

## Estudio geomecánico del eoceno del alto de Ceuta y área 2 norte, bloque VII del Lago de Maracaibo, Venezuela

## Geomechanical study of upper eocene of north Ceuta and area 2, block VII of Lake Maracaibo, Venezuela

Peña, Anggie\*<sup>1</sup>; Peñuela, Mariliana<sup>2</sup>; Lobo, Carlos<sup>3</sup>; Belandria, Norly<sup>4</sup>; Bongiorno, Francisco<sup>4</sup>.

<sup>1</sup> Instituto Autónomo Municipal de Protección Civil y Ambiente de Chacao (IPCA)

<sup>2</sup> Ministerio del Ambiente, Dirección General de Vigilancia y Control Ambiental

<sup>3</sup> Departamento de Estudios Integrados PDVSA Occidente, Maracaibo

<sup>4</sup> Grupo de Investigación en Geología Aplicada (GIGA),

Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes.

anggie\_p2@hotmail.com\*

### Resumen

*Este trabajo de investigación tiene como objetivo estudiar geomecánicamente el eoceno del alto de Ceuta y área 2 norte, bloque VII del Lago de Maracaibo. Para llevarlo a cabo, se caracteriza la resistencia mecánica de las arenas "B" y arenas "C" de la Formación Misoa, se establece una relación entre la resistencia a la compresión efectiva, la presión de poros del yacimiento y la caída de presión crítica, se calculan las resistencias a la compresión efectiva por los criterios de rotura: Mohr-Coulomb y Hoek-Brown, se calcula la magnitud del esfuerzo horizontal máximo por tres metodologías: Barton-Zoback en base a los anchos de las grietas por compresión en el hoyo (breakouts) inducido durante la perforación, teoría de falla por fricción y contraste de anisotropía acimutal de la onda de corte "S". Como resultados se obtuvo que las arenas "B" (B4 – B6) presentan mayor resistencia que las arenas "C" (C1 – C4), el gradiente del esfuerzo horizontal máximo más representativo es de 1,42 lpc/pie por la metodología de Barton-Zoback, el criterio de Mohr-Coulomb presenta resultados más optimistas que el criterio de rotura de Hoek-Brown. El gradiente del esfuerzo vertical de sobrecarga es de 1,01 lpc/pie, el gradiente del esfuerzo horizontal mínimo se estimó en 1,08 lpc/pie y el gradiente de fractura se estimó en 1,15 lpc/pie. Se observó que la magnitud de los esfuerzos efectivos actuantes varía con la presión de poros del yacimiento. Dentro del campo Ceuta, la dirección del esfuerzo horizontal máximo ( $\sigma_{Hmax}$ ) para las arenas "B" y "C" de la Formación Misoa es noroeste – sureste (NO-SE). Según la clasificación de los regímenes tectónicos de Anderson (1951), el régimen tectónico imperante en el eoceno del campo Ceuta se encuentra entre "inverso" y "transcurrente". Los datos obtenidos en este estudio servirán para ejecutar un modelo de estabilidad de hoyos, predicción y control de arenamiento, y la planificación de próximas actividades operacionales dentro del campo Ceuta.*

**Palabras clave:** Geomecánico, esfuerzos, resistencia, tectónico

### Abstract

*This research aims to study the geomechanics of the Eocene in the upper Ceuta and northern area 2, block VII of Lake Maracaibo. In order to do this, the mechanical strength of the "B" and "C" sands from the Eocene Misoa Formation is characterized, a relation is established between the effective compressive strength (UCS), the reservoir pore pressure and the critical drawdown, the resistances to the effective compression by the rupture criteria: Mohr-Coulomb and Hoek-Brown are calculated, the magnitude of the maximum horizontal stress is calculated using three methodologies: Barton-Zoback, based on the widths of breakouts, theory of faulting by friction and azimuthal anisotropy contrast of the "S" shear wave. As results it was obtained that the "B" sands (B4 – B6) present greater resistance than the "C" sands (C1 – C4), the most representative maximum horizontal stress gradient is of 1.42 psi / ft using the Barton-Zoback methodology, the Mohr-Coulomb presented more optimistic results than the Hoek-Brown failure criterion. The vertical stress overload gradient is of 1.01 psi / ft, the minimum horizontal stress gradient was estimated at 1.08 psi / ft and the fracture gradient was estimated at 1.15 psi / ft. It was observed that the magnitude of the acting effective stresses varies with the reservoir pore pressure. Within the Ceuta field, the maximum horizontal stress direction for the "B" and "C" sands from the Misoa Formation is northwest – southeast (NW-SE). According to the classification of the Anderson tectonic regimes (1951), the tectonic regime prevailing*

in the Ceuta field Eocene is between “inverse” and “transcurrent”. The data obtained in this study will be used to execute a model about stability of holes, sanding prediction and control, and future planning of the next operational activities within the Ceuta field.

**Keywords:** Geomechanical, stresses, strength, tectonic

## 1 Introducción

El campo Ceuta fue descubierto por Mene Grande Oil Company, en Abril de 1956, con el pozo 75-Z-1 o Ceuta-1. Después de 1957 tres empresas más perforaban en el área y el campo creció rápidamente hacia el norte y al este (Lobo, C. et al., 2010). La representación del yacimiento es el modelo estático, el cual está conformado por cinco modelos interdependientes: estructural, estratigráfico, sedimentológico, petrofísico y de fluidos-presiones. De su calidad depende el grado de incertidumbre que se maneje. Si los modelos son de alta calidad, la incertidumbre que se manejará será baja (Lobo, C. et al., 2010). Sin embargo, se ha comprobado que los modelos estáticos por sí solos no son suficientes para caracterizar todo el comportamiento que presentan los yacimientos, como es el caso del comportamiento mecánico y los elementos que en él intervienen: esfuerzos, deformaciones, resistencia y variación de propiedades elásticas de las rocas. Para poder analizar el comportamiento mecánico del yacimiento deben realizarse estudios geomecánicos, por medio de los cuales se tratan de reproducir todos o la mayoría de los elementos mencionados. La presente investigación tiene por objetivo realizar un estudio geomecánico del eoceno alto de Ceuta y área 2 norte, bloque VII del Lago de Maracaibo, tomando como referencia el modelo estático disponible.

