

011745



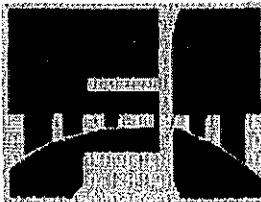
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

“DETERMINACIÓN DE CAMBIOS LITOLÓGICOS POR MEDIO DE PARÁMETROS DE OPERACIÓN DURANTE LA PERFORACIÓN”

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA PETROLERA  
(ESPECIALIDAD EN PERFORACIÓN)  
P R E S E N T A:  
ING. JOSE L. GONZÁLEZ GONZÁLEZ



DIRECTOR DE TESIS : DR. DANIEL GARCIA GAVITO

Estudios de Posgrado

CD. UNIVERSITARIA, MEX. D.F.

NOVIEMBRE DEL 2002

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.



PROGRAMA DE POSGRADO EN INGENIERÍA

RECIBI COPIA DE TESIS DESARROLLADO POR EL ALUMNO: JOSE LUIS GONZALEZ GONZALEZ.

PARA PRESENTAR EXAMEN DE GRADO DE MAESTRIA EN INGENIERIA EN EL CAMPO DEL CONOCIMIENTO INGENIERIA PETROLERA Y DE GAS NATURAL.

JURADO	FIRMA	FECHA
PRESIDENTE: DR. VICENTE CASARIEGO GONZALEZ	<i>[Signature]</i>	09/01/02
VOCAL: DR. DANIEL GARCIA GAVITO	<i>[Signature]</i>	09/01/02
SECRETARIO: DR. FERNANDO SAMANIEGO VERDUZCO	<i>[Signature]</i>	Enviado del 11/enero/2002
SUPLENTE: DR. SERGIO BERUMEN CAMPOS	<i>[Signature]</i>	8/1/02
SUPLENTE: M. en I. JOAQUIN MENDIOLA SANCHEZ	<i>[Signature]</i>	

APROBACION DEL TRABAJO DE TESIS POR EL DEPARTAMENTO Daniel Garcia Gavito

BJS\*jac.

Recibi  
11-01-02  
*[Signature]*

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

---

## Agradecimientos

Con mucho amor a mi esposa María Salomé, por cuidar y querer a nuestras hijas Priscila y Camila, la mayor parte de los 24 meses de mis estudios.



A mis padres, hermanas, hermanos, cuñadas y cuñados por impulsarme y compartir conmigo que:  
“ La educación es el único camino seguro para conseguir las metas”



A mis entrañables compañeros de clase de perforación, tuberos y yacimenteros de la Generación 2000, por ser “Mas tercós” que nadie por salir adelante.



Al M.I. Carlos Osornio Vázquez, porque de un plumazo me dio la oportunidad de ingresar a los estudios de posgrado.



A todos mis compañeros de trabajo de la Subgerencia de Ingeniería y la UONE, División Marina por que me enviaron muchos E-mail's llenos de información dándole mucho valor a éste trabajo.

---

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

---

**Al personal de la Gerencia de Tecnología de la UPMP por  
su amable bienvenida y las facilidades dadas  
para la conclusión de mi Maestría.**



**Al Dr. Daniel García Gavito por ordenar académicamente mis  
Ideas operativas, cuajadas en éste trabajo final**



**A los profesores de la División de Posgrado  
de la Facultad de Ingeniería, por compartir sus conocimientos y su tiempo  
para seguir formando Maestros en Ingeniería.**



---

## RESUMEN

El presente trabajo muestra la relación de parámetros operativos de perforación en la determinación de energía específica de perforación, la resistencia a la compresión uniaxial in situ y su utilidad en la correlación con el registro de rayos gamma mientras se perfora.

Se inició estimando la energía específica de perforación; trabajos de laboratorio y la aplicación a campo de algunos autores, buscando la evaluación de propiedades mecánicas a partir de la energía específica de perforación.

Tomando datos de campo del pozo Cantarell 3006D, se encontró una buena relación del registro de rayos gamma con la resistencia a la compresión, confirmada al obtener una gráfica de Índice de Resistencia a la Compresión/RG, la cual mantiene una aceptable correlación con el registro de rayos gamma.

Partiendo de las expresiones de energía específica y de resistencia a la compresión, se desarrolló una ecuación que permite predecir la velocidad de penetración de la barrena y la torsión esperada mientras perfora, permitiendo ser utilizadas para optimizar el uso de barrenas PDC.

Una de las mayores aportaciones técnicas que presenta éste trabajo, es la construcción de un perfil de porcentaje de lutita, partiendo solamente de los parámetros operativos básicos y el conocimiento de la resistencia a la compresión de las rocas en pruebas de laboratorio y promedio de campo.

Finalmente, a partir de los resultados de resistencia a la compresión, el registro de rayos gamma y un reporte litológico del pozo en estudio, se presenta una metodología para la construcción de un registro de Litoresistencia, que permite construir una gráfica de porcentaje de lutita contra profundidad mientras se perfora, empleando solamente parámetros básicos de perforación.

**CONTENIDO**

<b>Capítulo</b>	<b>Página</b>
<b>Agradecimientos</b>	
<b>RESUMEN</b>	i
<b>Lista de Tablas</b>	iv
<b>Lista de Figuras</b>	v
<b>INTRODUCCIÓN</b>	vi
<b>1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b> Deducción de expresiones empleadas en el modelo simple de Teale.	3
<b>1.2</b> Estudios experimentales en rocas índice sobre energía específica.	8
1.2.1 Descripción del equipo de perforación de laboratorio.	10
<b>1.3</b> Aplicaciones a la perforación para barrenas tricónicas	12
<b>1.4</b> Caracterización de las rocas perforadas en la edad Terciaria del Campo Cantarell	16
<b>1.5</b> Origen de la radiación natural en las rocas	17
<b>2 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A PARTIR DE DATOS OPERATIVOS.</b>	<b>20</b>
<b>2.1</b> Análisis de datos de laboratorio.	20
<b>2.2</b> Metodología empleada para obtener las ecuaciones de EEP y la Resistencia a la Compresión.	23
<b>2.3</b> Obtención de los datos de operación.	28
<b>2.4</b> Deducción de la ecuación para estimar la velocidad de penetración y el torque.	28

<b>TESIS CON FALLA DE ORIGEN</b>
--------------------------------------

---

2.5	Metodología de obtención de curvas.	31
3.	<b>PRUEBA DE CAMPO</b>	36
3.1	Problemática del asentamiento de tuberías de revestimiento en la perforación de la edad terciaria del Campo Cantarell.	36
3.2	Adquisición de los parámetros operativos en la etapa de 14 ¾" , Pozo Cantarell 3006D.	40
3.2.1	Selección de la barrena.	40
3.2.2	Parámetros operativos de perforación.	40
3.3	Análisis de la información.	42
3.4	Estimación de la resistencia a la compresión en campo.	43
3.5	Indice de Resistencia – Rayos Gamma.	44
3.6	Perfil de porcentaje de lutita.	45
3.7	Análisis preliminar de los resultados	49
4	<b>ANALISIS DE RESULTADOS</b>	50
	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	54
	<b>NOMENCLATURA</b>	57
	<b>REFERENCIAS</b>	58
	<b>APÉNDICE</b>	60



## LISTA DE TABLAS

	TÍTULO	Página
Tabla 1.1	Resultados de las pruebas con equipo de perforación portátil y otras pruebas mecánicas por Reddish.	11
Tabla 1.2	Resultados de pruebas mecánicas en núcleos de la formación Grout realizadas por Reddish y otros.	13
Tabla 1.3	Resultados de pruebas mecánicas en núcleos de lutita Mancos realizadas por Reddish y otros.	13
Tabla 1.4	Resumen de datos en agujeros de 49 mm llenos de agua, desarrollados por Elkington.	15
Tabla 2.1	Características y comportamiento de las rocas analizadas en laboratorio.	21
Tabla 2.2	Propiedades físicas y mecánicas de las principales rocas índice.	22
Tabla 2.3	Información obtenida en las pruebas de laboratorio	23
Tabla 2.4	Datos obtenidos durante la perforación	35
Tabla 3.1	Relación de pozos donde se ha empleado el sistema LWD en el Campo Cantarell	37
Tabla 3.2	Parámetros operativos de las barrenas de 14 3/4", Pozo Cantarell 3006D	42

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## LISTA DE FIGURAS

	TITULO	Pagina
Fig. 1.1	Modelo de Pessier para representar las fuerzas axiales y tangenciales que actúan en la formación durante el proceso de perforación rotatoria.	6
Fig. 2.1	Relación de torque vs. peso sobre barrena	26
Fig. 2.2	Relación de los valores de energía específica calculada con Rabia vs Teale	28
Fig. 2.3	Energía específica total vs penetración por revolución en pruebas de laboratorio.	29
Fig. 2.4	Relación de WOB – ROP, según ecuación 2.6	32
Fig. 2.5	Relación de WOB – Torque, según ecuación 2.7	32
Fig. 2.6	Secuencia para obtener la Resistencia a la Compresión.	36
Fig. 3.1	Comparación de registros GR y DIL del pozo Cantarell 3089, tomados con cable y con LWD.	41
Fig. 3.2	Sección estructural del pozo Cantarell 3006D	43
Fig. 3.3	Relación de RG-EEP y resistencia a la compresión, Pozo C-3006D	48
Fig.3.4	Registro de Indice de Resistencia - Rayos Gamma, Pozo Cantarell 3006D.	49
Fig. 3.5	Perfil de Porcentaje de Lutita, Pozo Cantarell 3006D	50
Fig. 4.1	Registros de rayos gamma de 5 diferentes pozos de la plataforma Akal KL	55

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

---

## INTRODUCCIÓN

Una de las decisiones más trascendentes en la perforación de pozos petroleros es determinar la profundidad de asentamiento de las tuberías de revestimiento; en los pozos exploratorios, se lleva un estricto seguimiento geológico a través de los fósiles índice, lo que permite identificar los diferentes contactos y edades de las formaciones. En pozos de desarrollo, las herramientas más importantes son los registros geofísicos, los cuales, por medio de comparación de curvas permiten correlacionar el pozo en perforación, con los pozos vecinos ya perforados.

En los pozos del campo Cantarell se introduce una tubería de revestimiento en la roca sello, siendo la más importante en el diseño, pues aísla una zona con presión de formación de 1.30 gr/cc de la zona de yacimiento con 0.56 gr/cc. Su objetivo central es cubrir las formaciones arcillosas de la edad terciaria, ya que la siguiente etapa es perforada con agua de mar y se puede generar hidratación de los cuellos arcillosos, provocando problemas de estabilidad de agujero, mientras se perforan las formaciones carbonatadas del yacimiento.

Cuando no se dispone de sistema LWD (Registra mientras perfora), se perfora hasta una profundidad estimada por personal de diseño, se suspende para tomar un registro de rayos gamma con doble inducción, se correlaciona con pozos vecinos y en muchas ocasiones se dispone perforar mas, suspender para tomar un registro parcial y "afinar" la profundidad de asentamiento, con la consecuente pérdida de tiempo y recursos.

En los últimos 10 años, las compañías de servicios que trabajan en México, han desarrollado herramientas y software que permiten obtener a tiempo real y a 17 metros de la barrena, curvas de rayos gamma y resistividad, lo cual ha generado ahorros importantes en la perforación de los pozos de desarrollo, pues facilita la

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

determinación del asentamiento de la tubería de revestimiento, sin necesidad de suspender la perforación para la toma de registros.

Con base a lo anterior, los objetivos específicos de éste trabajo son:

1. Desarrollo de una metodología para calcular la energía específica de perforación, la resistencia a la compresión a partir de datos operativos en pozos direccionales.
2. Elaboración de un perfil de porcentaje de lutita que permite a tiempo real determinar el porcentaje de lutita mientras se perfora.
3. Se realiza un post-análisis con los datos de resistencia a la compresión y el registro de rayos gamma, que permiten definir a detalle los cuerpos arcillosos y calcáreos.

Las curvas de resistencia a la compresión se obtienen a tiempo real. Los datos son grabados y procesados a partir de datos adquiridos durante la perforación. Por lo anterior, ésta tecnología puede mejorar la rentabilidad de la perforación al reducir el tiempo para la definición del asentamiento de la tubería de revestimiento en la formación Paleoceno Inferior.

## CAPITULO 1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capítulo se muestran los diferentes estudios sobre energía específica de perforación, su deducción matemática a través de modelos desarrollados por algunos investigadores, las pruebas de laboratorio y las condiciones de operación, así como pruebas de campo para identificar problemas con barrenas y la selección de las mismas.

Uno de los investigadores que inicia con estos estudios fue Rabia<sup>2</sup> quien define la energía específica de perforación (EEP), como la energía requerida para remover una unidad de volumen de roca; lo expresa como:

$$EEP = \frac{20 WOB * RPM}{d * ROP} \left( \frac{lb}{pg^2} \right) \quad (1.1)$$

Donde:

WOB= Peso sobre barrena, lb<sub>f</sub>

RPM= Velocidad de rotación, rev/min

d= Diámetro de la barrena, pg

ROP = Velocidad de Penetración, pie/hr

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Apoyado en principios fundamentales, Teale<sup>3</sup> agrega la torsión que genera la barrena al perforar y define a la energía específica como "El trabajo realizado para excavar un volumen de roca". La cuantificación de la roca perforada es el volumen y determina un patrón de esfuerzo que es geométrico.

En la perforación rotatoria, el trabajo realizado para avanzar, se da por dos factores, la fuerza aplicada *WOB*, y el torque que genera la barrena *T*, si la

velocidad de rotación es  $RPM$  en rpm, el área del agujero perforado es  $A$  y la velocidad de penetración es  $ROP$ , el trabajo total realizado en un minuto es  $(WOB*ROP + 2\pi*RPM*T)$ . Por lo tanto el volumen total de roca perforado en un minuto es  $(A*ROP)$  en unidades de volumen.

Considerando a la energía específica, como trabajo entre volumen<sup>(3)</sup>:

$$EEP = \left( \frac{WOB}{A} \right) + \left( \frac{2\pi}{A} \right) \left( \frac{RPM * T}{ROP} \right) pg * \frac{lb}{pg^3} \quad (1.2)$$

En la fórmula anterior se observa que el primer factor es componente de la fuerza axial aplicada y el segundo corresponde a la fuerza de torsión necesaria al perforar.

Basado en la derivación de la energía específica desarrollada por Teale<sup>(3)</sup>, otro investigador llamado Pessier<sup>4</sup>, realizó pruebas de laboratorio y a escala real, para validar el modelo de balance de energía. En estas pruebas, observó variaciones en la eficiencia de perforación, de poco porcentaje a 3 o 4 veces el observado en el espectro de las prácticas comunes de perforación.

Los análisis de datos de campo revelaron una buena correlación entre el simulador y los resultados de campo. Usando la eficiencia mecánica, la energía específica de entrada y un coeficiente específico de la barrena de deslizamiento de fricción como un índice clave del comportamiento de la perforación, permite seleccionar las barrenas, diagnosticar fallas y prácticas de perforación más precisas y menos ambiguas.

### 1.1 Deducción de expresiones empleadas en el Modelo simple de Teale

Con base a los estudios resultados obtenidos por Teale<sup>(3)</sup> sobre la Energía Específica de Perforación (EEP), Pessier<sup>(4)</sup> y otros lo retoman y derivan su propia ecuación para el desarrollo de pruebas de laboratorio y campo.

La ecuación derivada para ser aplicada en la perforación rotatoria es la siguiente<sup>(3)</sup>:

$$EEP = \frac{WOB}{A_B} + \frac{120\pi RPM * T}{A_B ROP} \quad (1.3)$$

*EEP = Energía Específica, psi*

*WOB = Peso sobre barrena, lbf*

*A<sub>B</sub> = Área de la barrena, pg<sup>2</sup>*

*RPM = Velocidad de la rotaria, rpm*

*T = Torque en la barrena, pie - lbf*

*ROP = Velocidad de penetración, pie / hr*

Se observan dos componentes de Energía Específica, una axial, debida al peso ejercido sobre el área de la barrena y la otra tangencial, generada por la rotación de barrena, la cual se deduce con base a un modelo simple, considerando un fondo plano. La torsión está en función al peso sobre barrena (*WOB*), introduciendo un coeficiente específico de fricción de deslizamiento ( $\mu$ ), el cual puede ser utilizado para el cálculo de la energía específica a falta de mediciones confiables de torque, donde:

$$T = \mu \frac{D_B WOB}{36} \quad (1.4)$$

o

$$\mu = 36 \frac{T}{D_B WOB} \quad (1.5)$$

Las ecuaciones anteriores son deducidas del modelo de Pessier<sup>(4)</sup> y otros que contempla el análisis de la torsión de la manera siguiente:

$$T = \int_0^{1/2D} \int_0^{2\pi} r^2 \frac{4\mu WOB}{\pi D^2} dr d\theta$$

$$\int_0^{1/2D} r^2 \frac{2\pi 4\mu WOB}{\pi D^2} dr$$

Integrando con respecto al radio:

$$\int_0^{1/2D} \frac{8\mu WOB}{D^2} r^2 dr$$

$$= \frac{8\mu WOB}{D^2} \left( \frac{r^3}{3} \right)^{1/2D}$$

$$= \frac{8\mu WOB}{D^2} \left( \frac{D^3}{8 \times 3} \right) = \frac{\mu WOB D}{3} \quad (1.6)$$

De la deducción anterior, y sustituyendo el valor de  $T$  en la Ecuación (1.3), tenemos:

$$EEP = WOB \left( \frac{1}{A_B} + \frac{13.33\mu * RPM}{D_B ROP} \right) \quad (1.7)$$



Teale<sup>(3)</sup> realizó las pruebas bajo condiciones atmosféricas, sin embargo, el objetivo de Pessier y otros se propusieron como objetivo validar estos conceptos para perforación en condiciones de presión hidrostática y lo aplicaron en pruebas de campo.

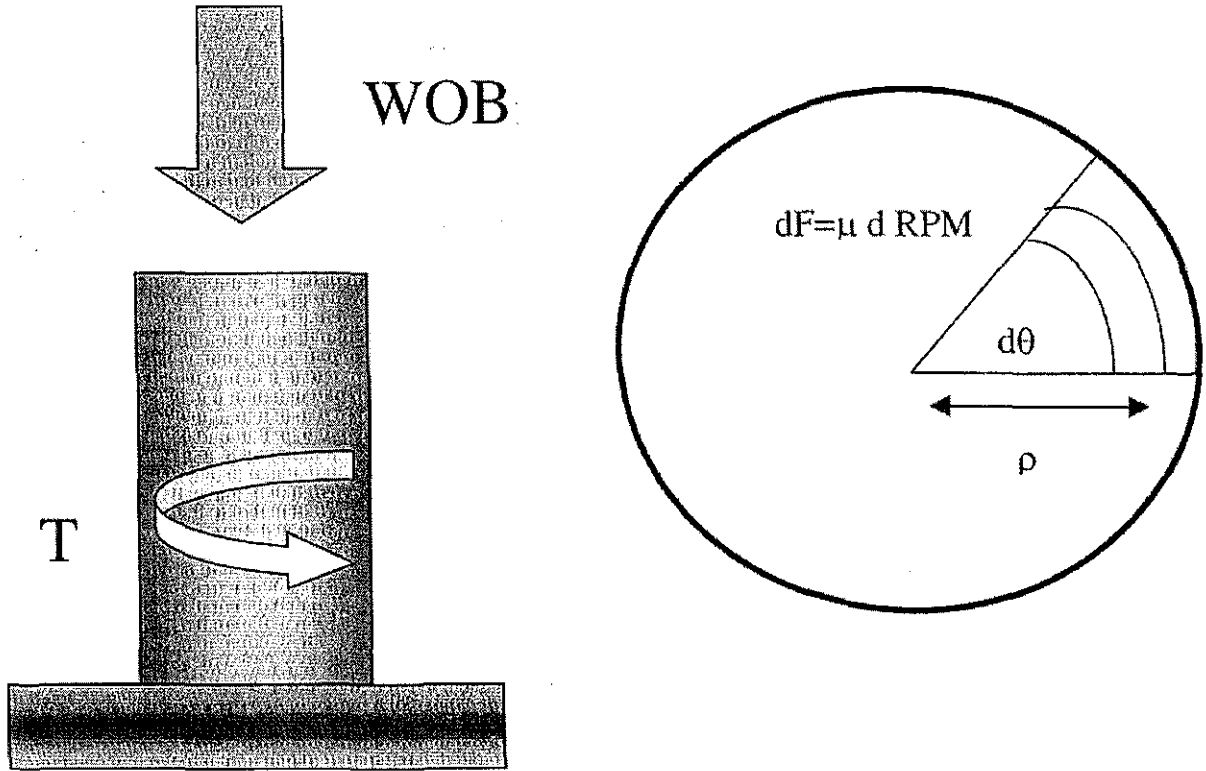
En el año de 1986, Rabia<sup>(2)</sup> desarrolla una serie de pruebas de laboratorio, donde deduce una expresión donde no interviene el torque en la evaluación de la Energía específica de perforación, considerando que en la perforación rotatoria, el trabajo realizado puede ser dividido en dos partes: El que realiza por la fuerza axial (*WOB*) y el que hace el componente rotacional, el torque ( $T$ ). La velocidad de la rotación es RPM, el área de la sección transversal de la barrena *A*, y la velocidad de penetración *ROP*.

