

01153



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**PROYECTO TERMINAL**

**"OPTIMIZACIÓN DE TRAYECTORIAS DIRECCIONALES  
USANDO BARRENAS BICÉNTRICAS EN POZOS  
ESBELTOS DEL PROYECTO DELTA DEL GRIJALVA"**

**QUE PARA OBTENER EL DIPLOMA DE  
ESPECIALISTA EN PERFORACIÓN DE POZOS  
PETROLEROS**

**PRESENTA:**

**ING. LUIS HERIBERTO CANO SILVA**

**DIRECTOR DE PROYECTO :**

**M.I. HÉCTOR AGUSTÍN MANDUJANO SANTIAGO**

**NOVIEMBRE DE 2005**



m339810



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico o impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: LOIS HERIBERTO CANO SILVA

FECHA: 26 NOVIEMBRE 2004

FIRMA: PA

*Beatriz A. Mayo T.*  
BEATRIZ A. MAYO T.

## CONTENIDO

|                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introducción .....                                                                                                                                   | 1  |
| 1. Conceptos básicos .....                                                                                                                           | 3  |
| 1.1. Barrenas bicéntricas .....                                                                                                                      | 4  |
| 1.2. Trayectorias típicas de pozos direccionales .....                                                                                               | 14 |
| 1.3. Motores de fondo .....                                                                                                                          | 17 |
| 2. Análisis del desempeño de la perforación direccional con<br>barrenas bicéntricas 10 5/8" x 12 1/4" .....                                          | 29 |
| 2.1. Pozos esbeltos .....                                                                                                                            | 30 |
| 2.2. Perforación direccional en la tercera etapa de los pozos<br>esbeltos .....                                                                      | 33 |
| 2.3. Desempeño de los ensambles de fondo (BHA) .....                                                                                                 | 41 |
| 3. Evaluación del desempeño de la perforación direccional de la<br>tercera etapa de pozos esbeltos con barrenas bicéntricas<br>10 5/8"x12 1/4" ..... | 83 |
| 3.1. Evaluación de los motores de fondo .....                                                                                                        | 84 |
| 3.2. Evaluación de las barrenas PDC bicéntricas<br>10 5/8" x 12 1/4" .....                                                                           | 85 |
| 3.3. Evaluación de los BHA con motor de fondo y<br>barrena PDC bicéntrica 10 5/8" x 12 1/4" .....                                                    | 87 |
| 4. Optimización. Sistema de Perforación Direccional Rotatorio .....                                                                                  | 92 |
| 4.1. Descripción general .....                                                                                                                       | 93 |
| 4.2. Vista general del sistema .....                                                                                                                 | 94 |
| 4.3. El estabilizador direccionable rotante .....                                                                                                    | 95 |
| 4.4. Consideraciones operacionales .....                                                                                                             | 99 |

|                          |                                                                   |     |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.5                      | Configuración del estabilizador direccionable no rotante .....    | 100 |
| 4.6                      | Selección de barrena .....                                        | 100 |
| 4.7                      | Fluidos de perforación y temperatura .....                        | 101 |
| 4.8                      | Beneficios del sistema de perforación direccional rotatorio ..... | 101 |
| 4.9                      | Análisis costo beneficio .....                                    | 102 |
| Conclusiones .....       |                                                                   | 104 |
| Bibliografía .....       |                                                                   | 108 |
| Índice de Gráficas ..... |                                                                   | 110 |
| Índice de Tablas .....   |                                                                   | 112 |
| Índice de Figuras .....  |                                                                   | 113 |

## INTRODUCCIÓN

La perforación direccional con barrenas bicéntricas 10 5/8" x 12 1/4" es una actividad que se lleva a cabo durante la perforación de la tercera etapa de los pozos esbeltos del Proyecto Delta del Grijalva, en ocasiones, es planeada antes de perforar la etapa en pozos clasificados desde su inicio como direccionales y en otros casos, como una medida de contingencia, en pozos verticales para lograr llegar al objetivo.

La tecnología hasta hora empleada en el desarrollo de la perforación direccional de la tercera etapa de los campos del Proyecto Delta del Grijalva, es la de los ensambles de fondo con motor de fondo. En algunos casos se han empleado los ensambles de fondo orientados; sin embargo, debido a la configuración geométrica del pozo, el agujero ampliado que se perfora de 7 5/8" a 12 1/4", limita a los aparejos de fondo para que cumplan con los principios de estabilización, debido a que no es posible que el aparejo de fondo lleve estabilizadores de diámetro al calibre del agujero ampliado de 12 1/4". A pesar de esto, los trabajos de construcción de trayectorias direccionales han logrado que se cumpla con el proyecto direccional, pero de forma no óptima debido a los problemas de altos tiempos de perforación en el modo de "deslizado", al elevado número de metros deslizados y al tiempo limitado de vida de los motores, lo cual origina más de 3 viajes para perforar la etapa.

El presente trabajo sustenta la tesis de que el mejor método de perforar es el rotado, por lo que se analiza y evalúa el desempeño de los motores de fondo, las barrenas bicéntricas, el desempeño de ambos en conjunto y, como parte fundamental, los aparejos de fondo direccionales durante la construcción de ángulo y rumbo, mostrando los factores de retraso con este sistema. También propone una nueva tecnología, factible de emplearse en la perforación direccional de la tercera etapa: el Sistema de Perforación Direccional Rotatorio, mediante el cual es posible la estabilización de los aparejos de fondo a través de una camisa estabilizadora direccional no rotante, esta permite un control direccional con la sarta constantemente rotando, eliminando el modo de "deslizado" y, con esto, optimizando el desempeño en la construcción de las trayectorias y, consecuentemente, los tiempos y costos de perforación de la tercera etapa.

1  
CONCEPTOS BÁSICOS

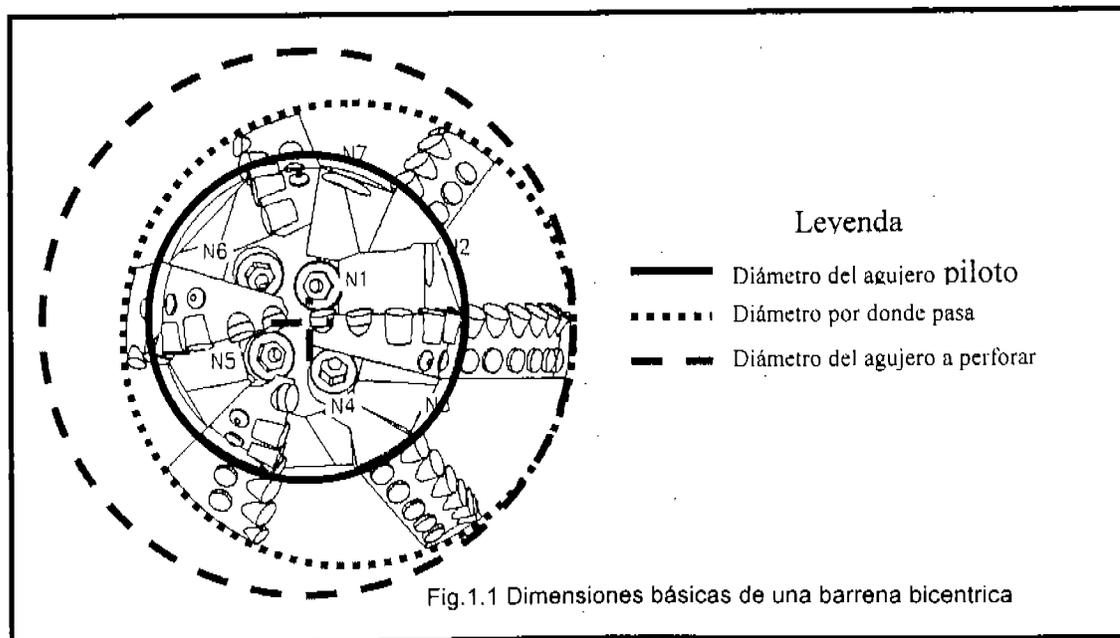
## 1.1 BARRENAS BICÉNTRICAS

Las barrenas bicéntricas han sido utilizadas en operaciones de perforación de pozos por muchos años. Originalmente se usaron para producir un agujero ligeramente mayor al diámetro de la barrena, con el único objetivo de evitar atascamientos de la barrena durante la perforación. Actualmente se usan con varios objetivos: para incrementar el volumen anular de cemento alrededor de tuberías de revestimiento, para solventar restricciones de tuberías de revestimiento, para ampliar en la zona productora de pozos a ser terminados con empaque de grava a agujero descubierto; para perforar formaciones con tendencia a hidratarse o derrumbarse, para perforar en forma direccional, e, incluso, para perforar los accesorios de una tubería de revestimiento anterior.

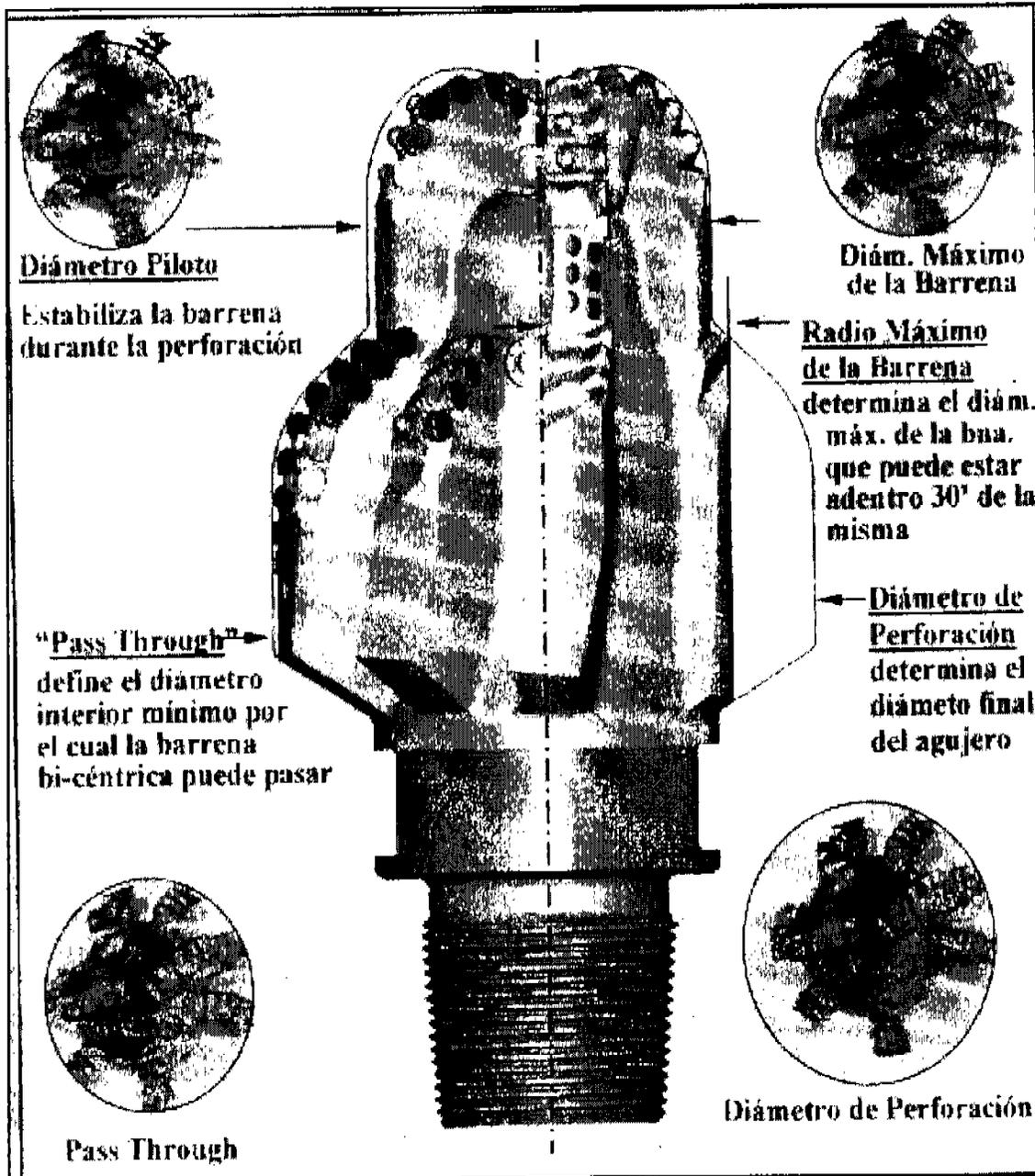
### 1.1.1 Consideraciones de diseño

#### 1.1.1.1 Dimensiones básicas de una barrena bicéntrica

Una barrena bicéntrica presenta tres diámetros importantes (ver figura 1.1 y 1.2). Estos son:



- Diámetro del agujero piloto: Es la sección guía que sirve de punto de apoyo o pivote a la barrena para que el ampliador excéntrico, al girar, pueda generar un agujero más grande que el agujero por donde pasa la barrena.
- Diámetro del agujero por donde la barrena puede pasar.
- Diámetro del agujero que la barrena genera u agujero a perforar.



• Fig. 1.2 Configuración de una barrena bicéntrica

1.1.1.2 *Cálculo del tamaño máximo de la sección piloto partiendo del tamaño del agujero a generar y el diámetro por donde pasa la barrena*

Se muestra a continuación la secuencia básica de pasos seguidos para realizar este cálculo (ver figuras 1.3a, 1.3b, 1.3c y 1.3d).

- a. Comenzar dibujando el diámetro del agujero que la barrena genera u agujero a perforar
- b. Dibujar el diámetro por donde pasa la barrena y moverlo al borde del diámetro del agujero a perforar
- c. El máximo radio del agujero piloto es la distancia entre el centro del agujero a perforar y el borde del diámetro del círculo por donde pasa la barrena en el lado opuesto a donde toca el agujero.
- d. Dibujar el diámetro del agujero piloto con el radio calculado y el mismo centro del agujero a perforar.

Estos cálculos muestran el tamaño máximo del agujero piloto. Sin embargo, todas las barrenas se diseñan con un agujero piloto menor, a fin de reducir el momento de flexión a lo largo de la barrena. Así, ciertos cortadores adicionales se pueden ubicar en el lado opuesto al punto de empuje máximo del ampliador, lo que genera un momento de flexión opuesto y ayuda en gran manera a estabilizar la barrena.

Por otra parte, para este tipo de barrenas se usan cortadores PDC más pequeños y con un ángulo de inclinación mayor en la sección del ampliador, a fin de minimizar el esfuerzo torsional creado durante la operación de perforación.

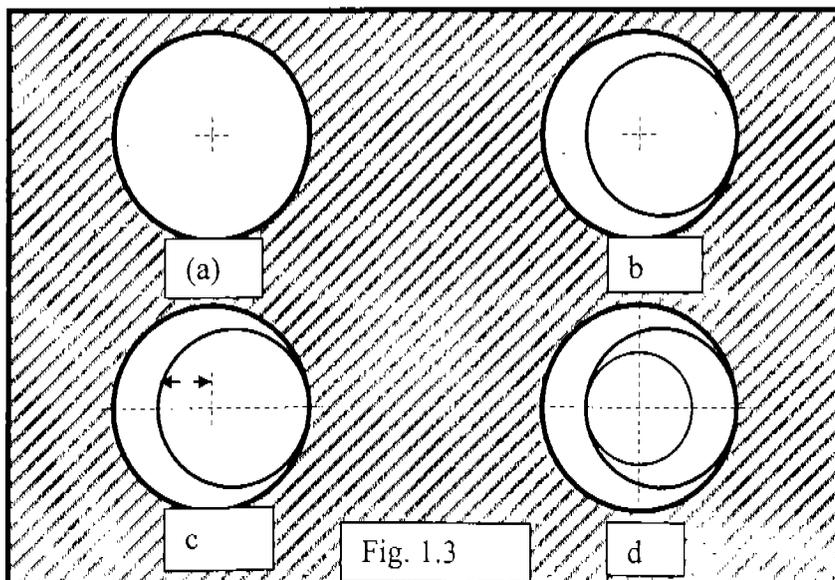


Fig. 1.3

### 1.1.1.3 Relación matemática entre los diferentes diámetros de una barrena bicéntrica

La figura 1.4 muestra la relación matemática entre los diferentes diámetros asociados a las barrenas bicéntricas.

Así, si definimos:

Radio del agujero piloto:  $r$

Radio del agujero por donde pasa la barrena:  $R$

Excentricidad entre diámetros:  $D$

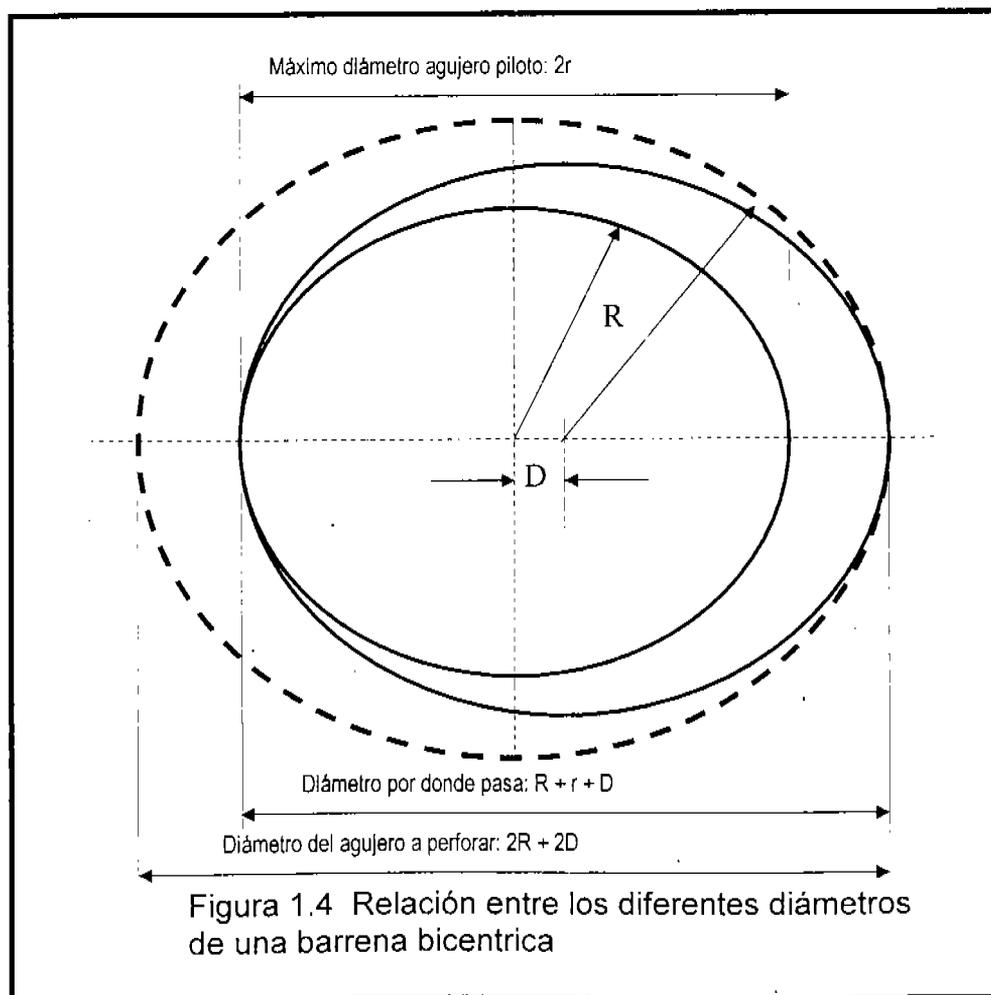
Se tendrá:

Excentricidad:  $D = R - r$

Diámetro del agujero piloto:  $2r$

Diámetro del agujero por donde pasa la barrena:  $2R$  o  $R+r+D$

Diámetro del agujero a perforar:  $2R + 2D$



La diferencia entre el agujero por donde pasa la barrena y el agujero a perforar (2 veces la excentricidad) indica el grado de exposición del ampliador y está limitado por la resistencia del material con el cual se fabrica el cuerpo de la barrena.

#### *1.1.1.4 Consideraciones Operacionales*

Las aplicaciones de barrenas de PDC convencionales y bicéntricas son parecidas, y en términos generales los procedimientos de perforación son básicamente iguales. Muchas de las prácticas y de los procedimientos comunes de campo se aplican por igual a ambas; sin embargo las barrenas bicéntricas tienen algunas diferencias importantes que se deben tomar en cuenta.

#### **1.1.2 Planificación del pozo**

Es importante que bajo la zapata de la tubería revestidora previa haya suficiente espacio (hueco de rata) para que la barrena pueda seguir perforando. Normalmente 1.5 m es suficiente. En el caso de las barrenas de nueva tecnología esto que rebajan accesorios de tubería de revestimiento esto ya no es necesario.

Escariado, Ensanchado o Ampliación. El diseño de las barrenas bicéntricas es tal que no les permite ampliar intervalos previamente perforados.

Ensamblaje de fondo: En perforación de pozos verticales se recomienda usar motor de fondo de desplazamiento positivo de alta torsión y baja velocidad. El uso de un mecanismo impulsor cerca de la barrena reduce las vibraciones laterales ("bamboleo") de la sarta inestabilizada y cualquier desviación que ocurra se puede controlar más rápidamente.

Estabilizadores: Con las barrenas bicéntricas no es posible usar estabilizadores del pleno calibre del agujero a generar, ya que no pasarían por el revestimiento previo. Aun más, la sección escariadora de la barrena restringe más el tamaño del estabilizador a usar.

El máximo diámetro de estabilizador que se puede usar es:

**Diámetro por donde pasa – (Diámetro a perforar – Diámetro por donde pasa)**

Ejemplo: Para una barrena bicéntrica de 6" x 7" el diámetro del máximo estabilizador que se puede usar es:

$$6 - (7 - 6) = 5 \text{ pulgadas.}$$

Sin embargo, la flexibilidad del conjunto de fondo permite usar estabilizadores del diámetro del agujero por donde pasa distantes de la barrena. Para este ejemplo, a partir de 9 m se puede usar estabilizadores de 6 pulgadas. En la tabla anexa se muestran los máximos diámetros de estabilizadores que se pueden utilizar con las diferentes barrenas bicéntricas.

**Tabla 1: Máximo estabilizador que se puede colocar sobre una barrena bicéntrica**

| Diámetro por donde pasa la barrena | Diámetro que perfora la barrena | Máximo diámetro de Herramienta directamente sobre la barrena |
|------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 4 1/2                              | 5 3/4                           | 3 1/4                                                        |
| 4 3/4                              | 6                               | 3 1/2                                                        |
| 5 1/2                              | 6 1/4                           | 4 3/4                                                        |
| 5 3/4                              | 6 3/4                           | 4 3/4                                                        |
| 6                                  | 7                               | 5                                                            |
| 6 1/4                              | 7 1/4                           | 5 1/4                                                        |
| 6 1/2                              | 7 1/2                           | 5 1/2                                                        |
| 8 1/2                              | 9 7/8                           | 7 1/8                                                        |
| 10 3/8                             | 11 5/8                          | 9 1/8                                                        |
| 10 5/8                             | 12 1/4                          | 9                                                            |
| 12 1/4                             | 13 1/2                          | 11                                                           |
| 12 1/4                             | 14 3/4                          | 9 3/4                                                        |
| 14 3/4                             | 17 1/2                          | 12                                                           |

### *1.1.2.1 En el equipo de perforación*

Cómo preparar las barrenas bicéntrica. Al levantar una barrena bicéntrica se deben tomar las precauciones normales recomendadas para barrenas de PDC convencionales, a fin de evitar que los cortadores sufran impactos y posibles daños. Las barrenas bicéntricas tienen conexiones estándar API tipo "pin" y se deben apretar aplicando el torque de apriete que se especifica para ese tipo de conexiones, el cual es igual que el de las barrenas PDC convencionales.

Las barrenas bicéntricas no deben tratar de girarse dentro de la sarta revestidora y si se usan con motor de fondo, tal precaución comprende eliminar la circulación del lodo con la barrena dentro de las tuberías de revestimiento. Si la barrena gira, la sección ampliadora se apoya contra la tubería de acero y se impactan severamente los cortadores, astillándose éstos y produciendo severos daños a la tubería de revestimiento. Esta recomendación esta quedando en desuso al incrementarse las aplicaciones de barrenas bicentricas capaces de rotar dentro de las tuberías de revestimiento.

Cómo tocar el fondo. Aunque el agujero sea de pleno diámetro hasta el fondo, el último tubo se debe introducir a baja velocidad (RPM) para minimizar posibilidades de embolamiento. Tocar suavemente el fondo del agujero para evitar la sobrecarga de los cortadores principales de la nariz de la sección piloto. Para localizar el fondo, observar las lecturas de los indicadores de peso y torque.

Preparativos para perforar. Después de tocar el fondo, levantar la barrena de 6 a 12 pulgadas y circule el lodo durante 5 a 10 minutos (o el tiempo requerido para acondicionarlo) mientras se rota lentamente. Si se usa motor de fondo, Utilizar un flujo reducido.

### 1.1.2.2 Perforando

Iniciando la perforación. Meter la barrena lentamente al fondo a bajo flujo. Apenas toque el fondo, aumente el flujo hasta su valor nominal. Para establecer el nuevo patrón del fondo, los primeros 1.5 m se deben perforar con bajo peso sobre la barrena.

Para establecer el nuevo patrón del fondo suelen bastar de 2 a 3 ton. En algunas formaciones blandas, la barrena penetra rápidamente, incluso con pesos de sólo 0.5 a 1 ton y el nuevo patrón del fondo se forma en unos pocos minutos.

Es muy importante tener paciencia, ya que inicialmente sólo unos pocos cortadores de la nariz hacen contacto con la formación. Por eso, las barrenas bicéntricas necesitan un poco más de tiempo que las barrenas de PDC convencionales para formar completamente el nuevo patrón del fondo. Si el peso se aumenta muy rápidamente, la barrena se puede sobrecargar y dañarse.

Peso sobre la barrena. Ya establecido el patrón del fondo, el peso sobre la barrena se puede aumentar para optimizar su rendimiento. Puesto que la velocidad de rotación depende de la potencia del motor y del régimen de flujo, para lograr máximo rendimiento se pueden variar el peso sobre la barrena y el régimen de flujo.

Debe recordarse que, por la naturaleza misma de las barrenas bicéntricas, es difícil lograr la plena estabilidad del ensamble de fondo, ya que no es posible usar estabilizadores de pleno calibre en la sección que se está perforando. Por eso, en perforación direccional las barrenas bicéntricas son más sensibles que las barrenas PDC convencionales a los cambios de peso. Se pueden presentar problemas con el ritmo de incremento de ángulo si se aplica demasiado peso al ensamble de fondo.

Un aumento excesivo del peso sobre la barrena incrementará exageradamente la tasa de construcción de ángulo, mientras que un aumento moderado del peso permitirá un mejor control de la misma tasa de construcción.

Sin embargo, si el peso es demasiado bajo, el ángulo del conjunto de fondo puede disminuir.

En pozos direccionales, las barrenas bicéntricas tienden a disminuir el ángulo (acercarse a la vertical) a causa de la fuerza de gravedad y la fuerza lateral de corte más alta de lo normal; otros factores que influyen son el tipo de formación, el ángulo de los echados y la habilidad del operador.

El uso de estabilizadores disminuye la flexión de los portabarrenas y la posición hacia arriba de la nariz de la barrena. En las secciones tangenciales debe usarse un conjunto que aumente ligeramente el ángulo para contrarrestar la tendencia de la barrena a disminuirlo, usando el peso sobre la barrena como medio para controlar la curvatura del conjunto y el ángulo de inclinación.

Torque. En el fondo del pozo, el torque (torsión rotatoria) indica el grado de eficiencia con que la barrena está penetrando y cuanta energía se está consumiendo para perforar (cizallar) la formación. Por eso, el torque sirve de guía para seleccionar el peso sobre la barrena más adecuado a fin de lograr máxima penetración. Las barrenas bicéntricas, sin embargo, pueden generar más torque a causa de su acción cortadora desbalanceada, la cual puede imponer límites al peso que se puede aplicar.

Ocasionalmente, en vez de permanecer constantes, la torsión y la velocidad rotatoria (RPM) varían. Esto se debe a que la sarta de perforación actúa como si fuera un largo resorte de torsión que responde al arrastre generado por la barrena de PDC. Esta se "aferra" a la formación y su velocidad de giro, así como la de la mesa rotatoria, disminuyen por un instante. El torque se incrementa también instantáneamente y eventualmente supera el torque creado por la barrena, liberándola de la formación. El ciclo se repite cuando la barrena vuelve a "aferrarse" a la formación. Dependiendo del diámetro, longitud y masa de la tubería de perforación y del ensamblaje de fondo, estas fluctuaciones o ciclos de torsión suelen durar de 2 a 8 segundos. Los ciclos son tolerables si no son muy pronunciados y si el régimen de penetración es bueno. Los ciclos de torsión se pueden aminorar disminuyendo el peso sobre la barrena o aumentando la

velocidad rotatoria. Los ciclos de fluctuación de la torsión suelen ser más evidentes en formaciones blandas, en las cuales los cortadores de PDC penetran más.

Conexiones. Las conexiones con barrenas bicéntricas siguen las mismas normas que las establecidas para barrenas de PCD convencionales. Estas pueden diferir ligeramente de compañía a compañía y de un área a otra, dependiendo de los problemas y condiciones específicos de las formaciones atravesadas.

## 1.2 TRAYECTORIAS TÍPICAS DE POZOS DIRECCIONALES

Cuando se planea utilizar la perforación direccional, se deberá seleccionar alguno de los patrones o configuraciones de trayectorias. La selección de la configuración dependerá principalmente de los siguientes factores: de las características de la estructura geológica, del espaciamiento entre pozos, de la profundidad vertical y del desplazamiento horizontal del objetivo. En general las trayectorias de los pozos direccionales pueden clasificarse en dos tipos "Slant" y tipo "S".

### 1.2.1 Tipo 1 ("Slant")

El KOP (punto de inicio de desviación) somero con dos secciones principales una de construcción de ángulo (L1) y otra de mantenimiento (L2).

El ritmo de construcción de la curva, la inclinación final y la longitud de la tangente establecen los requerimientos de rendimiento. El ritmo de construcción es normalmente baja.

Aunque la maniobrabilidad, el comportamiento de la barrena y el ritmo de penetración efectivo son importantes en este perfil, el requerimiento dominante es la respuesta direccional (ver fig 1.2.1)

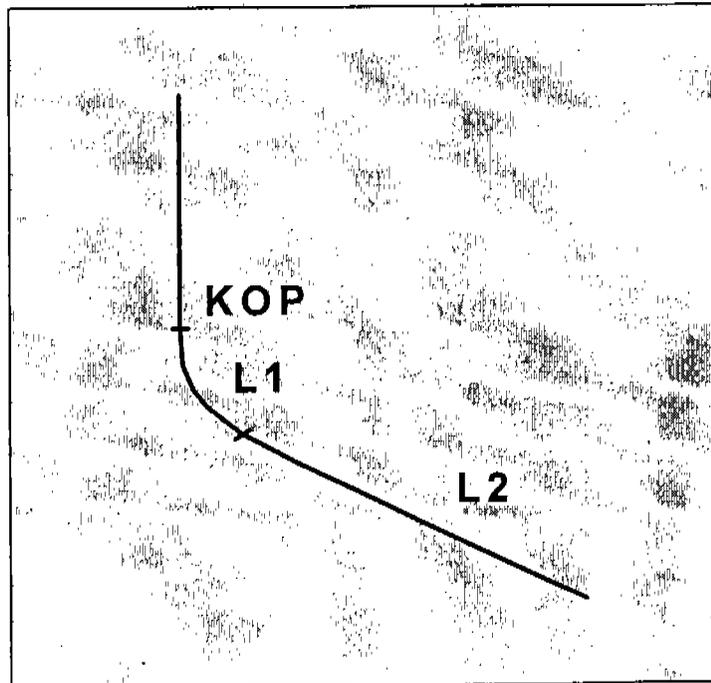


Fig. 1.2.1 Perfil de un pozo direccional

### 1.2.2 Tipo 2 ("Slant")

El KOP es profundo con una sección de construcción de ángulo (L1).

El KOP, el ritmo de construcción de la curva y la inclinación final establecen los requerimientos de rendimiento de este perfil. El ritmo de construcción en este perfil es alta.

Aunque el comportamiento de la barrena y el ritmo de penetración efectivo son importantes en este perfil, la maniobrabilidad direccional es la característica dominante (ver fig 1.2.2).

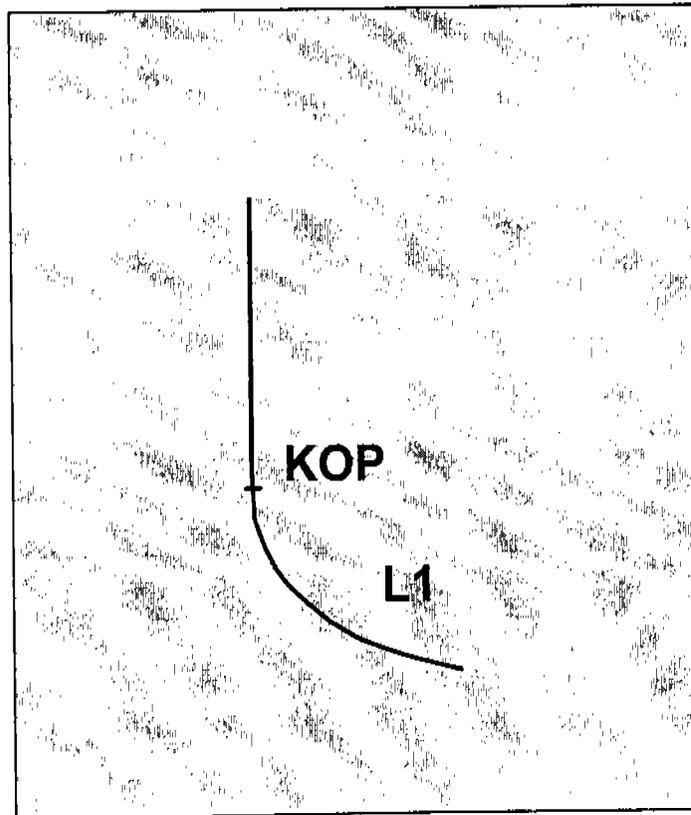


Fig. 1.2.2 Perfil de un pozo direccional tipo Slant

### 1.2.3 Tipo 3 ("S")

Se puede describir como repeticiones del perfil Tipo 1. Tiene cuatro secciones, cada una con requerimientos específicos.

Los KOP, profundidad, ritmo de construcción de la curva y la inclinación final afectan el rendimiento de este perfil.

Aunque la respuesta direccional es importante, la maniobrabilidad es la característica dominante (ver fig 1.2.3).

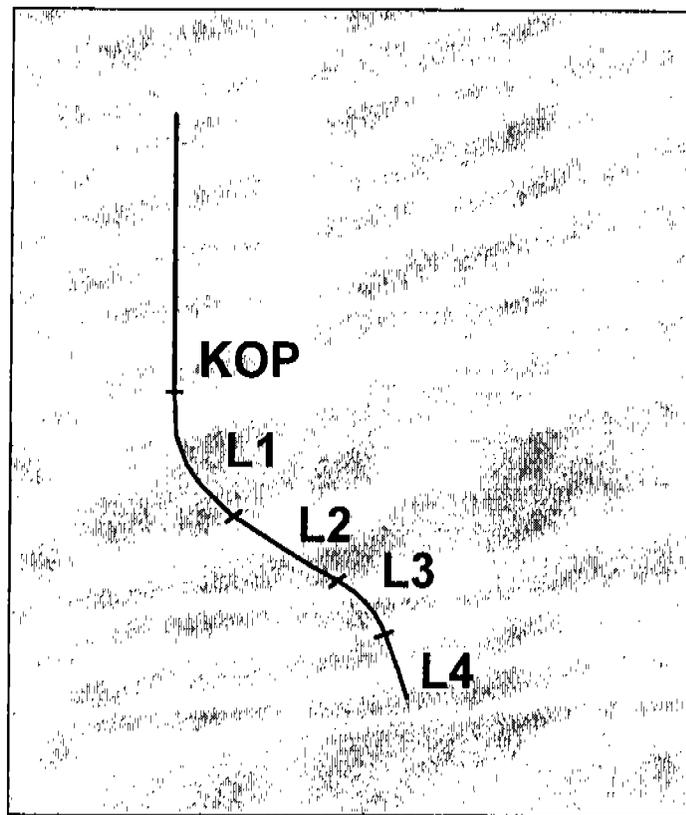


Fig. 1.2.3 Perfil de un pozo direccional tipo S

### 1.3 MOTORES DE FONDO

Hoy, el desplazamiento positivo de motores domina las operaciones de pozos y hace que éstos ofrezcan ventajas operacionales y económicas distintas sobre la perforación convencional rotatoria en muchos aspectos.

Los motores de fondo ofrecen la opción de perforar en un modo tradicional rotatorio o en un modo de deslizamiento en el cual el agujero sigue la dirección de bent housing (sustituto direccionador) en el motor. En aplicaciones de perforación direccional los motores de fondo permiten el control de la dirección del pozo y un control más efectivo de la desviación que los métodos rotarios tradicionales.

Los motores de fondo han sido diseñados específicamente para cumplir los exigentes criterios de la perforación direccional.

El ensamblado de un motor de fondo es el siguiente:

- Válvula de descarga
- Sección de poder
- Bent-housing (ajustable en la superficie)
- Sección de transmisión
- Sección de baleros y camisa estabilizadora

La variedad de configuraciones del rotor permite que los motores sean usados tanto para aplicaciones de baja velocidad y alto torque, como alta velocidad y bajo torque .

El Bent-housing (ajustable en la superficie) mejora la eficiencia y aumenta el control de la perforación direccional en el pozo.

#### **1.3.1 Perforación Vertical**

En aplicaciones de pozo vertical los motores funcionan como una herramienta de desempeño en perforación para aumentar la tasa de penetración y reducir el desgaste de la tubería de revestimiento minimizando la rotación de la sarta de perforación.

### 1.3.2 Perforación direccional

El diseño compacto y capacidades de alto torque hacen que los motores de fondo sean ideales tanto para perforación direccional, es decir, una situación en que se sigue un camino de pozo para seguir una trayectoria planeada, y para perforar de acuerdo a límites estructurales geológicos.

Para la perforación direccional convencional un bent housing, ajustable en la sección de transmisión, y un estabilizador, en la sección de baleros, permiten que el motor perforo en un modo deslizado, o modo rotario.

En el modo rotario tanto la barrena como la sarta de perforación, rotan; la rotación de la sarta de perforación anula el efecto del bent housing y la barrena perfora un camino paralelo al eje de la sarta de perforación sobre el bent housing.

En modo de deslizamiento únicamente rota la barrena. El motor cambia la dirección del pozo en la dirección del bent housing y la sarta de perforación se desliza bajo el agujero siguiendo a la barrena. En este modo, el motor se orienta en la misma forma que la perforación direccional convencional, haciéndolo aplicable para correcciones de dirección o levantamiento.

Existe un bent housing disponible para cada una de las aplicaciones descritas, de 0° a 2° y 0 a 3°.

El motor direccionable consiste de tres subensambles principales (ver figura 1.3.2.1):

- Sección de poder, compuesta de un rotor y un estator, que convierte la energía hidráulica en potencia mecánica rotaria.
- Sección de transmisión, que transmite la rotación de la sección de poder a la sección de baleros y también incluye el bent housing ajustable.
- Sección de baleros, que soporta las cargas axiales y radiales durante la perforación y transmite el movimiento rotatorio a la barrena a través del vástago.

