

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA DE PETRÓLEO, GAS NATURAL Y
PETROQUÍMICA



DETERMINACIÓN DE LA DIRECCIÓN DE LOS ESFUERZOS
HORIZONTALES MEDIANTE ANÁLISIS DE FALLAS DE LA PARED DEL
POZO “BREAKOUTS” EN EL CAMPO DORISSA - PERÚ

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO DE PETRÓLEO

ELABORADO POR:

ROBERTO DANIEL TORRES SANCHEZ

PROMOCIÓN 2008-I

LIMA – PERÚ

2009

DEDICATORIA

A maestra vida por enseñarme las bondades de Dios y enlazarme con la naturaleza de los seres que amo: mi Madre, mi Padre, mis hermanas y hermanos, mis familiares y amigos; a la sabiduría y el conocimiento logrado gracias a disfrutar la vida con ellos.

A mi alma mater, la Facultad de Petróleo y Gas Natural de la UNI, por la educación integral que recibí en sus aulas y a sus catedráticos cuales fueron los transmisores idóneos del saber.

A la compañía Schlumberger cuyo éxito a nivel mundial habla de su calidad de servicio y al equipo de DCS Perú conformado por excelentes profesionales y al cual me siento orgulloso de pertenecer; mis agradecimientos por brindarme su total apoyo, respaldo y el entorno para desarrollarme.

A la compañía Pluspetrol por haberme permitido realizar este estudio en el Campo Dorissa, tengo la convicción que este estudio les servirá de base para investigaciones y proyectos futuros en el desarrollo de esta zona.

CONTENIDO

DEDICATORIA	2
PRÓLOGO	7
INTRODUCCIÓN	9
TEXTO PRINCIPAL	11
1. EL ÁREA DE ESTUDIO: CAMPO DORISSA	11
1.1 Localización	11
1.2 Estratigrafía	14
1.3 Estructura	15
2. FUNDAMENTO TEÓRICO	17
2.1 Esfuerzos	17
2.2 Deformación	20
2.3 Comportamiento de las rocas	21
2.4 Curva Esfuerzo – Deformación	22
2.5 Estado de los esfuerzos en la Tierra	24
2.6 Mapa Mundial de Esfuerzos – “World Stress Map” (WSM)	25
2.7 Mapas geológicos	27
2.8 Fallas de la pared del pozo “breakouts”	28
3. MÉTODO	35
3.1 Registros para identificación de “breakouts”	35
3.1.1 Registro calíper orientado de 4 brazos	35
3.2 Preparación de datos	40
3.3 Análisis de datos	41

3.3.1 Caliban	41
3.3.2 Microsoft Excel	44
4. RESULTADOS	45
4.1 Identificación de "breakouts"	49
4.1.1 Dorissa1	50
4.1.2 Dorissa2	54
5. DISCUSIÓN	60
6. CONCLUSIONES	62
7. RECOMENDACIONES	64
REFERENCIAS	65
A) BIBLIOGRAFÍA	65
B) APÉNDICES	66
Otras herramientas para identificación de "breakouts"	66
a) "Formation MicroScanner" / "Formation MicroImager"	66
b) "Borehole Televiewer"	68

Lista de ilustraciones

Ilustración 1 – Ubicación del Lote IAB – Perú.....	12
Ilustración 2 - Ubicación del Campo Dorissa – Lote IAB.....	13
Ilustración 3 – Columna estratigráfica del campo Dorissa.....	14
Ilustración 4 - Alineamientos estructurales principales - Lote IAB.....	15
Ilustración 5 - Mapa estructural – Campo Dorissa.....	16
Ilustración 6 - Fuerza en un punto P.....	17
Ilustración 7 - Descomposición bidimensional del esfuerzo normal y cortante.....	18
Ilustración 8 - Componentes deformacionales normal y cortante.....	20
Ilustración 9 - Curva Esfuerzo – Deformación.....	23
Ilustración 10 - Mapa Mundial de Esfuerzos – “World Stress Map” (WSM).....	26
Ilustración 11 - Leyenda del WSM.....	27
Ilustración 12 - Falla – Comportamiento frágil.....	27
Ilustración 13 - Plegamiento – Comportamiento dúctil.....	28
Ilustración 14 – Concentración de los esfuerzos alrededor del pozo.....	31
Ilustración 15 – Relación entre la forma del pozo y ΔP (pozo – formación).....	31
Ilustración 16 – “Breakout”.....	32
Ilustración 17 - Trayectoria de pozos.....	33
Ilustración 18 - Optimización de fractura hidráulica.....	33
Ilustración 19 - Baleo para evitar la producción de arena.....	34
Ilustración 20 - Tortuosidad de las fracturas.....	34
Ilustración 21 - Geometría de la herramienta de calíper de 4 brazos en el pozo y las variables usadas para interpretar los breakouts”.....	36
Ilustración 22 - Tipos comunes de alargamientos del pozo y su respuesta en el registro calíper.....	37
Ilustración 23 - Algoritmo de la sección transversal de un “breakout” del pozo.....	38
Ilustración 24 - Leyenda convencional del registro Caliban.....	43
Ilustración 25 – Flujo de trabajo.....	45
Ilustración 26 - Mapa Mundial de Esfuerzos - Lote IAB.....	46
Ilustración 27 - Dirección de los esfuerzos a partir del mapa estructural del Campo Dorissa.....	47
Ilustración 28 - Registro de calíper orientado – Dorissa1.....	50
Ilustración 29 - Registro de detección de breakouts mediante Caliban – Dorissa1.....	51
Ilustración 30 - Histograma de frecuencia de la dirección de los “breakouts” – Dorissa1.....	53
Ilustración 31 - Dirección de los “breakouts” – Dorissa1.....	53
Ilustración 32 - Registro de calíper orientado – Dorissa2.....	54
Ilustración 33 - Registro de detección de “breakouts” mediante Caliban – Dorissa2.....	55
Ilustración 34 - Histograma de frecuencia de la dirección de los breakouts –Dorissa2.....	57
Ilustración 35 - Dirección de los breakouts – Dorissa2.....	57
Ilustración 36 - Promedio de la dirección de los esfuerzos horizontales – Campo Dorissa.....	58
Ilustración 37 - Dirección del Esfuerzo Horizontal Máximo – Dorissa1 y Dorissa2.....	58
Ilustración 38 - Dirección del esfuerzo horizontal máximo en el Campo Dorissa – WSM.....	59
Ilustración 39 - Esquema de una herramienta FMS/FMI.....	66
Ilustración 40 – Modelo de registro de FMI.....	67
Ilustración 41 - Esquema del borehole televiewer.....	68
Ilustración 42 – Modelo de registro de BHTV.....	69

Lista de tablas

Tabla 1 - Criterio para identificación de “breakouts” a partir del calíper orientado de 4 brazos de acuerdo a Plumb y Hickman.....	38
Tabla 2 - Clasificación de calidad para los “breakouts”.....	39
Tabla 3 - Análisis de “breakouts” – Dorissa1.....	52
Tabla 4 - Análisis de “breakouts” – Dorissa2.....	56

Lista de Símbolos

σ	=	Vector esfuerzo en un punto dado
σ_n	=	Componente normal del vector esfuerzo
τ	=	Componente cortante del vector esfuerzo
σ_x	=	Esfuerzo en la dirección "x"
σ_y	=	Esfuerzo en la dirección "y"
τ_{xy}	=	Esfuerzo cortante perpendicular a "x" en dirección "y"
τ_{yx}	=	Esfuerzo cortante perpendicular a "y" en dirección "x"
ε	=	Deformación longitudinal
γ	=	Deformación cortante
σ_1	=	Esfuerzo principal máximo
σ_2	=	Esfuerzo principal intermedio
σ_3	=	Esfuerzo principal mínimo
σ_v	=	Esfuerzo vertical u "overburden"
σ_h	=	Esfuerzo horizontal mínimo
σ_H	=	Esfuerzo horizontal máximo
S_{zz}	=	Esfuerzo axial efectivo
S_{rr}	=	Esfuerzo radial efectivo
$S_{\theta\theta}$	=	Esfuerzo circunferencial efectivo
$S_{r\theta}$	=	Esfuerzo tangencial

PRÓLOGO

Este estudio consta de 7 capítulos los cuales no guiarán de manera gradual a encontrar el objetivo principal y motivo de este trabajo, se llegará a la determinación de la dirección de los esfuerzos horizontales mediante análisis de “breakout ” en el pozo que se realizó en el Campo Dorissa en el NE del Perú.

El capítulo 1 trata del área de estudio, sobre su localización, estratigrafía y estructura para lograr un mayor conocimiento de donde se aplicó este estudio y su configuración geológica.

El capítulo 2 aborda el fundamento teórico para el entendimiento de las bases, los principios y procedimientos adecuados para llevarlo a cabo y del valor e importancia de la consecución de esta variable importante.

En el capítulo 3 se aplica la metodología adecuada usando los criterios indicados y manejo de datos óptimo.

En el capítulo 4 se revisan los resultados obtenidos después de aplicar eficientemente la metodología.

En el capítulo 5 se discute la calidad de los resultados así como las observaciones que se presentaron en el transcurso del estudio.

El capítulo 6 contiene las conclusiones esenciales.

En el capítulo 7 se dictan las recomendaciones para realzar este estudio.

Se agradece a las personas e instituciones que brindaron apoyo sustancial para realizar este trabajo. A continuación se detallará el tratado.

INTRODUCCIÓN

El entendimiento de las características de un campo nos destinará inevitablemente a un mejor desarrollo de éste, por ejemplo, el conocimiento de los procesos en la corteza terrestre relacionados a los esfuerzos in situ como resultado de las actividades naturales (tectónica de placas, sismos, etc.) y de las resultantes de la actividad petrolera (perforación y construcción de pozos, producción de fluidos, etc.) es de suma importancia para la toma de decisiones de ingeniería asociadas a la estabilidad de pozos, diseño de baleo y fracturamiento, etc. Y otras etapas esenciales en la vida de un campo petrolero o gasífero.

Este estudio tiene como objetivos: mostrar y aplicar un procedimiento adecuado para estimar la dirección de los esfuerzos horizontales en el área de estudio - el Campo Dorissa – el cual no tenía, hasta antes de este estudio, información alguna de este parámetro.

La teoría de los “breakouts” y su método nos brindará información sobre los esfuerzos en intervalos donde los “breakouts” ocurran en el pozo, las diversas aplicaciones de conocer la dirección de los esfuerzos a lo largo del desarrollo de la zona resaltarán su importancia, además, se discutirá la calidad de los resultados

obtenidos y se conseguirán conclusiones y recomendaciones acerca de las acciones para realzar este estudio.

Los “breakouts” son zonas de falla de la pared del pozo en respuesta a altos esfuerzos tangenciales compresivos. Las fallas alargan la sección transversal del pozo desde su forma circular original y son observados mediante registros geométricos. El análisis de los “breakouts” para obtener la dirección de los esfuerzos horizontales mediante registros de calíper orientado es capaz de brindar resultados fiables y precisos si se tiene en cuenta los criterios indicados para tal caso.

TEXTO PRINCIPAL**CAPITULO 1****1. EL ÁREA DE ESTUDIO: CAMPO DORISSA****1.1 Localización**

El Campo Dorissa, actualmente operado por la compañía Pluspetrol se ubica en la Cuenca Marañón en el noreste del Perú, dentro del Lote 1AB el cual se encuentra en el departamento de Loreto, entre los ríos Pastaza y Corrientes. Fue descubierto en el año 1978. (Ilustraciones 1 y 2)



Ilustración 1 – Ubicación del Lote 1AB - Perú

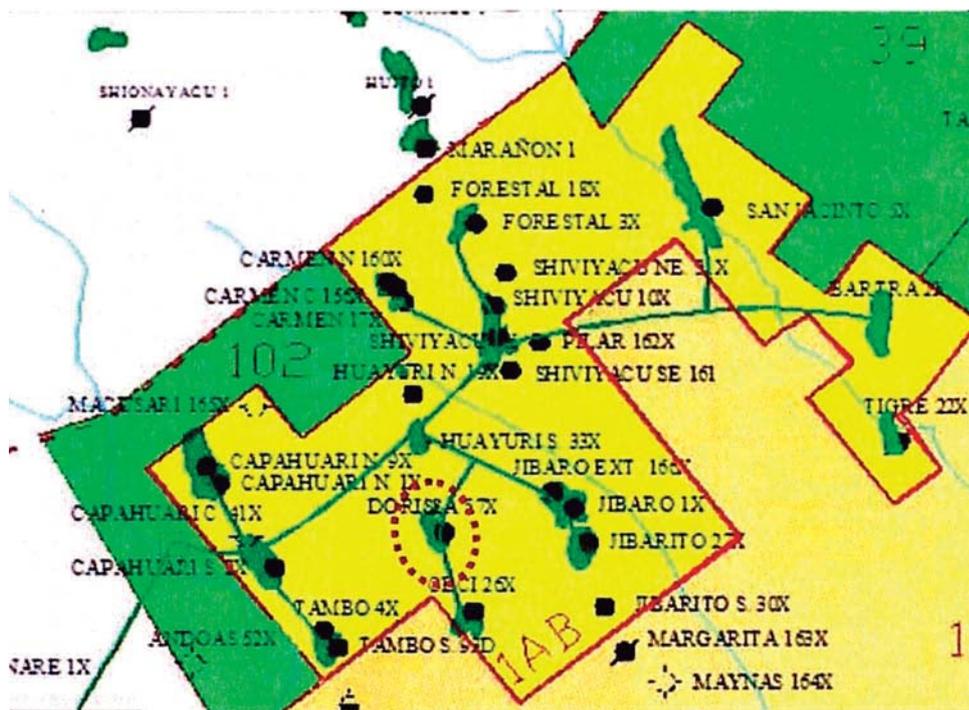


Ilustración 2 - Ubicación del Campo Dorissa – Lote 1AB

1.2 Estratigrafía

La estratigrafía del campo Dorissa, ha sido ampliamente estudiada y se tiene una columna estratigráfica generalizada.

