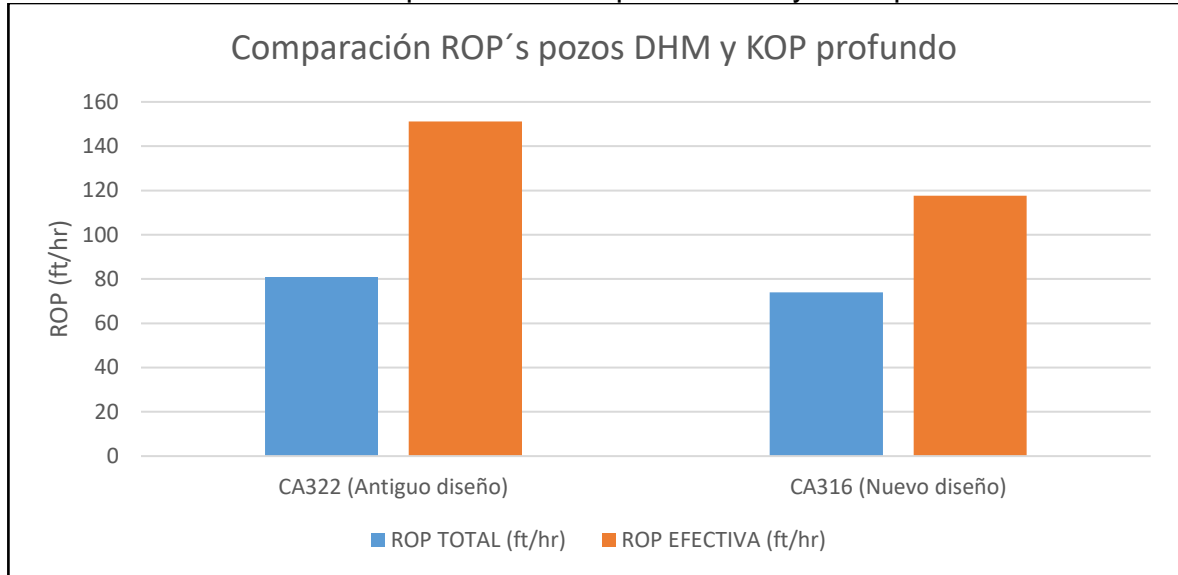


Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

Los rendimientos en ROP efectiva y total demostraron que la broca de calibre corto evidencia mejor desempeño en términos de velocidad de penetración con respecto a la de calibre extendido, a excepción de la ROP efectiva del CA471, que posiblemente fue la mejor de los tres por una optimización de parámetros. Es importante resaltar que a pesar de estos resultados, fueron más rápidos en operación los pozos CA471 y CA217.

8.9.2. Pozos perforados con motor de fondo y KOP profundo. En la **Gráfica 31**, se presenta el rendimiento en ROP de los pozos CA322 y CA316.

Gráfica 31. Comparación ROP pozos DHM y KOP profundo.



Fuente: ULTERRA, Bogotá 2016.

Se presenta un comportamiento donde las tasas de penetración del pozo perforado con la broca de calibre corto son mayores al pozo perforado con el diseño de calibre extendido, demostrando que la broca de calibre corto tiene mejor rendimiento.

8.9.3. Pozos perforados con herramienta rotaria y KOP profundo. Al igual que el análisis en tiempos totales de operación entre el pozo CA316 y CA236, realizar una comparación de ROP's totales y efectivas entre ambos pozos carece de validez al tener un motor de fondo con ángulo de desviación 0° en el CA361, que aumentó las RPM en fondo, optimizando las tasas de penetración de este pozo, dejando en total desventaja el CA236.

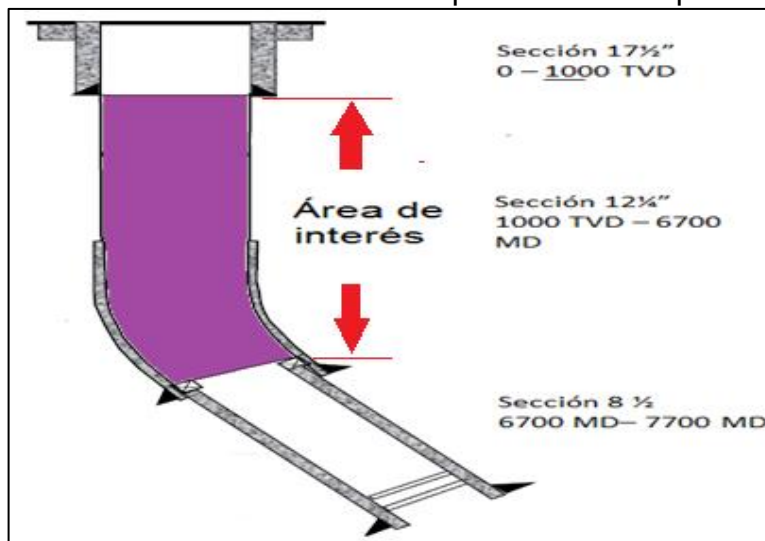
9. EVALUACIÓN FINANCIERA

Debido a la gran producción diaria de crudo que aporta el Campo Castilla a la producción nacional, la compañía Ecopetrol S.A ha tenido como objetivo principal realizar búsquedas constantes de tecnología que permitan la optimización de las operaciones y disminución de costos presentando un beneficio económico importante al país. La compañía Ulterra™ gracias a sus investigaciones, ha presentado avances tecnológicos importantes en las herramientas de perforación de pozos, lo que ha permitido que gane varios contratos en esta parte de la industria, no solo en el Campo Castilla, sino también a nivel mundial.

La sección 12 $\frac{1}{4}$ " de los pozos en el Campo Castilla que comprende las formaciones Guayabo, Areniscas Superiores, Lutita E, Unidad C1, Arenisca Carbonera, Unidad C2, Lutita E3, Unidad T1, Lutita E4 y la Unidad T2, frecuentemente presenta problemas en los viajes de tubería durante el proceso de perforación de la sección, debido a la presencia de puntos apretados a distintas profundidades asociados a una baja calidad del hueco. A partir de esta problemática Ulterra™ vio la necesidad de implementar una broca PDC con calibre extendido para disminuir la tortuosidad del hueco y así lograr reducir tiempos totales optimizando los costos de la operación.

El proyecto describe el desempeño de la broca con calibre extendido corrida en la sección de 12 $\frac{1}{4}$ " de cuatro (4) pozos en el Campo Castilla y compara su rendimiento contra la broca de calibre corto utilizada anteriormente en la perforación de tres (3) pozos en este mismo campo, en función de los tiempos totales de operación. Los pozos perforados con los dos diseños tienen un perfil tipo J. A continuación, en la **Figura 66**, se ilustra la sección que fue perforada por los dos diseños de broca, indicada de color morado.

Figura 66. Estado mecánico de un pozo en el Campo Castilla.



Fuente: ULTERRA, Estado mecánico de los pozos en Castilla.

La evaluación financiera se realiza desde el punto de vista de la compañía operadora del campo. Se utiliza como unidad monetaria de valor constante, el dólar norteamericano (USD). La tasa de interés de oportunidad de la compañía es del 11% anual con un horizonte de tiempo de un año, con periodos bimestrales y como indicador financiero la metodología del valor presente neto (VPN).

El análisis de costos al ser desde el punto de vista de la compañía operadora requiere de un análisis de costos de inversión (CAPEX), a partir de dos escenarios, el escenario 1 que se basa en la perforación de tres (3) pozos con el diseño de broca con calibre corto y el escenario 2, donde se perforan cuatro (4) pozos con el nuevo diseño de broca con calibre extendido.

9.1 ANÁLISIS DE COSTOS DE INVERSIÓN (CAPEX).

Los costos de inversión, también conocidos como costos pre-operativos, son aquellos que se incurren en la adquisición de los activos necesarios para poner un proyecto en funcionamiento, en este caso son todas aquellas herramientas, servicios y personal pertinentes para poder llevar a cabo la perforación de un pozo petrolero.

Las brocas de perforación constituyen solamente una fracción del costo total del pozo, que va entre el uno y el cinco por ciento. El tiempo necesario para perforar un pozo está relacionado directamente con la rapidez con la cual las brocas corten las formaciones y a su vez con la calidad final con la que el hueco quede después de la operación, puesto que no solo se puede esperar que la broca llegue de la manera más rápida a la profundidad deseada, sino que también deje el hueco bien conformado para que los tiempos de viaje de tubería no afecten los tiempos totales de perforación.

Para llevar a cabo el análisis financiero de este proyecto, se hará un estimado del costo de perforación por hora, para posteriormente comparar los dos escenarios y así determinar la viabilidad financiera del proyecto.

Tanto el precio de alquiler de la broca, como de las demás herramientas direccionales y personal capacitado necesario para llevar a cabo la perforación, será el mismo en los dos casos, sin embargo, la reducción de los tiempos de viaje en la perforación con la broca de calibre extendido será vital para determinar una posible optimización de costos, y por ende una probable reducción del capital necesario para perforar un pozo.

Se inicia con el análisis de los costos para los tres pozos perforados con el diseño de broca PDC con calibre corto (escenario 1) y posteriormente se presentan los costos para los cuatro pozos perforados con el diseño de broca PDC con calibre extendido (escenario 2); posteriormente con los valores de costo por pie perforado

(CPP) de cada pozo, se realiza un promedio ponderado de los pozos perforados por cada diseño para obtener un costo por pie perforado (CPP) para cada broca.

La **Tabla 20**, muestra un promedio de costos por servicio de perforación de un pozo común en el Campo Castilla en la sección 12 ¼”.

Tabla 20. Costos de servicio de perforación por hora.

SERVICIOS DE PERFORACION	OPERACIÓN
Equipo de perforacion	\$ 2.278,17
Servicio de herramientas direccionales	\$ 372,35
Servicio de herramientas de fondo	\$ 101,55
Fluido de perforacion y filtracion	\$ 946,05
Tratamiento de cortes y fluidos residuales	\$ 356,41
Bajada de tubulares y casing drilling	\$ 188,00
Comunicaciones	\$ 28,65
Servicio para corrida de liner, empaques de perforacion, y pruebas	\$ 27,36
Inspeccion de equipos y herramientas	\$ 52,05
Profesionales de supervision	\$ 125,66
Servicio tecnico y profesionales	\$ 14,96
Unidad Geologia	\$ 183,00
Servicios adicionales	\$ 10,13
PERFORACION	\$ 4.684,35
Cabezal de pozo y herramientas	\$ 121,37
Revestimientos y accesorios	\$ 922,20
Liner hanger y accesorios	\$ 307,88
Compras adicionales	\$ 155,96
MATERIALES (CONSUMIBLES) DE PERFORACION	\$ 1.507,41
SUB TOTAL	\$ 6.191,76
Servicios de planeacion y seguimiento	\$ 72,36
Servicios adicionales y de gerenciamiento	\$ 106,56
TOTAL	\$ 6.370,69

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

La **Ecuación 17**, se utiliza para determinar el costo por pie perforado.

Ecuación 17. 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)
- T_d= Tiempo de perforación (hr)
- T_t= Tiempo del viaje (hr)
- FD= Pies perforados (pies)

Para el costo promedio por pie perforado (CPP) de cada diseño, no se toman en cuenta los pozos CA236 (perteneciente al escenario 2) y CA361 (perteneciente al escenario 1), debido a que el primero presentó diferentes problemas con el lodo de perforación que afectaron significativamente los tiempos de viajes y el segundo utilizó motor de fondo y RSS, afectando los tiempos de perforación del pozo y generando una ventaja que los otros no tenían. Las variables afectadas en ambos pozos podrían generar una evaluación no válida para los diseños de broca, sin embargo, se presentan los costos por pie perforado de estos.

