

METODOLOGÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE ORIENTACIÓN Y MAGNITUD DE ESFUERZOS PRINCIPALES EN POZOS DESVIADOS A PARTIR DE REGISTROS CALIPER ORIENTADOS DE MÚLTIPLES BRAZOS

Juan Pablo Moreno¹, José Gildardo Osorio²

1: Pluspetrol Argentina. jmoreno@pluspetrolnet

2: Pluspetrol Uruguay. jgildardo@pluspetrol.net

Palabras clave: Calibración de esfuerzos, registros caliper, falla de pozo

ABSTRACT

The magnitude and orientation of the in-situ stresses are some of the geomechanical attributes that have a high impact for the understanding of the geomechanical behavior of rocks in operations related to drilling, stimulation and hydrocarbon production. The estimation and calibration process of the magnitude and orientation of the in-situ stresses is usually based on the identification of the width and location of *breakouts* in image logs. In highly deviated wells that are not aligned with one of the principal in-situ stresses, the location and width of *breakouts* is a function of the magnitude and orientation of the in-situ stresses. This work proposes a methodology for the characterization of the magnitude and orientation of horizontal stresses in wells not aligned with one of the principal in-situ stresses based on wellbore failure location (*breakouts*). The proposed methodology can be applied in wells where there is a multi-arm-oriented caliper log from which the location of *breakouts* can be obtained. The proposed methodology was implemented in the stress characterization in a deviated well with a 6-arm oriented caliper log.

INTRODUCCIÓN

Los reservorios de hidrocarburos y las formaciones geológicas suprayacentes se encuentran sometidos a un campo de esfuerzos denominado esfuerzos *in-situ*. Este campo de esfuerzos está caracterizado por 3 esfuerzos principales ortogonales. Generalmente, estos esfuerzos principales corresponden a un esfuerzo vertical y dos esfuerzos horizontales (mínimo y máximo). La determinación de la orientación y magnitud de los esfuerzos *in-situ* es esencial en toda evaluación geomecánica. De hecho, estos esfuerzos tienen un alto impacto en la estabilidad de pozos durante la perforación, la producción de arena y el desarrollo de las fracturas hidráulicas, entre otras. Por este motivo, es fundamental disminuir la incertidumbre en la caracterización de estos esfuerzos para una correcta evaluación de

los riesgos asociados a las diferentes operaciones mencionadas en la vida productiva de un reservorio.

De los 3 esfuerzos principales *in-situ*, el cálculo del esfuerzo vertical es el de menor complejidad e incertidumbre. Para una profundidad determinada, la magnitud de este esfuerzo es generada por el peso de las formaciones suprayacentes más la columna de agua en caso de operaciones costa-afuera. Debido a esto, la magnitud del esfuerzo vertical se obtiene a partir de la integración de las densidades de roca desde superficie hasta la profundidad de interés. Para esta estimación se usan registros eléctricos de densidad. En el caso en que la información de densidad no esté disponible para todo el intervalo de interés, existe la posibilidad de generar registros sintéticos a partir de correlaciones tales como las propuestas por Miller o Gardner (Zhang 2019).

Existen modelos que permiten construir perfiles para los esfuerzos horizontales, tales como los modelos poroelásticos lineales. Los perfiles construidos con estos modelos deben ser calibrados con la información obtenida durante la perforación, registros eléctricos y estimulación del pozo, entre otros. Infortunadamente, la caracterización de los esfuerzos horizontales es una de las actividades de mayor dificultad e incertidumbre durante la construcción de un modelo geomecánico.

El proceso de calibración del esfuerzo horizontal mínimo hace uso de las presiones de cierre de fractura obtenidas de pruebas, tales como: LOTs (*Leak off tests*), XLOTs (*Extended Leak off tests*), DFITs (*Diagnostic Fracture Injection Tests*), minifrac, entre otras.

La metodología generalmente usada para la determinación de la magnitud del esfuerzo horizontal máximo consta de dos pasos: (1) identificación en registros de imagen de fallas generadas durante la perforación del pozo (ubicación y anchos de *breakout*) y (2) identificación de los esfuerzos que generan dichas fracturas/fallas mediante el ajuste de modelos matemáticos. Mientras la aplicación de esta metodología para pozos verticales es directa, para pozos altamente desviados es un proceso iterativo más complejo.

En pozos donde no hay disponibilidad de registro de imagen o la calidad no permite identificar la ubicación y anchos de *breakouts* no es posible aplicar el flujo de trabajo mencionado.

El presente trabajo propone una metodología para determinar el esfuerzo horizontal máximo en pozos no alineados con los esfuerzos principales *in-situ* a partir de la identificación de la ubicación de los *breakouts* con caliper orientados de múltiples brazos.

CÁLCULO DE MAGNITUD DE ESFUERZOS PRINCIPALES IN-SITU

Para la determinación del campo de esfuerzos *in-situ* se debe caracterizar la magnitud del esfuerzo vertical, el esfuerzo horizontal mínimo y el esfuerzo horizontal máximo, así como la dirección de los esfuerzos principales horizontales. A continuación, se describe la metodología aplicada en este estudio para la caracterización de esfuerzos.

Esfuerzo vertical

El esfuerzo vertical a una profundidad determinada es generado por el peso de la columna litostática. La magnitud de este esfuerzo puede ser determinado a partir de la integración numérica del registro de densidad:

$$\sigma_v = \int_0^z \rho(z) g dz \cong \sum_{i=1}^n \rho_i g \Delta z_i \quad (1)$$

Para el cálculo de esfuerzo vertical se requiere tener un registro de densidad en el pozo de estudio. En los casos en los que no se tiene un registro de densidad, se puede usar alguna correlación a partir de la información disponible. La correlación de Gardner es una de las correlaciones ampliamente usadas para determinar el perfil de densidad a partir de las velocidades de onda compresional. Esta correlación tiene la siguiente forma (Zhang 2019):

$$\rho = a V_p^b \quad (2)$$

Para el sistema de unidades inglés (ρ en g/cm³ y V_p en km/s), los valores por defecto de las constantes son $a=0.23$ y $b=0.25$.

Para profundidades someras, la estimación de densidad se puede realizar haciendo uso de la correlación de Miller (Zhang 2019). Esta correlación permite obtener un perfil de porosidad a partir de la siguiente ecuación:

$$\phi = \phi_a + \phi_b e^{-kz^{1/n}} \quad (3)$$

Donde ϕ es la porosidad, ϕ_a es la porosidad a grandes profundidades, $\phi_a + \phi_b$ es la porosidad en superficie, z es la profundidad, k es un parámetro de declinación de porosidad y n es un parámetro de curvatura.