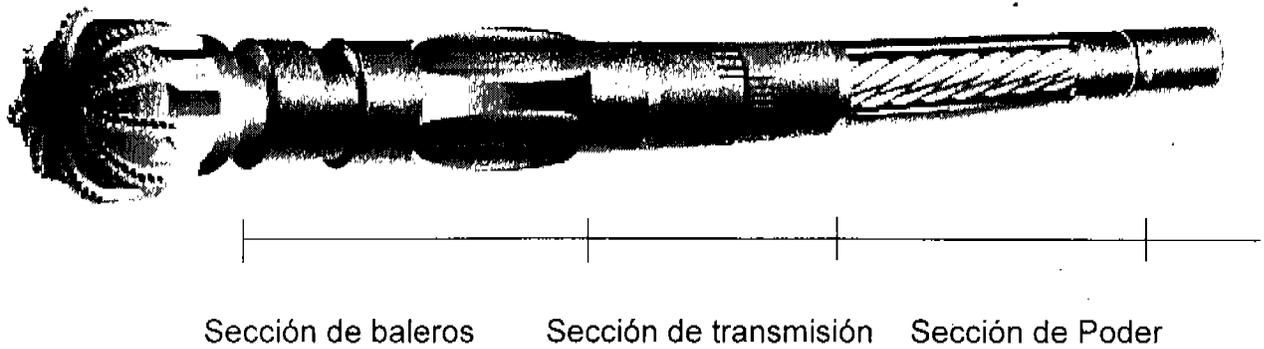


Figura 1.3.2.1 Diagrama de un motor de fondo

### 1.3.2.1 Sección de poder

La sección de poder convierte la energía hidráulica del fluido de perforación en potencia mecánica para hacer rotar la barrena. Esto se logra por aplicación inversa del principio de bombeo Moineau<sup>8</sup>, el fluido de perforación es bombeado dentro de la sección de poder del motor a una presión que causa que el rotor rote en el estator. Esta fuerza rotacional es entonces transmitida a través de un vástago a la barrena.

El rotor se manufactura de acero inoxidable resistente a la corrosión. Usualmente tiene 0.010 pulg. de platinado de cromo aplicado para reducir la fricción y abrasión. Los rotores cubiertos de carburo de tungsteno reducen también el desgaste por abrasión y daño por corrosión.

El estator consiste en un tubo de acero con un elastómero resistente a la abrasión y a los efectos causados por los hidrocarburos. La vida productiva de un motor está principalmente limitada por el uso del estator.

El rotor y el estator tienen perfiles helicoidales semejantes, pero el rotor tiene una espiral menos que el estator. En una sección de poder ensamblada, el rotor y estator forman un sello continuo en sus puntos de contacto en una línea recta, lo que produce un número de cavidades independientes. Cuando el fluido (lodo, agua o aire) es forzado dentro de estas cavidades progresivas, causa que el rotor rote dentro del estator. Este movimiento del rotor dentro del estator se llama

nutación. Por cada ciclo de nutación que hace el rotor dentro del estator, el rotor rota y engrana la distancia del ancho de una espiral y debe nutar en cada espiral en el estator para completar una revolución de la barrena. Un motor con un estator 7:8 y una velocidad de 100 revoluciones por minuto (rpm) en la barrena tendrá un velocidad de nutación de 700 ciclos por minuto.

La sección de poder de un motor se diseña por su configuración de rotor/estator. Por ejemplo, una sección de poder 5:6 tiene cinco espirales en el rotor y seis en el estator (ver figura 1.3.2.2). Generalmente, entre mayor es el número de espirales, es mayor la fuerza de torsión del motor, y menor la velocidad. Los motores están disponibles en configuraciones 1:2, 3:4, 4:5, 5:6 y 7:8. la fuerza de torsión también depende del número de etapas (una etapa es una vuelta completa de la hélice del estator), los motores tienen una longitud de sección de poder estándar, o una sección de poder extendido más larga (XP). Las secciones de poder XP tienen más etapas para proveer mayor fuerza de torsión sin una pérdida en la velocidad rotacional.

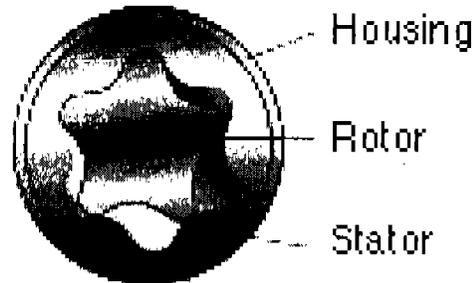


Figura 1.3.2.2 Área transversal de una sección de poder relación 5:6

### 1.3.2.2 Tasa de espirales del rotor / estator

Las espirales en un rotor y estator actúan como un caja de velocidades. Mientras sus números aumentan para un tamaño de motor dado, la fuerza de torsión generalmente aumenta y su velocidad generalmente decrece. Como el poder es definido como la velocidad de la fuerza de torsión, un número mayor de espirales en un motor no necesariamente producirá más caballos de fuerza. Los motores

con más espirales son realmente menos eficientes porque el área del sello entre el rotor y el estator aumenta con el número de espirales.

#### 1.3.2.3 *Ajuste de interferencia rotor/estator*

La diferencia entre el tamaño del diámetro promedio del rotor (medida del valle a la punta de la espiral) y el diámetro menor del estator (punta a punta de espiral) se define como el ajuste de interferencia rotor/estator.

Los motores se ensamblan generalmente con el rotor de un tamaño mayor que el estator. Esto produce un fuerte sello de interferencia llamado ajuste positivo. Los motores funcionan con un diámetro promedio de rotor de más de 0.022 pulg. más grande que el diámetro menor del estator, por las fuertes condiciones de perforación (capaces de producir grandes pérdidas de presión) pero tienen usualmente una vida más reducida porque se desarrolla trozado prematuro como se verá en el punto 1.3.2.6.

Si se anticipan temperaturas altas de perforación, la cantidad de ajuste positivo es reducida durante el ensamblaje del motor para permitir la dilatación del forro de elastómero en el estator. Un estator más grande es requerido usualmente para obtener la cantidad correcta de interferencia entre el rotor y estator a temperaturas sobre 200° F (93 °C) si la temperatura de operación anticipada del pozo está sobre aproximadamente 225° F (107 °C) el ajuste de interferencia debe ser un ajuste negativo, en el cual el diámetro promedio del rotor es del mismo tamaño o más pequeño que el diámetro menor del estator cuando el motor es ensamblado.

#### 1.3.2.4 *Número de etapas.*

Usar una sección de poder con más etapas es la única forma de efectivamente aumentar la potencia de un motor. Las etapas adicionales de las secciones de poder XP se pueden usar para crear más fuerza de torsión o para expandir la carga en el motor y correr cada etapa con una menor caída de presión. Usar el

motor con una menor caída de presión usualmente aumenta la vida del estator. Las secciones de poder XP son usadas generalmente en pozos de temperatura extremadamente alta. El ajuste suelto, generalmente requerido para permitir la dilatación del estator en pozos calientes a menudo significa que una sección de poder regular es muy débil para perforar cuando tropieza por primera vez en el pozo hasta que el estator tiene tiempo de dilatarse. Una sección de poder XP puede ser ensamblada con un ajuste extremadamente suelto entre el rotor y el estator y aún producir suficiente poder para perforar. De cualquier modo, la longitud total del motor y el costo de las piezas aumenta al usar secciones de poder XP.

#### *1.3.2.5 Caída de presión por etapa.*

La caída máxima de presión por etapa diseñada es una función del perfil espiral y la dureza del forro del elastómero. Los cambios en la dureza del elastómero afectan no solo a la caída de presión, sino la elasticidad y vida del elastómero.

#### *1.3.2.6 Modos de falla y prevención.*

El forro de elastómero en el tubo del estator es usualmente el elemento que falla primero en la sección de poder. Las causas de falla de hule en un estator son el troceado, despegado, y daño por desperdicios.

El desgarre describe un estator en el que el hule en la punta de las espirales aparentemente se ha desgarrado. El troceado ocurre cuando la fuerza de la fricción entre las espirales del rotor y el estator excede la fuerza del hule en el estator. La magnitud de la fuerza de fricción entre el rotor y el estator es influida por la lubricidad del lodo, el ajuste de interferencia entre el rotor y estator, velocidad de lóbulo y caída de presión. Muchas fallas de estator resultan del desgarre por varias razones.

Dos agentes de unión se usan en los estatores. Un agente une al tubo de acero, el otro agente se une al elastómero y cada agente se une al otro. El despegado se define como la falla de una, dos o las tres uniones en el estator:

- Tubo de acero al agente de unión
- Agente de unión a agente de unión
- Agente de unión a elastómero.

Los estatores fallando por despegado típicamente tienen grandes pliegos de elastómero suelto. Esos pliegues de hule usualmente tienen una superficie trasera lisa donde el estator se moldeó contra el tubo de acero.

Las fallas de motor causadas por despegue son extremadamente raras.

El daño por desperdicio generalmente es causado al bombear 'desperdicio' a través del motor. El estator tendrá cortes filosos en una ruta espiral y el rotor puede tener también daño en la misma ruta.

#### *1.3.2.7 Presión diferencial: curvas de desempeño del motor.*

La diferencia entre la presión interna y externa a nivel del motor se define como presión diferencial. Esta diferencia de presión se genera por la sección del rotor/estator del motor. Entre más grande es la diferencia de presión, más grande la fuerza de torsión del motor y menor la velocidad.

Los motores que corren con demasiada presión diferencial sufren un desgarramiento prematuro (en tan poco, como 6 horas de bombeo) de forma similar a estatores que tienen demasiada interferencia (compresión) entre el rotor y el estator. El desgarramiento seguirá una ruta espiral o será uniforme a través del cuerpo del estator. Correr un motor en o cerca de su máxima presión diferencial, reduce severamente la vida del estator.

Para extender la vida del motor se recomienda correrlo a no más de 90% de su caballaje máximo para cualquier gasto de flujo. El gasto de flujo debe ser mantenido bajo 90% del gasto máximo.

Correr al nivel máximo para cualquier parámetro (gasto de bombeo, peso en barrena, presión diferencial del motor o velocidad de la tabla rotacional) reduce la vida promedio del motor, particularmente del estator. El uso de secciones de poder XP y rotores con tobera debe ser investigado si estos límites de operación producen niveles de desempeño del motor por debajo de lo aceptable.

#### *1.3.2.8 El uso de obturante.*

El obturante puede causar dos problemas al ser bombeado a través del motor. El material puede atorarse dentro del motor, usualmente en la válvula de descarga, si se usa en la punta del tubo de salida o en los baleros radiales, y puede causar desgaste del estator; sin embargo, el obturante se puede usar con los motores si se siguen algunas precauciones:

Agregar el obturante gradualmente, evitar bombear un trozo grande del material

Minimizar el uso de materiales duros y filosos como mica áspera y placas de carbonato de calcio porque pueden causar desgaste por abrasión.

Aunque estas guías minimizan los problemas de trabado asociados con el obturante, no pueden eliminar completamente la posibilidad de tapan el motor o la sección de baleros.

#### *1.3.2.9 Sección de transmisión.*

El aparejo de transmisión, que se adjunta a la sección inferior del rotor, transmite la velocidad rotacional y la fuerza de torsión generada por la sección de poder al tubo de baleros y dirección. También compensa el movimiento excéntrico de la nutación del rotor y absorbe el impulso. La rotación se transmite a través del tubo de transmisión que está ajustado con una unión universal en cada extremo para

absorber el movimiento excéntrico del rotor. Ambas uniones universales están cubiertas de grasa y selladas para extender su duración.

La sección de transmisión contiene el bent housing ajustable en la superficie. La transmisión en muchos motores permitirá un dobléz de 0° a 3° en el bent housing ajustable. Sin embargo, el dobléz máximo para los motores XP es de 1.83° porque el tubo de diámetro mayor requerido para la mayor fuerza de torsión deja menos espacio en la transmisión. Los ajustes de dobléz mayores de 1.83° causarían que la transmisión en un motor XP se frotara contra el diámetro interior (DI) del bent housing ajustable.

#### *1.3.2.10 Sección de baleros y tubo de dirección.*

La sección de baleros transmite el impulso de perforación y poder rotacional del tubo de transmisión a la barrena. Esta sección consiste de un tubo de dirección de acero forjado soportada por balines axiales y radiales. Como la sección de baleros de un motor de perforación es la más expuesta a condiciones duras, los motores se diseñan para asegurar máxima eficiencia operacional tomando en cuenta factores tales como las propiedades del fluido de perforación, el peso sobre barrena (PSB) y carga lateral, velocidad rotacional, y caída de presión en la barrena.

#### *1.3.2.11 Falla de baleros y modos de prevención.*

##### ***1.3.2.11.1 Peso sobre barrena***

La naturaleza agresiva de los PDC (compactos de diamante policristalinos) generalmente imposibilita pesos de barrena altos. Las barrenas tricónicas, sin embargo, se usan a menudo con altos pesos de barrena que aceleran el desgaste de las esferas y los circuitos de los balines axiales.

Los circuitos en los baleros axiales lubricados con lodo están endurecidos. Su tasa de desgaste no es lineal, porque la cantidad de desgaste solo se incrementa cuando de han desgastado a través del área endurecida. Sólo porque un motor tiene desgaste menor después de un largo tiempo funcionando no significa que los balines puedan repetir el mismo trabajo.

Los motores con secciones de poder XP, no tienen mayor límite de peso de barrena que los motores regulares. La salida de fuerza de torsión adicional de una sección XP de un motor no permite correr más PSB. Como correr un motor en, o cerca del límite medido de PSB disminuye la vida de los baleros axiales, un límite de 80% del límite máximo medido de PSB se recomienda para trabajos largos.

#### **1.3.2.11.2 Velocidad Rotación**

Motores a velocidades de rotación sobre 80 rpm pueden dañar el elastómero en el estator. Altas velocidades de rotación incrementan la cantidad de fuerza centrífuga generada por el rotor y la transmisión, lo que resulta en desgaste mayor del estator, transmisión, baleros radiales y conexiones internas. Entre más grande sea el ajuste de dobléz, son más susceptibles los motores a ser dañados. Adicionalmente, el caballaje (fuerza de torsión y velocidad) que se le proporciona a la barrena de la rotación de superficie de los tubos de perforación deben ser transferidas por el estator al rotor dentro de la sección de poder del motor. Para extender la vida del motor, se recomienda correr el motor a no más del 80% de la velocidad máxima medida.

#### **1.3.2.12 Especificaciones Generales.**

Las características de desempeño generales de los motores se basan en las siguientes suposiciones:

- a) Gasto de flujo

El flujo promedio a través de un motor puede ser incrementado ajustando una tobera en el rotor y desviando algo del fluido a través del centro del motor. Cuando una tobera de desvío se use la tasa total de flujo no debe exceder el límite en la columna de desvío.

b) Diámetro del pozo

Los mínimos y máximos tamaños de barrena /pozo para los motores son los más usados.

c) Peso de la herramienta

El peso de la herramienta aumenta con las secciones de poder XP más largas.

d) Longitud de la herramienta

La longitud de un motor también varía con la sección de poder. Estas longitudes de herramienta para motores ensamblados incluyen el sub-superior, válvula de descarga.

e) PSB máximo

El peso sobre barrena máximo para un motor se determina por su sección de balines y es independiente de la sección de poder.

f) Carga axial

El trabajo axial es la máxima carga que puede ser colocada en un motor atorado (empujando o jalando) sin destruir las partes de baleros radiales. La carga debe ser menor que este valor para permitir reutilizar el motor después de desatorarlo.

g) Carga axial absoluta

La carga axial absoluta es la carga máxima que puede ser colocada en un motor atorado (jalando o empujando) antes de causar daño severo al motor y posiblemente dejar un fragmento en el pozo.

h) Caída de presión en la de barrena

Para mantener un flujo de fluido lubricante/refrigerante a través de la sección de baleros, la barrena usada con un motor debe tener una cantidad mínima de caída de presión. La tobera de barrena debe ser elegida con base en los cálculos de la hidráulica de barrena para proveer la caída de presión mínima a la barrena. La caída máxima de presión no debería ser excedida por periodos prolongados porque los baleros axiales y radiales del motor podrían desgastarse.

2  
ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LA PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE LA  
TERCERA ETAPA DE POZOS ESBELTOS CON BARRENAS BICÉNTRICAS  
10 5/8"x12 1/4"

## 2.1 POZOS ESBELTOS

Le Gerencia de Perforación y Mantenimiento de Pozos, consciente de que en todo proceso operativo existen áreas de mejora, contempla, dentro de sus objetivos, eficientar los proyectos con la aplicación de tecnología de punta y métodos que permitan la reducción de tiempos y costos.

Dentro de los procesos de perforación de los pozos del Proyecto Delta del Grijalva, existen múltiples áreas de oportunidad en las que la optimización de las geometrías de las Tuberías de Revestimiento (TR) pueden reducir los costos de:

- a) las Tuberías de Revestimiento (al emplear menores diámetros)
- b) el fluido de perforación (al requerir de un menor volumen de fluido)
- b) las barrenas (al requerir menores diámetros de barrenas coadyudando en mejorar los ritmos de penetración)
- c) las cementaciones de las TR (al emplear menores volúmenes de lechada de cemento).
- d) el tratamiento de recortes (menor volumen de recorte a tratar).
- e) los accesorios de Tubería de Revestimiento (al emplear menores diámetros).
- f) los días de operación (al reducirse los tiempos de operación).
- g) la Tubería de Revestimiento de 9 5/8" como de explotación (posibilidad de poder eliminar el complemento de 7").

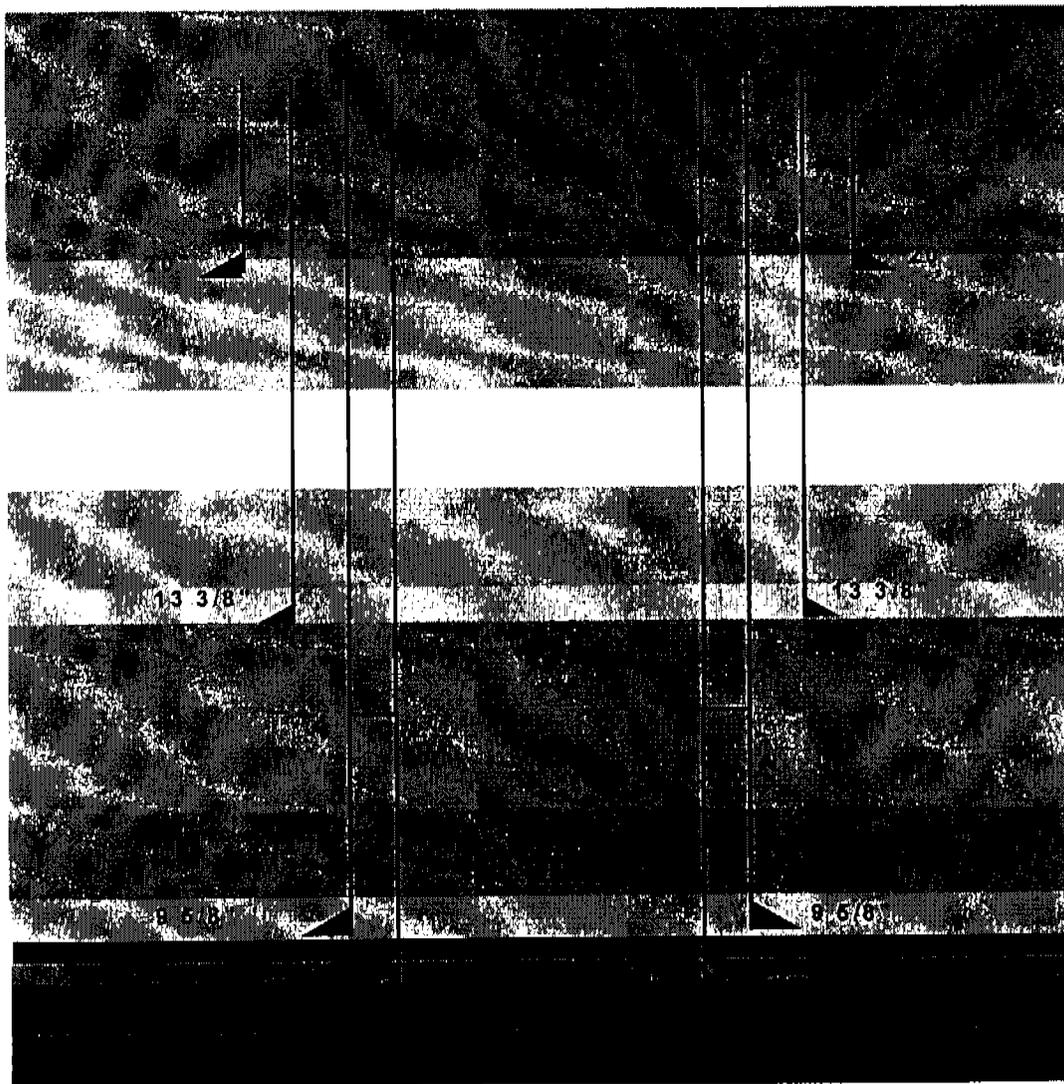
Una de las estrategias de optimización de costos y tiempos en el desarrollo de la perforación de los pozos del proyecto Delta del Grijalva es la implementación del arreglo de Pozos Esbeltos

Véase la comparación de una geometría de pozo convencional con una geometría de pozo esbelto en las siguientes gráficas:

**Arreglo de tuberías de revestimiento anteriores:**

| Diámetro de agujero | Diámetro T. R. | Función                              |
|---------------------|----------------|--------------------------------------|
| 26"                 | 20"            | Aislar acuíferos superficiales       |
| 17 1/2"             | 13 3/8"        | Aislar zona de arenas                |
| 12"                 | 9 5/8"         | Aislar zona de presión anormal alta  |
| 8 1/2"              | 7"             | Aislar zona de presión anormal media |
| 5 7/8"              | 5"             | Aislar yacimiento                    |

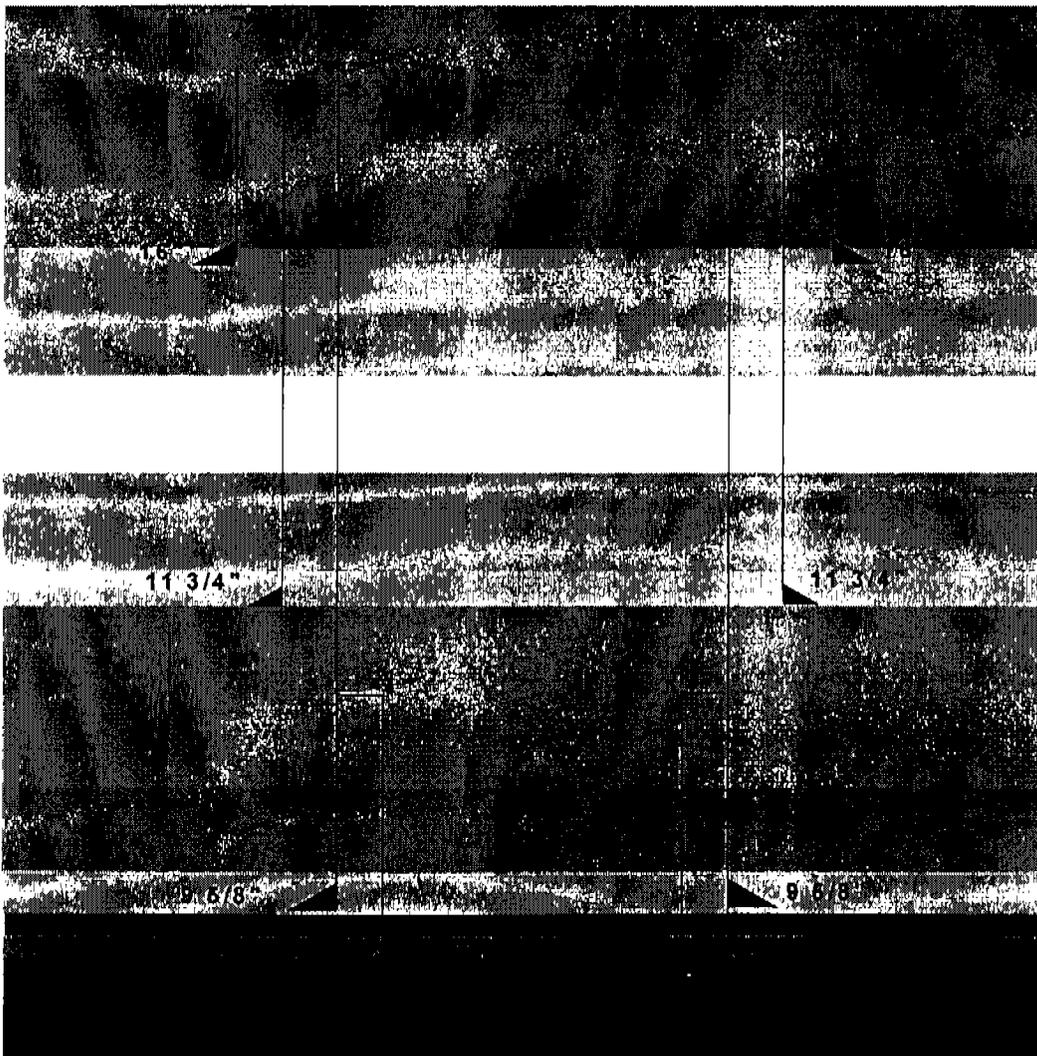
**Geometría anterior**



**Arreglo esbelto de tuberías de revestimiento:**

| Diámetro de agujero                                       | Diámetro T. R. | Función                              |
|-----------------------------------------------------------|----------------|--------------------------------------|
| 18 1/2"                                                   | 16"            | Aislar acuíferos superficiales       |
| 14 3/4"                                                   | 11 3/4"        | Aislar zona de arenas                |
| 7 5/8" x 10 5/8" x 12 1/4"<br>(Uso de barrena bicéntrica) | 9 5/8"         | Aislar zona de presión anormal alta  |
| 8 3/8"                                                    | 7"             | Aislar zona de presión anormal media |
| 5 7/8"                                                    | 5"             | Aislar yacimiento                    |

**Geometría Pozos Esbeltos**



La perforación de pozos con arreglo esbelto se ha llevado a cabo con éxito en los campos Sen, Luna, Escarbado y Pijje.

## 2.2 PERFORACIÓN DIRECCIONAL EN LA TERCERA ETAPA DE LOS POZOS ESBELTOS.

Un adecuado plan de la perforación es aquel que identifica los intervalos en los cuales los riesgos geológicos como zonas de alta presión en rocas y otros factores de inestabilidad, como intrusiones salinas que ocasionan fallas de tipo normal e inverso, así como fracturas, puedan comprometer la integridad del pozo. Si se identifican estos riesgos oportunamente o se anticipan los eventos indeseables ya conocidos, se reducirían los costos de exploración y de producción. Durante la perforación se adquieren datos que se interpretan y vuelcan en el proceso, en el plan del pozo o en el mismo modelo geológico del subsuelo; gracias a estas modificaciones y actualizaciones, el programa de perforación del pozo deja de ser un documento estático para convertirse en un programa dinámico.

Por el comportamiento geológico en el desarrollo de la perforación de la tercera etapa de los pozos esbeltos, se ha requerido como alternativa de solución para cumplir con el objetivo del pozo: que esta etapa se perfora en forma direccional debido a los siguientes casos:

### 2.2.1 Por domos salinos

Durante la perforación de la tercera etapa del pozo Sen 51 con barrena bicéntrica 10 5/8" x 12 1/4" encontró sal 100% a 3549 m. Perforó a 4400 m (851 m de sal).

Se redireccionó el pozo cambiando de objetivo a 575.84 m del original, con rumbo de N69.68° W hacia el pozo Sen 71. Se efectuó la desviación (side-track) y se continuó perforándose con barrena bicéntrica 10 5/8" x 12 1/4" dirigiéndose hacia el nuevo objetivo. Se cementó la T.R. de 9 5/8" en la base de Eoceno (ver figs. 2.1 y 2.2)

Pozo Sen 51

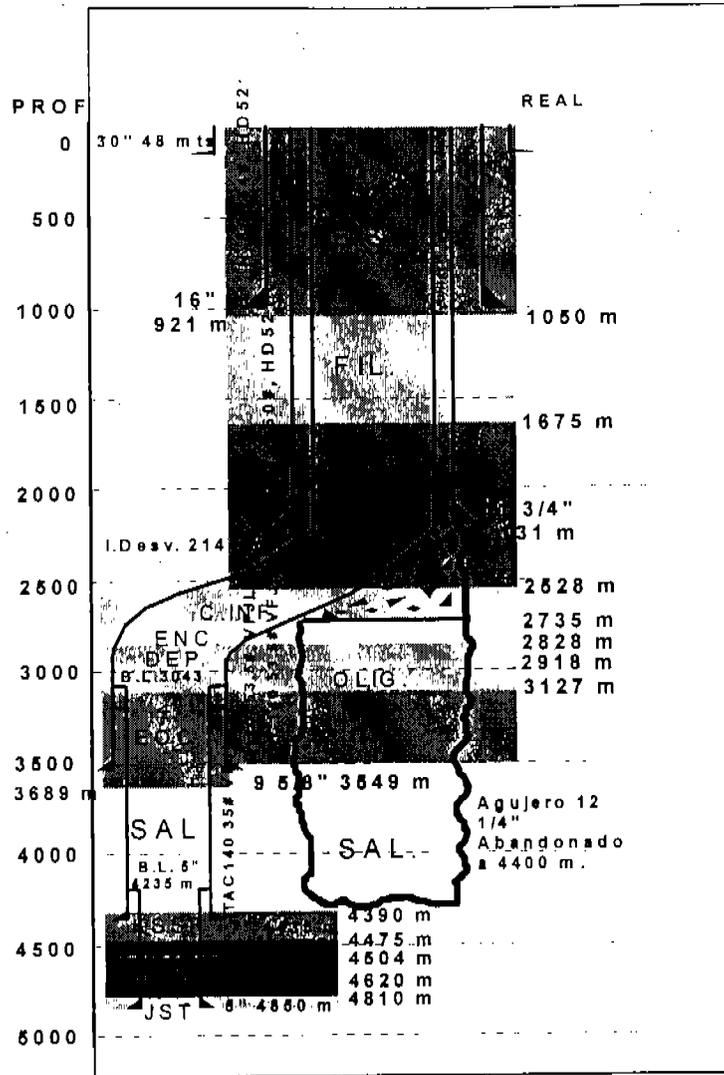


Fig. 2.1 Estado mecánico pozo Sen 51

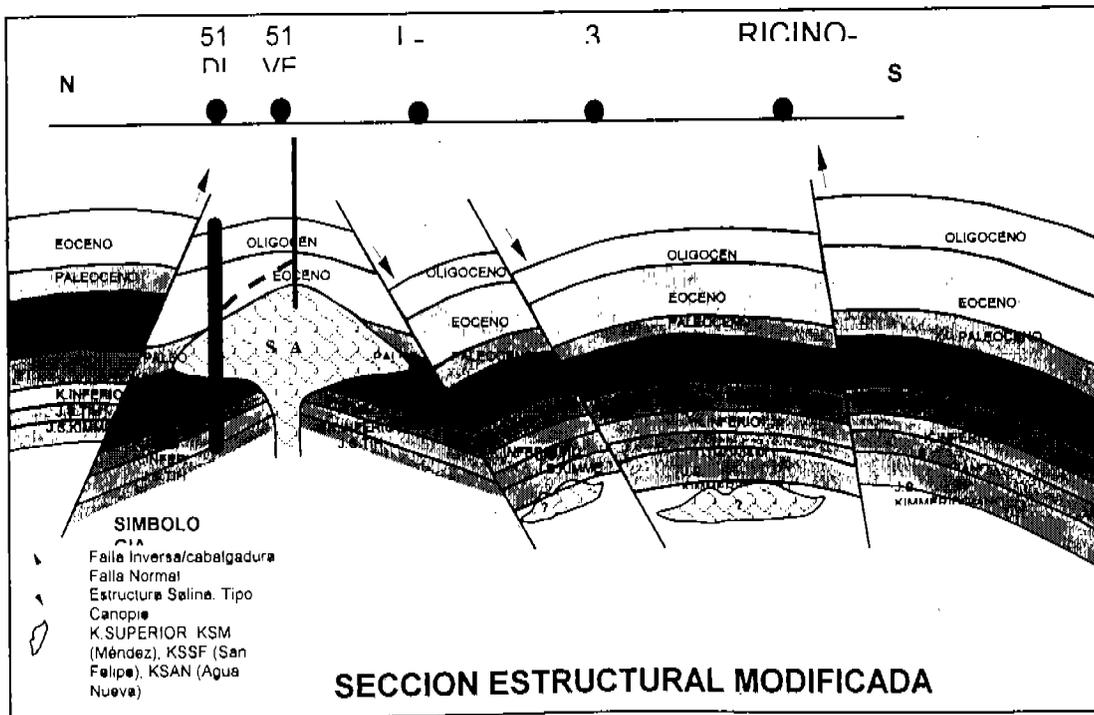


Fig. 2.2

### 2.2.3 Por columna geológica bajo estructural

La presencia de fallas geológicas durante la perforación de un pozo origina que los espesores de algunas formaciones se incrementen; consecuentemente, las cimas de las formaciones siguientes quedan más profundas. Tal es el caso del pozo Sen 111 (ver fig. 2.4).

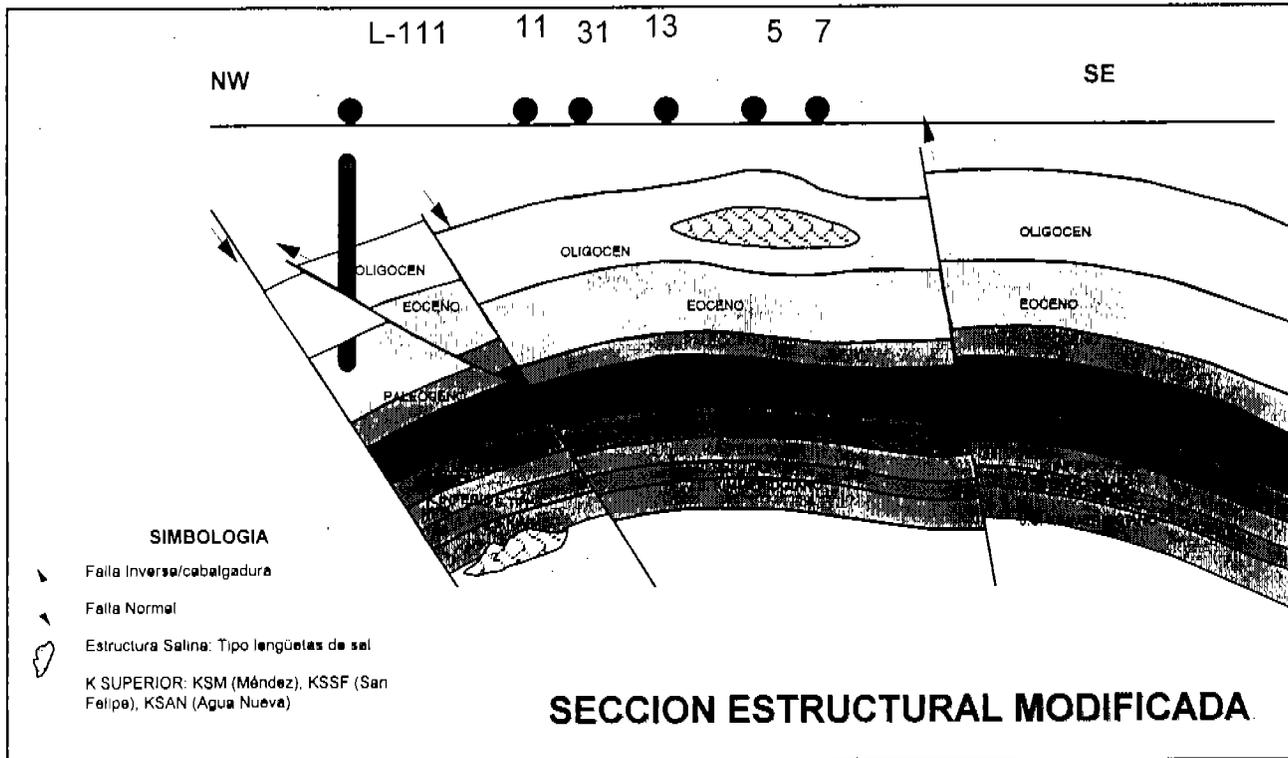
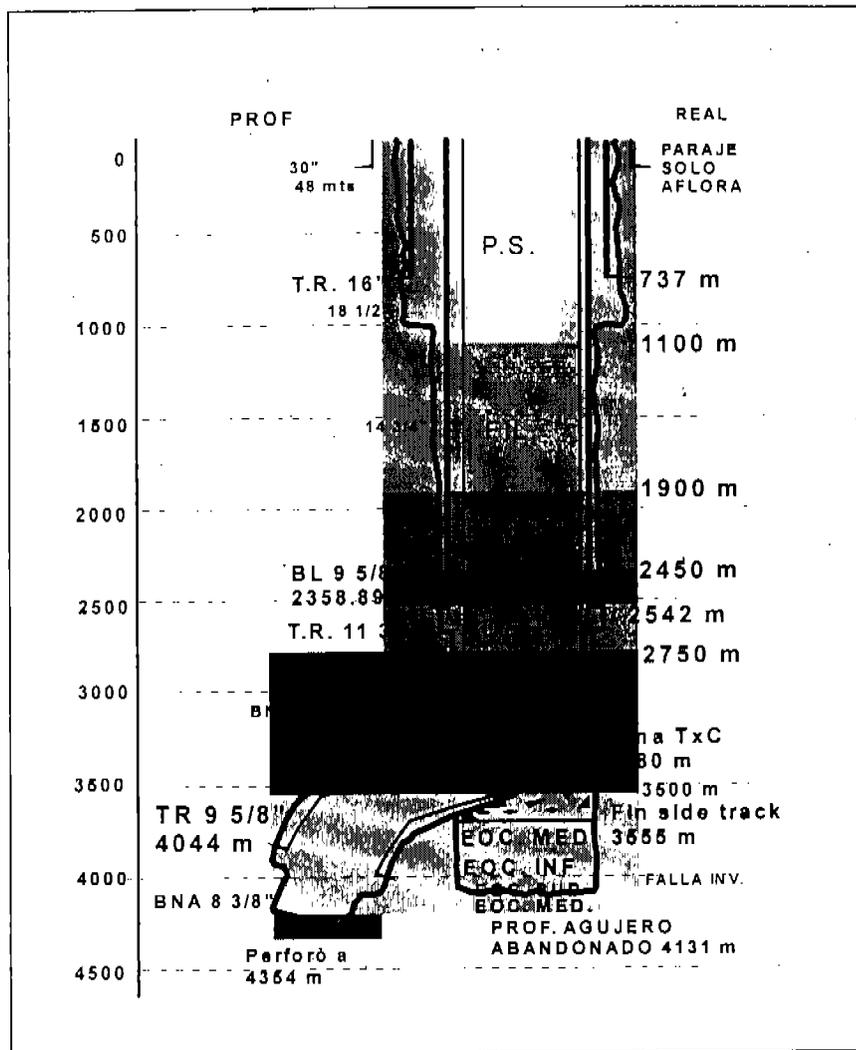


Fig .2.4 Sección estructural de una área del campo Sen

El pozo Sen 111 se perforó verticalmente con barrena bicéntrica 10 5/8" x 12 1/4" a 4131m (cima de Eoceno, falla geológica) el pozo quedó bajo estructural.

Se redireccionó el pozo cambiando de objetivo a 300 m, S64.5E del conductor hacia el bloque del sen 31 13 y 11. Se efectuó el side track a 3480 m, y se continuó perforando direccionalmente con barrena bicéntrica 10 5/8" x 12 1/4" hacia el nuevo objetivo, se cementó la T.R. de 9 5/8" a 4044 m por disminuir el gradiente de poro en la formación Eoceno superior (ver fig. 2.5).

## POZO SEN 111



**Fig. 2.5 Estado mecánico pozo Sen 111**

### 2.2.4 Por el uso de macroperas

En los campos del Proyecto Delta del Grijalva existen macroperas desde las cuales se perforan varios pozos en forma vertical o direccional dependiendo de su objetivo.

El pozo Sen 37 se planeó perforarlo desde la macropera donde los pozos Sen 31, 13 y 11 fueron perforados. Con base en su objetivo se planeó perforarlo

La perforación de pozos con arreglo esbelto se ha llevado a cabo con éxito en los campos Sen, Luna, Escarbado y Pijje.