A continuación, se encuentra la **Tabla 21**, donde se representan los periodos bimestrales de la campaña de perforación para el próximo año, para efectos de la proyección todos los pozos en ambos escenarios tendrán un intervalo perforado de 6450 pies, que corresponde a nuestra área de interés.

Tabla 21. Campaña de perforación.

Periodo (Bimestre)	Número de pozos a perforar
1	1
2	1
3	1
4	1
5	1
6	1

Fuente: ULTERRA, Castilla, 2016.

9.1.1 Escenario 1 (Diseño de broca con calibre corto). El diseño U519S se utilizó para perforar la sección 12¼” de los pozos CA322, CA342, CA361. En todos los pozos anteriormente mencionados la broca llegó a la profundidad deseada sin presentar ningún problema extraordinario.

9.1.1.1 Pozo CA322. En este pozo se perforó la sección 12¼” atravesando las formaciones Guayabo, Areniscas Superiores, Lutita E, Unidad C1, Arenisca Carbonera, Unidad C2, Lutita E3, Unidad T1, Lutita E4 y la Unidad T2. La operación de perforación en el pozo CA322, fue llevada a cabo con completa normalidad. Es importante resaltar que este pozo fue perforado con motor de fondo y un KOP a 4249 ft, considerado profundo. En la **Tabla 22**, se pueden observar los costos por pie del pozo C322.

Tabla 22. Costos por pie perforados para el Pozo C322 en el área de interés.

Fabricante	Tipo de diseño	Costo broca \$B (\$US)	Costo Perf. \$R (\$US)	Tiempo de perforación T _d (hr)	Tiempo del viaje T _t (hr)	Pies perforados FD (pies)	Costo por pie CPP (\$US)
Ulterra	U519S	42.688	6.370,69	80	41	5.903	137,82

Fuente: ULTERRA, CA322 reporte final.

9.1.1.2 Pozo CA342. La perforación de este pozo solo presentó un tiempo no productivo de 15 horas debido a un viaje de acondicionamiento del hueco, el resto de la operación transcurrió de manera normal. Se debe mencionar que este pozo fue perforado con motor de fondo y un KOP a 1472 ft, considerado somero. En la **Tabla 23**, se presentan los costos por pie perforados para el pozo CA342.

Tabla 23. Costos por pie perforados para el Pozo Castilla 342 en el área de interés.

Fabricante	Tipo de diseño	Costo broca \$B (\$US)	Costo taladro \$R (\$US)	Tiempo de perforación T _d (hr)	Tiempo del viaje T _t (hr)	Pies perforados FD (pies)	Costo por pie CPP (\$US)
Ulterra	U519S	42.688	6.370,69	88,5	58,5	5.911	165,11

Fuente: ULTERRA, CA342, reporte final.

9.1.1.3 Pozo CA361. Durante la sección de interés se realizaron operaciones sin ningún contratiempo, a excepción de un tiempo no productivo de dos (2) horas debido a una densificación del lodo. No será tomado en cuenta este NPT en el siguiente calculo, debido a que no se presentó por consecuencia de la broca. Este pozo fue perforado con herramienta rotaria y motor de fondo al tiempo. En la **Tabla 24**, se presentan los costos por pie perforado del pozo CA361.

Tabla 24. Costos por pie perforados para el Pozo Castilla 361 en el área de interés.

Fabricante	Tipo de diseño	Costo broca \$B (\$US)	Costo taladro \$R (\$US)	Tiempo de perforación T_d (hr)	Tiempo del viaje T_t (hr)	Pies perforados FD (pies)	Costo por pie CPP (\$US)
Ulterra	U519S	42.688	6.370,69	73,5	36,5	5.856	126,96

Fuente: ULTERRA, CA361 reporte final.

9.1.1.4 Costo por pie promedio ponderado para el escenario 1 (diseño de broca PDC con calibre corto). Se calculó el costo por pie promedio ponderado del diseño de broca con calibre corto, sin embargo, para este cálculo como se mencionó anteriormente no se tuvo en cuenta el pozo CA361, debido a que presenta ventaja significativa sobre el resto, por la utilización de motor y RSS en su ensamblaje de fondo. (Ver **Tabla 25**).

Tabla 25. Costo por pie promedio para el diseño de broca con calibre corto en el área de interés.

Pozo	CPP (US\$)	Pies totales perforados (pies)	Costo por pie promedio del diseño (US\$)
CA322	137,82	5.903	151,75
CA342	165,11	5.911	

Fuente: ULTERRA, Castilla, 2016.

9.1.1.5 Costo de la campaña de perforación proyectada para el escenario 1 (diseño de broca con calibre corto). A continuación, se realiza una proyección de costos de una campaña de perforación de un año con periodos bimestrales utilizando el diseño de broca con calibre corto. (Ver **Tabla 26**).

Tabla 26. Costo de inversión para el diseño de calibre corto.

Periodo	Profundidad (pies)	Número de pozos	CPP (USD/pie)	Costo de perforación por pozo
1	6.450	1	151,75	978.787,5
2	6.450	1	151,75	978.787,5
3	6.450	1	151,75	978.787,5
4	6.450	1	151,75	978.787,5
5	6.450	1	151,75	978.787,5
6	6.450	1	151,75	978.787,5

Fuente: ULTERRA, Castilla, 2016.

9.1.2 Escenario 2 (Diseño de broca con calibre extendido). Se utilizó para perforar la sección 12¼”, comprendiendo las formaciones que caracterizan el Campo Castilla. Los pozos perforados fueron: CA236, CA471, CA217 y CA316. En el pozo CA316, la broca fue corrida en tres ocasiones por el cambio del BHA en la sarta de perforación y por una falla de conexión con la herramienta direccional.

9.1.2.1 Pozo CA236. Debido a la insuficiencia del mantenimiento de presión por parte de las bombas, este pozo presentó una serie de tiempos no productivos que tuvieron repercusiones en la operación de perforación del pozo, además presentó otros inconvenientes en los viajes debido a problemas asociados a las propiedades reológicas del lodo. En la **Tabla 27**, se presentan los costos por pie perforado del pozo CA236.

Tabla 27. Costos por pie perforados para el Pozo CA236 en el área de interés.

Fabricante	Tipo de diseño	Costo broca \$B (\$US)	Costo taladro \$R (\$US)	Tiempo de perforación T _d (hr)	Tiempo del viaje T _t (hr)	Pies perforados FD (pies)	Costo por pie CPP (\$US)
Ulterra	U519S	42.688	6.370,69	91	80	5.873	192,76

Fuente: ULTERRA, CA236 reporte final.

9.1.2.2 Pozo CA471. En la perforación de este pozo no se presentaron mayores retrasos a parte de uno de aproximadamente de una hora debido a una falla de comunicación con el MWD-HELL. Esta hora no será tomada en cuenta en el siguiente calculo, debido a que no se presentó por culpa de la broca. Es importante tener en cuenta durante la comparación de desempeños que este pozo fue perforado con motor de fondo y un KOP a 700 ft, considerado somero. En la **Tabla 28**, se presentan los costos por pie perforado en el pozo CA471.

Tabla 28. Costos por pie perforados para el Pozo CA471 en el área de interés.

Fabricante	Tipo de diseño	Costo broca \$B (\$US)	Costo taladro \$R (\$US)	Tiempo de perforación T _d (hr)	Tiempo del viaje T _t (hr)	Pies perforados FD (pies)	Costo por pie CPP (\$US)
Ulterra	U519S	42.688	6.370,69	90,5	37,5	5.551	154,56

Fuente: ULTERRA, CA471 reporte final.

9.1.2.3 Pozo CA217. Tuvo un comportamiento similar al presentado por el pozo CA332, el cual tampoco presentó tiempos no productivos. Se procedió a calcular el costo por pie para el Pozo CA217, por medio de la **Ecuación 10**. (Ver **Tabla 29**).

Tabla 29. Costos por pie perforados para el Pozo CA217 en el área de interés.

Fabricante	Tipo de diseño	Costo broca \$B (\$US)	Costo taladro \$R (\$US)	Tiempo de perforación T_d (hr)	Tiempo del viaje T_t (hr)	Pies perforados FD (pies)	Costo por pie CPP (\$US)
Ulterra	U519S	42.688	6.370,69	97,5	26,5	5.750	149,49

Fuente: ULTERRA, CA217 reporte final.

9.1.2.4 Pozo CA316. La perforación de este pozo fue planeada con un cambio de ensamblaje de fondo planeado a los 5182 ft de profundidad, sin embargo, el tiempo no productivo aumento de manera inesperada por una falla de conexión con la herramienta direccional, pero para el cálculo de costo por pie no serán tomados en cuenta, debido a que este aumento de tiempo fue totalmente ajenos a la broca. Se procede a calcular en la **Tabla 30**, el costo por pie para el Pozo CA316, a través de la **Ecuación 10**.

Tabla 30. Costos por pie perforados para el Pozo CA316 en el área de interés.

Fabricante	Tipo de diseño	Costo broca \$B (\$US)	Costo taladro \$R (\$US)	Tiempo de perforación T_d (hr)	Tiempo del viaje T_t (hr)	Pies perforados FD (pies)	Costo por pie CPP (\$US)
Ulterra	U519S	42.688	6.370,69	83,5	23	5.668	127,22

Fuente: ULTERRA, CA316 reporte final.

9.1.2.5 Costo por pie promedio ponderado para el escenario 2 (diseño de broca PDC con calibre extendido). Se calculó el costo por pie promedio ponderado para el diseño de broca con calibre extendido, sin embargo, para este cálculo no se tuvo en cuenta el pozo CA236 (calibre extendido), por ser un pozo atípico al presentar problemas con el desempeño del lodo en toda la sección ocasionando dificultad en los viajes, situación totalmente ajena a la broca. (Ver **Tabla 31**).

Tabla 31. Costo por pie promedio para el diseño de broca con calibre

Pozo	CPP (US\$)	Pies totales perforados (pies)	Costo por pie promedio del diseño (US\$)
CA471	144,81	5.551	143,66
CA217	154,56	5.570	
CA316	127,22	5.668	

Fuente: ULTERRA, Castilla, 2016.

9.1.2.6 Costo de la campaña de perforación proyectada para el escenario 2 (diseño de broca con calibre extendido). A continuación, se realiza una proyección de costos de una campaña de perforación de un año con periodos bimestrales utilizando el diseño de broca con calibre extendido. (Ver **Tabla 32**).

Tabla 32. Costo de inversión para el diseño de calibre extendido.

Periodo	Profundidad (pies)	Número de pozos	CCP (USD/pie)	Costo de perforación por pozo
1	6.450	1	143,66	926.607
2	6.450	1	143,66	926.607
3	6.450	1	143,66	926.607
4	6.450	1	143,66	926.607
5	6.450	1	143,66	926.607
6	6.450	1	143,66	926.607

Fuente: ULTERRA, Castilla, 2015.

9.2 EVALUACIÓN FINANCIERA

Se realizó una evaluación financiera del proyecto utilizando la metodología del indicador valor presente neto (VPN), para así determinar la viabilidad financiera de cada una de los escenarios.