Una vez se obtiene el perfil de porosidad para las formaciones someras con la correlación de Miller, se puede estimar el perfil de densidad a partir de la siguiente relación:

$$\rho = \rho_m (1 - \phi) + \rho_w \phi \quad (4)$$

Donde ρ_m y ρ_w son los valores de densidad de matriz y agua de formación respectivamente. El perfil de densidad obtenido a partir de la correlación de Miller requiere ser calibrado con el perfil de densidad real más somero donde este último exista.

Esfuerzos horizontales

Existen múltiples modelos que permiten estimar los perfiles de esfuerzos en un pozo. Estos modelos pueden estar basados en diferentes suposiciones y leyes constitutivas, tales como: elasticidad lineal o no lineal, isotropía o anisotropía elástica, viscoplasticidad, cuenca tectónicamente activa o pasiva, entre otras. Para el presente trabajo se usó un modelo de esfuerzos basado en comportamiento elástico lineal e isotrópico para una cuenca tectónicamente activa. Las siguientes son las ecuaciones para el modelamiento de esfuerzos basado en las suposiciones mencionadas (Blanton y Olson 1999):

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu}(\sigma_v - \alpha P_p) + \alpha P_p + \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_h + \nu \varepsilon_H) \quad (5)$$

$$\sigma_H = \frac{\nu}{1-\nu}(\sigma_v - \alpha P_p) + \alpha P_p + \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_H + \nu \varepsilon_h) \quad (6)$$

Donde σ_h es el esfuerzo horizontal mínimo, σ_H es el esfuerzo horizontal máximo, ν es la relación de Poisson, E es el módulo de Young, α es el parámetro poroelástico de Biot, P_p es la presión de poro y ε_h y ε_H son las deformaciones tectónicas en la dirección del esfuerzo horizontal mínimo y máximo respectivamente. Las deformaciones tectónicas son parámetros que se modifican durante el proceso de calibración con el fin de que los perfiles de esfuerzos reproduzcan las observaciones (puntos de calibración).

ESFUERZOS ALREDEDOR DE UN POZO

Luego de la perforación de un pozo, el campo de esfuerzos alrededor del pozo es alterado por el hecho de reemplazar la roca por un fluido con presión hidrostática (P_w). El nuevo campo de esfuerzos es función de los esfuerzos in-situ, la orientación del pozo y la presión ejercida por el fluido de perforación. Las ecuaciones más ampliamente usadas para la determinación de los esfuerzos alrededor del pozo son las ecuaciones de Kirsch (Fjaer *et al.* 2008). Estas ecuaciones corresponden a la solución de las ecuaciones de equilibrio de esfuerzos en sistemas elásticos lineales. A continuación, se presentan las ecuaciones de Kirsch para la determinación de esfuerzos en la cara del pozo:

$$\sigma_r = P_w \quad (7)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_x^o + \sigma_y^o - 2(\sigma_x^o - \sigma_y^o)\cos(2\theta) - 4\tau_{xy}^o\sin(2\theta) - P_w \quad (8)$$

$$\sigma_z = \sigma_z^o - \nu[2(\sigma_x^o - \sigma_y^o)\cos(2\theta) + 4\tau_{xy}^o\sin(2\theta)] \quad (9)$$

$$\tau_{r\theta} = 0 \quad (10)$$

$$\tau_{\theta z} = 2[-\tau_{xz}^o \sin(\theta) + \tau_{yz}^o \cos(\theta)] \quad (11)$$

$$\tau_{rz} = 0 \quad (12)$$

Donde ν es la relación de Poisson, σ_r es el esfuerzo radial, σ_θ es el esfuerzo circunferencial, σ_z es el esfuerzo axial y $\tau_{r\theta}$, $\tau_{\theta z}$ y τ_{rz} son los esfuerzos de cizalla (Fig 1a).

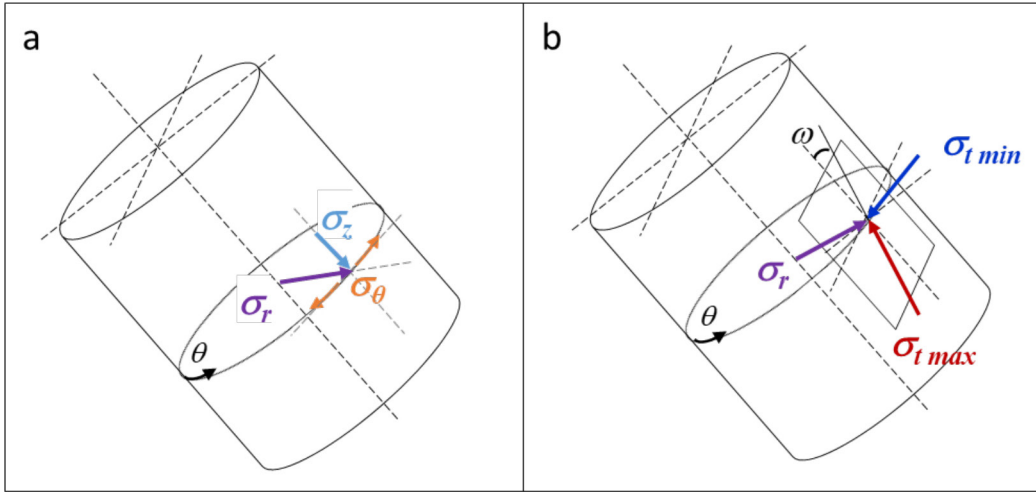


Figura 1. a) Esfuerzos de pozo en coordenadas radiales: esfuerzo radial (σ_r), esfuerzo circunferencial (σ_θ) y esfuerzo axial (σ_z). b) Esfuerzos principales en la cara del pozo: esfuerzo radial (σ_r), esfuerzo tangencial mínimo ($\sigma_{t \min}$) y esfuerzo tangencial máximo ($\sigma_{t \max}$).

Los esfuerzos σ_x^o , σ_y^o , σ_z^o , τ_{xy}^o , τ_{zx}^o y τ_{yz}^o corresponden a los esfuerzos vírgenes en un sistema de coordenadas cartesiano alineado con la orientación del pozo (en este nuevo sistema de coordenadas mencionado, el eje z está alineado con el eje del pozo, el eje x apunta radialmente a la parte más baja del pozo y el eje y es horizontal. El ángulo θ es medido a partir del eje x). Los esfuerzos vírgenes se pueden obtener a partir de las siguientes relaciones:

$$\sigma_x^o = l_{xx'}^2 \sigma_H + l_{xy'}^2 \sigma_h + l_{xz'}^2 \sigma_V \quad (13)$$

$$\sigma_y^o = l_{yx'}^2 \sigma_H + l_{yy'}^2 \sigma_h + l_{yz'}^2 \sigma_V \quad (14)$$

$$\sigma_z^o = l_{zx'}^2 \sigma_H + l_{zy'}^2 \sigma_h + l_{zz'}^2 \sigma_V \quad (15)$$

$$\tau_{xy}^o = l_{xx'} l_{yx'} \sigma_H + l_{xy'} l_{yy'} \sigma_h + l_{xz'} l_{yz'} \sigma_V \quad (16)$$

$$\tau_{yz}^o = l_{yx'} l_{zx'} \sigma_H + l_{yy'} l_{zy'} \sigma_h + l_{yz'} l_{zz'} \sigma_V \quad (17)$$

$$\tau_{zx}^o = l_{zx'} l_{xx'} \sigma_H + l_{zy'} l_{xy'} \sigma_h + l_{zz'} l_{xz'} \sigma_V \quad (18)$$