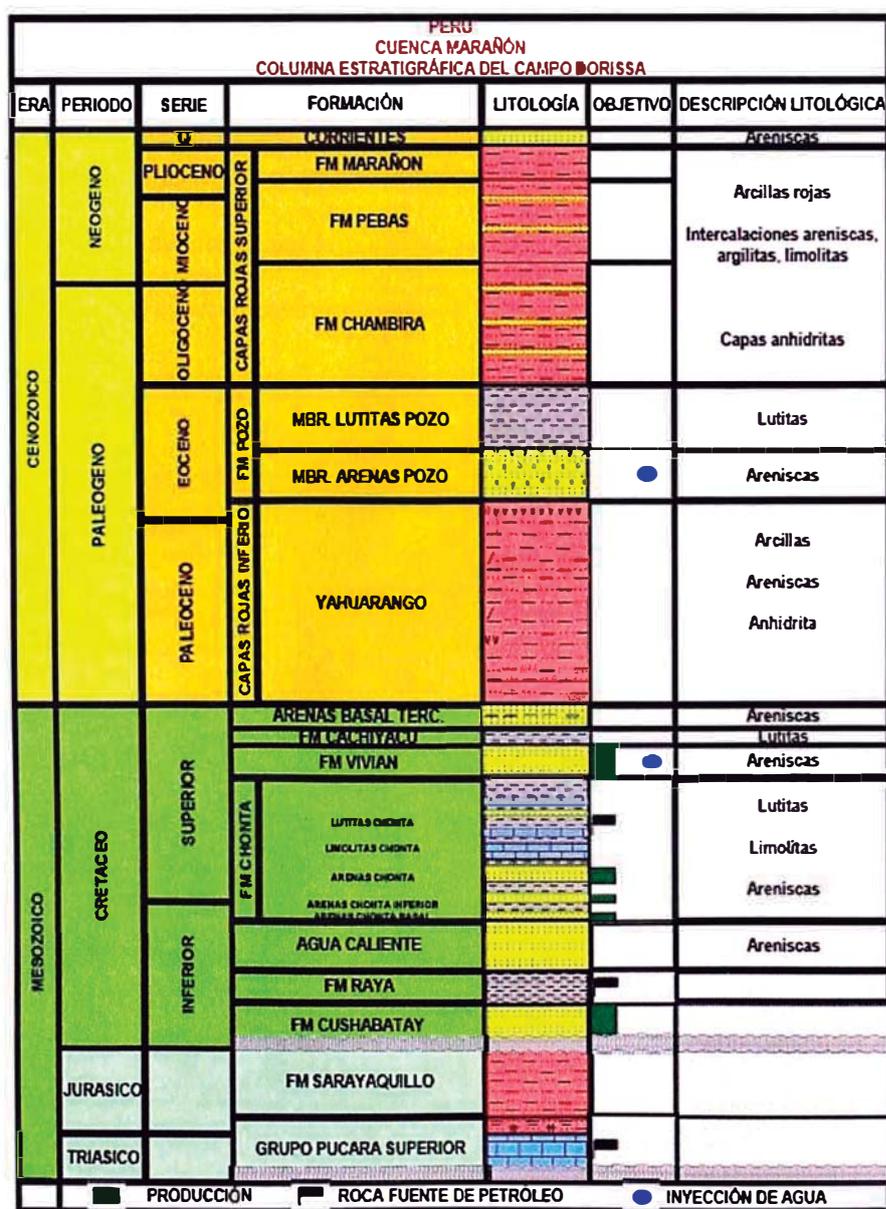


Ilustración 3 – Columna estratigráfica del Campo Dorissa

1.3 Estructura

Por anteriores estudios de sismica se tiene mapeado 4 alineamientos estructurales principales en el Bloque IAB. La estructura Dorissa forma parte del alineamiento: Carmen, Huayuri, Dorissa, Ceci.

Estas estructuras son del tipo anticlinales y monoclinales suaves relativamente simples; el buzamiento actual regional de la cuenca es muy suave de 1° a 2° grados en el bloque IAB, incrementándose hacia el Oeste. [Seminario, 1999]

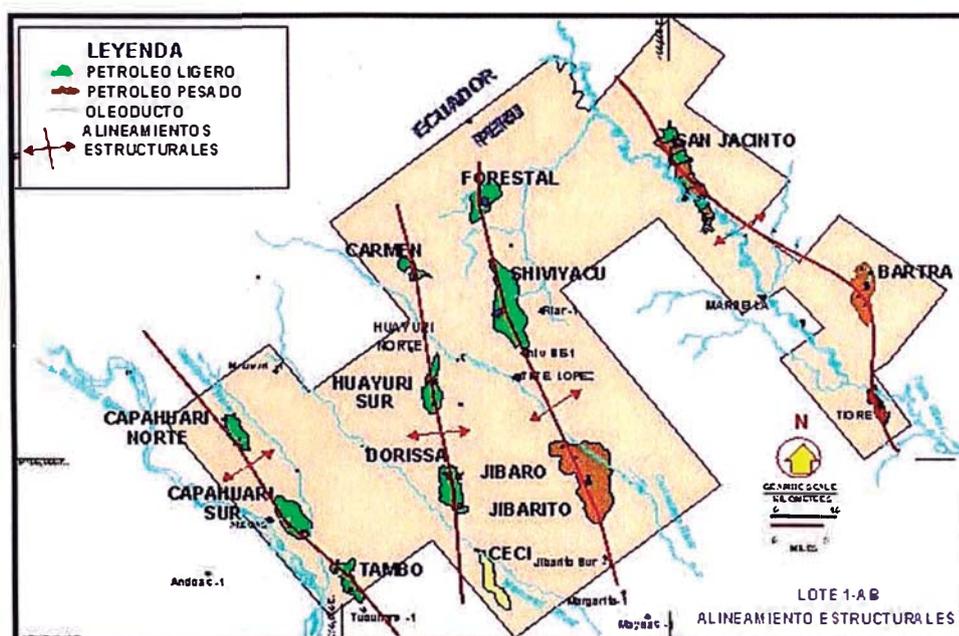


Ilustración 4 - Alineamientos estructurales principales - Lote 1AB ¹¹

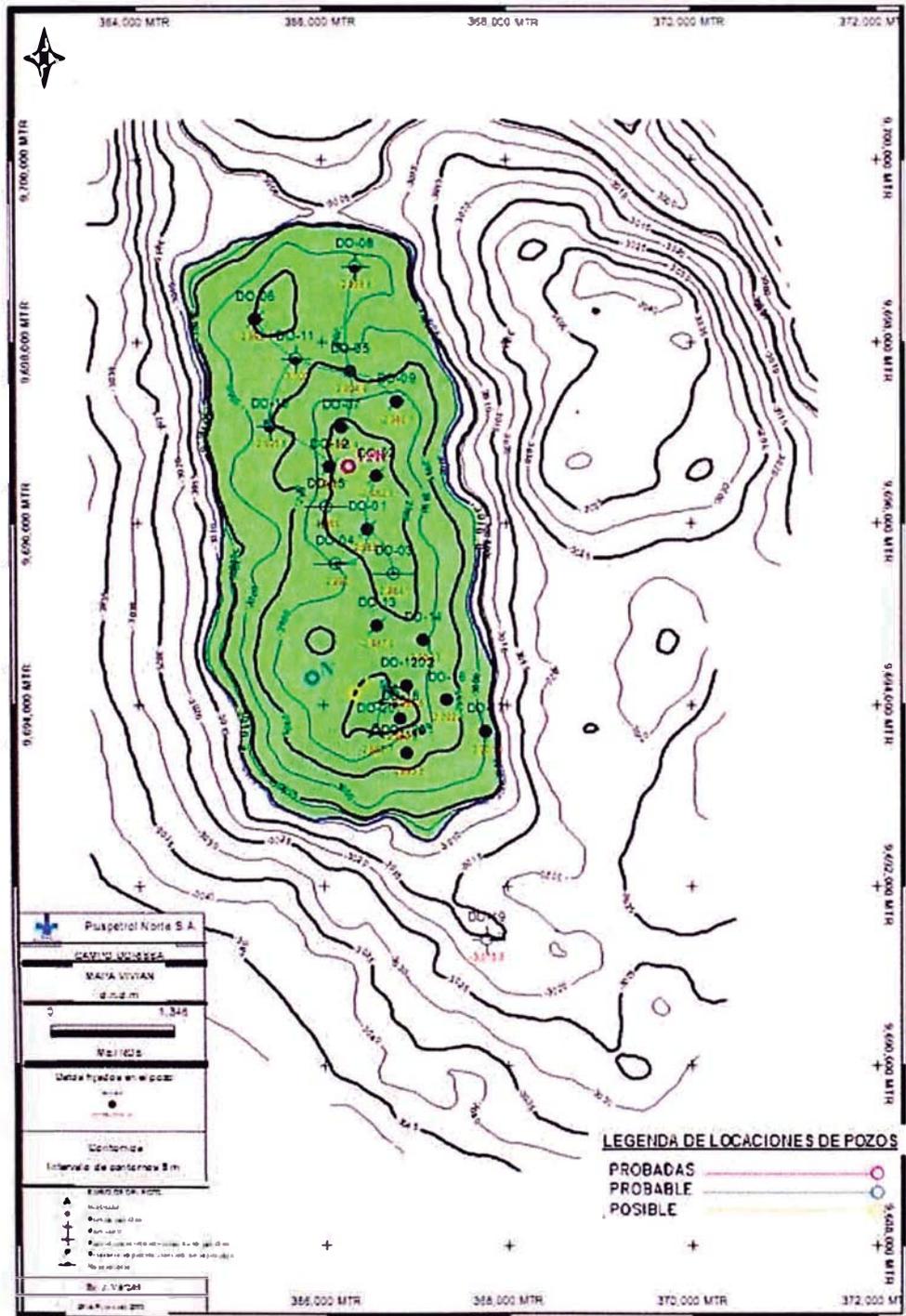


Ilustración 5 - Mapa estructural – Campo Dorissa

CAPITULO 2

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

Para comprender mejor este estudio emplearemos la mecánica de rocas, el estudio de la estática y dinámica de rocas o masas de rocas; aplicaremos la ingeniería que envuelve especialmente la construcción de estructuras sobre o dentro de masas de rocas e incluye el proceso de diseño; y la geología estructural, que trata con la descripción y análisis de la estructura de las masas de rocas.

2.1 Esfuerzos

Considerando un plano orientado aleatoriamente de área ΔA con un punto P en el centro dentro de un cuerpo a través del cual se ejerce una fuerza resultante ΔF , el vector esfuerzo σ en ese punto se define como:

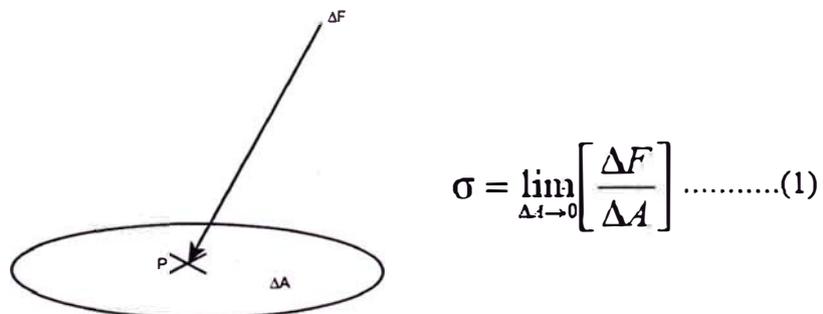
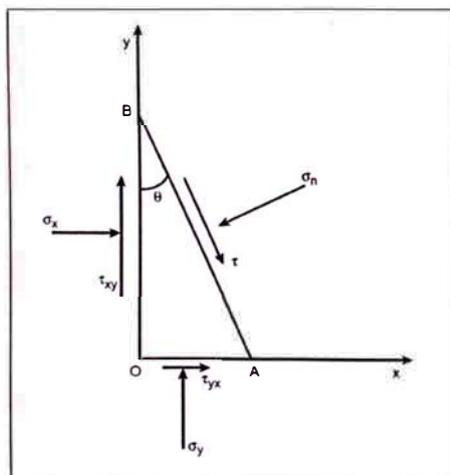


Ilustración 6 - Fuerza en un punto P ^[2]

Se expresa como fuerza por unidad de área. Por convención, la compresión es positiva. El esfuerzo resultante σ puede ser descompuesto en una componente normal σ_n y una componente cortante τ .

Una cantidad infinita de planos pueden ser dibujados a través de un punto dado variando, por la misma razón, los valores de σ_n y τ . La condición del esfuerzo, por lo tanto, depende de la inclinación. Consecuentemente, para la descripción completa de un esfuerzo se debe especificar su magnitud, dirección, sentido y además la dirección de la superficie sobre la cual actúa. En una situación bidimensional (2D), si σ_x , σ_y y τ_{xy} son conocidos, el estado de esfuerzo sobre cualquier plano con orientación normal a un ángulo θ desde O_x puede ser derivado usando las siguientes expresiones:



$$\sigma_n = \sigma_x \cos^2 \theta + 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta + \sigma_y \sin^2 \theta \quad \dots(2)$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_x) \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \quad \dots(3)$$

Ilustración 7 - Descomposición bidimensional del esfuerzo normal y cortante ^[2]

Estas expresiones se obtienen escribiendo ecuaciones de equilibrio de fuerzas a lo largo de las direcciones σ_n y τ , respectivamente. El equilibrio de momento implica que τ_{xy} es igual a τ_{yx} . Siempre existen dos orientaciones perpendiculares a ΔA para el cual las componentes del esfuerzo cortante desaparecen; estos son conocidos como planos principales. Los esfuerzos normales asociados con estos planos son conocidos como esfuerzos principales. En dos dimensiones, las expresiones para los esfuerzos principales pueden ser encontrados colocando $\tau = 0$ ó debido a que en los valores mínimo y máximo de los esfuerzos normales, se puede tomar su derivada con respecto al ángulo θ e igualarla a cero. En cada caso obtenemos la siguiente expresión para el valor de θ para el cual el esfuerzo cortante desaparece:

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}\right) \dots(4)$$

Y los dos componentes del esfuerzo principal σ_1 y σ_2 son:

$$\sigma_1 = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \left[\tau_{xy}^2 + \frac{1}{4}(\sigma_x - \sigma_y)^2 \right]^{1/2} \dots(5)$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) - \left[\tau_{xy}^2 + \frac{1}{4}(\sigma_x - \sigma_y)^2 \right]^{1/2} \dots(6)$$

Si este concepto se generaliza para tres dimensiones, puede mostrar que seis componentes independientes (tres componentes normales y tres cortantes) son necesarias para definir el esfuerzo sin ambigüedad. El vector esfuerzo para cualquier dirección de ΔA puede generalmente ser encontrado escribiendo ecuaciones de

fuerzas en equilibrio en varias direcciones. Tres planos principales para los cuales los componentes del esfuerzo cortante desaparecen — y, por lo tanto, los tres esfuerzos principales— existen. Es conveniente representar el estado de los esfuerzos a un punto dado usando métodos gráficos.