9.2.1 Valor presente neto (VPN). “el valor presente neto de un proyecto a una tasa de interés, es la ganancia extraordinaria que genera el proyecto dada en valores monetarios actuales, es decir, el VPN refleja el valor de la inversión y el retorno de la misma en términos actuales al tener en cuenta tasas de interés que afectan el proyecto durante su tiempo de ejecución³³; muestra en dólares actuales todos los ingresos y egresos, presentes y futuros, que constituyen el proyecto. (Ver **Ecuación 18**).

Ecuación 18. Expresión matemática del valor presente neto.

$$VPN(TIO) = \left(\frac{\text{ingresos}}{(1 + TIO)^1} \right) - \left(\frac{\text{costos}}{(1 + TIO)^1} \right) + \left(\frac{\text{ingresos}}{(1 + TIO)^2} \right) - \left(\frac{\text{costos}}{(1 + TIO)^2} \right) + \dots + \left(\frac{\text{ingresos}}{(1 + TIO)^n} \right) - \left(\frac{\text{costos}}{(1 + TIO)^n} \right)$$

Fuente. BACA. Guillermo. Ingeniería Económica. Valor presente neto. Capítulo 9. Fondo Educativo Panamericano. Octava edición. p.197.

³³BACA. Guillermo. Ingeniería Económica. Valor presente Neto. Capítulo 9. Fondo Educativo Panamericano. Octava Edición. p.197.

9.2.2 Tasa de interés de oportunidad (TIO). “La tasa de interés de oportunidad es la tasa de interés más alta que un inversionista sacrifica con el objeto de realizar un proyecto”³⁴, para realizar la evaluación financiera se utilizó una tasa interna de oportunidad del 11% anual.

El flujo de caja tuvo periodos bimestrales, por tal razón es necesario convertir la TIO del 11% anual a su respectivo valor bimestral. Para realizar este cambio de tasa se utiliza la **Ecuación 19**.

Ecuación 19. Tasa periódica a partir de la tasa anual.

$$Tasa\ bimestral\ (\%) = 1 + \left(\frac{Tasa\ anual\ (\%)}{100} \right)^{\frac{1}{6}} - 1$$

Fuente: CITI BANK. Préstamos personales. Disponible en Internet: <https://www.citibank.com.pe/peru/common/pdf/formulapil.pdf>. Consultado el 26 de enero de 2015.

Solución de la **Ecuación 19**, para la tasa bimestral.

$$Tasa\ bimestral\ (\%) = \left(1 + \frac{11}{100} \right)^{\frac{1}{6}} - 1 = 1,75\ \%$$

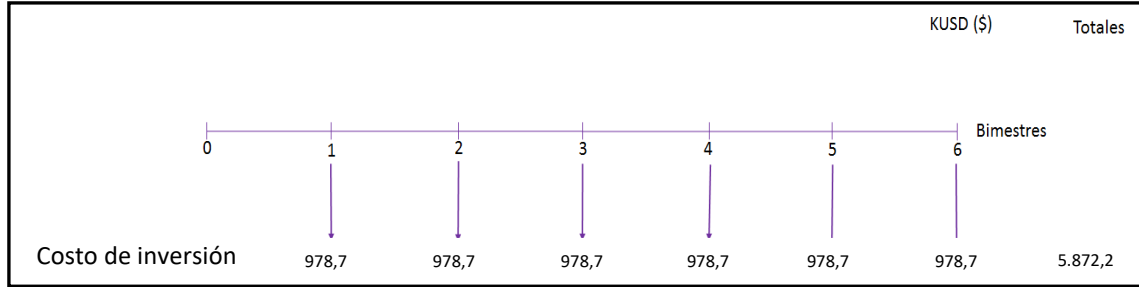
Obteniendo una TIO bimestral del 1,75 % se procede a realizar los dos flujos de efectivo para los diferentes diseños de broca PDC corridos en el Campo Castilla por la compañía Ulterra™.

9.2.3 Flujo de caja. El flujo de caja es un informe o estado financiero que presenta en detalle los flujos de ingresos y egresos de dinero que tiene una empresa o proyecto en un periodo estimado. En este caso al ser el proyecto exclusivamente de perforación de pozos petroleros no generará ingresos, lo cual conlleva a que el flujo de caja solo muestre egresos.

9.2.3.1 Escenario 1 (diseño de broca con calibre corto). En la **Gráfica 32**, se ilustran el flujo de caja efectivo en el caso que el proyecto perfora la sección 12¼” de los pozos del Campo Castilla con el diseño de broca de calibre corto.

³⁴ BACA, Guillermo. Ingeniería económica, Tasa de Interés de Oportunidad. Capítulo 7. Bogotá, Colombia. p.160.

Gráfica 32. Flujo de caja para el escenario 1 (diseño de broca con calibre corto).



En la **Ecuación 20**, se determina el Valor Presente Neto (VPN) de la empresa operadora perforando la sección 12¼” de los pozos con el diseño de calibre corto.

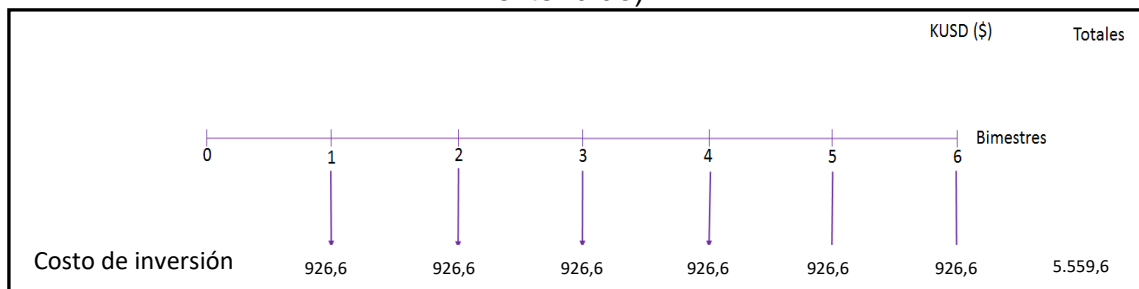
Ecuación 20. Cálculo del VPN para el escenario 1 (diseño de broca con calibre corto).

$$\begin{aligned}
 VPN(0,0175) &= - \frac{978.787,5}{(1+0,0175)^1} - \frac{978.787,5}{(1+0,0175)^2} - \frac{978.787,5}{(1+0,0175)^3} - \\
 &\quad - \frac{978.787,5}{(1+0,0175)^4} - \frac{978.787,5}{(1+0,0175)^5} - \frac{978.787,5}{(1+0,0175)^6} \\
 &= \$ - 5.529.168,25
 \end{aligned}$$

Fuente: BACA. Guillermo. Ingeniería Económica. Valor presente neto. Fondo Educativo Educativo Panamericano. Octava edición. Cap.9. p. 197.

9.2.3.2 Escenario 2 (diseño de broca con calibre extendido). En la **Gráfica 33**, se ilustran el flujo de caja efectivo en el caso que el proyecto perforo la sección 12¼” de los pozos del Campo Castilla con el diseño de broca de calibre extendido.

Gráfica 33. Flujo de caja para el escenario 2 (diseño de broca con calibre extendido).



En la **Ecuación 21**, se determina el Valor Presente Neto (VPN) de la empresa operadora perforando la sección 12¼” de los pozos con el diseño de calibre extendido.

Ecuación 21. Cálculo del VPN para el escenario 2 (diseño de broca con calibre extendido).

$$\begin{aligned}
 VPN(0,0175) &= \frac{926.607}{(1+0,0175)^1} - \frac{926.607}{(1+0,0175)^2} - \frac{926.607}{(1+0,0175)^3} - \\
 &\quad \frac{926.607}{(1+0,0175)^4} - \frac{926.607}{(1+0,0175)^5} - \frac{926.607}{(1+0,0175)^6} \\
 &= \$ - 5.234.400,74
 \end{aligned}$$

Fuente: BACA. Guillermo. Ingeniería Económica. Valor presente neto. Fondo Educativo Educativo Panamericano. Octava edición. Cap.9. p. 197.

9.3 CONCLUSIÓN FINANCIERA

Desde el punto de vista financiero para la compañía operadora, la mejor opción es perforar los pozos de la próxima campaña de perforación con brocas de calibre extendido, porque frente a las brocas con calibre corto tiene un ahorro en costos a dólares de hoy del 5,33% (USD 294.767,51), originado por la disminución de los tiempos de viaje, ejerciendo impacto en los tiempos totales de operación.

10. CONCLUSIONES

- ❖ Ulterra™ enfocándose en la optimización de la operación de perforación, modificó características del diseño de la broca U519S de calibre corto como el número de cortadores, longitud del calibre, ángulos de ataque de la estructura de corte contra la formación, cantidad de boquillas, área de remoción de ripios y la cantidad de limitadores de corte en las aletas de la broca, para caracterizar el nuevo diseño U519S de calibre extendido que busca una mejora de la calidad del hueco y una disminución de los tiempos totales de perforación.
- ❖ El nuevo diseño de broca con calibre extendido fue implementado en la presente campaña de perforación (2016) en la sección de 12¼" del Campo Castilla, perforando cuatro (4) pozos en diferentes "cluster", llegando en todos los casos a la profundidad objetivo sin presentar desgastes significativos ni falla alguna, obteniendo clasificaciones IADC entre 0-0 y 0-1.
- ❖ En la corrida del nuevo diseño de broca con herramienta rotaria se evidenció un mayor fenómeno de arrastre en comparación con los pozos realizados con motor de fondo, esto debido a un aumento promedio de la robustez de la sarta en un 28% al utilizar RSS, provocando un incremento del 38% del WOB máximo necesario para poder alcanzar las ROP's conocidas de la zona.
- ❖ Al realizar una evaluación para el nuevo diseño, en los pozos perforados con motor de fondo, se evidenció una disminución del 42% del aprovechamiento de la energía con un perfil direccional de KOP profundo (Formación C2), lo que indica que una tasa de construcción alta (mayor a 2,5°/100ft), afecta el desempeño de la broca con calibre extendido.
- ❖ El nuevo diseño de broca con calibre extendido, presentó el 50% de fenómenos vibracionales comparado con el diseño de broca con calibre corto, debido al aumento de la extensión del calibre, permitiendo que la broca tenga el doble de área de contacto con la formación obteniendo mayor estabilidad en la perforación.
- ❖ La broca de calibre corto presentó tasas de penetración efectiva mayores en un 22% al ser corrida tanto con motor de fondo como con herramienta rotaria, sin embargo, la broca de calibre extendido presentó menores tiempos totales de operación asociados a una mejor calidad del hueco que permitió optimizar los tiempos de viaje de tubería en un rango promedio de 36% a 46%.

- ❖ En términos financieros para la compañía operadora, la mejor opción es perforar los pozos de la próxima campaña de perforación con el diseño de broca con calibre extendido, porque frente al diseño con calibre corto presenta un ahorro en costos a dólares de hoy del 5,33% (USD 294.768,00), originado por la disminución de los tiempos de viaje, ejerciendo disminución en los tiempos totales de operación.