Donde los cosenos directores ($l_{ij'}$) están dados por las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} l_{xx'} &= \cos(a) \cos(i), & l_{xy'} &= \sin(a) \cos(i), & l_{xz'} &= -\sin(i) \\ l_{yx'} &= -\sin(a), & l_{yy'} &= \cos(a), & l_{yz'} &= 0 \\ l_{zx'} &= \cos(a) \sin(i), & l_{zy'} &= \sin(a) \sin(i), & l_{zz'} &= \cos(i) \end{aligned} \quad (19)$$

El ángulo i corresponde a la inclinación del pozo y el ángulo a corresponde al azimut del pozo respecto a la orientación del esfuerzo horizontal máximo.

Los esfuerzos principales alrededor del pozo están dados por el esfuerzo radial (σ_r) y dos esfuerzos tangenciales a la cara del pozo (Fig. 1b). Estos esfuerzos tangenciales están dados por:

$$\sigma_{tmin} = \frac{1}{2} \left(\sigma_z + \sigma_\theta - \sqrt{(\sigma_z - \sigma_\theta)^2 + 4\tau_{\theta z}^2} \right) \quad (20)$$

$$\sigma_{tmax} = \frac{1}{2} \left(\sigma_z + \sigma_\theta + \sqrt{(\sigma_z - \sigma_\theta)^2 + 4\tau_{\theta z}^2} \right) \quad (21)$$

Es importante mencionar que las expresiones descritas en las secciones anteriores corresponden a los esfuerzos totales. No obstante, la deformación y la falla de la roca están gobernadas por los esfuerzos efectivos. La definición de Terzaghi para los esfuerzos efectivos (Zoback 2007) está dada por:

$$\sigma'_i = \sigma_i - \alpha P_p \quad (22)$$

FALLAS INDUCIDAS DURANTE LA PERFORACIÓN

La alteración del campo de esfuerzos generada por la perforación es la causa de la generación de fallas de pozo, tales como los *breakouts* o las fallas inducidas de tensión. Para que estas fallas sean generadas, se requiere que los esfuerzos superen la resistencia de la roca. En el caso de fallas inducidas de tensión, el mínimo esfuerzo efectivo debe superar la resistencia a la tensión de la roca. La falla de tensión ocurre cuando se cumple el siguiente criterio de:

$$\sigma'_3 \leq -T_0 \quad (23)$$

Donde σ'_3 es el mínimo esfuerzo efectivo y T_0 es la resistencia a la tensión de la roca. En el caso

de fallas de tensión inducidas en la cara del pozo durante la perforación, el mínimo esfuerzo efectivo corresponde al esfuerzo tangencial mínimo efectivo. Para este caso, el criterio de falla de tensión toma la siguiente forma:

$$\sigma'_{tmin} = \sigma_{tmin} - \alpha P_p \leq -T_0 \quad (24)$$

En el caso de fallas compresivas o de cizalla, los esfuerzos deben superar la resistencia a la cizalla de la roca. Existen en la literatura múltiples criterios para evaluar la falla de cizalla en función de los esfuerzos aplicados y por lo menos una propiedad de resistencia de la roca. Uno de los criterios de falla comúnmente usados es el de Mohr-Coulomb. De acuerdo a este criterio la falla de cizalla se presenta cuando se cumple la siguiente relación:

$$\sigma'_1 \geq UCS + \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \sigma'_3 \quad (25)$$

Donde σ'_1 es el esfuerzo máximo efectivo, UCS es la resistencia a la compresión sin confinamiento (*Unconfined/Uniaxial Compressive Strength*) y φ es el ángulo de fricción interna. Aunque existen diferentes tipos de fallas compresivas o de cizalla inducidas durante la perforación (Fjaer *et al.* 2008), este estudio se concentra en las fallas tipos *breakout* en las cuales $\sigma'_1 = \sigma'_{tmax}$ y $\sigma'_3 = \sigma'_r$. Para este caso particular, la condición para que se presente la falla se puede expresar de la siguiente forma:

$$\sigma'_{tmax} \geq UCS + \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \sigma'_r \quad (26)$$

Fallas compresivas en pozos verticales

De acuerdo a la ecuación (25), los *breakouts* son generados por la anisotropía entre los esfuerzos principales máximo y mínimo. Para el caso de pozos verticales, los esfuerzos radial, axial y circunferencial son esfuerzos principales. En la cara del pozo, el esfuerzo radial, independientemente de la orientación del pozo, corresponde a la presión del fluido en el pozo, y está expresado por la ecuación (7). Los esfuerzos circunferencial y axial se obtienen luego de reemplazar la inclinación y el azimut respecto al esfuerzo máximo en la ecuación (19), reemplazando los valores resultantes en las ecuaciones (13) a (17) y luego en las ecuaciones (8) y (9). Lo anterior conlleva a las siguientes expresiones para los esfuerzos circunferencial y axial en la cara del pozo:

$$\sigma_\theta = \sigma_H + \sigma_h - 2(\sigma_H - \sigma_h)\cos(2\theta) - P_w \quad (27)$$

$$\sigma_z = \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h)\cos(2\theta) \quad (28)$$

En pozos verticales, los esfuerzos de cizalla se anulan, es decir:

$$\tau_{r\theta} = \tau_{\theta z} = \tau_{rz} = 0 \quad (29)$$

La Figura 2 presenta un ejemplo de la variación de los esfuerzos principales σ_r , σ_θ y σ_z respecto a la dirección del esfuerzo horizontal máximo en un pozo vertical. El ángulo θ donde el esfuerzo circunferencial es máximo corresponde a 90° y 270° . Este es el ángulo, sobre la circunferencia del pozo, entre la dirección del esfuerzo horizontal máximo y el centro de la falla compresiva (centro del *breakout*). De acuerdo a lo anterior, los *breakouts* en pozos verticales están alineados con la orientación del esfuerzo horizontal mínimo y perpendicular al esfuerzo horizontal máximo. Por otra parte, el menor esfuerzo circunferencial se da a un ángulo θ igual a 0° y 180° . Esto quiere decir que las fracturas inducidas en pozos verticales están alineadas con la dirección del esfuerzo horizontal máximo.