2.2 Deformación

Cuando un cuerpo está sujeto a un campo de esfuerzos, se deforma: las nuevas posiciones relativas de sus puntos interiores son tales que su posición inicial y final no se corresponden mediante movimiento de cuerpo rígido (translación y/o rotación). La deformación a lo largo de una dirección arbitraria puede ser descompuesta en dos componentes:

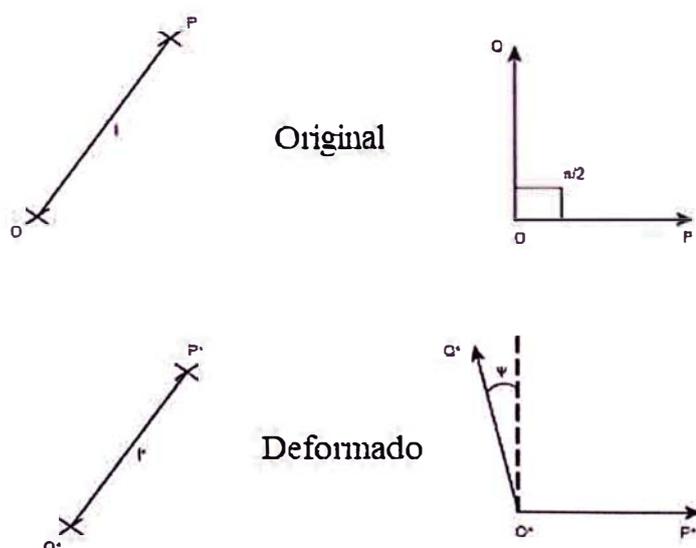


Ilustración 8 - Componentes deformacionales normal y cortante ¹²¹

- La deformación longitudinal (elongación) se define como

$$\epsilon = \lim_{l \rightarrow 0} \frac{l - l^*}{l} \dots(7)$$

- La deformación cortante se define como

$$\gamma = \tan(\psi) \dots(8)$$

Donde ψ es el cambio del ángulo entre 2 direcciones que son perpendiculares antes de la deformación.

Consecuentemente, la deformación (una proporción de longitudes o cambio de ángulo) es adimensional. Debido a que los esfuerzos compresivos son positivos, una deformación longitudinal positiva (ϵ) corresponde a una disminución de longitud, y una deformación cortante positiva (γ) refleja un aumento en el ángulo entre dos direcciones que son inicialmente perpendiculares. Las deformaciones principales pueden ser definidas como componentes deformacionales longitudinales actuando en planos donde las deformaciones cortantes han desaparecido.

2.3 Comportamiento de las rocas

Cuando una roca o elemento de la tierra es sometido a una carga, se deforma; a mayor nivel de esfuerzos la roca experimenta mayor deformación. Es un

importante aspecto de la mecánica de rocas determinar la relación entre esfuerzo y deformación.

2.4 Curva Esfuerzo – Deformación

La relación típica de esfuerzo – deformación para rocas se muestra en la ilustración 9. La prueba es conducida bajo presión de confinamiento constante (p_c) y una razón de deformación axial constante. Las medidas incluyen los valores de esfuerzo axial, deformación axial y deformación radial. Cuando la presión confinante es aplicada a la muestra, el origen del gráfico esfuerzo – deformación es usualmente trasladado para remover la influencia de la carga hidrostática en el esfuerzo y deformación (el esfuerzo axial es la diferencial $\sigma_a - p_c$).

Durante los estados iniciales de carga, desde O al punto A, la roca se pone rígida. Este régimen no lineal es probablemente debido al cierre de microfalla pre-existentes en la muestra. Si la carga aumenta mucho más, la curva de esfuerzo – deformación se vuelve lineal (desde el punto A al punto B); ésta es la porción de la curva donde el comportamiento de la roca es cercanamente elástico. Si ocurre una descarga en esta región, la deformación regresa a casi cero, usualmente a lo largo de una ruta diferente. Este efecto es llamado histéresis e indica alguna disipación de energía durante el ciclo de carga y descarga. Cuando la roca es cargada más allá del punto B, se presenta un daño irreversible. Esto es mostrado por una disminución de la curva de esfuerzo versus deformación radial. En este estado, el daño no es visto en

la deformación axial. En el punto C, la deformación axial incluso se vuelve lineal, y ocurren eventualmente grandes deformaciones. Si la roca es descargada en esta región, deformaciones permanentes a esfuerzo cero son observadas. El punto D es la máxima carga que la roca puede sostener bajo una presión de confinación dada. La roca se falla (la muestra pierde su integridad) en este punto. Algunas rocas, especialmente aquellas con alta porosidad, pueden no exhibir un esfuerzo tope máximo pero continúan llevando un esfuerzo creciente (continúan endureciéndose).

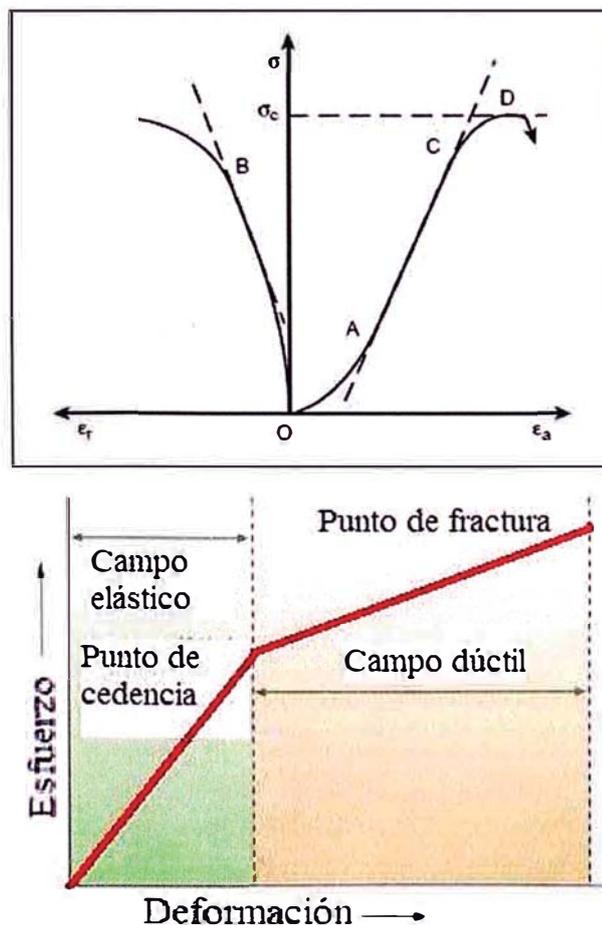


Ilustración 9 - Curva Esfuerzo – Deformación ^{[2] - [3]}

2.5 Estado de los esfuerzos en la Tierra

El estado de los esfuerzos puede ser descrito por tres esfuerzos principales que son perpendiculares entre sí: esfuerzo principal máximo σ_1 , esfuerzo principal intermedio σ_2 y esfuerzo principal mínimo σ_3 . Debido a que las direcciones de los esfuerzos principales son ortogonales, la dirección de dos esfuerzos principales automáticamente describe la dirección de todos ellos.

El peso de los sedimentos, o esfuerzo “overburden” σ_v , es usualmente uno de los esfuerzos principales. Los otros dos esfuerzos son por lo tanto horizontales. El azimut del esfuerzo horizontal mínimo σ_h completa la descripción de la orientación de los esfuerzos, porque el esfuerzo horizontal máximo σ_H es horizontal y ortogonal a σ_h .

La metodología para determinar los esfuerzos, verificando que la zona no se encuentre cerca a fallas mayores, es como sigue:

- El valor de σ_v se determina primero.
- Segundo, la orientación de σ_h es determinada.
- Finalmente, el valor del esfuerzo mínimo como una función de la profundidad es determinado y comparado con el del “overburden” para determinar cual esfuerzo es el σ_3 .

Dentro de estos parámetros la orientación de los esfuerzos puede ser determinada usando diversos recursos. Las más conocidas son:

- Mapa Mundial de Esfuerzos – “World Stress Map” (W M)
- Mapas Geológicos
- “Breakouts”
- Fracturas inducidas por perforación
- Anisotropía de ondas cortantes
- Pruebas en cores
- Población de fracturas naturales
- Diagnóstico de fracturas hidráulicas

2.6 Mapa Mundial de Esfuerzos – “World Stress Map” (WSM)

Si no se cuenta con información disponible para el pozo o campo, se puede consultar el WSM que es la compilación global actualizada de la información de los campos de esfuerzos en la corteza terrestre. El WSM es un proyecto colaborativo entre academia, industria y gobierno que ayuda a entender el origen y factores que controlan los esfuerzos en la litósfera. El WSM usa diferentes tipos de indicadores de esfuerzos y están agrupados en 4 categorías [Zoback, 1992; Reinecker 2004]:

1. Mecanismos localizados de temblores
2. “Breakouts” y fracturas inducidas de pozos
3. Medidas de esfuerzos in situ (muestras de cores, fracturamiento hidráulico, etc.)
4. Datos geológicos actuales (de análisis de fallas-deslizamientos y alineamientos de grietas volcánicas)

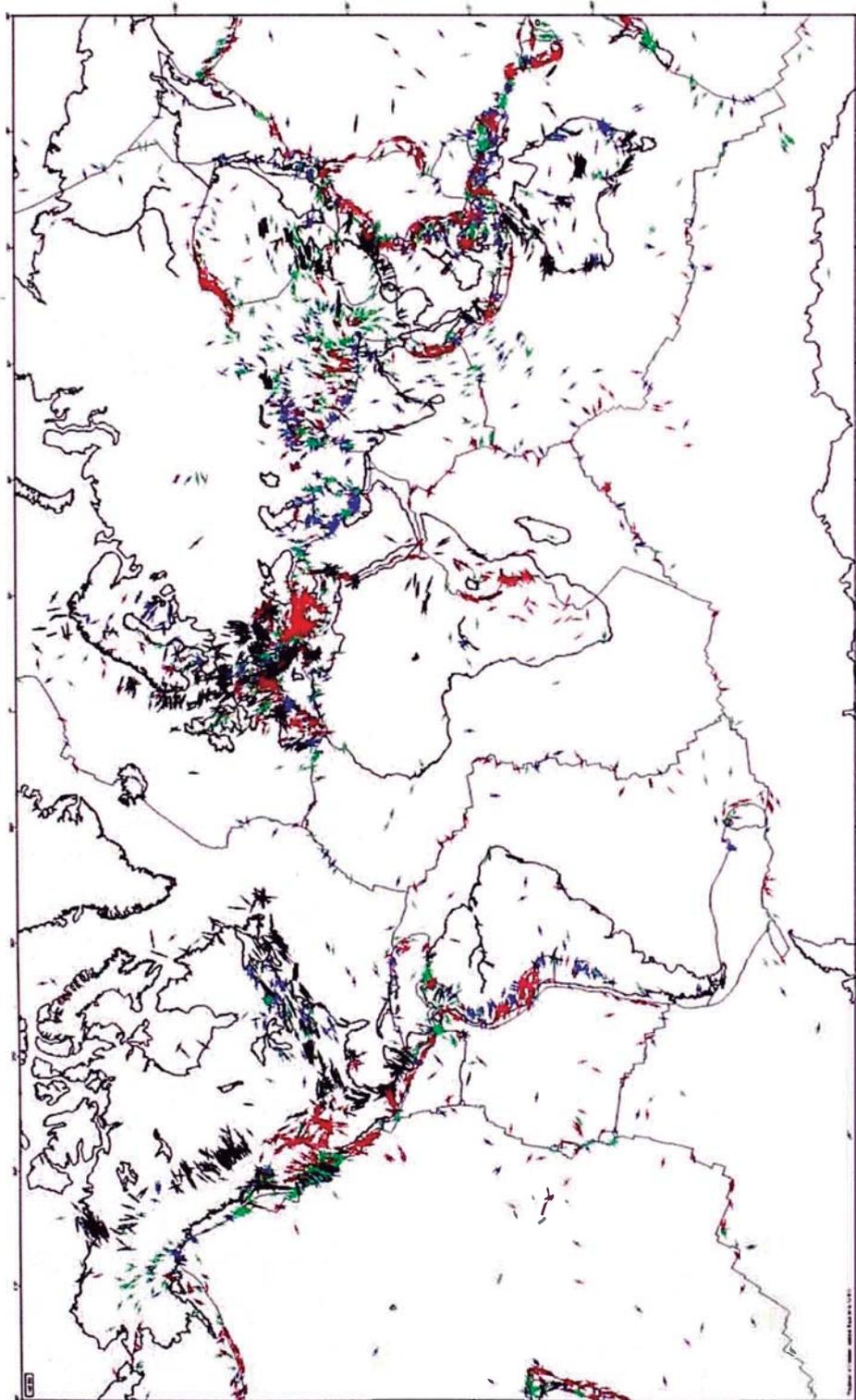


Ilustración 10 - Mapa Mundial de Esfuerzos – World Stress Map (WSM) ^[4]

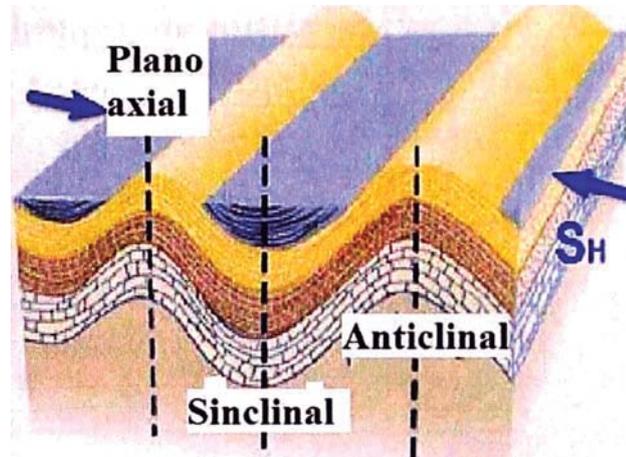


Ilustración 13 - Plegamiento – Comportamiento dúctil

2.8 Fallas de la pared del pozo “breakouts”

La presencia de un pozo en la formación genera un cambio local en los esfuerzos, un proceso denominado concentración de los esfuerzos.

Los “breakouts” son el resultado del colapso de las paredes del pozo inducidos por los esfuerzos efectivos que se concentran en las paredes al momento de perforar el pozo. El alargamiento del pozo es causado por el desarrollo de planos de esfuerzos conjugados intersecándose. Los “breakouts” son simétricos, bilaterales y pueden ocurrir en largas secciones del pozo, y dentro de estas secciones, el método de los “breakouts” provee información continua de la orientación del campo de los esfuerzos.