11.RECOMENDACIONES

- ❖ Correr siempre el nuevo diseño de broca de calibre extendido con herramienta rotaria en su ensamblaje de fondo ya que presenta mayor eficiencia que el motor y puede disminuir el costo por pie perforado (5,33%) al optimizar la tasa de penetración efectiva en las zonas de trabajo direccional de la sección 12 ¼" de los pozos del Campo Castilla.
- ❖ Para corroborar la disminución de los fenómenos vibracionales y por ende el mejoramiento de la calidad del hueco, al usar la broca de calibre extendido, es recomendable correr un registro Caliper 3D y/o bajar sensores de vibración en las próximas corridas.
- ❖ Realizar un análisis de los diseños de brocas PDC utilizados recientemente por las diferentes compañías prestadoras de servicios para perforar la sección 12¼" en el Campo Castilla y así diseñar una broca PDC que obtenga mayores tasas de penetración en comparación con las de la competencia.
- ❖ Buscar la optimización de la calidad del hueco a través del diseño de brocas PDC con calibres mayores a 4" corridas con control direccional eficiente e implementarlas en el Campo Castilla.

BIBLIOGRAFÍA

ANADRILL, Directional drilling training manual. Diciembre de 1996, 383p.

ANH, Colombian Sedimentary Basins, Colombia 2007, 92 p.

_____, Sector hidrocarburos. Memorias al Congreso de la República 2009-2010. Colombia, 126 p.

AZAR Jamal, ROBELLO Samuel. Drilling engineering. PennWell, Tulsa, OK. USA, Marzo de 2007. 500p.

BAKER HUGHES, IADC desgaste PDC. Hughes Christisen Manual, USA. 2010, 28p.

_____, Sistema de graduación de desgaste de IADC para trépanos PDC, PDF-Manual, 1996 Austin TX, 14p.

_____, Inteq Navi-Drill™ motor handbook, edición 11, 181p.

BAROID. Manual de fluidos. Houston, Texas, 1997, septiembre 1. 566p.

BERRIO NAVARRO Marfiza Victoria, LEÓN LÓPEZ Myriam Andrea. Evaluación de un nuevo diseño de broca PDC en la perforación de la fase 12¼ para el Campo Castilla de la Cuenca de los Llanos Orientales. Fundación universidad de América, Bogotá 2013. 178p.

BOURGOYNE Jr. Adam T, MILLHEIM Keith K, CHENEVERT Martin E, YOUNG Jr. F.S. Applied drilling engineering. Richardson, Texas, 1991. 508p.

BÜRG H., Bioestratigrafía de la sabana de Bogotá y alrededores, Geología Nacional 1957, 298p.

ECOPETROL S. A., Carta petrolera Edición 110. [En línea] [Bogotá, Colombia]. . Disponible en internet: <http://www.ecopetrol.com.co/especiales/carta%20petrolera%20110/rev_port.htm>.

_____, Castilla, recargado. Edición No. 107. [En línea] [Bogotá, Colombia] Disponible en internet: <http://www.ecopetrol.com.co/especiales/carta_petrolera/empresa.htm>.

FRANCO, Manual de geología para ingenieros. Colombia. 2002, 109p.

HALLIBURTON, Sperry Drill technical information handbook, directional drilling, tercera edición, 2012, 366p.

_____. Diseño y selección de brocas. Bit technologies Handbook, 2009, 34p.

_____. Vibration mitigation, Sperry Drilling Services, PDF-manual, 2010, 23p.

ICANH, Llanos orientales, [en línea] [Bogotá, Colombia]. Disponible en: http://www.icanh.gov.co/ver_pagina_ingles/release/register_of_archaeological_sites/llanos_orientales

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Trabajos escritos: presentaciones y referencias bibliográficas. Sexta actualización. Bogotá: ICONTEC, 2008. 110 p.

_____. Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura.. NTC 5613. Bogotá : El Instituto, 2008, 12 p.

_____. Referencias documentales para fuentes de informaciones electrónicas. NTC 4490. Bogotá : El Instituto, 1998, 8 p.

JULIVERT M., Amérique Latine Colombie, volumen 4, primera parte, Paris 1968, 618 p.

KEHRER, L., Some observations on Cretaceous and Precretaceous beds in the south western and northern-central parts of Venezuela, Bol. Geol. y Min., 1937, 467p.

KELLER, W.S. (1983) Where and how to run bits. Society of Petroleum Engineers (SPE) 00011387. 29p

LAKE W Larry, MITCHELL F. Robert. Petroleum engineering handbook, volumen 2. Society of petroleum engineers, Richardson, TX USA 2007. 772p.

_____. Petroleum engineering handbook, volumen 7: Indexes and standards. Society of petroleum engineers, Richardson, TX, USA, 2007. 176p.

LANGEVELT C.J. PDC dynamics. Society of petroleum engineering (SPE) 23867. 30p.

MISWACO. Manual de fluidos de perforación, Capítulo 5 Reología e hidráulica, 36p.

MITCHELL F. Robert, MISKA, Z. Stefan. SPE textbook series volumen 12. Society of petroleum engineers, Richardson, TX, USA, 2011. 710p.

NOSTESTEIN F, HUBMAN C.W. y BOWLER J.W., Geology of the Barco Concession, República de Colombia, Sur América, 1944, 572p.

PVDSA., El pozo ilustrado. Cuarta edición. Caracas, Venezuela, Septiembre 1998. 671p.

----- . Barrenas e Hidráulica de perforación. PDF – manual, 2001, 90p.

SCHLUMBERGER, PowerPack steetable motor handbook, Sugar Land, Tejas 2005, 204p.

----- , Selección y evaluación de brocas, Handbook, PDF-Manual, 2011, 80p.

----- , Sistema de clasificación y evaluación de desgaste de brocas de la asociación internacional de contratistas de perforación (IADC), PDF-Manual, 2011, 55p.

----- . Bordes cortantes. Houston, TX, USA, 2001. 21p.

----- . Bordes cortantes. Smithbits manual, Houston TX, 2001, 66p.

----- . El diseño de las barrenas: de arriba hasta abajo. Volumen 23 N°2, Houston TX, 2001, 19p.

----- , Oilfield Glossary, disponible en internet: <<http://www.glossary.oilfield.slb.com/es.aspx>>.

SMITH Mike. Directional drilling training manual. Sugar Land, Texas, 1996. 383p.

SMITHBITS, Fixed cutter bits, terminología y mecanismos de perforación, Houston TX 2012, 66p.

----- . Sistema de clasificación y evaluación de desgaste de las brocas de la asociación internacional de contratistas de perforación. 2008. 55p.

ULTERRA, Brocas en el Campo Castilla U519S (2,5" gauge), Bogotá 2015, 209p.

----- , Brocas en el Campo Castilla U519S (4" gauge), Bogotá 2016, 345p.

----- , Product portfolio, Drill bits technologies Houston, TX 2015, 18p.

----- , Reporte final de la broca 12¼", U519M, S/N 15905 en la primera corrida en el Pozo CA322, Bogotá 2012, 26p.

_____, Reporte final de la broca 12¼", U519M, S/N 15905 en la primera corrida en el Pozo CA342, Bogotá 2016.

_____, Reporte final de la broca 12¼", U519M, S/N 15905 en la primera corrida en el Pozo CA361, Bogotá 2016.

_____, Reporte final de la broca 12¼", U519M, S/N 15905 en la primera corrida en el Pozo CA236, Bogotá 2016.

_____, Reporte final de la broca 12¼", U519M, S/N 15905 en la primera corrida en el Pozo CA471, Bogotá 2016.

_____, Reporte final de la broca 12¼", U519M, S/N 15905 en la primera corrida en el Pozo CA217, Bogotá 2016.

_____, Reporte final de la broca 12¼", U519M, S/N 15905 en la primera corrida en el Pozo CA316, Bogotá 2016.

_____, Reporte final de la broca 12¼", U519M, S/N 15905 en la segunda corrida en el Pozo CA316, Bogotá 2016.

_____, Reporte final de la broca 12¼", U519M, S/N 15905 en la tercera corrida en el Pozo CA316, Bogotá 2016.

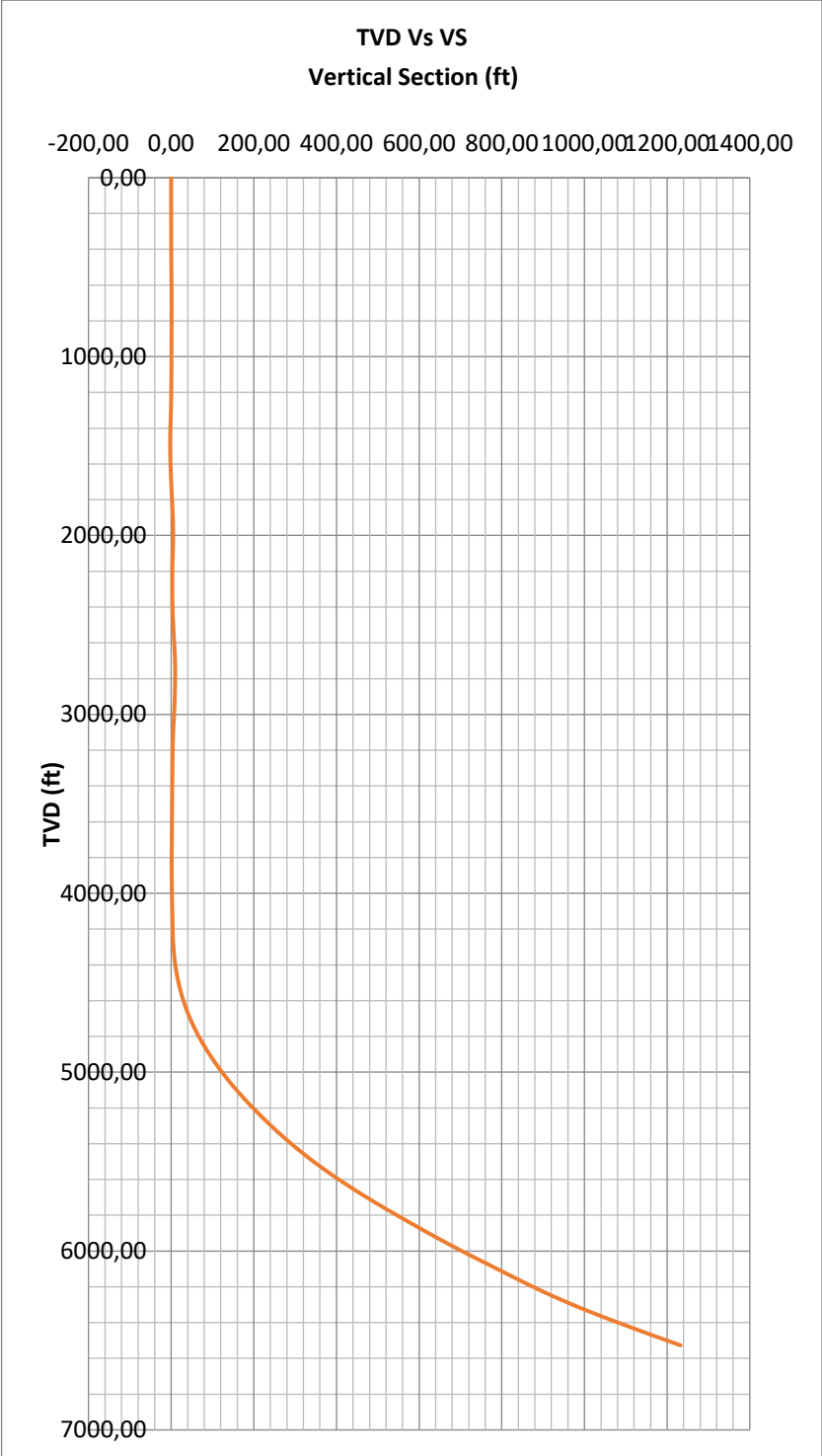
_____, U519S (2,5" gauge), Bogotá 2015. 1p.