## 2 . Materiales y Métodos

### 2.1 Caracterización de la resistencia mecánica de la roca en base a datos de núcleos

La caracterización de la resistencia de la roca se refiere a la determinación de los parámetros de resistencia a la compresión simple (UCS), cohesión ( $\tau_0$ ), fricción ( $\mu$ ), tracción ( $T_0$ ), y parámetros “ $m_i$ ” y “ $s$ ”, los cuales se obtienen a partir de ensayos geomecánicos de núcleos (UCS, RSD, triaxiales, tensión indirecta, compresibilidad, entre otros).

#### 2.1.1 Ensayo de resistencia a la compresión simple

El ensayo permite determinar en laboratorio la resistencia no confinada de la roca, mediante el cual la muestra es sometida a un aumento de carga de compresión axial sin soporte lateral hasta producir su rotura. La ecuación (1), muestra la relación esfuerzo, fuerza y área. (Vázquez, 2001).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

#### 1.2 Ensayo de tracción indirecta

El ensayo consistió en aplicar una carga vertical compresiva sobre el tapón de roca colocado horizontalmente entre dos placas, por medio de las cuales se transmitió la carga hasta alcanzar la rotura. Mediante la ecuación (2) se obtiene la resistencia a la tracción. (González de V. et al., 2002)

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi DL} \quad (2)$$

#### 2.1.3 Cohesión y fricción de la roca

La cohesión y fricción de la roca se determina mediante el análisis de envolventes de fallas elaboradas por medio del criterio de falla de Mohr-Coulomb.

#### 2.1.4 Estimación de parámetros “ $m_i$ ” y “ $s$ ” de la roca

En el programa Roclab se introducen valores de las envolventes de falla propuestas para calcular los parámetros “ $m_i$ ”.

#### 2.1.5 Determinación de las propiedades elásticas

Se calcularon perfiles del módulo de young dinámico (Ed) y coeficiente de poisson dinámico ( $\nu_d$ ) para las rocas del eoceno, a través de registros de densidad y sínicos convencionales y dipolares. Con la ecuación (3) y (4) se obtiene el coeficiente de poisson y el modulo de young dinámico a partir de los tiempos de tránsito (Maury y Seger, 2008).

$$\nu_d = \frac{(\Delta_{ts}/\Delta_{tp})^2 - 2}{(\Delta_{ts}/\Delta_{tp})^2 - 2} \cdot 1,34 \cdot 10^{10} \quad (3)$$

$$E_d = \frac{\rho}{\Delta_{ts}^2} \cdot \left( \frac{3\Delta_{ts}^2 - 4\Delta_{tc}}{\Delta_{ts}^2 - \Delta_{tc}^2} \right) \cdot 1,34 \cdot 10^{10} \quad (4)$$

#### 2.2 Perfiles de resistencia mecánica

Se calcularon perfiles de resistencia mecánica (UCS) con la aplicación Geolog, para las rocas del eoceno, me-

diante 6 ecuaciones de modelos preestablecidos a una región del mundo (tabla 1), que son dependientes del tiempo de tránsito de la onda "P" (DTC) y la densidad de la roca (RHOB).

Para optimizar la data se calibraron para el eoceno "B" y "C" cada modelo de UCS, comparando las medianas o promedios ponderados de los valores de UCS de los ensayos (reales) con los valores de UCS que generaban los 6 modelos de UCS considerados. De esta forma cada una de las ecuaciones está adaptada al campo Ceuta. Cada campo petrolero posee un comportamiento característico por lo que es necesario calibrar las ecuaciones a usar.

Tabla 1. Modelos para calcular perfiles de UCS para areniscas. Fuente: GeoMechanics, International (2009)

No.	REGION DEL MODELO / AUTOR	ECUACION DEL PERFIL DE UCS ORIGINAL (MPa)
A	Alaska / Moss y otros (1999)	$1.745 \cdot 10^{-9} \cdot \rho \cdot Vp^2 - 21$
B	Australia / No Publicado.	$42.1 \cdot \exp(1.9 \cdot 10^{-11} \cdot \rho \cdot Vp^2)$
C	Bowen Basin Australia / McNally (1987).	$1200 \exp(-0.036 \cdot \Delta t)$
D	Germany / Freyburg (1972)	$0.035 \cdot Vp - 31.5$
E	Golfo Pérsico (GULF) / No Publicado.	$1.4138 \cdot 10^7 \cdot \Delta t^{-3}$
F	Golfo de México (GOM) / No Publicado	$3.87 \cdot \exp(1.14 \cdot 10^{-10} \cdot \rho \cdot Vp^2)$

### 2.3 Cálculo de la caída de presión crítica de las rocas del eoceno

La caída de presión crítica ( $\Delta P_c$ ) se calculó por el método de Shell – Veeken (1991). Este método establece un límite optimista (zona superior) y un límite conservador (zona inferior) calculado a partir del tiempo de tránsito de la onda compresional "P" como se observa en las siguientes ecuaciones:

- a) Zona superior para cálculo de la caída de presión crítica por el método de Shell-Veeken, (Vásquez 2001)

$$\Delta P_c = 11910 - 108 \Delta_{tp} \tag{5}$$

- b) Zona inferior para cálculo de la caída de presión crítica por el método de Shell-Veeken, Vásquez (2001).

$$\Delta P_c = 10344 - 108 \Delta_{tp} \tag{6}$$

### 2.4 Determinación del esfuerzo vertical de sobrecarga

Con el registro de densidad (RHOB) se procedió a cal-

cular el esfuerzo vertical de sobrecarga ( $\sigma_v$ ) a cada pozo con la aplicación Geolog, la cual tiene algoritmos definidos para el cálculo de la sobrecarga ( $\sigma_v$ ) por medio de la ecuación (7), (Vásquez, 2001).

$$\sigma_v = \sum \rho g \Delta z \tag{7}$$

### 2.5 Cálculo del gradiente de presión de poros

El gradiente de presión de poros (PP) se calculó a través del software Drillworks Predict usando como registros de entrada: el perfil de rayos gamma (GR), tiempo de tránsito de la onda de compresión "P" (DT ó DTC), densidad (RHOB) y resistividad (RES).