Los mapas de esfuerzos muestran el esfuerzo compresional horizontal máximo S_H

Método	Calidad	Régimen de esfuerzos
 mecanismo local	A  S_H desvío de $\pm 15^\circ$	 régimen de falla normal
 "breakouts"	B  S_H desvío de $\pm 20^\circ$	 régimen de falla de rumbo
 fract. inducidas	C  S_H desvío de $\pm 25^\circ$	 régimen de falla inversa
 cores		 régimen de tectonismo
 fracturas hidráulicas		
 Indicadores geológicos		
Rango de profundidad de dato: 0-40 km		

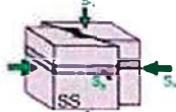
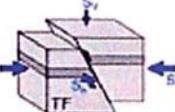
		
régimen de falla normal $S_V > S_H > S_h$	régimen de falla de rumbo $S_H > S_V > S_h$	régimen de falla inversa $S_H > S_h > S_V$

Ilustración 11 - Leyenda del WSM ^[4]

2.7 Mapas geológicos

Se debería examinar un mapa geológico del campo para comprobar la existencia de fallas o plegamientos. En la vecindad de las fallas, los esfuerzos principales rotarán más probablemente para alinearse paralelos a la superficie de falla (Barton y Zoback, 1994).

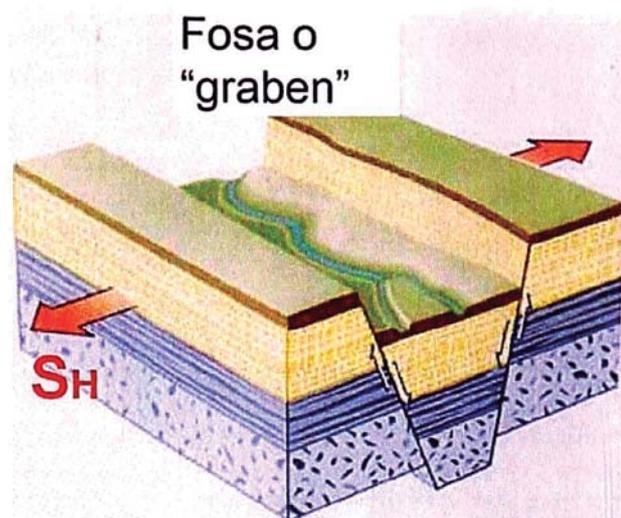


Ilustración 12 - Falla – Comportamiento frágil

Bell y Gough [1979] fueron los primeros en proponer una teoría para la formación de los “breakouts” y predijeron que son áreas que se han derrumbado en cada lado del pozo centradas en la dirección del esfuerzo principal horizontal mínimo (donde la concentración de los esfuerzos compresivos es la mayor). Ellos presentaron el método analítico comúnmente usado para predecir la teoría de los “breakouts”. Este método usa la solución de Kirsch para calcular los esfuerzos alrededor de un hueco circular en un continuo isotrópico y linealmente elástico sujeto a un campo de esfuerzos tridimensionales. Kirsch [1898] desarrolló un sistema de ecuaciones para calcular los esfuerzos actuantes en una placa elástica isotrópica homogénea delgada, conteniendo un hueco cilíndrico, sujeto a un campo de esfuerzos principales máximo y mínimo efectivos. Asumiendo que el pozo es vertical, los esfuerzos principales en la pared del pozo son el esfuerzo radial efectivo (S_{rr}), el esfuerzo axial efectivo (S_{zz}) y el esfuerzo circunferencial efectivo ($S_{\theta\theta}$). El esfuerzo radial efectivo actúa normal a la pared del pozo. El esfuerzo axial efectivo actúa en dirección paralela al eje del pozo. El esfuerzo circunferencial actúa en dirección ortogonal al S_{rr} y S_{zz} (en la dirección horizontal en el plano tangencial a la pared del pozo).

Zoback [1985] expandió la teoría de formación de los “breakouts” en dos aspectos: Primero, aplicó a los esfuerzos el criterio de falla de Mohr-Coulomb con cohesión y ángulo de fricción interna; segundo, incluían la influencia de la presión del lodo dentro del pozo y la presión poral en la formación circundante. Las ecuaciones para los esfuerzos principales efectivos y esfuerzos cortantes que están

actuando perpendicular al eje del pozo en la pared del pozo de acuerdo a Zoback [1985] son:

$$S_{\theta\theta} = \frac{1}{2}(S_{H\max} + S_{H\min}) \left\{ 1 + \frac{R^2}{r^2} \right\} - \frac{1}{2}(S_{H\max} - S_{H\min}) \left\{ 1 + 3\frac{R^4}{r^4} \right\} \cos 2\theta - \frac{\Delta P R^2}{r^2} \quad \dots(9)$$

$$S_{rr} = \frac{1}{2}(S_{H\max} + S_{H\min}) \left\{ 1 - \frac{R^2}{r^2} \right\} + \frac{1}{2}(S_{H\max} - S_{H\min}) \left\{ 1 - 4\frac{R^2}{r^2} + 3\frac{R^4}{r^4} \right\} \cos 2\theta - \frac{\Delta P R^2}{r^2} \quad \dots(10)$$

$$S_{r\theta} = -\frac{1}{2}(S_{H\max} + S_{H\min}) \left\{ 1 + 2\frac{R^2}{r^2} - 3\frac{R^4}{r^4} \right\} \sin 2\theta \quad \dots(11)$$

Donde $S_{r\theta}$ es el esfuerzo cortante, R es el radio del hueco, r es la distancia desde el centro del pozo, θ es el azimut medido desde la orientación del $S_{H\max}$, $S_{H\max}$ es el esfuerzo horizontal máximo efectivo, $S_{H\min}$ es el esfuerzo horizontal mínimo efectivo, ΔP es la presión diferencial que es la diferencia entre P_w (presión del lodo en el pozo) y P_p (presión poral en la formación circundante). La concentración de esfuerzos predicha por estas ecuaciones se observa en la ilustración 14.

En la pared del pozo donde $R = r$, las ecuaciones 9,10 y 11 se convierten en:

$$S_{\theta\theta} = S_{H\max} + S_{H\min} - 2(S_{H\max} - S_{H\min}) \cos 2\theta - \Delta P \quad \dots(12)$$

$$S_{rr} = \Delta P \quad \dots(13)$$

$$S_{r\theta} = 0 \quad \dots(14)$$

La medida de $S_{\theta\theta}$ varía con θ alrededor de la pared del pozo. Las ecuaciones (15) y (16) muestran los valores máximo y mínimo de $S_{\theta\theta}$, los cuales se obtiene a $\theta = 90^\circ$ y $\theta = 0^\circ$, respectivamente. Los “breakouts” se formarán paralelos a la

orientación del S_{Hmin} si $S_{\theta\theta}$ se vuelve mayor que la fuerza de la roca a $\theta = 90^\circ$.

$$S_{H\theta}^{\theta=90^\circ} = 3S_{ff\max} - S_{Hmin} - \Delta P \dots(15)$$

$$S_{H\theta}^{\theta=0^\circ} = 3S_{Hmin} - S_{ff\max} - \Delta P \dots(16)$$

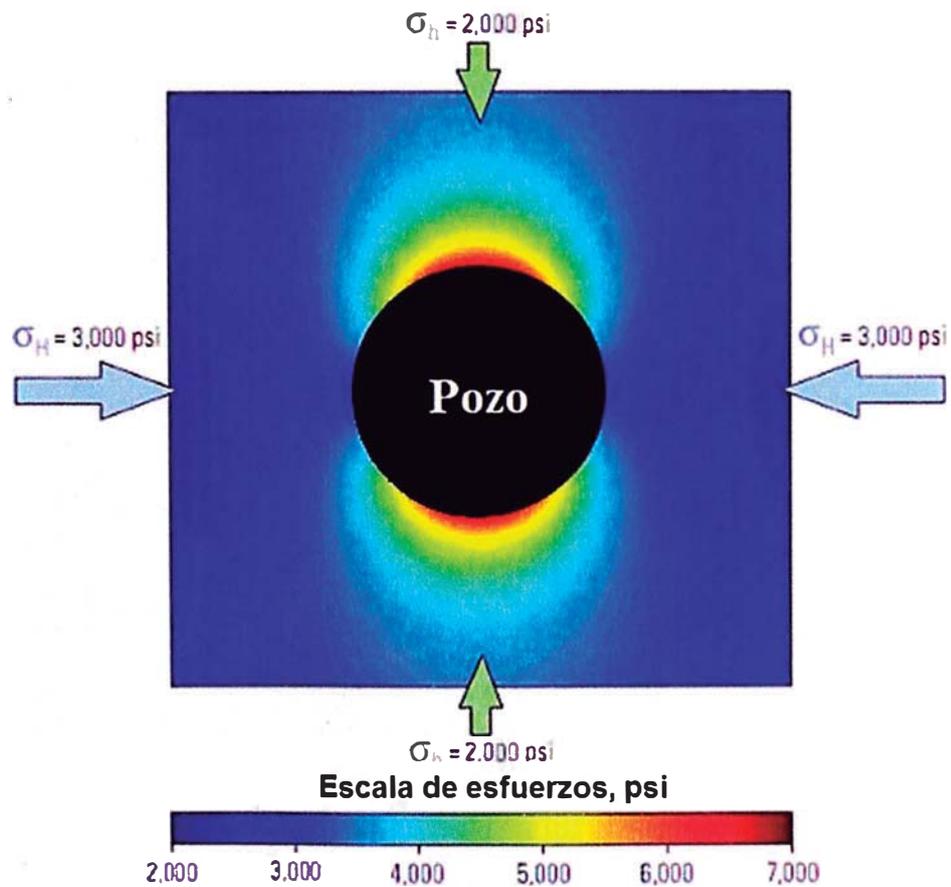


Ilustración 14 – Concentración de los esfuerzos alrededor del pozo ^[3]

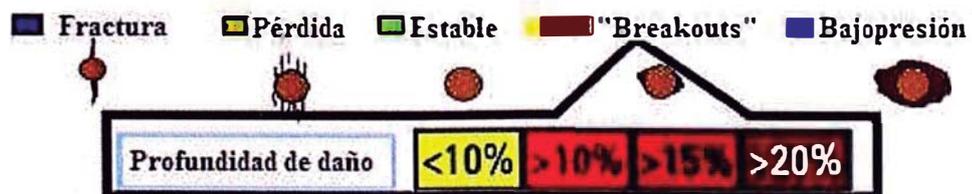


Ilustración 15 – Relación entre la forma del pozo y ΔP (pozo – formación)

Los primeros análisis de “breakouts” se hicieron para pozos ca i verticales, en un pozo vertical, la interpretación es directa porque el azimut del “breakout” corresponde al azimut del σ_h si el σ_h es una dirección de esfuerzo principal. [Bell y Gough, 1979; Zoback, 1985]. Más tarde, la teoría se expandió para incluir pozos inclinados [Péska y Zoback, 1995; Zoback 2003].

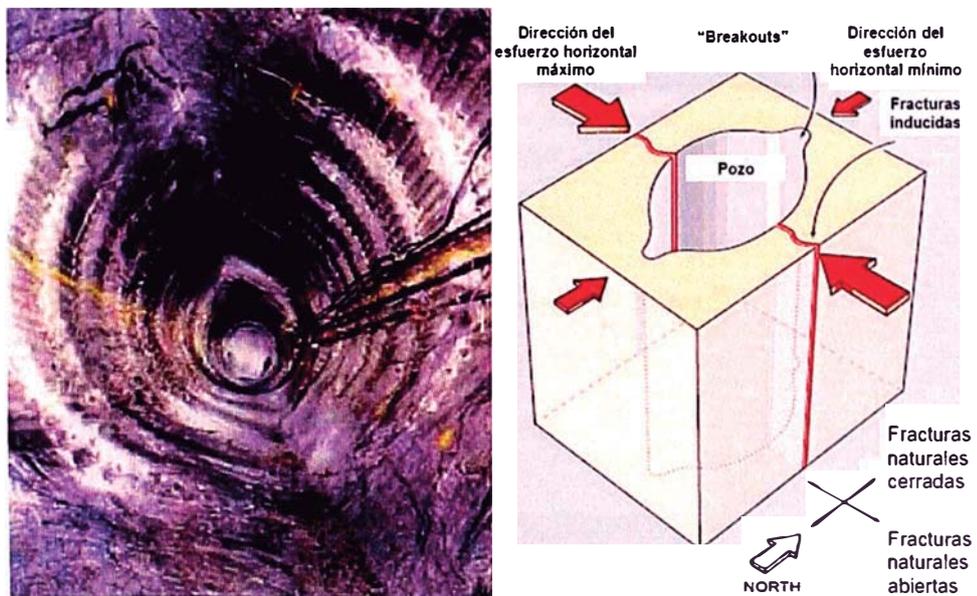


Ilustración 16 – “Breakout” [5]

Se aplica el conocimiento de la dirección de los esfuerzos horizontales en:

- Diseño de trayectoria de pozos horizontales

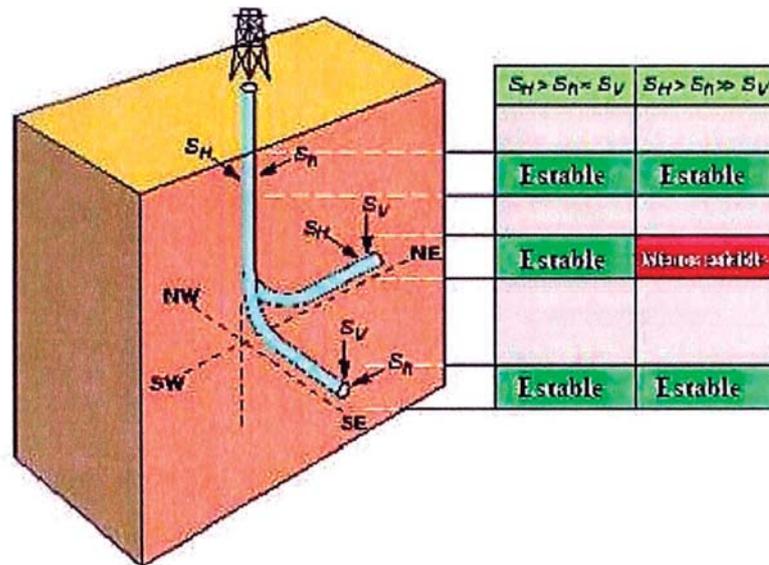


Ilustración 17 - Trayectoria de pozos ¹⁶¹

- Mejorar las fracturas hidráulicas

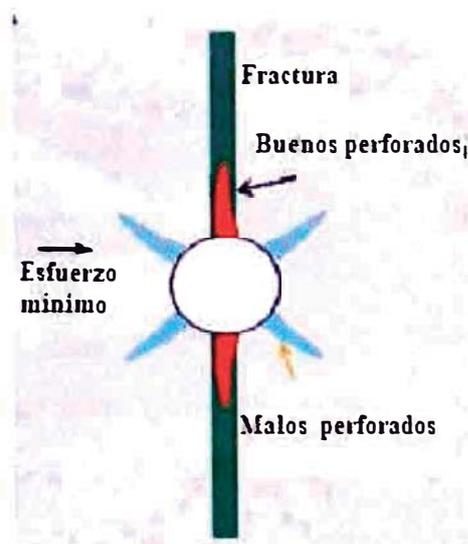


Ilustración 18 - Optimización de fractura hidráulica

Prevención de producción de arenas

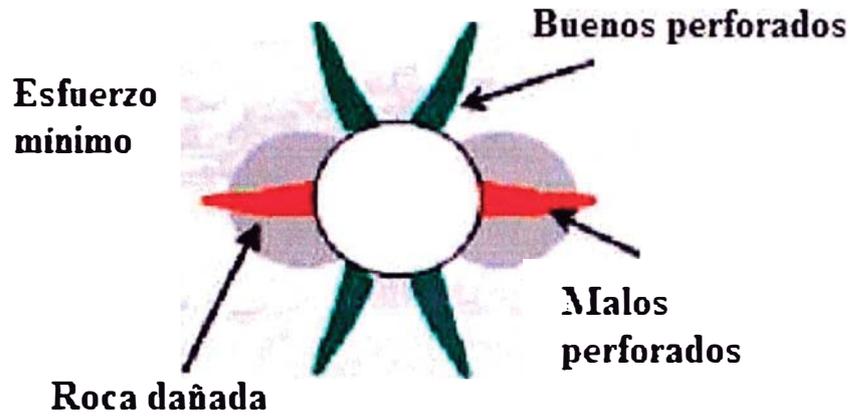


Ilustración 19 - Baleo para evitar la producción de arena

- Mejorar la tortuosidad cercana al pozo por completaciones naturales

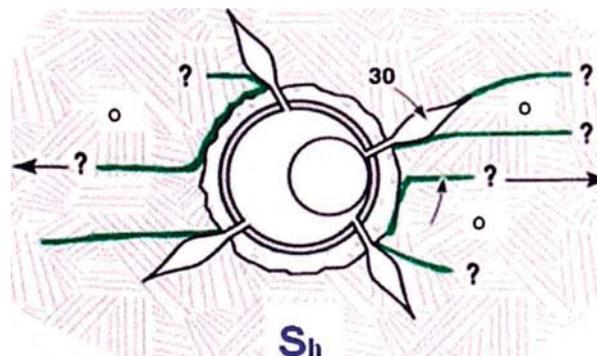


Ilustración 20 - Tortuosidad de las fracturas

etc.

CAPITULO 3

3. MÉTODO

3.1 Registros para identificación de “breakouts”

La orientación de los “breakouts” del pozo puede ser medida usando registros mecánicos (cáliper orientado de 3-4-6 brazos), acústicos (BHTV) o de resistividad eléctrica (FMS/FMI). Registros ópticos tales como BIPS y cámaras pueden ser usados para visualizar los “breakouts”. Mientras que los registros de BHTV y FMS/FMI proveen una excelente calidad de datos para el análisis de “breakouts”, las cámaras como BIPS y registro de cáliper orientado tienen una calidad menor, pero no por ello menos importante. Para tener más información acerca de las herramientas actuales para identificar “breakouts” verificar la parte de los apéndices.

3.1.1 Registro cáliper orientado de 4 brazos

La manera más simple para detectar “breakouts” es examinar las pistas “tracks” registrados por el cáliper orientado de 4 brazos. Esta herramienta es comúnmente corrida para obtener información sobre rumbo y buzamiento de los estratos y estimar el volumen de cemento requerido para el revestimiento. Pero además puede usarse para interpretar los “breakouts”.

La herramienta es corrida en el pozo permitiendo que unos brazos con muelles se abran mientras pasan por alargamientos del hueco. [Bell y Gough, 1979; Plumb y Hickman, 1985]. El cáliper de 4 brazos orientado magnéticamente mide el diámetro del pozo en dos direcciones ortogonales en un sistema de brazos opuestos.



Ilustración 21 - Geometría de la herramienta de cáliper de 4 brazos en el pozo y las variables usadas para interpretar los “breakouts”. ¹⁷¹

Las variables que brinda este registro y son necesarios para la interpretación, son:

- **PIAZ** azimut del brazo 1 relativo al norte magnético;
- **C1 y C2** cáliper 1 (medida entre brazo 1 y brazo 3) y cáliper 2 (medida entre brazo 2 y brazo 4). Ambos medirán el diámetro del hueco en 2 direcciones ortogonales;
- **DEVI** desviación del pozo con respecto a la vertical;
- **HAZI** azimut del pozo;
- **RB** “relative bearing”, ángulo entre el brazo 1 y el lado superior del pozo.

Existe la siguiente relación entre PIAZ, RB y HAZI:

$$PIAZ = HAZI + \operatorname{atan} \frac{\tan RB}{\cos DEVI} \dots(15)$$

Las técnicas para la identificación e interpretación de "breakouts" han sido descritas en numerosas publicaciones [Plumb y Hickman, 1985; Reinecker, 2004] y recae en el análisis de la forma de la sección transversal del pozo.

Cáliper orientado de 4 brazos

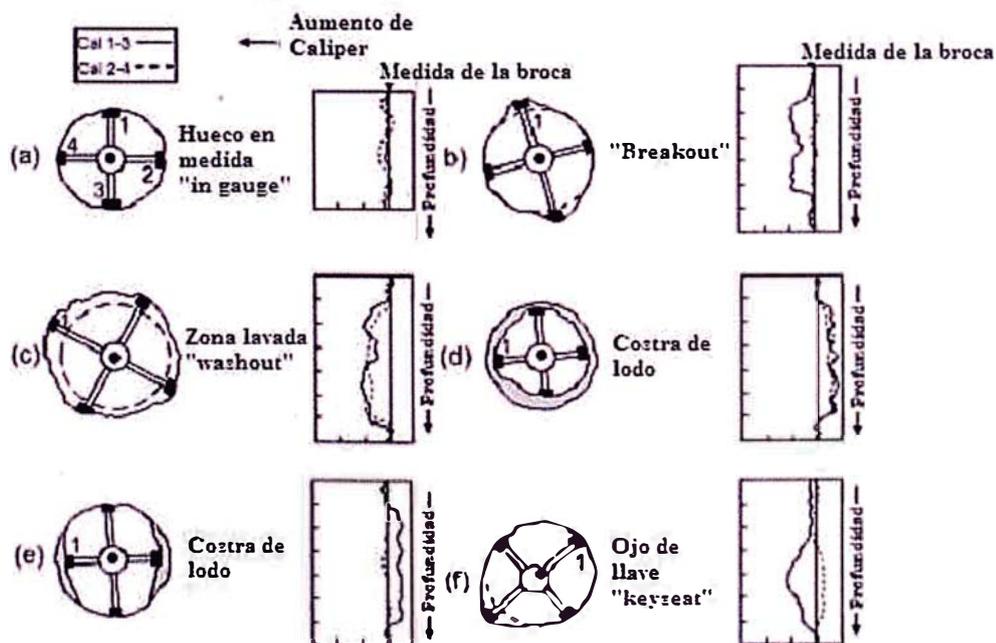


Ilustración 22 - Tipos comunes de alargamientos del pozo y su respuesta en el registro cáliper

Los criterios para la identificación de los “breakouts” a partir de las variables del cáliper de 4 brazos:

Tabla 1 - Criterio para identificación de “breakouts” a partir del cáliper orientado de 4 brazos de acuerdo a Plumb y Hickman [1985]

1.- La rotación de la herramienta debe cesar al entrar en la zona de alargamiento.
2.- Debe haber clara rotación de la herramienta al entrar y salir de la zona de alargamiento.
3.- La lectura del cáliper menos alargado debe estar cerca al del diámetro de la broca (“bit size”). El tope y la base del “breakout” deben estar bien marcados.
4.- La diferencia de los cáliper deben exceder un 10% al del “bit size”.
5.- La orientación de la elongación no debe coincidir con el lado superior del hueco en los pozos desviados más de cinco grados (5°). (Peligro de “key seat”)
6.- La longitud de la zona de alargamiento debe ser de más de 1 m.

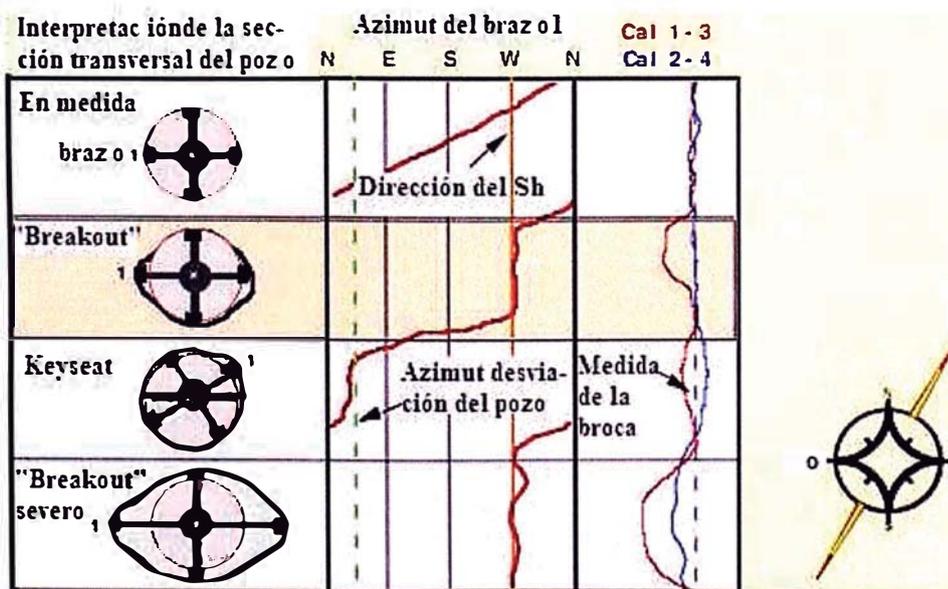


Ilustración 23 - Algoritmo de la sección transversal de un “breakout” del pozo ^[8]

Esta técnica es muy firme para revelar la dirección de los “breakouts”, puede ser usada en grandes profundidades, y el procedimiento de evaluación está bien establecido [Plumb y Hickman, 1985].

La desventaja principal de este registro consiste en que no proporciona información sobre la forma de los “breakouts” en detalle. Se debe tener especial cuidado de no calificar equivocadamente rasgos tales como ojos de llave (“keyseats”) y sobrerrimado (“overreaming”) como “breakouts”.

La calidad de los datos del WSM ha sido catalogada de acuerdo a diferentes esquemas. Para los “breakouts”, la clasificación de calidad depende de la longitud y desviación estándar obtenida de los intervalos de “breakout” del pozo. [Zoback, 1992].

Tabla 2 - Clasificación de calidad para los “breakouts”

“Breakout”	Clasificación de Calidad
<input type="checkbox"/> ≥ 10 zonas de “breakout” distintas y una longitud combinada ≥ 300 m en un solo pozo con una desv. est. $\leq 12^\circ$; <input type="checkbox"/> Promedio de “breakouts” en 2 o más pozos en proximidad geográfica con una longitud combinada > 300 m y desv. est. $\leq 12^\circ$	Calidad A
<input type="checkbox"/> ≥ 6 zonas de “breakout” distintas y una longitud combinada > 100 m en un solo pozo con una desv. est. $\leq 20^\circ$	Calidad B

<input type="checkbox"/> ≥ 4 zonas de “breakout” distintas y una longitud combinada ≥ 30 m con desv. est. $\leq 25^\circ$	Calidad C
<input type="checkbox"/> < 4 “breakouts” orientados consistentemente o de longitud combinada < 30 m en un solo pozo; “breakouts” en un solo pozo con desv. est. $\leq 40^\circ$	Calidad D
<input type="checkbox"/> Pozos en el cual ningún “breakout” fiable fue detectado. <input type="checkbox"/> Dispersión extrema de las orientaciones, promediada determinada no significativa (desv. est. $> 0^\circ$)	Calidad E

3.2 Preparación de datos

Para obtener la dirección de los esfuerzos horizontales se buscó en la base de datos del campo Dorissa los datos e información necesaria para este estudio, se encontró tres pozos: Dorissa1, Dorissa2 y Dorissa15 con registros de cáliper orientado, los registros están escaneados, los dos primeros del año 1978 son de buena visibilidad a excepción de algunos pequeños tramos donde es un poco difícil diferenciar las lecturas y el tercero es del año 1991 cuya lectura es muy difícil y por lo tanto no se tomó para el análisis.

De las lecturas del registro se tabuló las variables necesarias para el trabajo: profundidad (pies), “gamma ray” (gAPI), desviación del pozo (grados sexagesimales), “relative bearing” (grados sexagesimales), azimut del pozo (grados

sexagesimales), C1 (pulgadas), C2 (pulgadas). Luego se calculó el PIAZ (grados sexagesimales) usando la ecuación 15.

Además se relacionó la profundidad con la formación litológica correspondiente a cada pozo para identificar si existe alguna respuesta en el perfil que tenga una correspondencia con la litología.

3.3 Análisis de datos

Se utilizaron dos Software para el análisis de los datos de los registros en este estudio: Caliban de la plataforma GEOFRAME y Microsoft Excel. Los resultados que se generaban en cada etapa del proceso fueron examinados detenidamente para realzar la calidad de la información resultante.

3.3.1 Caliban

CALIBAN es un producto de detección de “breakouts” usado para caracterización anisotrópica de esfuerzos. Los datos introducidos al CALIBAN incluyen:

- **Cáliper dual**
- **Inclinometría**

Los algoritmos usados en CALIBAN para detectar “breakouts” y determinar su dirección a partir de datos de cáliper incluyen los siguientes criterios:

1. Los alargamientos del hueco del pozo en las direcciones del cáliper dual son calculadas a partir de la diferencia entre los valores actual y nominal de los cáliper. El valor nominal del cáliper es el diámetro de la broca (“bit size”), pero puede ajustarse para permitir zonas lavadas “washouts” en un paso subsiguiente. El ajuste es importante si el “breakout” y “washout” ocurren simultáneamente pero en direcciones perpendiculares tal que el efecto de una no sea enmascarado por el otro.