Si en la excavación de un volumen de roca, la barrena avanza una distancia, *y*, el trabajo realizado por la fuerza axial es *WOB*\**y*. EL trabajo realizado por la fuerza tangencial por revolución es  $2\pi T$ . Como la barrena avanza una distancia, *y*,  $RPM/ROP$  son las revoluciones ocurridas. Entonces el trabajo realizado por el torque a una distancia de avance, *y*, es:

$$2\pi T \frac{RPM}{ROP} y \quad (1.8)$$

De aquí el trabajo total desarrollado para el avance de la barrena a una distancia, *y*, despreciando las pérdidas de energía por adsorción o por otra causa, puede ser escrita como:

$$\text{Trabajo realizado} = \frac{WOB}{A} + \frac{2\pi RPM * T}{A * ROP} \quad (1.9)$$



$$T = \int_0^{1/2 D} \int_0^{2\pi} r^2 \frac{4 \mu \text{WOB}}{\pi D^2} dr d\theta$$

$$T = \int_0^{1/2 D} \frac{8 \mu \text{WOB}}{D^2} \rho^2 d\rho = \frac{8 \mu \text{WOB}}{D^2} \left( \frac{\rho^3}{3} \right)_0^{1/2 D}$$

$$T = \frac{\mu * \text{WOB} * D}{3}$$

Fig. 1.1 Modelo de Pessier<sup>(4)</sup>, representa las fuerzas axiales y tangenciales actuando en la roca, durante el proceso de perforación rotaria.

Como el volumen de roca removido es  $A \cdot y$ , la energía específica puede ser expresada:

$$EEP = \frac{WOB}{A} + \frac{2\pi RPM \cdot T}{A \cdot ROP} \quad (1.10)$$

O más convenientemente:

$$EEP = \frac{4W \cdot ROP + 8\pi RPM \cdot T}{D^2 \cdot ROP} \quad (1.11)$$

Donde  $D$ , es el diámetro de la barrena

La ecuación (1.11) es equivalente a la ecuación de Teale<sup>(3)</sup> derivada para la energía específica de perforación.

Rabia presenta una derivación para calcular la energía específica de perforación, que no requiere conocer el torque, como sigue:

Si  $N$  es el número de revoluciones por minuto, la potencia de la barrena en un minuto es:

$$WOB \cdot \pi D \cdot RPM \quad (1.12)$$

El volumen de la roca removida en un minuto es:

$$\frac{\pi D^2}{4} \cdot ROP$$

Si  $ROP$  es la velocidad de penetración por minuto. Entonces la energía específica está dada por:

$$EEP = \frac{4 \cdot WOB \cdot RPM}{D \cdot ROP} \quad (1.13)$$

## 1.2 Estudios experimentales en rocas índice sobre energía específica.

Reddish<sup>(5)</sup> y otros desarrollaron pruebas de laboratorio con un equipo de perforación portátil a diferentes tipos de rocas índice, con el propósito de caracterizar su comportamiento, evaluando las principales propiedades mecánicas.

Todas las pruebas realizadas fueron corridas en un simulador a escala. Las lutitas Grout y Mancos fueron usadas como material de prueba. Una breve descripción de estos materiales y los resultados de pruebas triaxiales se muestra en las *Tablas 1.1 y 1.2*, respectivamente. La lutita Mancos fue la roca preferida para la mayoría de las pruebas a presión hidrostática, estas arcillas son las más comunes y frecuentemente presentan dificultades en la perforación.

La metodología de prueba fue "Velocidad de penetración constante", el medio que selecciona la longitud del núcleo fue perforando con velocidad constante, rpm, hidráulica de la barrena y las condiciones de fondo del agujero. El peso sobre barrena y el torque fueron variables registradas de la energía específica.

Reddish<sup>(5)</sup> y otros muestran algunos de los métodos utilizados para la determinación de la energía específica, pero los resultados son solamente comparables si se utiliza el mismo equipo. La energía específica para la prueba de la perforación usada en su investigación es específica al equipo de perforación utilizado y la colocación para ser perforada. Los equipos de perforación grandes tienen mas torque disponible y pueden cortar roca mas eficientemente. Todas las pruebas fueron conducidas para ésta investigación utilizando el mismo equipo de prueba, con los mismo modos operativos y la geometría de la barrena. Todas las rocas probadas fueron evaluadas por pruebas convencionales para que los resultados puedan ser comparados directamente a las pruebas estándar del *ISRM (International Society of Rocks Mechanics)*. Para resistencia compresiva uniaxial y

el módulo elástico de Young, el resultado de la perforación tiene que ser analizado por un número de caminos, antes de un método adecuado de determinación de un índice de resistencia confiable de los resultados de la energía específica.

La energía específica de perforación es un parámetro útil de la roca, sin embargo, depende del aparato utilizado. La energía específica usada en estas pruebas fueron relativas a la energía requerida para excavar un volumen particular. La energía específica puede ser usada también para mejorar los procesos de perforación o evaluar su eficiencia.

En la aproximación usada en éstas pruebas de energía específica tienen comprobaciones poco confiables en la determinación de las propiedades de resistencia y rigidez directamente. Sin embargo, la variación de la energía específica con el empuje y la energía específica mínima (o máxima penetración), ha comprobado un índice confiable de la resistencia y rigidez de la roca. Considera como variables las siguientes condiciones:

- Potencia y empuje
- Tamaño físico
- Sistema de frenado (rotaria o percusión o ambos)
- Geometría de la barrena.
- Estructura de corte de la barrena.

De estos factores la estructura de corte de la barrena y la potencia disponible tiene mayor influencia sobre las pruebas conducidas. Las barrenas fueron regularmente afiladas y la potencia fue mantenida bien cargada para estos pruebas conducidas para el control de estas influencias.

La energía específica de la roca es influenciada por un número de parámetros, como:

- Resistencia de la roca
- Rigidez de la roca
- Presencia de discontinuidades estructurales
- Abrasividad y dureza de los minerales constituyentes
- Naturaleza de la matriz de la roca
- Naturaleza de los granos minerales.

### 1.2.1 Descripción del equipo de perforación en laboratorio<sup>(5)</sup>

El equipo es un roto-martillo industrial modificado utilizando un recargador de baterías de 12 V. Tiene además un amperímetro integrado, construido dentro de una caja acoplada al equipo de perforación que es suministrado efectivamente por unas baterías de voltaje constante. La corriente aplicada es por tanto una medida directa de la energía de entrada en una prueba de perforación particular.

La importancia del trabajo realizado por Reddish al presente trabajo, es la evaluación de la energía específica a condiciones de laboratorio, con los parámetros controlados, con el propósito de establecer valores índice para tomarlos como referencia. *Tabla No. 1.3.*

Tipo de Roca	Energía Específica MJ/M <sup>3</sup>	UCS (MPa)	Tensión (MPa)	E (GPa)	K (MPa)
Arena 1	1745	72	7.8	10.49	211
Arena 2	1678	82	9.85		
Silstone	1604	70	9.3	9.04	125
Mudstone	318	19		6.6	117
Caliza 1	760	39	3.5		
Caliza 2	1617	63	5.9	7.31	85.6
Yeso	470	16	2.52	4.29	59
Cemento 1:1	862	11			
Cemento 1:15	663	10			

*Tabla 1.1.- Resultados de las pruebas con el taladro portátil y otras pruebas mecánicas por Reddish<sup>(5)</sup>.*

Como el objetivo central de este trabajo es encontrar una curva de resistencia a la compresión en sitio que sea correlacionable con los registros geofísicos, se buscó una relación de los registros con las diferentes propiedades mecánicas de la roca. En este sentido Onyia<sup>6</sup> realiza trabajos orientados para que, a través de registros con línea de acero, sea posible determinar la resistencia de las rocas. La ventaja que plantea es que no requiere una extensiva perforación, ni datos de laboratorio, proporcionando una estimación realista de la resistencia de las rocas en su sitio. Onyia<sup>(6)</sup> menciona las relaciones entre la resistencia a la perforación de la roca y algunas propiedades de los registros con línea de acero y muestra como la resistencia a la perforación de una formación se puede estimar a través de datos de registros.

### 1.4 Aplicaciones a la perforación para barrenas tricónicas

Varios investigadores han tratado de relacionar un modelo de resistencia a la perforación. De la experiencia de los mismos, el modelo más aceptado es el desarrollado por Warren<sup>(8)</sup>, ha sido aplicado extensivamente para predecir el esfuerzo de la roca a la perforación, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\sigma_{ult} = \left[ \frac{WOB}{aD^2\varepsilon} \frac{RPM}{ROP} \frac{b}{D} \frac{cRPM\rho_m\mu D}{Im} + \frac{\phi^2}{4a\varepsilon} \right]^{0.5} - \frac{\phi WOB}{2aD\varepsilon^2} \quad (1.14)$$

Se ha demostrado que la resistencia de la roca predicha por la Ecuación 1.14 correlaciona muy bien los resultados de laboratorio con las mediciones. Por lo tanto, la resistencia de perforación obtenida con este modelo es una estimación de la resistencia dinámica compresiva. Esto tiene importantes implicaciones:

1. Las resistencias compresivas *in situ* de las rocas pueden ser estimadas de la resistencia de la roca derivadas de datos de perforación. En forma normal, las ecuaciones principalmente empleada en un análisis posterior.
2. Basado en la resistencia de la roca, el modelo se puede emplear para predecir la velocidad de penetración. Un ejemplo de esta aplicación es su empleo en la simulación en ingeniería de perforación.
3. Estos perfiles de registros de perforación para la resistencia de la roca se pueden emplear para monitorear el desempeño de la perforación y la selección de la barrena.
4. Esta técnica se puede emplear con MWD derivado de la perforación y datos de la formación para predecir la resistencia de la roca mientras se perfora.



Entonces, se puede construir un pre-registro continuo sintético de las resistencias de las rocas.

Prueba No.	Presión de Confinamiento (psi)	Resistencia a la Compresión (psi)
51	0	6387
52	0	6521
53	2000	13548
54	2000	11155
55	4000	15994
56	4000	18548

*Tabla No.1.2.- Resultados de pruebas mecánicas en núcleos de la formación Grout, realizadas por Reddish<sup>(5)</sup> y otros*

Prueba No.	Presión de Confinamiento (psi)	Resistencia a la Compresión (psi)
4	0	4324
5	0	5167
42	0	5215
33	1000	6621
35	1000	7297
31	2000	13378
36	2000	12500
32	4000	17972
34	4000	14324
37	6000	14784
39	6000	19220

*Tabla No. 1.3.- Resultados de pruebas mecánicas en núcleos de Lutita Mancos realizadas por Reddish<sup>(5)</sup> y otros.*

Warren<sup>(8)</sup> considera de gran interés el torque por varias razones. Primera, porque puede dar información a cerca de la formación que está siendo perforada y de las condiciones de la barrena misma. Segunda, el torque ejerce una influencia significativa sobre "La dirección de la barrena", experimentado en pozos direccionales. Finalmente, la predicción del torque de la barrena puede ser útil en la relación del motor de fondo y la barrena.

Define la energía requerida ( $E_v$ ) para remover el volumen de roca perforada en un incremento de unidad de tiempo, expresándola como:

$$E_v = \frac{\pi}{4} d^2 EEP * ROP \quad (1.15)$$

Donde " $EEP$ " es la energía específica de la roca,  $d$  es el diámetro del agujero, y  $ROP$  es la velocidad de penetración. El trabajo total ( $W_t$ ) realizado por la barrena en la misma unidad de tiempo está dado por:

$$W_t = WOB * ROP + 2\pi * RPM * T \quad (1.16)$$

Donde  $W$  es la fuerza axial aplicada a la barrena,  $RPM$  es la velocidad de rotación en rpm, y  $T$  es el torque aplicado a la barrena.

Generalmente el trabajo axial es mucho menor que el trabajo tangencial y pudiera ser despreciable, pero para tener exactitud, se mantiene en las ecuaciones.

Finalmente, Elkington<sup>(9)</sup> desarrolla un trabajo experimental para demostrar un método de derivación de relaciones empíricas entre registros geofísicos y ciertas propiedades físicas y mecánicas de la roca.

Efectúa pruebas a diferentes tipos de rocas como lutitas, areniscas y calizas, obtenidas de minas a cielo abierto. Los espacios porosos no fueron llenados completamente de agua, se eliminaron efectos de los registros como:

1. Efectos finales debido a los tamaños de bloques finitos
2. Los efectos de fondo del agujero debido a la porción baja de la roca, la herramienta normalmente estaba ocupada por fluido.
3. Composición del fluido del agujero.
4. Tamaño del agujero.

En la Tabla 1.4 se resume algunos de los interesantes resultados obtenidos de 4 bloques de roca probados. La resistencia a la compresión sin confinamiento (UCS) y la prueba de tensión Brasileña son valores promedio calculado de las últimas 8 muestras.

Los periodos de conteo gamma y neutrón fueron suficientemente largos para tener desviaciones estándar despreciables.

Tipo de Bloque	Porosidad (%)	UCS (MPa)	Esf. Tensión (MPa)	No. Martillo Schmidt	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Por. Neutrón (%)	GR (API)
Caliza	0.2	169	9.05	61	2.68	-4.0	12
Arenisca fina	5.3	41	2.10	51	2.24	29	74
Lutita	6.1	108	7.30	N/A	2.58	16	94
Arena Cuarzo	2.5	164	13.9	62	2.66	7.5	N/A

Tabla 1.4.- Resumen de datos en agujeros de 49 mm llenos de agua, desarrollados por Elkington<sup>(9)</sup>

#### 1.4 Caracterización de las rocas perforadas en la edad terciaria del Campo Cantarell<sup>(10)</sup>.

Se describen las unidades cronoestratigráficas presentes en el área de estudio de las más jóvenes a las más viejas.

**PLIO-PLEISTOCENO:** Consiste de lutitas color verde bentoníticas, con un espesor promedio de 650 m.

**MIOCENO:** Es una alternancia de lutitas bentoníticas color verde y limolitas a arenas siliciclásticas de gran fino, color gris claro a verde claro, presentan un espesor promedio de 1000 m.

**OLIGOCENO:** Consiste de lutitas color verde, bentoníticas con un espesor promedio de 350 m.

**EOCENO SUPERIOR:** Lutita color gris claro y gris verdoso bentonítico, con espesor promedio de 20 a 80 m.

**EOCENO MEDIO:** En la parte superior ésta constituido por una lutita gris claro a gris verdoso, bentonítica, ligeramente calcárea. En la parte media consiste de packstone-grainstone color crema, constituido por granos de bioclastos, intraclastos y ooides de 100 micras a 7 mm hasta 2 cm de tamaño. Se presenta en la parte sur del campo y tiene una distribución E-W, cambiando a facies arcillosas en los pozos de la parte norte del campo. Su espesor varía de 20 a 120 m.

**EOCENO INFERIOR:** En la parte superior consiste de lutita gris claro a gris verdoso, bentonítica, ligeramente calcárea. En la parte inferior, consiste de packstone color café, constituido por granos redondeados a subredondeados de exoclastos, bioclastos y ooides de 100 a 500 micras de tamaño, bien clasificados, diseminados en matriz micrítica moderadamente recristalizada, con intercalaciones de lutita bentonítica y calcárea color verde de estructura laminar. Se presenta en la parte norte del campo en una dirección en una dirección NW-SE. El espesor varía de 10 a 140 m.

**PALEOCENO SUPERIOR:** En la parte superior consiste de packstone color café, constituido por granos redondeados a subredondeados de exoclastos, bioclastos

y ooides de 100 a 500 micras de tamaño, bien clasificados, diseminados en matriz micrítica moderadamente recristalizada, con intercalaciones de lutita bentonítica y calcárea color verde de estructura laminar. Se presenta en la parte norte del campo en una dirección NW-SE.

La parte inferior consiste de lutita gris verdoso en ocasiones café rojizo, bentonítica y calcárea; en ocasiones mudstone arcilloso color gris verdoso de estructura laminar.

*PALEOCENO INFERIOR:* Consiste de lutita gris verdoso, café rojizo, bentonítico y calcárea, en ocasiones mudstone arcilloso color gris verdoso de estructura laminar. Presenta un espesor de 40 a 60 m.

*BRECHA CALCÁREA:* Constituida por clastos subangulosos a subredondeados cuyo tamaño varía de 0.2 a 15 cm de dolomía y en menor proporción mudstone-wackstone de bioclastos e intraclastos color crema, café gris. Su espesor varía de 200 a 300 m y subyace discordantemente al Paleoceno y sobreyace Cretácico Superior.

### 1.5 Origen de la radiación natural en las rocas <sup>(11)</sup>

Las condiciones naturales sobre la tierra NO son apropiadas para la formación de elementos radiactivos y los únicos elementos o isótopos encontrados sobre la tierra son aquellos estables ó que tienen un tiempo de decaimiento comparable ó mayor al de la edad de la tierra.

Los isótopos con tiempo de vida más corto desaparecieron hace tiempo, a no ser resultado del decaimiento de elementos radiactivos de más larga vida. Los isótopos con una vida suficientemente larga y cuyo decaimiento produce una cantidad apreciable de rayos gamma son el Uranio(<sup>235</sup>U), Potasio(<sup>40</sup>K) y Torio(<sup>232</sup>Th).

Las fuentes minerales del Uranio están en rocas ígneas de origen ácido, es muy soluble y es transportado en solución, y muy raramente en suspensión. Es disuelto durante la alteración de fuentes minerales.

Las fuentes del potasio son los feldespatos potásicos y micas más una gran cantidad de minerales de menor importancia. Los minerales más comunes con potasio son: evaporitas, minerales de arcilla, feldespatos, feldespatoides y carbonatos.

El torio es encontrado principalmente en: arcillas de origen detrítico, rocas ígneas alteradas del tipo ácido, arenas de playa y pláceres.

En resumen, las principales rocas radioactivas son:

1. Arcillas y lutitas, las cuales por un medio u otro, fijan o se hacen componer de Potasio, Torio y Uranio. Además, pueden contener cantidades significantes de fosfatos ó materia orgánica, ricos en uranio y minerales radioactivos.
2. Sales de potasio.
3. Esquisto bituminoso
4. Fosfatos
5. Ciertas arenas arkosas ó grauvacas, areniscas, conglomerados, ricos en minerales como feldespatos ó micas.
6. Ciertos carbonatos, originados a partir de algas que fijan potasio y uranio ó que son ricas en materia orgánica ó en fosfatos.

Una herramienta de rayos gamma natural solamente detecta radiación que se origina a partir de un volumen relativamente pequeño que se encuentra rodeando al detector, debido a que los rayos gamma son absorbidos ó atenuados por el medio, a través del cual viajan.

Por la naturaleza del registro de rayos gamma, tiene las aplicaciones siguientes:

1. Evaluación de litología, tales como: lutitas, evaporitas y uranio.
2. Estimación de la fracción de lutita en rocas almacenadoras.
3. Correlación pozo a pozo. Detección de discordancias.

4. Sedimentología, la variación de los rayos gamma con la profundidad da la información sobre la evolución en el tamaño del grano.

Por lo anterior se pueden considerar a los registros de rayos gamma combinado con el de resistividad, como auxiliares en la determinación litológica cuantitativa.

## CAPITULO 2 METODOLOGIA DE EVALUACION DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A PARTIR DE DATOS OPERATIVOS.

En éste trabajo se desarrolla un procedimiento que permite estimar la posición estratigráfica del pozo mientras se perfora, a través de "curvas tipo" correlacionables a registros geofísicos de pozos cercanos. Si conocemos a tiempo real las propiedades mecánicas de la roca podemos generar un de EEP, resistencia a la compresión, porcentaje de lutita y litoresistencia a partir de parámetros de operación, es posible correlacionarla con información de otros pozos; como registros de rayos gamma y de resistividad. La caracterización estratigráfica de las rocas perforadas nos permitirá definir las curvas de correlación con mayor precisión la profundidad de asentamiento de la tubería de revestimiento en la roca sello del campo Cantarell.

### 2.1 Análisis de datos de laboratorio

Pruebas realizadas en las principales rocas índice y tomadas de un trabajo desarrollado en la disertación doctoral de García-Gavito<sup>1</sup> a diferentes muestras de rocas índice como: Lutita 1, Lutita 2, Arena y Mármol; fueron perforadas bajo diferentes condiciones, como:

- Dos diferentes tipos de barrena, PDC1 y PDC2.
- Se emplearon dos densidades, 10 y 12 lb/gal.
- Se utilizaron dos tipos de fluidos, base agua y base aceite.

En la serie de pruebas, también se evaluó la Resistencia a la Compresión Uniaxial (UCS), De pruebas de laboratorio se tienen los datos siguientes: De 16,000 lb/pg<sup>2</sup> para el mármol, 8000 lb/pg<sup>2</sup> la lutita y de 8500 lb/pg<sup>2</sup> la arena.

A partir de los datos operativos obtenidos en las pruebas, se calculó la energía específica de perforación (EEP), empleando la ecuación (2.2) de Rabia; se observó lo siguiente:



Tipo de formación	Fluido	EEP (lb/pg <sup>2</sup> )	Comportamiento
Lutita Mancos	Agua	40,000-60,000	Uniforme
	Aceite	30,000-35,000	Muy uniforme
Lutita Pierre	Agua	10,000-45,000	Muy dispersa
	Aceite	8,000-12,000	Uniforme
Arena Berea	Agua	10,000-22,000	Muy dispersa
	Aceite	15,000-30,000	Uniforme
Mármol Carthage	Agua	40,000-80,000	Dispersa
	Aceite	60,000-100,000	Uniforme

*Tabla 2.1.- Características y comportamiento de las rocas analizadas en laboratorio<sup>(1)</sup>.*

Se observa que en las lutitas y la arena, se consume menor EEP al perforar las muestras con fluido base aceite, observándose un comportamiento contrario en las muestras de Mármol. Así mismo, los valores de EEP en las cuatro muestras fueron mas uniformes cuando se perforaron con fluido base aceite.