## 2.2 PERFORACIÓN DIRECCIONAL EN LA TERCERA ETAPA DE LOS POZOS ESBELTOS.

Un adecuado plan de la perforación es aquel que identifica los intervalos en los cuales los riesgos geológicos como zonas de alta presión en rocas y otros factores de inestabilidad, como intrusiones salinas que ocasionan fallas de tipo normal e inverso, así como fracturas, puedan comprometer la integridad del pozo. Si se identifican estos riesgos oportunamente o se anticipan los eventos indeseables ya conocidos, se reducirían los costos de exploración y de producción. Durante la perforación se adquieren datos que se interpretan y vuelcan en el proceso, en el plan del pozo o en el mismo modelo geológico del subsuelo; gracias a estas modificaciones y actualizaciones, el programa de perforación del pozo deja de ser un documento estático para convertirse en un programa dinámico.

Por el comportamiento geológico en el desarrollo de la perforación de la tercera etapa de los pozos esbeltos, se ha requerido como alternativa de solución para cumplir con el objetivo del pozo: que esta etapa se perfora en forma direccional debido a los siguientes casos:

### 2.2.1 Por domos salinos

Durante la perforación de la tercera etapa del pozo Sen 51 con barrena bicéntrica 10 5/8" x 12 1/4" encontró sal 100% a 3549 m. Perforó a 4400 m (851 m de sal).

Se redireccionó el pozo cambiando de objetivo a 575.84 m del original, con rumbo de N69.68° W hacia el pozo sen 71. Se efectuó la desviación (side-track) y se continuó perforándose con barrena bicéntrica 10 5/8" x 12 1/4" dirigiéndose hacia el nuevo objetivo. Se cementó la T.R. de 9 5/8" en la base de Eoceno (ver figs. 2.1 y 2.2)

Pozo Sen 51

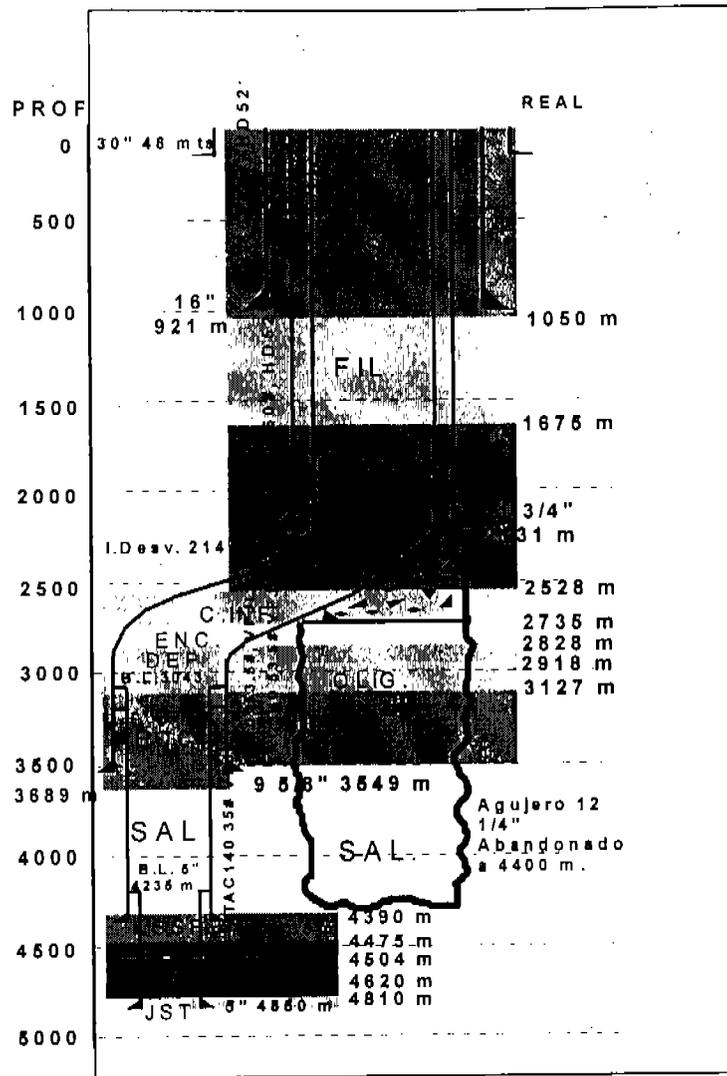


Fig. 2.1 Estado mecánico pozo Sen 51

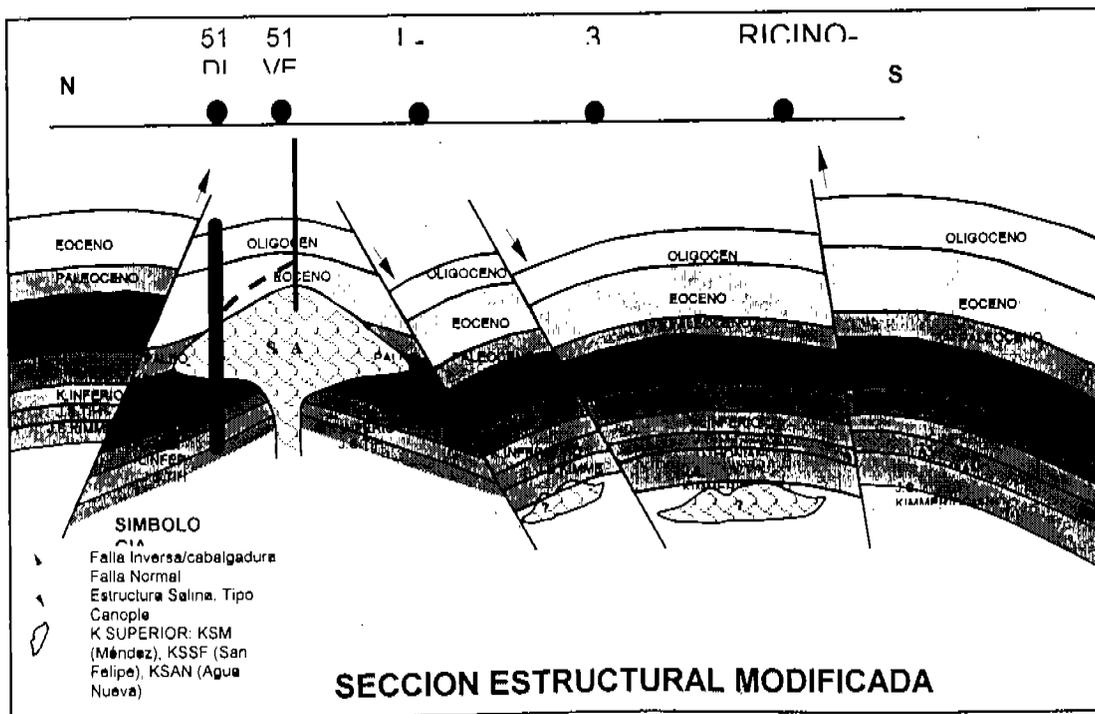


Fig. 2.2

## 2.2.2 Por espaciamiento de drene entre pozos, radio de drene

Debido a la perforación direccional del pozo Sen 51 hacia el NW del bloque por desarrollar, se invadió parte del radio de drene del pozo Sen 71 lo cual originó que la perforación del pozo Sen 71 fuera direccional dirigiéndose también hacia el NW (ver figura 2.3 ).

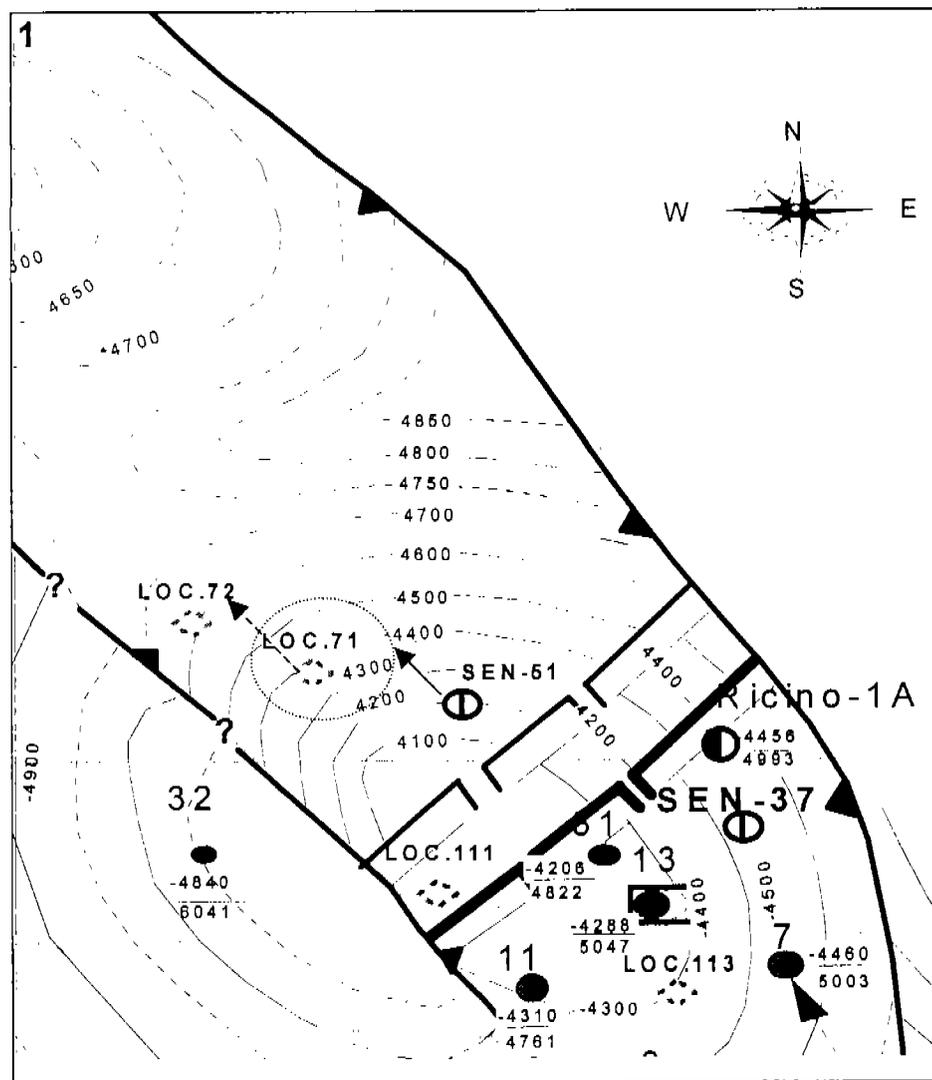


Fig. 2.3 Configuración estructural del campo Sen

### 2.2.3 Por columna geológica bajo estructural

La presencia de fallas geológicas durante la perforación de un pozo origina que los espesores de algunas formaciones se incrementen; consecuentemente, las cimas de las formaciones siguientes quedan más profundas. Tal es el caso del pozo Sen 111 (ver fig. 2.4).

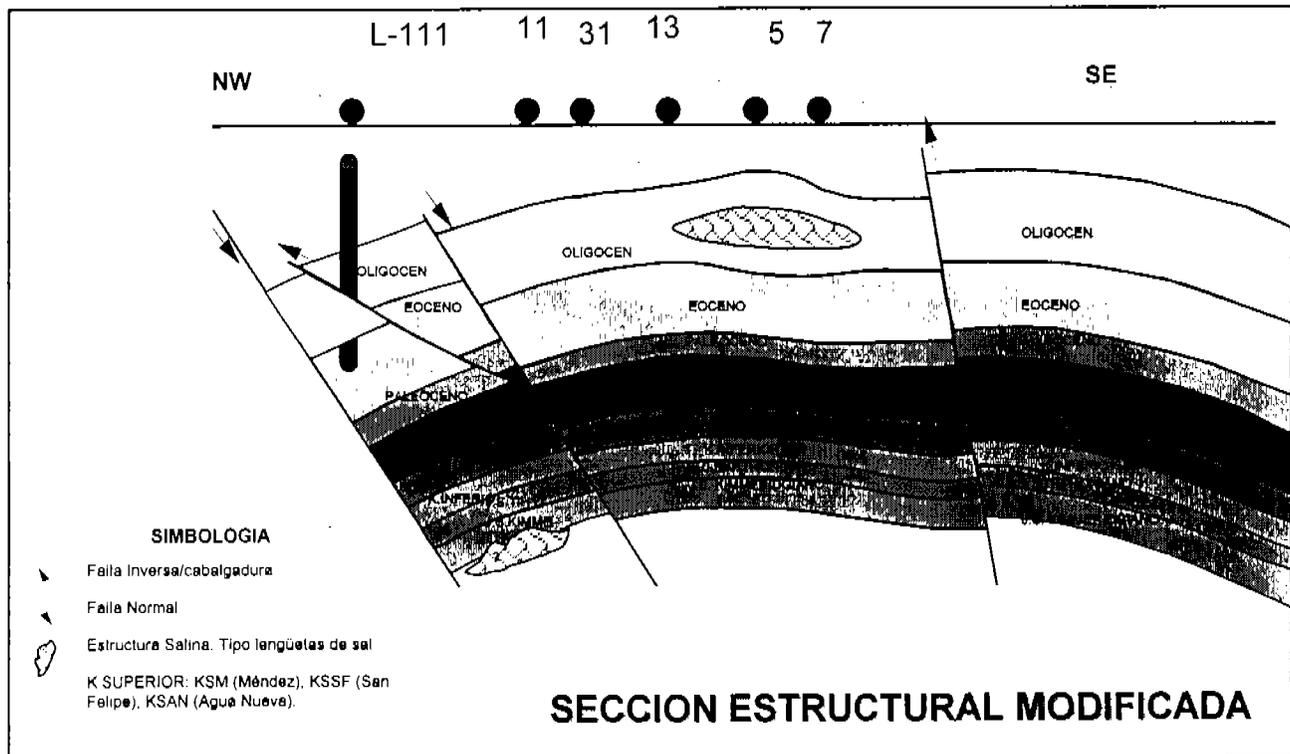
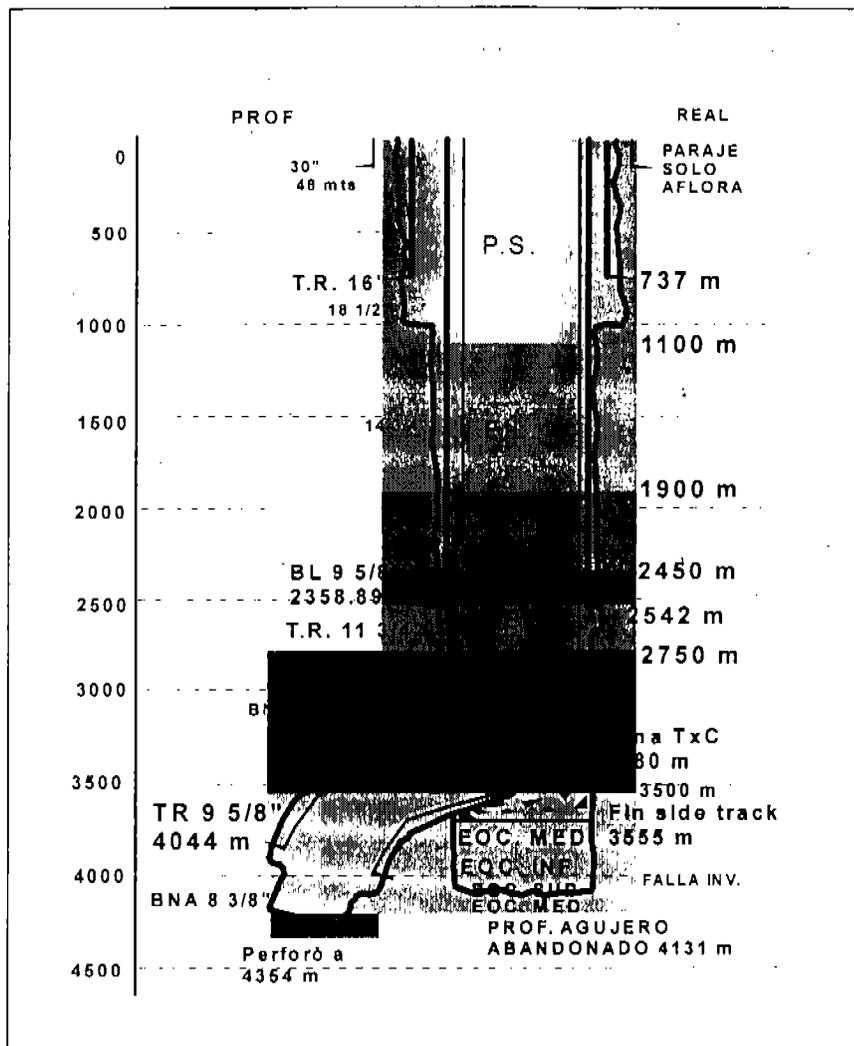


Fig .2.4 Sección estructural de una área del campo Sen

El pozo Sen 111 se perforó verticalmente con barrena bicéntrica 10 5/8" x 12 1/4" a 4131m (cima de Eoceno, falla geológica) el pozo quedó bajo estructural.

Se redireccionó el pozo cambiando de objetivo a 300 m, S64.5E del conductor hacia el bloque del sen 31 13 y 11. Se efectuó el side track a 3480 m, y se continuó perforando direccionalmente con barrena bicéntrica 10 5/8" x 12 1/4" hacia el nuevo objetivo, se cementó la T.R. de 9 5/8" a 4044 m por disminuir el gradiente de poro en la formación Eoceno superior (ver fig. 2.5).

## POZO SEN 111



**Fig. 2.5 Estado mecánico pozo Sen 111**

### 2.2.4 Por el uso de macroperas

En los campos del Proyecto Delta del Grijalva existen macroperas desde las cuales se perforan varios pozos en forma vertical o direccional dependiendo de su objetivo.

El pozo Sen 37 se planeó perforarlo desde la macropera donde los pozos Sen 31, 13 y 11 fueron perforados. Con base en su objetivo se planeó perforarlo

direccionalmente con barrena bicéntrica 10 5/8" x 12 1/4" a partir de la tercera etapa (ver figura 2.6).

### POZO SEN 37

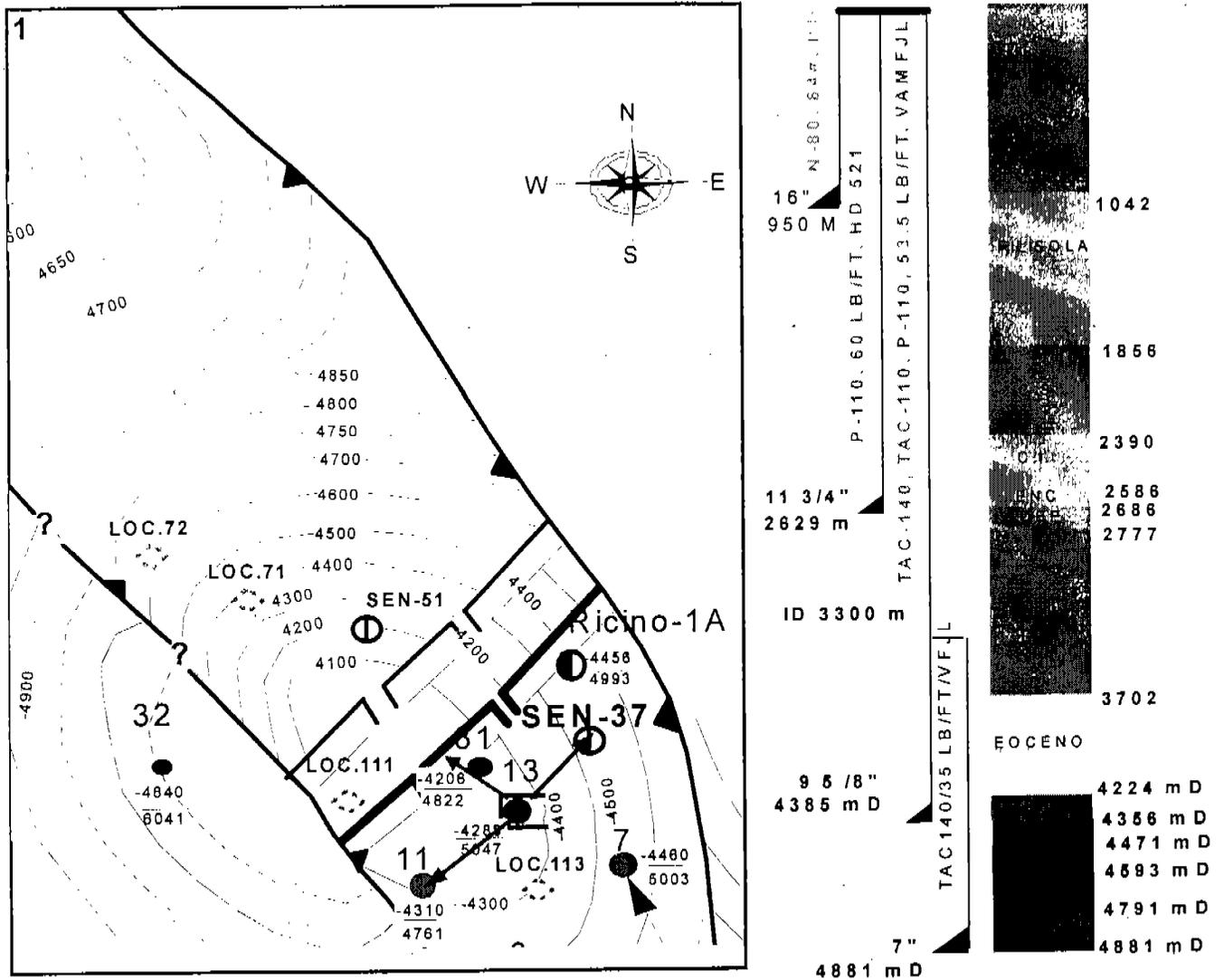


Fig. 2.6 Estado mecánico real del pozo Sen 37

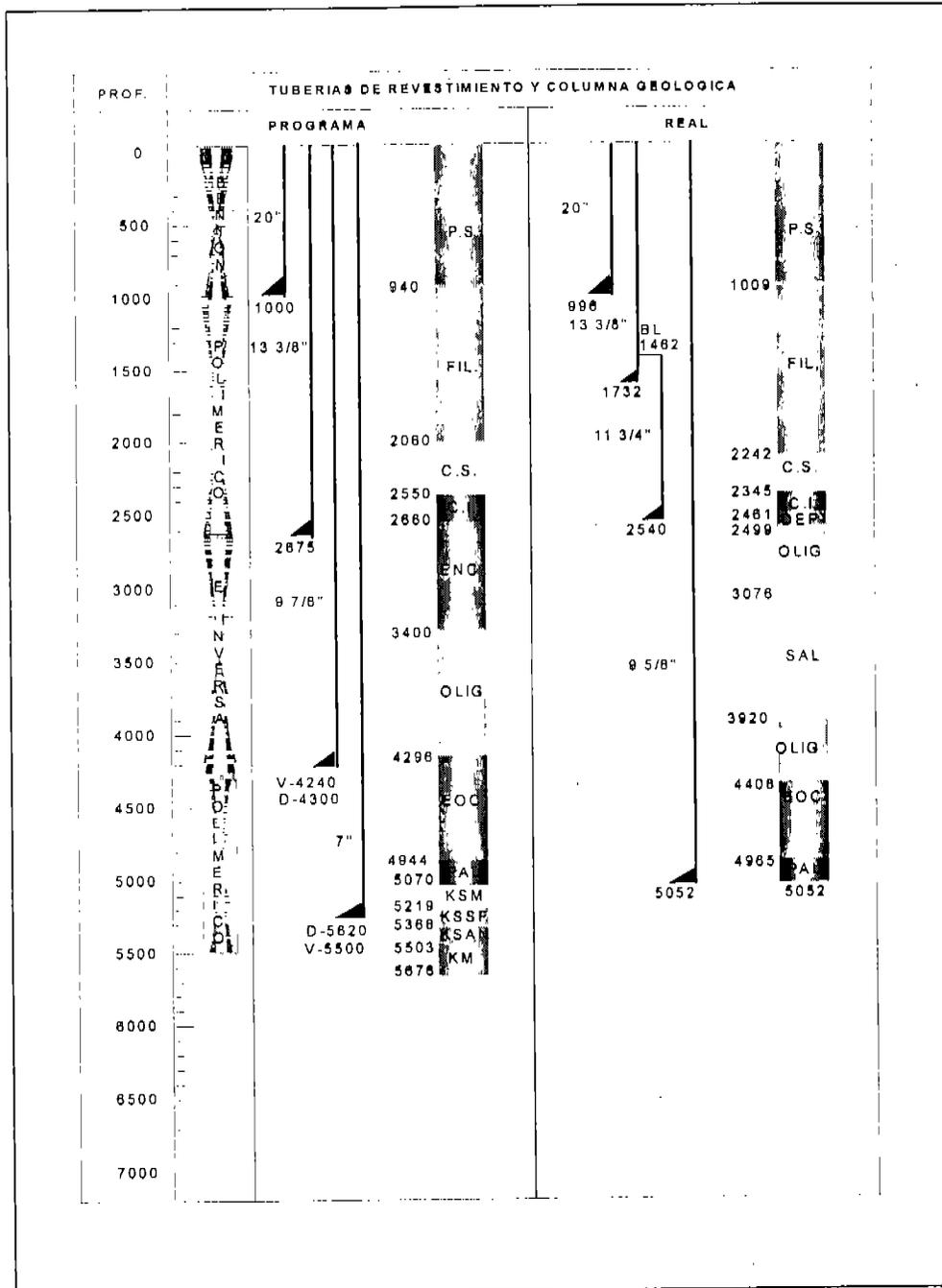
### 2.2.5 Por accidente mecánico

El pozo Sen 121 se perforó en su tercera etapa en forma direccional para solucionar un problema de introducción de la T.R. de 13 3/8" en agujero de 17 1/2" puesto que ésta se quedó atrapada a la profundidad de 1732 m. originando que se quedaran 808 m de agujero descubierto (formación de bajo gradiente) imposibilitando llegar al objetivo del pozo, dado que, para la siguiente etapa de 12 1/4" se tenía que utilizar lodo con densidad de 2.02 gr/cm<sup>3</sup>, perforar vertical a 4100 m y desviar hasta 5052 m.

Esta operación consistió primero en rebajar los accesorios y el cemento de la TR de 13 3/8" con una barrena de 12", acondicionar el agujero hasta la profundidad perforada de 2,540 m, e introducir y cementar la tubería (Liner) de 11 3/4" de 1732 a 2540 m. Se perforó verticalmente de 2,540 m a 4,100 m y direccionalmente hasta 5,052 m, con un ángulo de 28.20° Rumbo Norte 28° Este, un desplazamiento de 597 m y una severidad de 1.45° cada 30 metros perforados. Esto se llevó a cabo con el uso de barrenas bicéntricas de diamante policristalino (PDC) de 7 7/8", barrena piloto y aleta integral de 10 5/8", cuya característica de diseño le permite pasar por el diámetro interior (10.625") del liner de 11 3/4", perforar y ampliar al mismo tiempo el agujero de 10 5/8" a 12 1/4" facilitando la introducción y cementación de la tubería de revestimiento de 9 5/8". Para lograr esto se utilizó un aparejo de fondo normal en la etapa vertical y sarta dirigible (motor de fondo y MWD) para la etapa direccional.

El uso de esta técnica de perforación solucionó el problema de reducción de diámetro provocado por la cementación de la tubería de 11 3/4", no contemplada en el diseño original del pozo, con resultados satisfactorios que permitieron continuar con el programa de perforación (ver figura 2.7).

# POZO SEN 121



**Fig. 2.7 Estado mecánico pozo Sen 121**

## **2.3 DESEMPEÑO DE LOS ENSAMBLES DE FONDO (BHA)**

El análisis de desempeño de los ensambles de fondo (BHA) está basado en los rendimientos de velocidad de penetración (ROP), en el promedio metro/día acumulativo, en el número de motores y barrenas empleadas, en los tipos de trayectorias construidas, en la respuesta para incrementar el ángulo y rumbo en las formaciones perforadas y en el tiempo efectivo de perforación de la tercera etapa. Tanto el rendimiento de la barrena bicéntrica 10 5/8" x 12 1/4", como el de los motores de fondo se analizan en conjunto como parte del BHA, dado que existe una relación directa entre ambos.

Los pozos que se analizan son del campo Sen, Luna y Escarbado, todos del proyecto Delta del Grijalva.

### **2.3.1 Pozo Sen 37**

El pozo Sen 37 es el primer pozo esbelto de su campo planeado para perforarse direccionalmente desde una macropera hacia el objetivo 238 m, N 20.65°. La trayectoria planeada fue tipo "Slant", el inicio de desviación (KOP) a 3100 m, el ángulo máximo planeado para alcanzar el desplazamiento de 238 m fue de 16.31°.

La perforación direccional de la tercera etapa con barrena bicéntrica 10 5/8" x 12 1/4" atravesó las formaciones Depósito, Oligoceno, Eoceno y Paleoceno las cuales forman la zona de presión anormal alta del campo.

Los ensambles de fondo empleados (BHA) y sus rendimientos se muestran en la tabla 2.1.1

**Tabla 2.1.1 Rendimientos de Ensamblajes de fondo empleados**

| Sarta navegable            | BHA1                                                     | BHA2        | BHA3             |
|----------------------------|----------------------------------------------------------|-------------|------------------|
| Barrena                    | Bicentrica de 10 5/8" x 12 1/4", marca SMITH, tipo S223, |             |                  |
| Motor                      | 8"                                                       | 8"          | 8"               |
| Marca                      | MF-BICO                                                  | MF-P150-XL  | MF-P150-XL       |
| Graduado a                 | 1.15                                                     | 1.5         | 0.78°            |
| DC Monel                   | 8"                                                       | 8"          | 8"               |
| MWD                        | 8"                                                       | 8"          | 8"               |
| 3 DCN                      | 8"                                                       | 8"          | 8"               |
| Martillo                   | 8"                                                       | 8"          | 8"               |
| 15 HW                      | 5"                                                       | 5"          | 5"               |
| TP                         | 5"                                                       | 5"          | 5"               |
| GPM                        | 460                                                      | 460         | 460              |
| PB (psi)                   | 2800                                                     | 2800        | 2800             |
| PSB (ton)                  | 2-4                                                      | 3-4         | 3-5              |
| Tipo de lodo               | E.I.                                                     | E.I.        | E.I.             |
| Densidad lodo              | 2.03                                                     | 2.03        | 2.03             |
| Formación                  | DEP-OLIG-EOCENO                                          | EOCENO      | EOCENO-PALEOCENO |
| Intervalo                  | 2645-4206                                                | 4206-4213   | 4213-4310        |
| Construcción               | 1.8°-19.4°                                               | 19.4°-19.4° | 19.4°-19.90      |
| Rumbo                      | 240° a 24°                                               | 24° a 24°   | 24° a 24.9°      |
| Desplazam. Alcanzado (m)   | 190                                                      | 190         | 201              |
| Metros Perforados          | <b>1561</b>                                              | <b>7</b>    | <b>97</b>        |
| Horas de Perforación       | <b>311</b>                                               | <b>11</b>   | <b>29</b>        |
| ROP m/hora                 | <b>5.01</b>                                              | <b>0.63</b> | <b>3.34</b>      |
| Promedio m/día acumulativo | <b>116.50</b>                                            | <b>6</b>    | <b>50.77</b>     |

El rendimiento del ensamble BHA1 fue muy bueno perforó 1561 m en 311 horas. El BHA2 perforó solo 7 m por falla del motor de fondo.

Un parámetro de medición del rendimiento de los ensambles de fondo es el promedio metro/día acumulativo, el cual indica la tasa de metros perforados por día en una determinada formación o etapa considerando el número de ensambles utilizados (número de viajes).

El comportamiento de este parámetro en el desarrollo de la perforación direccional del pozo Sen 37 se muestra en la siguiente tabla 2.1.2

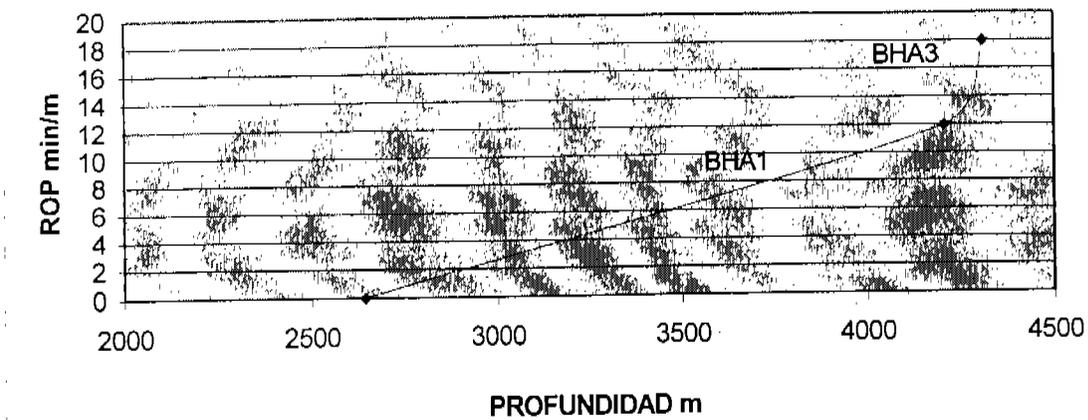
**Tabla 2.1.2 Rendimiento metros/día acumulativo**

| Sarta                                 | Fecha    | Profundidad | Metros perforados | Horas de perforación | Horas Acum | Horas Viaje | Horas Acum Viaje | Metros Acum | metros/día    | FORM                                   |
|---------------------------------------|----------|-------------|-------------------|----------------------|------------|-------------|------------------|-------------|---------------|----------------------------------------|
|                                       | 15/01/00 | 2645        | 0                 | 0                    | 0          |             |                  |             |               | <b>DEP</b>                             |
|                                       | 16/01/00 | 2650        | 5                 | 1                    | 1          | 10.58       | 10.58            | 5           | 10.36         |                                        |
|                                       | 17/01/00 | 2857        | 207               | 24                   | 25         | 0           | 10.58            | 212         | 143.00        | <b>E<br/>O<br/>C<br/>E<br/>N<br/>O</b> |
|                                       | 18/01/00 | 3101        | 244               | 24                   | 49         | 0           | 10.58            | 456         | 183.69        |                                        |
|                                       | 19/01/00 | 3300        | 199               | 19                   | 68         | 0           | 10.58            | 655         | 200.05        |                                        |
|                                       | 20/01/00 | 3520        | 220               | 24                   | 92         | 0           | 10.58            | 875         | 204.72        |                                        |
|                                       | 21/01/00 | 3634        | 114               | 24                   | 116        | 0           | 10.58            | 989         | 187.52        |                                        |
| <b>BHA1</b>                           | 22/01/00 | 3714        | 80                | 24                   | 140        | 0           | 10.58            | 1069        | 170.38        |                                        |
|                                       | 23/01/00 | 3766        | 52                | 22                   | 162        | 0           | 10.58            | 1121        | 155.89        |                                        |
|                                       | 24/01/00 | 3835        | 69                | 23                   | 185        | 0           | 10.58            | 1190        | 146.03        |                                        |
|                                       | 25/01/00 | 3899        | 64                | 23                   | 208        | 0           | 10.58            | 1254        | 137.69        |                                        |
|                                       | 26/01/00 | 3969        | 70                | 19                   | 227        | 0           | 10.58            | 1324        | 133.75        |                                        |
|                                       | 27/01/00 | 4021        | 52                | 24                   | 251        | 0           | 10.58            | 1376        | 126.25        |                                        |
|                                       | 28/01/00 | 4074        | 53                | 24                   | 275        | 0           | 10.58            | 1429        | 120.09        |                                        |
|                                       | 29/01/00 | 4169        | 95                | 24                   | 299        | 0           | 10.58            | 1524        | 118.15        |                                        |
|                                       | 30/01/00 | 4206        | 37                | 12                   | 311        | 0           | 10.58            | 1561        | 116.50        |                                        |
|                                       | 31/01/00 | 4206        | 0                 | 0                    | <b>311</b> | 0           | 10.58            | <b>1561</b> | <b>116.50</b> |                                        |
| <b>BHA2</b>                           | 1/02/00  | 4209        | 3                 | 6                    | 6          | 16.824      | 16.824           | 3           | 3.15          | <b>PAL</b>                             |
|                                       | 2/02/00  | 4213        | 4                 | 5                    | <b>11</b>  | 0           | 16.824           | <b>7</b>    | <b>6.04</b>   |                                        |
| <b>BHA3</b>                           | 3/02/00  | 4236        | 23                | 14                   | 14         | 16.852      | 16.852           | 23          | 17.89         |                                        |
|                                       | 4/02/00  | 4310        | 74                | 15                   | <b>29</b>  | 0           | 16.852           | <b>97</b>   | <b>50.77</b>  |                                        |
| <b>PROMEDIO METRO/DIA ACUMULATIVO</b> |          |             |                   |                      | 351        |             | 44.256           | 1665        | <b>101.10</b> |                                        |

El promedio metros/día acumulativo de la perforación direccional de la Tercera Etapa es de 101.10, es un rendimiento bastante bueno para el campo Sen.