_____, U519S (4" gauge), Bogotá 2016. 1p.

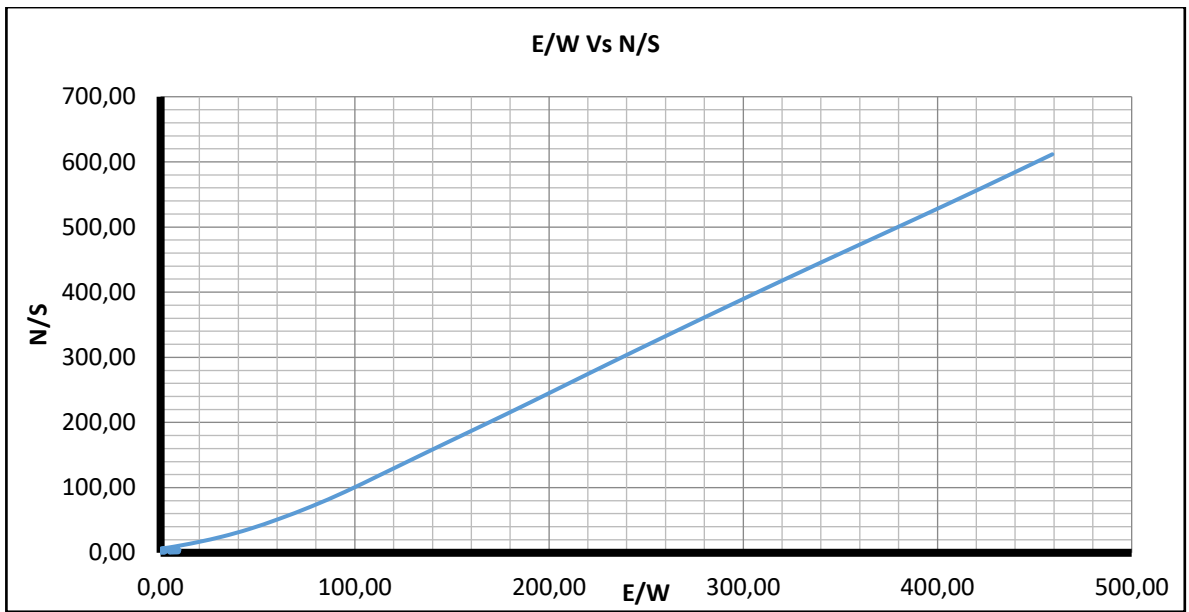
WEATHERFORD, Mud lubricated drilling motors, handbook, segunda edición, enero de 2012, 255p.

ANEXOS

**ANEXO A
PERFIL DIRECCIONAL POZO CA322.**

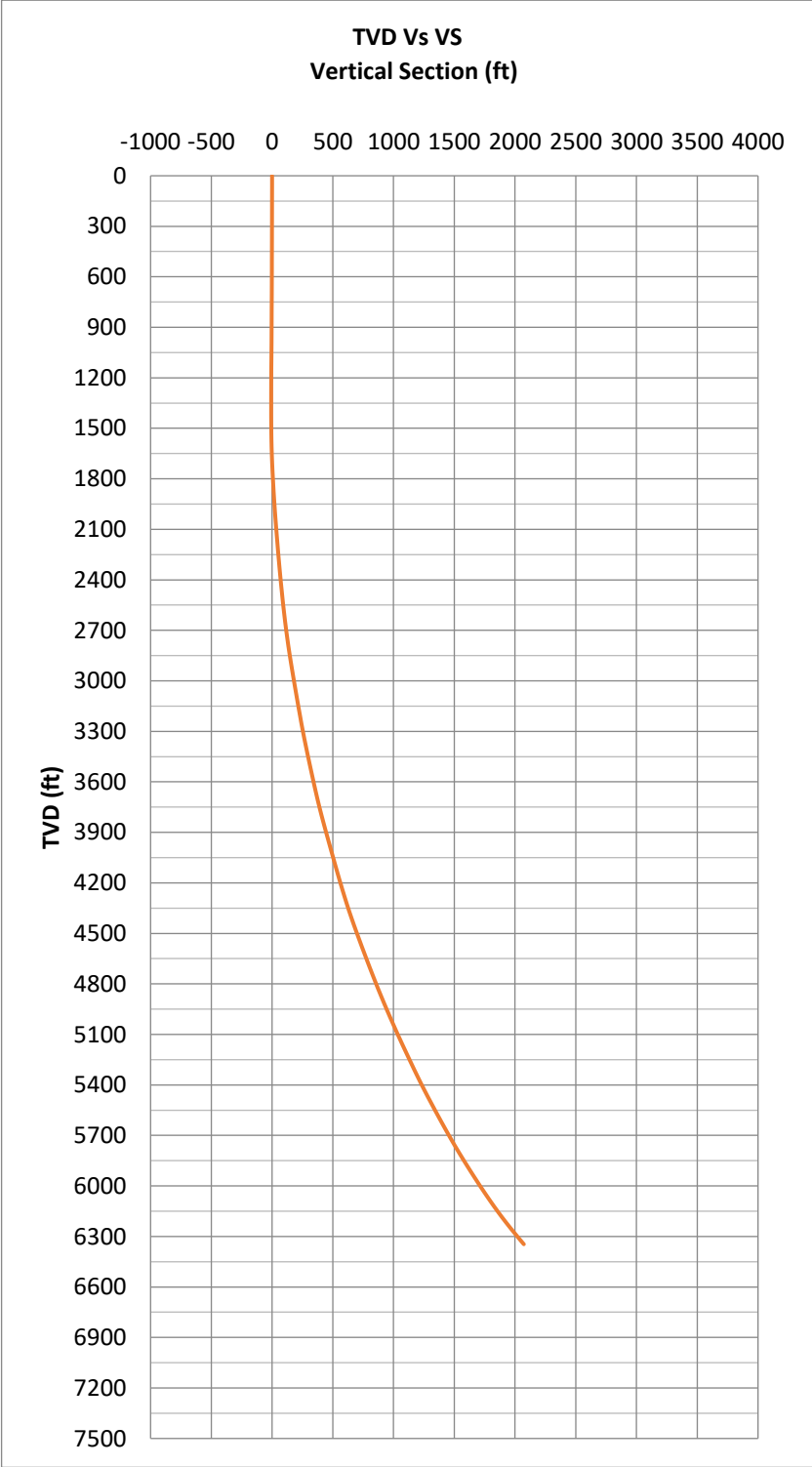


Fuente: ECOPEPETROL S. A. Reporte final de la sección 12 ¼" CA322.

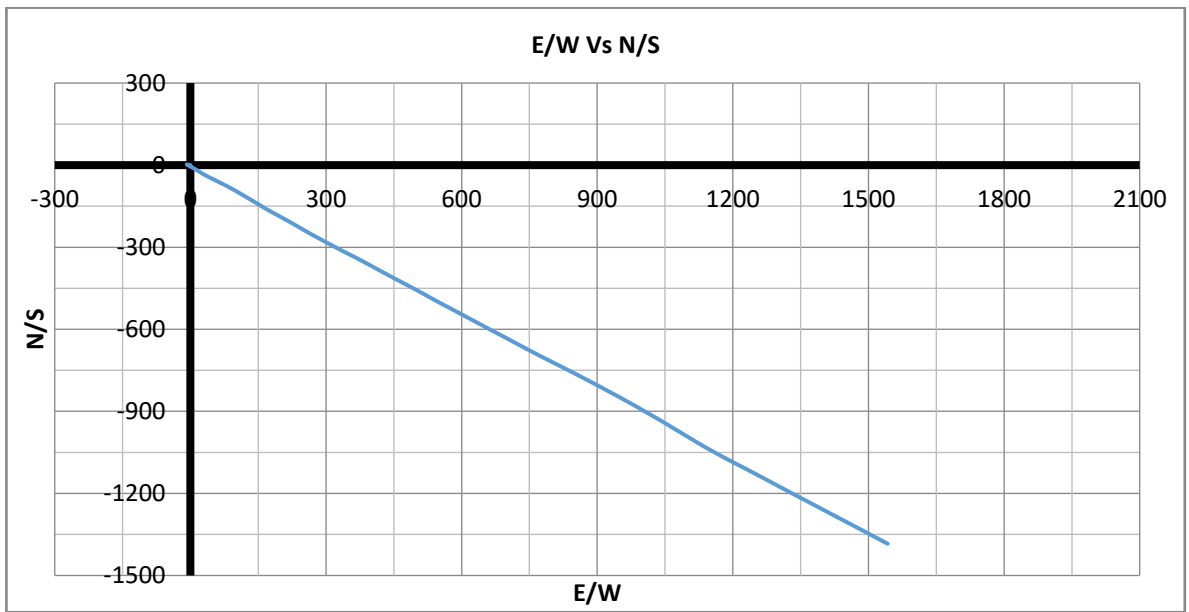


Fuente: ECOPETROL S. A. Reporte final de la sección 12 ¼" CA322.

**ANEXO B
PERFIL DIRECCIONAL POZO CA342.**

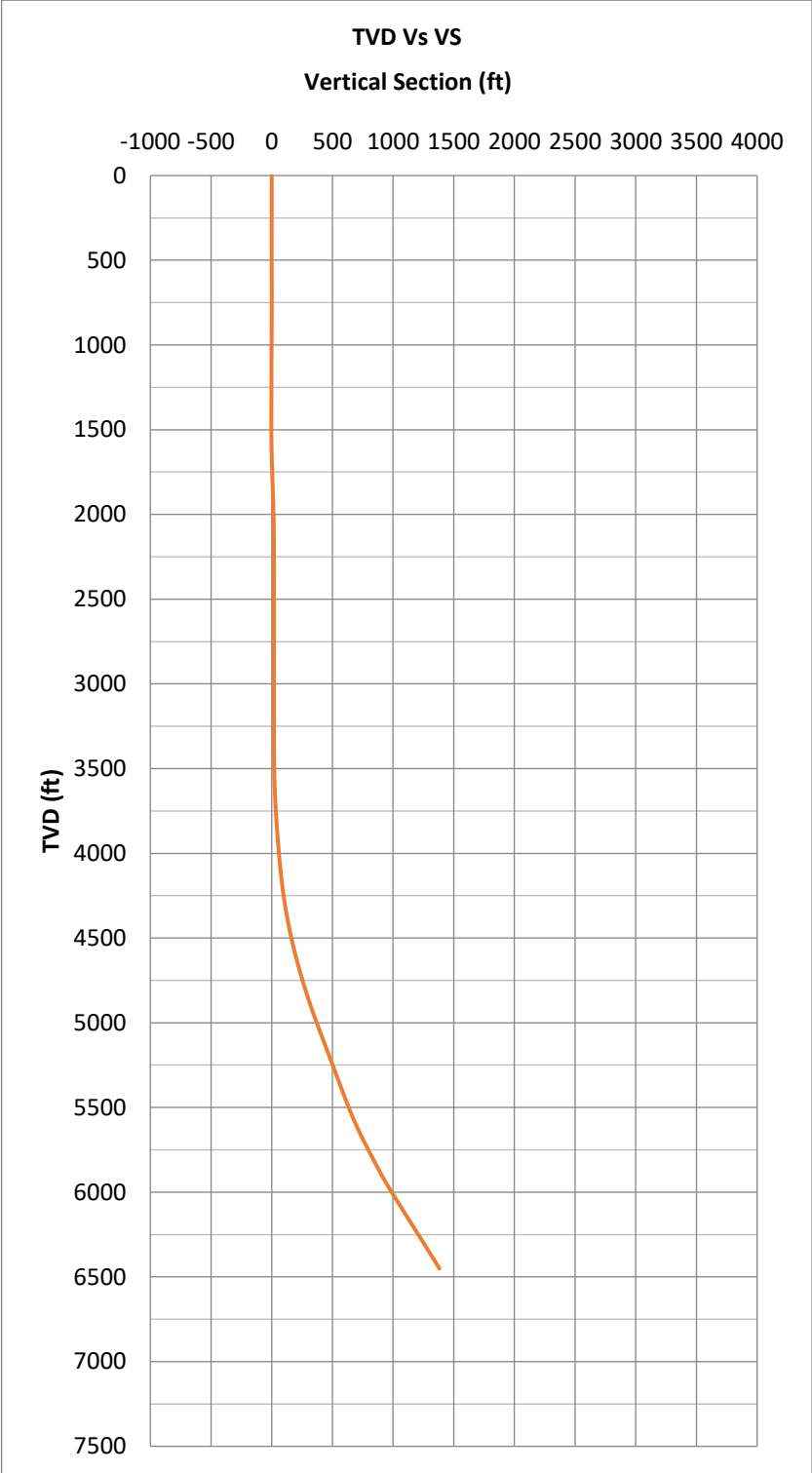


Fuente: ECOPETROL S. A. Reporte final de la sección 12 ¼" CA342.