Se ha estudiado la relación de la EEP con la UCS, es decir la energía que se requiere para remover un volumen de roca, al perforar con la técnica rotatoria y la resistencia que tiene la roca al someterse a la compresión. Fueron elaboradas gráficas donde se muestra la relación entre EEP/UCS vs ROP/RPM, buscando tener la eficiencia de la perforación en las diferentes pruebas a nivel laboratorio, encontrando los resultados siguientes:

- En la lutita se observan valores de EEP/UCS = 6 para las pruebas realizadas con fluido base aceite y de 3.75 cuando se utilizó fluido base agua. *Fig. 2.3.*
- En las pruebas a muestras de Mármol se obtuvieron valores normalizados de 3.5 para fluidos base aceite y de 2 en fluidos base agua, respectivamente.

Si se realiza una análisis de los resultados anteriores y los mostrados en la tabla 2.1, se observa que se consigue mayor eficiencia de EEP/UCS en todos los

tipos de formación cuando se utiliza fluido base agua. Las tablas completas pueden ser consultadas en el Apéndice I.

Las formaciones que se analizarán en éste trabajo, son la lutita y formaciones carbonatadas (mármol), que son los más representativos de las formaciones perforadas en la etapa terciaria del campo Cantarell.

Tipo de Roca	$\phi$ (%)	$\rho$ (gr/cc)	$S_w$ (%)	K (mD)	P. Confin. (Psi)	$\sigma$ (Psi)	Módulo de Young
Lutita 2	3.80	2.64	94.10	< 0.01	0	8,000	1.10
					2,000	14,634	1.20
					4,000	18,140	0.98
					8,000	28,659	0.93
					16,000	36,738	1.40
							1.90
Lutita 1	9.70	2.56	93.10	2.0	0	726	2.40
					2,000	1,244	0.12
					4,000	909	0.13
					8,000	1,250	0.08
					16,000	976	0.13
							0.04
Mármol	1.90	2.70	50.30	< 0.01	0	15,707	0.09
					2,000	23,488	0.21
					4,000	26,268	5.00
					8,000	35,671	4.60
					16,000	46,463	5.50
							5.00
Arena	20.70	2.66	57.50	315	0	6,886	3.20
					2,000	11,890	6.00
					4,000	16,310	6.00
					8,000	23,323	1.30
					16,000	33,537	1.80
							1.90

Tabla 2.2 Propiedades físicas y mecánicas de las principales rocas índice<sup>(1)</sup>.

Los datos obtenidos de laboratorio<sup>1</sup>, tienen la información suficiente para el cálculo de la energía específica de perforación y la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) y se presentan en la Tabla 2.3, de la forma siguiente:

No de dato	Intervalo de:	Intervalo a (pg)	Rop (pie/hr)	$p=Rop/N$ (pg/rev)	Torque (lbf . pg)	WOB (lb)	RPM	EEP Teale	EEP Rabia	
1	0	2.3	13.7	0.034	5796	1437	80	18763.18	18763.18	19744.10
2	2.3	3.1	22.6	0.0569	10104	2034	80	19837.30	19837.30	16941.18
3	3.1	4.5	28.5	0.0704	14700	4366	81	23207.15	23207.15	29196.78
4	4.5	6	19	0.0271	5436	1456	140	22201.29	22201.29	25243.34
5	6	7.5	35	0.0498	10416	29.05	141	23231.85	23231.85	275.36
6	7.5	9.3	38	0.0542	14772	4364	140	30207.37	30207.37	37830.34
7	9.3	11.4	32.1	0.0183	4992	1404	651	56074.36	56074.36	66996.81
8	11.4	13.5	66	0.0379	10836	2903	349	31774.04	31774.04	36119.32
9	13.5	16.1	85	0.0486	15300	4371	350	34955.92	34955.92	42348.79
10	16.1	18.7	24.8	0.0623	9384	2852	80	16809.27	16809.27	21647.06
11	18.7	20.9	39.3	0.056	10452	2874	140	20664.40	20664.40	24089.81
12	20.9	23.9	67.6	0.0386	10476	2844	350	30078.99	30078.99	34646.71
13	23.9	26.1	42.6	0.0607	10944	2968	140	19964.39	19964.39	22950.57
14	26.1	27.8	38.6	0.055	11472	2976	140	23088.18	23088.18	25397.14
15	27.8	29.2	35.6	0.0505	10908	2974	141	23971.04	23971.04	27715.40
16	29.2	30.4	33	0.0471	10452	2981	140	24601.64	24601.64	29756.86
17	30.4	31.2	15.7	0.0389	5796	1560	81	16582.75	16582.75	18937.43

*Tabla 2.3.- Información obtenida en las pruebas de laboratorio<sup>(1)</sup>*

## 2.2 Metodología empleada para obtener las ecuaciones de EEP y la Resistencia a la Compresión

En el capítulo No. 1 se discutió el concepto de energía específica, su aplicación en la perforación rotatoria y la información que se puede obtener a través de ella para la determinación de propiedades mecánicas de la roca.

Uno de los mayores problemas en el desarrollo del presente trabajo, fue la determinación de los parámetros que intervienen en la evaluación de la energía específica de perforación: La forma sencilla de la ecuación desarrollada por Teale está en función del torque generado por la barrena, el cual es un parámetro difícil de evaluar y con mayor grado de dificultad en pozos desviados y perforados con motor de fondo.

Debido a lo anterior se investigaron las ecuaciones desarrolladas por Rabia, quien no considera el torque en la estimación de la energía específica de perforación, pero él encontró una relación directa del torque con el WOB, como se muestra en la figura 2.1.

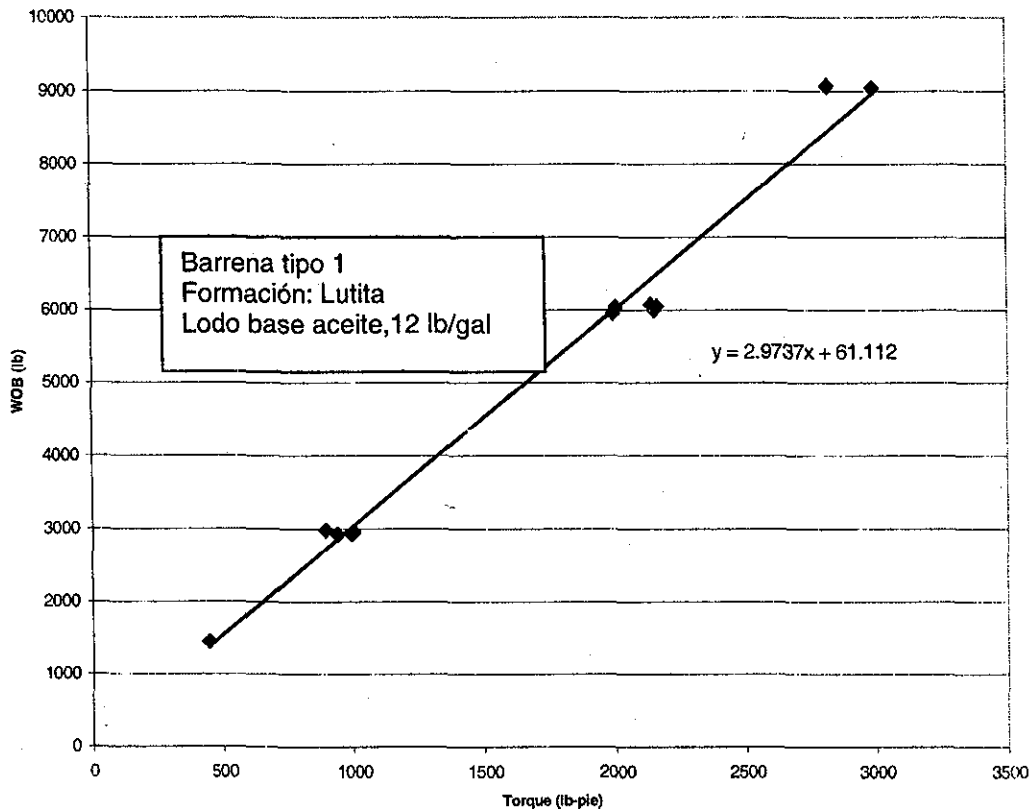


Fig. 2.1 Relación de torque vs Peso sobre barrena<sup>(2)</sup>

Rabia desarrolló pruebas de laboratorio en roca del tipo arena Berea. Las barrenas que se utilizaron fueron solamente tricónicas IADC 3-2-1 en diámetros de 4 3/4" y 8 3/4". Su principal aportación fue concluir que el resultado de la energía específica calculada con su ecuación original, es mayor en 8.8 veces el valor de la energía específica estimada por Teale. Por lo anterior, Rabia hace una buena aproximación y su ecuación original queda de la forma siguiente:

$$EEP = 2.25 * \frac{WOB * RPM}{d * ROP} \quad (2.1)$$

Como las condiciones de prueba de Rabia son muy distintas a las que se presentan en el campo de estudio del presente trabajo, se adquirieron 16 diferentes pruebas de laboratorio de rocas, mostradas en el apéndice como: arena Berea, lutita Pierre, lutita Mancos y mármol Carthage, con lodos base agua y base aceite. Adicionalmente, las barrenas empleadas fueron del tipo PDC.

A partir de los resultados de las diferentes pruebas de laboratorio desarrollados en el trabajo de Tesis de Vázquez Reyes I.<sup>12</sup>, se calcula la energía específica con la ecuación básica de Teale y la ecuación original de Rabia, como se muestra en la gráfica 2.2. De ésta gráfica se obtuvo una correlación que permite estimar la energía específica de Teale a partir de los parámetros operativos que se requieren para la ecuación de Rabia, de la forma siguiente:

$$EEP_t = 41.547 X^{0.6208} \quad (2.2)$$

Sustituyendo la ecuación 1.1 en el valor de X:

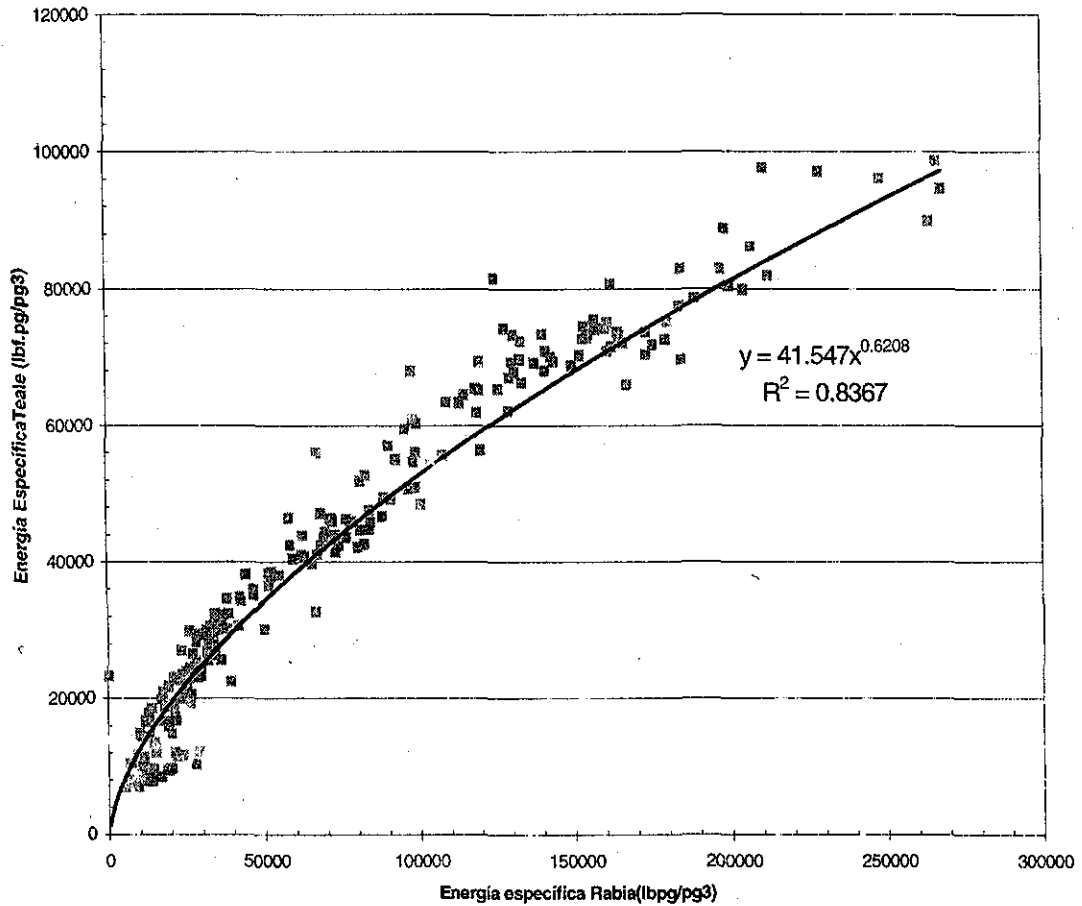
$$EEP_t = 41.547 * \left( 20 * \frac{WOB * RPM}{d * ROP} \right)^{0.6208} \quad (2.3)$$

Donde:

$EEP_t$  = Energía Específica de Perforación ajustada de Teale (lb-pg/pg3)

X = Es el valor de la EEP de la ecuación básica de Rabia (Ec. 1.1)

Una vez definida la ecuación de la energía específica de perforación para ser empleada en las condiciones de campo, se procedió a elaboración de una curva de energía específica a partir de parámetros operativos que se adquieren de manera regular durante el proceso de perforación, como son:  $WOB$ ,  $RPM$ ,  $d$  y  $ROP$ . La ecuación (2.3) contempla la relación de los parámetros básicos anteriores e involucra de manera implícita la torsión de la barrena.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

*Fig. 2.2 Relación de los valores de energía específica calculada con Rabia<sup>(2)</sup> vs Teale<sup>(3)</sup>*

La aplicación es sencilla, pues de los datos operativos y metro a metro, se calcula de manera continua la energía específica, mostrando los valores promedio en cada metro perforado.

A partir de los resultados de las pruebas de laboratorio y el cálculo de la energía específica empleando la fórmula simple de Rabia, se buscó una relación normalizada de la energía específica de perforación y la resistencia a la compresión de la roca, a los diferentes valores de esfuerzo de las rocas índice, obteniendo de la figura 2.3, la siguiente relación:

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

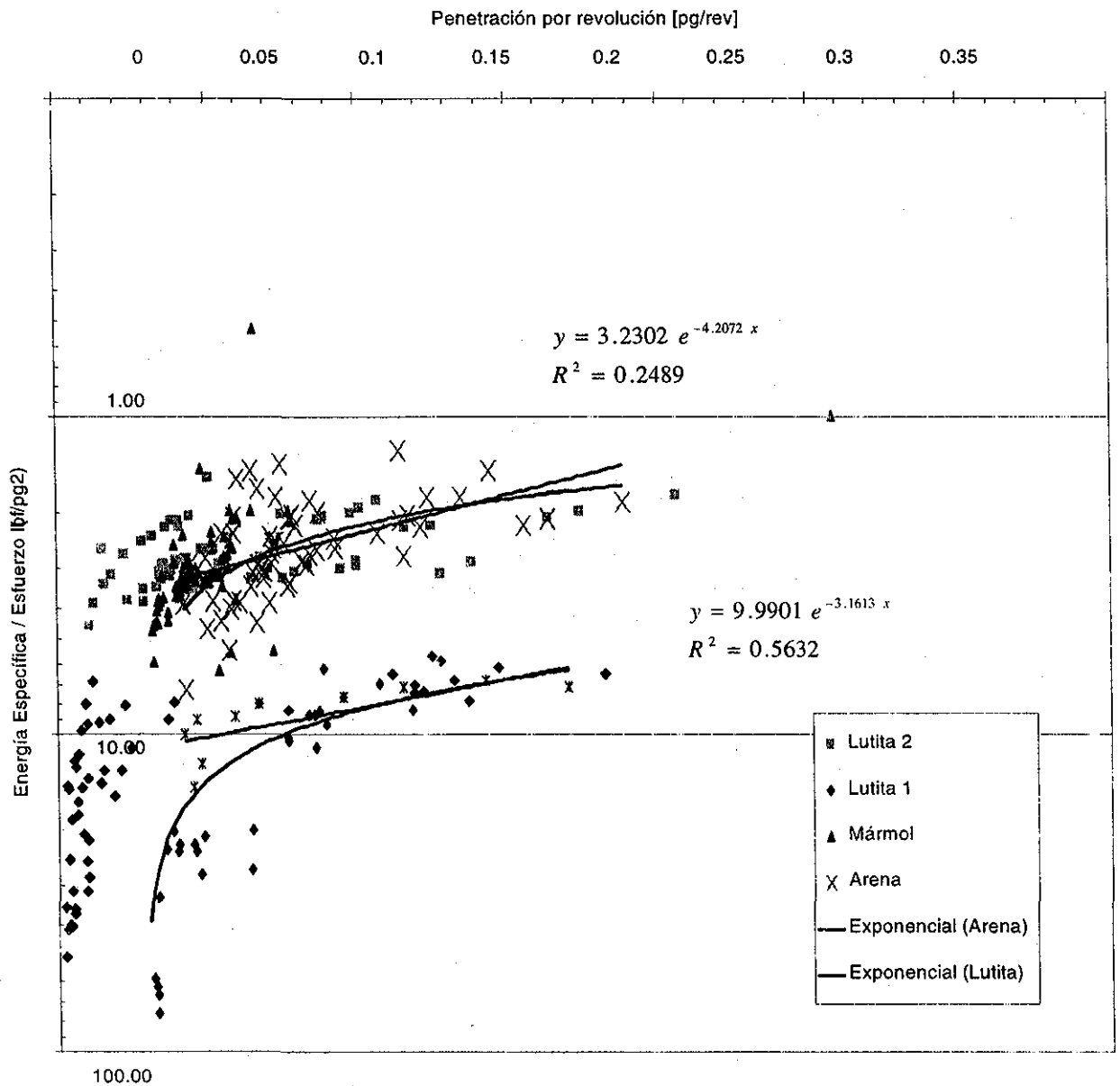


Fig. 2.3 Energía específica como una función de la penetración por revolución en diferentes rocas, fluidos de perforación con barrenas de 8 1/2".

De la Figura 2.3, es posible obtener una ecuación en función de la Resistencia a la compresión, por lo que es posible obtener:

$$\sigma = \frac{EEP_t}{3.2302 * (2.7182)^{(-0.4072 * \left(\frac{ROP}{RPM}\right))}} \quad (2.4)$$

### 2.3 Obtención de los datos de operación

El modelo de perforación usado en los cálculos está preparado para ser usado en barrenas PDC, considerando que el área de estudio es la etapa de 14 3/4" en la edad terciaria del Campo Cantarell, se considera despreciable el desgaste de la barrena, ya que históricamente no se presentan desgastes importantes. Según los reportes de operación de los pozos perforados en el Campo Cantarell en los años 1998-2000, por equipos de la Unidad Operativa Noreste de la UPMP.

Los datos de velocidad de penetración adquiridos con instrumentos como el MWD o manuales, tomadas directamente por el perforador, no varían de manera importante. Aunque se debe tener un buen control de los tiempos de penetración y no estimar, por comodidad mismos tiempos a los metros de un tubo, principalmente cuando la velocidad de penetración es alta.

### 2.4 Deducción de la ecuación para estimar la velocidad de penetración y el torque.

Otra de las aplicaciones encontradas al análisis de los parámetros operativos, es la estimación de la velocidad de penetración y el torque, mientras se perfora, estando en función de la energía específica de perforación y la resistencia a la compresión de la roca.

Partiendo de la Ecuación 2.5, obtenida de la Figura 2.3,



$$\frac{EEP_t}{\sigma o} = 1.077 * \left( \frac{ROP}{RPM} \right)^{-0.2797} \quad (2.5)$$

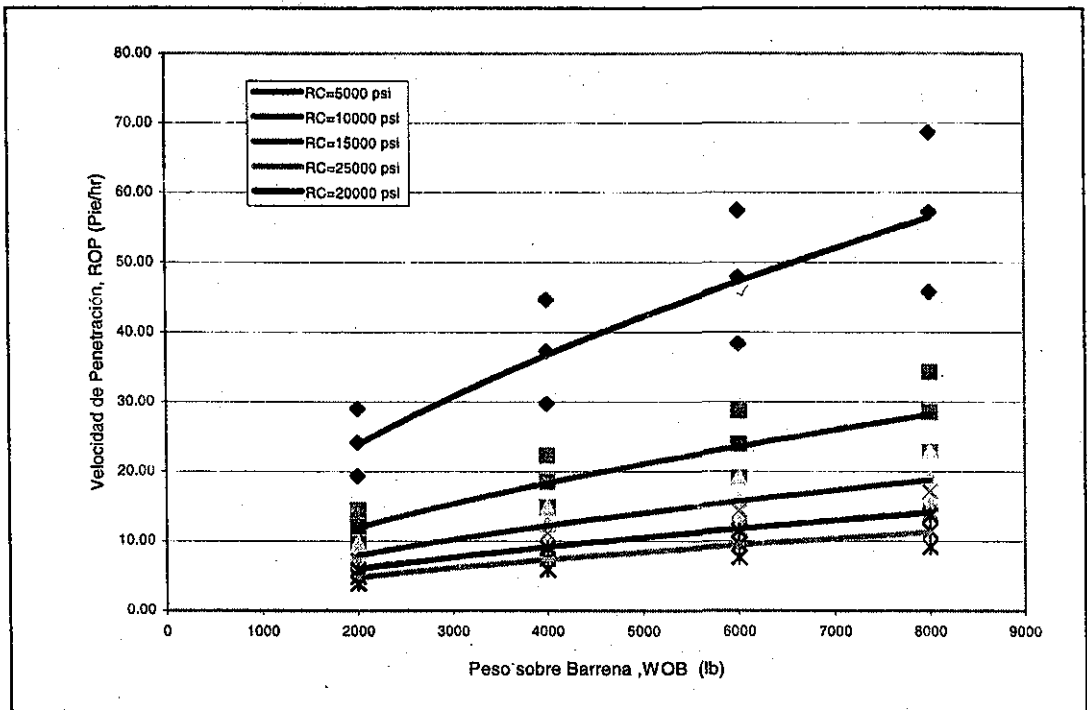
Sustituyendo el valor de  $EEP_t$  obtenido en la Ecuación (2.3) en la Ecuación (2.5), obtenemos una ecuación que nos permite estimar la velocidad de penetración, en función de WOB, RPM, d y  $\sigma o$ ; a partir de la siguiente ecuación:

$$ROP = \left[ \frac{491 * \left( \frac{WOB}{d} \right)^{0.6208}}{\sigma o} * RPM^{0.3411} \right]^{2.93} \quad (2.6)$$

Esta relación nos permite pronosticar la velocidad de penetración mientras perforamos con barrenas PDC en secuencias de arenas, lutitas y formaciones carbonatadas.