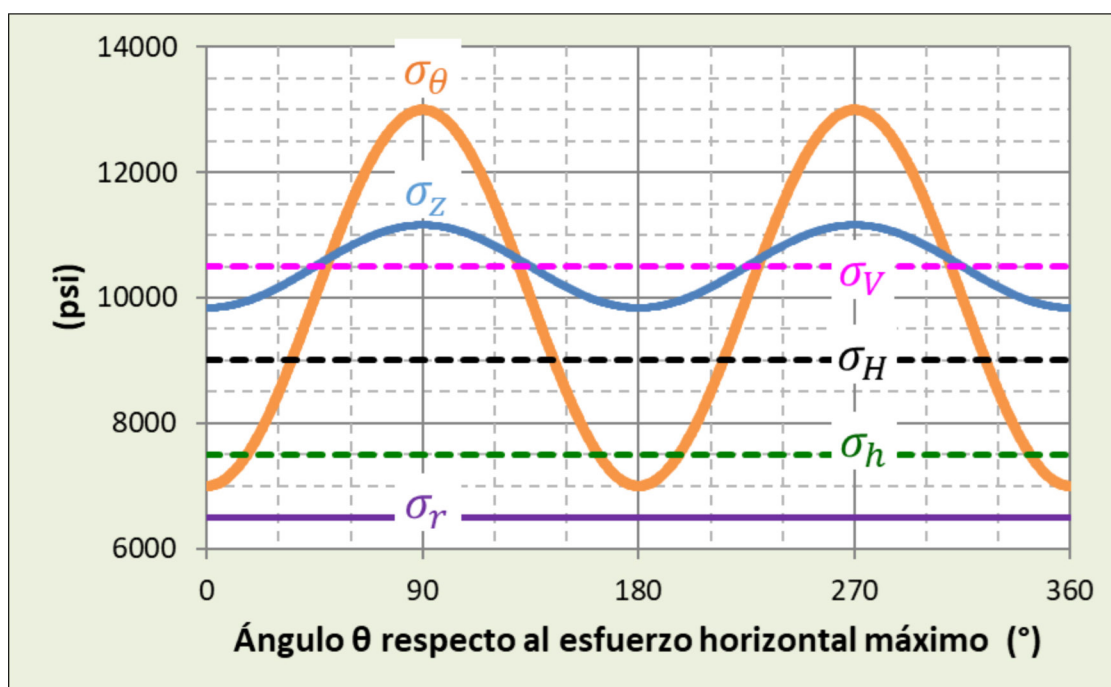


Figura 2. Variación de los esfuerzos principales σ_r , σ_θ y σ_z con el ángulo θ respecto a la dirección del esfuerzo horizontal máximo en un pozo vertical.

Basados en las ecuaciones de esfuerzos para pozos verticales (ecuaciones (7), (27) y (28)), y el criterio de falla (ecuación (25)), se debe cumplir la siguiente condición para que se presenten fallas tipo *breakouts* en pozos verticales:

$$\sigma_H + \sigma_h - 2(\sigma_H - \sigma_h) \cos(2\theta) - P_w - \alpha P_p \geq UCS + \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) (P_w - \alpha P_p) \quad (30)$$

En el punto donde comienza el *breakout*, correspondiente al ángulo θ_b (Ver Fig. 3), se cumple la igualdad del criterio dado por la ecuación (30). Teniendo en cuenta lo anterior, se puede obtener la siguiente expresión para la calibración del esfuerzo horizontal máximo:

$$\sigma_H = \frac{UCS + P_w \left[\tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) + 1 \right] + \alpha P_p \left[1 - \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \right] - \sigma_h [1 + 2 \cos(2\theta_b)]}{[1 - 2 \cos(2\theta_b)]} \quad (31)$$

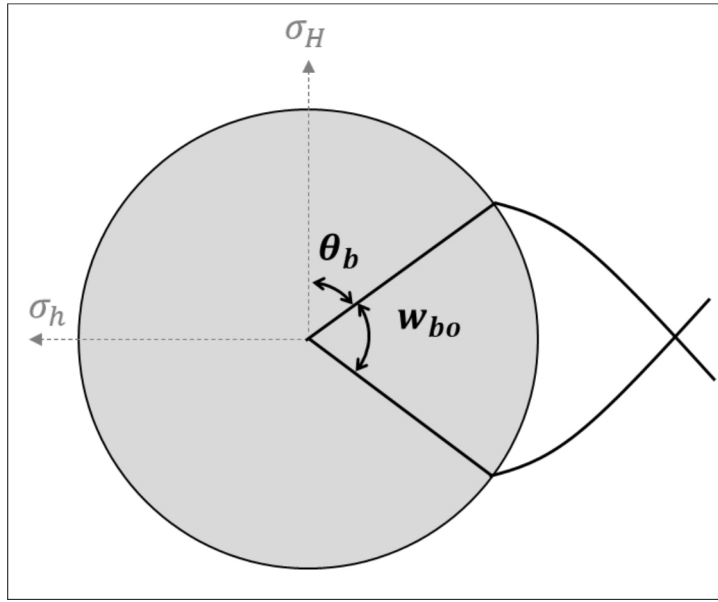


Figura 3. Ubicación de *breakouts* respecto a los esfuerzos horizontales *in situ* en pozos verticales.

El ángulo donde inicia el *breakout* (θ_b) puede ser expresado en función del ancho de *breakout* (w_{bo}) a partir de la siguiente ecuación:

$$2\theta_b = \pi - w_{bo} \quad (32)$$

Basado en lo anterior, la ubicación de *breakouts* en pozos verticales permite identificar la orientación del esfuerzo horizontal máximo. Para estimar la magnitud del esfuerzo horizontal máximo en pozos verticales se requiere identificar el ancho de *breakout*.

Fallas compresivas en pozos desviados

Las ecuaciones (7) a (22) permiten apreciar la relación compleja que existe entre los esfuerzos principales alrededor de un pozo desviado y los esfuerzos principales *in situ*. La Figura 4 presenta un ejemplo de la variación de los esfuerzos principales σ_r , $\sigma_{\theta min}$ y $\sigma_{\theta max}$ en función del ángulo respecto al punto más bajo del pozo para un pozo desviado. En el caso de pozos desviados, el ángulo θ donde el esfuerzo circunferencial es máximo (ángulo donde iniciaría la falla de compresión si los esfuerzos superan la resistencia de la roca) es función de la magnitud y orientación de los esfuerzos *in situ* y de la trayectoria del pozo. Esta complejidad hace que la determinación de los esfuerzos requeridos para que se presente falla del pozo no sea tan directa como para el caso de pozos verticales.