2. La diferencia entre alargamientos, el “alargamiento diferencial” se toma como una medida de ovalización. Para descontar pequeñas diferencias en alargamiento, una “marca de ovalización” se coloca solamente cuando el alargamiento diferencial excede un límite de ovalización.

3. El eje con el mayor alargamiento se toma como eje “alargado” y el azimut de este eje se deduce del azimut del cáliper 1-3.

4. En todos los puntos donde se encuentre la marca de ovalización, se calculará la razón de aumento del cáliper “alargado”. Si este excede un límite de razón, una marca de “breakout” se enciende.

5. La marca de “breakout” e mantiene encendida hasta que la ovalización se encuentre debajo del límite de ovalización.

Caliban al realizar su procesamiento genera como salida variables que son graficadas y tabuladas, estos datos se tomarán en cuenta para un posterior análisis:

AZIL (grados sexagesimales): Azimut del “breakout”

BRKOUT: “Breakout” (zona roja)

DCX (pulgadas): Diferencia del diámetro del hueco

OVALN (pulgadas) Límite de ovalización

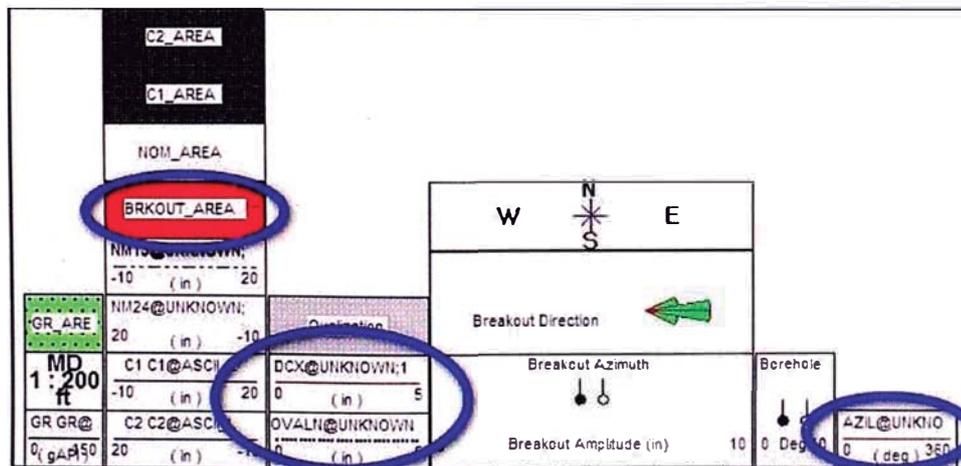


Ilustración 24 - Leyenda convencional del registro Caliban

3.3.2 Microsoft Excel

Microsoft Excel se usó para registrar los datos de los “breakouts” y comprobar que cumplan los criterios de Plumb y Hickman [1985] y Reinecker [2003] para diferenciarlos de otras entidades tales como “washouts” y “keyseat”, contabilizó el número de “breakouts” y para cada uno, se registró su profundidad, calculó su orientación promedio, media y desviación estándar. Además se calculó la longitud total combinada de ocurrencia de “breakouts” y se catalogó según la clasificación del WSM.

CAPITULO 4

4. RESULTADOS

Se creó un flujo de trabajo para poder realizar mejor este estudio:

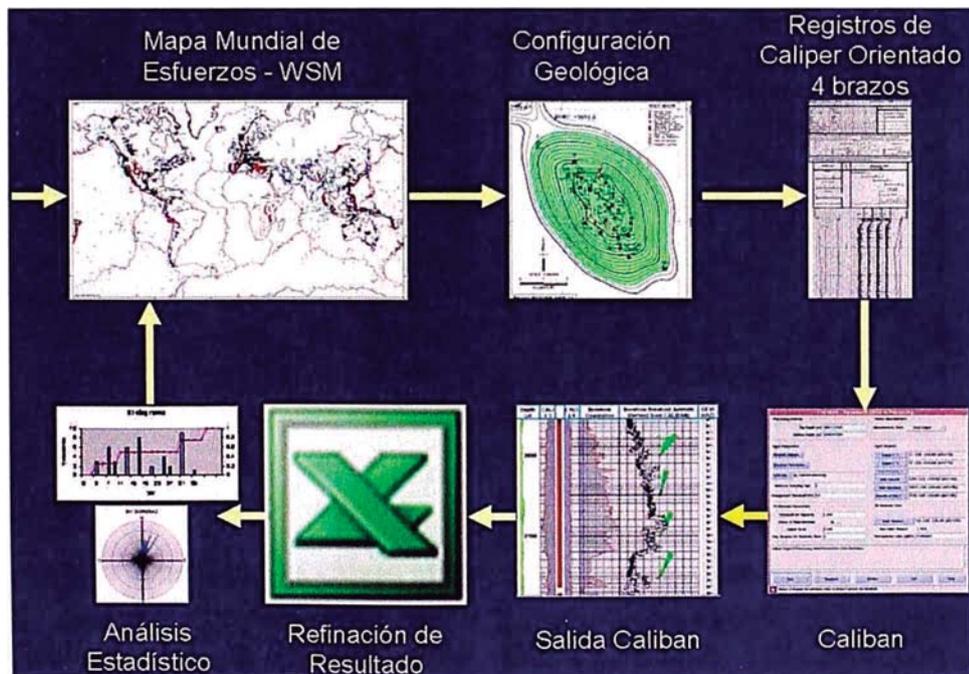


Ilustración 25 – Flujo de trabajo

Aplicando la metodología para hallar la dirección de los esfuerzos:

Primero se recurrió al WSM. No hay ningún indicio sobre el estado actual de los esfuerzos en el Campo Dorissa.

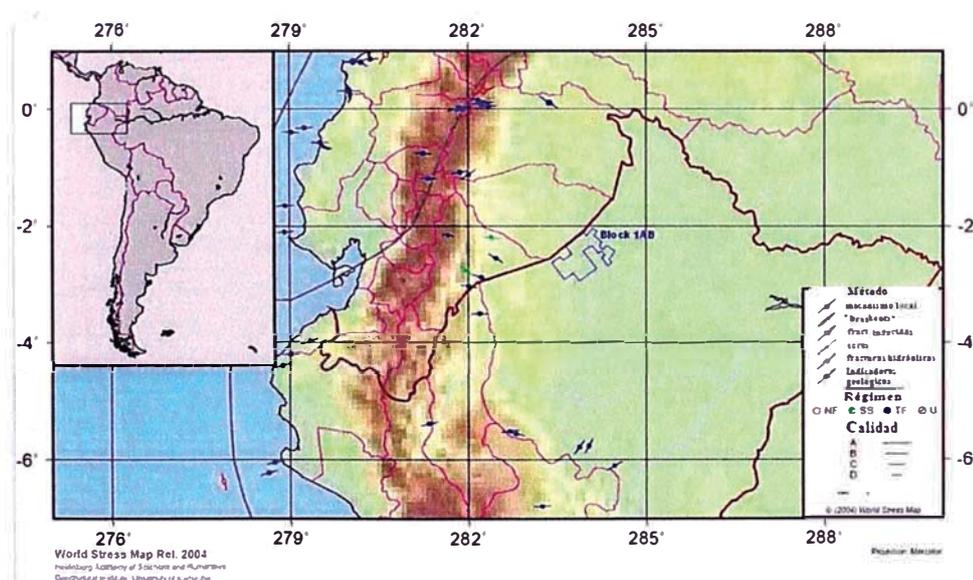


Ilustración 26 - Mapa Mundial de Esfuerzos - Lote 1AB ^[4]

Seguidamente observando el mapa estructural se infirió la dirección de los esfuerzos a un nivel zonal de acuerdo a su configuración geológica, que en este caso por ser un plegamiento anticlinal nos da una pista muy aproximada.

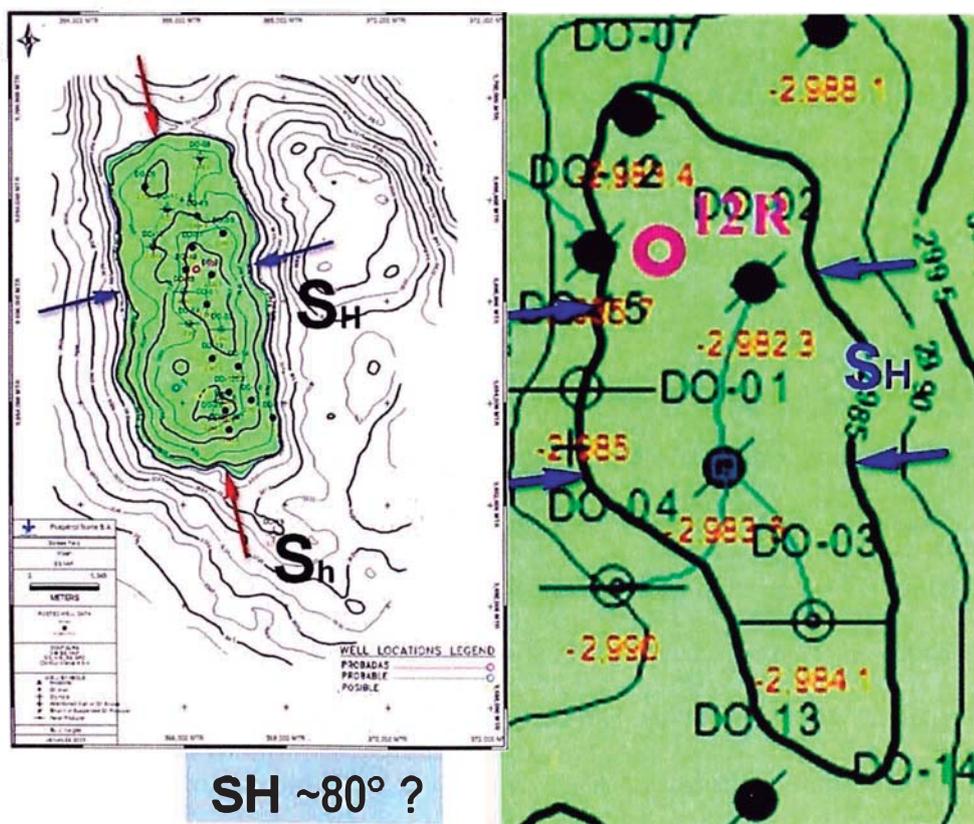


Ilustración 27 - Dirección de los esfuerzos a partir del mapa estructural del Campo Dorissa

Luego se tomaron los datos de los pozos verticales Dorissa1 y Dorissa2 (desviaciones de 0° - 0.5° y de 0.1° - 2.5° , respectivamente) que cuentan con registro de cáliper orientado y se digitalizaron las lecturas para introducirlas al Caliban.

Caliban arrojó los resultados preliminares tanto gráficamente como tablas de donde se obtuvieron zonas donde existieron según sus algoritmos los “breakouts” y la orientación de los mismos.

Luego se introdujeron los resultados de Caliban a una hoja de cálculo Excel donde se procedió a aplicarles condicionales adicionales, como por ejemplo, se colocó un límite máximo de ovalización (para diferenciar zonas muy lavadas), se colocó un límite para el cáliper menor haciendo que sea menor que el 150% del bit size $8 \frac{1}{2}$ (1.5 BS) para filtrar de los cálculos los “breakouts” severos y otro límite por longitud continua de “breakouts” en el pozo, mínimo 3 pies ($\approx 1\text{m}$) de longitud continua. Además se usó Excel para hacer análisis estadísticos como número de “breakouts”, longitud total combinada, orientación promedio, desviación estándar, media y la calidad de los “breakouts” según la clasificación del WSM.

4.1 Identificación de “breakouts”

Mediante el algoritmo de Caliban se tuvo un gráfico con los resultados procesados, aplicando luego la hoja Excel para refinar los datos se observó la presencia de los “breakouts” en ambos pozos bajo análisis: Dorissa1 y Dorissa2. Se debió refinar los datos de salida del Caliban para obtener valores más precisos evitando combinar en el análisis características distintas como pueden ser “washouts”, “breakouts” severos, etc.

4.1.1 Dorissal

La presencia de 7 “breakouts” que son identificados a partir de los 9776 pies en la formación Capas Rojas Inferior cuyas orientaciones muestran una distribución normal con una media de 18°, un promedio de 15.89° y una desviación estándar de 7.23°. La longitud total combinada de los “breakouts” es 64 pies, todas las características nos indican la categoría D según el WSM.