Así mismo, a partir de la Ecuación básica de Teale (1.3) y la Ecuación (2.5) es posible estimar la torsión que tendrá la barrena bajo diferentes condiciones de operación y tipos de roca, con el propósito de seleccionar el motor de fondo apropiado para ser empleado en la perforación de la etapa.

$$T = \frac{A * ROP * \left[ \sigma o * \left( 1.077 * \left( \frac{ROP}{RPM} \right)^{-0.2797} \right) - \frac{WOB}{A} \right]}{120 * \pi * RPM} \quad (2.7)$$



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Fig 2.4.- Velocidad de penetración como una función del peso sobre barrena en rocas de diferente resistencia a la compresión.

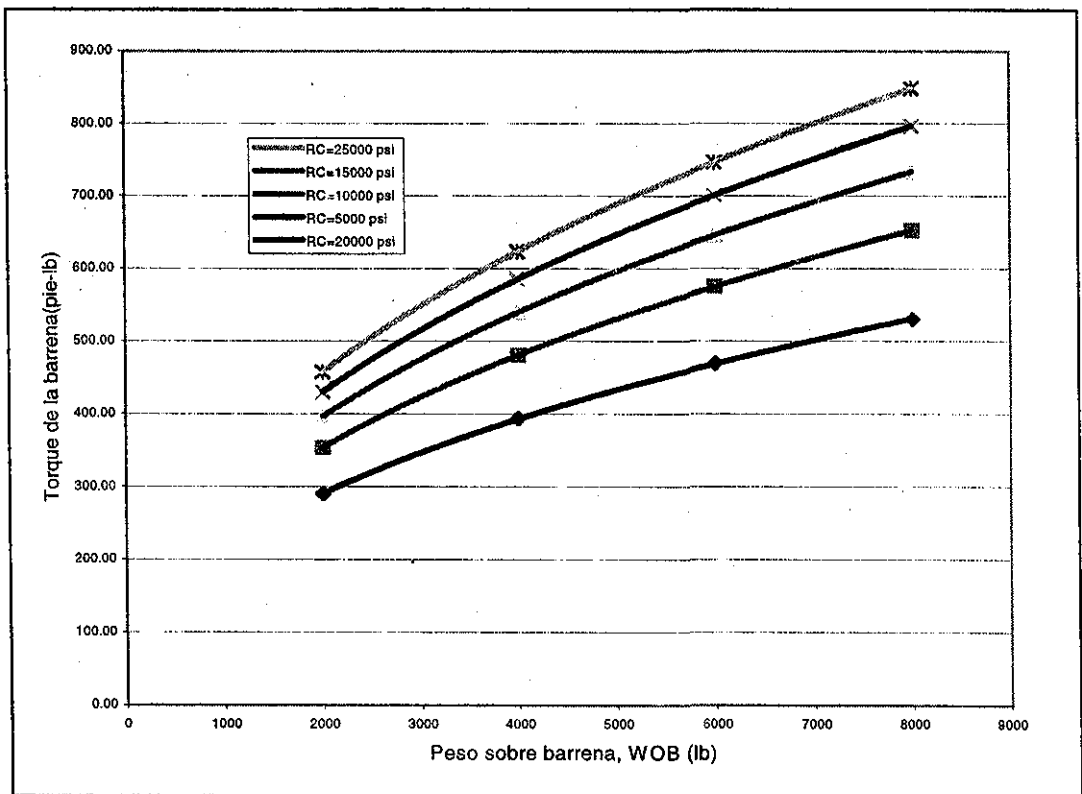


Fig. 2.5.- Torsión de la barrena como una función del peso sobre barrena para rocas de diferente resistencia a la compresión.

El torque estimado con la Ecuación (2.7), nos permite seleccionar las condiciones operativas óptimas para generar el menor torque posible durante la perforación, estando además en función de las propiedades mecánicas de la roca.

Es importante mencionar que la velocidad de penetración como la torsión mientras se perfora, dependen en gran medida de las condiciones fisicoquímicas del fluido de perforación y un adecuado manejo hidráulico, ya que se evalúan solamente las fuerzas axiales y tangenciales durante el proceso de perforación.

En la Figura 2.4 se muestra la relación del WOB y la ROP, a partir de las pruebas de laboratorio, donde se observa el comportamiento de la velocidad de penetración a rocas de diferente resistencia a la compresión, que varían desde 5000 y hasta 25,000 psi. La aplicación práctica de éste modelo en campo será de estimar la velocidad de penetración para las diferentes rocas que se espera perforar.

Así mismo, la Figura. 2.5 muestra los modelos analíticos de correlación semiempíricas para estimar el torque a partir de la resistencia a la compresión de la roca y las diferentes condiciones de operación que se tienen programadas para la perforación.

## **2.5 Metodología de obtención de curvas de energía específica.**

Partiendo de las características del registro de rayos gamma y a la información que proporciona, se planteó la posibilidad de correlacionarlo con la energía específica de perforación y posteriormente con la resistencia a la compresión.

La técnica empleada para obtener la curva de energía específica, es calcularla a tiempo real, a través de una pantalla de captura, donde metro a metro se introducen los diferentes parámetros de operación, obtenidos al perforar. Los datos son grabados, procesados y graficados para el cálculo de la energía

específica, mediante el empleo de la fórmula de Teale ajustada, que no considera el torque en su estimación.

Con la Ecuación (2.4) se calculó también metro a metro, la resistencia a la compresión de la roca in situ, la cual permite hacer una mejor correlación cualitativa con respecto al registro de rayos gamma y el de resistividad.

Una vez perforada y registrada la etapa de 14  $\frac{3}{4}$ ", es posible obtener un índice de resistencia-rayos gamma (IRRG), el cual muestra la relación de las Lb/pg<sup>2</sup> requeridas para perforar una formación con determinada lectura de RG, las unidades son psi/RG, y al graficar éste contra la profundidad y compararlo con el registro de rayos gamma, nos permite obtener una muy buena correlación con el pozo perforado, como se muestra en la Figura (2.5).

En ciertas condiciones de operación, se presentan algunos problemas en la adquisición de datos. Las dos principales causas encontradas son: la estimación de la velocidad de penetración y el peso sobre barrena, aquí es importante calcular la componente axial del peso sobre barrena, de acuerdo al ángulo de desviación que este perforando, considerando que toda la etapa será perforada con motor de fondo.

Al perforar con motor de fondo se dificulta estimar las RPM, ya que las revoluciones que aporta la mesa rotaria o "Top drive", no son las que se tienen en la barrena, por lo que es necesario conocer las características del motor de fondo y de acuerdo al gasto de bombeo, se puedan estimar las RPM que tiene la barrena mientras perfora.

Los cálculos son realizados cada metro perforado. Adicionalmente, cada parámetro es medido en promedio como: peso sobre barrena, velocidad de penetración y rotación por cada metro perforado.

En la Tabla (2.4) se muestran los datos obtenidos durante la perforación.

En la Figura. 2.6 se resume la secuencia empleada para obtener los valores de resistencia a la compresión a partir de datos de operación.

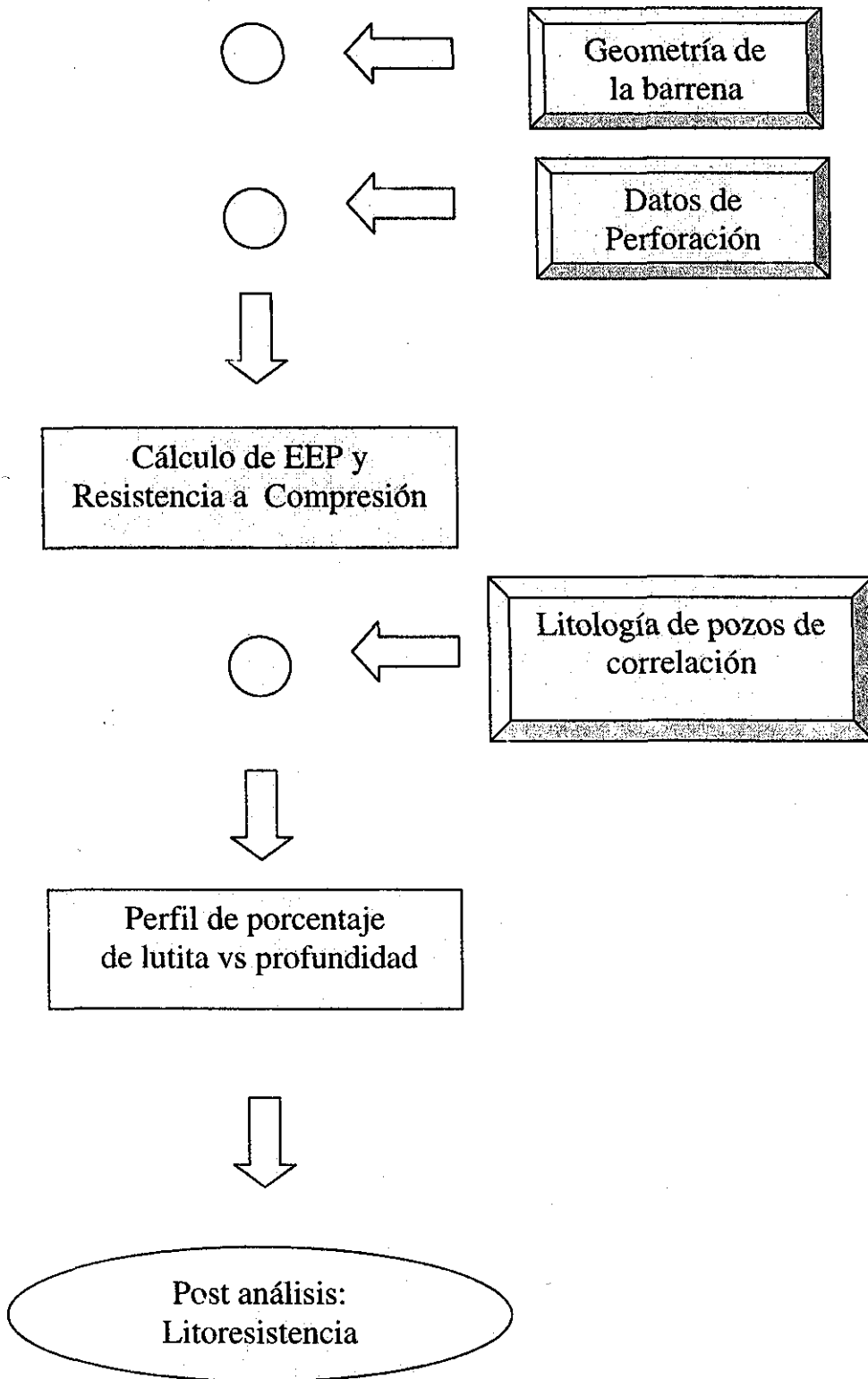


Fig. 2.6 Secuencia para obtener la Resistencia a la Compresión.

Prof.	Tiem po	Acum. (m)	Condiciones de Operación					Pbba. PSI	Dens.	Lodo	
	(min/ m)		p.s.b.	Td/Mf	gpm	Caída Presión Motor	Visc.			A.T.F.	
2055	10	109	7	45	612	750	2800	1.50	59	1.724	
2056	9	110	8	45	612	750	2800	1.50	59	1.724	
2057	9	111	8	45	612	750	2800	1.50	59	1.724	
2058	10	112	8	45	612	750	2800	1.50	59	1.724	
2059	9	113	8	45	612	750	2800	1.50	59	1.724	
2060	8	114	8	45	612	750	2800	1.50	59	1.724	
2061	10	115	8	45	612	750	2800	1.50	59	1.724	
2062	5	116	10-11	45	637	750	2850	1.50	59	1.724	
2063	2	117	10-11	45	637	750	2850	1.50	59	1.724	
2064	3	118	10-11	45	637	750	2850	1.50	59	1.724	
2065	3	119	10-11	45	637	750	2850	1.50	59	1.724	
2066	2	120	10-11	45	637	750	2850	1.50	59	1.724	
2067	3	121	10-11	45	637	750	2850	1.50	59	1.724	
2068	3	122	10-11	45	637	750	2850	1.50	59	1.724	
2069	7	123	10-11	45	637	750	2850	1.50	59	1.724	
2070	10	124	10-11	45	612	750	2850	1.50	59	1.724	
2071	7	125	9	45	612	750	2850	1.51	57	1.724	
2072	8	126	9	45	612	750	2850	1.51	57	1.724	
2073	5	127	10	45	612	750	2850	1.51	57	1.724	
2074	5	128	10	45	612	750	2850	1.51	57	1.724	
2075	3	129	9-10	45	637	750	2850	1.51	57	1.724	
2076	2	130	9-10	45	637	750	2850	1.51	57	1.724	
2077	3	131	9-10	45	637	750	2850	1.51	57	1.724	
2078	2	132	9-10	45	637	750	2850	1.51	57	1.724	
2079	3	133	9-10	45	637	750	2850	1.50	62	1.724	
2080	3	134	11-12	45	637	750	2900	1.50	62	1.724	
2081	3	135	11-12	45	637	750	2900	1.50	62	1.724	
2082	3	136	11-12	45	687	750	2900	1.50	62	1.724	
2083	10	137	10-11	45	687	750	2900	1.50	62	1.724	
2084	10	138	10-11	45	687	750	2900	1.50	62	1.724	
2085	15	139	10	45	687	750	2900	1.50	62	1.724	
2086	8	140	10	45	687	750	2900	1.50	62	1.724	
2087	13	141	10	45	687	750	2900	1.50	62	1.724	
2088	7	142	10	45	687	750	2900	1.50	62	1.724	
2089	13	143	10	45	687	750	2900	1.50	62	1.724	
2090	9	144	10	45	687	750	2900	1.50	62	1.724	
2091	8	145	10	45	687	750	2900	1.50	62	1.724	
2092	2	146	10	45	687	750	2900	1.50	62	1.724	
2093	3	147	10-11	45	687	750	2900	1.50	62	1.724	
2094	2	148	10-11	45	687	750	2900	1.50	62	1.724	
2095	4	149	10-11	45	687	750	2900	1.50	62	1.724	
2096	4	150	10-11	45	687	750	2900	1.50	62	1.724	
2097	4	151	10-11	45	687	750	2900	1.50	62	1.724	
2098	4	152	10-11	45	687	750	2900	1.50	62	1.724	
2099	4	153	10-11	45	687	750	2900	1.50	62	1.724	
2100	3	154	10-11	45	687	750	2900	1.50	62	1.724	
2101	2	155	10	45	687	750	2900	1.50	62	1.724	
2102	2	156	10	45	687	750	2900	1.50	62	1.724	

Tabla 2.4 Datos obtenidos durante la perforación del pozo Cantarell 3006D

## CAPITULO 3 PRUEBA DE CAMPO

### 3.1 Problemática del asentamiento de tuberías de revestimiento en la perforación de la edad terciaria del campo Cantarell

Perforado desde la plataforma Akal KL, el pozo de desarrollo Cantarell 3006D es uno de los 8 pozos perforados hasta marzo del 2001. Por lo anterior se cuenta con suficientes registros geofísicos para correlacionar los estratos en las formaciones de Eoceno y Paleoceno del pozo en perforación.

Adicionalmente, los pozos perforados en la plataforma Akal KL cuentan con información litológica detallada, metro a metro; estos datos permitieron verificar los resultados de energía específica y auxiliaron en la correlación con los registros geofísicos.

En la mayor parte de la perforación de los últimos pozos, se ha empleado el sistema LWD (Logging While Drilling), para tomar un registro de Rayos Gamma y doble inducción, mientras se perfora. Con la ligera desventaja de obtener la información del instrumento a 17 m sobre la barrena. La información de los registros se recupera al sacar la herramienta a la superficie, lo que implica un tiempo adicional.

La información disponible de todos los pozos perforados en la edad terciaria del Campo Cantarell, son registros rayos gamma y de doble inducción y a través de éstos se hacen las correlaciones para el asentamiento de la tubería de revestimiento, la cual es clave en la futura terminación del pozo, pues debe aislar las formaciones arcillosas del Paleoceno Inferior con las formaciones carbonatadas de la Brecha- Paleoceno Cretácico superior (BP-KS). El problema de perforar hasta el contacto con la BP-KS es grande, pues se corre el riesgo de pasar a una zona de baja presión de fractura, de 1.30 gr/cc a 0.57 gr/cc, lo que

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



provocaría una fuerte pérdida de circulación. De ahí la importancia de suspender la perforación a tiempo y tomar los registros geofísicos para ubicar estructuralmente el pozo que se perfora.

En la Tabla 3.1 se muestra la relación de pozos donde se ha empleado el LWD en la etapa de 14 3/4" y 10 5/8".

	BARRENA	LODO	¿CIRCULA?	FECHA	INTERVALO
POZO	pg	Gr/cc			M
CANTARELL 1067D	14 3/4"	E.I. 1.35	SI	16-01-00	802-2022
CANTARELL 1027D	14 3/4"	E.I. 1.35	SI	29-11-99	801-2060
CANTARELL 3006	14 3/4"	E.I. 1.52	SI	11-01-98	2292-2607
CANTARELL 1086D	14 3/4"	E.I. 1.45	SI	11-02-00	805-2220
CANTARELL 1088	14 3/4"	E.I. 1.46	SI	28-09-99	830-2351
CANTARELL 2298D	14 3/4"	E.I. 1.53	SI	30-09-99	1896-2590
CANTARELL 2293	10 5/8"	E.I. 1.02	Parcial	13-07-99	2663-2981
CANTARELL 4062	14 3/4"	E.I. 1.30	Parcial	9-07-99	1599-1845
CANTARELL 3089	14 3/4"	E.I. 1.32	SI	22-08-99	1320-2137
CANTARELL 3089D	14 3/4"	E.I. 1.34	SI	28-09-99	802-2153
CANTARELL 99D	14 3/4"	E.I. 1.36	SI	06-06-99	800-2018
CANTARELL 436	14 3/4"	E.I. 1.33	SI	16-02-99	800-1947
CANTARELL 9D	10 5/8"	E.I. 1.46	SI	08-03-00	1537-2143
CANTARELL 55D	14 3/4"	E.I. 1.35	SI	20-12-99	800-2141
CANTARELL 77D	14 3/4"	E.I. 1.32	SI	04-03-99	803-2500

*Tabla 3.1.- Relación de pozos donde se ha empleado el sistema LWD en campo Cantarell*

En los primeros trabajos del sistema LWD del campo Cantarell fue muy cuestionada la calidad de la información presentada, pues no era posible correlacionar las curvas de rayos gamma y resistividad con los registros de otros pozos registrados con cable. A partir de 1998 se mejoró el servicio, mostrando resultados similares a los obtenidos en registros con cable, por lo tanto, ya es posible correlacionar. Aún cuando la información del LWD se obtiene a tiempo

real, se tiene la desventaja de que la información de registros está a 17 m del fondo y un alto costo de servicio.

En el presente trabajo se encuentra la relación de los parámetros operativos mientras se perfora, con los registros geofísicos, a la profundidad de la barrena y sin costo adicional para la perforación, como una herramienta adicional para correlación.

La Figura 3.1 muestra la calidad de los registros de un mismo pozo, tomados con cable de manera convencional y la otra a través del LWD, sin observarse diferencias importantes.

Aún cuando eleva el costo de la perforación, la aplicación de éste tipo de herramientas ha sido necesaria. Se obtiene operación segura y reducción de tiempos de perforación y asentamiento óptimo de tuberías de revestimiento en zonas críticas. Adicionalmente permite tener el menor tiempo posible la exposición del agujero descubierto con el fluido de perforación, reduciendo con esto los potenciales problemas de reacción de la roca perforada con el fluido.

En el Pozo Cantarell 3006D de la plataforma KL, se capturó la información requerida. En efecto, como se muestra en la Tabla 3.2. es un pozo de desarrollo que tiene como objetivo aislar la edad terciaria de la Cretácica con una tubería de revestimiento de 11 7/8".