### 2.6 Determinación de la magnitud del esfuerzo horizontal mínimo y gradiente de fractura

Se estimaron los gradientes a través de las siguientes pruebas:

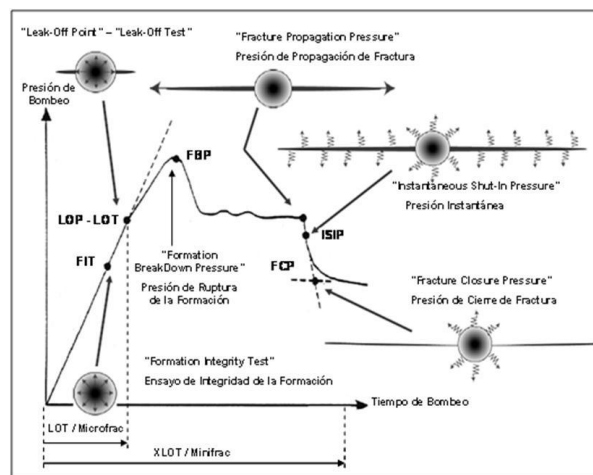


Fig. 1. Elementos de una prueba XLOT y de una fractura hidráulica. Modificado de: GeoMechanics, International (2009)

- Pruebas por fractura hidráulica (DataFrac).
- Pruebas por integridad del hoyo (MicroFrac).

Los resultados de estas pruebas son representados en la figura (1) de presión vs tiempo de bombeo el cual permite interpretar el gradiente de la presión de cierre de la formación (Formation Closure Pressure) que representa el gradiente del esfuerzo principal menor ( $\sigma_3$ ) ó esfuerzo horizontal mínimo ( $\sigma_{hmin}$ ), el valor de presión de cierre instantánea o ISIP (Instantaneous Shut-In Pressure) se considera el gradiente de fractura (FG).

### 2.7 Cálculo de la resistencia a la compresión efectiva de la roca del eoceno

Para las arenas "B" y "C" del eoceno se utilizaron los crite-

rios de rotura de Mohr-Coulomb y Hoek-Brown. Mediante el criterio de rotura de Mohr-Coulomb se calculó la resistencia a la compresión efectiva a través de la ecuación (8), (GeoMechanics, International, 2009), en la cual intervienen como variables de entrada la fricción ( $\mu$ ) calculada a partir de núcleos y la estimada por regresión lineal, el perfil de UCS del modelo Alaska ajustado, el esfuerzo vertical de sobrecarga ( $\sigma_v$ ), la presión de poros máxima y mínima ( $PP_{max}$  y  $PP_{min}$ ).

$$\sigma_1' = \left( \sqrt{\mu^2 + 1} + \mu \right)^2 (\sigma_3 - PP) + UCS \quad (8)$$

Con el criterio de rotura de Hoek-Brown (ecuación 9) se utilizaron como variables de entrada los valores obtenidos de ensayos triaxiales  $\sigma_1$  (esfuerzo principal mayor) y  $\sigma_3$  (esfuerzo principal menor), la sobrecarga ( $\sigma_v$ ), el perfil de UCS del modelo Alaska ajustado y la presión de poros (máxima y mínima), (GeoMechanics, International 2009).

$$\sigma_1' = \sigma_3 - PP + UCS \sqrt{m \frac{(\sigma_3 - PP)}{UCS} + s} \quad (9)$$

### 2.8 Estimación de la Magnitud del Gradiente del Esfuerzo Horizontal Máximo

La magnitud del gradiente del esfuerzo horizontal máximo ( $\sigma_{Hmax}$ ) se estimó por la teoría de falla por fricción, el método del ancho de las grietas por compresión en el hoyo (breakouts) y por anisotropía acústica.

a) Método del ancho de las grietas por compresión en el hoyo (metodología de Barton-Zoback)

Se mide el ancho de las grietas por compresión en el hoyo y se calcula el ángulo conjugado por medio de la ecuación (10), (GeoMechanics, International 2009).

$$\theta_b = 90^\circ - \left( \frac{1}{2} \phi_b \right) \quad (10)$$

Luego se procede a calcular la magnitud del gradiente del esfuerzo horizontal máximo ( $\sigma_{Hmax}$ ) con la ecuación (11), (GeoMechanics, International 2009).

$$\sigma_{Hmax} = \frac{(\sigma_1 + 2PP) - \sigma_v [1 + 2\cos(2\theta_b)]}{[1 - 2\cos(2\theta_b)]} \quad (11)$$

b) Teoría de falla por fricción

Se hizo un acotamiento de la magnitud del gradiente del esfuerzo horizontal máximo ( $\sigma_{Hmax}$ ), haciendo uso de la ecuación (12) cuyas variables de entrada son la fricción ( $\mu$ ), el esfuerzo vertical de sobrecarga ( $\sigma_v$ ) y la presión de poros (PP). Cabe destacar que esta teoría es de mucha utilidad en

aquellos pozos que carecen de registros de imágenes, (GeoMechanics, International 2009).

$$\sigma_{Hmax} \leq \left( \sqrt{\mu^2 + 1} + \mu \right)^2 (\sigma_v - PP) + PP \quad (12)$$

c) Anisotropía acústica

Como variable de entrada se utilizó el esfuerzo horizontal mínimo ( $\sigma_{hmin}$ ) y el porcentaje de anisotropía acústica (PAA). Por medio de la siguiente ecuación se calculó la magnitud del gradiente del esfuerzo horizontal máximo ( $\sigma_{Hmax}$ ), (GeoMechanics, International 2009).

$$\sigma_{Hmax} = PAA \cdot \sigma_{hmin} \quad (13)$$

### 2.9 Determinación de la dirección de los esfuerzos horizontales máximo y mínimo

La dirección de los esfuerzos horizontales máximo ( $\sigma_{Hmax}$ ), y mínimo ( $\sigma_{hmin}$ ) se estimó a través del análisis de los registros de imágenes, de ovalización orientados, de ensayos ASR (Anelastic Strength Recovery) y de sónicos dipolares cruzados y radiales. Por medio del análisis de los registros de imágenes acústicas y resistivas se identificó la dirección y ancho de las grietas por compresión en el hoyo. La dirección de las grietas por compresión en el hoyo (breakouts) corresponde al esfuerzo horizontal mínimo ( $\sigma_{hmin}$ ) y perpendicular al mismo se ubica la dirección del esfuerzo horizontal máximo ( $\sigma_{Hmax}$ ). En el análisis de anisotropía acimutal o acústica de sónicos dipolares cruzados y radiales, la dirección de la onda "S" rápida corresponde al esfuerzo horizontal máximo ( $\sigma_{Hmax}$ ), mientras que la dirección de la onda "S" lenta corresponde al esfuerzo horizontal mínimo ( $\sigma_{hmin}$ ). En los ensayos ASR (Anelastic Strength Recovery) se identifica la dirección de las contracciones anelásticas del núcleo, las cuales representan la dirección del esfuerzo horizontal máximo ( $\sigma_{Hmax}$ ) y perpendicular a este se encuentra la dirección del esfuerzo horizontal mínimo ( $\sigma_{hmin}$ ).