La velocidad de penetración ROP efectuada por cada BHA se muestra en la siguiente gráfica 2.1.3

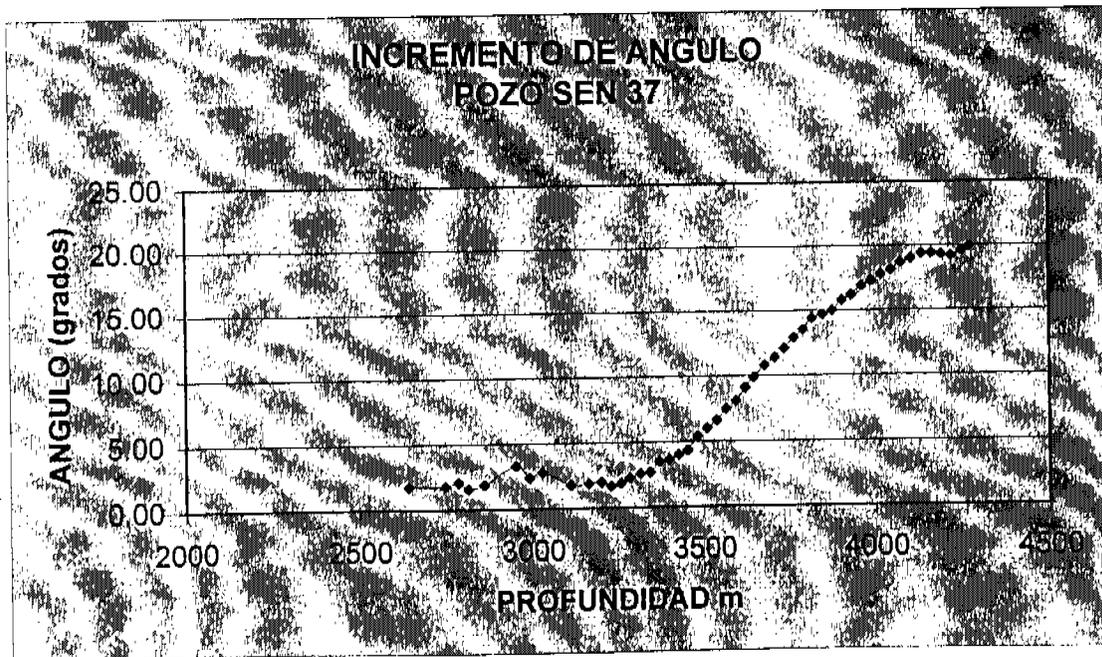
VELOCIDAD DE PENETRACIÓN POR CADA BHA  
POZO SEN 37



Gráfica 2.1.3 Velocidad de penetración por cada BHA pozo Sen 37

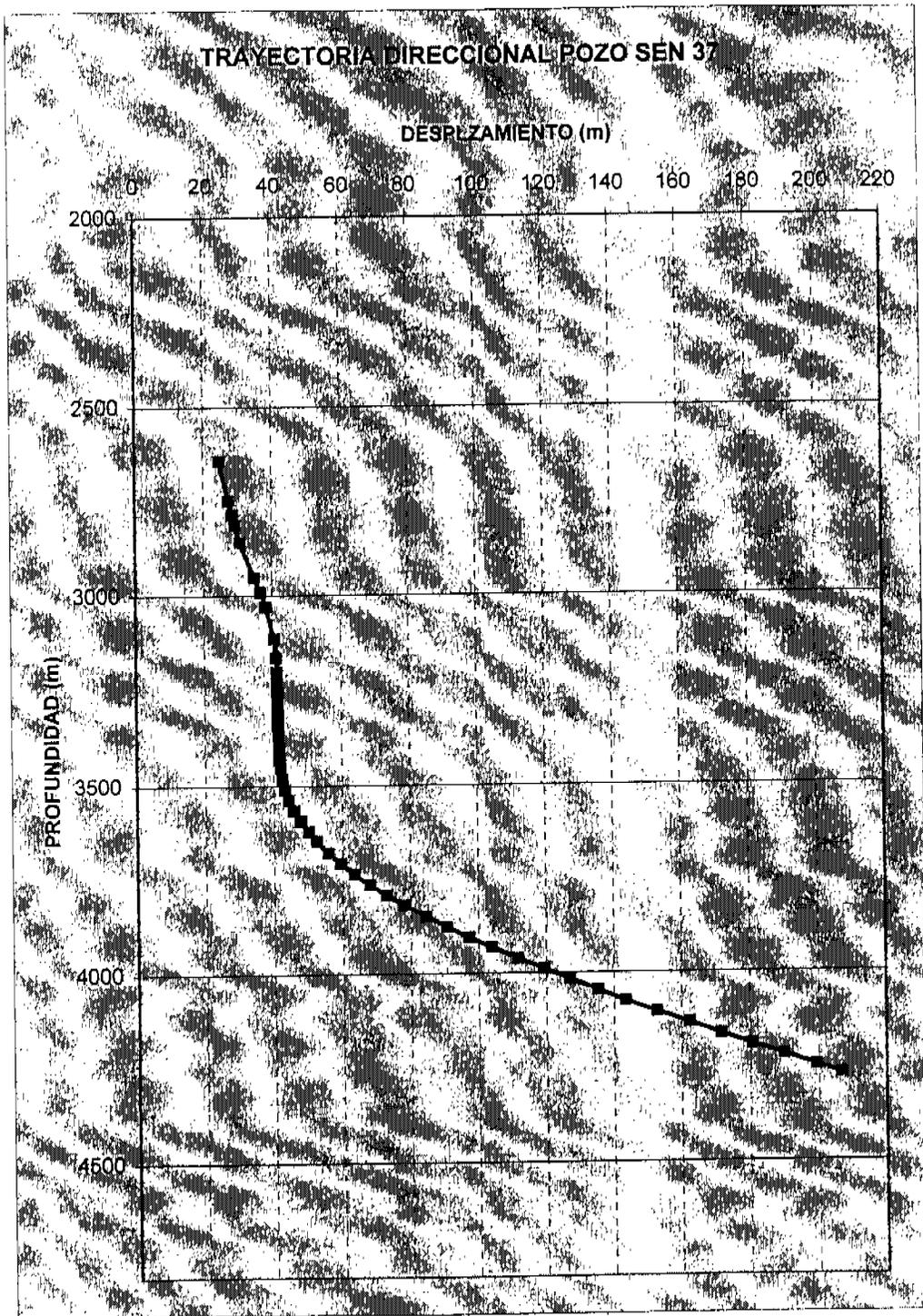
El BHA2 no se consideró por no ser representativo debido a que este ensamble sólo perforó 7 m por falla del motor de fondo

El trabajo de incremento de ángulo lo efectúa el BHA1 a un buen ritmo de penetración como se muestra en la siguiente gráfica 2.1.4



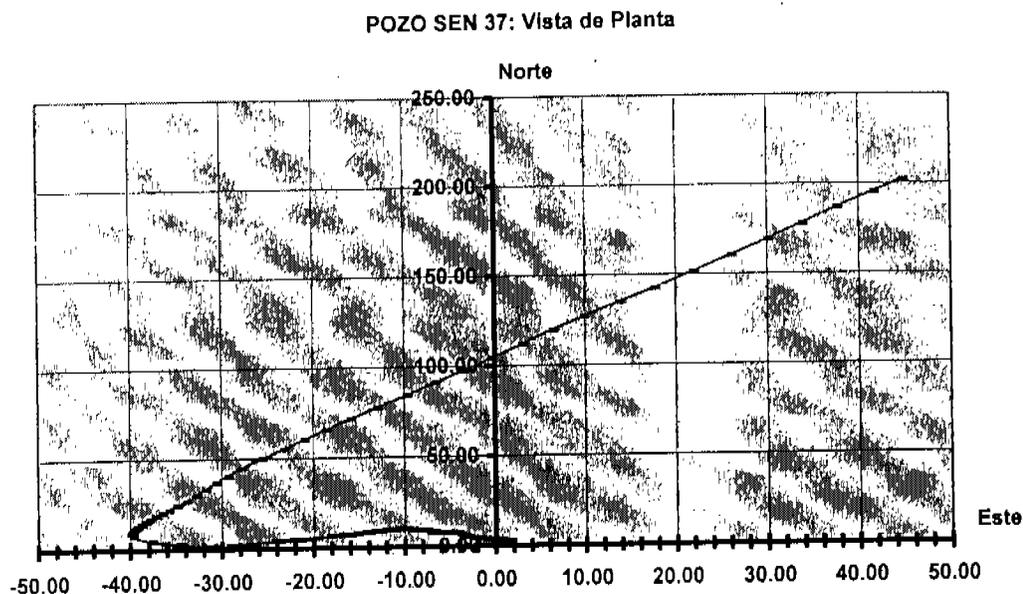
Gráfica 2.1.4 Incremento del ángulo pozo Sen 37

El desarrollo de la Trayectoria tipo "Slant" se logró alcanzando un desplazamiento de 206 m (gráfica 2.1.5)



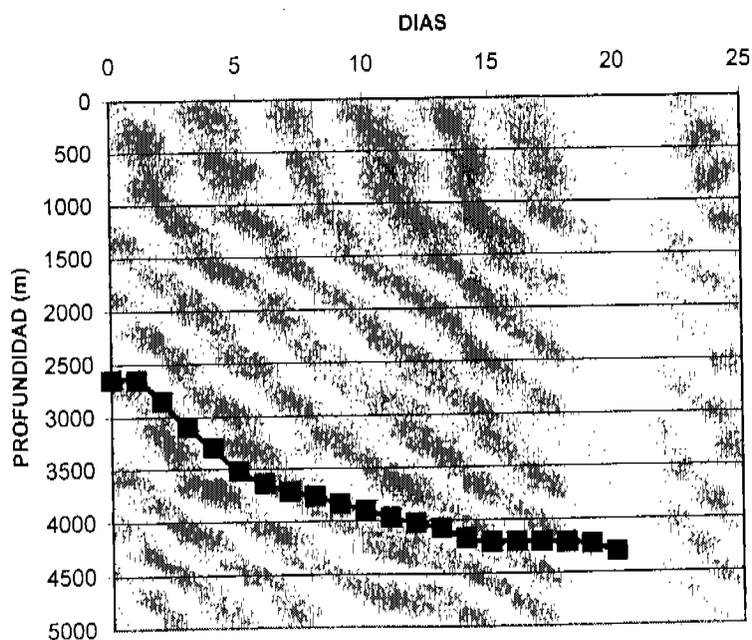
Gráfica 2.1.5 Trayectoria direccional pozo Sen 37

El pozo tendía girarse a la derecha quedando el rumbo N 24.9°E a 4310 m, el rumbo planeado era N 20.65° E (ver gráfica 2.1.5)



Gráfica 2.1.5 Vista de planta pozo Sen 37

La tercera etapa del pozo Sen 37 se perforó en 20 días la gráfica 2.1.6 muestra la tasa de profundidad con respecto al tiempo en días.



Gráfica 2.1.6 Tiempo de perforación de la tercera etapa pozo Sen 37

Las barrenas bicéntricas de 10 5/8" x 12 1/4" de la marca SMITH utilizadas en la perforación direccional de la tercera etapa del pozo sen 37 tienen las siguientes características:

| TIPO IADC | DIÁMETRO PILOTO | No. DE CORTADORES | TAMAÑO DE CORTADORES | LONGITUD |
|-----------|-----------------|-------------------|----------------------|----------|
| S223      | 7.8"            | 49/11             | 16mm/13mm            | 16.1"    |

El record de las barrenas bicéntricas utilizadas en la perforación es el siguiente:

| No. serie | Toberas   | Profundidad salida (m) | Metros Perforados | Horas de rotación | ROP (m/hora) | PSB ton. | RPM |
|-----------|-----------|------------------------|-------------------|-------------------|--------------|----------|-----|
| JR6681    | 6, 11/32" | 4206                   | 1561              | 187.6             | 8.3          | 3-4      | 70  |
|           | 3, 12/32" |                        |                   |                   |              |          | 150 |
| JR7939    | 7, 12/32" | 4310                   | 104               | 28.1              | 3.7          | 4-6      | 60  |
|           | 2, 13/32" |                        |                   |                   |              |          | 140 |

### 2.3.2 Pozo Sen 51

En este pozo la perforación de la tercera etapa en forma direccional se planeó como contingencia debido a que el pozo encontró un domo salino a 3549 m.

Se redireccionó el pozo cambiando de objetivo a 575.84 m del original, con rumbo de N 69.68° W hacia el pozo sen 71.

La trayectoria planeada fue tipo "S", el inicio de desviación (KOP) a 2132 m, el ángulo máximo planeado para alcanzar el desplazamiento de 307 m, en esta etapa, fue de 18.05° y un rumbo de N 71.5° W.

Para la perforación de esta etapa se emplearon 8 BHA dos de ellos fueron sartas orientadas y seis sartas navegables con motor de fondo.

Los (BHA) con motor de fondo utilizados en el pozo Sen 51 y sus rendimientos se muestran en la tabla 2.1.7

**Tabla 2.1.7 Rendimientos de Ensamblajes de fondo empleados con motor**

| Sarta navegable            | BHA1                                                     | BHA2          | BHA4          | BHA5            | BHA6          | BHA8        |
|----------------------------|----------------------------------------------------------|---------------|---------------|-----------------|---------------|-------------|
| Barrena                    | Bicentrica de 10 5/8" x 12 1/4", marca SMITH, tipo S223, |               |               |                 |               |             |
| Motor                      | 8"                                                       | 8"            | 8"            | 8"              | 7 3/4"        | 7 3/4"      |
| Marca                      | Black Max                                                | Black Max     | Black Max     | Black Max       | TRUDRILL      | TRUDRILL    |
| Graduado a                 | 0.78°                                                    | 0.78°         | 0.78°         | 0.78°           | 1.25°         | 1.25°       |
| DC Monel                   | 8"                                                       | 8"            | 8"            | 8"              | 8"            | 8"          |
| MWD                        | 8"                                                       | 8"            | 8"            | 8"              | 8"            | 8"          |
| DCN                        | -----                                                    | -----         | -----         | -----           | -----         | 8"          |
| Martillo                   | 8"                                                       | 8"            | 8"            | 8"              | 8"            | 8"          |
| TP                         | 5 1/2"                                                   | 5 1/2"        | 5 1/2"        | 5 1/2"          | 5 1/2"        | 5 1/2"      |
| GPM                        | 558                                                      | 558           | 465           | 465             | 511           | 511         |
| PB (psi)                   | 2450                                                     | 2450          | 2300          | 2500            | 2500          | 2500        |
| PSB (ton)                  | 1-2                                                      | 1-2           | 1-2           | 1-2             | 1-2           | 1-2         |
| Tipo de lodo               | E.I.                                                     | E.I.          | E.I.          | E.I.            | E.I.          | E.I.        |
| Densidad lodo              | 2.01                                                     | 2.01          | 2.03          | 2.03            | 2.05          | 2.07        |
| Formación                  | C.SUP.                                                   | C. INF.       | DEP-OLIG      | OLIG            | OLIG          | EOCENO      |
| Intervalo                  | 2144-2366                                                | 2366-2693     | 2851-2970     | 2970-3040       | 3040-3108     | 3295-3550   |
| Construcción               | 1.70°-4.20°                                              | 4.20°-9.90°   | 11.5°-11.6    | 11.6°-10.4°     | 10.4°-10.9°   | 14.3°-12.2° |
| Rumbo                      | 358° a 298°                                              | 298° a 291.5° | 300° a 294.6° | 294.6° a 287.5° | 287.5° a 285° | 305° a 286° |
| Desplazam. Alcanzado (m)   | 12.51                                                    | 56.63         | 116           | 130             | 135           | 238         |
| Metros Perf.               | 234                                                      | 327           | 119           | 70              | 68            | 255         |
| Horas Perf.                | 90.3                                                     | 94            | 52            | 35              | 51            | 121         |
| ROP m/hora                 | 2.59                                                     | 3.48          | 2.29          | 2.00            | 1.33          | 2.11        |
| Promedio m/dia acumulativo | 56.86                                                    | 75.85         | 45            | 35.84           | 25.84         | 45.61       |

De los BHA con motor de fondo el BHA2 fue el de mejor rendimiento aun construyendo la curva.

Los ensambles de fondo orientados utilizados en el pozo Sen 51 y sus rendimientos se muestran en la tabla 2.1.8

**Tabla 2.1.8 Rendimientos de Ensambls de fondo orientados**

| Sarta orientada            | BHA3                          |
|----------------------------|-------------------------------|
| Barrena Bicentrica         | 10 5/8" x 12 1/4", tipo S223, |
| Pta. Bna. Estab.           | 8"                            |
| Monel                      | 8"                            |
| MWD                        | 8"                            |
| DC monel                   | 8"                            |
| Estabilizador              | 8"x 10 5/8"                   |
| DCC                        | 8"                            |
| DCC                        | 8"                            |
| Estabilizador              | 8"x 10 5/8"                   |
| 4 DCN                      | 8"                            |
| Martillo                   | 8"                            |
| TP                         | 5 1/2"                        |
| GPM                        | 465                           |
| PB (psi)                   | 1800                          |
| PSB (ton)                  | 10                            |
| RPM                        | 90                            |
| Tipo de lodo               | E.I.                          |
| Densidad lodo              | 2.03                          |
| Formación                  | DEP                           |
| Intervalo                  | 2693-2851                     |
| Construcción               | 9.9°-11.5°                    |
| Rumbo                      | 291.5°-300°                   |
| Desplaza. Alcanzado        | 79.69                         |
| Metros Perf.               | 158                           |
| Horas Perf.                | 18                            |
| ROP m/hora                 | 8.78                          |
| Promedio m/día acumulativo | 131.79                        |

| Sarta orientada            | BHA7                          |
|----------------------------|-------------------------------|
| Barrena Bicentrica         | 10 5/8" x 12 1/4", tipo S223, |
| Estabilizador invertido    | 8"                            |
| Doble caja                 | 8"                            |
| 2 DCN                      | 6 1/2"                        |
| Estabilizador              | 8"x 10 5/8"                   |
| DCN                        | 8"                            |
| Estabilizador              | 8"x 10 5/8"                   |
| DC monel                   | 8"                            |
| MWD                        | 8"                            |
| 6 DCN                      | 8"                            |
| Martillo                   | 8"                            |
| TP                         | 5 1/2"                        |
| GPM                        | 511                           |
| PB (psi)                   | 2400                          |
| PSB (ton)                  | 13                            |
| RPM                        | 130                           |
| Tipo de lodo               | E.I.                          |
| Densidad lodo              | 2.07                          |
| Formación                  | EOCENO                        |
| Intervalo                  | 3108-3295                     |
| Construcción               | 10.9°-14.3°                   |
| Rumbo                      | 285°-305°                     |
| Desplaza. Alcanzado        | 178                           |
| Metros Perf.               | 187                           |
| Horas Perf.                | 22                            |
| ROP m/hora                 | 8.5                           |
| Promedio m/día acumulativo | 130.3                         |

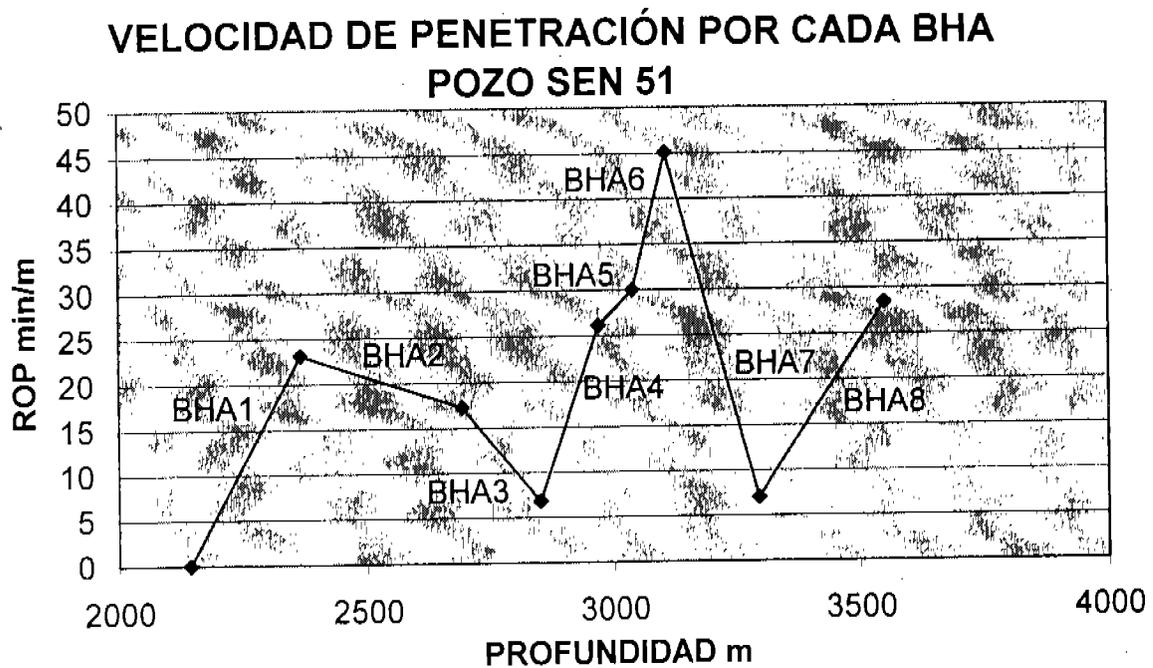
El comportamiento promedio metros/día acumulativo en el desarrollo de la perforación direccional del pozo Sen 51 se muestra en la siguiente tabla 2.1.9

Tabla 2.1.9 Rendimiento metros/día acumulativo

| Sarta                      | Fecha    | Profundidad (m) | Metros Perf | Horas Perf | Horas Acum | Hrs Viaje | Hrs Acum Viaje | Metros Acum | metros/día | FORM                       |
|----------------------------|----------|-----------------|-------------|------------|------------|-----------|----------------|-------------|------------|----------------------------|
|                            | 12/05/00 | 2132            | 0           | 0          | 0          |           |                |             |            | C.                         |
|                            | 13/05/00 | 2144            | 12          | 4          | 4          | 8.528     | 8.528          | 12          | 22.99      |                            |
|                            | 14/05/00 | 2188            | 44          | 22         | 26         | 0         | 8.528          | 56          | 38.92      |                            |
| BHA1                       | 15/05/00 | 2204            | 16          | 8.3        | 34.3       | 0         | 8.528          | 72          | 40.35      |                            |
| Sarta                      | 16/05/00 | 2204            | 0           | 0          | 34.3       | 0         | 8.528          | 72          | 40.35      |                            |
| Navegable                  | 17/05/00 | 2204            | 0           | 0          | 34.3       | 0         | 8.528          | 72          | 40.35      |                            |
|                            | 18/05/00 | 2204            | 0           | 0          | 34.3       | 0         | 8.528          | 72          | 40.35      |                            |
|                            | 19/05/00 | 2266            | 62          | 19         | 53.3       | 0         | 8.528          | 134         | 52.02      |                            |
|                            | 20/05/00 | 2330            | 64          | 22         | 75.3       | 0         | 8.528          | 198         | 56.69      |                            |
|                            | 21/05/00 | 2366            | 36          | 15         | 90.3       | 0         | 8.528          | 234         | 56.83      |                            |
|                            | 22/05/00 | 2382            | 16          | 4          | 4          | 9.464     | 9.464          | 16          | 28.52      |                            |
|                            | 23/05/00 | 2477            | 95          | 21         | 25         | 0         | 9.464          | 111         | 77.30      |                            |
| BHA2                       | 24/05/00 | 2561            | 84          | 21         | 46         | 0         | 9.464          | 195         | 84.38      |                            |
| Sarta                      | 25/05/00 | 2611            | 50          | 14         | 60         | 0         | 9.464          | 245         | 84.65      |                            |
| Navegable                  | 26/05/00 | 2655            | 44          | 16         | 76         | 0         | 9.464          | 289         | 81.16      |                            |
|                            | 27/05/00 | 2693            | 38          | 18         | 94         | 0         | 9.464          | 327         | 75.85      |                            |
|                            | 28/05/00 | 2693            | 0           | 0          | 94         | 0         | 9.464          | 327         | 75.85      |                            |
| BH3                        | 29/05/00 | 2851            | 158         | 18         | 18         | 10.772    | 10.772         | 158         | 131.79     |                            |
| Sarta                      | 30/05/00 | 2851            | 0           | 0          | 18         | 0         | 10.772         | 158         | 131.79     |                            |
| Orientada                  | 31/05/00 | 2851            | 0           | 0          | 18         | 0         | 10.772         | 158         | 131.79     |                            |
|                            | 1/06/00  | 2874            | 23          | 8          | 8          | 11.404    | 11.404         | 23          | 28.45      |                            |
| BHA4                       | 2/06/00  | 2920            | 46          | 23         | 31         | 0         | 11.404         | 69          | 39.05      |                            |
| Sarta                      | 3/06/00  | 2970            | 50          | 21         | 52         | 0         | 11.404         | 119         | 45.04      |                            |
| Navegable                  | 4/06/00  | 2970            | 0           | 0          | 52         | 0         | 11.404         | 119         | 45.04      |                            |
| BHA5                       | 5/06/00  | 3004            | 34          | 13         | 13         | 11.88     | 11.88          | 34          | 32.80      |                            |
| Sarta                      | 6/06/00  | 3040            | 36          | 22         | 35         | 0         | 11.88          | 70          | 35.84      |                            |
| Navegable                  | 7/06/00  | 3040            | 0           | 0          | 35         | 0         | 11.88          | 70          | 35.84      |                            |
|                            | 8/06/00  | 3075            | 35          | 22         | 22         | 12.16     | 12.16          | 35          | 24.59      |                            |
| BHA6                       | 9/06/00  | 3102            | 27          | 23         | 45         | 0         | 12.16          | 62          | 26.03      |                            |
| Sarta                      | 10/06/00 | 3108            | 6           | 6          | 51         | 0         | 12.16          | 68          | 25.84      |                            |
| Navegable                  | 11/06/00 | 3108            | 0           | 0          | 51         | 0         | 12.16          | 68          | 25.84      |                            |
|                            | 12/06/00 | 3108            | 0           | 0          | 51         | 0         | 12.16          | 68          | 25.84      |                            |
| BHA7                       | 13/06/00 | 3184            | 76          | 9          | 9          | 12.432    | 12.432         | 76          | 85.11      |                            |
| Sarta                      | 14/06/00 | 3295            | 111         | 13         | 22         | 0         | 12.432         | 187         | 130.34     |                            |
| Orientada                  | 15/06/00 | 3295            | 0           | 0          | 22         | 0         | 12.432         | 187         | 130.34     |                            |
|                            | 16/06/00 | 3339            | 44          | 20         | 20         | 13.18     | 13.18          | 44          | 31.83      |                            |
| BHA8                       | 17/06/00 | 3393            | 54          | 21         | 41         | 0         | 13.18          | 98          | 43.41      |                            |
| Sarta                      | 18/06/00 | 3440            | 47          | 23         | 64         | 0         | 13.18          | 145         | 45.09      |                            |
| Navegable                  | 19/06/00 | 3478            | 38          | 23         | 87         | 0         | 13.18          | 183         | 43.84      |                            |
|                            | 20/06/00 | 3520            | 42          | 22         | 109        | 0         | 13.18          | 225         | 44.20      |                            |
|                            | 21/06/00 | 3550            | 30          | 12         | 121        | 0         | 13.18          | 255         | 45.61      |                            |
| PROMEDIO M/DIA ACUMULATIVO |          |                 |             |            |            | 483.3     | 89.82          | 1418        | 59.38      | E<br>O<br>C<br>E<br>N<br>O |

El promedio metros/día acumulativo de la perforación direccional de la Tercera Etapa del pozo Sen 51 es de 59.38.

La velocidad de penetración ROP efectuada por cada BHA se muestra en la siguiente gráfica 2.1.10

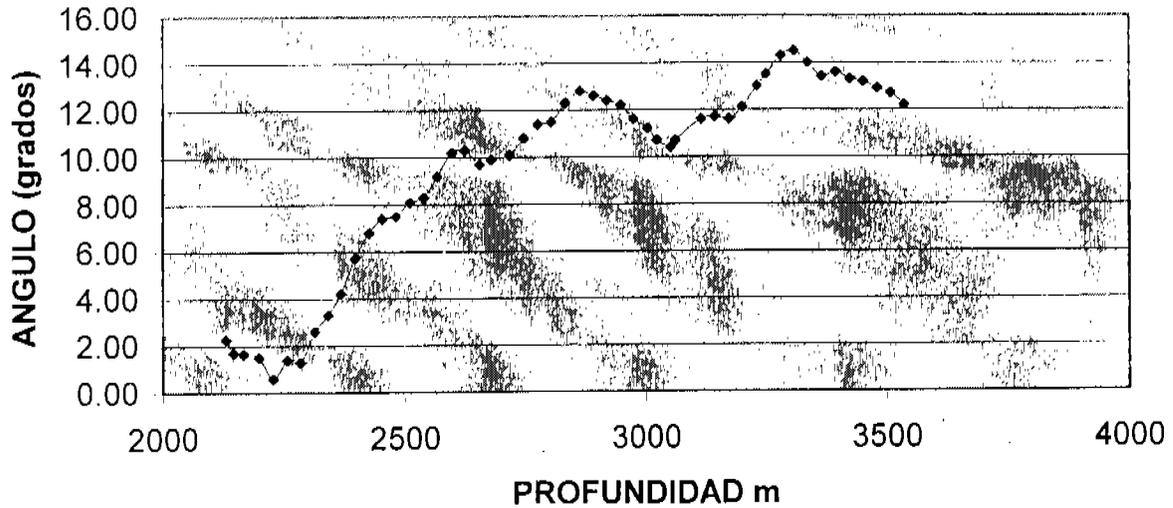


Gráfica 2.1.10 Velocidad de penetración por cada BHA pozo Sen 51

Los BHA 3 Y 7 orientados efectuaron mejores tiempos de penetración, teniendo buena respuesta en la construcción del ángulo, sin embargo no mantenían el rumbo.

El trabajo de incremento de ángulo con respecto a la profundidad se muestra en la siguiente grafica 2.1.11

## INCREMENTO DE ANGULO POZO SEN 51

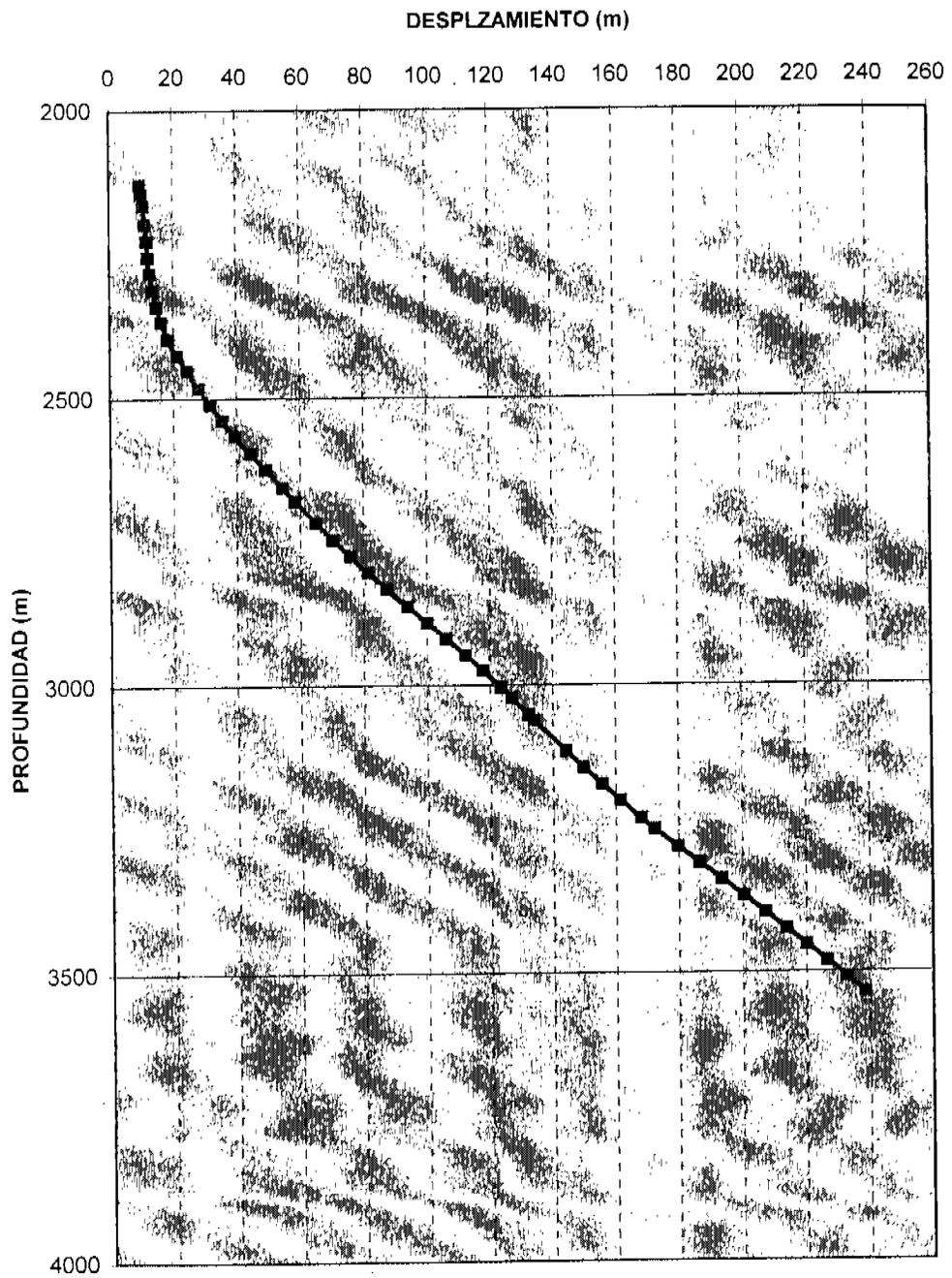


Gráfica 2.1.11 Incremento de ángulo pozo Sen 51

Puede observarse que con los BHA 4 , 5 y 6 se incrementaron los tiempos de penetración gradualmente y la construcción del incremento del ángulo disminuyó.

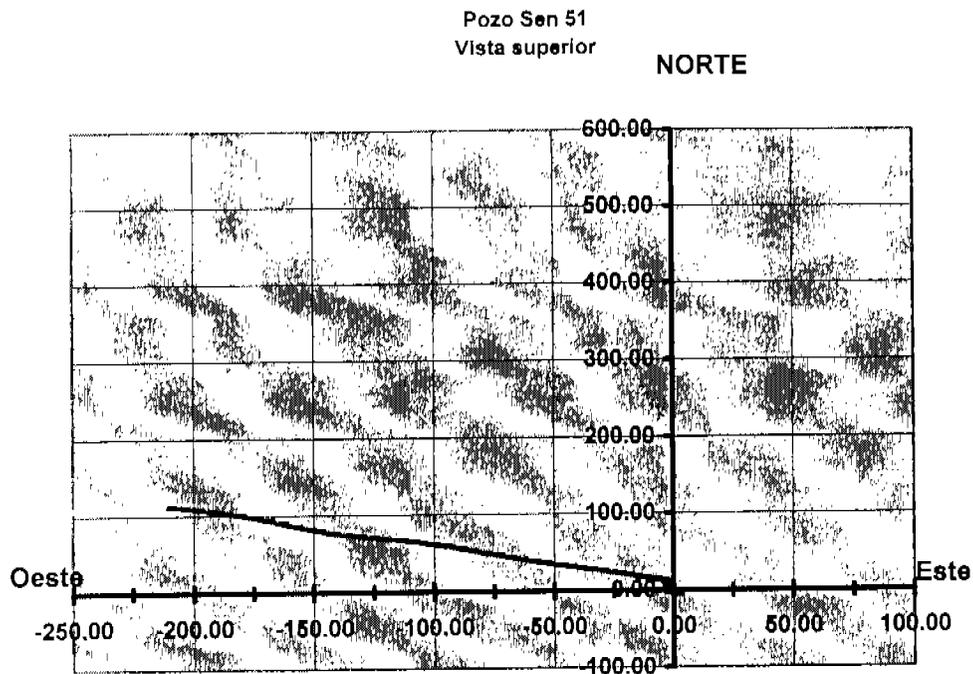
El desarrollo de la Trayectoria tipo "S" en la etapa de incrementar el ángulo se había planeado levantar el ángulo a  $18.0^{\circ}$  a la profundidad de 3550 m para obtener un desplazamiento horizontal de 307 m y en la realidad el ángulo máximo que alcanzó fue de  $14.3^{\circ}$  cayendo a  $12^{\circ}$  a 3550m alcanzando un desplazamiento horizontal de 238 m (ver gráfica 2.1.12)

# TRAYECTORIA DIRECCIONAL POZO SEN 51



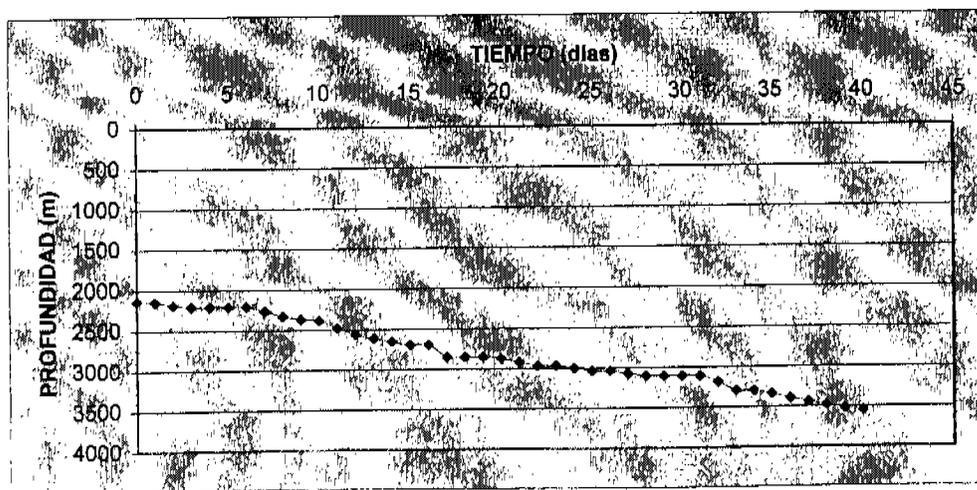
Gráfica 2.1.12 Trayectoria direccional pozo Sen 51

El pozo tendía a girarse a la derecha ligeramente del rumbo planeado N 72 °W. A 3550 m el rumbo real fue de N 74° W (ver gráfica 2.1.13).



Gráfica 2.1.13 Vista superior pozo Sen 51

La tercera etapa del pozo Sen 51 se perforó en 40 días la gráfica 2.1.14 muestra la tasa de profundidad con respecto al tiempo en días.



Gráfica 2.1.14 Tiempo de perforación de la tercera etapa pozo Sen 51

Las barrenas bicéntricas de 10 5/8" x 12 1/4" de la marca SMITH utilizadas en la perforación direccional de la tercera etapa del pozo Sen 51 tienen las siguientes características:

| TIPO IADC | DIÁMETRO PILOTO | No. DE CORTADORES | TAMAÑO DE CORTADORES | LONGITUD |
|-----------|-----------------|-------------------|----------------------|----------|
| S223      | 7.8"            | 49/11             | 16mm/13mm            | 16.1"    |

El record de las barrenas bicéntricas utilizadas en perforación es el siguiente:

| No. serie | Toberas   | Profundidad salida (m) | Metros Perforados | Horas de rotación | ROP (m/hora) | PSB ton. | RPM |
|-----------|-----------|------------------------|-------------------|-------------------|--------------|----------|-----|
| JR8587    | 5, 10/32" | 2851                   | 719               | 168               | 4.3          | 1-3      | 70  |
|           | 4, 12/32" |                        |                   |                   |              | 6-10     | 150 |
| JR7939    | 7, 12/32" | 3550                   | 699               | 212               | 3.3          | 1-3      | 60  |
|           | 2, 13/32" |                        |                   |                   |              | 8-14     | 140 |

### 2.3.3 Pozo Sen 111

La perforación de la tercera etapa en forma direccional, de este pozo, se planeó como contingencia debido a que el pozo se encontró bajo estructural .

Se redireccionó el pozo cambiando de objetivo a 300 m, S64.5E del conductor.

La trayectoria planeada fue tipo "Slant", el inicio de desviación (KOP) a 3480 m, el ángulo máximo planeado para alcanzar el desplazamiento de 80 m, en esta etapa, fue de 20.28° y un rumbo de S 63° E.

Para la perforación de esta etapa se emplearon 3 BHA con motor de fondo.

El rendimiento de los (BHA) con motor de fondo utilizados en la perforación direccional de la tercera etapa con barrena bicéntrica 10 5/8" x 12 1/4" del pozo Sen 111 se muestran en la tabla 2.1.15

**Tabla 2.1.15 Rendimientos de Ensamblajes de fondo empleados**

| Sarta navegable                   | BHA1                                                            | BHA2              | BHA3              |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|
| <b>Barrena</b>                    | <b>Bicéntrica de 10 5/8" x 12 1/4", marca SMITH, tipo S223,</b> |                   |                   |
| <b>Motor</b>                      | <b>8"</b>                                                       | <b>8"</b>         | <b>8"</b>         |
| <b>Marca</b>                      | POWER-PACK                                                      | POWER-PACK        | POWER-PACK        |
| <b>Graduado a</b>                 | 1.15                                                            | 1.5               | 1.5               |
| <b>Válvula Contrapresión</b>      | 8"                                                              | 8"                | 8"                |
| <b>FLEX JOINT</b>                 | -----                                                           | -----             | <b>6 5/8"</b>     |
| <b>DCC</b>                        | 8"                                                              | 8"                | -----             |
| <b>Estabilizador</b>              | 8" x 10 5/8"                                                    | 8" x 10 5/8"      | -----             |
| <b>UBHO</b>                       | 8"                                                              | 8"                | 8"                |
| <b>DC Monel</b>                   | 8"                                                              | 8"                | 8"                |
| <b>MWD</b>                        | 8"                                                              | 8"                | 8"                |
| <b>3 DCN</b>                      | 8"                                                              | 8"                | 8"                |
| <b>Martillo</b>                   | 8"                                                              | 8"                | 8"                |
| <b>12 HW</b>                      | 5"                                                              | 5"                | 5"                |
| <b>TP</b>                         | 5"                                                              | 5"                | 5"                |
| <b>GPM</b>                        | 460                                                             | 460               | 460               |
| <b>PB (psi)</b>                   | 2800                                                            | 2800              | 2800              |
| <b>PSB (ton)</b>                  | 2-4                                                             | 3-4               | 3-5               |
| <b>Tipo de lodo</b>               | E.I.                                                            | E.I.              | E.I.              |
| <b>Densidad lodo</b>              | 2.00                                                            | 1.98              | 1.96              |
| <b>Formación</b>                  | <b>OLIGOCENO</b>                                                | <b>OLIGOCENO</b>  | <b>OLIGO-EOC</b>  |
| <b>Intervalo</b>                  | 3480-3689                                                       | 3689-3761         | 3761-4060         |
| <b>Construcción</b>               | <b>2.28°-2.93°</b>                                              | <b>2.93°-3.2°</b> | <b>3.2°-16.42</b> |
| <b>Rumbo</b>                      | 350° a 65°                                                      | 65° a 93°         | 93° a 116°        |
| <b>Desplaza. Alcanzado (m)</b>    | 45                                                              | 49                | 32                |
| <b>Metros Perf.</b>               | <b>209</b>                                                      | <b>72</b>         | <b>299</b>        |
| <b>Horas Perf.</b>                | <b>113.69</b>                                                   | <b>55.39</b>      | <b>227.25</b>     |
| <b>ROP m/hora</b>                 | <b>1.84</b>                                                     | <b>1.30</b>       | <b>1.32</b>       |
| <b>Promedio m/día acumulativo</b> | <b>39.31</b>                                                    | <b>24.63</b>      | <b>29.62</b>      |

El BHA3 efectuó el trabajo de construcción de la curva incrementando el ángulo.