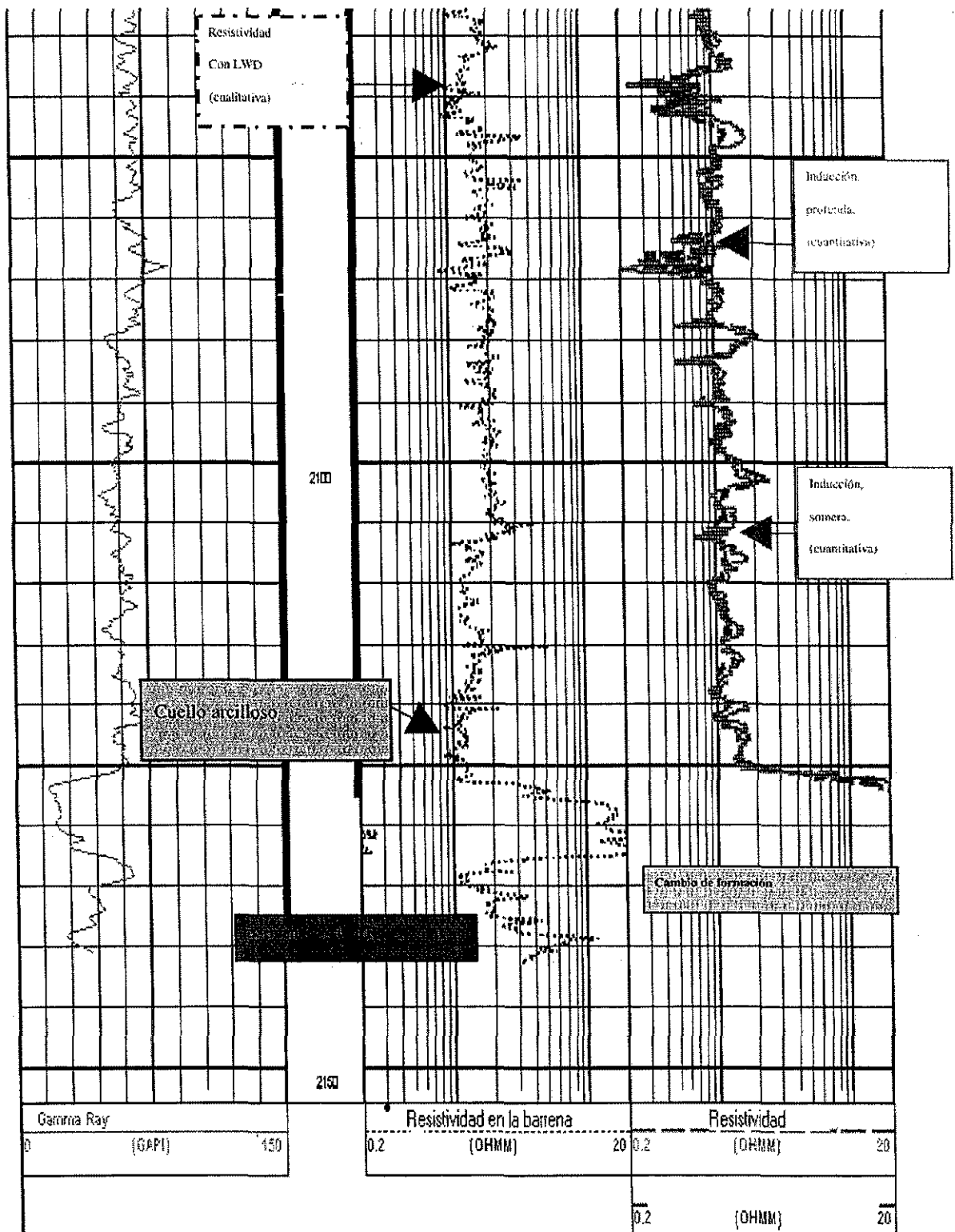


Fig. 3.1 Comparación de los registros de GR y DIL del Pozo Cantarell 3089, tomados con cable y con LWD respectivamente.

## **3.2 Adquisición de los parámetros operativos de la etapa de 14 ¾", Pozo Cantarell 3006D.**

### **3.2.1 Selección de la barrena**

De acuerdo a los diseños de barrenas de las compañías, se han desarrollado barrenas PDC para perforar zonas de lutitas suaves con intercalaciones de formaciones calcáreas, principalmente en la formación eoceno y paleoceno.

La etapa de 14 ¾" fue perforada con tres barrenas, 1) PDC marca Hycalog tipo DS59H con 8 toberas de 14/32", que perforó de 821 a 1841 m, (1021 m en 46:13 hr). Fue sacada a la superficie con un desgaste mínimo, por problemas en el incremento del ángulo. 2) Barrena tricónica, marca Reed, tipo 115, con 3 toberas de 22/32" y una al centro de 16/32", perforó de 1842 a 2214m, (373 m en 71:41 hr), con un desgaste de 5 en el sistema de rodamiento. 3) Barrena PDC, marca Hycalog, tipo DS59H con 8 toberas de 18/32", que perforó de 2215 a 2538 m, (324 m en 62:31 hr.)

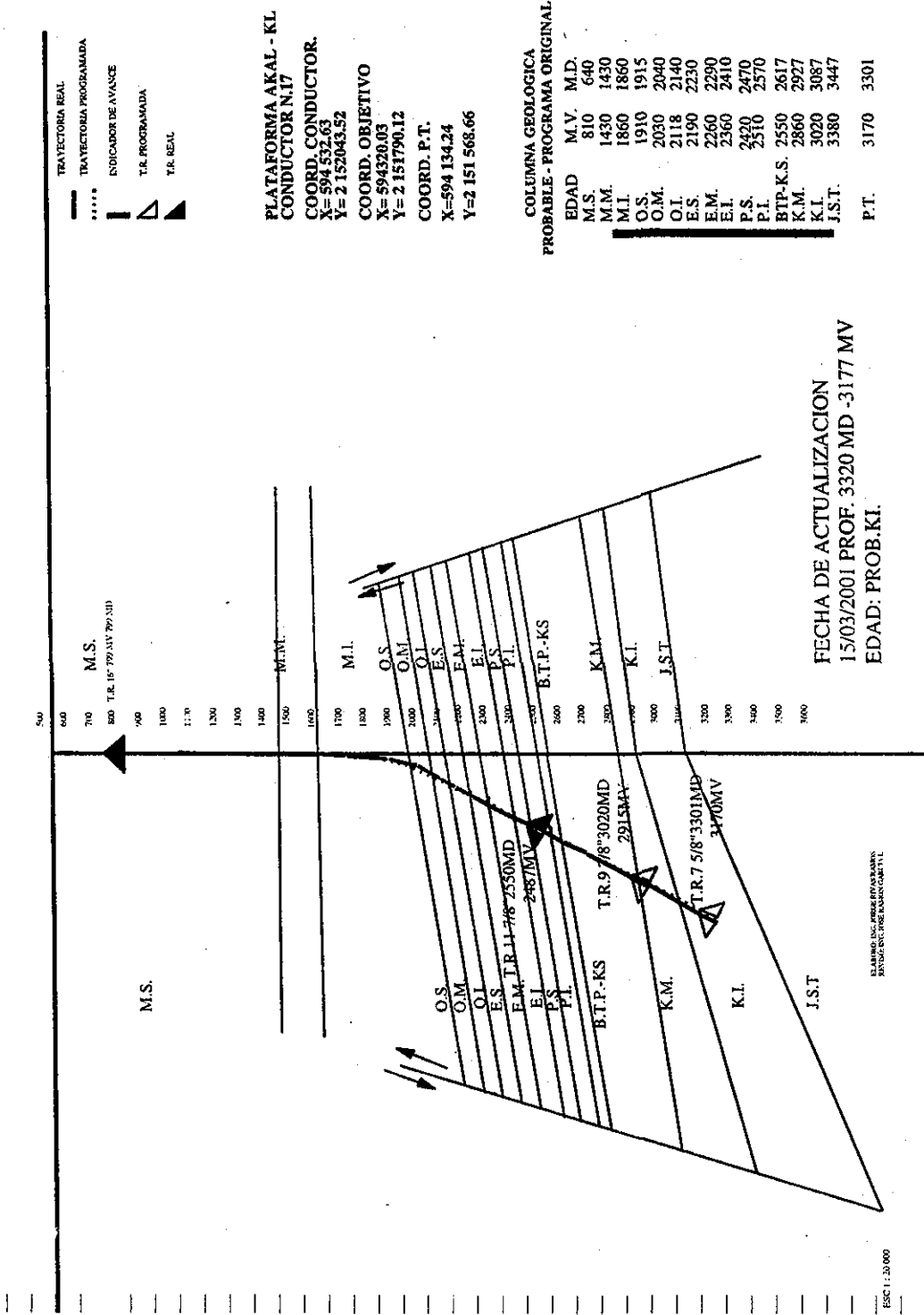
Por los problemas con la corrección del ángulo y la necesidad de meter una barrena tricónica, se consideró únicamente el intervalo de 2250 a 2550 m, que además es la zona que nos interesa caracterizar en éste trabajo. Estos son los datos obtenidos con la tercera barrena.

En la mayoría de los pozos se utilizan barrenas PDC para la perforación de la etapa de 14 ¾", debido a su alto rendimiento y mínimo riesgo de dejar algún pez. La Figura 3.2 Muestra la posición estructural del pozo Cantarell 3006d, con respecto al pozo vertical Cantarell 1006.

### **3.2.2 Parámetros operativos de perforación**

Los parámetros operativos de perforación, WOB y RPM son las dos variables que pueden ser controladas de manera manual o automática

**SECCIÓN ESTRUCTURAL CANTARELL 3006d  
AKAL - KL**



**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Fig. 3.2 Sección estructural del pozo Cantarell 3006D

En la Tabla 3.2 se muestran los parámetros operativos durante la perforación del pozo Cantarell 3006D.

Barrena	Metros Perf.	Horas	WOB (ton)	RPM	Gasto (gpm)
PDC-DS59H	1021	46:13	1-5	140	638
Tricónica 115	373	71:41	7-9	140	638
PDC-DS59H*	324	62:31	3-4	130	613

Tabla 3.2.- Parámetros operativos de las barrenas de 14 3/4", pozo Cantarell 3006D

\*Datos obtenidos en la zona de interés.

### 3.3 Análisis de la Información

La información obtenida en el pozo Cantarell 3006D en la etapa de 14 3/4", fueron principalmente los parámetros operativos durante la perforación; como el WOB, RPM, y ROP, todos ellos en valores promedio en cada metro, tomados de los indicadores en la superficie por el perforador. A continuación se detalla cada uno de los parámetros:

*Peso sobre barrena (WOB).*- Este es obtenido del indicador de peso en la superficie y es afectado por la desviación del agujero al momento de perforar, para obtener el peso sobre barrena axial, efectivo en la cara de la barrena. El peso es controlado por el perforador, quien busca mantener de manera constante el peso recomendado para el mejor avance de la barrena, sin embargo, durante la perforación de cada metro, la habilidad del perforador para mantener el peso programado, puede no ser buena y pudieran ocurrir variaciones importantes en el peso ejercido sobre la barrena y consecuentemente en una mala estimación de la Energía Específica de Perforación (EEP).

*Revoluciones por Minuto (RPM).*- Es otro de los parámetros importantes durante el proceso de perforación, programado de acuerdo al tipo de barrena, es suministrado por la mesa rotaria, en un equipo convencional, o bien por los motores hidráulicos del "Top Drive". El perforador selecciona las revoluciones y las mantiene fijas; éste parámetro se puede considerar como muy confiable. Cuando se perfora con motor de fondo, las revoluciones que se imparten a la sarta de perforación en la superficie, no son precisamente las que se tienen en la barrena, por lo anterior, se hace necesario conocer las características del motor de fondo y en función al gasto de trabajo, se obtienen las RPM que tiene la barrena.

*La Velocidad de Penetración (ROP).*- La velocidad de penetración, en metros o pies por hora, existen dos formas de obtenerla, una es de forma manual, marcando metro a metro en el tubo que se está perforando, midiendo el tiempo que transcurre en la perforación de cada metro, teniendo una precisión a minutos, lo que involucra un error considerable, ya que la velocidad de penetración es el parámetro variable mas importante en la estimación de la energía específica de perforación.

Otro método es tomando mediciones por instrumentos a través del sistema MWD (Medición mientras perfora). Obteniendo la velocidad en pie/hr, siendo la mejor estimación.

Sin embargo, se pretende que el método empleado en el campo, sea a tiempo real y se tendrá que emplear la medida manual de velocidad, porque para contar con la medición del instrumento (MWD), sería necesario recuperar y procesar la información en la superficie.

### **3.4 Estimación de la resistencia a la compresión en campo**

La energía específica de perforación es calculada a tiempo real y a la profundidad de la barrena con la fórmula de Rabia discutida en el Capítulo I, metro a metro y

es graficada en un gráfico X-Y, con el mismo formato de los registros rayos gamma, siendo en X la EEP y en el eje Y, la profundidad, al mismo tiempo se compara cualitativamente con registros rayos gamma y doble inducción de pozos de correlación. De la misma manera y partiendo de la evaluación de la energía específica de la Ecuación de Teale modificada y la ecuación normalizada (2.4), se evalúa la resistencia a la compresión in situ. Como se muestra en la Figura 3.3

### 3.5 Índice de Resistencia-Rayos Gamma

Después de perforar y registrar un agujero en la edad Terciaria, es posible caracterizar el tipo de formaciones que se perforan y definir apropiadamente los cuerpos arcillosos, calcáreos y las formaciones que presentan intercalación de lutitas y carbonatos, esto de la manera siguiente:

- o Durante la perforación de la etapa se obtiene la información básica de los parámetros de perforación y empleando las Ecuaciones (1.1), (2.3) y (2.4) y se calcula la resistencia a la compresión in situ. Eso nos indica de manera continua las características mecánicas de la roca, las cuales pueden ser comparables con valores típicos de laboratorio, como los mostrados en la Tabla 2.2
- o Se recupera la información del registro de rayos gamma de manera digitalizada, metro a metro. Se divide el valor de resistencia a la compresión entre el valor de rayos gamma en Unidades API. Se genera un perfil, el cual definirá de manera clara los diferentes cuerpos perforados, confirmando los diferentes estratos, como se muestra en el ejemplo, Pozo Cantarell 3006D. Figura 3.4.

Es importante señalar que la información recabada de los registros de rayos gamma indican dudosa calibración de las herramientas, ya que los valores van desde promedios de 20, 30 y 40 UAPI en pozos diferentes de la plataforma Akal KL, mientras que de manera cualitativa correlacionan muy bien sus marcas.



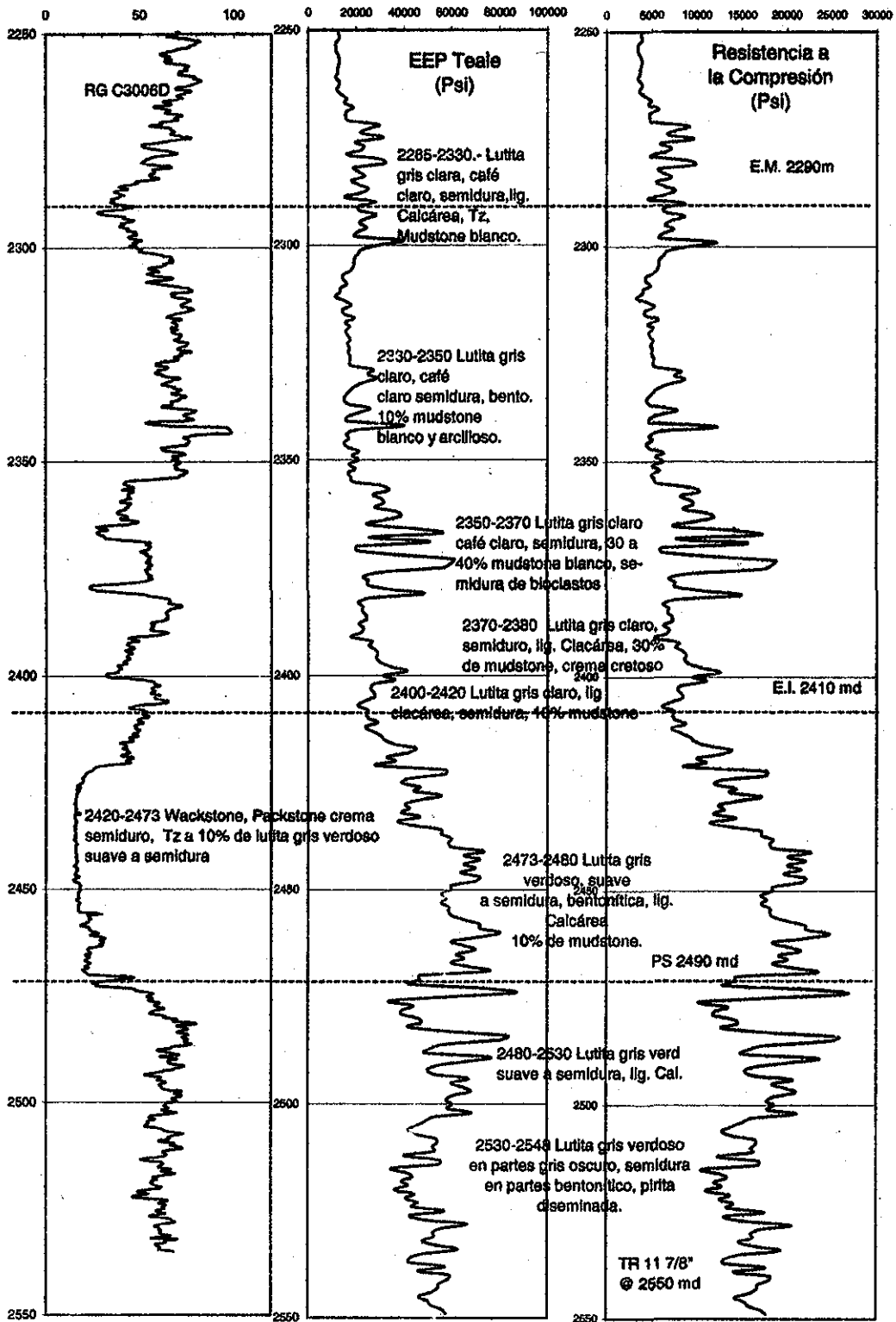
### 3.6 Perfil de Porcentaje de Lutita.

Una de las mayores aportaciones técnicas que presenta éste trabajo, es la construcción de un porcentaje de lutita, partiendo solamente de los parámetros operativos básicos y el conocimiento de la resistencia a la compresión de las rocas en pruebas de laboratorio.

Para obtener el registro se procede de la manera siguiente:

- o Se calcula la energía específica de perforación con las Ecuaciones (1.1) y la (2.3). Y empleando la Ecuación (2.4) se calcula de manera continua la resistencia a la compresión in situ.
- o Los valores de resistencia a la compresión del registro son comparados con los valores obtenidos en laboratorio. Si los valores calculados en campo son menores a 7,000 psi, se tiene 100% de lutita, cuando los valores son de 25,000 psi o mayores, se tiene 0% de lutita. En el pozo Cantarell 3006D, se dispuso de información litológica que permitió comprobar los valores anteriores con los de laboratorio, obteniendo un registro de porcentaje de lutita verificado con los reportes litológicos del geólogo.

Es importante señalar que es posible obtener valores menores a 7,000 psi, porque se requiere menor energía específica de perforación cuando se perforan formaciones sobrepresionadas, principalmente cuando se tiene una presión diferencial (Presión de formación menos presión hidrostática) muy pequeñas. El ejemplo de aplicación se muestra en la Figura 3.5.