## 3 Resultados

### 2.1 Caracterización de la resistencia mecánica de la roca en base a datos de núcleos

Los valores de resistencia a la compresión simple presentan medianas variables en las unidades muestreadas, resultando que las areniscas más resistentes corresponden a las unidades B4 y B6 de las arenas "B" y la unidad C5 de las arenas "C", mientras que las areniscas menos resistentes corresponden a las unidades C1 a C4 de las arenas "C". De igual manera la cohesión para las arenas "B" (B4 - B6) presenta un valor mediana de 2.160 lpc, mientras que para las

arenas "C" (C1 – C4) presenta valores mediana entre 1.100 lpc – 2.080 lpc. La fricción para las arenas "B" (B4 – B6) presenta un valor mediana de 0,53° y para las arenas "C" (C1 – C4) presenta valores medianas entre 0,75° – 1,37°.

El valor del parámetro "s" se consideró igual a "I", es decir, sin fracturas ni heterogeneidades, ya que la calidad del macizo de acuerdo al GSI no se pudo medir. Los resultados indican que el parámetro "mi" presenta una mediana de 6,7 en las arenas "B" (B4 – B4) y que en las arenas "C" (C1 – C4) presenta valores más altos y de mayor variabilidad, entre 13,4 – 50,0. Esto pudiera ser un indicio de alta heterogeneidad en las propiedades mecánicas de dicho intervalo.

El rango de medianas del coeficiente de poisson dinámico, se encuentra entre 0,19 y 0,29. Mientras que el rango de medianas del módulo de young dinámico se encuentra entre  $1,62 \times 10^6$  PSI y  $4,45 \times 10^6$  PSI, que corresponden con valores típicos de areniscas consolidadas

### 3.2 Perfiles de resistencia a la compresión simple

De los 6 modelos de resistencia a la compresión simple (UCS) aplicados a nivel mundial, la ecuación de mayor ajuste para los intervalos arenas "B" y arenas "C" de la Formación Misoa, fue la generada por Moos y otros (1999) en la región de Alaska, con un error de 16,18% y 7,89% respectivamente, seguido de ello, el que proporcionó resultados más optimistas fue el "B" (Australia) y el que proporcionó resultados más pesimistas fue el "E" (GULF).

En vista de los resultados obtenidos, se recomienda utilizar los modelos calibrados "A", "B", "C", "D", y "E" en ese orden de prioridad, más no el modelo "F" (GOM) debido a que este presentó el mayor margen de error con respecto a los datos reales de UCS del campo Ceuta.

### 3.3 Cálculo de la caída de presión crítica

La ecuación de Shell-Veecken que mejor calibró para las arenas "B" (B1 – B6) de la Formación Misoa fue la del límite optimista, obteniéndose valores entre 1759 y 3868 lpc, mientras que para las arenas "C" (C1 – C4) resultó la del límite conservador, con la cual se obtuvieron valores comprendidos entre 1009 y 2835 lpc.

### 3.4 Cálculo del esfuerzo vertical de sobrecarga

La figura 2 representa gráficamente los resultados de los cálculos de los gradientes del esfuerzo de sobrecarga en los pozos del área de estudio.

El presente gráfico evidencia que el esfuerzo vertical de sobrecarga va aumentando progresivamente con la profundidad, siendo bastante similar a las mismas profundidades para los diferentes pozos. A la profundidad de 8.000 pies, el gradiente de sobrecarga es de 0,9518 lpc/pie, mientras que a 16.000 pies es de 1,013 lpc/pie. Estos resultados confirman las investigaciones realizadas por Hoek y Brown,

1980; en Almeida y Cornelis, 2010 donde indican que a profundidades mayores de 10.000 pies, en la mayoría de las regiones a nivel mundial, el gradiente del esfuerzo vertical de sobrecarga está entre 0,90 lpc/pie y 1,10 lpc/pie.

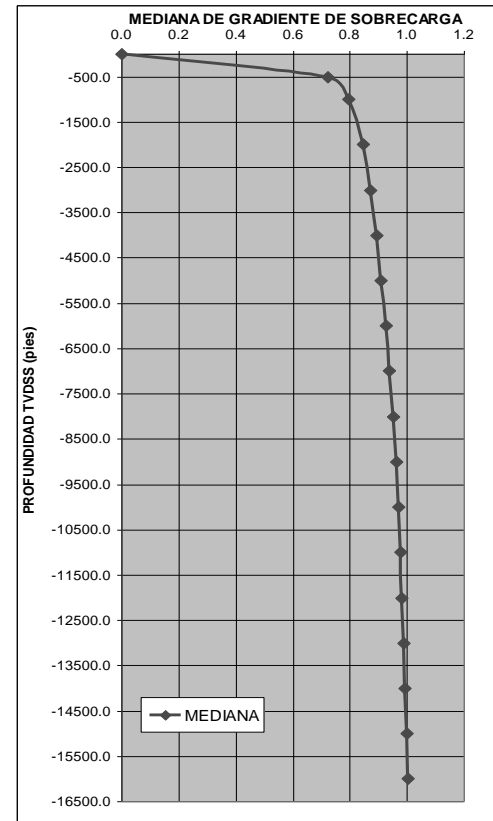


Fig. 2. Representación gráfica del gradiente de sobrecarga para el campo Ceuta. Fuente: Los autores (2011)

### 3.5 Resultados del gradiente de presión de poros

En base a los resultados obtenidos, puede afirmarse que toda la secuencia del mioceno – plioceno en el campo Ceuta, desde la superficie hasta el tope de la Formación La Rosa, está sometida a una presión de poros normal (presión hidrostática), de 0,45 lpc/pie (8,65 lpg). A partir de la Formación La Rosa, comienzan a observarse intervalos sobrepresurizados.