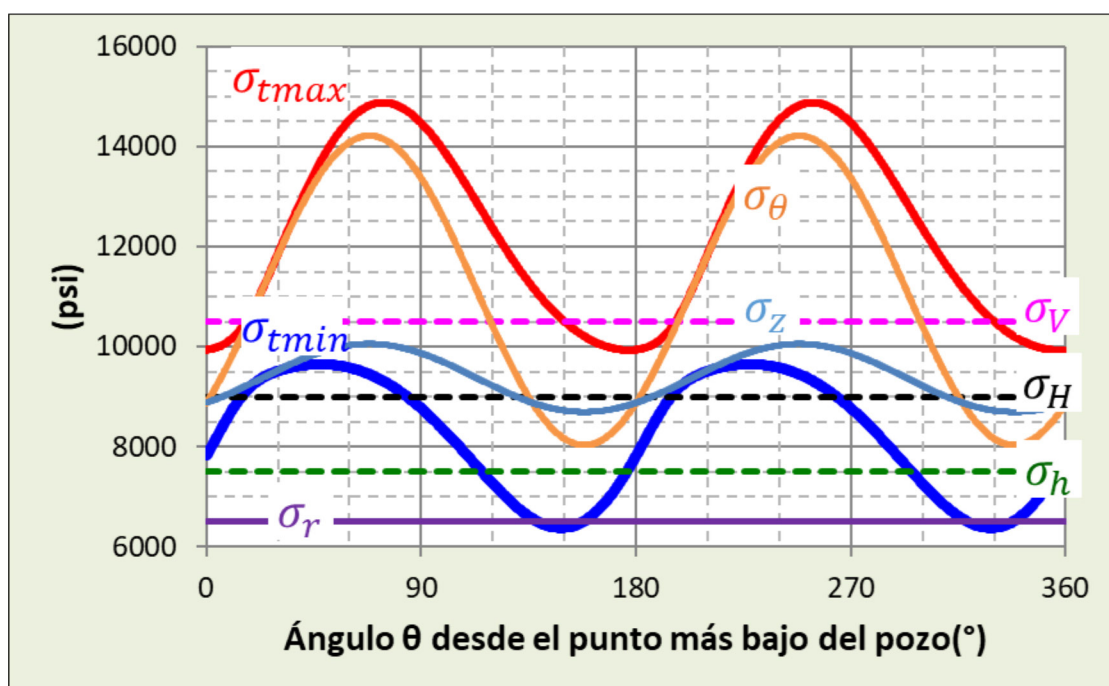


Figura 4. Variación de los esfuerzos principales σ_r , $\sigma_{\theta min}$ y $\sigma_{\theta max}$ en función del ángulo θ desde el punto más bajo del pozo.

La Figura 5 ilustra un ejemplo del comportamiento del esfuerzo tangencial máximo σ_{tmax} y la variación del ángulo donde iniciaría la falla del pozo en función de la orientación del esfuerzo máximo, magnitud del esfuerzo máximo y azimuth del pozo. Los parámetros usados para la construcción de la Figura 5 se presentan en la Tabla 1.

σ_v	σ_h	σ_H	P_p	P_w	Inclinación	Azimut
10500 psi	7500 psi	9000 psi	6500 psi	6500 psi	45°	45°

Tabla 1. Parámetros usados en la estimación de esfuerzo tangencial máximo de la Figura 5.

En la Figura 5 puede notarse que el punto donde se presenta el mayor valor del esfuerzo tangencial máximo es función de la orientación y magnitud del esfuerzo horizontal máximo y el azimut del pozo. De lo anterior se puede concluir que la ubicación de *breakouts* es función de la orientación y magnitud del esfuerzo horizontal máximo y el azimut del pozo. De igual manera, la variación en la amplitud de las sinusoides y en los valores máximos y mínimos de los esfuerzos tangenciales máximos, indican que la región del pozo que puede fallar es función de la orientación y magnitud del esfuerzo horizontal máximo y el azimut del pozo. Por ende, el ancho de *breakout* es función de la orientación y magnitud del esfuerzo horizontal máximo y el azimut del pozo.

Calibración de esfuerzos en pozos desviados a partir de ancho y ubicación de *breakouts* de registros de imagen

Debido a que a que el impacto de la magnitud y orientación de esfuerzos sobre la ubicación y anchos de *breakouts* en pozos desviados no es tan directa como en pozos verticales, la metodología empleada para la calibración de esfuerzos consiste en obtener la magnitud y orientación de esfuerzos que reproduzca de mejor manera la ubicación y ancho de *breakouts* observados en los pozos. La Figura 6 ilustra la forma en la que se utilizó la información de ancho y ubicación de *breakouts* en un pozo desviado en Camisea (Perú) para realizar la calibración de orientación y magnitud de esfuerzos. El proceso consistió en modificar las constantes tectónicas de las ecuaciones de esfuerzos horizontales (ecuaciones (5) y (6)) de tal forma que se obtenga el mejor ajuste de las siguientes condiciones: 1) Que el perfil de esfuerzo mínimo calibre con las pruebas de integridad de formación (FIT, LOT, XLOT, DFIT,...), 2) Que la ubicación y ancho de los *breakouts* simulados calibren con los *breakouts* observados y 3) Que el modelo de estabilidad, resultante del modelo geomecánico, reproduzca los eventos geomecánicos ocurridos durante la perforación del pozo.