**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

Fig. 3.3 Relación entre RG-EEP y Resistencia a la Compresión, Pozo C-3006D

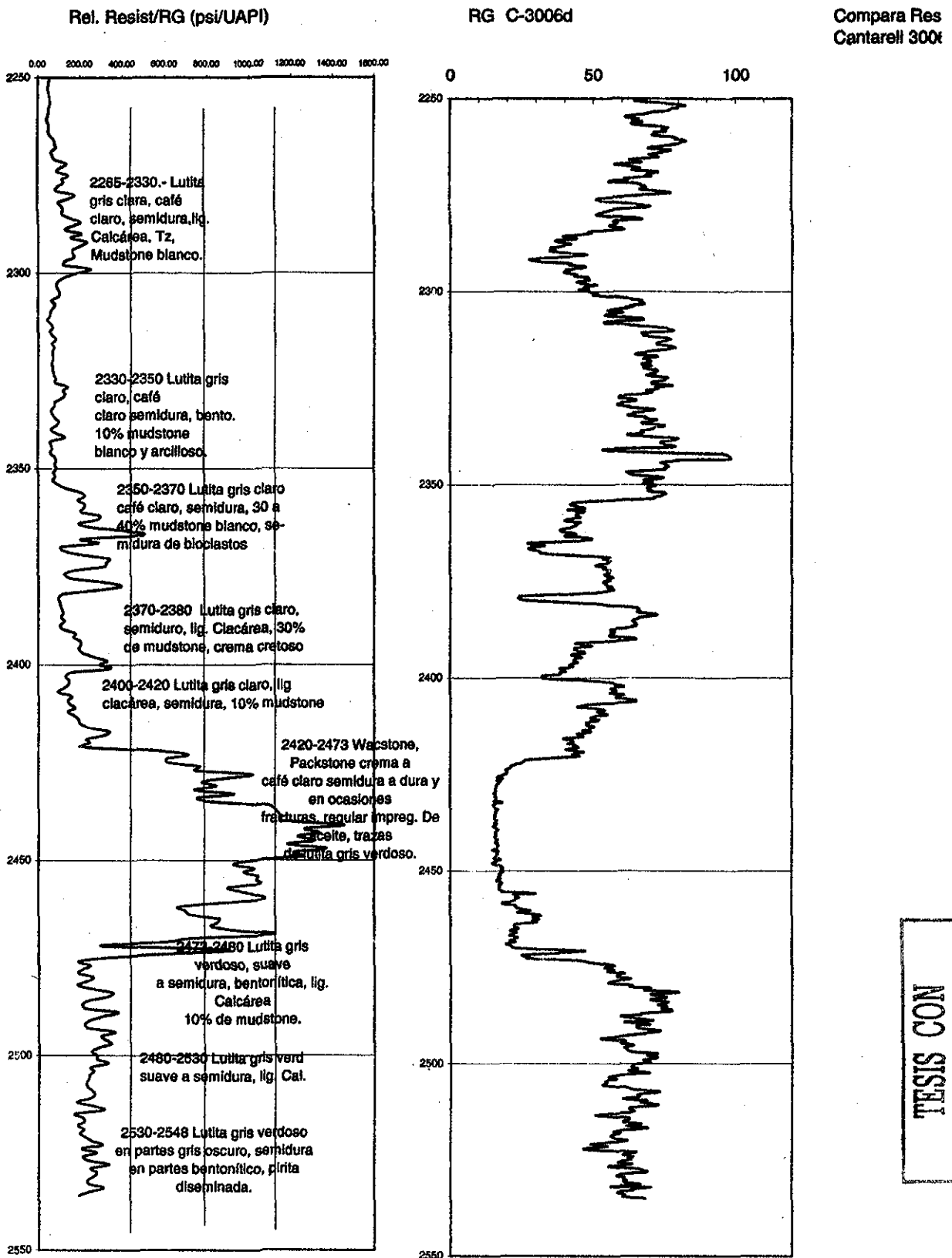


Fig. 3.4.- Registro de Indice de resistencia-rayos gamma, Pozo Cantarell 3006D

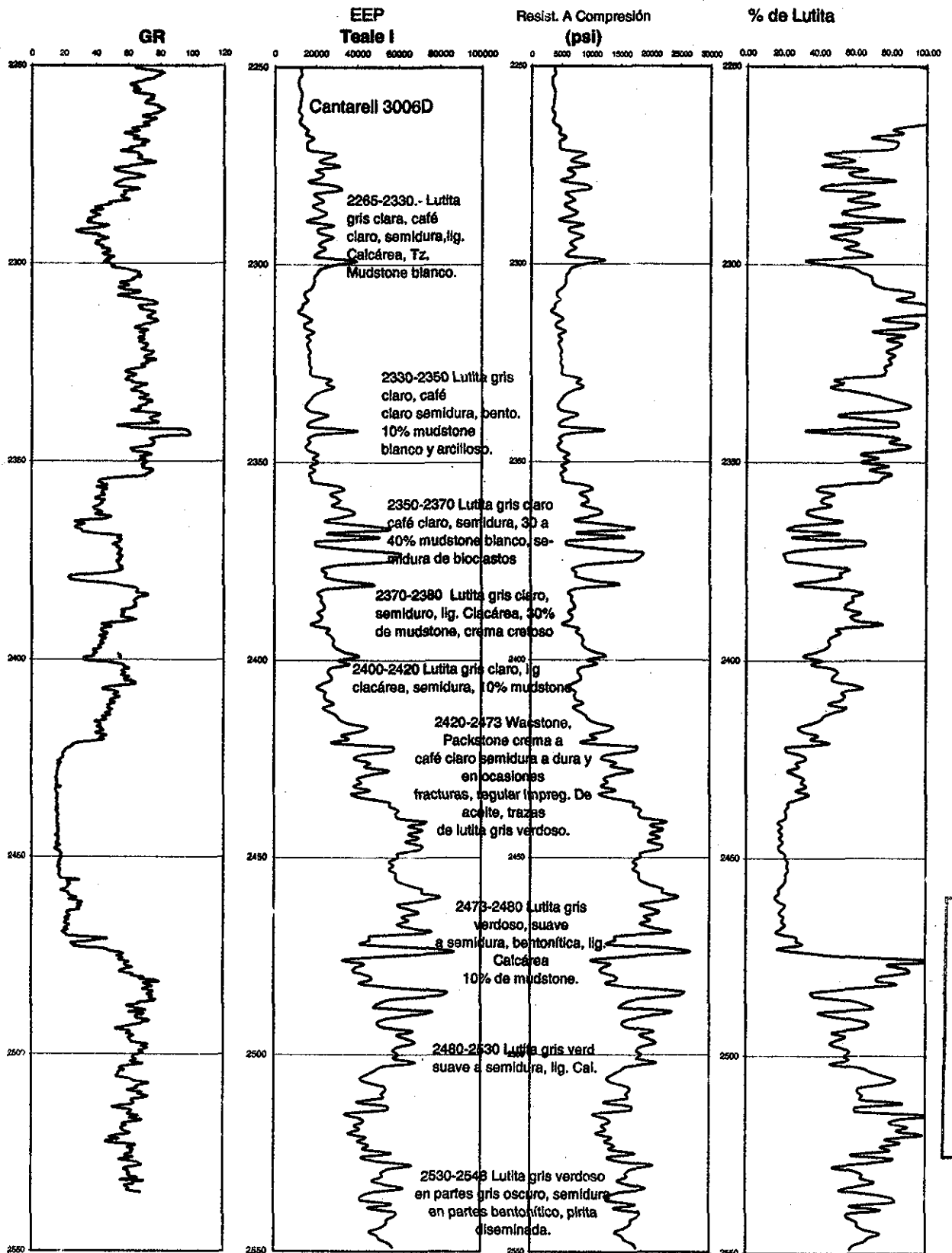


Fig. 3.5.- Perfil de Porcentaje de Lutita, Pozo Cantarell 3006D

### 3.7 Análisis preliminar de los resultados

Al comparar los resultados obtenidos de resistencia a la compresión in-situ con el de rayos gamma y de resistividad, se observan una buena correlación en las formaciones correspondientes a las edades Oligoceno y Eoceno, pues la mayoría de las marcas observadas en los registros geofísicos, se observan en la gráfica obtenida de energía específica, a la misma profundidad, lo que permite correlacionar en el mismo pozo y sugiere una correlación con información de otros pozos que se perforen a futuro.

Es posible encontrar marcas índice en las curvas de rayos gamma, resistividad y la de energía específica. Sin embargo, en algunos casos no es posible observar marcas claras de correlación, pero se deberá correlacionar a través de las tendencias, es decir:

- Cuando se tiene un incremento en los valores de rayos gamma y su correspondiente disminución en la resistividad, puede denotar la existencia de una formación arcillosa, se tendría que esperar una disminución en los valores de la resistencia a la compresión. Por lo contrario, bajos valores de rayos gamma y aumento en la resistividad, puede sugerir que tenemos una formación calcárea o arenisca y para ello deberíamos esperar altos valores en la energía específica.

Haciendo un post-análisis, al contar con la información de los parámetros operativos metro a metro y el registro de rayos gamma, es posible encontrar una buena correlación con los pozos de correlación de la plataforma Akal KL

## 4.- ANÁLISIS DE RESULTADOS

La primera fase del trabajo consistió en caracterizar las diferentes rocas "índice", tales como: arena, lutita 1, lutita 2 y mármol, perforadas con diferentes tipos de barrenas con lodos base agua y aceite.

En virtud de la dificultad para estimar el torque mientras se perfora, a partir de pruebas de laboratorio<sup>1</sup>, se calculó la energía específica de perforación empleando las Ecuaciones básicas de Teale<sup>(3)</sup> y de Rabia<sup>(2)</sup>. Fueron graficados los resultados de energía de Rabia vs Teale (Como lo muestra la Figura 2.2), se encontró una ecuación que permite obtener el valor de la energía específica de Teale a partir de los parámetros básicos de la ecuación de Rabia, tales como: WOB, RPM, d y ROP, la cual tiene implícito el torque.

Teniendo como datos la resistencia a la compresión de las diferentes rocas índice, se obtuvo una gráfica de energía específica entre la resistencia a la compresión normalizada contra la velocidad de penetración, para conocer la resistencia a la compresión a partir de la energía específica, como lo muestra la Figura 2.3.

De acuerdo a los resultados de la resistencia a la compresión en la perforación de dos pozos y su registro de rayos gamma, se comparó con la descripción litológica aportada por el geólogo, con las resistencias a la compresión típicas de las rocas perforadas, encontrando una buena correlación hasta el cuerpo calcáreo del Eoceno-Paleoceno.

Así mismo y a partir de la información de registros de rayos gamma tomados en la edad terciaria del campo Cantarell se pueden distinguir dos bloques desde el punto de vista de secuencias sedimentarias: 1).- La etapa de transgresión del mar sobre la plataforma continental, propiciando la depositación de grano grueso arenoso intercalado en el material arcilloso, desde el reciente

hasta la base de la formación mioceno inferior y 2).- La etapa de regresión, periodo en que se depositó material calcáreo intercalado en las arcillas. Estas diferentes etapas de sedimentación provocan diferentes respuestas en los valores y tendencias de rayos gamma, como se muestra en la Figura 4.1.

Una vez definida la ecuación que permite obtener la resistencia a la compresión, a partir de los parámetros básicos de perforación, se estudió la relación entre la resistencia a la compresión con los diferentes registros geofísicos, tales como: rayos gamma y resistividad, encontrando los resultados siguientes:

1. Buena correlación entre los valores de rayos gamma y la resistencia a la compresión, a partir de la formación Oligoceno Inferior en los pozos analizados del campo Cantarell, antes del fenómeno de transgresión geológica del mioceno, con resistencias a la compresión que varían desde 4000 psi y hasta 8000 psi en formaciones con 100% de lutita. En el cuerpo calcáreo del Eoceno Medio a una profundidad de 2420 a 2473 m del pozo Cantarell 3006D, se observan valores desde 12000 hasta 25000 psi, que corresponden a formaciones carbonatadas. En la formación Eoceno Inferior y Paleoceno, se observan valores de 10000 a 14000 psi, que corresponden a una lutita compacta, con presión de formación normal.

Se observa en términos generales que "A mayor resistencia a la compresión obtenida al perforar, se tienen los menores valores de rayos gamma, es decir: se tiene un menor porcentaje de lutita".

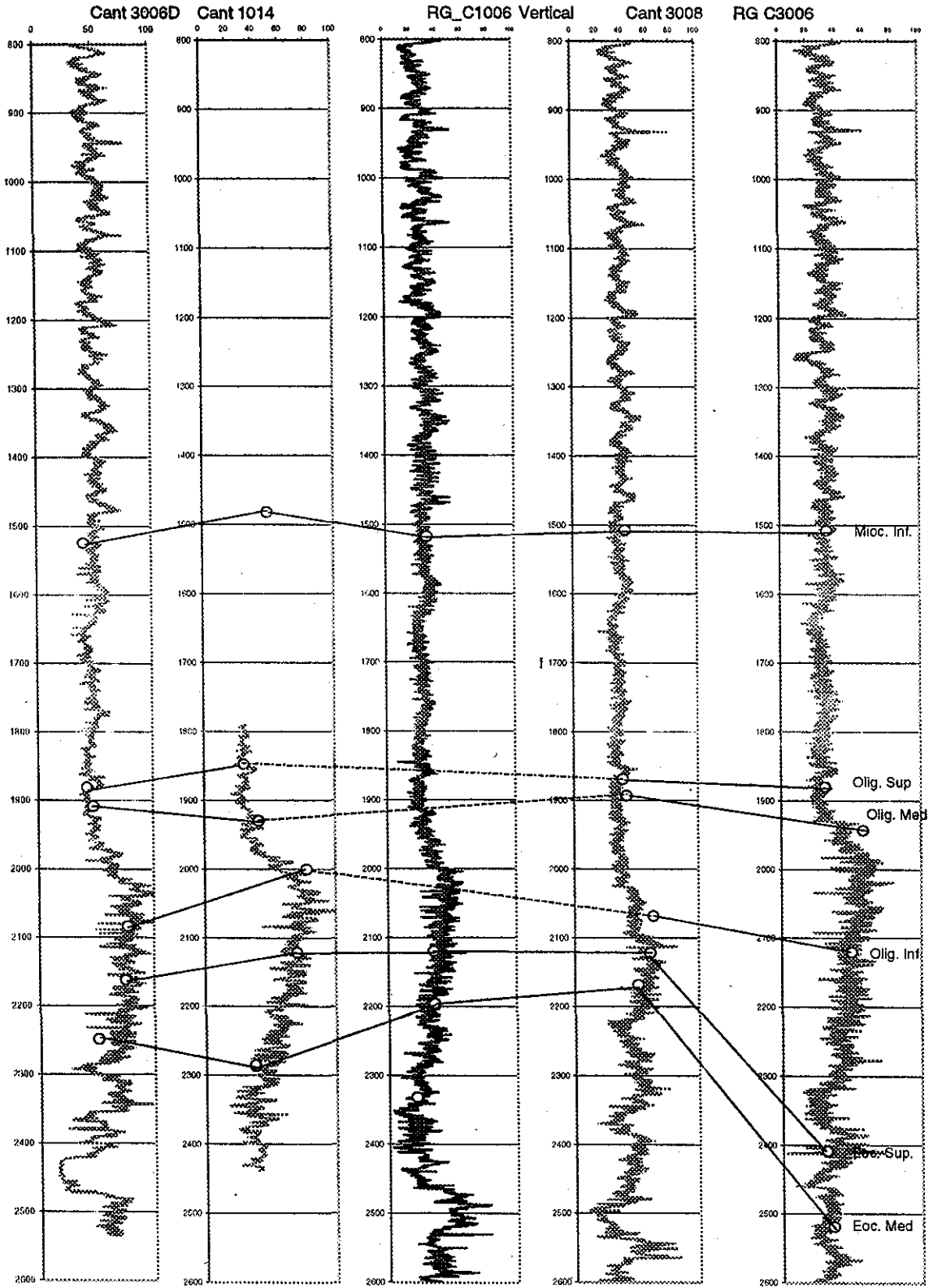
2. Un post-análisis muestra que es posible obtener un "Índice de resistencia a la compresión con rayos gamma", es decir la relación de resistencia a la compresión entre rayos gamma del registro, sus unidades son psi/UAPI, lo que viene a confirmar la relación que existe entre la resistencia a la compresión y los valores de rayos gamma. Figura 3.4

3. Partiendo de datos de laboratorio a rocas índice y de la curva de resistencia a la compresión continua, es posible construir un registro de porcentaje de lutita y formaciones carbonatadas mientras se perfora. Figura 3.5

En el caso particular del pozo Cantarell 3006d, la etapa de 14 ¾" fue perforada con tres barrenas, dos de tipo PDC y una tricónica, se observó un cambio importante en la velocidad de penetración de 8 a 2 min/m cuando se cambió la barrena tricónica por la barrena PDC.

De acuerdo a las pruebas de laboratorio en las diferentes rocas índice, solamente fueron utilizadas barrenas PDC, por lo anterior, las relaciones de los parámetros operativos en el cálculo de la energía específica de perforación, de resistencia a la compresión y los porcentajes de lutita, son tomadas solamente para la etapa en que fue perforada con barrenas PDC.





**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Fig. 4.1.- Registros de Rayos Gamma de 5 diferentes pozos de Akal KL

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

1. Se asimiló y adaptó una metodología que permite evaluar la resistencia a la compresión de las rocas perforadas a tiempo real, a partir de la energía específica de perforación, empleando solamente los parámetros operativos de perforación.
2. La curva de resistencia a la compresión obtenida mientras se perfora, nos proporciona un perfil de "Litoresistencia" en la que es posible estimar el porcentaje de lutita, permitiendo identificar cuerpos arcillosos para definir el asentamiento de la tubería de revestimiento en la roca sello del campo Cantarell.
3. Es posible obtener expresiones que relacionen los parámetros de operación y su comportamiento en rocas con diferentes resistencias a la compresión, siendo posible realizar análisis de sensibilidad entre los parámetros de velocidad de penetración, peso sobre barrena y el torque que genera la barrena al perforar.
4. Es posible utilizar el concepto de resistencia a la compresión para correlacionar el pozo que se perfora con pozos vecinos, a tiempo real y a la profundidad de la barrena, sin requerir de recursos adicionales, solamente se adquieren los datos de perforación y a través de una pantalla de captura se calcula metro a metro la energía específica.

5. En los pozos perforados en el campo Cantarell se tienen diferentes valores de rayos gamma, sin embargo, las tendencias de los pozos en una misma estructura, por lo que es posible tener correlación entre ellos, se puede concluir que los diferentes valores son debidos a una dudosa calibración de las herramientas.
  
6. A partir de los parámetros operativos y un registro de rayos gamma del pozo perforado, es posible realizar un post-análisis y obtener un índice de resistencia – rayos gamma, el cual permite definir cuerpos característicos de las diferentes rocas perforadas en la edad terciaria del campo Cantarell, tales como lutita, carbonatos e intercalaciones de ellos.

### **RECOMENDACIONES**

1. Las correlaciones fueron desarrolladas en el Campo Cantarell, en la edad terciaria, empleando barrenas PDC, por lo que, de aplicarse en otro campo o diferentes tipos de barrenas deberá considerarse el desgaste de barrena y la caracterización de las formaciones.
  
2. Se propone aplicar esta metodología durante la perforación de un pozo vertical del campo Cantarell, donde se tenga programado la toma de la mayor parte de los registros (Litodensidad, Porosidad Neutrón, sónico, etc.), con el propósito de corroborar los datos obtenidos con los parámetros operativos y los de registro.

3. Adicionalmente, es posible tener expresiones que permitan optimizar la penetración de la roca en función de las propiedades mecánicas de la roca y de las condiciones de operación. Así mismo, se puede estimar la torsión de la barrena a partir de datos de diseño para perforar, la geometría del agujero y el tipo de roca a perforar.

## NOMENCLATURA

a,b,c	Constante de diseño de la barrena (Adimensional)
A	Area ( $\text{pg}^2$ )
D	Diámetro de barrena (pg)
DIL	Registro Doble Inducción
EEP	Energía específica de perforación ( $\text{lb/pg}^2$ )
F	Fuerza ( $\text{lb}_f$ )
Im	Fuerza de impacto de jet modificada (lb)
LWD	Registra mientras perfora
MWD	Medición mientras perfora
Pbl	Caída de presión en la barrena ( $\text{lb/pg}^2$ )
Pdl	Caída de presión en la sarta de perforación ( $\text{lb/pg}^2$ )
Pea	Caída de presión en el espacio anular ( $\text{lb/pg}^2$ )
Psp	Caída de presión en el stand pipe ( $\text{lb/pg}^2$ )
RG	Rayos gamma (U-API)
ROP	Velocidad de Penetración (pie/hr)
RPM	Revoluciones por minuto (rpm)
Rt	Resistencia verdadera (ohm-m)
UCS	Resistencia a la Compresión Uniaxial (Psi)
T	Torque (pie-lb)
WOB	Peso sobre barrena ( $\text{lb}_f$ )
$\mu$	Coefficiente específico de fricción de deslizamiento
$\rho$	Densidad de la matriz ( $\text{g/cm}^3$ )
$\delta_{ult}$	Esfuerzo de compresión último ( $\text{lb/pg}^2$ )
$\phi$	Porosidad (%)
$\varepsilon$	Ductibilidad de la roca (Adimensional)
$\sigma_0$	Resistencia a la compresión (Psi)

## REFERENCIAS

- 1.- García-Gavito, D., **Cutting Mechanics Modeling for Polycrystalline Diamond Compacts and extension to the Drill Bit** .Disertación doctoral desarrollado por el Dr. Daniel García Gavito en la Universidad de Tulsa en 1998.
- 2.- Rabia Hussain, **Specific Energy as a Criterion for Drill Performance Prediction**, International Journal of Mechanics & Mining Sciences, Feb 1982, Vol 19, No. 1
- 3.-Teale R., **The Concept of Specific Energy in Rock Drilling**, Int. Journal Rock Mechanic Sci, Vol 2, pp 57-73, Pergamon Press 1965.
- 4.- Pessier R.C., **Quantifying Common Drilling Problems With Mechanical Specific Energy and a Bit\_Specific Coefficient of Sliding Friction**. Hughes Tool Co., and M.J. Fear, BP Exploration, SPE Members, Paper SPE 24584, presentado en la 67 Conferencia Anual técnica de la SPE en Washington, DC, Octubre 4-7 de 1992.
- 5.- Reddish D. J. Y Yasar Ergül, **A New Portable Rock Strength Index Test Based on Specific Energy of Drilling**, Int. J. Rock mech. Min Sci., Vol 33, No. 5, PP 543-548, 1996.
- 6.- Onyia E.C **Relationships Between Formation Strength, Drilling Strength, and Electric Log Properties..**, Amoco Production Co. Paper SPE 18166, presentado en la 63 Conferencia Anual técnica de la SPE en Houston, TX, 2-5 de Octubre de 1988.
- 7.- Smorodinov y otros, **Determination of Correlation Relationships Between Strength and Some Physical Characteristics of Rocks**, Proceeding of the Second Congress of the Int. Soc. For Rock Mech., Beograd, September 21-26, 1970.
- 8.- Warren T.M., **Factors Affecting Torque for a Roller Cone Bit**, Society of Petroleum Engineers of AIME, 1984.
- 9.- Elkington y otros, **Rock Strength Predictions from Wireline Logs**, Int. J. Rock mech. Min Sci & Geomechanics, Vol 19, pp91 a 97, 1982
- 10.- Romero Peñaloza Rafael, **Geometría y procesos diagenéticos que condicionan las propiedades petrofísicas de la brecha calcárea en el campo Cantarell**, DEPFI, UNAM, Tesis 1995
- 11.- Serra Oberto, **Fundamentals of well-log interpretation**, París, Francia, Developments in Petroleum Science, 1984,

**12.- Vázquez Reyes Iza A. "Desarrollo de perfiles de energía específica y resistencia a la compresión e sitio a partir de parámetros de perforación"**  
Proyecto de Tesis, DEPFI-UNAM, 2001

**APÉNDICE**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Prueba 2

Barrena 8.5 Bna. 1 Lodo 12 lb/gal,  
 Toberas 4) 11/32" 0.37 pg2 Formación Lutita 1