- Formación La Rosa: en el bloque del alto de Ceuta, presenta presiones de poros entre 0,54 – 0,58 lpc/pie (10,58 lpg – 11,15 lpg); mientras que en el bloque del área 2 es de 0,65 – 0,67 lpc/pie (12,50 – 12,90 lpg).
- Formación Paují: en el bloque del alto de Ceuta, presenta presiones de poros entre 0,54 – 0,58 lpc/pie (10,58 lpg – 11,15 lpg); mientras que en el bloque del área 2 no está presente (esta erosionada).
- Intervalo B-superior (B1 – B4) de la Formación Misoa: en el bloque del alto de Ceuta, presenta presiones de poros

entre 0,53 – 0,15 lpc/pie (10,19 lpg – 2,88 lpg); mientras que en el bloque del área 2 es de 0,67 – 0,45 lpc/pie (12,90 – 8,65 lpg).

- Intervalo B-inferior (B6) de la Formación Misoa: en el bloque del alto de Ceuta, presenta presiones de poros entre 0,47 – 0,15 lpc/pie (9,23 lpg – 2,88 lpg); mientras que en el bloque del área 2 es de 0,67 – 0,45 lpc/pie (12,90 – 8,65 lpg).

### 3.6 Resultados de la magnitud del esfuerzo horizontal mínimo y gradiente de fractura

En base a los resultados obtenidos, puede afirmarse que, dentro de la Formación Misoa del campo Ceuta, el gradiente de presión de iniciación de la fractura inducida o BP (*Breakdown Pressure*) tiene una mediana de 1,19 lpc/pie, el de presión de cierre instantánea o ISIP (*Instantaneous Shut-In Pressure*) posee una mediana de 1,15 lpc/pie y es equivalente a la magnitud del gradiente de fractura (FG), mientras que el gradiente de presión de cierre de la formación o FCP (*Formation Closure Pressure*) posee una mediana de 1,08 lpc/pie y es equivalente a la magnitud del esfuerzo principal menor o esfuerzo horizontal mínimo.

### 3.5. Resultados de la resistencia a la compresión efectiva a través de los criterios de fallas de Morh-Coulomb y Hoek-Brown

Para las arenas “B y C” el criterio de rotura de Morh-Coulomb, con fricción calculada por ensayos de núcleos, proporciona valores más optimistas de resistencia a la compresión efectiva de la roca que el criterio de rotura de Hoek-Brown. Es importante resaltar que para el criterio de Hoek-Brown no se determinó el GSI por no tener datos confiables de las discontinuidades en el núcleo. También se determinó que los valores de fricción calculados por ensayos de núcleos se encontraban sobreestimados para las arenas “C”, se puede afirmar que la resistencia a la compresión efectiva con fricción estimada por regresión por el criterio de rotura de Morh-Coulomb es el más conservador y el que se considera más confiable.

Se observó que tanto para las arenas “B” y “C” la presión de poros afecta notablemente los valores de los esfuerzos efectivos a los cuales está sometida la roca. Mientras menor es la presión de poros, mayores serán los esfuerzos efectivos actuantes.

### 3.7 Cálculo de la magnitud del esfuerzo horizontal máximo

#### 3.7.1 Resultados del cálculo de la magnitud del esfuerzo horizontal máximo por la metodología de Barton-Zoback

Los resultados del cálculo del esfuerzo horizontal máximo por medio de la metodología de Barton-Zoback considerando los anchos de las grietas por compresión en el

hoyo se determina a través de la ecuación (11).

Al analizar los resultados evidencian que la magnitud del gradiente del esfuerzo horizontal máximo calculada por la metodología de Barton-Zoback depende de la resistencia a la compresión efectiva que se esté utilizando. Mientras mayor sea la resistencia a la compresión efectiva, mayor será la magnitud del gradiente del esfuerzo horizontal máximo calculado.

La mayor magnitud del gradiente del esfuerzo horizontal máximo ( $\sigma_{Hmax-1}$ ) se obtuvo con la resistencia a la compresión efectiva calculada por el criterio de rotura de Morh-Coulomb a través de la ecuación (8), con fricción de núcleos, con una mediana de 1,98 lpc/pie con la presión de poros máxima y 2,44 lpc/pie con la presión de poros mínima. Este valor no se considera representativo del área, debido a que se identificó que los valores de fricciones de las arenas “C” calculada por ensayos de núcleos están sobreestimados.

Utilizando la resistencia a la compresión efectiva del criterio de rotura de Hoek-Brown (ecuación 9), resultó una magnitud del gradiente del esfuerzo horizontal máximo ( $\sigma_{Hmax-3}$ ) de 1,74 lpc/pie con la presión de poros máxima y 1,89 lpc/pie con la presión de poros mínima.

La menor magnitud del gradiente del esfuerzo horizontal máximo ( $\sigma_{Hmax-2}$ ) se obtuvo con la resistencia a la compresión efectiva calculada por el criterio de rotura de Morh-Coulomb, con fricción estimada por regresión lineal, con una mediana de 1,42 lpc/pie con la presión de poros máxima y 1,56 lpc/pie con la presión de poros mínima. Este valor es el que se considera más representativo del área.

#### 3.7.2 Resultados de la magnitud del gradiente del esfuerzo horizontal máximo por la teoría de falla por fricción

Los resultados del “acotamiento” de la magnitud del gradiente del esfuerzo horizontal máximo por medio de la teoría de falla por fricción (Ecuación 12).

Según los resultados obtenidos, se puede afirmar que según la teoría de falla por fricción, la magnitud del gradiente del esfuerzo horizontal máximo “acotado” es de  $\sigma_{Hmax} \leq 1,55$  lpc/pie con la presión de poros máxima y  $\sigma_{Hmax} \leq 2,08$  lpc/pie con la presión de poros mínima. Esto corrobora que la magnitud del gradiente del esfuerzo horizontal máximo más representativo calculado con la metodología de Barton-Zoback es de 1,42 lpc/pie considerando la presión de poros máxima.