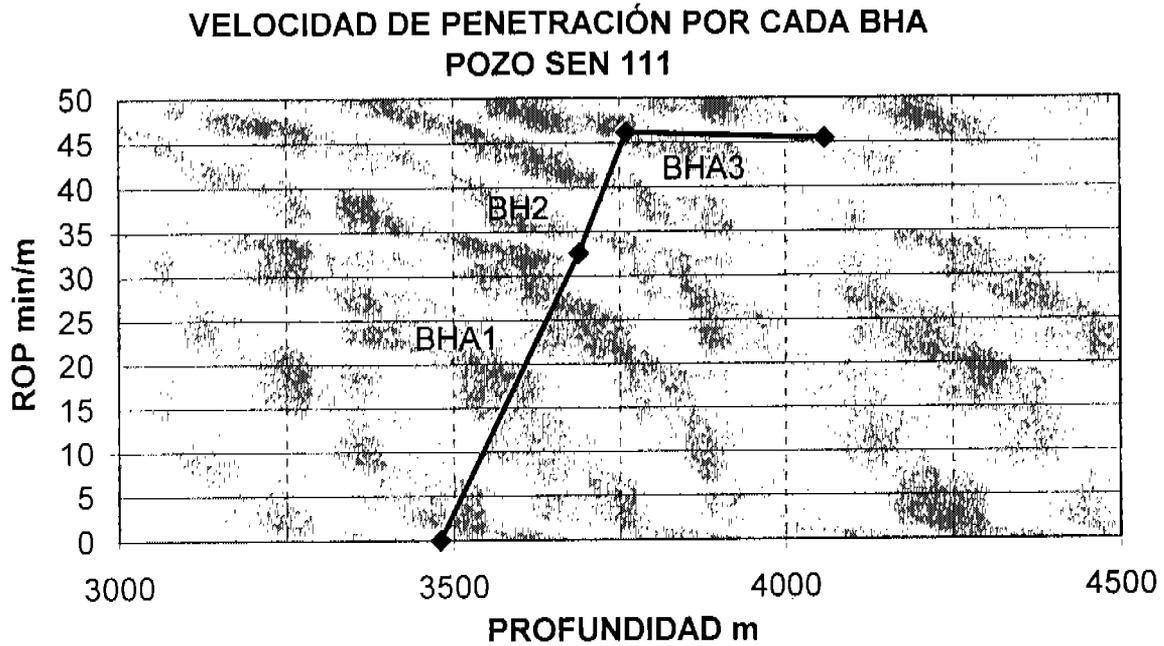
El promedio metros/día acumulativo en el desarrollo de la perforación direccional de la tercera etapa del pozo Sen 111 se muestra en la siguiente tabla 2.1.16

**Tabla 2.1.16 Rendimiento metros/día acumulativo**

| Sarta                                 | Fecha    | Profundidad | Metros Perf | Horas Perf | Horas Acum    | Hrs Viaje | Hrs Acum Viaje | Metros Acum | metros/día   | FORM |
|---------------------------------------|----------|-------------|-------------|------------|---------------|-----------|----------------|-------------|--------------|------|
|                                       | 22/11/00 | 3480        | 0           | 0          | 0             |           |                |             |              |      |
|                                       | 23/11/00 | 3491        | 11          | 1.2        | 1.2           | 13.92     | 13.92          | 11          | 17.46        |      |
|                                       | 24/11/00 | 3495        | 4           | 2.83       | 4.03          | 0         | 13.92          | 15          | 20.06        |      |
| <b>BHA1</b>                           | 25/11/00 | 3512        | 17          | 19.11      | 23.14         | 0         | 13.92          | 32          | 20.72        |      |
| <b>Sarta</b>                          | 26/11/00 | 3561        | 49          | 16.93      | 40.07         | 0         | 13.92          | 81          | 36.01        |      |
| <b>Navegable</b>                      | 27/11/00 | 3596        | 35          | 18.18      | 58.25         | 0         | 13.92          | 116         | 38.58        |      |
|                                       | 28/11/00 | 3643        | 47          | 19.16      | 77.41         | 0         | 13.92          | 163         | 42.83        |      |
|                                       | 29/11/00 | 3675        | 32          | 16.73      | 94.14         | 0         | 13.92          | 195         | 43.31        |      |
|                                       | 30/11/00 | 3689        | 14          | 19.55      | 113.69        | 0         | 13.92          | 209         | 39.31        |      |
|                                       | 1/12/00  | 3689        | 0           | 0          | <b>113.69</b> | 0         | 13.92          | <b>209</b>  | <b>39.31</b> |      |
|                                       | 2/12/00  | 3712        | 23          | 15.18      | 15.18         | 14.756    | 14.756         | 23          | 18.44        |      |
| <b>BHA2</b>                           | 3/12/00  | 3736        | 24          | 18.63      | 33.81         | 0         | 14.756         | 47          | 23.23        |      |
| <b>Sarta</b>                          | 4/12/00  | 3758        | 22          | 18.33      | 52.14         | 0         | 14.756         | 69          | 24.75        |      |
| <b>Navegable</b>                      | 5/12/00  | 3761        | 3           | 3.25       | 55.39         | 0         | 14.756         | 72          | 24.63        |      |
|                                       | 6/12/00  | 3761        | 0           | 0          | <b>55.39</b>  | 0         | 14.756         | <b>72</b>   | <b>24.63</b> |      |
|                                       | 7/12/00  | 3774        | 13          | 9.5        | 9.5           | 15.044    | 15.044         | 13          | 12.71        |      |
|                                       | 8/12/00  | 3795        | 21          | 15.75      | 25.25         | 0         | 15.044         | 34          | 20.25        |      |
|                                       | 9/12/00  | 3812        | 17          | 12.07      | 37.32         | 0         | 15.044         | 51          | 23.37        |      |
|                                       | 10/12/00 | 3817        | 5           | 4.5        | 41.82         | 0         | 15.044         | 56          | 23.64        |      |
|                                       | 11/12/00 | 3844        | 27          | 20.93      | 62.75         | 0         | 15.044         | 83          | 25.61        |      |
|                                       | 12/12/00 | 3870        | 26          | 21.25      | 84            | 0         | 15.044         | 109         | 26.41        |      |
| <b>BHA3</b>                           | 13/12/00 | 3890        | 20          | 17.25      | 101.25        | 0         | 15.044         | 129         | 26.62        |      |
| <b>Sarta</b>                          | 14/12/00 | 3904        | 14          | 12.91      | 114.16        | 0         | 15.044         | 143         | 26.56        |      |
| <b>Navegable</b>                      | 15/12/00 | 3904        | 0           | 0          | 114.16        | 0         | 15.044         | 143         | 26.56        |      |
|                                       | 16/12/00 | 3907        | 3           | 1.75       | 115.91        | 0         | 15.044         | 146         | 26.76        |      |
|                                       | 17/12/00 | 3916        | 9           | 6.25       | 122.16        | 0         | 15.044         | 155         | 27.11        |      |
|                                       | 18/12/00 | 3937        | 21          | 17.67      | 139.83        | 0         | 15.044         | 176         | 27.27        |      |
|                                       | 19/12/00 | 3951        | 14          | 13.33      | 153.16        | 0         | 15.044         | 190         | 27.11        |      |
|                                       | 20/12/00 | 3974        | 23          | 21.17      | 174.33        | 0         | 15.044         | 213         | 26.99        |      |
|                                       | 21/12/00 | 3991        | 17          | 20.08      | 194.41        | 0         | 15.044         | 230         | 26.35        |      |
|                                       | 22/12/00 | 4010        | 19          | 17.25      | 211.66        | 0         | 15.044         | 249         | 26.36        |      |
|                                       | 23/12/00 | 4054        | 44          | 13.42      | 225.08        | 0         | 15.044         | 293         | 29.28        |      |
|                                       | 24/12/00 | 4060        | 6           | 2.17       | <b>227.25</b> | 0         | 15.044         | <b>299</b>  | <b>29.62</b> |      |
| <b>PROMEDIO METRO/DÍA ACUMULATIVO</b> |          |             |             |            | <b>396.33</b> |           | <b>58.764</b>  | <b>580</b>  | <b>30.59</b> |      |

El promedio metros/día acumulativo de la perforación direccional de la Tercera Etapa del pozo Sen 111 es de 30.59.

La velocidad de penetración ROP efectuada por cada BHA se muestra en la siguiente gráfica 2.1.17

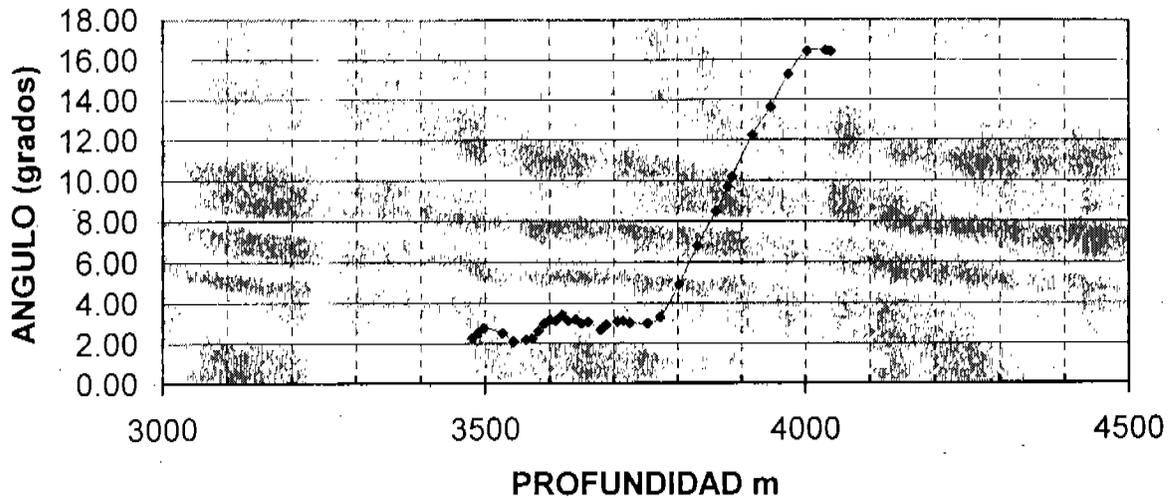


Gráfica 2.1.17 Velocidad de penetración por cada BHA Pozo Sen 111

Los BHA 1 Y 2 incrementaron los tiempos de penetración gradualmente. El BHA3 termina la etapa disminuyendo ligeramente los tiempos de penetración, teniendo buena respuesta en la construcción de la curva.

El trabajo de incremento de ángulo con respecto a la profundidad se muestra en la siguiente grafica 2.1.18

## INCREMENTO DE ANGULO POZO SEN 111

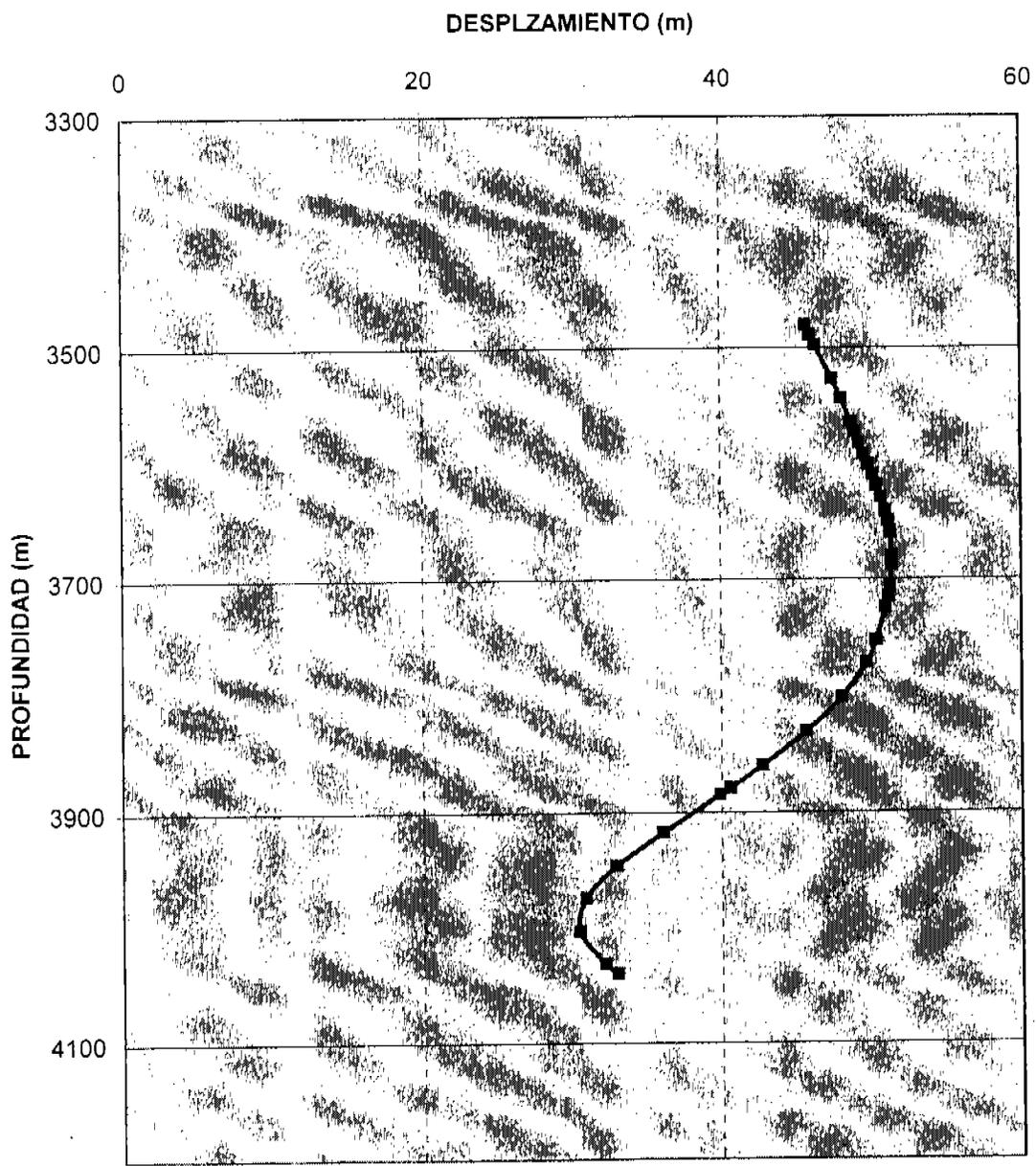


Gráfica 2.1.18 Incremento del ángulo pozo Sen 111

Puede observarse que los BHA 1 y 2 no cumplieron con su trabajo de incrementar el ángulo, perforaron aproximadamente 300 m entre los dos ensambles de fondo, intentando levantar el ángulo y sólo lograron incrementar de 2 a 3.8 grados haciendo altos tiempos de penetración. El BHA3 se modificó empleando una junta flexible arriba del motor de fondo (ver tabla 2.1.15) dando buena respuesta para incrementar el ángulo.

El desarrollo de la Trayectoria tipo "Slant" en la etapa de levantar el ángulo se había planeado levantar el ángulo a  $20.28^\circ$  a la profundidad de 4060 m para obtener un desplazamiento horizontal de 80 m y en la realidad el ángulo máximo que alcanzó fue de  $16.42^\circ$  a 4060 m alcanzando un desplazamiento horizontal de 32 m (ver gráfica 2.1.19).

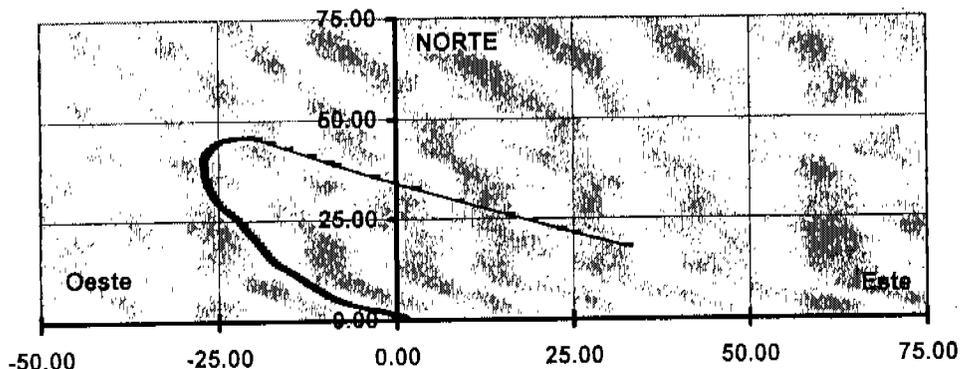
# TRAYECTORIA DIRECCIONAL POZO SEN 111



Gráfica 2.1.19 Trayectoria direccional pozo Sen 111

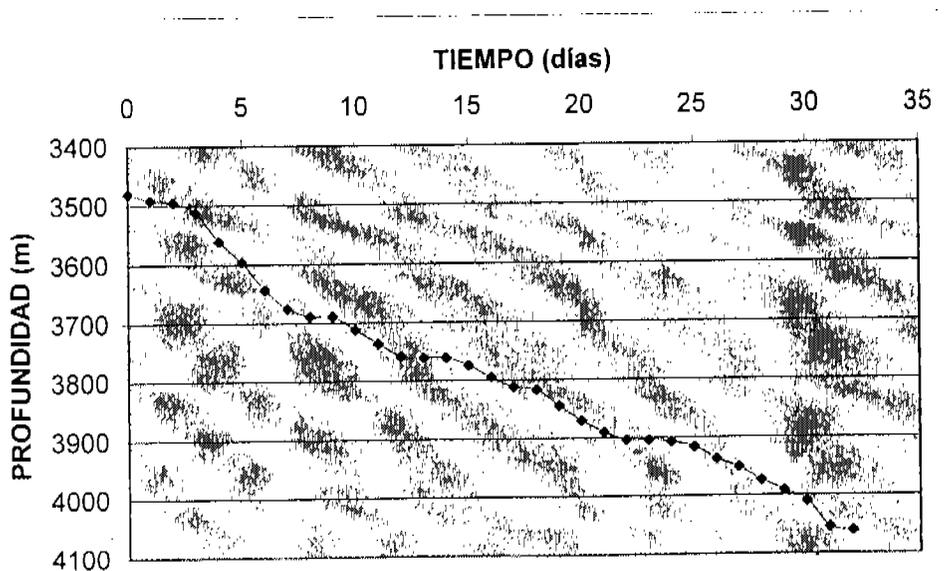
Debido a que el programa direccional fue de contingencia el pozo quedó con un rumbo contrario al requerido. En los primeros 300 m después del KOP se giró el pozo de N 10° W a S 64° E (ver gráfica 2.1.20).

Pozo Sen 111 Proyecto direccional etapa de 10 5/8" X 12 1/4"  
Vista superior



Gráfica 2.1.20 Vista superior pozo Sen 111

La tercera etapa del pozo Sen 111 se perforó en 32 días la gráfica 2.1.14 muestra la tasa de profundidad con respecto al tiempo en días.



Gráfica 2.1.14 Tiempo de perforación de la tercera etapa pozo Sen 111

Las barrenas bicéntricas de 10 5/8" x 12 1/4" de la marca SMITH utilizadas en la perforación direccional de la tercera etapa del pozo Sen 111 tienen las siguientes características:

| TIPO IADC | DIÁMETRO PILOTO | No. DE CORTADORES | TAMAÑO DE CORTADORES | LONGITUD |
|-----------|-----------------|-------------------|----------------------|----------|
| S223      | 7.8"            | 49/11             | 16mm/13mm            | 16.1"    |

El record de las barrenas bicéntricas utilizadas en al perforación es el siguiente:

| No. serie | Toberas   | Profundidad salida (m) | Metros Perforados | Horas de rotación | ROP (m/hora) | PSB ton. | RPM |
|-----------|-----------|------------------------|-------------------|-------------------|--------------|----------|-----|
| JR8369    | 5, 12/32" | 4060                   | 580               | 394               | 1.5          | 2-5      | 70  |
|           | 4, 14/32" |                        |                   |                   |              |          | 150 |

#### 2.3.4 Pozo Sen 71

El pozo Sen 71 fue el primer pozo de su campo planeado para perforarse direccionalmente a partir de la segunda etapa con barrena de 14 3/4", esto como una alternativa direccional con el propósito de evitar el trabajo de construcción de la curva y únicamente mantener y decrementar ángulo durante la tercera etapa con barrena bicéntrica 10 5/8" x 12 1/4".

La trayectoria planeada fue tipo "S", el inicio de desviación (KOP) a 1500 m, en la segunda etapa de perforación. El ángulo máximo planeado de 13.86 ° a mantener hasta la profundidad de 3900 m para alcanzar el desplazamiento de 572.75 m, posteriormente decrementar el ángulo a 0° a la profundidad de 4196 m.

Para la perforación de esta etapa se emplearon 7 BHA con motor de fondo y sarta navegable.

Los ensambles de fondo empleados (BHA) y sus rendimientos se muestran en la tabla 2.1.22.

Tabla 2.1.22 Rendimientos de Ensamblajes de fondo empleados

| Sarta navegable                  | BHA1                                                        | BHA2               | BHA3         | BHA4             | BHA5                | BHA6              | BHA7         |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------|--------------|------------------|---------------------|-------------------|--------------|
| Barrena                          | Bicentrica de 10 5/8" x 12 1/4", marca HYCALOG, tipo DS101, |                    |              |                  |                     |                   |              |
| Motor                            | 8 1/4"                                                      | 8 1/4"             | 8 1/4"       | 8 1/4"           | 8 1/4"              | 8 1/4"            | 8 1/4"       |
| Marca                            | ANADRILL                                                    | ANADRILL           | ANADRILL     | ANADRILL         | ANADRILL            | ANADRILL          | ANADRILL     |
| Graduado a                       | 1.5                                                         | 1.5                | 1.5          | 1.5              | 1.5                 | 1.5               | 1.5          |
| Válvula de contrapresión         | 8"                                                          | 8"                 | 8"           | 8"               | 8"                  | 8"                | 8"           |
| DCC                              | 8"                                                          | -----              | -----        | -----            | -----               | -----             | -----        |
| HW corto                         | -----                                                       | 6 5/8"             | 6 5/8"       | 6 5/8"           | 6 5/8"              | 6 5/8"            | -----        |
| CDR                              | -----                                                       | -----              | -----        | -----            | -----               | -----             | 8 1/4"       |
| Power Pulser                     | -----                                                       | -----              | -----        | -----            | -----               | -----             | 8 1/4"       |
| Estabilizador                    | 8"x 10 5/8"                                                 | 8"                 | 8"           | 8"               | 8"                  | 8"                | 8"           |
| UBHO                             | 8"                                                          | 8"                 | 8"           | 8"               | 8"                  | 8"                | -----        |
| Monel con SLIM-1                 | 8"                                                          | 8"                 | 8"           | 8"               | 8"                  | 8"                | -----        |
| Monel                            | 8"                                                          | 8"                 | 8"           | 8"               | 8"                  | 8"                | -----        |
| 6 DCN                            | 8"                                                          | 8"                 | 8"           | 8"               | 8"                  | 8"                | 8"           |
| Martillo                         | 8"                                                          | 8"                 | 8"           | 8"               | 8"                  | 8"                | 8"           |
| 9 HW                             | 5"                                                          | 5"                 | 5"           | 5"               | 5"                  | 5"                | 5"           |
| TP                               | 5"                                                          | 5"                 | 5"           | 5"               | 5"                  | 5"                | 5"           |
| GPM                              | 511                                                         | 513                | 513          | 513              | 563                 | 483               | 483          |
| PB (psi)                         | 2500                                                        | 2500               | 2500         | 2500             | 2600                | 2800              | 2800         |
| PSB (ton)                        | 2-4                                                         | 2-3                | 1-2          | 1-2              | 2-3                 | 2-3               | 2-3          |
| Tipo de lodo                     | E.I.                                                        | E.I.               | E.I.         | E.I.             | E.I.                | E.I.              | E.I.         |
| Densidad lodo                    | 2.05                                                        | 2.05               | 2.05         | 2.05             | 2.05                | 2.06              | 2.06         |
| Formación                        | C. SUP.                                                     | C. SUP.<br>C. INF. | C. INF.- SAL | SAL<br>OLIGOCENO | OLIGOCENO<br>EOCENO | EOCENO            | PALEOCENO    |
| Intervalo                        | 2085-2275                                                   | 2275-2473          | 2473-3015    | 3015-3667        | 3667-4000           | 4000-4071         | 4071-4196    |
| Construcción                     | 21.3°-<br>15.8°                                             | 15.8°-<br>12.6°    | 12.6°-12.7   | 12.7°-11.90      | 11.90°-<br>12.90    | 12.90°-<br>12.37° | 12.37°-9.30° |
| Rumbo                            | 320° a<br>307°                                              | 307° a<br>280°     | 280° a 282°  | 282° a 285°      | 285° a 291°         | 291° a 292°       | 292° a 294°  |
| Desplazam.<br>Alcanzado (m)      | 177                                                         | 213                | 321          | 458              | 531                 | 547               | 572          |
| Metros Perf.                     | 190                                                         | 198                | 542          | 652              | 333                 | 71                | 125          |
| Horas Perf.                      | 93                                                          | 84                 | 151          | 184              | 111                 | 40                | 86           |
| ROP m/hora                       | 2.04                                                        | 2.36               | 3.59         | 3.54             | 3.00                | 1.78              | 1.45         |
| Promedio<br>m/día<br>acumulativo | 45                                                          | 51.04              | 80.85        | 79.81            | 63.60               | 30.43             | 29.33        |

El promedio metros/día acumulativo en el desarrollo de la perforación direccional de la tercera etapa del pozo Sen 71 se muestra en la siguiente tabla 2.1.16

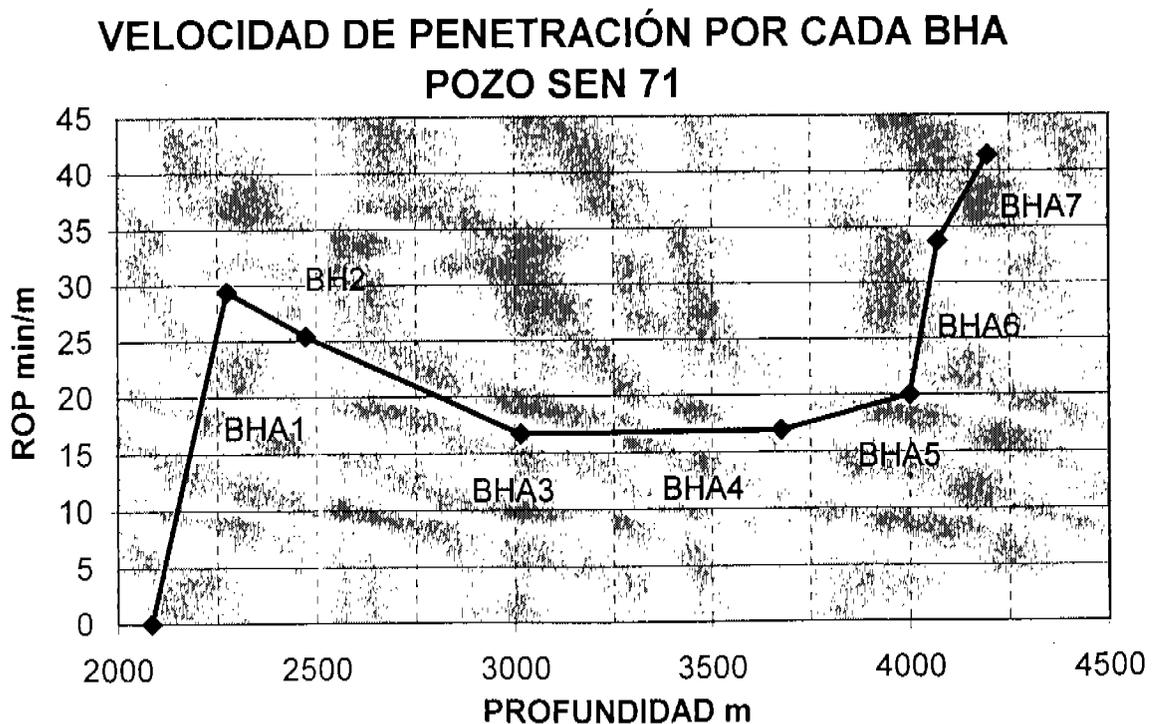
**Tabla 2.1.23 Rendimiento metros/día acumulativo**

| Sarta            | Fecha    | Profundidad | Metros Perf | Horas Perf | Horas Acum | Hrs Viaje | Hrs Acum Viaje | Metros Acum | metros/día   | FORM       |
|------------------|----------|-------------|-------------|------------|------------|-----------|----------------|-------------|--------------|------------|
|                  | 22/05/01 | 2085        | 0           | 0          | 0          |           |                |             |              |            |
|                  | 23/05/01 | 2119        | 34          | 6          | 6          | 8.34      | 8.34           | 34          | 56.90        |            |
|                  | 24/05/01 | 2143        | 24          | 14         | 20         | 0         | 8.34           | 58          | 49.12        |            |
| <b>BHA1</b>      | 25/05/01 | 2187        | 44          | 22         | 42         | 0         | 8.34           | 102         | 48.63        |            |
| <b>Sarta</b>     | 26/05/01 | 2229        | 42          | 21         | 63         | 0         | 8.34           | 144         | 48.44        |            |
| <b>Navegable</b> | 27/05/01 | 2253        | 24          | 19         | 82         | 0         | 8.34           | 168         | 44.63        |            |
|                  | 28/05/01 | 2275        | 22          | 11         | <b>93</b>  | 0         | 8.34           | <b>190</b>  | <b>45.00</b> |            |
|                  | 29/05/01 | 2285        | 10          | 6          | 6          | 9.1       | 9.1            | 10          | 15.89        |            |
| <b>BHA2</b>      | 30/05/01 | 2320        | 35          | 19         | 25         | 0         | 9.1            | 45          | 31.67        |            |
| <b>Sarta</b>     | 31/05/01 | 2344        | 24          | 13         | 38         | 0         | 9.1            | 69          | 35.16        |            |
| <b>Navegable</b> | 1/06/01  | 2385        | 41          | 21         | 59         | 0         | 9.1            | 110         | 38.77        |            |
|                  | 2/06/01  | 2424        | 39          | 17         | 76         | 0         | 9.1            | 149         | 42.02        |            |
|                  | 3/06/01  | 2473        | 49          | 8          | <b>84</b>  | 0         | 9.1            | <b>198</b>  | <b>51.04</b> |            |
|                  | 4/06/01  | 2520        | 47          | 14         | 14         | 9.892     | 9.892          | 47          | 47.21        |            |
|                  | 5/06/01  | 2610        | 90          | 22         | 36         | 0         | 9.892          | 137         | 71.65        |            |
| <b>BHA3</b>      | 6/06/01  | 2680        | 70          | 22         | 58         | 0         | 9.892          | 207         | 73.18        |            |
| <b>Sarta</b>     | 7/06/01  | 2755        | 75          | 22         | 80         | 0         | 9.892          | 282         | 75.29        |            |
| <b>Navegable</b> | 8/06/01  | 2821        | 66          | 22         | 102        | 0         | 9.892          | 348         | 74.64        |            |
|                  | 9/06/01  | 2922        | 101         | 19         | 121        | 0         | 9.892          | 449         | 82.33        |            |
|                  | 10/06/01 | 2992        | 70          | 22         | 143        | 0         | 9.892          | 519         | 81.47        |            |
|                  | 11/06/01 | 3015        | 23          | 8          | <b>151</b> | 0         | 9.892          | <b>542</b>  | <b>80.85</b> | <b>SAL</b> |
|                  | 12/06/01 | 3025        | 10          | 3          | 3          | 12.06     | 12.06          | 10          | 15.94        |            |
|                  | 13/06/01 | 3102        | 77          | 22         | 25         | 0         | 12.06          | 87          | 56.34        |            |
|                  | 14/06/01 | 3177        | 75          | 22         | 47         | 0         | 12.06          | 162         | 65.83        |            |
| <b>BHA4</b>      | 15/06/01 | 3250        | 73          | 20         | 67         | 0         | 12.06          | 235         | 71.34        |            |
| <b>Sarta</b>     | 16/06/01 | 3325        | 75          | 22         | 89         | 0         | 12.06          | 310         | 73.62        |            |
| <b>Navegable</b> | 17/06/01 | 3409        | 84          | 22         | 111        | 0         | 12.06          | 394         | 76.84        |            |
|                  | 18/06/01 | 3483        | 74          | 22         | 133        | 0         | 12.06          | 468         | 77.43        |            |
|                  | 19/06/01 | 3550        | 67          | 19         | 152        | 0         | 12.06          | 535         | 78.26        |            |
|                  | 20/06/01 | 3629        | 79          | 22         | 174        | 0         | 12.06          | 614         | 79.20        |            |
|                  | 21/06/01 | 3667        | 38          | 10         | 184        | 0         | 12.06          | 652         | 79.81        |            |
|                  | 22/06/01 | 3667        | 0           | 0          | <b>184</b> | 0         | 12.06          | <b>652</b>  | <b>79.81</b> |            |
|                  | 23/06/01 | 3686        | 19          | 13         | 13         | 14.668    | 14.668         | 19          | 16.48        |            |
|                  | 24/06/01 | 3686        | 0           | 0          | 13         | 0         | 14.668         | 19          | 16.48        |            |
| <b>BHA5</b>      | 25/06/01 | 3713        | 27          | 5          | 18         | 0         | 14.668         | 46          | 33.79        |            |
|                  | 26/06/01 | 3792        | 79          | 22         | 40         | 0         | 14.668         | 125         | 54.88        |            |
|                  | 27/06/01 | 3866        | 74          | 22         | 62         | 0         | 14.668         | 199         | 62.29        |            |
|                  | 28/06/01 | 3911        | 45          | 17         | 79         | 0         | 14.668         | 244         | 62.52        |            |

|                                   |          |      |    |    |            |        |        |            |              |                                        |
|-----------------------------------|----------|------|----|----|------------|--------|--------|------------|--------------|----------------------------------------|
| <b>BHA5</b>                       | 29/06/01 | 3955 | 44 | 17 | 96         | 0      | 14.668 | 288        | 62.46        | <b>E<br/>O<br/>C<br/>E<br/>N<br/>O</b> |
| <b>SARTA</b>                      | 30/06/01 | 4000 | 45 | 15 | 111        | 0      | 14.668 | 333        | 63.60        |                                        |
| <b>Navegable</b>                  | 1/07/01  | 4000 | 0  | 0  | 111        | 0      | 14.668 | 333        | 63.60        |                                        |
|                                   | 2/07/01  | 4000 | 0  | 0  | 111        | 0      | 14.668 | 333        | 63.60        |                                        |
|                                   | 3/07/01  | 4000 | 0  | 0  | 111        | 0      | 14.668 | 333        | 63.60        |                                        |
|                                   | 4/07/01  | 4000 | 0  | 0  | <b>111</b> | 0      | 14.668 | <b>333</b> | <b>63.60</b> |                                        |
| <b>BHA6</b>                       | 5/07/01  | 4035 | 35 | 12 | 12         | 16     | 16     | 35         | 30.00        |                                        |
| <b>Sarta</b>                      | 6/07/01  | 4064 | 29 | 21 | 33         | 0      | 16     | 64         | 31.35        |                                        |
| <b>Navegable</b>                  | 7/07/01  | 4071 | 7  | 7  | 40         | 0      | 16     | 71         | 30.43        | <b>P<br/>A<br/>L</b>                   |
|                                   | 8/07/01  | 4071 | 0  | 0  | <b>40</b>  | 0      | 16     | <b>71</b>  | <b>30.43</b> |                                        |
| <b>BHA7</b>                       | 9/07/01  | 4077 | 6  | 8  | 8          | 16.284 | 16.284 | 6          | 5.93         |                                        |
|                                   | 10/07/01 | 4109 | 32 | 22 | 30         | 0      | 16.284 | 38         | 19.70        |                                        |
| <b>Sarta</b>                      | 11/07/01 | 4146 | 37 | 22 | 52         | 0      | 16.284 | 75         | 26.36        |                                        |
| <b>Navegable</b>                  | 12/07/01 | 4171 | 25 | 22 | 74         | 0      | 16.284 | 100        | 26.58        |                                        |
|                                   | 13/07/01 | 4196 | 25 | 12 | <b>86</b>  | 0      | 16.284 | <b>125</b> | <b>29.33</b> |                                        |
| <b>PROMEDIO M/DÍA ACUMULATIVO</b> |          |      |    |    | 749        |        | 86.344 | 2111       | <b>60.65</b> |                                        |

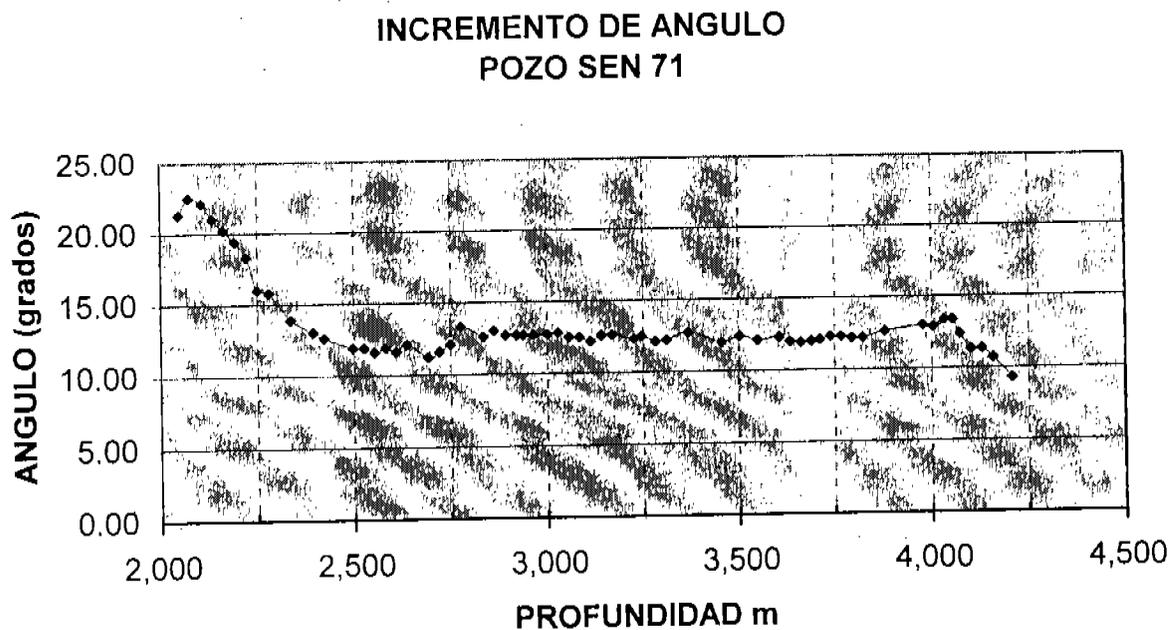
El promedio metros/día acumulativo de la perforación direccional de la Tercera Etapa del pozo Sen 71 es de 60.65.