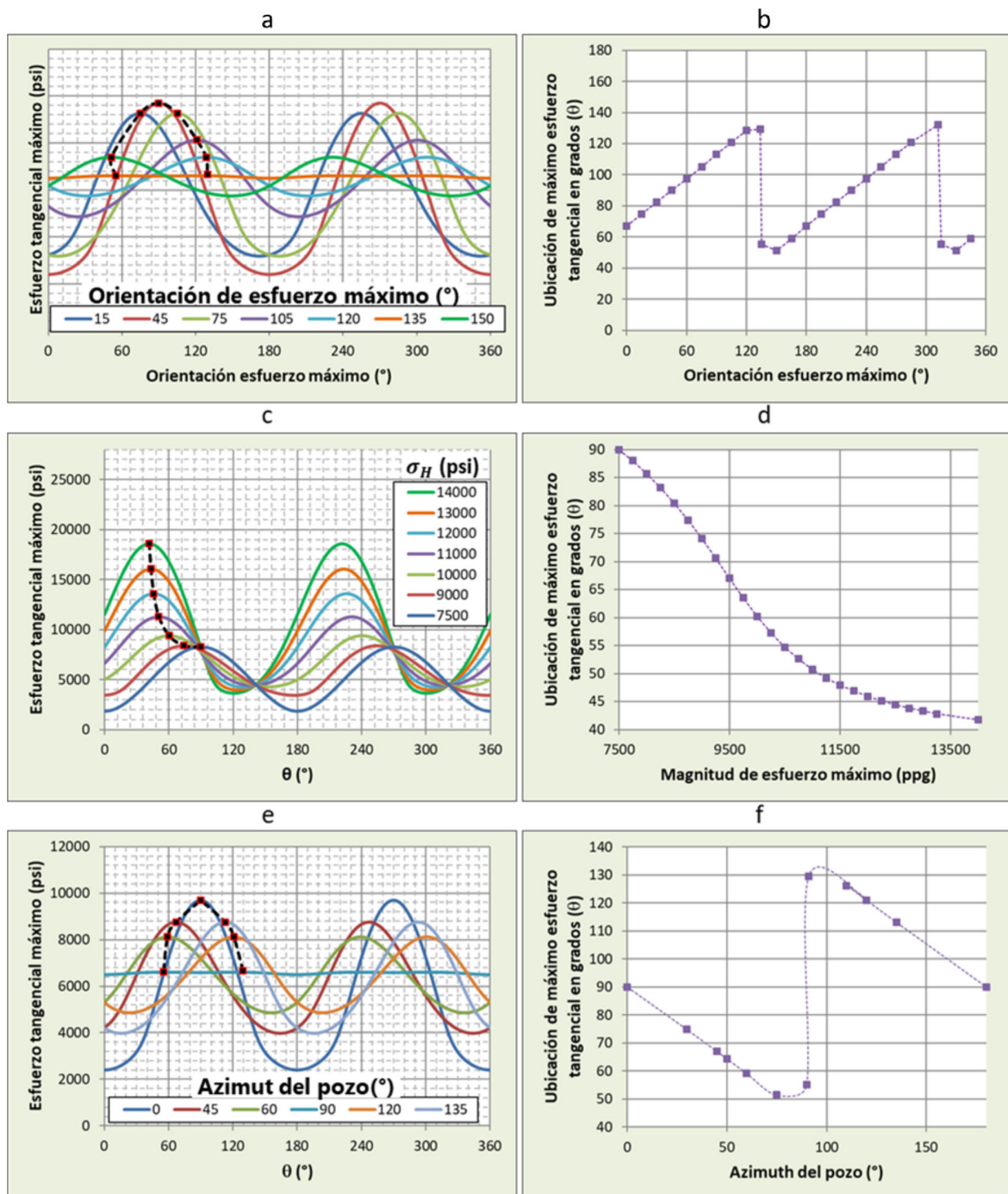


Figura 5. a) Efecto de la orientación del esfuerzo horizontal máximo en la distribución del esfuerzo tangencial máximo alrededor del pozo. b) Ubicación de máximo esfuerzo tangencial (ángulo de inicio de falla compresiva) en función de la orientación del esfuerzo horizontal máximo. c) Efecto de la magnitud del esfuerzo horizontal máximo en la distribución del esfuerzo tangencial máximo alrededor del pozo. d) Ubicación de máximo esfuerzo tangencial (ángulo de inicio de falla compresiva) en función de la magnitud del esfuerzo horizontal máximo. e) Efecto del azimut del pozo en la distribución del esfuerzo tangencial máximo alrededor del pozo. f) Ubicación de máximo esfuerzo tangencial (ángulo de inicio de falla compresiva) en función del azimut del pozo.

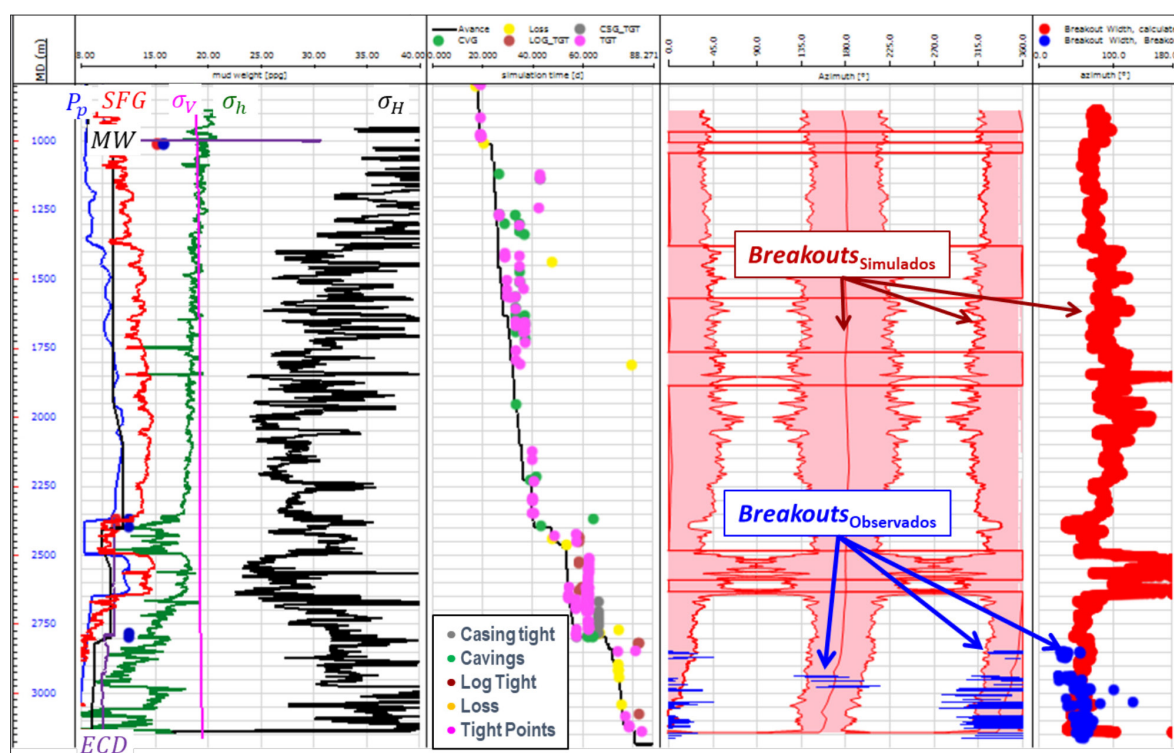


Figura 6. Ejemplo de calibración de esfuerzos en un pozo desviado a partir del ajuste de ancho y magnitud de *breakouts* simulados con los observados de registros de imagen.

Calibración de esfuerzos en pozos desviados a partir de ubicación de *breakouts* de registros caliper

En los casos en los que el pozo de estudio no tiene registro de imagen o la imagen no tiene la calidad suficiente para caracterizar los *breakouts*, es posible que el pozo cuente con registro caliper orientado de múltiples brazos. Si el registro caliper permite identificar la ubicación de *breakouts*, se puede hacer uso del hecho de que la ubicación de estos son función de la magnitud y orientación de los esfuerzos in situ.

El análisis de registros caliper de múltiples brazos orientados permite tener un registro a las profundidades donde se presentan *breakouts* con sus respectivas ubicaciones alrededor del pozo. Estas técnicas aplican diferentes metodologías con el fin de discriminar *breakouts*, de otros tipos de ensanchamiento de pozo tales como *washouts* o *key seats*. Plumb y Hickman (1985) y Jairosinski (1998) proponen procedimientos para la interpretación de ubicación de *breakouts* a partir de caliper orientados de 4 y 6 brazos, respectivamente. Debido a que el interés del presente trabajo se enfoca en la caracterización de esfuerzos no se profundiza en las técnicas para caracterizar *breakouts*.