#### 3.7.3 Resultados de la magnitud del gradiente del esfuerzo horizontal máximo por magnitud de anisotropía acústica

El registro sónico dipolar radial o multiacimutal (Sonic

Scanner de Schlumberger) corrido en el pozo P919 confirmó que la anisotropía acústica o acimutal de la onda de corte “S” es primordialmente originada por anisotropía de esfuerzos (inducida) y no por anisotropía intrínseca (fracturas). En base a esto, se estimó la magnitud del gradiente del esfuerzo horizontal máximo por medio de la magnitud o porcentaje de anisotropía acústica (PAA) (Ecuación 13). Para el cálculo se consideraron 3 porcentajes de anisotropía: Salas (2011) para el campo Ceuta (7,19%), Baker Atlas (2008) en el pozo P722A (12,10%) y Schlumberger (2009) en el pozo P919 (14,00%). Las estimaciones se presentan en la Tabla 2:

Tabla 2. Estimación de la magnitud del gradiente del esfuerzo horizontal máximo considerando la anisotropía acústica de la onda “S” del intervalo arenas “C” de la Formación Misoa  
Fuente: Los autores (2011).

GRADIENTE DEL ESFUERZO HORIZONTAL MÍNIMO ( $\sigma_{Hmin}$ ) [pc/ptie]	FUENTE	MAYOR PORCENTAJE DE ANISOTROPIA ACÚSTICA (PAA) [%]	GRADIENTE ESTIMADO DEL ESFUERZO HORIZONTAL MÁXIMO ( $\sigma_{Hmax}$ ) [pc/ptie]
1,08	Tesis de Grado de	7,19%	1,16
	Baker Atlas Pozo P722A (2008)	12,10%	1,21
	Schlumberger Pozo P919 (2009)	14,00%	1,23

Los resultados evidencian que la magnitud del gradiente del esfuerzo horizontal máximo calculada por el porcentaje de anisotropía acústica (PAA) proporciona valores menores que los estimados por la metodología de Barton-Zoback y la Teoría de Falla por Fricción.

### 3.8 Dirección de los esfuerzos horizontales máximo y mínimo

La dirección del esfuerzo horizontal máximo determinada con los ensayos ASR en los núcleos del pozo P815 cotejan con la dirección del esfuerzo horizontal máximo determinada mediante los registros de imágenes de las grietas por compresión en el hoyo (breakouts), calipers de 6 brazos (ovalizaciones) y sónicos dipolares cruzados (anisotropía acústica), la cual es noroeste- sureste (NO-SE).

#### 3.8.1 Sumario de direcciones de esfuerzos horizontales máximos y mínimos

El sumario de las direcciones interpretadas para los esfuerzos horizontales máximos y mínimos de las arenas “B” y “C” arrojando como resultados en las arenas B (figura 3) una mediana en la dirección del esfuerzo horizontal mínimo ( $\sigma_{Hmin}$ ) de 67° y la dirección del esfuerzo horizontal má-

ximo ( $\sigma_{Hmax}$ ) de 157° y para las arenas C (figura 4) una mediana en la dirección del esfuerzo horizontal mínimo ( $\sigma_{Hmin}$ ) de 56,45° y la dirección del esfuerzo horizontal máximo ( $\sigma_{Hmax}$ ) de 146,45°

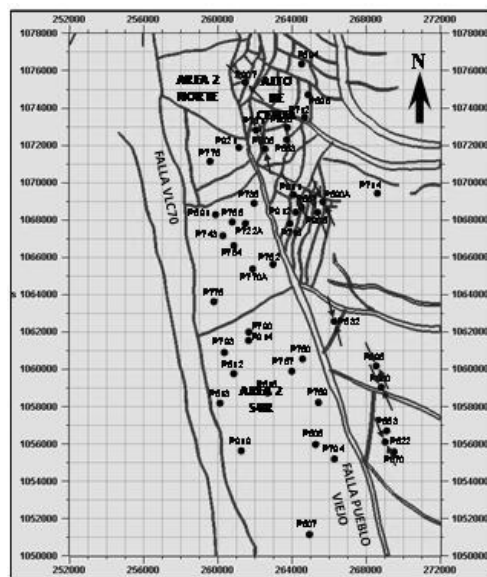


Fig. 3. Mapa de dirección del esfuerzo horizontal máximo para las arenas “B”. Fuente: Los autores (2011)

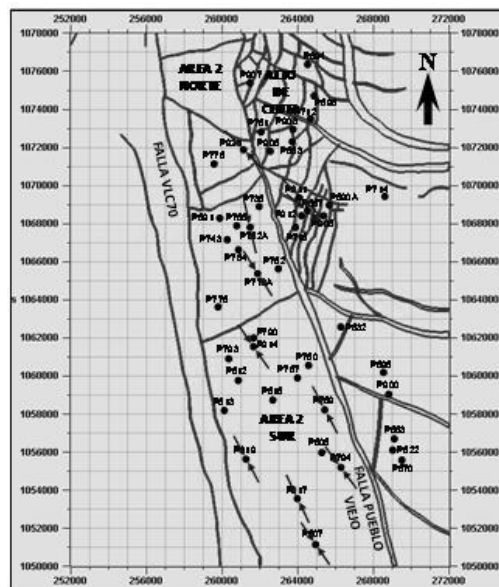


Fig. 4. Mapa de dirección del esfuerzo horizontal máximo para las arenas “C”. Fuente: Los autores (2011)

### 3.9 Determinación del régimen tectónico imperante en el área de estudio

Para la determinación del régimen tectónico imperante en el área de estudio, se compararon las magnitudes de los

esfuerzos ortogonales principales, resultando (figura 5):  $\sigma_v = 1,01$  lpc/pie,  $\sigma_{hmin} = 1,08$  lpc/pie,  $\sigma_{Hmax} = 1,42$  lpc/pie.