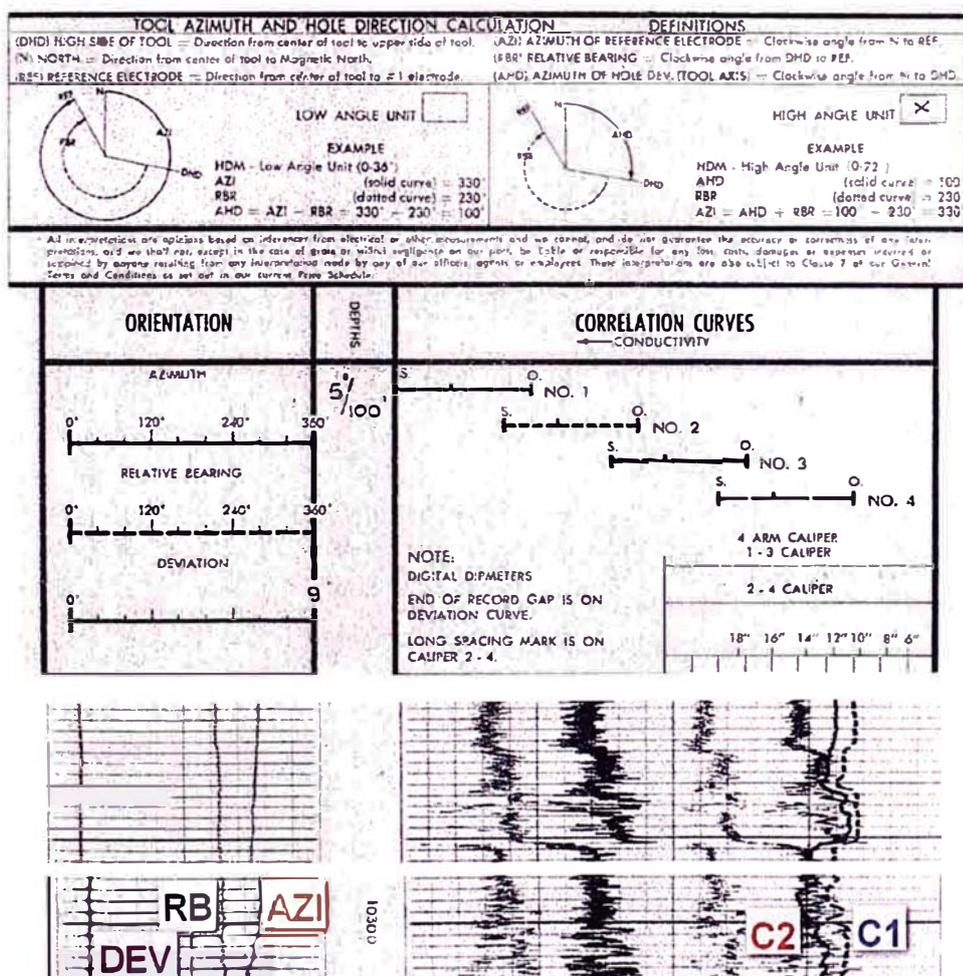


Ilustración 28 - Registro de calíper orientado – Dorissal

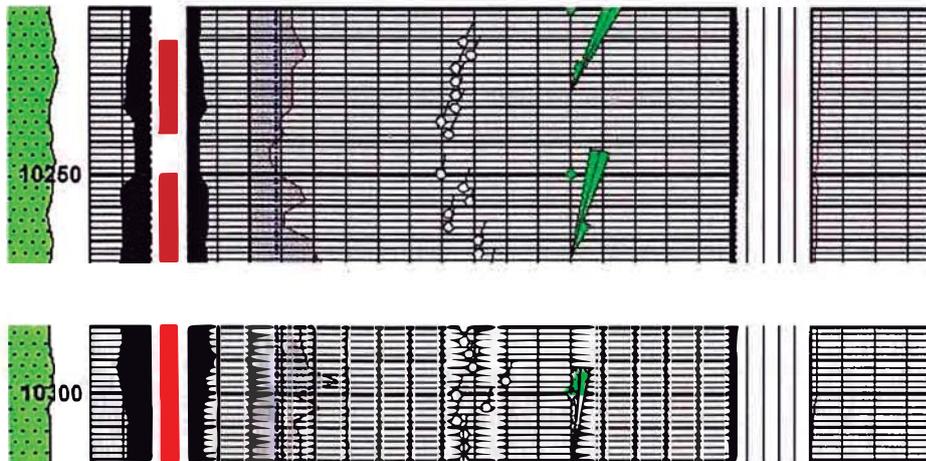
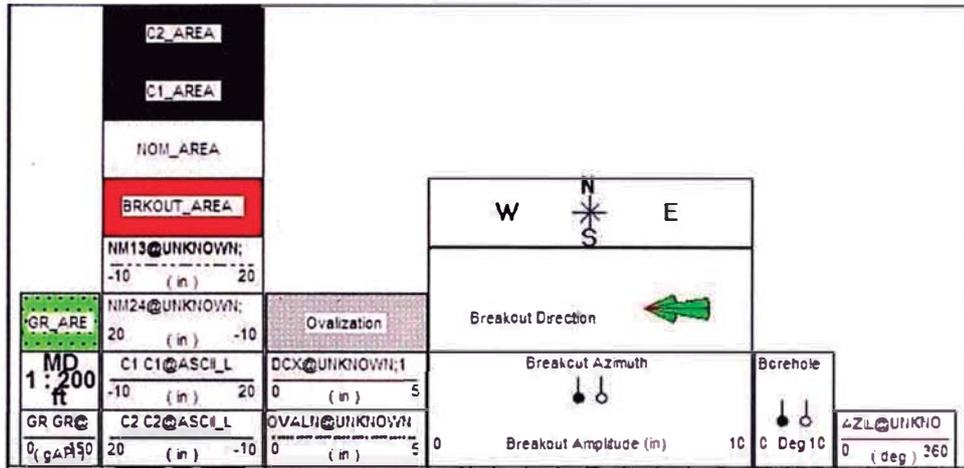


Ilustración 29 - Registro de detección de breakouts mediante Caliban – Dorissa1

Tabla 3 - Análisis de "breakouts" – Dorissa1

DORISSA1						
Formación	Profundidad pies	Longitud pies	Promedio deg	Media deg	Desv. est deg	
Capas Roj. Inf.	9776 - 9780	4.00	20.25	20.25	3.18	Nº "Breakouts" 7.00
Capas Roj. Inf.	10230 - 10246	16.00	23.06	22.50	2.88	Promedio deg 15.89
Capas Roj. Inf.	10250 - 10266	16.00	16.31	18.00	2.33	Media deg 18.00
Capas Roj. Inf.	10290 - 10296	6.00	18.00	18.00	0.00	Desv. est. deg 7.23
Capas Roj. Inf.	10300 - 10314	14.00	7.07	9.00	7.28	Long. Total m 19.50
Capas Roj. Inf.	10470 - 10474	4.00	18.00	18.00	0.00	Categoría WSM D
Capas Roj. Inf.	10480 - 10484	4.00	6.75	6.75	3.18	

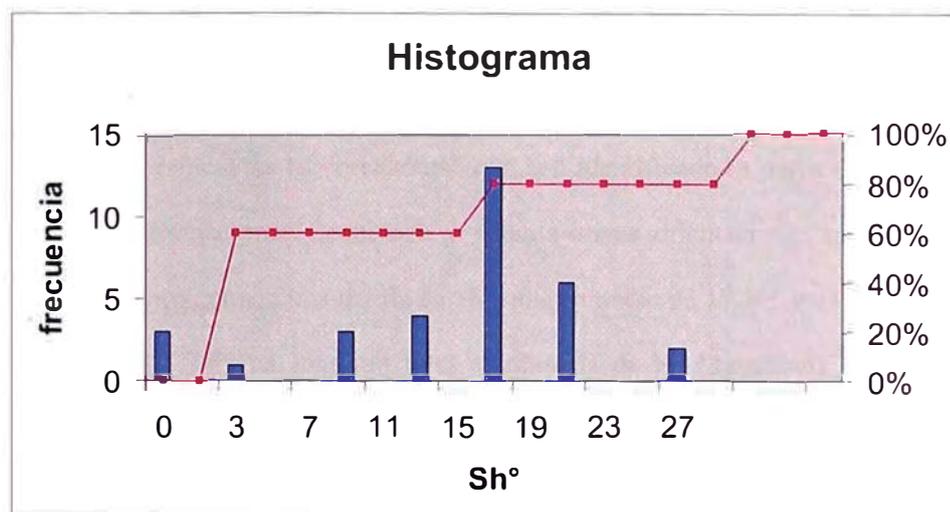


Ilustración 30 - Histograma de frecuencia de la dirección de los “breakouts” – Dorissa1

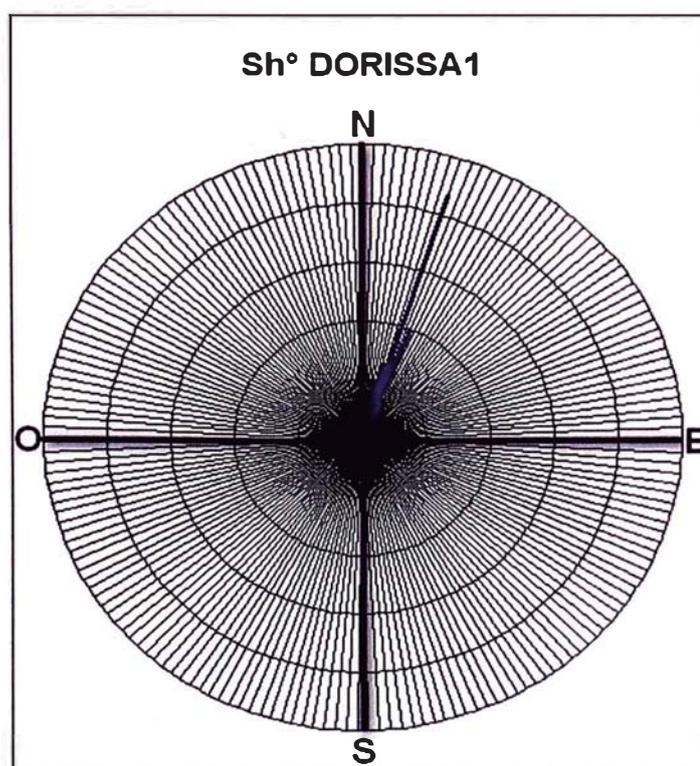


Ilustración 31 - Dirección de los “breakouts” – Dorissa 1

4.1.2 Dorissa2

La presencia de 12 “breakouts” que son identificados a partir de los 10992 pies en las formaciones Cachiyacu y Chonta cuyas orientaciones muestran una distribución normal con una media de 18°, un promedio de 17.16° y una desviación estándar de 11.73°. La longitud total combinada de los “breakouts” es 85 pies, todas las características nos indican la categoría C según el WSM.

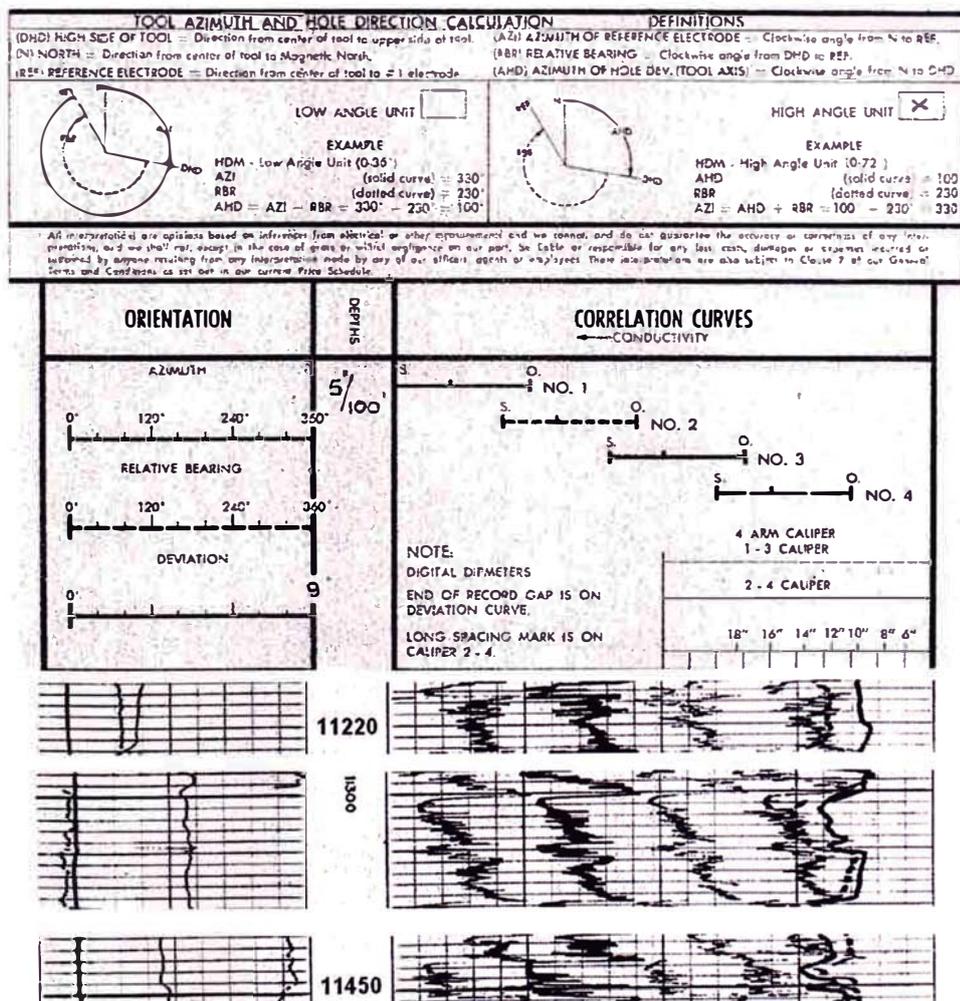


Ilustración 32 - Registro de caliper orientado – Dorissa2

Tabla 4 - Análisis de “breakouts” – Dorissa2

DORISSA2						
Formación	Profundidad pies	Longitud pies	Promedio deg	Media deg	Desv. est. deg	Nº "Breakouts"
Cachiyacu	10992 - 10996	4.00	24.75	24.75	3.18	12
Chonta	11198 - 11210	12.00	28.50	29.25	6.15	Promedio deg 17.16
Chonta	11214 - 11222	8.00	15.75	15.75	2.60	Media deg 18.00
Chonta	11302 - 11314	12.00	9.75	11.25	4.42	Desv. est. deg 11.73
Chonta	11316 - 11320	4.00	9.00	9.00	0.00	Long. Total m 30.00
Chonta	11322 - 11334	12.00	-2.25	-2.25	8.42	Categoría WSIW C
Chonta	11424 - 11428	4.00	29.25	29.25	3.18	
Chonta	11430 - 11434	4.00	29.25	29.25	3.18	
Chonta	11440 - 11450	10.00	18.00	18.00	9.00	
Chonta	11560 - 11570	10.00	31.50	31.50	0.00	
Chonta	11648 - 11654	6.00	12.00	9.00	5.20	
Chonta	11660 - 11670	10.00	15.30	18.00	4.02	

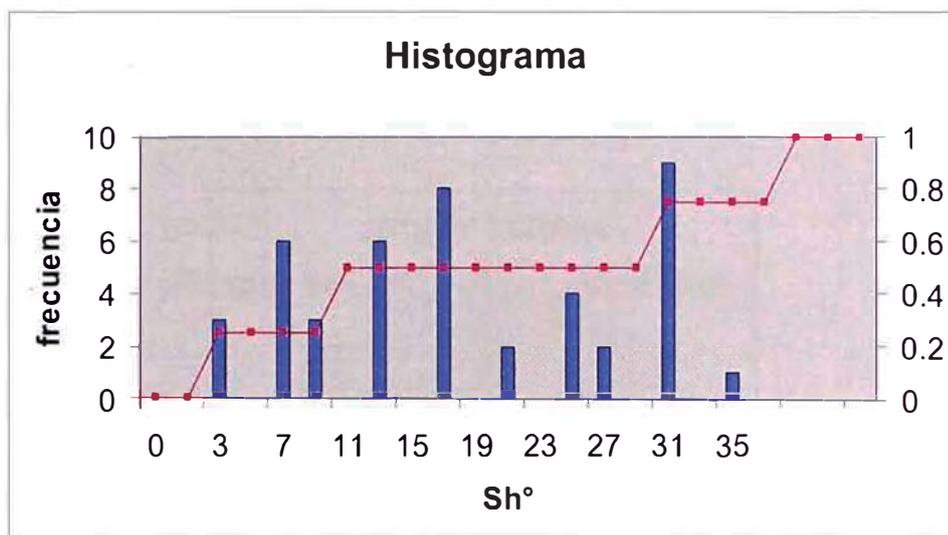


Ilustración 34 - Histograma de frecuencia de la dirección de los breakouts – Dorissa2