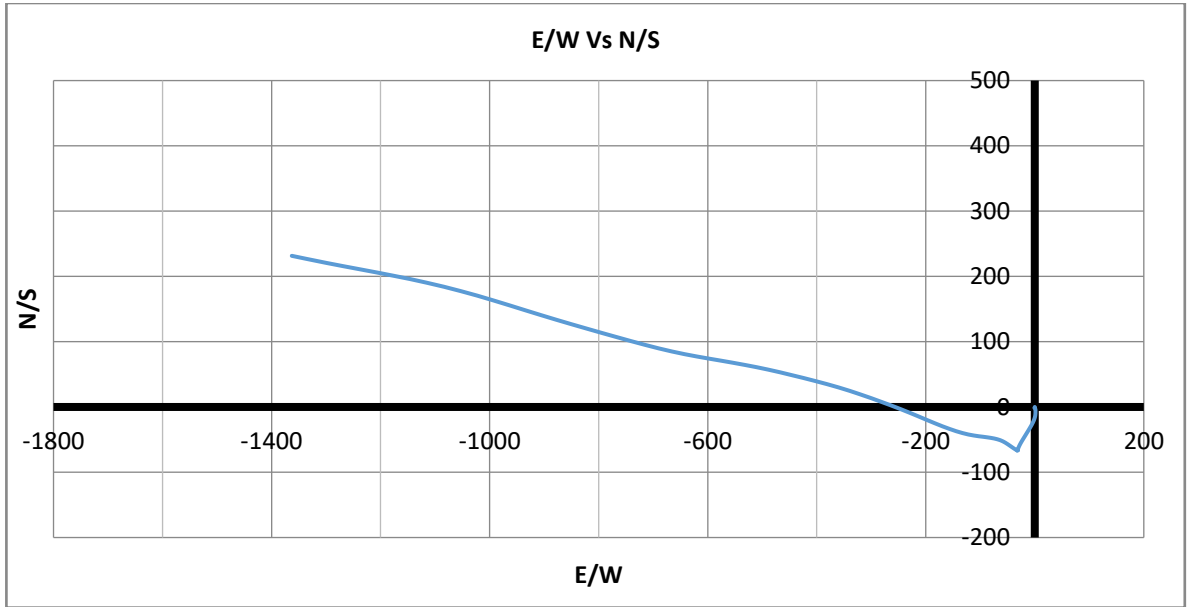


Fuente: ECOPETROL S. A. Reporte final de la sección 12 ¼" CA342.

**ANEXO C
PERFIL DIRECCIONAL POZO CA361.**

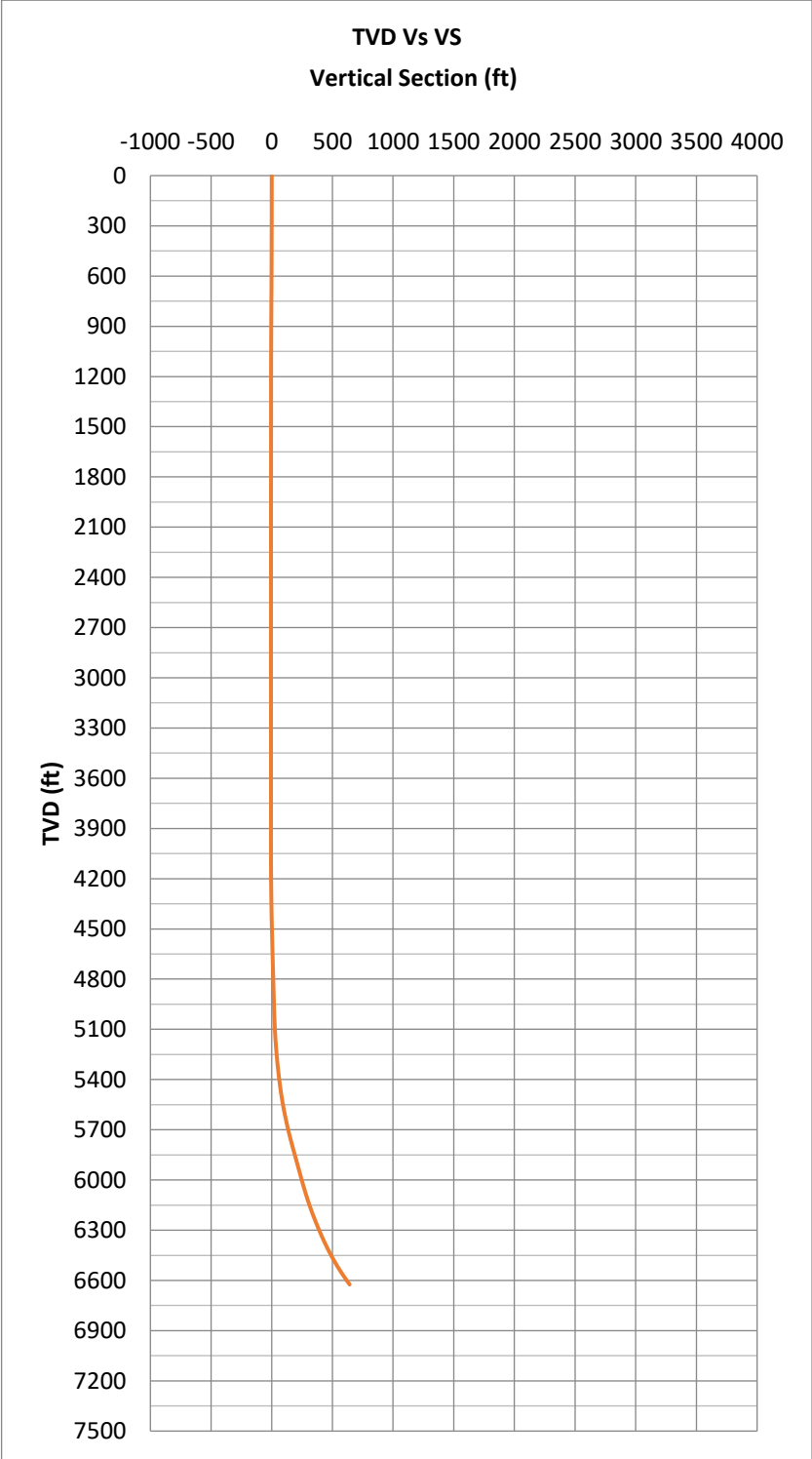


Fuente: ECOPEPETROL S. A. Reporte final de la sección 12 ¼" CA361.

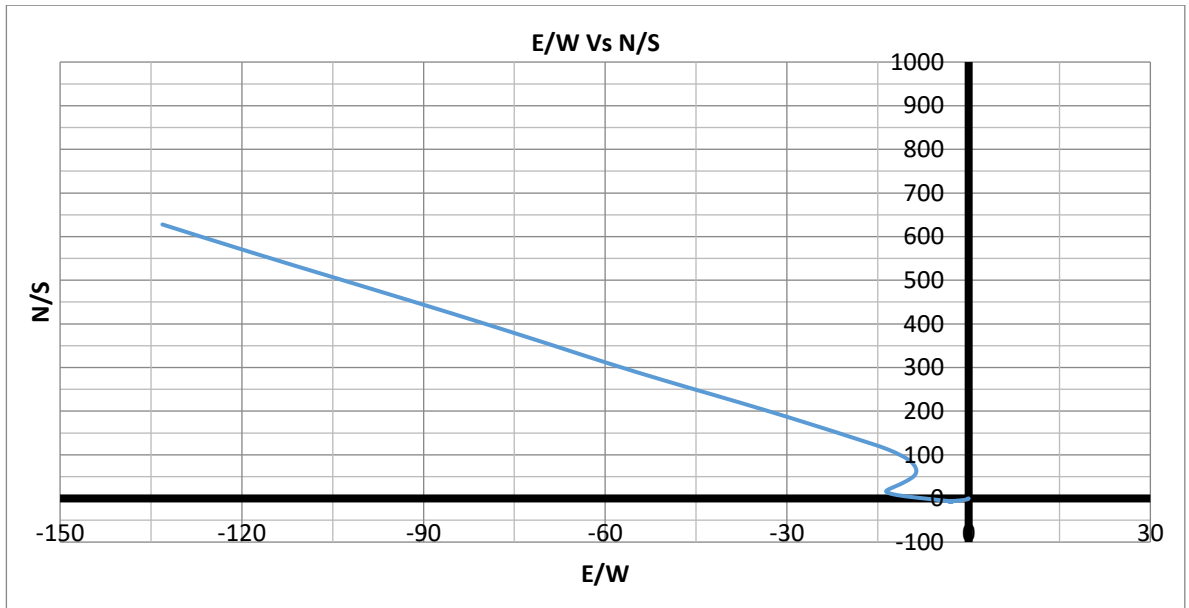


Fuente: ECOPEPETROL S. A. Reporte final de la sección 12 ¼" CA361.