La velocidad de penetración ROP efectuada por cada BHA se muestra en la siguiente gráfica 2.1.24



Gráfica 2.1.24 Velocidad de penetración por cada BHA pozo Sen 71

El trabajo de mantener el ángulo con respecto a la profundidad se muestra en la siguiente gráfica 2.1.25

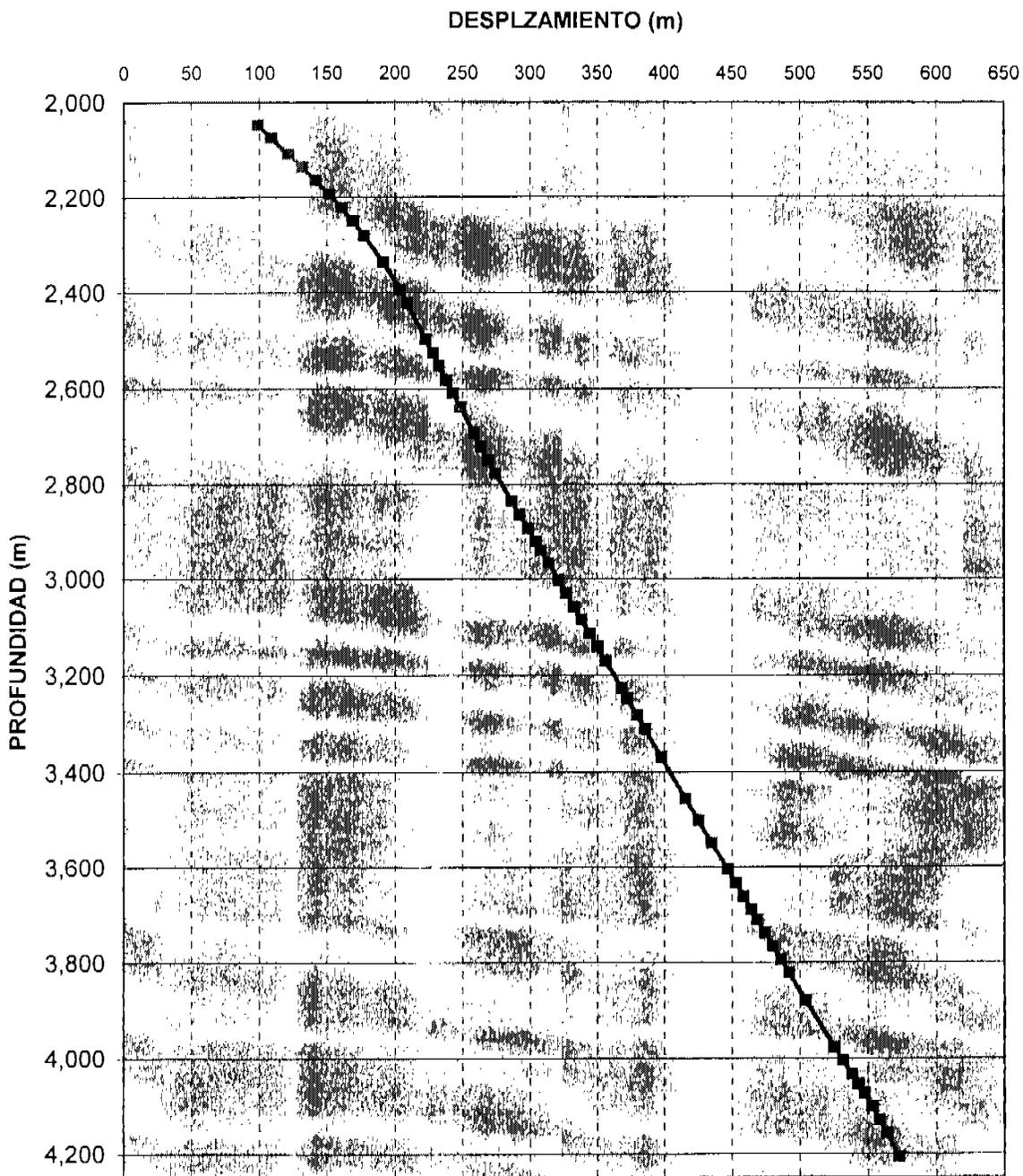


Gráfica 2.1.25 Incremento del ángulo pozo Sen 71

Se observa que con los BHA 1 y 2 efectuaron trabajos de corrección, decrementando el ángulo de  $23^{\circ}$  a  $12^{\circ}$  reflejándose en el aumento del tiempo de penetración. Los BHA 3, 4 y 5 efectuaron mejores tiempos de penetración en el trabajo de mantener el ángulo fluctuando en  $13^{\circ}$ . Los BHA 6 y 7 efectuaron trabajo de decremento de ángulo aumentando el tiempo de penetración.

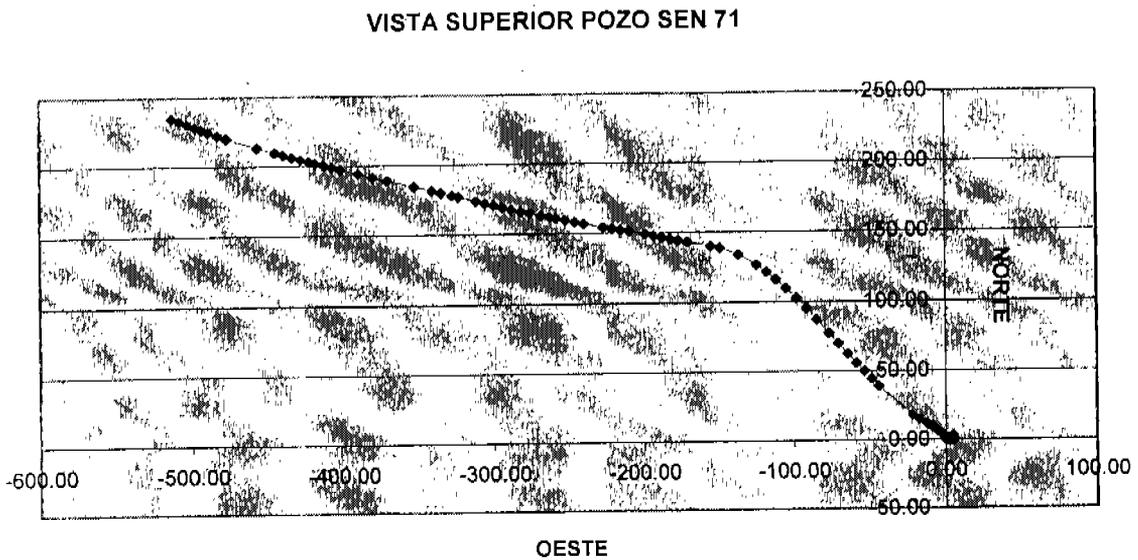
El desarrollo de la Trayectoria tipo "S" en la etapa de mantener el ángulo se había planeado mantener el ángulo a  $13.86^{\circ}$  hasta la profundidad de 3900 m para obtener un desplazamiento horizontal de 542 m y a partir de esta profundidad decrementar el ángulo a  $0^{\circ}$  a la profundidad de 4196 m (ver gráfica 2. 1. 26).

# TRAYECTORIA DIRECCIONAL POZO SEN 71



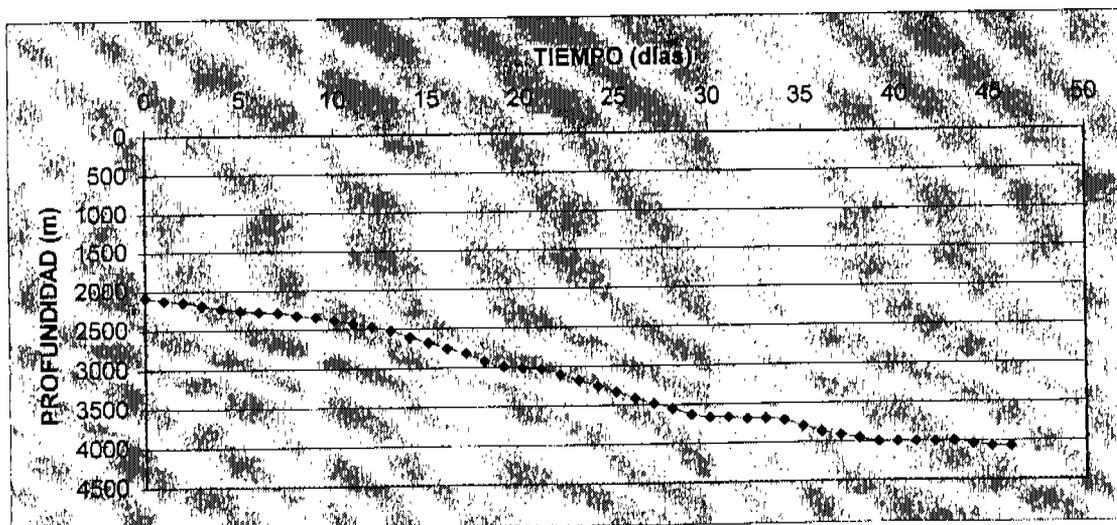
Gráfica 2.1.26 Trayectoria direccional pozo Sen 71

Durante la perforación direccional de la etapa de 14 3/4" el rumbo del pozo tendió hacia la derecha, en la perforación direccional con barrena bicéntrica 10 5/8" x 12 1/4" se corrigió el rumbo dirigiéndose el pozo de N 40° W a N 66° W (ver gráfica 2.1.27).



Gráfica 2.1.27 Vista superior pozo Sen 71

La tercera etapa del pozo Sen 71 se perforó en 46 días la gráfica 2.1.28 muestra la tasa de profundidad con respecto al tiempo en días.



Gráfica 2.1.28 Tiempo de perforación de la tercera etapa

Las barrenas bicéntricas de 10 5/8" x 12 1/4" de la marca HYCALOG utilizadas en la perforación direccional de la tercera etapa del pozo sen 71 tienen las siguientes características:

| TIPO/ IADC | DIÁMETRO PILOTO | No. DE CORTADORES | TAMAÑO DE CORTADORES | LONGITUD |
|------------|-----------------|-------------------|----------------------|----------|
| DS101/S433 | 7 5/8"          | 46/10             | 13mm/8mm             | 17.4"    |

El record de las barrenas bicentricas utilizadas en al perforación es el siguiente:

| No. serie | Toberas                | Profundidad salida (m) | Metros Perforados | Horas de rotación | ROP (m/hora) | PSB ton. | RPM |
|-----------|------------------------|------------------------|-------------------|-------------------|--------------|----------|-----|
| 18830     | 5, 16/32"<br>4, 11/32" | 4196                   | 2111              | 661.83            | 3.19         | 2-5      | 40  |

### 2.3.5 Pozo Luna 38

Pozo esbelto planeado para perforarse direccionalmente a partir de la segunda etapa con barrena de 14 3/4" , esto como una alternativa direccional con el propósito de evitar el trabajo de construcción de la curva y únicamente mantener ángulo durante la tercera etapa con barrena bicentrica 10 5/8" x 12 1/4".

La trayectoria planeada fue tipo "Slant", el inicio de desviación (KOP) a 3450 m, en la segunda etapa de perforación. El ángulo máximo planeado de 16.16° a la profundidad de 3450 m, posteriormente mantener el ángulo, durante la tercera etapa, hasta la profundidad de 4660 m para alcanzar un desplazamiento de 600 m hacia el rumbo objetivo de N 41.0 W.

Para la perforación de esta etapa se emplearon 6 BHA con motor de fondo y 1 BHA como sarta orientada.

Los ensambles de fondo empleados (BHA) y sus rendimientos se muestran en la tabla 2.1.28 y 2.1.29

**Tabla 2.3.28 Rendimientos de Ensamblajes de fondo empleados con motor de fondo**

| Sarta navegable                       | BHA1             | BHA2               | BHA3         | BHA4          | BHA6          | BHA7             |
|---------------------------------------|------------------|--------------------|--------------|---------------|---------------|------------------|
| Barrena HYCALOG<br>10 5/8" x 12 1/4"  | DS152HDF         | DS152HDF           | DS101HDE     | DS101HDE      | DS101HDE      | DS101HDE         |
| <b>Motor</b>                          | 8"               | 8"                 | 8"           | 8"            | 8"            | 8"               |
| <b>Marca</b>                          | ANADRILL         | ANADRILL           | ANADRILL     | ANADRILL      | ANADRILL      | ANADRILL         |
| <b>No. Serie</b>                      | 1186             | 1196               | 2732         | 1155          | 1196          | 2732             |
| <b>Tipo</b>                           | A800XP           | A800XP             | A800M        | A800M         | A800XP        | A800M            |
| <b>Relación</b>                       | 4:5              | 4:5                | 7:8          | 4:5           | 4:5           | 4:5              |
| <b>Graduado a</b>                     | 1.5              | 1.5                | 1.5          | 1.5           | 1.5           | 1.15             |
| <b>DCC MONEL</b>                      | 8"               | -----              | -----        | -----         | -----         | -----            |
| <b>Estabilizador</b>                  | 7 3/4" x 10 1/2" | -----              | -----        | -----         | -----         | -----            |
| <b>Válvula de contrapresión</b>       | 8"               | 8"                 | 8"           | 8"            | 8"            | 6 5/8"           |
| <b>DCC</b>                            | -----            | 8"                 | 8"           | 8"            | 8"            | 8"               |
| <b>Estabilizador</b>                  | -----            | -----              | -----        | -----         | -----         | 7 3/4" x 10 1/2" |
| <b>DCC MONEL</b>                      | -----            | -----              | -----        | -----         | -----         | 8"               |
| <b>UBHO</b>                           | 8"               | 8"                 | 8"           | 8"            | 8"            | 8"               |
| <b>MWD</b>                            | 8"               | 8"                 | 8"           | 8"            | 8"            | 8"               |
| <b>DC monel</b>                       | -----            | 8"                 | 8"           | 8"            | 8"            | 8"               |
| <b>DCN</b>                            | 5 de 8"          | 5 de 8"            | 6 de 8"      | 6 de 8"       | 6 de 8"       | 6 de 8"          |
| <b>Martillo</b>                       | 8"               | 8"                 | 8"           | 8"            | 8"            | 8"               |
| <b>12 HW</b>                          | 5"               | 5"                 | 5"           | 5"            | 5"            | 8"               |
| <b>TP</b>                             | 5"               | 5"                 | 5"           | 5"            | 5"            | 8"               |
| <b>GPM</b>                            | 511              | 513                | 513          | 513           | 563           | 483              |
| <b>PB (psi)</b>                       | 2500             | 2500               | 2500         | 2500          | 2600          | 2800             |
| <b>PSB (ton)</b>                      | 2-4              | 2-3                | 1-2          | 1-2           | 2-3           | 2-3              |
| <b>Tipo lodo</b>                      | E.I.             | E.I.               | E.I.         | E.I.          | E.I.          | E.I.             |
| <b>Densidad lodo</b>                  | 1.98             | 1.99               | 1.99         | 1.99          | 1.98          | 1.98             |
| <b>Formación</b>                      | DEPOSITO         | DEP.-<br>OLIGOCENO | EOCENO       | EOCENO        | EOCENO        | PALEOCENO        |
| <b>Intervalo</b>                      | 3550-3584        | 3584-4060          | 4060-4110    | 4110-4186     | 4311-4530     | 4530-4661        |
| <b>Construcción</b>                   | 18°-17°          | 17°-17.7°          | 17.7°-18.13° | 18.13°-17.94° | 17.94°-18.65° | 18.65°-14.58°    |
| <b>Rumbo</b>                          | 317° a 322°      | 322° a 319°        | 319° a 318°  | 318° a 319°   | 321° a 326°   | 325° a 330°      |
| <b>Desplazam.<br/>Alcanzado (m)</b>   | 80               | 219                | 230          | 263           | 359           | 390              |
| <b>Metros Perf.</b>                   | 34               | 476                | 50           | 76            | 219           | 71               |
| <b>Horas Perf.</b>                    | 17               | 137                | 36.5         | 61            | 128           | 40               |
| <b>ROP m/hora</b>                     | 2.00             | 3.47               | 1.37         | 1.25          | 1.71          | 1.78             |
| <b>Promedio m/día<br/>acumulativo</b> | 26.15            | 75.49              | 22.75        | 23.55         | 36.19         | 40.77            |

Tabla 2.3.29 Rendimiento de Ensamble de fondo orientado

| Sarta orientada               | BHA5                                |
|-------------------------------|-------------------------------------|
| Barrena Bicentrica            | 10 5/8" x 12 1/4",<br>tipo DS101HDF |
| DCC                           | 8"                                  |
| Pta. Bna. Estab.              | 10 5/8"                             |
| DC liso                       | 8"                                  |
| Válvula contrapresión         | 8"                                  |
| Estabilizador                 | 8"x 10 5/8"                         |
| UBHO (orientador)             | 8"                                  |
| MWD                           | 8"                                  |
| DC monel                      | 8"                                  |
| 6 DCN                         | 8"                                  |
| Martillo                      | 8"                                  |
| 12 HW                         | 5"                                  |
| TP                            | 5"                                  |
| GPM                           | 465                                 |
| PB (psi)                      | 1800                                |
| PSB (ton)                     | 10                                  |
| RPM                           | 90                                  |
| Tipo de lodo                  | E.I.                                |
| Densidad lodo                 | 1.99                                |
| Formación                     | EOCENO                              |
| Intervalo                     | 4186-4311                           |
| Construcción                  | 17.94°-15.07°                       |
| Rumbo                         | 319° a 321°                         |
| Desplaza. Alcanzado (m)       | 297                                 |
| Metros Perf.                  | 125                                 |
| Horas Perf.                   | 54                                  |
| ROP m/hora                    | 2.31                                |
| Promedio m/dia<br>acumulativo | 42.41                               |

El promedio metros/día acumulativo en el desarrollo de la perforación direccional de la tercera etapa del pozo Luna 38 se muestra en la siguiente tabla 2.3.30.

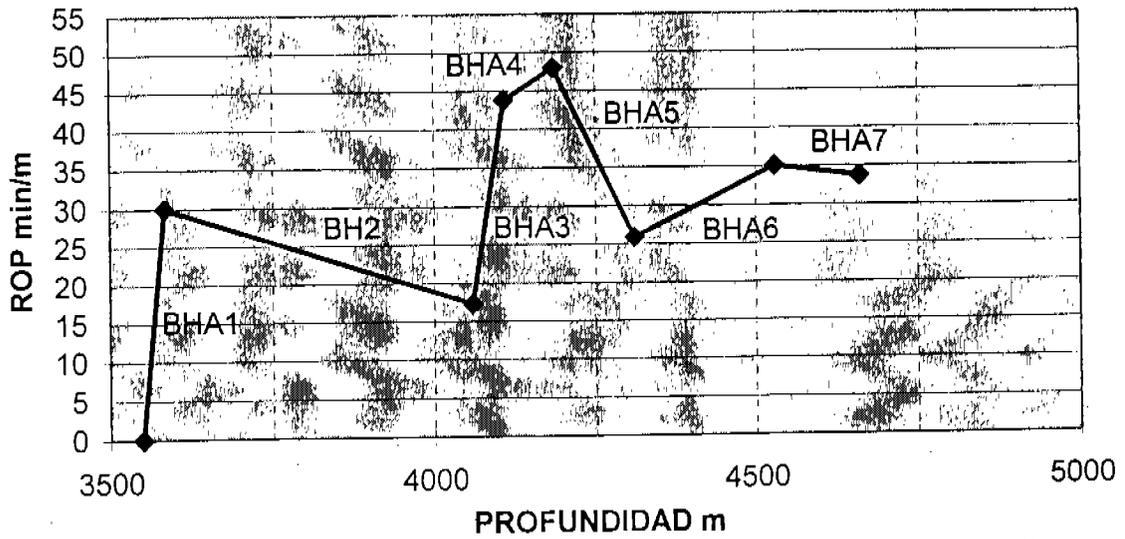
**Tabla 2.3.30 Rendimiento metros/día acumulativo**

| Sarta                             | Fecha    | Prof. (m) | Metros Perforados | Horas de Perforación | Horas Acumuladas | Horas de Viaje | Horas Acumuladas Viaje | Metros Acumulados | metros/día   | FORM       |
|-----------------------------------|----------|-----------|-------------------|----------------------|------------------|----------------|------------------------|-------------------|--------------|------------|
| <b>BHA1</b>                       |          | 3550      | 0                 | 0                    | 0                |                |                        |                   |              | <b>DEP</b> |
| Entrada                           | 26/05/01 | 3550      | 0                 | 0                    | 0                | 14.2           | 14.2                   | 0                 | 0.00         |            |
| Salida                            | 30/05/01 | 3584      | 34                | 17                   | 17               | 0              | 14.2                   | 34                | 26.15        |            |
| <b>BHA2</b>                       |          |           |                   |                      |                  |                |                        |                   |              | <b>OL</b>  |
| Entrada                           | 2/06/01  | 3584      | 0                 | 0                    | 0                | 14.336         | 14.336                 | 0                 | 0.00         |            |
| Salida                            | 22/06/01 | 4060      | 476               | 137                  | 137              | 0              | 14.336                 | 476               | 75.49        |            |
| <b>BHA3</b>                       |          |           |                   |                      |                  |                |                        |                   |              | <b>E</b>   |
| Entrada                           | 22/06/01 | 4060      | 0                 | 0                    | 0                | 16.24          | 16.24                  | 0                 | 0.00         |            |
| Salida                            | 25/06/01 | 4110      | 50                | 36.5                 | 36.5             | 0              | 16.24                  | 50                | 22.75        |            |
| <b>BHA4</b>                       |          |           |                   |                      |                  |                |                        |                   |              | <b>O</b>   |
| Entrada                           | 25/06/01 | 4110      | 0                 | 0                    | 0                | 16.44          | 16.44                  | 0                 | 0.00         |            |
| Salida                            | 29/06/01 | 4186      | 76                | 61                   | 61               | 0              | 16.44                  | 76                | 23.55        |            |
| <b>BHA5 ORIENT</b>                |          |           |                   |                      |                  |                |                        |                   |              | <b>C</b>   |
| Entrada                           | 1/07/01  | 4186      | 0                 | 0                    | 0                | 16.744         | 16.744                 | 0                 | 0.00         |            |
| Salida                            | 3/07/01  | 4311      | 125               | 54                   | 54               | 0              | 16.744                 | 125               | 42.41        |            |
| <b>BHA6</b>                       |          |           |                   |                      |                  |                |                        |                   |              | <b>N</b>   |
| Entrada                           | 4/07/01  | 4311      | 0                 | 0                    | 0                | 17.244         | 17.244                 | 0                 | 0.00         |            |
| Salida                            | 14/07/01 | 4530      | 219               | 128                  | 128              | 0              | 17.244                 | 219               | 36.19        |            |
| <b>BHA7</b>                       |          |           |                   |                      |                  |                |                        |                   |              | <b>O</b>   |
| Entrada                           | 14/07/01 | 4530      | 0                 | 0                    | 0                | 18.12          | 18.12                  | 0                 | 0.00         |            |
| Salida                            | 18/07/01 | 4661      | 131               | 59                   | 59               | 0              | 18.12                  | 131               | 40.77        |            |
| <b>PROMEDIO M/DIA ACUMULATIVO</b> |          |           |                   |                      | 492.5            |                | 113.324                | 1111              | <b>44.01</b> | <b>L</b>   |

El promedio metros/día acumulativo de la perforación direccional de la Tercera Etapa del pozo Luna 38 es de 44.01

La velocidad de penetración ROP efectuada por cada BHA se muestra en la siguiente grafica 2.3.31

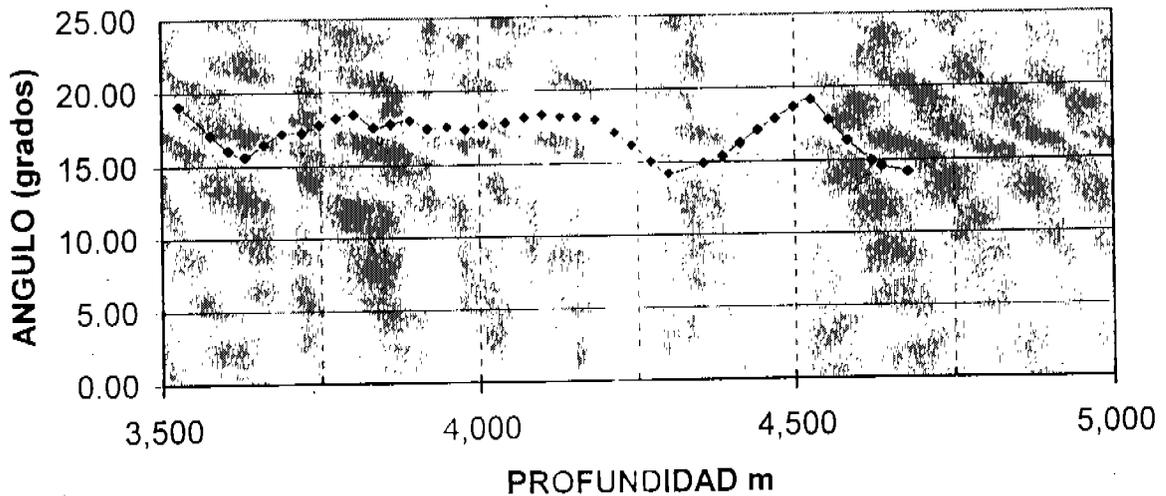
**VELOCIDAD DE PENETRACIÓN POR CADA BHA  
POZO LUNA 38**



Gráfica 2.3.31 Velocidad de penetración por cada BHA pozo Luna 38

El trabajo de incremento de ángulo con respecto a la profundidad se muestra en la siguiente grafica 2.3.32

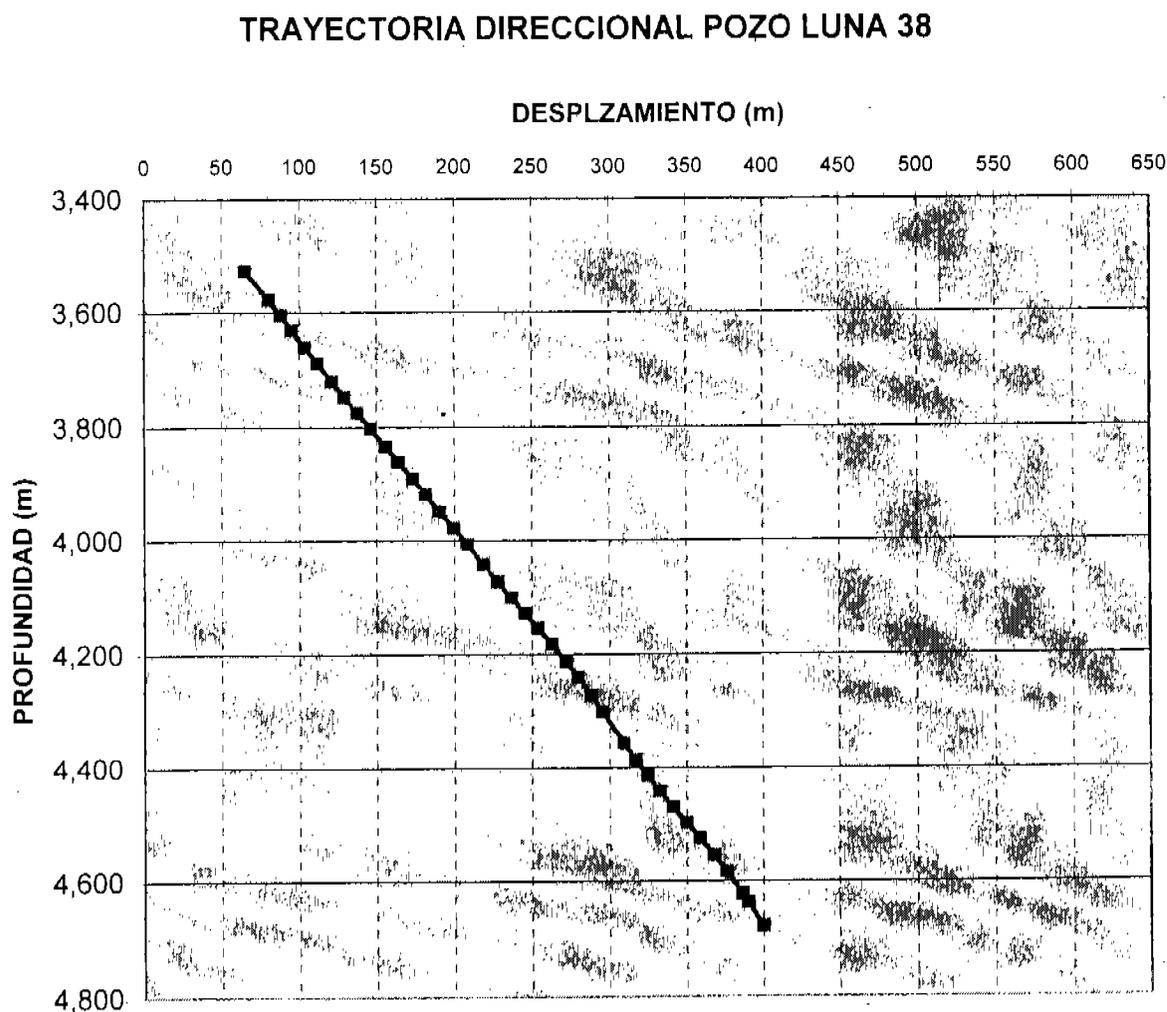
**INCREMENTO DE ANGULO  
POZO LUNA 38**



Gráfica 2.3.32 Incremento de ángulo pozo Luna 38

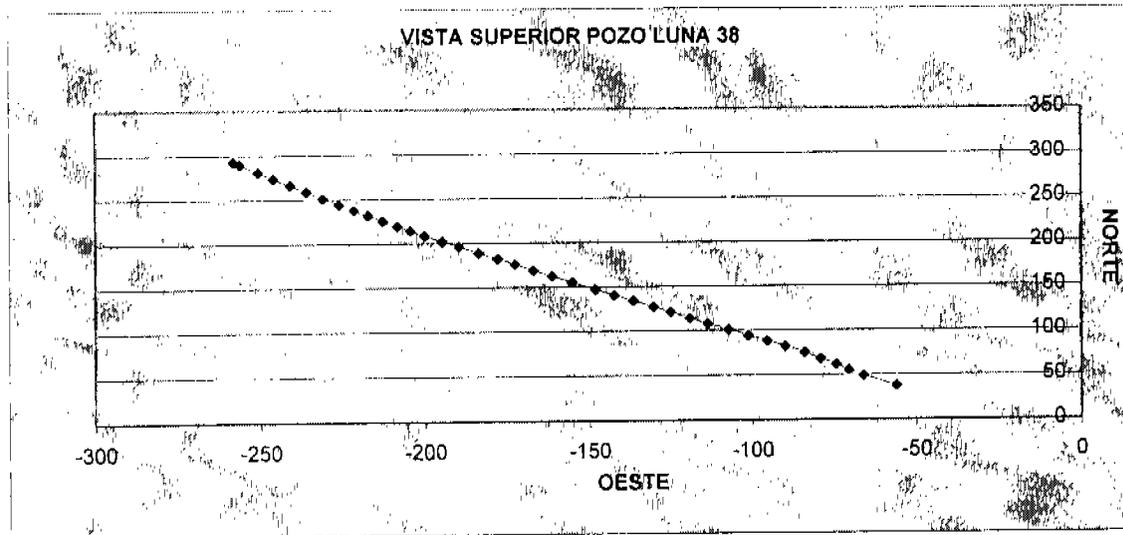
Se observa que los BHA 2, 3 y 4 mantuvieron el ángulo, sin embargo con los BHA 3 y 4 hubo aumento en el tiempo de penetración. El BHA5 disminuyó la velocidad de penetración, más no mantuvo el ángulo decreméntándolo a 14.8°. El BHA6 similar en el tipo de motor de fondo al BHA2, recuperó el ángulo pero incrementó el tiempo de penetración (ver tabla 2.3.28 y 2.3.29).

El desarrollo de la Trayectoria tipo "Slant" en la tercera etapa fue el de mantener el ángulo, el cual fluctuó de 18° a 14.8°, alcanzando un desplazamiento de 390 m a la profundidad de 4661 m, ver gráfica 2.3.33



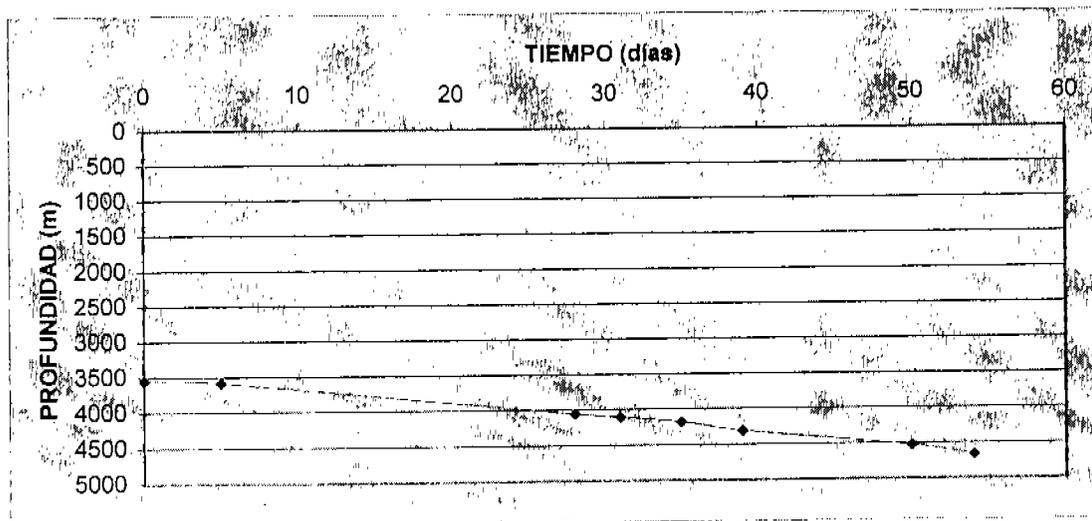
Gráfica 2.3.33 Trayectoria direccional pozo Luna 38

Durante la perforación direccional de la etapa de 14 3/4" el rumbo del pozo quedo en N 40° W, en la perforación direccional con barrena bicentrica 10 5/8" x 12 1/4" el rumbo se dirigió hacia a N 30° W, objetivo, ver gráfica 2.3.34



Gráfica 2.3.34 Vista superior pozo Luna 38

La tercera etapa del pozo Luna 38 se perforó en 46 días la gráfica 2.3.35 muestra la tasa de profundidad con respecto al tiempo en días.



Gráfica 2.3.35 Tiempo de Perforación de la tercera etapa pozo Luna 38

Las barrenas bicéntricas de 10 5/8" x 12 1/4" de la marca HYCALOG utilizadas en la perforación direccional de la tercera etapa del pozo Luna 38 tienen las siguientes características:

| TIPO/ IADC | DIÁMETRO PILOTO | No. DE CORTADORES | TAMAÑO DE CORTADORES | LONGITUD |
|------------|-----------------|-------------------|----------------------|----------|
| DS152/S443 | 8"              | 39/10             | 13mm/8mm             | 15"      |
| DS101/S433 | 7 5/8"          | 46/10             | 13mm/8mm             | 17.4"    |

El record de las barrenas bicentricas utilizadas en al perforación es el siguiente:

| No. serie       | Toberas                | Profundidad salida (m) | Metros Perforados | Horas de rotación | ROP (m/hora) | PSB ton. | RPM       |
|-----------------|------------------------|------------------------|-------------------|-------------------|--------------|----------|-----------|
| DS152<br>200968 | 5, 12/32"<br>3, 16/32" | 3633                   | 124               | 27.06             | 4.58         | 3-6      | 45        |
| DS101<br>200968 | 3, 14/32"<br>6, 15/32" | 4661                   | 987               | 472.68            | 2.08         | 2-7      | 60<br>150 |

### 2.3.6 Pozo Escarbado 4

Pozo esbelto planeado para perforarse direccionalmente hacia el objetivo con un desplazamiento de 287 m y rumbo Sur franco. La trayectoria planeada fue tipo "Slant", el inicio de desviación (KOP) a 3470 m, el ángulo máximo para alcanzar el desplazamiento de 287 m fue de 35.80°.

Para la perforación de esta etapa se emplearon 3 BHA con motor de fondo con junta flexible.

Los ensambles de fondo empleados (BHA) y sus rendimientos se muestran en la tabla 2.3.36

Tabla 2.3.36  
de fondo

Rendimientos de Ensamblajes de fondo empleados con motor

| Sarta navegable            | BHA1                                                        | BHA2         | BHA3             |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------|------------------|
| Barrena                    | Bicentrica de 10 5/8" x 12 1/4", marca HYCALOG, tipo DS101, |              |                  |
| Motor                      | 8"                                                          | 8"           | 8"               |
| Marca                      | POWER-PACK                                                  | POWER-PACK   | POWER-PACK       |
| Graduado a                 | 1.5                                                         | 1.5          | 1.5              |
| Válvula Contrapresión      | 8"                                                          | 8"           | 8"               |
| FLEX JOINT                 | 6 5/8"                                                      | 6 5/8"       | 6 5/8"           |
| Estabilizador              | 8 x 10 5/8"                                                 | -----        | -----            |
| UBHO                       | 8"                                                          | 8"           | 8"               |
| DC Monel                   | 8"                                                          | 8"           | 8"               |
| MWD                        | 8"                                                          | 8"           | 8"               |
| 3 DCN                      | 8"                                                          | 8"           | 8"               |
| Martillo                   | 8"                                                          | 8"           | 8"               |
| 12 HW                      | 5"                                                          | 5"           | 5"               |
| TP                         | 5"                                                          | 5"           | 5"               |
| GPM                        | 515                                                         | 500          | 500              |
| PB (psi)                   | 3100                                                        | 3100         | 3200             |
| PSB (ton)                  | 1.85                                                        | 1.85         | 1.85             |
| Tipo de lodo               | E.I.                                                        | E.I.         |                  |
| Densidad lodo              | 2-3                                                         | 2-3          | 1-3              |
| Formación                  | C. INF ENCANTO                                              | EOCENO       | EOCENO-PALEOCENO |
| Intervalo                  | 3470-3763                                                   | 3763-4075    | 4075-4386        |
| Construcción               | 2.5°-10.7°                                                  | 10.7°-32.30° | 32.30°-35.80°    |
| Rumbo                      | 341° a 191°                                                 | 191° a 181°  | 181° a 180°      |
| Desplazam. Alcanzado (m)   | 7.07                                                        | 122          | 287              |
| Metros Perf.               | 293                                                         | 312          | 311              |
| Horas Perf.                | 146.67                                                      | 114.24       | 81.07            |
| ROP m/hora                 | 2.00                                                        | 2.73         | 3.84             |
| Promedio m/día acumulativo | 43.80                                                       | 57.92        | 76.66            |

Se observa que en los tres aparejos se utilizó junta flexible dando buena respuesta ayudando al motor a tener mejor desempeño en la construcción del ángulo.