No de dato	Intervalo de:	Intervalo a (pg)	Rop (pie/hr)	p=Rop/RPM (pg/rev)	Torque (lb . pg)	WOB (lb)	RPM	EEP Teale (Psi)
1	0	3.2	51	0.125	7872	1391	82	7031.82
2	3.2	4.8	59	0.1471	10188	2723	80	7696.01
3	4.8	6.9	73	0.1823	13068	4275	80	8003.97
4	6.9	9.5	79	0.1115	8040	1506	142	8027.45
5	9.5	11.7	84	0.1191	9876	2903	141	9229.05
6	11.7	14.6	99	0.1372	11988	4245	144	9728.56
7	14.6	18.3	135	0.0767	7224	1183	352	10449.03
8	18.3	19.6	40	0.0228	2076	520	350	10065.91
9	19.6	21.3	68	0.0387	3456	959	352	9921.33
10	21.3	24.2	52	0.1279	8388	2787	81	7282.84
11	24.2	26.7	86	0.1188	9240	2977	145	8677.55
12	26.7	30.2	94	0.1321	10020	2761	142	8428.78
13	30.2	32.6	87	0.1218	9948	2844	143	9102.75

Tabla A.1.- Pruebas de laboratorio de roca lutita 1, Barrena 1

## Prueba 6

Barrena 8.5 Bna. 2 12 lb/gal,  
 Toberas 4) 11/32" 0.37 pg2 Lutita 1

No de dato	Intervalo de:	Intervalo a (pg)	Rop (pie/hr)	p=Rop/RPM (pg/rev)	Torque (lbf . pg)	WOB (lb)	RPM	EEP Teale (Psi)
1	0	3.2	3.8	0.0094	840	1425	81	9938.06
2	3.2	3.9	6.1	0.0151	2196	2876	81	16194.63
3	3.9	5	14.9	0.037	3708	4353	81	11236.62
4	5	5.6	4	0.0057	816	1443	141	15950.14
5	5.6	6.6	5.5	0.0078	852	2877	141	12143.26
6	6.6	7.5	5	0.0071	924	4327	141	14502.16
7	7.5	8.4	4.1	0.0023	924	1393	350	43694.06
8	8.4	9.4	5.9	0.0034	564	2875	350	18573.92
9	9.4	10.1	6.3	0.0036	1008	4344	350	31080.01
10	10.1	10.9	5.6	0.0138	1428	2868	81	11485.84
11	10.9	11.9	5.5	0.0078	1296	2882	141	18445.10
12	11.9	13.1	7.4	0.0042	888	2886	351	23369.89
13	13.1	14.9	6.8	0.0097	1008	2899	140	11540.61
14	14.9	16	4.7	0.0117	900	2937	80	8532.95
15	16	17.1	5.9	0.0145	2316	5807	81	17705.62
16	17.1	18.3	7.5	0.0185	3240	8667	81	19525.47
17	18.3	19	3.8	0.0054	732	2888	141	15088.16
18	19	19.7	6.8	0.0097	2364	5816	140	27048.15
19	19.7	20.6	6.8	0.0096	3072	8723	141	35419.51
20	20.6	21.3	4.9	0.0028	456	2881	351	18134.92
21	21.3	22.2	7.9	0.0045	1584	5813	351	39065.88
22	22.2	23.3	9.6	0.0055	2184	8649	350	44235.46
23	23.3	24.8	9.6	0.0055	2268	8639	351	46061.58

A.2.- Pruebas de laboratorio de lutita 1, Barrena 2

Prueba 14

Barrena 8.5 Bna. 1 Lodo 12 lb/gal,  
 Toberas 4) 11/32" 0.37 pg2 Formación Lutita 2

No de dato	Intervalo de:	Intervalo a (pg)	Rop (pie/hr)	$p=Rop/RPM$ (pg/rev)	Torque (lbf . pg)	WOB (lb)	RPM	EEP Teale (Psi)
1	0	3	15.4	0.0384	10776	2814	80	31041.55
2	3	4.3	22.8	0.0568	18084	5666	80	35229.33
3	4.3	5.9	27.5	0.0677	24828	8563	81	40637.96
4	5.9	7.2	19.8	0.0283	9204	2806	140	36079.23
5	7.2	9.3	36.5	0.052	17928	5673	141	38442.46
6	9.3	11.1	39	0.0557	22116	8624	140	44105.34
7	11.1	13.1	32	0.0182	7572	2789	351	46031.36
8	13.1	15.8	88	0.0502	17220	5633	350	38016.85
9	15.8	18.6	95	0.0541	20724	8524	351	42541.76
10	18.6	20.2	17.3	0.0433	16020	5703	80	41114.16
11	20.2	21.9	33.7	0.0484	16692	5658	139	38216.42
12	21.9	24.8	69.1	0.0396	15192	5748	349	42581.29
13	24.8	26.3	36.5	0.0514	17880	5719	142	38611.81
14	26.3	27.9	30.2	0.043	15792	5732	141	40920.87
15	27.9	29.3	26.4	0.0377	15816	5715	140	46535.44
16	29.3	30.9	27	0.0384	15360	5680	141	44508.86
17	30.9	31.5	13.9	0.032	10740	2778	81	34698.43
18	31.5	32.2	19	0.0461	19440	5710	82	46549.87

Tabla A.3.- Pruebas de laboratorio de Lutita 2, Barrena 1

## Prueba 9

Barrena 8.5 Bna. 2  
Toberas 4) 11/32" 0.37 pg2

12 lb/gal, Base agua  
Lutita 2

No de dato	Intervalo de:	Intervalo a (pg)	Rop (pie/hr)	p=Rop/RPM (pg/rev)	Torque (lbf . pg)	WOB (lb)	RPM	EEP Teale (Psi)
1	0	2	4.4	0.0109	6504	3082	81	66342.33
2	2	2.8	11.7	0.0292	14820	6156	80	56209.98
3	2.8	4.1	16.7	0.0415	20460	9206	80	54424.92
4	4.1	5.1	8.5	0.0121	6144	3081	141	56479.55
5	5.1	6.5	20.4	0.0291	13404	6126	140	51035.70
6	6.5	7.9	30.2	0.0432	18888	9227	140	48638.88
7	7.9	9.6	27.5	0.0157	6984	3043	350	49264.57
8	9.6	12	60	0.0342	14160	6121	351	45968.63
9	12	14.9	85.5	0.0488	20520	9124	351	46798.85
10	14.9	16.8	15.8	0.0397	14784	6132	80	41550.66
11	16.8	18.7	25	0.0357	14412	6151	140	44790.58
12	18.7	22.2	60	0.0343	13884	6121	350	44946.62
13	22.2	23.9	30.3	0.0432	16056	6172	140	41180.68
14	23.9	25.6	24.5	0.0348	14928	6204	141	47673.16
15	25.6	27.2	24.8	0.0352	13560	6149	141	42790.80
16	27.2	28.9	25.3	0.036	13764	6156	140	42275.64
17	28.9	29.6	9.2	0.0225	8052	3124	82	39788.11
18	29.6	30.3	15.1	0.0373	15456	6180	81	46010.45
19	30.3	31.5	19.6	0.0489	21876	9227	80	49596.40

Tabla A.4.- Pruebas de laboratorio de Lutita 2, Barrena 2

Prueba 4

Barrena 8.5 Bna. 1 12 lb/gal, Base aceite  
 Toberas 4) 11/32" 0.37 pg2 Arena

No de dato	Intervalo de:	Intervalo a (pg)	Rop (pie/hr)	$p=Rop/R_{PM}$ (pg/rev)	Torque (lbf . pg)	WOB (lb)	RPM	EEP Teale (Psi)
1	0	4.3	44	0.1101	10332	1591	80	10428.29
2	4.3	5.8	55	0.1367	17928	3103	80	14491.83
3	5.8	7.4	66	0.1635	25716	4590	81	17553.85
4	7.4	9.2	45	0.0638	9492	1636	141	16494.77
5	9.2	11.1	76	0.1104	16932	3080	138	17075.70
6	11.1	13.3	79	0.1122	22080	4628	141	21899.47
7	13.3	15.7	55.5	0.0302	8136	1662	368	29896.04
8	15.7	18.3	120	0.0685	14052	3059	350	22744.57
9	18.3	21.8	48	0.1194	19320	3280	80	17884.79
10	21.8	24.9	70	0.1009	16884	2959	139	18613.70
11	24.9	28.3	105	0.062	15132	3054	339	27101.43
12	28.3	30.3	35	0.02	4176	888	350	23135.37
13	30.3	32.7	80	0.1142	16956	3028	140	16481.32

Tabla A.5.- Pruebas de laboratorio de Arena, Barrena 1

Prueba 7

**Barrena** 8.5 Bna. 2 12 lb/gal, Base agua  
**Toberas** 4) 1 1/32" 0.37 pg2 Arena

No de dato	Intervalo de:	Intervalo a (pg)	Rop (pie/hr)	p=Rop/RPM (pg/rev)	Torque (lbf . pg)	WOB (lb)	RPM	EEP Teale (Psi)
1	0	3.6	23.8	0.059	6060	1434	81	11443.61
2	3.6	6.3	61.5	0.1489	15660	2912	83	11752.15
3	6.3	9	85	0.2061	27804	4458	82	14928.49
4	9	10.7	27.5	0.0388	5832	1465	142	16698.11
5	10.7	13.3	87	0.1222	16032	2920	142	14538.47
6	13.3	16.3	122	0.1742	26328	4345	140	16803.19
7	16.3	20.8	68	0.0387	6552	1488	351	18750.03
8	20.8	23.9	126	0.0719	14004	2940	351	21649.68
9	23.9	26	96	0.0547	9408	2259	351	19083.69
10	26	28	18.6	0.0461	4956	1480	81	11974.92
11	28	28.9	29	0.0403	4644	1306	144	12789.72
12	28.9	31.2	131	0.0745	14124	2774	351	21000.41

Tabla A.6.- Pruebas de laboratorio de Arena, Barrena 2

Prueba 11

Barrena 8.5 Bna. 1 Lodo 12 lb/gal,  
Toberas 4) 11/32" 0.37 pg2 Formación Mármol

No de dato	Intervalo de:	Intervalo a (pg)	Rop (pie/hr)	p=Rop/RPM (pg/rev)	Torque (lb . pg)	WOB (lb)	RPM	EEP Teale (Psi)
1	0	2.2	2.6	0.0065	5700	3159	80	97154.42
2	2.2	3.4	7.1	0.0177	12036	6075	80	75189.08
3	3.4	4.8	13.3	0.0329	20544	9084	81	69429.34
4	4.8	5.2	4.2	0.0059	5172	3143	141	96183.51
5	5.2	6.2	11.4	0.0163	10560	6075	140	71904.54
6	6.2	8.3	21.2	0.0303	18624	9073	140	68250.51
7	8.3	9.5	12	0.0069	5076	3093	350	82019.90
8	9.5	11.1	27.9	0.0159	10800	6083	351	75329.88
9	11.1	13.5	48.5	0.0276	18132	9050	352	73016.06
10	13.5	15	9.1	0.0227	13416	6086	80	65404.33
11	15	16.5	14	0.0199	12528	6115	140	69466.93
12	16.5	18.5	26.8	0.0153	10848	6127	351	78766.20
13	18.5	19.8	15.3	0.0224	14184	6144	141	72476.60
14	19.8	21.1	12.9	0.0183	12240	6109	141	74176.06
15	21.1	22.7	12.3	0.0175	11712	6135	140	73911.47
16	22.7	24.1	11	0.0156	10920	6100	141	77602.06
17	24.1	24.5	3.6	0.009	6564	3098	80	80811.23
18	24.5	25.5	8.8	0.0216	13680	6134	81	69820.59
19	25.5	26.7	13.4	0.0337	22440	9110	80	74330.87
20	26.7	27.4	5	0.0071	5520	3116	141	86235.67
21	27.4	28.7	12.5	0.0178	12108	6109	140	75185.64
22	28.7	30.1	23	0.0327	19992	9096	141	68013.39
23	30.1	31.2	13.1	0.0075	5604	3137	350	82948.12
24	31.2	32.5	30	0.0171	11172	6046	350	72267.10

Tabla A.7.- Pruebas de laboratorio de Mármol, Barrena 1

Prueba16

**Barrena** 8.5 Bna. 1 **Lodo** 12 lb/gal,  
**Toberas** 4) 11/32" 0.37 pg2 **Formación** Mármol

No de dato	Intervalo de:	Intervalo a (pg)	Rop (pie/hr)	p=Rop/RPM (pg/rev)	Torque (lb . pg)	WOB (lb)	RPM	EEP Teale (Psi)
1	0	2.2	2.2		480		81	9784.21
2	2.2	3.3	7.7	0.019	12060	6146	81	70344.95
3	3.3	4.5	13.4	0.0333	18804	9187	80	62314.25
4	4.5	5.4	3	0.0043	3960		141	103042.21
5	5.4	6.9	11.2	0.0161	10488	6106	140	72688.92
6	6.9	8.5	20.2	0.0288	17904	9171	140	68860.37
7	8.5	9.6	9.4		4452		351	92035.75
8	9.6	11	19.2	0.011	8916	6149	350	90091.06
9	11	13.2	47.1	0.0269	17184	9174	351	71059.45
10	13.2	14.4	8.5	0.0209	13116	6139	81	69305.56
11	14.4	15.6	12.4	0.0177	11448	6109	140	71665.64
12	15.6	17.1	18.9	0.0108	9204	6129	351	94741.33
13	17.1	18.4	13.3	0.019	12600	6257	140	73539.51
14	18.4	19.7	10.2	0.0145	10584	6185	140	80535.62
15	19.7	20.9	11.8	0.0168	11220	6208	140	73808.30
16	20.9	21.9	9.9	0.0141	10200	6140	140	79965.60
17	21.9	22.3	2.9	0.0072	5256		81	81276.41
18	22.3	23.5	8.2	0.0203	12804	6145	81	70131.01
19	23.5	24.8	14.6	0.0365	21564	9180	80	65578.47
20	24.8	25.4	3.5		4368		141	97421.73

Tabla A.8.- Pruebas de laboratorio de Mármol, Barrena 2



		<p>PRESENTA SABOR SALADO,AL ROMPER LA MUESTRA NO DESPIDE OLOR A ACEITE O GAS                  EDAD: CRETÁCICO                  INFERIOR POR POSICIÓN ESTRATIGRÁFICA                  DESCRIBIO: ING. SERGIO JIMÉNEZ MAGANA</p>
<p>3311-                  3320                  NÚCLEO N°2                  COMPLEME                  NTO                  RECUPERACION 12.7%                  +- (1.4M)</p>	<p>PARTE SUPERIOR:                  DOLOMIA GRIS CLARO, MICROCRISTALINA, COMPACTA, DURA; CON FRACTURAS Y CAVIDADES DE DISOLUCIÓN RELLENAS POR CALCITA; SE OBSERVA REGULAR IMPREGNACIÓN DE HIDROCARBUROS, POROSIDAD SECUNDARIA INTERCRISTALINA, EN FRACTURAS Y CAVIDADES DE DISOLUCIÓN ± 6 %; TRAZAS DE LUTITA GRIS OSCURO A NEGRO SEMIDURA A DURA.                  PARTE INFERIOR:                  DOLOMIA GRIS CLARO, MICROCRISTALINA, COMPACTA, DURA; CON FRACTURAS SELLADAS POR CALCITA; POROSIDAD SECUNDARIA EN FRACTURAS ± 6%.</p>	<p>OBSERVACIONES:                  ESTADO DE LA MUESTRA MALO (FRACTURADO)                  POROSIDAD:INTERCRISTALINA,EN FRACTURAS Y MICROCAVIDADES DE DISOLUCIÓN                  IMPREGNACIÓN:REGULAR                  AR PARTE SUPERIOR                  FLUORESCENCIA: NO SE OBSERVA.                  ESTRATIFICACIÓN NO SE OBSERVA                  ECHADO. NO SE OBSERVA                  EL NÚCLEO SE RECUPERO EN FUNDA DE ALUMINIO,SE ANALIZARON FRAGMENTOS DE 7 A 10 CM.,NO PRESENTA SABOR SALADO,NO PRESENTA EXUDACIÓN,AL PARTIR LA MUESTRA DESPIDE OLOR A HIDROCARBUROS.                  EDAD:CRETÁCICO INFERIOR POR MARCA ELECTRICA                  DESCRIBIO: ING. SERGIO JIMÉNEZ MAGANA</p>

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

ESTA TESIS NO SALE DE LA BIBLIOTECA

<p>2973-2982 NÚCLEO N°1 RECUPERACIÓN 5% + (40-50CM)</p>	<p>MUDSTONE DOLOMITICO GRIS CLARO , MICROCRISTALINO Y COMPACTO, LIGERAMENTE ARCILLOSO, OCASIONALES FRACTURAS RELLENAS DE DOLOMITA, MUY POBRE IMPREGNACIÓN DE ACEITE EN FRACTURAS , POROSIDAD SECUNDARIA INTERCRISTALINA DE +/- 4% Y EN FRACTURAS DE +/- 2-3% , +/-10-20% DOLOMIA GRIS CLARO, MICROCRISTALINA Y POROSIDAD SECUNDARIA INTERCRISTALINA DE +/- 5% TRAZAS DE PEDERNAL NEGRO.</p>	<p>OBSERVACIONES: LA MUESTRA DESPIDE LEVE OLOR A GAS NO TIENE SABOR SALADO MUY POBRE IMPREGNACIÓN DE ACEITE EN FRACTURAS CON DOLOMITA NO SE OBSERVA BURBUJEO DE GAS AL LAVAR LA MUESTRA LA DESCRIPCIÓN SE REALIZO CON FRAGMENTOS MAYORES DE 8 CMS. EDAD PROBABLE KM.</p>
<p>2982- 2986 NÚCLEO N°1 COMPLETO RECUPERACIÓN 5% + (50CM)</p>	<p>DOLOMIA GRIS OSCURA, BLANCA Y GRIS CLARO, INTERCRISTALINA, EN PARTES ARCILLOSA, CON MUY POBRE IMPREGNACIÓN DE ACEITE, POROSIDAD SECUNDARIA INTERCRISTALINA DE +/- 5% . +/- 20% MUDSTONE DOLOMITIZADO, CLARO SUAVE A SEMIDURO Y POROSIDAD SECUNDARIA INTERCRISTALINA DE +/- 2% , Y 20% DE MUDSTONE BLANCO, SUAVE A SEMIDURO EN PARTES DE ASPECTO CRETOSO. TRAZAS DE FRAGMENTOS DE ASPECTO BRECHOIDE, CONSTITUIDOS DE FRAGMENTOS DE DOLOMIA CREMA GRIS OSCURO Y PEDERNAL NEGRO.</p>	
<p>3302- 3311 NÚCLEO N°2 RECUPERACIÓN 0.7% + (60CM)</p>	<p>PORTE SUPERIOR E INFERIOR: DOLIMIA GRIS CLARO MICROCRISTALINA COMPACTA, DURA CON ESCASAS FRACTURAS SELLADAS POR CALCITA Y EN OCASIONES POR ACEITE RESIDUAL POROSIDAD SECUNDARIA INTERCRISTALINA Y EN FRACTURAS ± 4-6 %.</p>	<p>OBSERVACIONES: ESTADO DE LA MUESTRA: MALO (FRACTURADO) POROSIDAD: INTERCRISTALINA Y EN FRACTURAS IMPREGNACIÓN. NO PRESENTA ESTRATIFICACIÓN. NO SE OBSERVA ECHADO: NO SE OBSERVA EL NÚCLEO SE RECUPERO EN FUNDA DE ALUMINIO, SE ANALIZARON FRAGMENTOS DE 7 A 10 CM., NO PRESENTA EXUDACIÓN, NO</p>