La técnica propuesta en el presente trabajo consiste en obtener la magnitud y orientación de esfuerzos que mejor representan la ubicación de los *breakouts* observados en el registro caliper en un pozo desviado. El flujo de trabajo propuesto consiste en los siguientes pasos:

1. Caracterizar el esfuerzo vertical, la presión de poro, las propiedades elásticas (relación de Poisson y módulo de Young) y las propiedades de resistencia (UCS y ángulo de fricción interna)
2. Determinar puntos de calibración para el esfuerzo horizontal mínimo a partir de la interpretación de pruebas LOTs (*Leak off tests*), XLOTs (*Extended Leak off tests*), DFITs (*Diagnostic Fracture Injection Tests*), minifrac, etc.
3. Obtener múltiples pares de deformaciones tectónicas ϵ_h y ϵ_H que permitan que el perfil de esfuerzo horizontal mínimo calibre con las mediciones mencionadas en el paso.
4. Interpretar el registro caliper de múltiples brazos orientados para obtener un registro de las profundidades de *breakouts* con sus respectivas ubicaciones alrededor del pozo.
5. A las profundidades de interés (profundidades donde se interpretaron *breakouts*), obtener la distribución de esfuerzos tangenciales máximo y mínimo (σ_{tmax} y σ_{tmin}) de las ecuaciones (5) a (21) para cada par de deformaciones tectónicas obtenidas en el paso 3 y para diferentes orientaciones de esfuerzo horizontal máximo.
6. Para cada profundidad de interés, y cada escenario de esfuerzos (cada escenario conformado por un par de deformaciones tectónicas y una orientación de esfuerzo horizontal máximo), evaluar si alrededor del pozo se dan las condiciones para que se presente falla (ecuación 26). Si el pozo falla, identificar el ángulo donde inicia la falla, correspondiente al punto de mayor esfuerzo tangencial máximo
7. Para cada profundidad de interés y cada escenario esfuerzos, hallar la mínima diferencia entre la ubicación angular de *breakout* observado y el ángulo de inicio de falla del modelo ($\Delta\theta_i$) (paso 6).
8. Identificar el escenario para el cual existe el menor error entre la ubicación de los *breakouts* observados y los *breakouts* simulados.

La función de error usada en el presente trabajo tiene la siguiente forma:

$$error = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta\theta_i^2} \quad (33)$$

Donde N es el número de *breakouts* interpretados en el registro caliper. A las profundidades donde se interpretaron *breakouts* y el modelo no predijo falla, se asignó un valor de 90° a $\Delta\theta_i$.

Aplicación de la metodología propuesta para la calibración de esfuerzos en pozos desviados a partir de ubicación de *breakouts* de registros caliper

La metodología propuesta fue implementada en un campo ubicado en la cuenca oriente ecuatoriana. La zona de estudio es tectónicamente activa, con múltiples eventos de inestabilidad durante la perforación que han generado pérdidas de pozos. Este hecho evidencia la importancia de tener un modelo geomecánico calibrado que permita entender la causa raíz de los eventos geomecánicos y planear de forma adecuada la ventana de lodo de perforación.

Entre la información disponible para la calibración de esfuerzos en el campo de estudio se contaba con pruebas de fractura en 2 pozos (pozos A y pozos B) de las cuales fue posible obtener presiones de cierre para la calibración del esfuerzo horizontal mínimo. Luego de realizar los pasos 1 y 2 del flujo de trabajo propuesto, se obtuvieron pares de constantes de deformación tectónicas que permitieran calibrar los perfiles de esfuerzo horizontal mínimo en los pozos A y B (se asume que los valores de las deformaciones tectónicas se mantienen a través del campo).

Se tenía registro de imagen en un único pozo (pozo C); sin embargo, este registro no tenía la calidad requerida para caracterizar la ubicación y ancho de *breakouts*. No obstante, existía información de caliper de 6 brazos orientado en este mismo pozo, lo que permitió realizar la interpretación de ubicación de *breakouts* (Figura 7a).

Para los pares de deformaciones tectónicas que permitieron reproducir perfiles de esfuerzos acordes a las presiones de cierre en los pozos A y B, se identificó la orientación de esfuerzo máximo que reproducía de mejor manera los *breakouts* observados. La Figura 7b ilustra el comportamiento del error asociado a cada escenario evaluado. Se construyó el modelo calibrado de esfuerzos con el escenario que arrojó el menor error.

La Figura 8 presenta la forma en la que el modelo calibra con las presiones de cierre y la ubicación y anchos de *breakout* de los pozos de estudio. En las Figuras 8a y 8b, se presentan los perfiles de esfuerzos calibrados con las presiones de cierre obtenidas en las pruebas de fractura en los pozos A y B. En la Figura 8c se presentan los *breakouts* simulados con los perfiles de esfuerzos calibrados y su comparación con los *breakouts* interpretados con el registro caliper.

Los perfiles de esfuerzos calibrados con la técnica propuesta permitieron construir las ventanas operativas del lodo de perforación para la planificación y seguimiento de la última campaña de perforación de pozos en el área. A pesar de que en algunos pozos de la campaña de perforación se han tenido dificultades asociadas a ángulos de ataques con los que se perforan formaciones con planos de debilidad, el modelo ha ayudado a disminuir potenciales eventos de inestabilidad. Adicionalmente, los modelos calibrados han sido utilizados como información de entrada para realizar estudios para la evaluación de las condiciones críticas para producción de arena. Estos últimos estudios han sido usados para la evaluación de opciones de completamiento de los pozos.