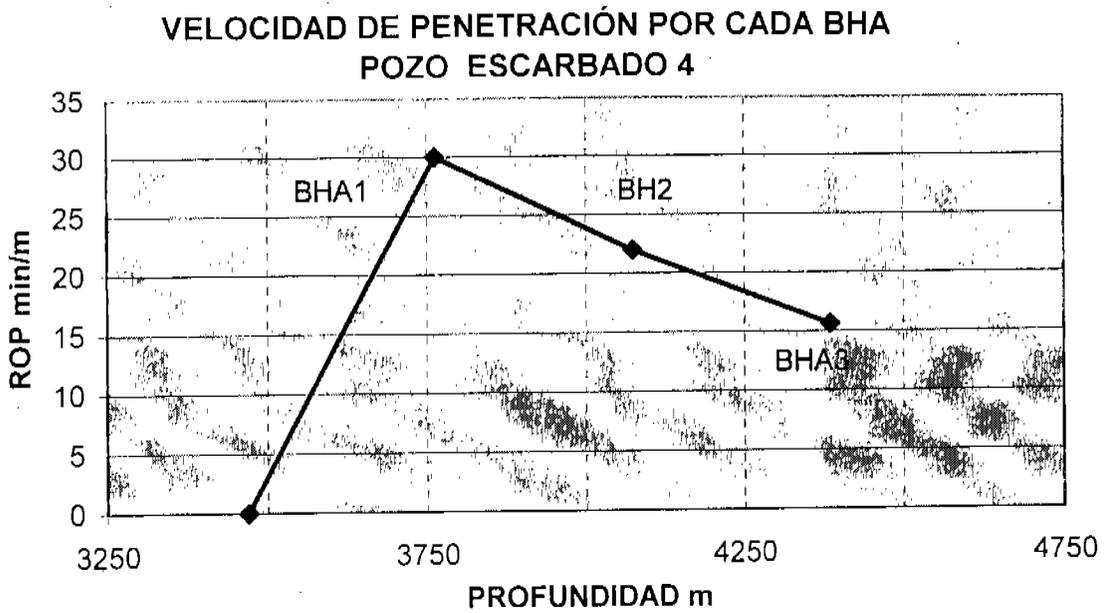
El promedio metros/día acumulativo en el desarrollo de la perforación direccional de la tercera etapa del pozo Escarbado 4 se muestra en la siguiente tabla 2.3.37

**Tabla 2.3.37 Rendimiento metros/día acumulativo**

| Sarta                             | Fecha    | Profundidad en metros | Metros Perforados | Horas Perforación | Horas Acum.   | Horas Viaje | Horas Acum. Viaje | Metros Acum.  | metros/día   | FORM |
|-----------------------------------|----------|-----------------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------|-------------------|---------------|--------------|------|
|                                   | 30/08/01 | 3470                  | 0                 | 0                 | 0             |             |                   |               |              |      |
|                                   | 31/08/01 | 3503                  | 33                | 13.65             | 13.65         | 13.88       | 13.88             | 33            | 28.77        |      |
|                                   | 1/09/01  | 3535                  | 32                | 19.52             | 33.17         | 0           | 13.88             | 65            | 33.16        |      |
| <b>BHA1</b>                       | 2/09/01  | 3573                  | 38                | 20.77             | 53.93         | 0           | 13.88             | 103           | 36.45        |      |
| <b>Sarta</b>                      | 3/09/01  | 3619                  | 46                | 18.70             | 72.63         | 0           | 13.88             | 149           | 41.33        |      |
| <b>Navegable</b>                  | 4/09/01  | 3658                  | 39                | 18.63             | 91.27         | 0           | 13.88             | 188           | 42.91        |      |
|                                   | 5/09/01  | 3693                  | 35                | 16.72             | 107.98        | 0           | 13.88             | 223           | 43.92        |      |
|                                   | 6/09/01  | 3699                  | 6                 | 4.13              | 112.12        | 0           | 13.88             | 229           | 43.62        |      |
|                                   | 7/09/01  | 3736                  | 37                | 17.93             | 130.05        | 0           | 13.88             | 266           | 44.35        |      |
|                                   | 8/09/01  | 3763                  | 27                | 16.62             | 146.67        | 0           | 13.88             | 293           | 43.80        |      |
|                                   | 9/09/01  | 3763                  | 0                 | 0.00              | <b>146.67</b> | 0           | 13.88             | <b>293</b>    | <b>43.80</b> |      |
|                                   | 10/09/01 | 3776                  | 13                | 8.77              | 8.77          | 15.052      | 15.052            | 13            | 13.10        |      |
|                                   | 11/09/01 | 3805                  | 29                | 18.78             | 27.55         | 0           | 15.052            | 42            | 23.66        |      |
|                                   | 12/09/01 | 3815                  | 10                | 6.17              | 33.72         | 0           | 15.052            | 52            | 25.59        |      |
| <b>BHA2</b>                       | 13/09/01 | 3854                  | 39                | 18.93             | 52.65         | 0           | 15.052            | 91            | 32.26        |      |
| <b>Sarta</b>                      | 14/09/01 | 3892                  | 38                | 15.37             | 68.02         | 0           | 15.052            | 129           | 37.27        |      |
| <b>Navegable</b>                  | 15/09/01 | 3920                  | 28                | 5.13              | 73.15         | 0           | 15.052            | 157           | 42.72        |      |
|                                   | 16/09/01 | 3966                  | 46                | 12.85             | 86.00         | 0           | 15.052            | 203           | 48.21        |      |
|                                   | 17/09/01 | 4005                  | 39                | 12.63             | 98.64         | 0           | 15.052            | 242           | 51.09        |      |
|                                   | 18/09/01 | 4037                  | 32                | 7.75              | 106.39        | 0           | 15.052            | 274           | 54.15        |      |
|                                   | 19/09/01 | 4075                  | 38                | 7.85              | 114.24        | 0           | 15.052            | 312           | 57.92        |      |
|                                   | 20/09/01 | 4075                  | 0                 | 0.00              | <b>114.24</b> | 0           | 15.052            | <b>312</b>    | <b>57.92</b> |      |
|                                   | 21/09/01 | 4097                  | 22                | 6.97              | 6.97          | 16.3        | 16.3              | 22            | 22.69        |      |
| <b>BHA3</b>                       | 22/09/01 | 4137                  | 40                | 6.97              | 13.94         | 0           | 16.3              | 62            | 49.21        |      |
| <b>Sarta</b>                      | 23/09/01 | 4191                  | 54                | 16.70             | 30.64         | 0           | 16.3              | 116           | 59.31        |      |
| <b>Navegable</b>                  | 24/09/01 | 4241                  | 50                | 16.70             | 47.34         | 0           | 16.3              | 166           | 62.61        |      |
|                                   | 25/09/01 | 4277                  | 36                | 6.98              | 54.32         | 0           | 16.3              | 202           | 68.65        |      |
|                                   | 26/09/01 | 4343                  | 66                | 15.85             | 70.17         | 0           | 16.3              | 268           | 74.38        |      |
|                                   | 27/09/01 | 4386                  | 43                | 10.90             | <b>81.07</b>  | 0           | 16.3              | <b>311</b>    | <b>76.66</b> |      |
| <b>PROMEDIO M/DÍA ACUMULATIVO</b> |          |                       |                   |                   | <b>341.97</b> |             | <b>45.23</b>      | <b>916.00</b> | <b>56.78</b> |      |

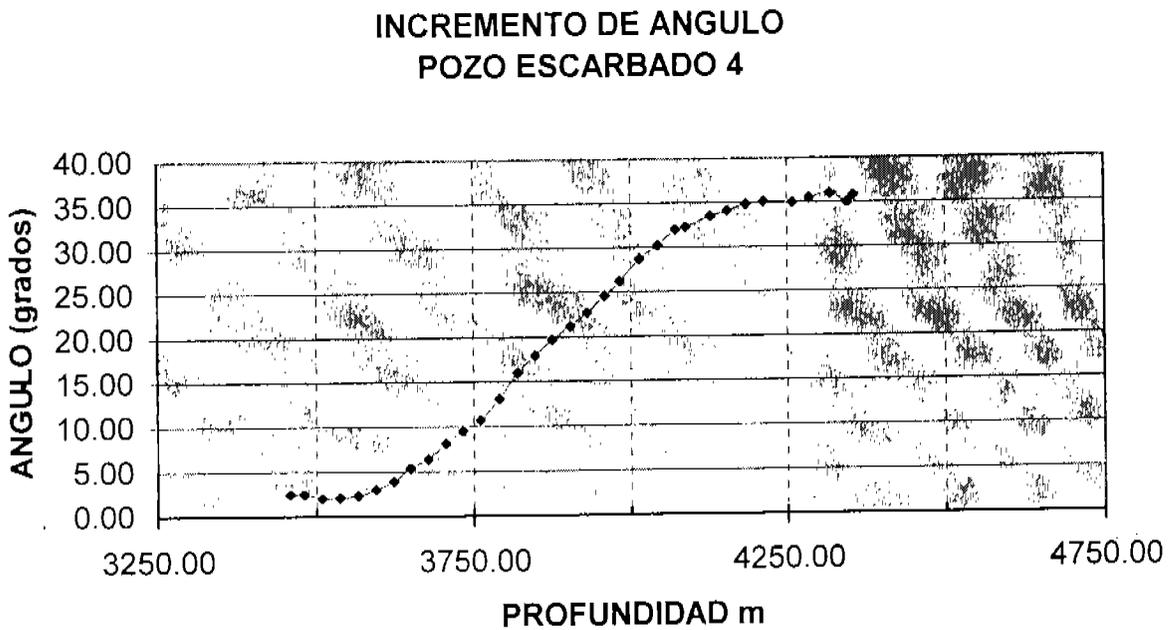
El promedio metros/día acumulativo de la perforación direccional de la Tercera Etapa del pozo Escarbado 4 es de 56.78.

La velocidad de penetración ROP efectuada por cada BHA se muestra en la siguiente grafica 2.3.38



Gráfica 2.3.38 Velocidad de penetración por cada BHA pozo Escarbado 4

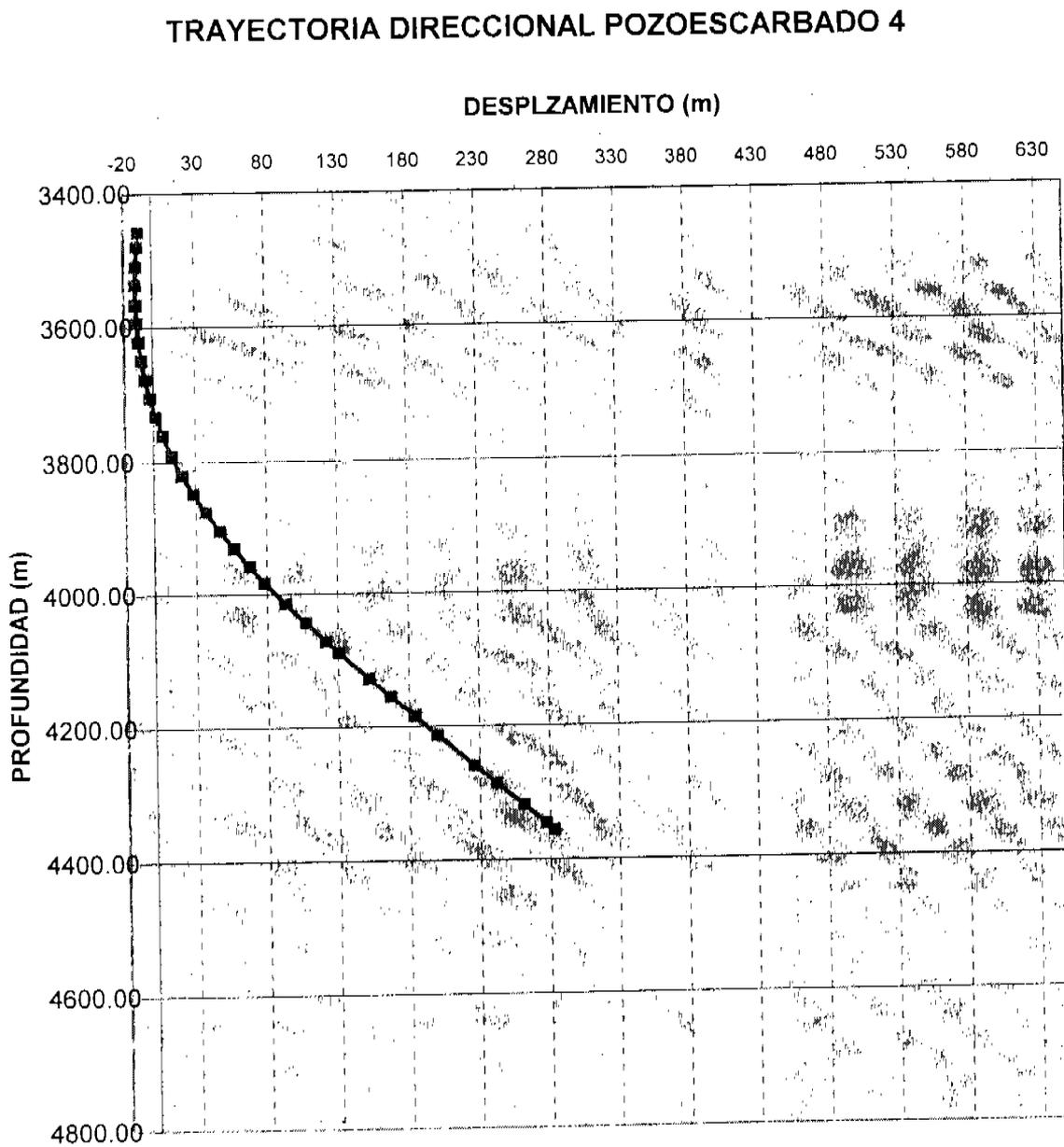
El trabajo de incremento de ángulo con respecto a la profundidad se muestra en la siguiente grafica 2.3.39



Gráfica 2.3.39 Incremento de ángulo pozo Escarbado 4

Los BHA 1, 2 Y 3 tuvieron buena respuesta para incrementar el ángulo, con los BHA 2 y 3 se disminuyeron los tiempos de penetración.

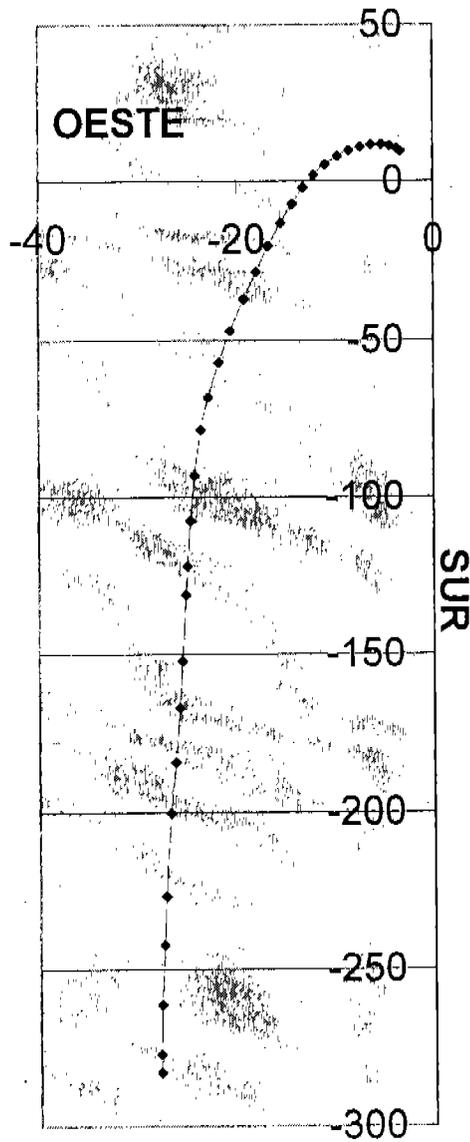
El desarrollo de la Trayectoria tipo "Slant" en la tercera etapa inicia a partir de 3470 m, el ángulo, se incrementó de 2.5° a 32.30°, alcanzando un desplazamiento de 287 m a la profundidad de 4386 m, ver gráfica 2.3.40



Gráfica 2.3.40 Trayectoria direccional pozo Escarbado 4

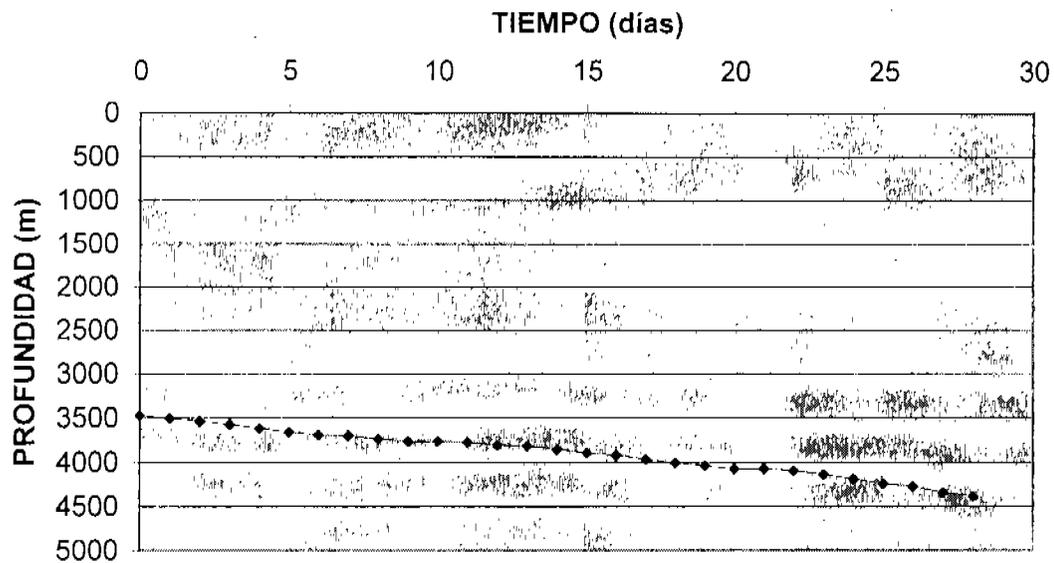
Durante la perforación direccional con barrena bicéntrica 10 5/8" x 12 1/4" el rumbo se dirigió hacia a S1.5° W, objetivo, ver gráfica 2.3.41

**VISTA SUPERIOR POZO  
ESCARBADO 4**



Gráfica 2.3.41 Vista superior pozo Escarbado 4

La tercera etapa del pozo Escarbado 4 se perforó en 46 días la gráfica 2.3.42 muestra la tasa de profundidad con respecto al tiempo en días.



Gráfica 2.3.42 Tiempo de perforación de la tercera etapa Escarbado 4

Las barrenas bicentricas de 10 5/8" x 12 1/4" de la marca HYCALOG utilizadas en la perforación direccional de la tercera etapa del pozo Escarbado 4, tienen las siguientes características:

| TIPO/ IADC | DIÁMETRO PILOTO | No. DE CORTADORES | TAMAÑO DE CORTADORES | LONGITUD |
|------------|-----------------|-------------------|----------------------|----------|
| DS101/S433 | 5"              | 46/7              | 13mm/13mm            | 17.4"    |

El record de las barrenas bicentricas utilizadas en al perforación es el siguiente:

| No. serie | Toberas                | Profundidad salida (m) | Metros Perforados | Horas de rotación | ROP (m/hora) | PSB ton. | RPM |
|-----------|------------------------|------------------------|-------------------|-------------------|--------------|----------|-----|
| 18930     | 5, 15/32"<br>4, 13/32" | 4075                   | 636               | 276               | 2.3          | 1-4      | 40  |
| SROO27    | 9, 15/32"              | 4386                   | 311               | 88                | 3.5          | 3-4      | 40  |

3  
EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LA PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE LA  
TERCERA ETAPA DE POZOS ESBELTOS CON BARRENAS BICÉNTRICAS  
10 5/8"x12 1/4"

### 3.1 EVALUACIÓN DE LOS MOTORES DE FONDO

Los motores utilizados en la perforación de la tercera etapa de los pozos del Proyecto Delta del Grijalva fueron de 8" de diámetro, su sección de poder tiene una relación de rotor/estator de 4:5, con número de estaciones de 3.6 y 5.3. En algunos casos como en los BHA de los pozos Sen 111 y Escarbado 4 se empleó junta flexible. La graduación de los bent housing varió de 0.78° a 1.5°.

El número alto de motores empleados se debe a que por un lado entre mayor está graduado el bent housing se tiene mayor respuesta a incrementar el ángulo, pero para optimizar la vida del motor se tiene que minimizar la velocidad de rotación del motor lo cual se refleja en los bajos rendimientos de los BHA, tal es el caso del Sen 71 (ver tabla 2.3.22).

En el caso del Sen 51 se utilizaron motores con bent housing graduado a 0.75°, esto porque el cabezal de la tubería de revestimiento de 11 3/4" no permitió el paso de un bent housing con mayor graduación. Debido a la graduación de 0.75° el ritmo de incremento del ángulo es menor y consecuentemente se tuvo que deslizar constantemente.

Los motores con junta flexible tuvieron buena respuesta para incrementar el ángulo debido a que esta junta ayuda al motor a tener más capacidad al torque sin reducir la velocidad del motor, también, por su flexibilidad, ayuda a alargar la vida del motor aunque esté graduado el bent housing a 1.5°. En el caso de pozo Sen 111, por ejemplo, la junta flexible fue una buena medida, se empleó en el BHA3 en el cual también se eliminó el estabilizador ubicado arriba del DCC (ver tabla 2.3.15), incrementando el ángulo de 3.2° a 16.42° en un intervalo de 299 m (ver gráfica 2.3.18).

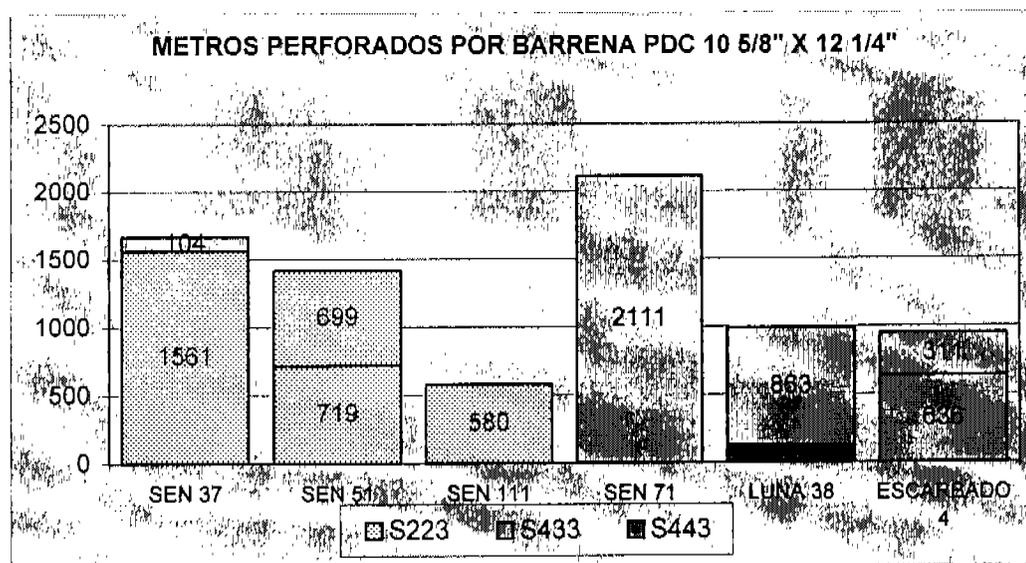
En el pozo Escarbado 4 la junta flexible se utilizó en sus tres BHA teniendo buen ritmo en el incremento del ángulo de 2.5° a 35.80° en un intervalo de 919 m (ver gráfica 2.3.39 y 2.3.40).

Los motores con mayor número de estaciones 5.3 (275 HP) son más potentes con respecto a los de menor estaciones 3.6 (175 HP). Los motores con estaciones de 5.3 sólo se utilizaron en los pozos Luna 38 , Escarbado 4 y Sen 37

los cuales tuvieron un buen desempeño en el incremento del ángulo lo que podría hacer pensar que también tuvieron un buen desempeño, gracias a los motores, en la velocidad de penetración, sin embargo, interpretando los datos encontramos que, por ejemplo en el pozo Sen 37, el cual ha sido el de las mejores cifras, en su BHA1, deslizó 279 m en 125 horas resultando un velocidad de penetración de 2.22 m/h y rotó 1245 m en 55 horas resultando un velocidad de penetración 22.63 m/h. Con lo que se concluye que el buen desempeño del BHA1 se debe al modo rotado y no al modo deslizado en donde se utilizan los motores de fondo. De igual forma en el pozo Sen 111 la velocidad de penetración en el modo de deslizar fue de 1.15 m/h, mientras que en el modo rotado fue de 5.5 m/h.

### 3.2 EVALUACIÓN DE LAS BARRENAS PDC BICÉNTRICAS 10 5/8" X 12 1/4"

Las formaciones del Terciario que componen la tercera etapa fueron perforadas con barrenas PDC bicéntricas 10 5/8" x 12 1/4" cumpliendo con un buen desempeño, perforando intervalos grandes disminuyendo el número de viajes para cambio de barrena (ver gráfica 3.2.1).



Gráfica 3.2.1 Metros perforados por barrenas PDC 10 5/8" x 12 1/4"

Se emplearon máximo 2 barrenas para perforar cada pozo, el diseño de las barrenas bicéntricas fue el siguiente:

- El de la barrena S223 (BC75): la sección piloto, 7.75 " de diámetro; tamaño del cortador, 16 mm; número de aletas 5; número de cortadores, 47. En la sección ampliadora: tamaño del cortador 13 mm; número de aletas, 2; número de cortadores, 13; longitud de trabajo, 16.3".
- La barrena S433 (DS101): la sección piloto, 7.625 " de diámetro; tamaño del cortador, 13 mm; número de aletas, 7; número de cortadores, 46. En la sección ampliadora: tamaño del cortador, 8 mm; número de aletas, 3; número de cortadores, 8; longitud de trabajo, 17.4".
- La barrena S443 (DS152): la sección piloto, 7.625 " de diámetro; tamaño del cortador, 13 mm; número de aletas, 7; número de cortadores, 39. En la sección ampliadora: tamaño del cortador, 8 mm; número de aletas, 3; número de cortadores, 8; longitud de trabajo, 15".

Esta barrena se empleó como nueva tecnología en el pozo Luna 38, la cual esta diseñada para perforar los accesorios de la tubería de revestimiento anterior de 11 ¾", sin dañar la tubería. La barrena tuvo un desempeño exitoso, por lo que es una tecnología que debe emplearse para optimizar los tiempos de perforación de la tercera etapa de los pozos esbeltos, ya que en un solo viaje se rebajan accesorios y se perfora direccionalmente.

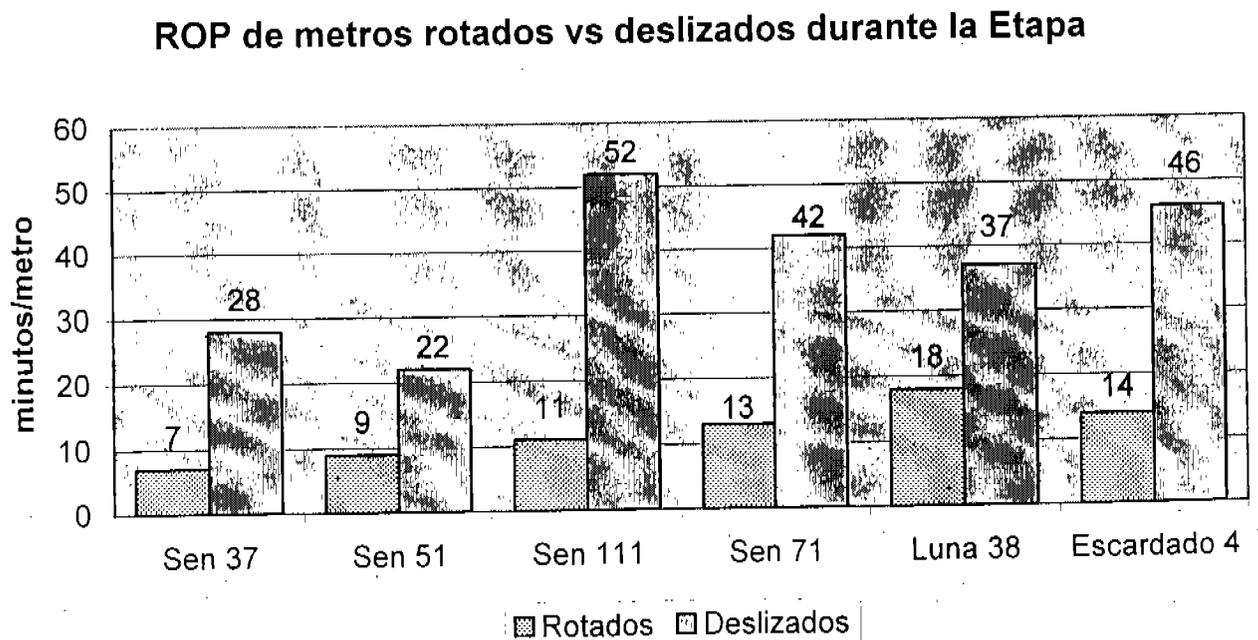
Los cambios de las barrenas bicéntricas se efectuaron aprovechando el viaje para cambiar el motor de fondo.

El trabajo de ampliación de las barrenas bicéntricas a 12 ¼" fue de calidad, comprobándose esto con los registros de calibración.

### 3.3 EVALUACIÓN DE LOS BHA CON MOTOR DE FONDO Y BARRENA PDC BICÉNTRICA 10 5/8" x 12 1/4"

El empleo de motores de fondo con barrena bicéntrica, PDC 10 5/8" x 12 1/4", en las sartas para perforar direccionalmente la tercera etapa de los pozos esbeltos ha hecho posible la construcción de las trayectorias direccionales en los modos de incremento, mantenimiento o decremento del ángulo, así como también ha permitido, finalmente, dirigir el rumbo del pozo hacia el objetivo; sin embargo, durante el desarrollo de la perforación se han observado factores que la retrasan y que impiden la eficiencia debido a lo siguiente:

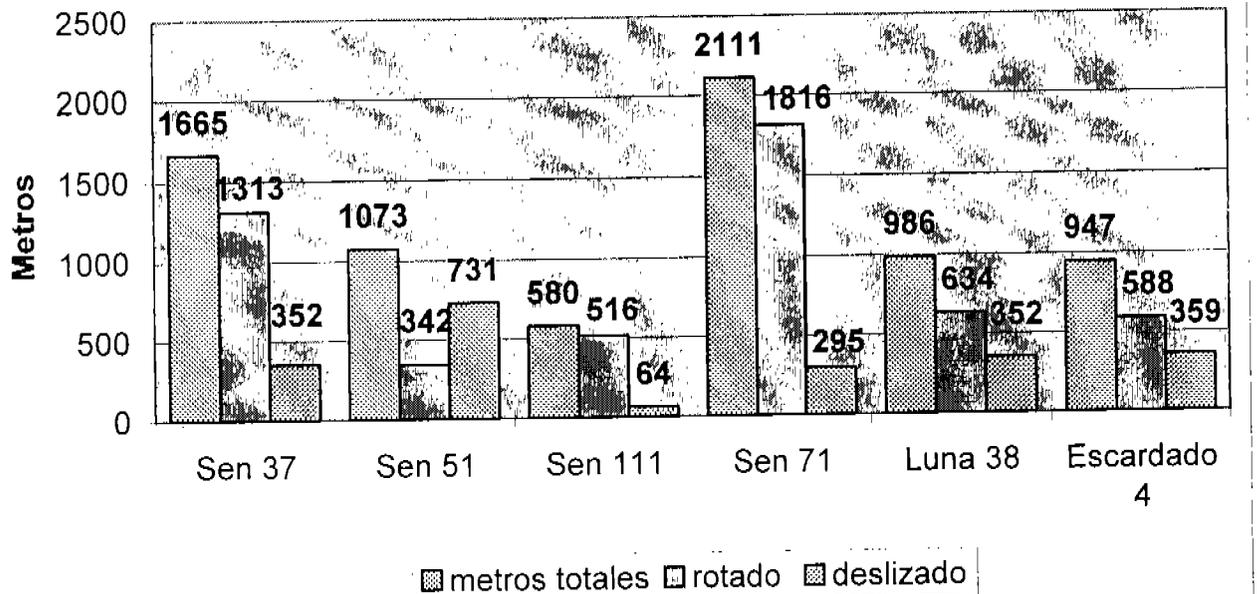
- Al incremento en el tiempo de perforación en el modo de deslizar. En todos los pozos se observó que en el modo de perforación rotaria se realizaron tiempos de perforación más bajos con respecto al modo de perforación deslizado lo que indica que el desempeño de las barrenas bicéntricas no ha aumentado el tiempo de perforación y que el factor de retraso ha sido el desempeño de los motores de fondo (ver gráfica 3.3.1).



Gráfica 3.3.1 ROP de metros rotados vs deslizados durante la tercera etapa

- A la gran cantidad de metros deslizados debido a la falta de respuesta en la construcción de la curva por no poder emplear estabilizadores al calibre del agujero de 12 ¼" (ver gráfica 3.3.2).

### Cantidad de metros rotados vs Deslizados en al perforación de la tercera Etapa

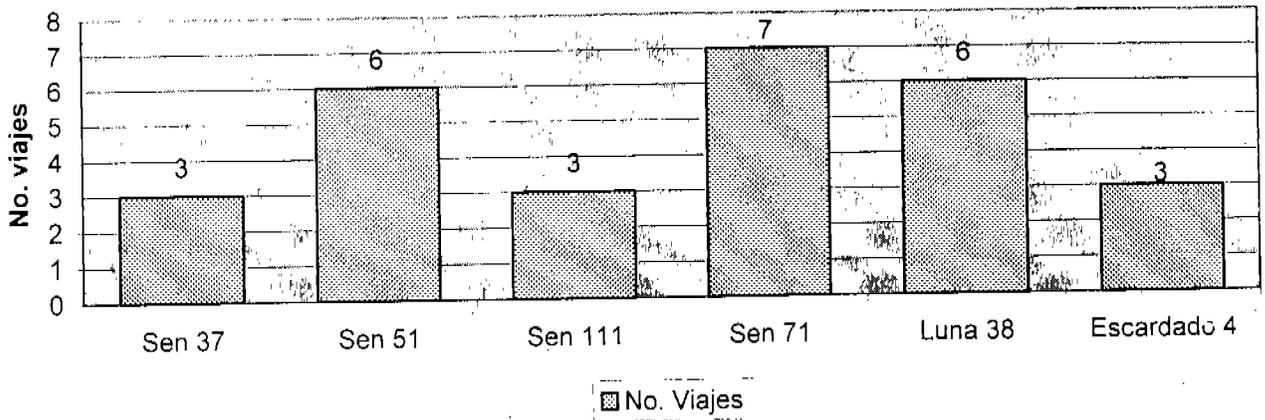


Gráfica 3.3.2 Cantidad de metros rotados vs deslizados

- Al número considerable de motores empleados como en el pozo Sen 71 que empleó 7 motores, en los pozos sen 51 y Luna 38 que emplearon 6 motores y al tiempo de vida del motor lo cual originó más numero de viajes para el cambio de los motores (ver gráfica 3.3.3).

El número de BHA empleados en cada pozo con relación a las formaciones perforadas se expone en la gráfica 3.3.4, también se incluyeron los BHA orientados, utilizados solamente en los pozo Sen 51 (BHA3 y 7) y Luna 38 (BHA5), los demás BHA utilizados en los pozos son con motor de fondo.

No. De viajes para cambio de motor en la tercera etapa de 10 5/8" x 12 1/4"



Gráfica 3.3.3 No. de viajes para cambio de motor por pozo

POZOS DEL PROYECTO DELTA DEL GRIJALVA

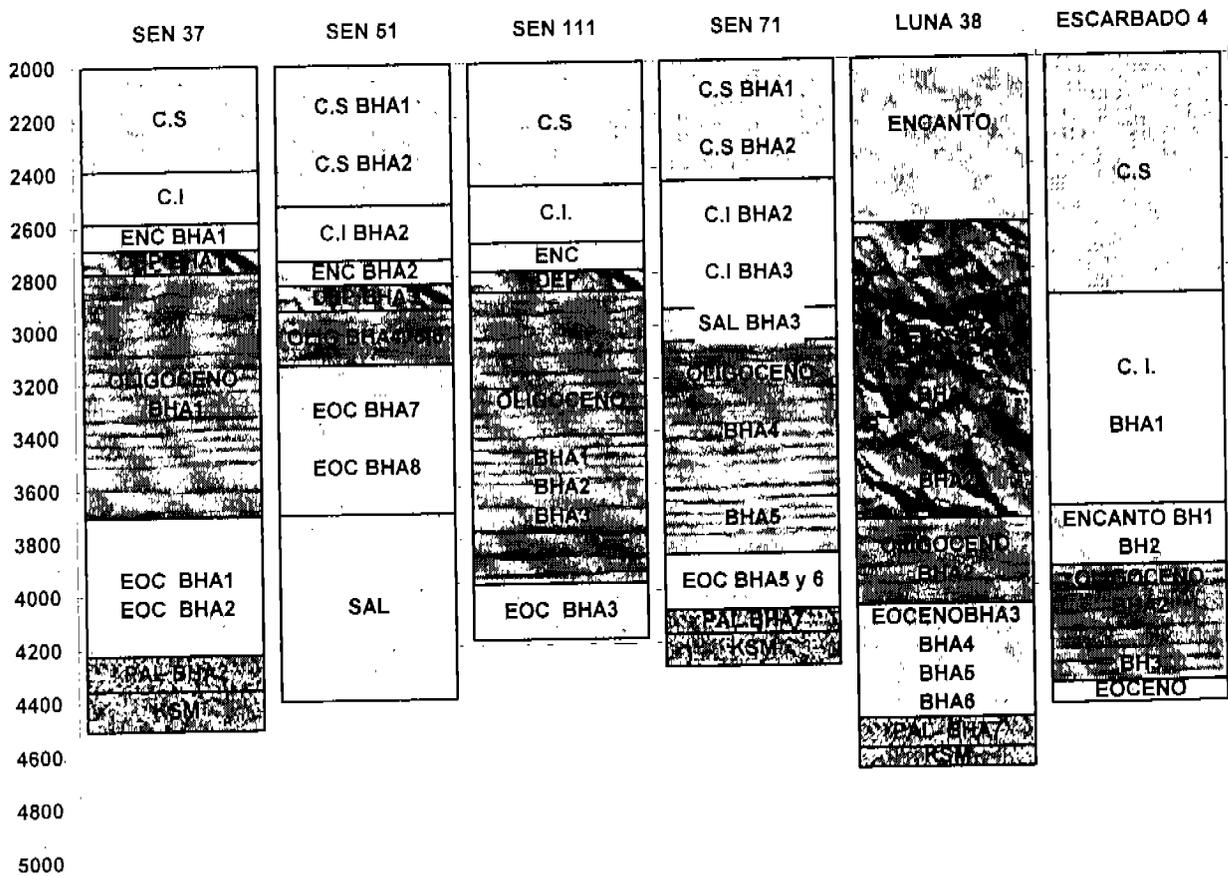


Figura 3.3.4 BHA empleados en relación a las formaciones perforadas

- Al número de viajes que afectó retrasando la perforación de la etapa y como consecuencia disminuyendo el promedio de metros por día acumulativo el cual también es un indicativo del desempeño de los ensambles de fondo (ver gráfica 3.3.5).