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

2595-2600	DE PEDERNAL TRANSLUCIDO MUDSTONE-WACKSTONE DE BIOCLASTOS E INTRACLASTOS, CREMA BLANCO Y CAFÉ CLARO, DURO, POROSIDAD EN FRACTURAS RELLENAS POR CALCITA $\pm$ 2-3 % SIN IMPREGNACIÓN DE ACEITE; 10-20 % DE LUTITA VERDE CLARO, SUAVE A SEMIDURA, LIGERAMENTE CALCAREA, BENTONITICA; FRAGMENTOS DE PEDERNAL TRANSLUCIDO.	
2600-2605	MUDSTONE-WACKSTONE DE BIOCLASTOS E INTRACLASTOS, CREMA BLANCO Y CAFÉ CLARO, DURO POROSIDAD EN FRACTURAS RELLENAS POR CALCITA $\pm$ 2-3 %; SIN IMPREGNACIÓN; DE 10-20 % MUDSTONE-WACKSTONE LIGERAMENTE DOLOMITIZADO, CAFÉ OSCURO, MICROCRISTALINO, POROSIDAD INTERCRISTALINA Y EN FRACTURAS $\pm$ 2-3 %; SIN IMPREGNACIÓN.	
2605-2615	MUDSTONE-WACKSTONE DE BIOCLASTOS E INTRACLASTOS, CREMA BLANCO Y CAFÉ CLARO, DURO POROSIDAD EN FRACTURAS RELLENAS POR CALCITA $\pm$ 2-3 % SIN IMPREGNACIÓN DE ACEITE; 20-30 % DE MUDSTONE-WACKSTONE LIGERAMENTE DOLOMITIZADO, CAFÉ OSCURO, MICROCRISTALINO, POROSIDAD INTERCRISTALINA Y EN FRACTURAS $\pm$ 2-3 % SIN IMPREGNACIÓN DE ACEITE; TRAZAS DE LUTITA GRIS VERDOSO Y VERDE CLARO, LIGERAMENTE CALCAREA, SEMIDURA.	
2615-2620	MUDSTONE-WACKSTONE DE BIOCLASTOS E INTRACLASTOS, CREMA BLANCO Y CAFÉ CLARO, DURO, POROSIDAD EN FRACTURAS RELLENAS POR CALCITA $\pm$ 2-3 % SIN IMPREGNACIÓN DE ACEITE; 40-50 % DE MUDSTONE-WACKSTONE LIGERAMENTE DOLOMITIZADO, CAFÉ OSCURO, MICROCRISTALINO, POROSIDAD INTERCRISTALINA Y EN FRACTURAS $\pm$ 2-3 %; SIN IMPREGNACIÓN DE ACEITE; TRAZAS DE LUTITA GRIS VERDOSO Y VERDE CLARO LIGERAMENTE, SEMIDURA.	
2620-2641	MUDSTONE-WACKSTONE DE BIOCLASTOS E INTRACLASTOS, CREMA BLANCO Y CAFÉ CLARO, LIGERAMENTE ARCILLOSO Y PARCIALMENTE DOLOMITIZADO, POROSIDAD INTERGRANULAR E INTERCRISTALINA DE $\pm$ 3 %; 20 %; DE WACKSTONE-PACKSTONE DE BIOCLASTOS E INTRACLASTOS CREMA CAFÉ, PARCIALMENTE DOLOMITICO, POROSIDAD INTERGRANULAR, INTERCRISTALINA Y EN FRACTURAS DE $\pm$ 6 %; ESPORÁDICOS FRAGMENTOS DE PEDERNAL GRIS AMBAR.	P.I.A 2626 M.
2641-2665	MUDSTONE-WACKSTONE BLANCO A CREMA DE LITOCLASTOS Y BIOCLASTOS SEMIDURA A DURA, POROSIDAD INTERGRANULAR DE $\pm$ 1-2 % 30 % WACKSTONE-PACKSTONE GRIS VERDOSO DE LITOCLASTOS Y BIOCLASTOS, LIGERAMENTE ARCILLOSO Y BENTONITICO, SEMIDURO A DURO Y POROSIDAD PRIMARIA INTERGRANULAR DE $\pm$ 3-4 %; $\pm$ 20% DE MUDSTONE-WACKSTONE CAFÉ CLARO A CAFÉ OSCURO, DOLOMITICO, SEMIDURO Y POROSIDAD INTERCRISTALINA DE 1-3%; $\pm$ 10 % DE LUTITA GRIS VERDOSO, CALCAREA Y BENTONITICA, SUAVE A SEMIDURA, TRAZAS DE FRAGMENTOS DE ASPECTO BRECHOIDE, CONSTITUIDOS DE MUDSTONE Y PACKSTONE CREMA, GRIS Y CAFÉ CLARO; TRAZAS DE BENTONITA GRIS Y BLANCA Y TRAZAS DE PIRITA.	
2665-2685	BRECHA SEDIMENTARIA DOLOMITIZADA, CONSTITUIDA DE EXOCLASTOS DE DOLOMIA CAFÉ CLARO A CAFÉ OSCURO Y CREMA, DE TEXTURA MICRO-MESOCRISTALINA Y POROSIDAD SECUNDARIA Y POROSIDAD SECUNDARIA INTERCRISTALINA DE $\pm$ 5-6 %, OCASIONALES MANCHAS DE ACEITE; 50 %, MUDSTONE-WACKSTONE BLANCO, CREMA Y CAFÉ CLARO, SEMIDURO A DURO, DE LITOCLASTOS A BIOCLASTOS POROSIDAD PRIMARIA INTERGRANULAR DE $\pm$ 1-2 %, TRAZAS DE WACKSTONE-PACKSTONE GRIS CLARO, TRAZAS DE BENTONITA GRIS, BLANCA Y PITRITA.	BTP-KS. A 2667 M.
2685-2695	BRECHA SEDIMENTARIA DOLOMITIZADA, CONSTITUIDA DE EXOCLASTOS DE DOLOMIA CAFÉ CLARO A CAFÉ OSCURO Y CREMA, DE TEXTURA MICRO-MESOCRISTALINA Y POROSIDAD SECUNDARIA Y POROSIDAD SECUNDARIA INTERCRISTALINA DE $\pm$ 5-6 %, OCASIONALES MANCHAS DE ACEITE; 50 %, MUDSTONE-WACKSTONE BLANCO, CREMA Y CAFÉ CLARO, SEMIDURO A DURO, DE LITOCLASTOS A BIOCLASTOS POROSIDAD PRIMARIA INTERGRANULAR DE $\pm$ 1-2 %, TRAZAS DE WACKSTONE-PACKSTONE GRIS CLARO, TRAZAS DE BENTONITA GRIS, BLANCA Y PITRITA.	
2695-2926	SIN RECUPERACION POR PERDIDA TOTAL DE CIRCULACION.	

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

	TRAZAS A 10 % DE LUTITA GRIS VERDOSO, SUAVE A SEMIDURA, BENTONITICA, LIGERAMENTE CALCAREA.	
2450-2465	WACKSTONE-PACKSTONE DE BIOCLASTOS, CREMA A CAFÉ, SEMIDURO POROSIDAD INTERGRANULAR Y EN OCASIONES EN FRACTURAS ± 4-5 % REGULAR IMPREGNACION DE ACEITE; TRAZAS A 10 % DE LUTITA GRIS VERDOSO, SUAVE A SEMIDURA, BENTONITICA, LIGERAMENTE CALCAREA.	
2465-2473	MUDSTONE CREMA, CRETOSO, SEMIDURA SIN POROSIDAD OBSERVABLE; 20 % DE WACKSTONE-PACKSTONE CREMA, EN PARTES CRETOSO, SEMIDURO EN PARTES CON IMPREGNACION DE ACEITE, POROSIDAD PRIMARIA INTERGRANULAR ± 4 % TRAZAS DE LUTITA GRIS VERDOSO, LIGERAMENTE CALCAREA, BENTONITICA, SEMIDURA; ESPORADICOS FRAGMENTOS DE PEDERNAL BIOGENO CAFÉ CLARO	
2473-2480	LUTITA GRIS VERDOSO, SUAVE A SEMIDURA, BENTONITICA, LIGERAMENTE CALCAREA TRAZAS A 10 % DE MUDSTONE CREMA, DE ASPECTO CRETOSO, NO SE OBSERVA POROSIDAD NI IMPREGNACION DE HIDROCARBUROS, ESPORADICOS FRAGMENTOS DE LUTITA GRIS OSCURO, SUAVE, LIGERAMENTE CALCAREA.	
2480-2490	LUTITA GRIS VERDOSO EN PARTES GRIS OSCURO, SUAVE, LIGERAMENTE CALCAREA TRAZAS DE MUDSTONE CREMA DESCRITO.	P.S. A 2490 M.
2490-2500	LUTITA GRIS OSCURO Y GRIS VERDOSO, SUAVE A SEMIDURA, LIGERAMENTE CALCAREA	
2500-2530	LUTITA GRIS VERDOSO, EN PARTES GRIS OSCURO, SEMIDURA, LIGERAMENTE CALCAREA. BENTONITICA, ESPORADICOS FRAGMENTOS DE MUDSTONE CREMA, ESPORADICOS FRAGMENTOS DE LUTITA CAFÉ.	
2530-2548	LUTITA GRIS VERDOSO EN PARTES GRIS OSCURO, SEMIDURA, LIGERAMENTE CALCAREA, EN PARTES BENTONITICO; ESPORADICOS FRAGMENTOS DE MUDSTONE CREMA; PIRITA DISEMINADA.	
2548-2549	MUDSTONE CREMA CLARO, SEMIDURA, NO SE OBSERVA POROSIDAD NI IMPREGNACION; 20-30 % DE LUTITA GRIS VERDOSO EN PARTES GRIS OSCURO, SEMIDURA, LIGERAMENTE CALCAREA, EN PARTES BENTONITICA; PIRITA DISEMINADA.	
2549-2550	MUDSTONE CREMA CLARO, SEMIDURO, NO SE OBSERVA POROSIDAD NI IMPREGNACION; 50 % DE LUTITA GRIS VERDOSO EN PARTES GRIS OSCURO, SEMIDURA LIGERAMENTE CALCAREA, EN PARTES BENTONITICA, PIRITA DISEMINADA.	
2550-2552	LUTITA GRIS VERDOSO Y CAFÉ LIGERAMENTE CALCAREA, BENTONITICA, SEMIDURA 20 % DE MUDSTONE-WACKSTONE CREMA DE BIOCLASTOS EN PARTES CRETOSO SEMIDURO	
2552-2555	10 % BENTONITA VERDE CLARO Y AZUL VERDOSO SUAVE. CEMENTO 100 % TRAZAS DE LUTITA GRIS VERDOSO, SEMIDURA, BENTONITA LIGERAMENTE CALCAREA; TRAZAS DE BENTONITA GRIS AZULOSO; TRAZAS DE MUDSTONE CREMA CLARO SEMIDURO.	
2555-2575	LUTITA GRIS VERDOSO Y VERDE CLARO, BENTONITICA, LIGERAMENTE CALCAREA, SUAVE A SEMIDURA; 30 % DE BENTONITA GRIS CLARO Y VERDE CLARO, SUAVE, 20 % MUDSTONE-WACKSTONE DE BIOCLASTOS E INTRACLASTOS CREMA Y CAFÉ CLARO SEMIDURO A DURO, POROSIDAD INTERGRANULAR ± 4 %; ESPORADICOS FRAGMENTOS DE PEDERNAL BIOGENO, AHUMADO Y CAFÉ CLARO.	
2575-2580	BENTONITA GRIS CLARO Y VERDE CLARO, SUAVE, 20 % MUDSTONE- WACKSTONE DE BIOCLASTOS E INTRACLASTOS, CREMA Y CAFÉ CLARO; SEMIDURO A DURO; POROSIDAD INTERGRANULAR ± 4 %; ESPORADICOS FRAGMENTOS DE PEDERNAL GRIS Y AMBAR.	
2585-2595	MUDSTONE-WACKSTONE EN OCASIONES PACKSTONE DE INTRACLASTOS, CREMA CLARO EN PARETES BLANCO; DURO, POROSIDAD EN FRACTURAS RELLENAS POR CALCITA Y EN OCASIONES POR ARCILLA ± 2-3 %; SIN IMPREGNACION DE ACEITE; 20-30 % LUTITA GRIS VERDOSO, SUAVE A SEMIDURO, BENTONITICA LIGERAMENTE; TRAZAS 10 % DE BENTONITA GRIS CLARO; FRAGMENTOS	

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

	GRANO FINO, SEMIDURA, CON CEMENTANTE CALCAREO Y MATRIZ ARCILLOSA, POROSIDAD PRIMARIA INTERGRANULAR $\pm 4-5\%$	
1900-1940	LUTITA GRIS CLARO, SEMIDURA A SUAVE, EN PARTES ARENOSA, CALCAREA; 10 % DE ARENISCA GRIS CLARO, DE GRANO FINO, SEMIDURA, MEDIANAMENTE CEMENTADA CON CEMENTANTE CALCAREO Y MATRIZ ARCILLOSA POROSIDAD PRIMARIA INTERGRANULAR $\pm 4\%$	O.S. A 1920 M.
1940-1970	LUTITA GRIS CLARO DESCRITA TRAZAS DE ARENISCA GRIS CLARO DESCRITA	O.M. A 1950 M.
1970-2030	LUTITA GRIS CLARO, SEMIDURA A SUAVE, EN PARTES ARENOSA, CALCAREA, TRAZAS DE ARENISCA GRIS CLARO DE GRANO FINO, MEDIANAMENTE CEMENTADA, SEMIDURA CON CEMENTANTE CALCAREO Y MATRIZ ARCILLOSA, POROSIDAD PRIMARIA INTERGRANULAR $\pm 4\%$	
2030-2050	LUTITA GRIS CLARO, ARENOSA, CALCAREA, SEMIDURA; TRAZAS DE ARENISCA GRIS CLARO SEMIDURA	
2050-2112	LUTITA GRIS CLARO, LIGERAMENTE CALCAREA, LIMOLITICA, SEMIDURA	
2112-2120	LUTITA GRIS CLARO, SEMIDURA EN PARTES ARENOSA, CALCAREA, LIMOLITICA, CON PELLAS DE GLAUCONITA VERDE DISEMINADA	
2120-2180	LUTITA GRIS CLARO Y CAFÉ, EN PARTES ARENOSA, CALCAREA; TRAZAS DE ARENISCA GRIS CLARO DE GRANO FINO, MEDIANAMENTE CEMENTADA, SEMIDURA CON CEMENTANTE CALCAREO Y MATRIZ ARCILLOSA	O.I. A 2130 M.
2180-2214	LUTITA GRIS CLARO Y CAFÉ SEMIDURA, EN PARTES ARENOSA, CALCAREA; TRAZAS DE ARENISCA GRIS CLARO DE GRANO FINO, MEDIANAMENTE CEMENTADA, SEMIDURA CON CEMENTANTE CALCAREO Y MATRIZ ARCILLOSA	
2214-2265	LUTITA GRIS CLARO Y CAFÉ CLARO, SEMIDURA, LIGERAMENTE CALCAREA, LIMOLITICA Y BENTONITICA, TRAZAS DE MUDSTONE CREMA Y GRIS ARCILLOSO, SEMIDURO.	E.S. A 2213 M.
2265-2330	LUTITA GRIS CLARO, CAFÉ CLARO, SEMIDURA, CALCAREA; TRAZAS DE MUDSTONE BLANCO, ARCILLOSO, SEMIDURO DE BIOCLASTOS SIN POROSIDAD OBSERVABLE	E.M. A 2300 M.
2330-2350	LUTITA GRIS CLARO, CAFÉ CLARO SEMIDURA, LIGERAMENTE CALCAREA, BENTONITICA. 10 % DE MUDSTONE BLANCO ARCILLOSO, SEMIDURO DE BIOCLASTOS, CON POROSIDAD SECUNDARIA INTERCISTALINA Y POR FRACTURAS DE $\pm 3\%$	
2350-2370	LUTITA GRIS CLARO, CAFÉ CLARO Y GRIS VERDOSO, SEMIDURA, LIGERAMENTE CALCAREA, BENTONITICA. 30-40 % DE MUDSTONE BLANCO, ARCILLOSO, SEMIDURO DE BIOCLASTOS, CON POROSIDAD SECUNDARIA INTERCISTALINA Y POR FRACTURAS DE $\pm 3\%$	
2370-2380	LUTITA GRIS CLARO Y GRIS OSCURO; SEMIDURA, LIGERAMENTE CALCAREA; 30 % DE MUDSTONE CREMA CRETOSO, EN PARTES LIGERAMENTE ARCILLOSO, SIN POROSIDAD OBSERVABLE; TRAZAS DE LUTITA CAFÉ, CALCAREA, SEMIDURA.	
2380-2400	LUTITA GRIS CLARO Y GRIS OSCURO, LIGERAMENTE CALCAREA, BENTONITICA SEMIDURA; 20 % DE MUDSTONE CREMA CRETOSO, CON POROSIDAD EN MICROFRACTURAS DE $\pm 2\%$ ; TRAZAS DE LUTITA CAFÉ	
2400-2420	LUTITA GRIS CLARO Y GRIS VERDOSO, LIGERAMENTE CALCAREA SEMIDURA; 10 % A TRAZAS DE MUDSTONE CREMA CRETOSO, SIN POROSIDAD OBSERVABLE; ESPORÁDICOS FRAGMENTOS DE WACKSTONE GRIS Y CAFÉ CLARO DE BIOCLASTOS; FRAGMENTOS DE LUTITA CAFÉ.	E.I. A 2420 M.
2420-2430	WACKSTONE-PAKSTONE DE BIOCLASTOS, CREMA A CAFÉ SEMIDURO, POROSIDAD INTERGRANULAR Y EN OCASIONES FRACTURAS $\pm 4-5\%$ ; REGULAR IMPREGNACION DE ACEITE; TRAZAS DE 10-20 % DE LUTITA GRIS VERDOSO, SUAVE A SEMIDURA, BENTONITICA, LIGERAMENTE CALCAREA.	
2430-2450	WACKSTONE-PACKSTONE DE BIOCLASTOS, CREMA A CAFÉ, SEMIDURO POROSIDAD INTERGRANULAR Y EN OCASIONES EN FRACTURAS $\pm 4-5\%$ ; REGULAR IMPREGNACION DE ACEITE;	

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

REPORTE LITOLÓGICO DEL POZO CANTARELL 3006 D AKAL KL

PROFUNDID AD (M)	DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA	OBSERVACIONES
820-840	LUTITA GRIS VERDOSO A CLARO SEMIDURA EN PARTES ARENOSA, LIGERAMENTE CALCAREA, TRAZAS DE ARENISCA GRIS CLARO DE GRANO FINO, SEMIDURA MAL CEMENTADA CON MATRIZ ARCILLOSA Y CEMENTANTE CALCAREO, CON POROSIDAD PRIMARIA INTERGRANULAR DE ± 3 %	M.S. A 810 M.
840-920	LUTITA GRIS CLARO DESCRITA; TRAZAS DE ARENISCA GRIS CLARO DESCRITA.	
920-960	LUTITA GRIS VERDOSO CLARA SEMIDURA, SUAVE EN PARTES ARENOSA, CALCAREA; TRAZAS DE ARENISCA GRIS CLARO DE GRANO FINO, SEMIDURA MAL CEMENTADA EN MATRIZ ARCILLOSA Y CEMENTANTE CALCAREO, CON POROSIDAD INTERGRANULAR DE ± 3 %	M.S. A 810 M.
960-1040	LUTITA GRIS VERDOSO Y GRIS CLARO, SEMIDURA A SUAVE EN PARTES ARENOSA, CALCAREA, TRAZAS DE MUDSTONE BLANCO SEMIDURO DE BIOCLASTOS CON POROSIDAD OBSERVABLE.	
1040-1100	LUTITA GRIS VERDOSO Y GRIS CLARO, SEMIDURA A SUAVE EN PARTES ARENOSA, CALCAREA	M.S. A 810 M.
1100-1350	LUTITA GRIS VERDOSO Y GRIS CLARO, SEMIDURA Y SUAVE, EN PARTES ARENOSA, CALCAREA, CON ESPORADICOS FRAGMENTOS DE MUDSTONE BLANCO, DE BIOCLASTOS, SIN POROSIDAD OBSERVABLE	M.M. A 1440 M.
1350-1460	LUTITA GRIS VERDOSO Y GRIS CLARO, SEMIDURA Y SUAVE, CALCAREA, CON ESPORADICOS FRAGMENTOS DE MUDSTONE BLANCO, SEMIDURO SIN POROSIDAD OBSERVABLE.	
1460-1620	LUTITA GRIS VERDOSO Y GRIS LIGERAMENTE CLARO, SEMIDURA A SUAVE EN PARTES ARENOSA, CALCAREA.	M.I. A 1550 M.
1620-1650	LUTITA GRIS VERDOSO Y GRIS LIGERAMENTE CLARO. SEMIDURA A SUAVE, EN PARTES CON ESPORADICOS FRAGMENTOS DE MUDSTONE BLANCO, SEMIDURO SIN POROSIDAD OBSERVABLE	
1650-1680	LUTITA GRIS CLARO, CALCAREA Y ARENOSA, SEMIDURA; TRAZAS DE ARENISCA GRIS CLARO, SEMIDURA DE GRANO FINO; TRAZAS DE MUDSTONE CREMA Y BLANCO, CRETOSO; TRAZAS DE MUDSTONE ARCILLOSO CAFÉ CLARO EN PARTES DOLOMITIZADO, DURO.	M.I. A 1550 M.
1680-1750	LUTITA GRIS CLARO, SEMIDURA, EN PARTES ARENOSA, CALCAREA; ESPORADICOS DE ARENISCA GRIS CLARO, SEMIDURA DE GRANO FINO.	
1750-1790	LUTITA GRIS CLARO, SEMIDURA ARENOSA, CALCARA; TRAZAS DE ARENISCA GRIS CLARO, DE GRANO FINO, SEMIDURA.	M.I. A 1550 M.
1790-1830	LUTITA GRIS CLARO, SEMIDURA A SUAVE, EN PARTES ARENOSA, CALCAREA, CON ESPORADICOS FRAGMENTOS DE ARENISCA GRIS CLARO DE GRANO FINO.	
1830-1841	LUTITA GRIS CLARO, SEMIDURA, ARENOSA, CALCAREA, TRAZAS DE ARENISCA, GRIS CLARO DE GRANO FINO. SEMIDURA, LIGERAMENTE CALCAREA, MATRIZ ARCILLOSA, POROSIDAD PRIMARIA INTERGRANULAR ± 4-5 %	
1841-1850	LUTITA GRIS CLARO, SEMIDURA, ARENOSA, CALCAREA: 10 % DE ARENISCA GRIS CLARO DE GRANO FINO DE CUARZO SUBREDONDEADO, CON CEMENTANTE CALCAREO Y MATRIZ ARCILLOSA, POROSIDAD PRIMARIA INTERGRANULAR ± 4-5 % TRAZAS DE MUDSTONE ARCILLOSO CAFÉ CLARO, DURO, DOLOMITIZADO.	M.I. A 1550 M.
1850-1880	LUTITA GRIS CLARO, SEMIDURA A SUAVE, EN PARTES ARENOSA, CALCAREA: 10 % ARENISCA GRIS CLARO, DE GRANO FINO, SEMIDURA, CON CEMENTANTE CALCAREO Y MATRIZ ARCILLOSA, POROSIDAD PRIMARIA INTERGRANULAR. ± 4 %.	
1880-1900	LUTITA GRIS CLARO, SEMIDURA, ARENOSA, CALCAREA; TRAZAS DE ARENISCA GRIS CLARO, DE	

TESIS CON FALLA DE ORIGEN