**ANEXO D
PERFIL DIRECCIONAL POZO CA236.**

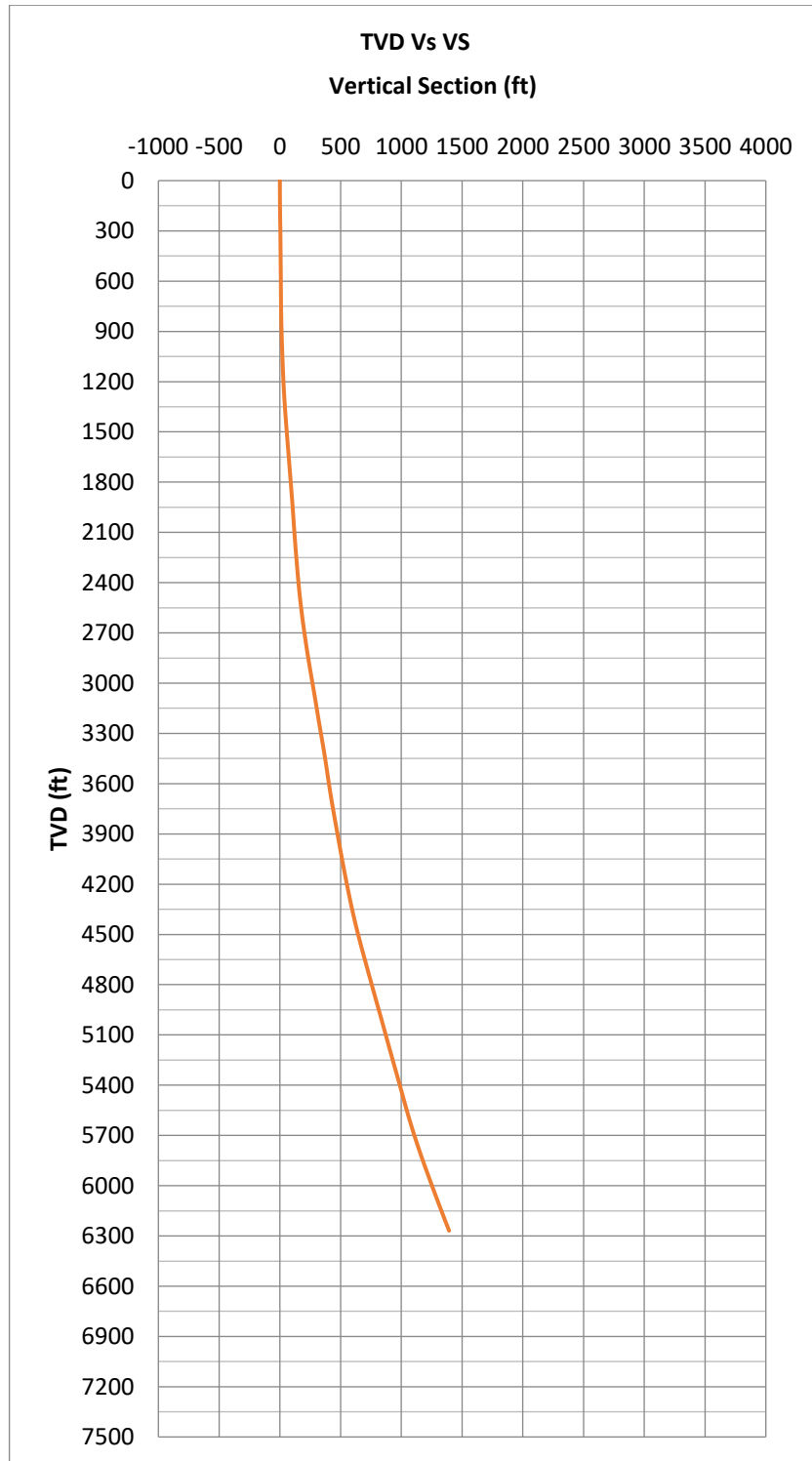


Fuente: ECOPETROL S. A. Reporte final de la sección 12 ¼" CA236.

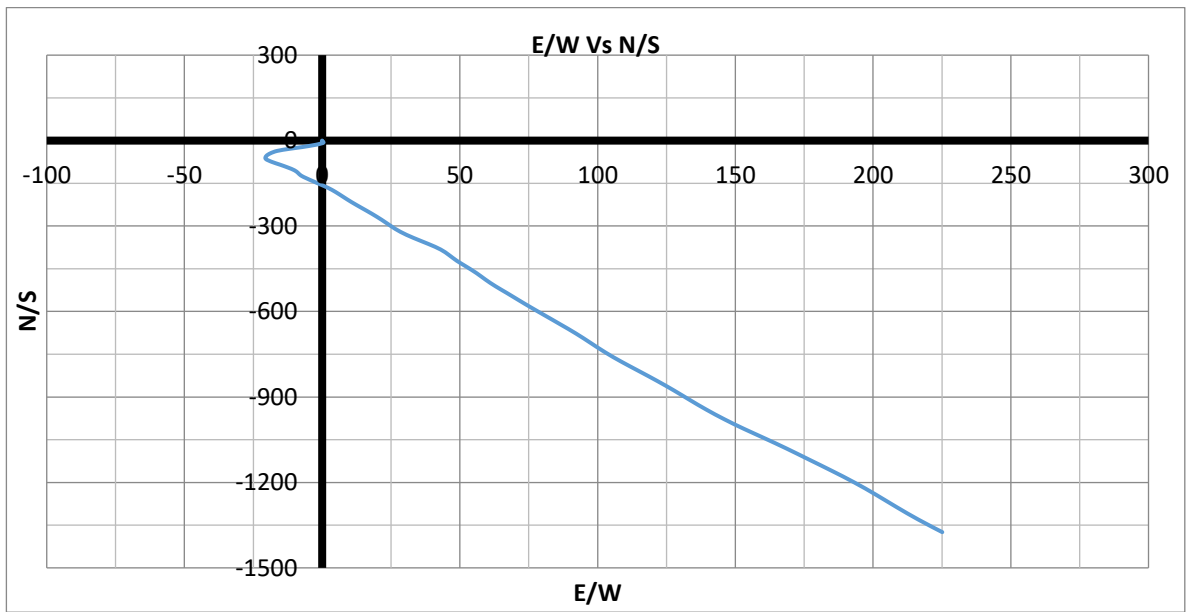


Fuente: ECOPETROL S. A. Reporte final de la sección 12 ¼" CA236.

ANEXO E PERFIL DIRECCIONAL POZO CA471.

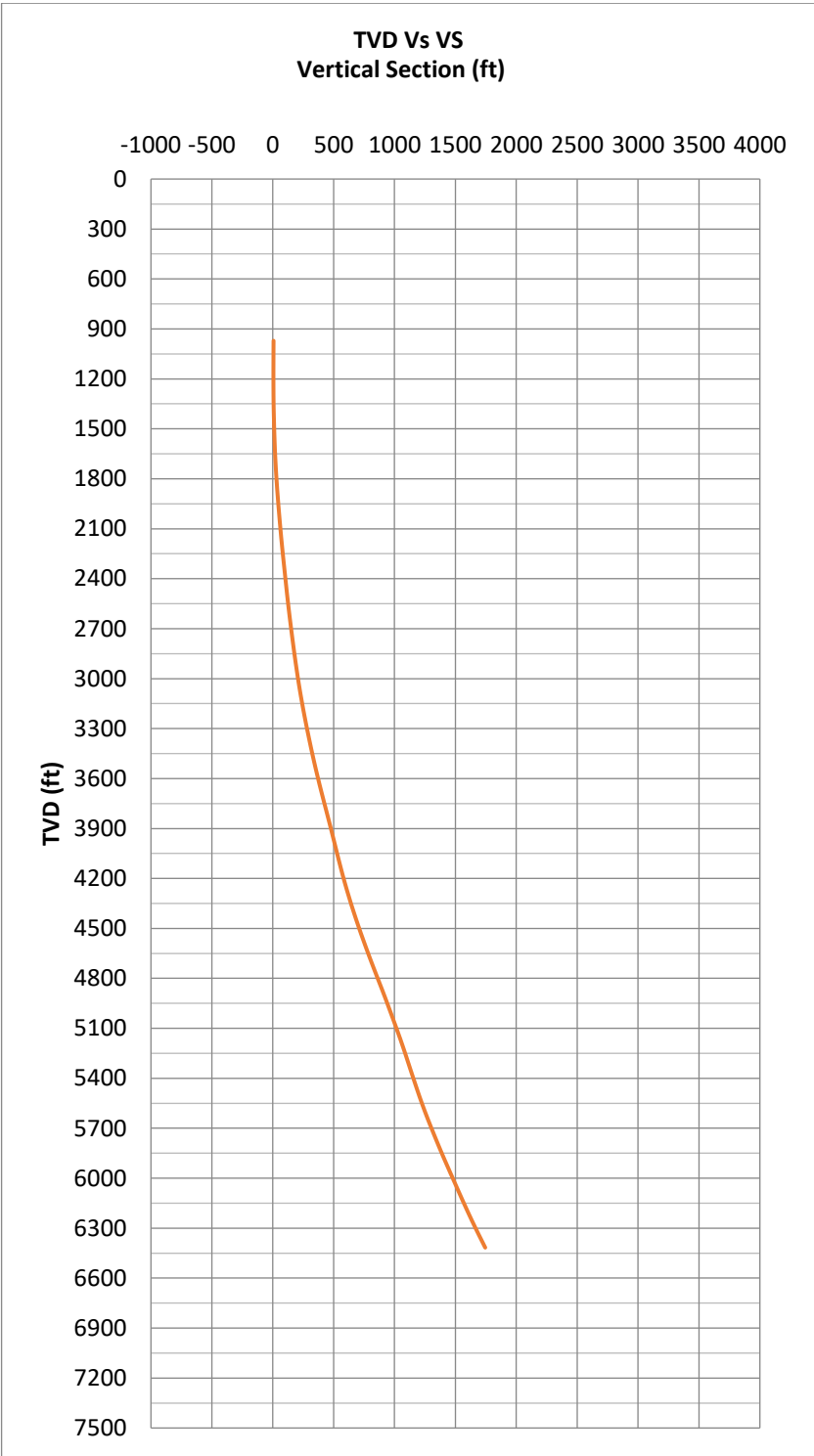


Fuente: ECOPETROL S. A. Reporte final de la sección 12 ¼" CA471.

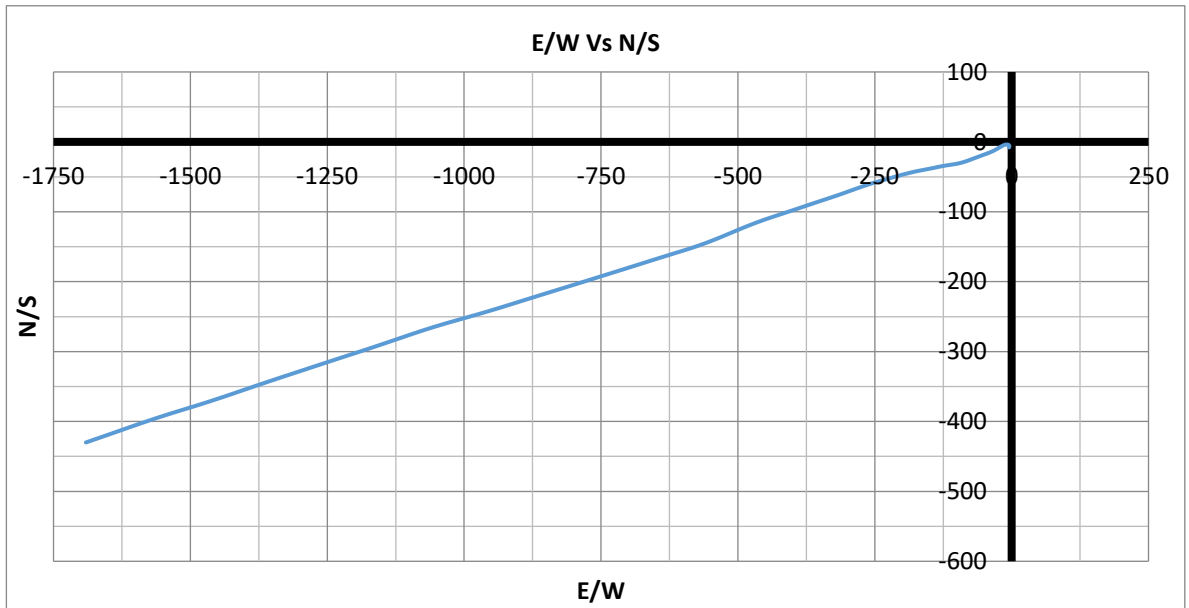


Fuente: ECOPETROL S. A. Reporte final de la sección 12 ¼" CA471.