**PROMEDIO METRO/DIA ACUMULATIVO DE LA TERCERA ETAPA AL PERFORAR CON BARRENA BICENTRICA 10 5/8" X 12 1/4" LAS FORMACIONES DEL TERCARIO**

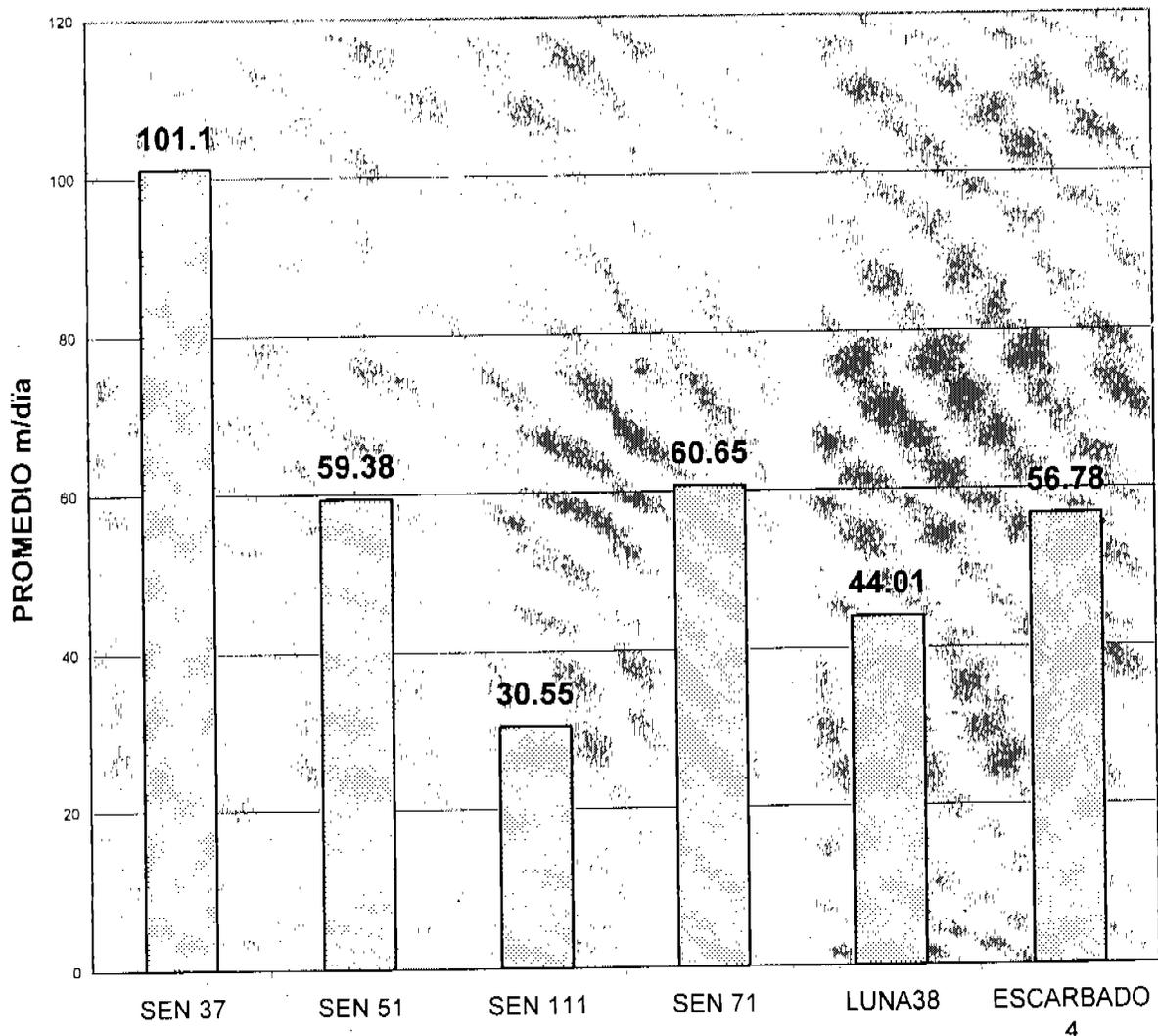
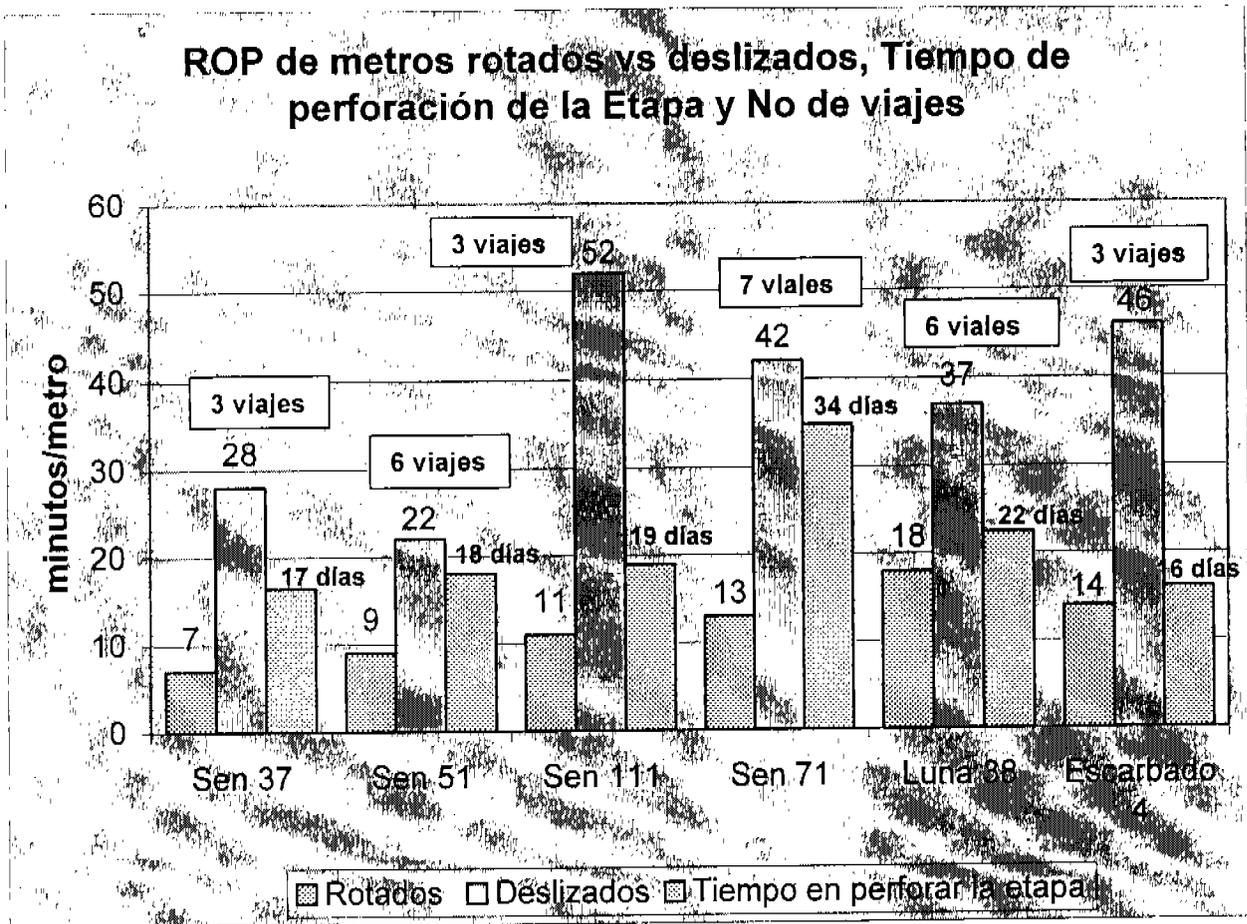


Figura 3.3.5 Promedio m/día acumulativo de la tercera etapa de perforación

Todos los factores antes descritos han repercutido en aumentar el tiempo de perforación de la tercera etapa (ver gráfica 3.3.6).



Gráfica 3.3.6 Desempeño de los BHA por pozo

4  
OPTIMIZACIÓN  
SISTEMA DE PERFORACIÓN DIRECCIONAL ROTATORIO

Con base en la evaluación expuesta en el capítulo 3, se determina que los sistemas de perforación direccional con motores de fondo han sido un factor de retraso en la perforación, debido al principio de su funcionamiento de "deslizar" para construir las trayectorias direccionales, viéndose reflejado en la disminución del ritmo de penetración, en el número de metros deslizados y en la limitada vida de los motores, ocasionando un número considerable de viajes para su cambio. La evaluación también muestra que la perforación rotatoria es la forma más adecuada para lograr la optimización de la perforación, así mismo, muestra que las barrenas bicéntricas de 10 5/8" x 12 1/4" tienen el diseño y la capacidad para perforar en un sólo viaje la tercera etapa.

Partiendo de la premisa que el mejor método para optimizar los tiempos de perforación es perforar en modo rotado, en el presente capítulo se describe el **Sistema de Perforación Direccional Rotatorio** el cual se propone como una tecnología factible de emplearse para optimizar la perforación direccional de la tercera etapa de 10 5/8" x 12 1/4" de los pozos esbeltos del Proyecto Delta del Grijalva.

#### 4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

El sistema de perforación rotatorio direccional tiene la habilidad de perforar un pozo en forma desviada con un control completo del ángulo y dirección con la rotación completa de la sarta de perforación en forma continua. La perforación con este sistema es muy similar a perforar con un ensamble rotatorio.

El sistema de perforación rotatorio puede dirigirse en cualquier dirección deseada mientras la sarta de perforación rota. Ésto incrementa el ritmo de penetración, reduce la fuerza de torsión y resistencia y mejora la calidad del pozo. El sistema de guía dentro del pozo de la herramienta automáticamente mantiene el pozo en la ruta programada. Cambios en la trayectoria del pozo se comunican a la herramienta desde la superficie mediante telemetría de pulso de lodo. Este proceso, conocido como enlace descendente <sup>10</sup>, asegura un posicionamiento preciso del pozo mientras optimiza el desempeño de perforación promedio.

El sistema de perforación rotatorio combina los beneficios de un nuevo sistema direccionable de perforación rotatorio de circuito cerrado con recientes avances en la tecnología. El sistema incluye registro de rayos gamma y resistividad a múltiple propagación, medidas de inclinación direccionales cerca de la barrena. Así puede lograr un control direccional superior y colocación precisa del pozo para lograr objetivos tanto geológicos como geométricos.

Para obtener información más completa al perforar, el aparejo rotatorio direccional puede incluir servicios de registros geofísicos en tiempo real como la densidad de litología, porosidad-neutrón y presión estática y dinámica.

#### 4.2 VISTA GENERAL DEL SISTEMA

El sistema consiste de tres elementos principales:

1. **La unidad de dirección:** controla la dirección con una camisa no-rotante. La camisa contiene tres aletas (operadas hidráulicamente), el inclinómetro cerca de barrena y dispositivos electrónicos de control. El sistema aplica una fuerza hidráulica controlada y diferente para cada aleta de dirección. El vector de fuerza resultante dirige la herramienta en la trayectoria deseada con una severidad de curva programada. Este vector de fuerza se ajusta por una combinación del control electrónico en pozo y comandos enviados hidráulicamente desde la superficie.

2. **Los dispositivos electrónicos de investigación:** controlan la interfase entre todos los componentes de la herramienta y administra los intercambios de datos desde su ubicación y hacia la superficie. Esta sección también contiene los sensores direccionales y de vibración. Las medidas de azimut del magnetómetro tri-axial se usan para monitorear y controlar la unidad de dirección en conjunto con el inclinómetro cerca de barrena, que da lecturas instantáneas de los cambios en la inclinación de la herramienta. El sensor de vibración ayuda a asegurar que la herramienta se opere dentro de las especificaciones y a máxima eficacia.

**3. La herramienta de navegación de pozo con sensores de resistividad de propagación múltiple y de rayos gamma:** permite geodirección en tiempo real en el yacimiento. El sistema provee medidas profundas de 400 Khz. y lecturas de alta resolución vertical de 2 Mhz. Mientras se perfora horizontalmente, las lecturas de 400 Khz pueden detectar límites en el estrato y contactos de fluido adyacentes a la zona objetivo. Estas lecturas permiten a los operadores enviar correcciones en el curso para mantener el pozo en la zona de interés.

Los aparatos de resistividad a la propagación de la herramienta de navegación de pozo usan dos frecuencias y transmisores duales para proveer 4 medidas de resistividad compensadas para una determinación adecuada de la resistencia de la formación ( $R_t$ ) en una variedad de condiciones. Los sensores de resistividad a la propagación compensados (dos transmisores, dos receptores) deducen diferencia de fase y resistividades de atenuación usando frecuencias de transmisión estándar de 2 Mhz y la única de 400 Khz. La nueva y menor frecuencia de transmisión permite extender la profundidad de investigación en el pozo, mejorando la capacidad para detectar límites en el estrato tempranamente para un posicionamiento preciso del pozo. Por ejemplo, la medida de 400 Khz puede leer hasta 5.5 m (18 pies) en la formación. En una aplicación horizontal, esto permite a los perforadores anticipar límites hasta 75m (250 pies) delante de la barrena.

#### 4.3 EL ESTABILIZADOR DIRECCIONABLE NO ROTANTE

El tubo de transmisión de rotación a la barrena gira dentro de la camisa no rotante direccional que se desacopla de la rotación de la sarta de perforación. El estabilizador se ubica cerca de la barrena y contiene un inclinómetro, los dispositivos electrónicos de control de dirección, y las válvulas de control que operan hidráulicamente las "aletas" de estabilización (ver figura 4.1.1).

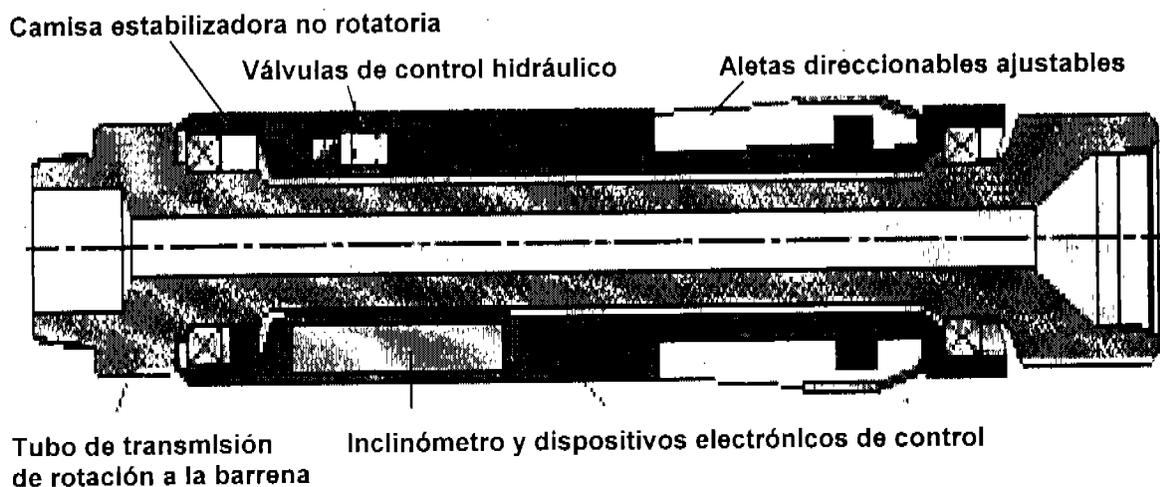
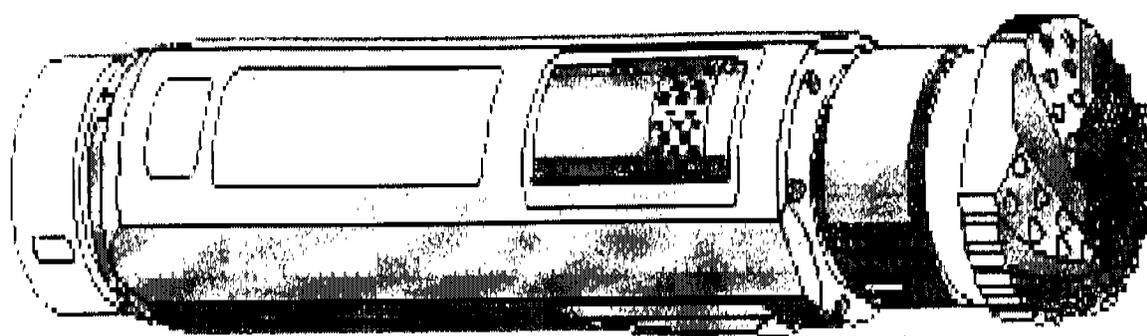


Figura 4.1.1 Estabilizador direccionable no rotatorio

Los Pistones operados por fluido hidráulico de alta presión, ejercen fuerzas controladas separadamente a cada una de las tres "aletas" de dirección. El vector de fuerza resultante dirige el aparejo en la trayectoria deseada.

El sistema interno de micro-procesamiento del estabilizador no rotatorio calcula cuánta presión debe ser aplicada a cada pistón para obtener la orientación deseada. Al determinar la magnitud de la fuerza aplicada a las "aletas" de dirección, el sistema también toma en cuenta los límites de curva para la sección de pozo actual (figura 4.1.2).

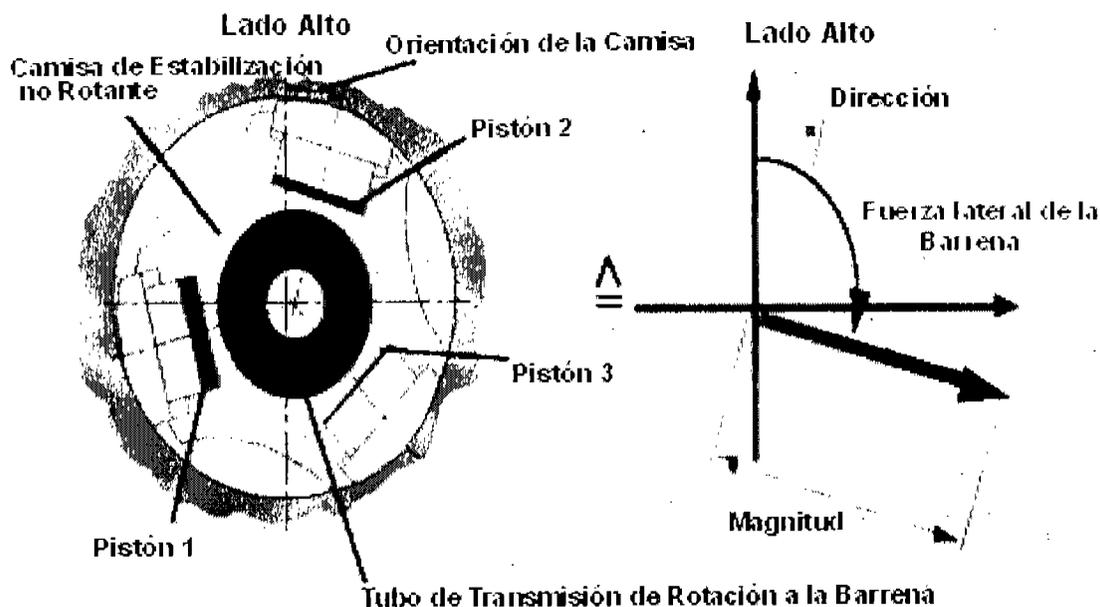


Figura 4.1.2 Vista superior del estabilizador direccional no rotatorio

En pruebas de campo se ha visto que la camisa estabilizadora rota aproximadamente una revolución cada media hora, dependiendo tanto del tipo de formación y velocidad de penetración. Para compensar, el sistema continuamente monitorea la posición relativa de la camisa estabilizadora. Usando estos datos, la herramienta automáticamente ajusta la fuerza en cada "aleta" de dirección para proveer una firme fuerza lateral en la barrena en la dirección deseada.

El sistema MWD/ LWD tiene en superficie una unidad decodificadora estándar conectada a un sistema computacional.

Los vínculos de comunicación con el estabilizador direccionable no rotante se controlan tanto con el sistema computacional o manualmente. El sistema se programa usando telemetría de pulso negativa <sup>10</sup> creada en el activador de desvío de superficie.

La transmisión de la información de la herramienta de pozo es posible vía telemetría de pulso de lodo.

El activador de desvío se conecta a la tubería y puede desviar hasta 20% del flujo de lodo. Típicamente del 13% al 15% del flujo se desvía para crear una serie de pulsos negativos en la tubería de perforación. La herramienta detecta

estos pulsos para recibir sus instrucciones. La longitud de pulso del vínculo puede ser variada entre 8, 12 y 16 segundos de acuerdo a la profundidad y propiedades del lodo. Un vínculo de comando completo puede tomar entre 2 y 8.5 minutos dependiendo de la complejidad del vínculo y la longitud de pulso elegida para funcionar en la condiciones de operación. Después que el estabilizador direccional no rotante recibe la información de vínculo, inmediatamente se reconfigura para la tarea requerida. Entonces, en confirmación, la herramienta transmite un mensaje a la superficie de que ha recibido el vínculo y se ha reconfigurado apropiadamente.

La operación automatizada del vínculo puede ser realizada mientras procede la perforación, permitiendo el control del estabilizador direccional no rotante sin interrumpir el progreso del pozo (ver figura 4.1.3)

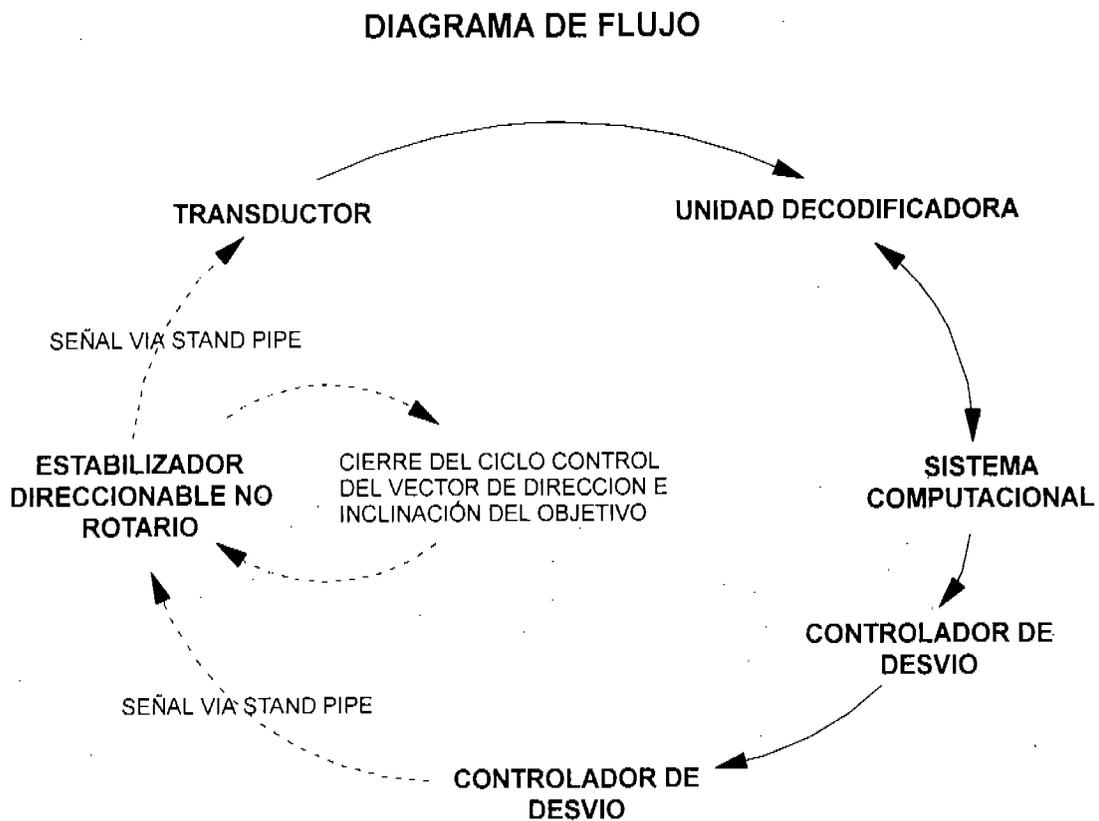


Figura 4.1.3 Diagrama de flujo de funcionamiento del sistema de perforación direccional rotatorio

#### 4.4 CONSIDERACIONES OPERACIONALES

Una vez que todo el equipo de superficie está instalado, las herramientas de pozo se prueban en la cubierta. Durante las pruebas de cubierta, el estabilizador direccional no rotante se programa rápidamente con el formato de datos requeridos y tasa de transmisión así como las respuestas direccionales iniciales para complementar el plan de pozo. A diferencia de los sistemas de motor direccionables convencionales, el estabilizador direccional no rotante, no tiene bent housing así que no requiere ajustes en la superficie que consumen tiempo. La herramienta está inmediatamente lista para funcionar en el pozo.

Al perforar, se debe tener precaución por algún cambio en el diámetro del pozo. En un punto conveniente, una prueba se realiza para confirmar la comunicación bidireccional entre la herramienta de fondo y la superficie.

La perforación con el sistema direccional rotatorio es muy similar a perforar rotando con un ensamble rotatorio. Los parámetros de perforación se optimizan incrementando el ritmo de penetración, y los datos de vibración transmitidos se monitorean continuamente para la detección de cualquier inestabilidad del agujero potencialmente peligrosa. La inclinación cerca de barrena proporciona indicaciones inmediatas y continuas de la respuesta direccional de la herramienta. Investigaciones direccionales completas se obtienen durante el bombeo fuera de perforación en cada conexión, después transmitida cuando se reanuda la perforación así que no se desperdicia tiempo de perforación en las investigaciones.

Cuando se requieren mayores cambios de curso para lograr la trayectoria de pozo deseada, el estabilizador direccional no rotante se reprograma desde la superficie por vinculación. Esta reprogramación toma lugar mientras se perfora, de nuevo sin perder tiempo de perforación.

La rotación continua de la sarta de perforación mejora enormemente la limpieza del pozo y resultados en menos viajes de revisión. La rotación continua también elimina la perforación de deslizamiento y tiempo asociado sin perforar para ajustar la orientación de la herramienta. También maximiza el ritmo de

penetración porque se pueden seleccionar barrenas cortadoras más agresivas y de mayor duración en vez de las barrenas tricónicas requeridas para la orientación. En adición, el control de desviación del estabilizador direccionable no rotante es más preciso y perfora una curva más 'suave' comparada con las altamente localizadas curvas cerradas creadas por los sistemas direccionables convencionales.

Una vez fuera del pozo el estabilizador direccionable no rotante se almacena, y los datos de memoria son recuperados del puerto de descarga de la herramienta, convenientemente localizado cerca del final de la herramienta. Un registro completo se produce en tiempo real al perforar, y un registro final de campo se produce en el sitio de los datos de memoria descargados.

#### 4.5 CONFIGURACIÓN DEL ESTABILIZADOR DIRECCIONABLE NO ROTANTE

En su configuración estándar, la herramienta está diseñada para crear una intensidad de curva de hasta  $6.5^\circ/30$  m (100 pies) en pozos de  $8\frac{1}{2}$  y  $6^\circ/30$  m (100 pies) en pozos de  $12\frac{1}{4}$ . Se proveen medidas de datos de evaluación direccionales y de formación en tiempo real (resistividad y rayos gamma).

#### 4.6 SELECCIÓN DE BARRENA

En general, el sistema de perforación direccionable rotaria puede usar barrenas con cortadores fijos más estables, elegidos para un desempeño de perforación óptimo, en lugar de barrenas elegidas para una orientación eficiente en los motores de fondo direccionables.

Aunque diseñadas para mayor ritmo de penetración, las barrenas agresivas PDC pueden crear fuerza de torsión que hace difícil controlar la orientación de los sistemas direccionables con motor de fondo, en la perforación de modo deslizado, para cambiar el curso del pozo. El sistema de perforación direccionable rotatorio continuo, completamente elimina la perforación lateral, para que las barrenas PDC

se puedan elegir para alto desempeño de perforación de la formación, mejorando grandemente el ritmo de penetración, tanto en el fondo como en promedio.

Una selección de barrena altamente agresiva, es conveniente para el manejo del sistema de perforación direccional rotatorio sobre la perforación con motor de fondo. Esto dará fuerza de torsión directamente al sistema, aislándolo de los efectos de torsión de la sarta de perforación, resultando en parámetros de perforación de pozo más consistentes.

#### 4.7 FLUIDOS DE PERFORACIÓN Y TEMPERATURA

Los elastómeros usados en el sistema de perforación direccional rotatorio han sido extensivamente probados para identificar problemas potenciales de compatibilidad con un amplio rango de fluidos de perforación. En servicio, la herramienta de fondo, estabilizador direccional no rotante, ha sido usada con una variedad de fluidos de perforación, ( base aceite, sintéticos y base agua) sin incidentes.

Todos los componentes dentro del estabilizador direccional no rotante, están diseñados para soportar temperaturas de hasta 150° C.

#### 4.8 BENEFICIOS DEL SISTEMA DE PERFORACIÓN DIRECCIONAL ROTATORIO

Control direccional rotando la sarta continuamente:

- Eliminación de la perforación por deslizamiento
- Fuerza de torsión y resistencia minimizadas
- Limpieza del pozo mejorada
- Velocidad de penetración mejorada
- Tiempo de perforación de la etapa reducido
- Selección de parámetros de perforación para optimizar la velocidad de penetración.
- Presión diferencial reducida
- Selección de barrena para mejor desempeño en perforación en vez de manejo direccional
- Control direccional completo en mayor alcance
- Habilidad para perforar perfiles de pozo de diseños más ambiciosos con menor riesgo
- Habilidad para reducir el número de viajes.

#### Control direccional automatizado

- Control horizontal de la profundidad vertical verdadera (PVV) mejorado
- Tortuosidad del pozo reducida

#### Evaluación de la formación perforada

- Resistividad múltiple de propagación
- Rayos Gamma
- Sensores cerca de barrena
- Alta profundidad de investigación
- Posicionamiento geológico preciso mediante la geodirección

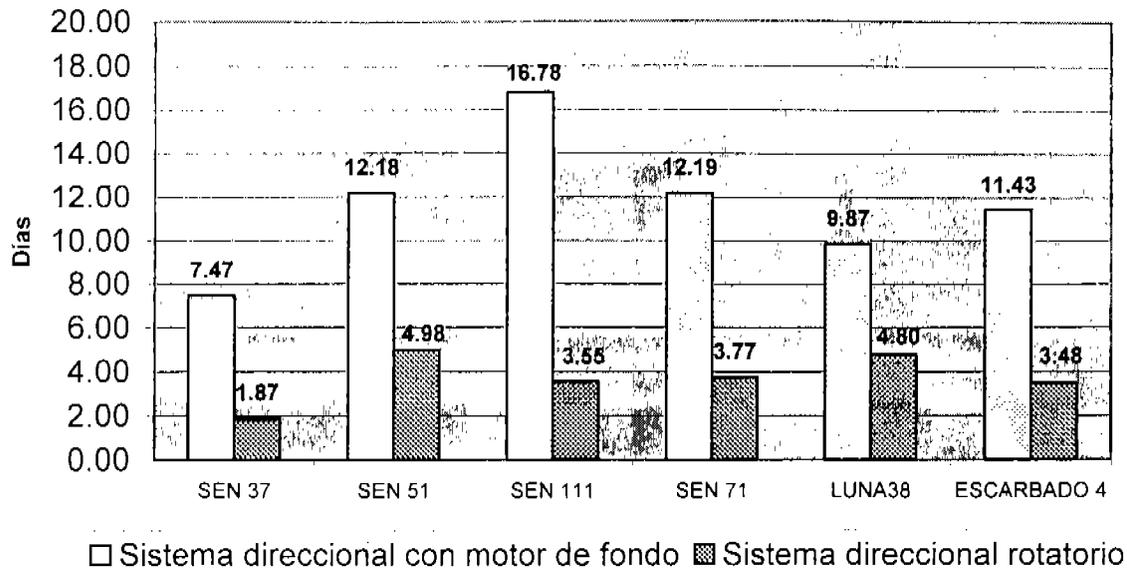
#### Comunicación de dos vías para ajustes en la perforación rotaria

- Dirección ajustable
- Severidad de curva ajustable
- Sección puede ser perforada en una sola corrida
- Confirmación de la herramienta de pozo a superficie de configuración de operación completa.

#### 4.9 ANALISIS COSTO BENEFICIO EMPLEANDO EL SISTEMA DIRECCIONAL ROTATORIO

La optimización en tiempo al emplear el sistema de perforación direccional rotatorio con respecto al sistema direccional con motor de fondo, en la construcción de las trayectorias direccionales, minimiza los costos de perforación direccional de la tercera etapa de los pozos esbeltos (gráfica 4.9.1)

### Comparación de tiempos de construcción de trayectorias



Gráfica 4.9.1 Comparación de tiempos de construcción de trayectorias direccionales

Se determinó el ahorro de tiempo, en días, en función de la diferencia de tiempos de perforación entre el sistema con motor de fondo y el sistema con camisa estabilizadora direccional no rotatoria. El costo beneficio se determinó en función del ahorro de tiempo y el costo por día del equipo de perforación el cual es de \$133000 pesos/día , como se muestra en la siguiente Tabla comparativa:

#### Costo beneficio empleando el Sistema Direccional Rotatorio

| Sistemas de perforación           | Sen 37    | Sen 51    | Sen 111     | Sen 71      | Luna 38   | Escarbado 4 |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-------------|-------------|-----------|-------------|
| Direccional con motor de fondo    | 7.47      | 12.18     | 16.78       | 12.19       | 9.87      | 11.43       |
| Direccional rotatorio             | 1.87      | 4.98      | 3.55        | 3.77        | 4.8       | 3.48        |
| Ahorro en Tiempo por optimización | 5.6 días  | 7.2 días  | 13.23 días  | 8.42 días   | 5.07 días | 7.95 días   |
| Beneficio en pesos                | \$744,800 | \$957,600 | \$1,759,590 | \$1,119,860 | \$674,310 | \$1,057,350 |

**CONCLUSIONES**

De acuerdo al análisis, realizado a los pozos de los campos Sen, Luna y Escarbado se puede concluir que se ha intentado optimizar la perforación direccional mediante las siguientes estrategias:

- Empleando motores de alto desempeño, así como barrenas PDC bicéntricas de tecnología de vanguardia las cuales están diseñadas para la perforación direccional e incluso hoy en día pueden moler los accesorios de cementación de la tubería de revestimiento anterior.
- Efectuando el trabajo de construcción de la curva en la etapa anterior de 14 ¾", pozo sen 71 y luna 38, para únicamente mantener el ángulo construido durante la etapa bicéntrica y facilitar el manejo direccional

Sin embargo las estrategias anteriores no han logrado la optimización de la perforación direccional con barrena bicéntrica PDC 10 5/8" x 12 ¼" lo cual se demuestra en la evaluación del desempeño de los BHA con motor de fondo, basada en los rendimientos de velocidad de penetración (ROP), en el promedio metro/día acumulativo, en el número de motores y barrenas empleadas, en los tipos de trayectoria construidos, en la respuesta para incrementar el ángulo y rumbo en las formaciones perforadas y en el tiempo efectivo de perforación de la tercera etapa, concluyendo lo siguiente:

- 1.- El método de perforación direccional con motor de fondo cumple con el proyecto direccional sin lograr optimizar los tiempos de perforación durante la construcción de la curva en modo de "deslizado".
- 2.- El no emplear estabilizadores al calibre del agujero de 12 ¼", limita a los BHA para que funcionen de acuerdo a los principios de estabilización, lo cual origina que el motor de fondo realice más trabajo direccional, es decir, se requiere perforar más metros en modo deslizado.

3.- El tiempo de vida de los motores de fondo es limitado de 180 a 200hrs lo cual ocasiona más numero de viajes en algunos casos hasta 7 viajes para cambiar el motor .

4.- Los tiempos de perforación en modo deslizado son en algunos casos hasta 500% más que en el modo rotado.

5.- Aun facilitando el trabajo direccional, para únicamente perforar manteniendo el ángulo, durante toda la tercera etapa (pozos Luna 38 y Sen 71) no se logró optimizar los tiempos de perforación.

6.- Los factores de retraso son inherentes al desempeño y funcionabilidad de los motores de fondo y no al desempeño de las barrenas bicéntricas.

Se ha demostrado que en los intentos de optimización de los pozos a través del empleo de motores y barrenas con especificaciones de alto desempeño no han tenido una respuesta de mejora debido básicamente al principio del funcionamiento de los motores de fondo y a la falta de estabilización. Por tales motivos se investigó sobre tecnologías diferentes que pudieran eliminar el modo de perforación deslizado y que permitan estabilizar la sarta de perforación, para obtener un mejor control direccional y a su vez una mejor respuesta en la construcción de las trayectorias. Esta tesis mostró una nueva tecnología como una alternativa para optimizar los tiempos de perforación de la tercera etapa que con base en su principio de funcionamiento y en que puede rotar constantemente durante la construcción de las trayectorias direccionales permitirá que la perforación sea mas eficiente.

Con el empleo de la tecnología, Perforación Direccional Rotatoria se concluye que podemos obtener los siguientes beneficios: Tener control de la dirección y ángulo del pozo sin menoscabo de los ritmos de penetración, uso de barrenas específicas para las formaciones atravesadas, obtención de información geofísica a tiempo real durante la perforación y una disminución de tiempos y costos.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Compañía Schlumberger. Reporte final del proyecto direccional Luna 38, agosto del 2001.
- 2.- Compañía Schlumberger. Reporte final del proyecto direccional Pozo Sen 71, agosto del 2001.
- 3.- Compañía Perforación Latinoamericana. Reporte final del proyecto direccional Pozo Sen 51, diciembre del 2000.
- 4.- Compañía Perforación Latinoamericana. Reporte final del proyecto direccional Pozo Sen 37, noviembre del 2000.
- 5.- Compañía Schlumberger. Reporte final del proyecto direccional Pozo Sen 111, marzo del 2001.
- 6.- Compañía Schlumberger. Reporte final del proyecto direccional Pozo Escarbado 4, septiembre del 2001.
7. Compañía Smith Bits. Manual Nuevas Tecnologías de Barrenas de Perforación.
8. Compañía Schlumberger. Steerable Motor Handbook. 1997
9. Artículo Técnico. SPE k71398: Field Development Utilizing Rotary Steering Technology. Morten Grini, SPE, Esso Norway, and Bill Rice, SPE, Esso Canada, an Svein Stromberg, SPE, Baker Hughes Inteq.
10. Baker Hughes. Technical Overview. Rotary Closed Loop Drilling System. 1999
11. Abstract. SPE 71840. Using Rotary Closed-Loop Drilling to Increase Operational Efficiency and reduce operational risk. John a Johnstone; Baker Hughes intq, Hartmut Gruenhagen; Baker Hughes Intq.
12. Compañía Reed-Haycalog, Schlumberger. Manual de Barrenas PDC Bicéntricas. 2000

## INDICE DE GRAFICAS

|                      |    |
|----------------------|----|
| Gráfica 2.1.3 .....  | 44 |
| Gráfica 2.1.4 .....  | 44 |
| Gráfica 2.1.5 .....  | 46 |
| Gráfica 2.1.6 .....  | 46 |
| Gráfica 2.1.10 ..... | 51 |
| Gráfica 2.1.11 ..... | 52 |
| Gráfica 2.1.12 ..... | 53 |
| Gráfica 2.1.13 ..... | 54 |
| Gráfica 2.1.14 ..... | 54 |
| Gráfica 2.1.17 ..... | 58 |
| Gráfica 2.1.18 ..... | 59 |
| Gráfica 2.1.19 ..... | 60 |
| Gráfica 2.1.20 ..... | 61 |
| Gráfica 2.1.14 ..... | 61 |
| Gráfica 2.1.24 ..... | 65 |
| Gráfica 2.1.25 ..... | 66 |
| Gráfica 2.1.26 ..... | 67 |
| Gráfica 2.1.27 ..... | 68 |
| Gráfica 2.1.28 ..... | 68 |
| Gráfica 2.3.31 ..... | 73 |
| Gráfica 2.3.32 ..... | 73 |
| Gráfica 2.3.33 ..... | 74 |
| Gráfica 2.3.34 ..... | 75 |
| Gráfica 2.3.35 ..... | 75 |
| Gráfica 2.3.38 ..... | 79 |
| Gráfica 2.3.39 ..... | 79 |
| Gráfica 2.3.40 ..... | 80 |
| Gráfica 2.3.41 ..... | 81 |
| Gráfica 2.3.42 ..... | 82 |

|                     |     |
|---------------------|-----|
| Gráfica 3.2.1 ..... | 85  |
| Gráfica 3.3.1 ..... | 87  |
| Gráfica 3.3.2 ..... | 88  |
| Gráfica 3.3.3 ..... | 89  |
| Gráfica 3.3.4 ..... | 89  |
| Gráfica 3.3.5 ..... | 90  |
| Gráfica 3.3.6 ..... | 91  |
| Gráfica 4.9.1 ..... | 103 |

## INDICE DE TABLAS

|                    |    |
|--------------------|----|
| Tabla 1 .....      | 9  |
| Tabla 2.1.1 .....  | 42 |
| Tabla 2.1.2 .....  | 43 |
| Tabla 2.1.7 .....  | 48 |
| Tabla 2.1.8 .....  | 49 |
| Tabla 2.1.9 .....  | 50 |
| Tabla 2.1.15 ..... | 56 |
| Tabla 2.1.16 ..... | 57 |
| Tabla 2.1.22 ..... | 63 |
| Tabla 2.1.23 ..... | 64 |
| Tabla 2.3.28 ..... | 70 |
| Tabla 2.3.29 ..... | 71 |
| Tabla 2.3.30 ..... | 72 |
| Tabla 2.3.36 ..... | 77 |
| Tabla 2.3.37.....  | 78 |

## INDICE DE FIGURAS

|                      |    |
|----------------------|----|
| Figura 1.1 .....     | 4  |
| Figura 1.2 .....     | 5  |
| Figura 1.3 .....     | 6  |
| Figura 1.4 .....     | 7  |
| Figura 1.2.1 .....   | 14 |
| Figura 1.2.2 .....   | 15 |
| Figura 1.2.3 .....   | 16 |
| Figura 1.3.2.1 ..... | 19 |
| Figura 1.3.2.2 ..... | 20 |
| Figura 2.1 .....     | 34 |
| Figura 2.2 .....     | 34 |
| Figura 2.3 .....     | 35 |
| Figura 2.4 .....     | 36 |
| Figura 2.5 .....     | 37 |
| Figura 2.6 .....     | 38 |
| Figura 2.7 .....     | 40 |
| Figura 4.1.4 .....   | 96 |
| Figura 4.1.2 .....   | 97 |