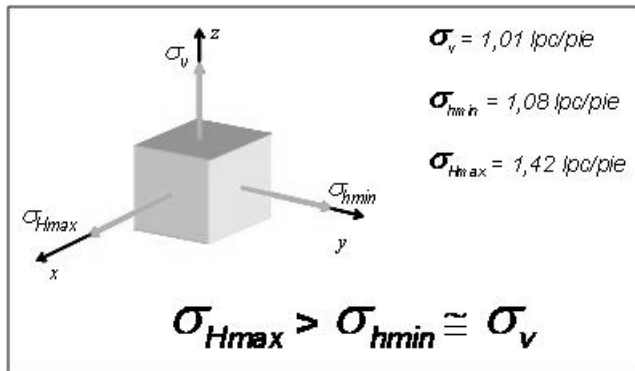


Fig. 5. Comparación de las magnitudes de los esfuerzos ortogonales principales en el campo Ceuta. Fuente: Los autores (2011)

Estas magnitudes indican que el esfuerzo horizontal máximo es aproximadamente entre 25% y 30% mayor que las otras componentes, y que a su vez, el esfuerzo horizontal mínimo es un poco mayor al esfuerzo vertical de sobrecarga, es decir, hay bajo contraste entre ambos.

Tomando en consideración la clasificación de los regímenes tectónicos de Anderson (1951), se puede afirmar que el régimen tectónico imperante en el eoceno del campo Ceuta se encuentra entre “inverso” y “transcurrente”.

La interpretación estructural de los datos sísmicos 3D del campo Ceuta refleja que existe una deformación de tipo transpresivo (transcurrencia + compresión). Las reflexiones sísmicas evidencian que las principales estructuras dentro del campo son los sistemas de fallas Pueblo Viejo VLG3686 y la VLC70, y que estas fallas tienen 2 componentes (vectores) de movimiento:

- Una componente transcurrente sinextral en sentido sur - norte.
- Una componente compresiva en sentido oeste - este.

Según Engelder (1993), un régimen transpresivo se presenta en regiones que están sometidas simultáneamente a dos tipos de esfuerzos o componentes: transcurrencia y compresión. De la misma manera, McClay y Bonora (2001) afirman que en las regiones con sistema de fallas sometidas a transpresión se producen estructuras positivas del tipo “restraining stepovers” (estructuras positivas en fallas transcurrentes). Estas estructuras se han interpretado en el alto de Ceuta, adyacentes a la falla de Pueblo Viejo.

El movimiento de estas dos componentes es producto de la vergencia de esfuerzos regionales en dirección noroeste – sureste (NO-SE) con acimut entre  $146^\circ$  y  $157^\circ$ , bajo el cual se encuentra sometida la región del bloque VII Ceuta

de la cuenca de Maracaibo (Figura 6)

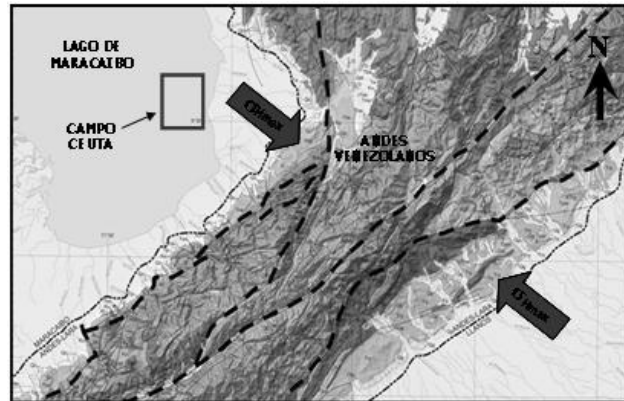


Fig. 6. Visualización de la superficie estructural de la unidad B6 en 3D con la dirección del esfuerzo horizontal máximo. Fuente: Los autores (2011)

La dirección del esfuerzo horizontal máximo interpretada en el campo Ceuta ( $146^\circ - 157^\circ$ ) coincide con la dirección de esfuerzos regionales noroeste – sureste (NO-SE) producto de la colisión oblicua entre el bloque de Maracaibo y la placa suramericana, que levantaron Los Andes Venezolanos (Colleta y otros, 1997) (Figura 7). Esto es consistente con modelos publicados por diferentes autores (Palme, Choy y Morandi, 2001; Kellogg y Bonini, 1982; Audemar, 1991, Backé y otros, 2006).

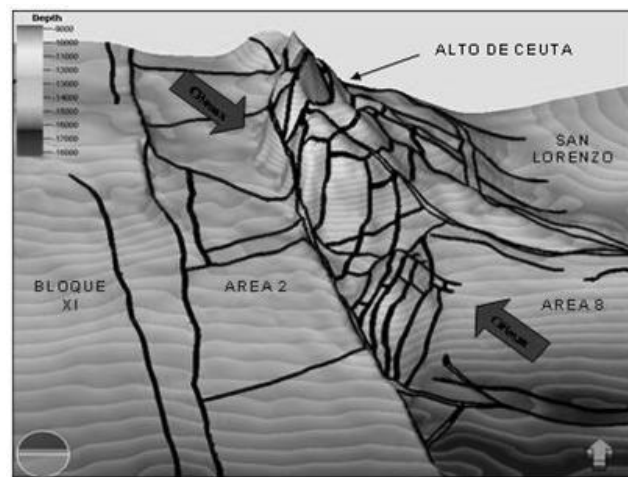


Fig. 7. dirección del esfuerzo horizontal máximo interpretado por Palme, Choy y Morandi (2001). Basado en el mapa geológico de Venezuela (Hackely y otros, 2006)

Por último, los datos que aporta el mapa mundial de esfuerzos o WSM (World Stress Map) para la región del Mar Caribe, indican que en el piedemonte norandino, los esfuerzos regionales presentan una dirección promedio noroeste – sureste (NO-SE) y son predominantemente compresivos, como se muestran en las Figura 8.