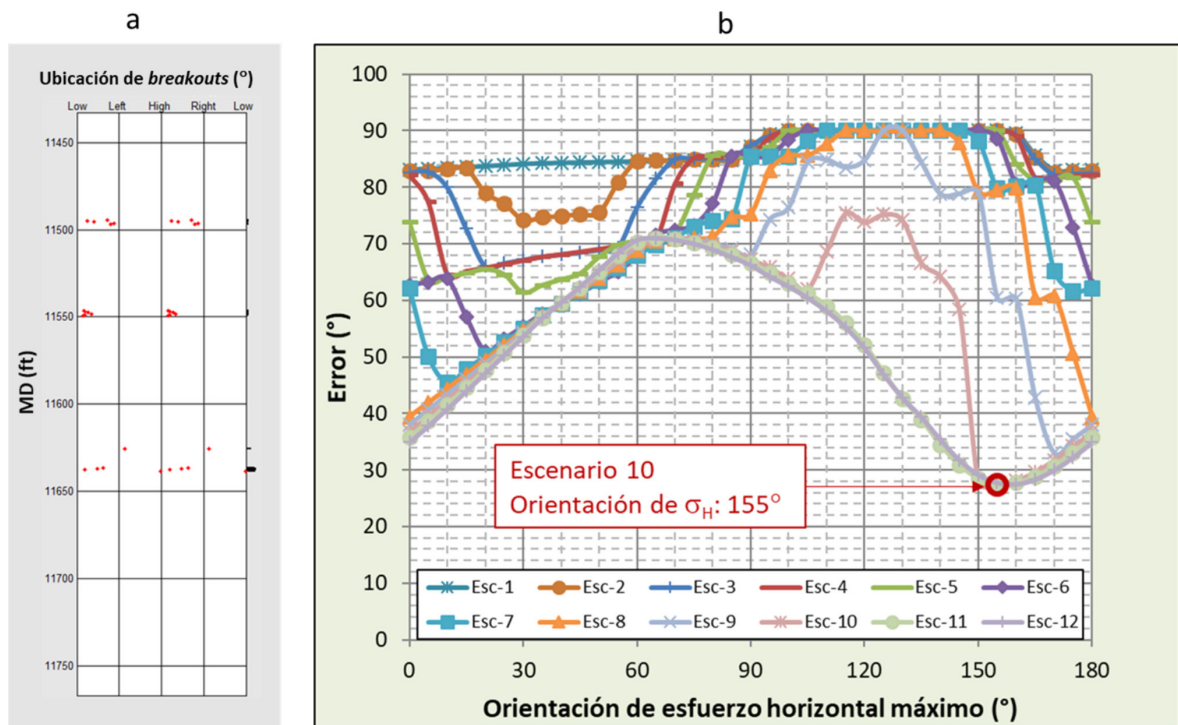


Figura 7. a) Ubicación de *breakouts* interpretados en el pozo C b) Cálculo de errores entre la ubicación de *breakouts* interpretados y simulados para los diferentes escenarios de deformaciones y orientación de esfuerzo horizontal máximo. El punto marcado con rojo representa la selección de modelo final.

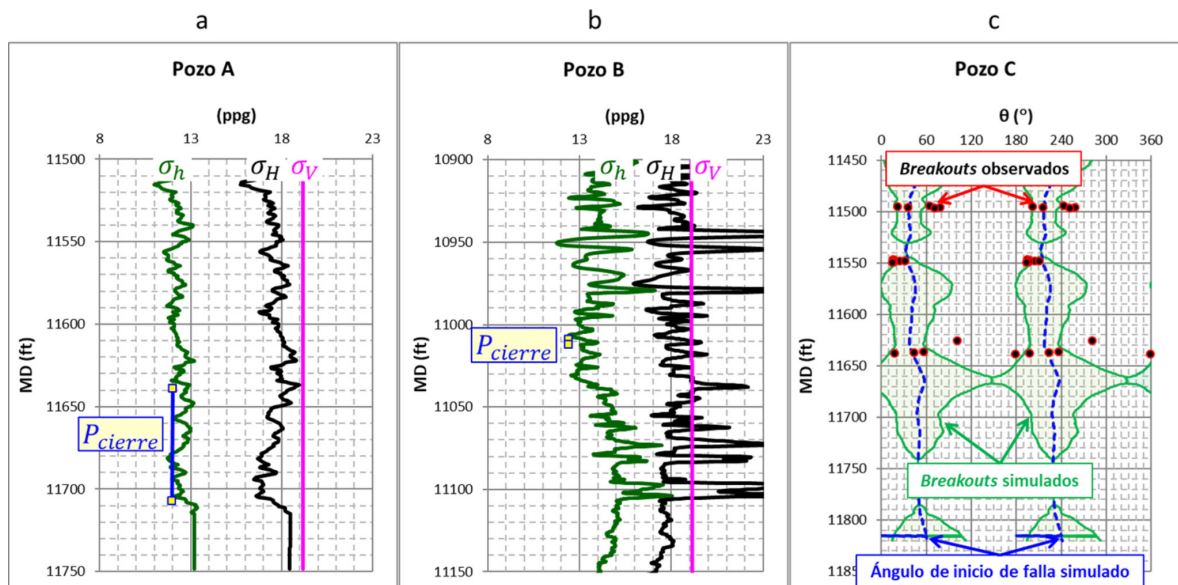


Figura 8. a) Perfiles de esfuerzos calibrados y presión de cierre en el pozo A. b) Perfiles de esfuerzos calibrados y presión de cierre en el pozo B. c) Comparación de *breakouts* observados y *breakouts* simulados con el modelo de esfuerzos calibrados en el pozo C.

CONCLUSIONES

La calibración de esfuerzos horizontales es una de las tareas de mayor incertidumbre durante la construcción de modelos geomecánicos. A su vez disminuir la incertidumbre asociada a la estimación y calibración de esfuerzos tiene un alto impacto en la determinación del comportamiento geomecánico de las rocas.

El presente trabajo presenta metodologías ampliamente usadas para la calibración de esfuerzos a partir de la interpretación de ancho y ubicación de *breakouts* en pozos verticales y desviados. Debido a la compleja relación entre los esfuerzos alrededor del pozo y los esfuerzos *in-situ*, la calibración de esfuerzos en pozos desviados es más compleja que en pozos verticales. Se ilustra un ejemplo de la calibración de esfuerzos en un pozo desviado a partir de la interpretación de ancho y ubicación de *breakouts* de registros de imagen en un pozo inclinado en Camisea (Perú).

Por último, se plantea una nueva metodología para la calibración de esfuerzos horizontales en pozos desviados a partir de la caracterización de la ubicación de *breakouts* de registros caliper. Se presenta un caso de campo donde se implementó esta metodología en la cuenca oriente ecuatoriana. La calibración de esfuerzos fue fundamental en la etapa de planeación de perforación y completamiento de pozos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Pluspetrol la autorización para la publicación de este artículo.

REFERENCIAS CITADAS

- Blanton, T.L. y Olson, J.E., 1999. Stress Magnitudes from Logs: Effects of Tectonic Strains and Temperature, SPE Res. Eval. & Eng., v.2, Issue 01, p. 62-68, San Antonio, Texas
- Fjaer, E., Holt, R.M., Horsrud, P., Raaen, A.M. y Risnes, R., 2008. Petroleum Related Rock Mechanics, 2nd edition. Elsevier, 491pp
- Jarosinski, M., 1998. Contemporary stress field distortion in the Polish part of the Western Outer Carpathians and their basement, Tectonophysics v. 297, p. 91-119.
- Plumb, R.B., y Hickman, S.H., 1985. Stress induced borehole elongation: a comparison between the four-arm dipmeter and borehole televiewer in the Auburn geothermal well, J. Geophys. Res., v. 90, p. 5513-5521.
- Zhang, J.J., 2019. Applied Petroleum Geomechanics, 1st edition. Gulf Professional Publishing, 516pp
- Zoback, M.D., 2007. Reservoir Geomechanics, 1st edition. Cambridge University Press, 449pp