**ANEXO F
PERFIL DIRECCIONAL POZO CA217.**

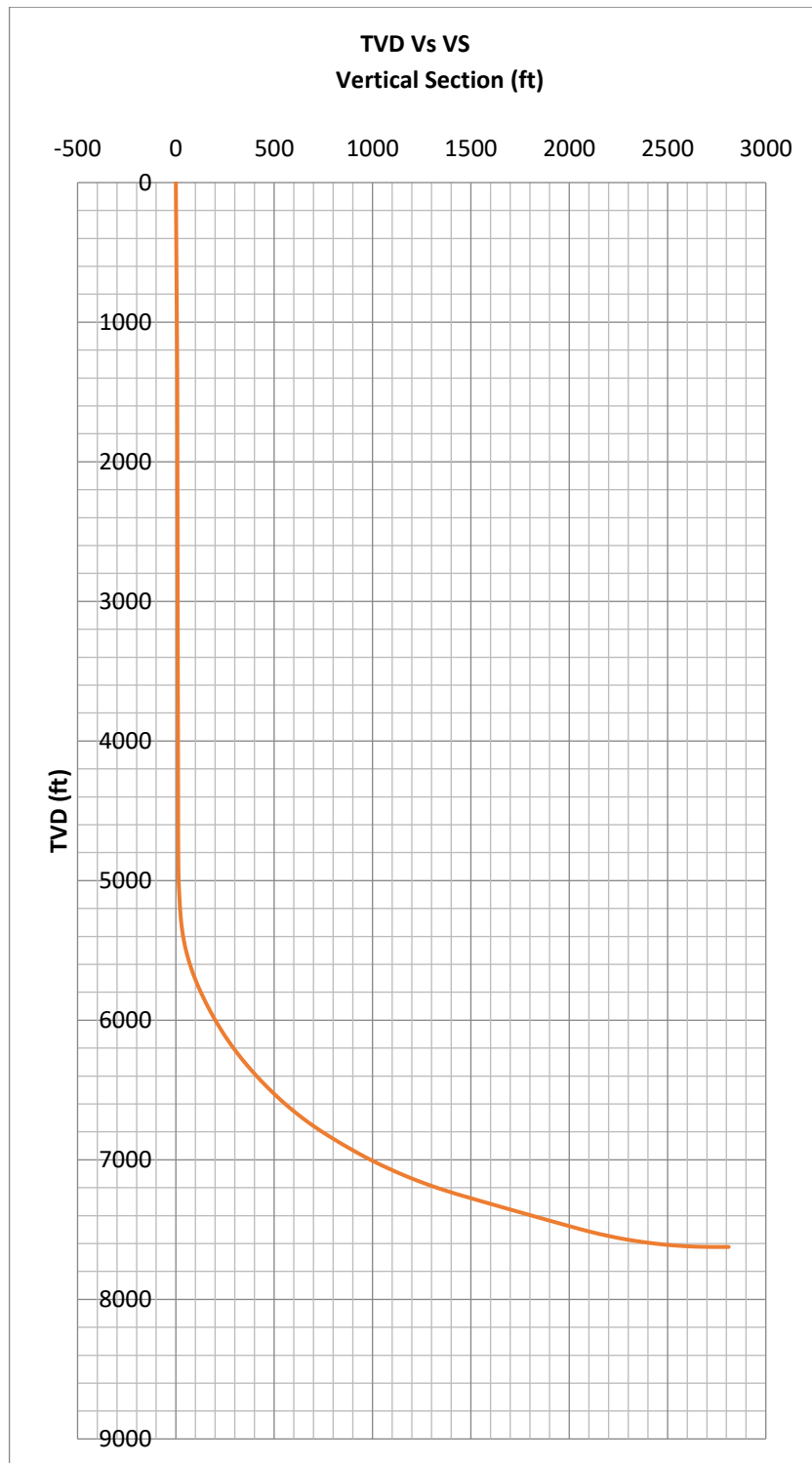


Fuente: ECOPETROL S. A. Reporte final de la sección 12 ¼" CA217.

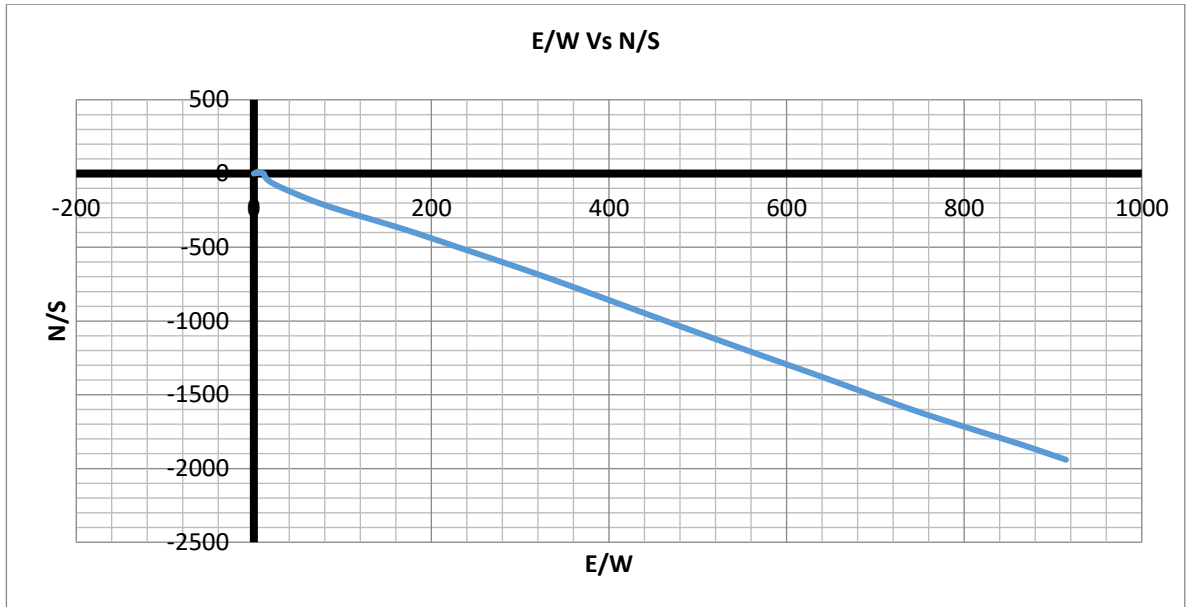


Fuente: ECOPETROL S. A. Reporte final de la sección 12 ¼" CA217.


ANEXO G PERFIL DIRECCIONAL POZO CA316.



Fuente: ECOPETROL S. A. Reporte final de la sección 12 ¼" CA316.



Fuente: ECOPEPETROL S. A. Reporte final de la sección 12 ¼" CA316.

	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016


AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL LUMIERES




Nosotros Juan David Serrato Serrato y John Alexander Suarez Monroy en calidad de titulares de la obra “Evaluación técnico-financiera de la implementación de brocas policristalinas de calibres extendidos con motores de fondo y herramientas rotatorias en la sección 12 ¼" del Campo Castilla”, elaborada en el año 2016, autorizamos al Sistema de Bibliotecas de la Fundación Universidad América para que incluya una copia, indexe y divulgue en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres, la obra mencionada con el fin de facilitar los procesos de visibilidad e impacto de la misma, conforme a los derechos patrimoniales que nos corresponden y que incluyen: la reproducción, comunicación pública, distribución al público, transformación, en conformidad con la normatividad vigente sobre derechos de autor y derechos conexos (Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, entre otras).

Al respecto como Autores manifestamos conocer que:

- La autorización es de carácter no exclusiva y limitada, esto implica que la licencia tiene una vigencia, que no es perpetua y que el autor puede publicar o difundir su obra en cualquier otro medio, así como llevar a cabo cualquier tipo de acción sobre el documento.
- La autorización tendrá una vigencia de cinco años a partir del momento de la inclusión de la obra en el repositorio, prorrogable indefinidamente por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales del autor y podrá darse por terminada una vez el autor lo manifieste por escrito a la institución, con la salvedad de que la obra es difundida globalmente y cosechada por diferentes buscadores y/o repositorios en Internet, lo que no garantiza que la obra pueda ser retirada de manera inmediata de otros sistemas de información en los que se haya indexado, diferentes al Repositorio Digital Institucional – Lumieres de la Fundación Universidad América.
- La autorización de publicación comprende el formato original de la obra y todos los demás que se requiera, para su publicación en el repositorio. Igualmente, la autorización permite a la institución el cambio de soporte de la obra con fines de preservación (impreso, electrónico, digital, Internet, intranet, o cualquier otro formato conocido o por conocer).
- La autorización es gratuita y se renuncia a recibir cualquier remuneración por los usos de la obra, de acuerdo con la licencia establecida en esta autorización.
- Al firmar esta autorización, se manifiesta que la obra es original y no existe en ella ninguna violación a los derechos de autor de terceros. En caso de que el trabajo haya sido financiado por terceros, el o los autores asumen la responsabilidad del cumplimiento de los acuerdos establecidos sobre los derechos patrimoniales de la obra.
- Frente a cualquier reclamación por terceros, el o los autores serán los responsables. En ningún caso la responsabilidad será asumida por la Fundación Universidad de América.
- Con la autorización, la Universidad puede difundir la obra en índices, buscadores y otros sistemas de información que favorezcan su visibilidad.

Conforme a las condiciones anteriormente expuestas, como autores establecemos las siguientes condiciones de uso de mí (nuestra) obra de acuerdo con la *licencia Creative Commons* que se señala a continuación:

	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016

	Atribución- no comercial- sin derivar: permite distribuir, sin fines comerciales, sin obras derivadas, con reconocimiento del autor.	
	Atribución – no comercial: permite distribuir, crear obras derivadas, sin fines comerciales con reconocimiento del autor.	✗
	Atribución – no comercial – compartir igual: permite distribuir, modificar, crear obras derivadas, sin fines económicos, siempre y cuando las obras derivadas estén licenciadas de la misma forma.	

Licencias completas: http://co.creativecommons.org/?page_id=13

Siempre y cuando se haga alusión de alguna parte o nota del trabajo, se debe tener en cuenta la correspondiente citación bibliográfica para darle crédito al trabajo y a sus autores.

De igual forma como autores autorizamos la consulta de los medios físicos del presente trabajo de grado así:

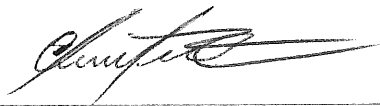
AUTORIZAMOS	SI	NO
La consulta física (sólo en las instalaciones de la Biblioteca) del CD-ROM y/o Impreso	✗	
La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer para efectos de preservación	✗	

Información Confidencial: este Trabajo de Grado contiene información privilegiada, estratégica o secreta o se ha pedido su confidencialidad por parte del tercero, sobre quien se desarrolló la investigación. En caso afirmativo expresamente indicaremos, en carta adjunta, tal situación con el fin de que se respete la restricción de acceso.	SI	NO
		✗

Para constancia se firma el presente documento en Bogotá, a los 13 días del mes de Marzo del año 2017.

LOS AUTORES:

Autor 1

Nombres	Apellidos
Juan David	Serrato Serrato
Documento de identificación No	Firma
1010216885	

Autor 2

Nombres	Apellidos
John Alexander	Suarez Monroy
Documento de identificación No	Firma
1023935685	