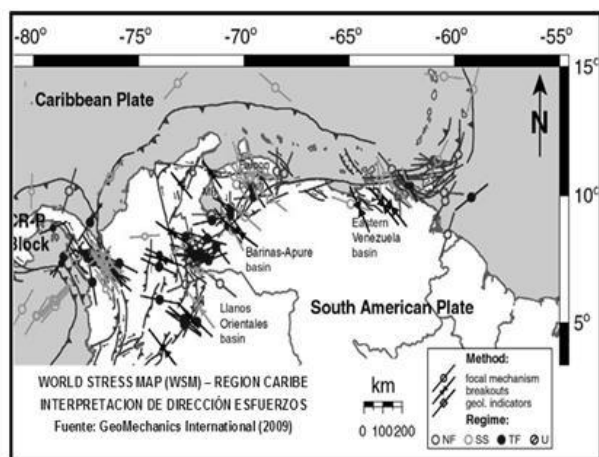


Fig. 8. Mapa mundial de esfuerzos de la región del Mar Caribe promedio de dirección de esfuerzos. Tomado de GeoMechanics, International (2009)

#### 4 Conclusiones

Se caracterizó la resistencia mecánica de las arenas “B” y arenas “C” de la Formación Misoa (eoceno) del alto de Ceuta y el área 2 del campo Ceuta, donde los valores de los ensayos UCS indican que las areniscas más resistentes corresponden a las unidades B4, B6 y C5, mientras que las areniscas menos resistentes corresponden a las unidades C1 a C4. Dentro de las arenas “C” se observó que las fricciones ( $\mu$ ) calculadas por el análisis de las envolventes de Mohr-Coulomb presentaron valores más altos que las calculadas por el registro continuo RSD (*Rock Strength Device*). Se lograron calibrar para las arenas “B” y “C” del campo Ceuta 5 modelos de perfiles a la resistencia a la compresión simple (UCS). De las ecuaciones de Shell-Veecken para calcular la caída de presión crítica el límite optimista representó a las arenas “B” y el límite conservador a las arenas “C” para el campo Ceuta. Se obtuvo para todo el Alto de Ceuta y área 2 el esfuerzo vertical de sobrecarga ( $\sigma_v$ ). Los resultados confirman las investigaciones realizadas por Hoek y Brown (1980). Se calcularon las resistencias a la compresión efectiva a través de los criterios de rotura de Mohr-Coulomb y de Hoek-Brown. Para el criterio de rotura de Mohr-Coulomb, se evidenció que la resistencia a la compresión efectiva depende de los valores estimados para la fricción ( $\mu$ ) de la roca. Las unidades estratigráficas que presentaron mayores presiones anormales (sobrepresión) fueron las lutitas de la Formación La Rosa, las lutitas de la Formación Paují y las arenas del C-inferior (C5 – C7) de la Formación Misoa, donde existen areniscas poco drenadas. Las zonas con subpresión se hallaron en los yacimientos con larga vida de productividad del B-superior (B1 – B4), B-inferior (B6) y C-superior (C1 – C4) donde su energía natural ha declinado. Según la clasificación de los regímenes tectónicos de Anderson (1951), el régimen tectónico imperante en el eoceno del campo Ceuta se encuentra entre “in-

verso” y “transcurrente”. La dirección del esfuerzo horizontal máximo ( $\sigma_{Hmax}$ ) interpretada en el Campo Ceuta ( $146^\circ - 157^\circ$ ) coincide con la dirección de esfuerzos regionales noreste – sureste (NO-SE), la cual fue interpretada por, Palme, Choy y Morandi, 2001, entre  $110^\circ$  y  $135^\circ$ .

#### Referencias bibliográficas

- GeoMechanics International (2009). “Curso de Geomecánica en E&P de Petróleo y Gas”. Dictado para PDVSA E&P Occidente.
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., y Oteo, C., (2002). “Ingeniería Geológica”. Editorial Pearson. Madrid. España.
- Lobo, C., Chacón, J., y Rojas, S. (2010). “Modelo Estático del Eoceno del Alto de Ceuta y Área 2 Norte, Campo Ceuta, Bloque VII del Lago de Maracaibo”. Informe y Presentación de Avance en formato PDF. Estudios Integrados de Yacimientos, PDVSA E&P, División Occidente. Maracaibo.
- Lobo, C. y Vásquez, V. (2011). “Manual de Términos Básicos para la Elaboración de Estudios Geomecánicos de Yacimientos”. Estudios Integrados de Yacimientos, PDVSA E&P, División Occidente. Maracaibo.
- Mauri, M., y Seger, O. (2008). “Temas Especiales y Aspectos Operacionales: Geomecánica”. estudio integrado del yacimiento C-Superior P676. Área 2 Sur. Bloque VII Ceuta. Beicip-Franlab y PDVSA E&P Occidente. Maracaibo. Venezuela.
- Palme, C., Choy, J., y Morandi, M. (2001). “Mecanismos Focales Sísmicos y Esfuerzos Tectónicos en la Región Norte de los Andes Merideños. Venezuela”. Revista “Interciencia” Vol. 26. No. 005. Caracas. Venezuela.
- Parra, J. (1998). “Taller de Geomecánica Petrolera”. Presentación en formato PDF. PDVSA Exploración y Producción. Caracas. Venezuela.
- Poquima, W. (1998). “Geología Estructural y Geomecánica”. Presentación en formato PDF. Comunidad de Conocimientos de Geología Estructural y Geomecánica. PDVSA CIED. Los Teques. Caracas. Venezuela.
- Vásquez, A. (2001). “Introducción a la Geomecánica Petrolera”. V.V.A. Consultores. C.A., Quinta Edición. Caracas. Venezuela.
- Zoback, M. (2006). “Reservoir Geomechanics”. Department of Geophysics. Stanford University. Cambridge Press. USA.

**Recibido:** 10 de agosto de 2011

**Revisado:** 10 de noviembre 2012

**Peña, Anggie:** Ingeniero, Geólogo. Instituto Autónomo Municipal de Protección Civil y Ambiente de Chacao (IPCA).

**Peñuela, Mariliana:** Ingeniero. Geólogo Ministerio del Ambiente. Dirección General de Vigilancia y Control Ambiental. Correo electrónico: marip\_222@hotmail.com.

**Lobo, Carlos:** Ingeniero. Geólogo, PDVSA E&P Occidente. Estudios Integrados de Yacimientos. Correo electrónico: lobo@pdvsa.com.

**Belandria, Norly:** Ingeniero. Geólogo, MSc., Grupo de Investigación en Geología Aplicada (GIGA), Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Correo electrónico: nbelandria@ula.ve.

**Bongiorno, Francisco:** Ingeniero. Geólogo, Dr., Grupo de Investigación en Geología Aplicada (GIGA), Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Correo electrónico: frabon@ula.ve.