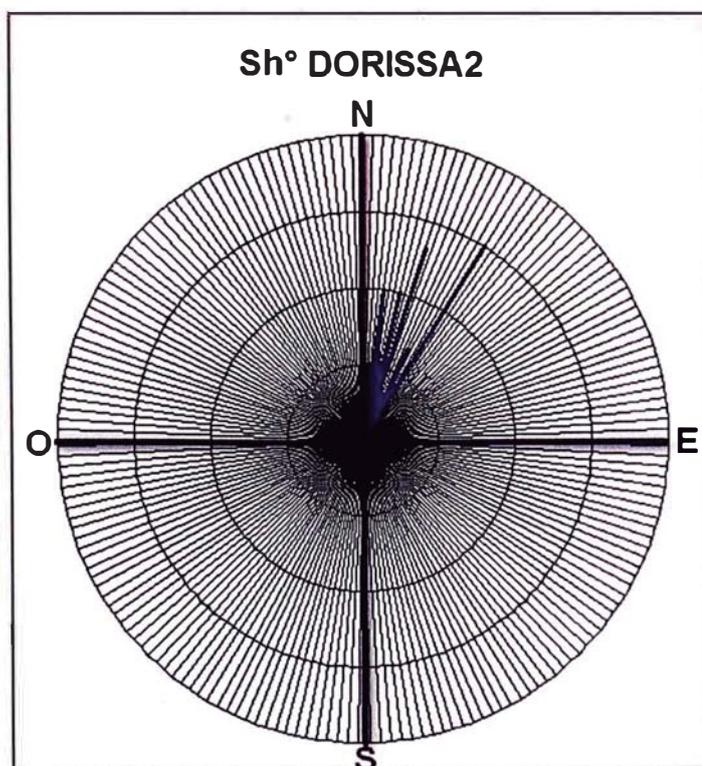


Ilustración 35 - Dirección de los breakouts – Dorissa2

De acuerdo a los datos de ambos pozos en la zona central del campo Dorissa la dirección del esfuerzo horizontal mínimo es 16.65° y la del esfuerzo horizontal máximo es 106.65° .

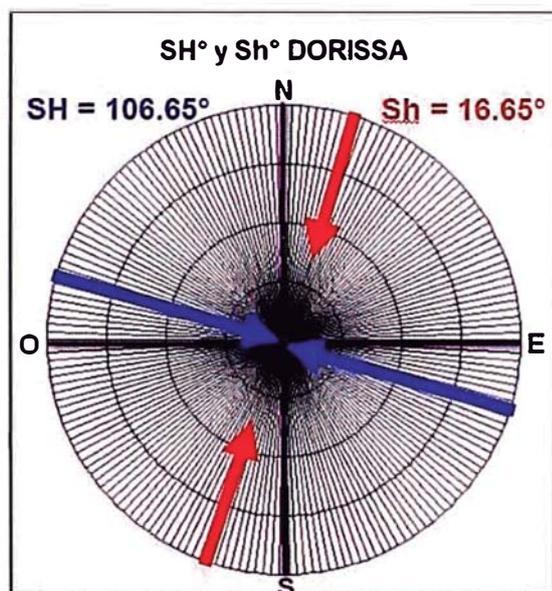


Ilustración 36 - Promedio de la dirección de los esfuerzos horizontales – Campo Dorissa



Ilustración 37 - Dirección del Esfuerzo Horizontal Máximo – Dorissa1 y Dorissa2

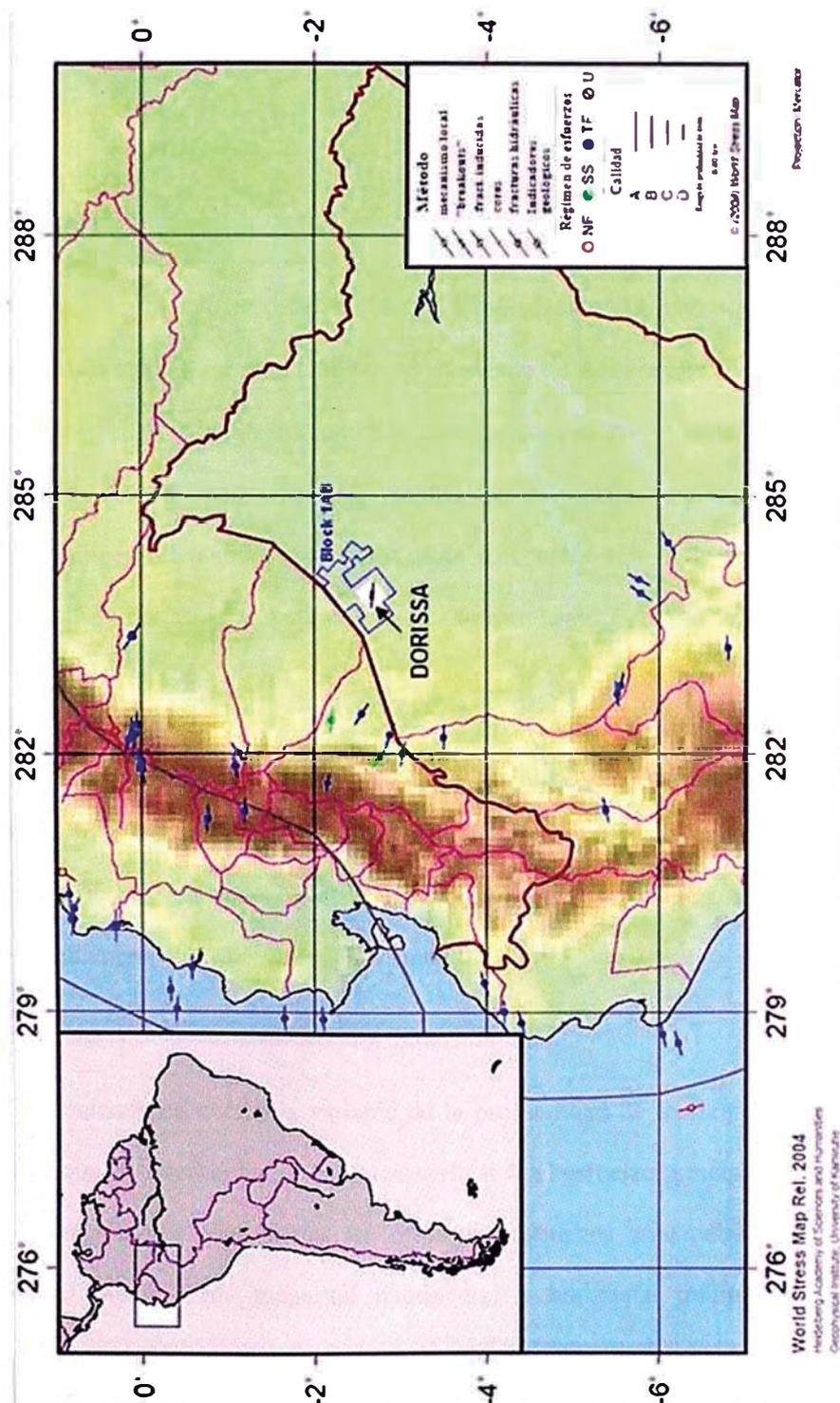


Ilustración 38 - Dirección del esfuerzo horizontal máximo en el Campo Dorissa – World Stress Map ^[4]

CAPITULO 5

5. DISCUSIÓN

En un principio se deseó dividir el campo Dorissa en zonas separadas tales como norte, centro y sur para facilitar su estudio de tal manera que encontráramos la variable por zona y luego buscaríamos correlacionar dicha variable integrando de esta manera todo el campo, pero se encontró que solamente existían 3 pozos con el registro cáliper orientado de 4 brazos y de los cuales sólo 2 fueron útiles, y se incluyeron en este estudio. Ambos se encuentran en la parte central de la estructura.

El WSM no nos proporcionó ningún indicio sobre el estado de los esfuerzos en la zona de estudio, pero el mapa estructural nos mostró que Dorissa se trata de un anticlinal y nos da una idea de la dirección de los esfuerzos horizontales, aproximadamente 80° el esfuerzo horizontal máximo.

Teniendo en cuenta la variable de la profundidad de los registros se puede suponer que el “overburden” o esfuerzo vertical es el esfuerzo principal máximo (de mayor magnitud) y lógicamente los otros dos esfuerzos principales deben ser el horizontal máximo (de magnitud intermedia) y horizontal mínimo (de menor magnitud), ambos perpendiculares entre sí.

Se determinó la dirección de los esfuerzos principales analizando los “breakouts”, la dirección de los esfuerzos horizontales en la parte central del campo sería de 16.65° para el esfuerzo horizontal mínimo y 106.65° para el esfuerzo horizontal máximo.

Las categorías de los “breakouts” según el WSM son D para Dorissal y C para Dorissa2, esto se debe a que el tramo de las zonas de “breakout” continua no es el suficiente (valor máximo obtenido: 30 m) para calificar a otra mejor categoría, sin embargo, desde el punto de vista de la desviación estándar, el obtener un valor $<12^\circ$ nos indica una muy buena calidad de los “breakouts”.

En los resultados del Caliban, en el registro, se puede atribuir el efecto de la interacción de la litología con el fluido de perforación que se hace evidente en el caso del pozo Dorissal donde se encontró una longitud bastante apreciable de “washouts”, en la formación Capas Rojas inferior que es donde predominan rocas lutíticas, las cuales producen problemas mecánicos por inestabilidad que provoca el proceso fisico-químico del hinchamiento de lutitas al absorber el filtrado del lodo de perforación (base agua) que se refleja en forma de “washouts”.

CAPITULO 6

6. CONCLUSIONES

- Se consiguió aplicar la metodología de manera eficiente y del que se obtuvieron resultados muy valiosos. Se logró estimar la dirección de los esfuerzos horizontales en el campo Dorissa, dato del que no se tenía conocimiento.
- Se determinaron los esfuerzos horizontales y resultaron ser muy similares en los 2 pozos, con un esfuerzo horizontal máximo promedio de 105.89° con una desviación estándar de 7.23° para Dorissa1 y un esfuerzo horizontal máximo promedio de 107.16° con una desviación estándar de 11.73° para Dorissa2.
- Se comprobó cierta variación entre el valor aproximado de dirección de esfuerzos obtenidos mediante geología estructural y mediante la aplicación del método de los “breakouts”. Primero, debemos tener en cuenta que los esfuerzos en la tierra varían con respecto al tiempo, los registros de cáliper orientado fueron corridos en el año 1978 así que actualmente son resultados válidos. Segundo, los datos que se obtiene a nivel local mediante pozos son más aceptables que los que se obtienen a modo regional mediante estructura, además, se observa asimetría en la configuración estructural lo que refuerza la conclusión de cierta variación local que se pudo comprobar analizando estos pozos.

- Se demostró que aunque existan limitaciones de datos, mediante un estudio detallado y bien organizado se pueden tener muy buenos resultados si se sabe manejar bien los principios para aplicarlos con criterio, además de la experiencia necesaria para poder trabajarla.
- Serán varias las aplicaciones gracias a este conocimiento, por ejemplo, cuando se desee diseñar una trayectoria más estable en pozos direccionales, optimizar el balceo para fracturar una formación o evitar la producción de arena se recurrirá a este valor para tales motivos. Además la dirección de los esfuerzos es uno de los componentes para construir el modelo geomecánico de la zona.

CAPITULO 7

7. RECOMENDACIONES

Se sugiere correr registros FMS/FMI y BHTV a pozos futuros para mejorar la detección de “breakouts”, conseguir más datos de mejor calidad y comprobar alguna pequeña variación en el valor de la dirección de los esfuerzos desde el tiempo que se corrieron los registros antiguos hasta la actualidad. Así como también se requiere estudiar pozos en otras ubicaciones del campo para tener un área más representativa, puede ser la zona norte o sur ya que este estudio cubrió sólo la zona central, que es donde están los pozos investigados.

REFERENCIAS

A) BIBLIOGRAFÍA

- [1] Estudio geológico del reservorio arenisca chonta en el Campo Doris a, Lote 1-AB Perú, Federico Seminario Gros, INGEPET 1999
- [2] Formation Characterization: Rock Mechanics, m. C. Thiercelin, Schlumberger Dowell j.-c. Roegiers, University of Oklahoma
- [3] Rocks matter: ground truth in geomechanics, John cook Cambridge, England
- [4] Heidbach, O., Tingay, M., Barth, A., Reinecker, J., Kurfesß, D., and Müller, B.(2008): The 2008 release of the World Stress Map (available online at www.world-stress-map.org)
- [5] Micromechanisms of borehole instability leading to breakouts in rocks, B. Haimson. 2006
- [6] The Quest for Borehole Stability in the Cusiana Field, Colombia, Tonny Addis, David Boulter, Luis Roca-Ramisa, Dick Plumb 1993
- [7] Borehole breakout analysis from four-arm caliper logs j. Reinecker, m. Tingay y B. Müller, World Stress Map Project, 2003
- [8] Caliban user's guide
- [9] Using breakouts for in situ stress estimation in tectonically active areas, Frydman, M. y Ramirez, H.A.

B) APÉNDICES

Otras herramientas para identificación de “breakouts”

a) “Formation MicroScanner” / “Formation MicroImager”

Las herramientas FMS/FMI son calípers de 4 brazos con una línea de micro electrodos montado en cada brazo. Emite una corriente enfocada desde los 4 brazos a la formación y la variación en la intensidad de corriente es medida por los brazos. El procesamiento transforma las medidas de intensidad de corriente a imágenes de alta resolución de intensidad variable. El FMI tiene un panel adicional de micro electrodos en cada brazo de los 4 brazos del calíper, el cual resulta en una mejor cobertura de la pared del pozo.

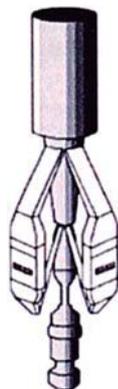


Ilustración 39 - Esquema de una herramienta FMS/FMI

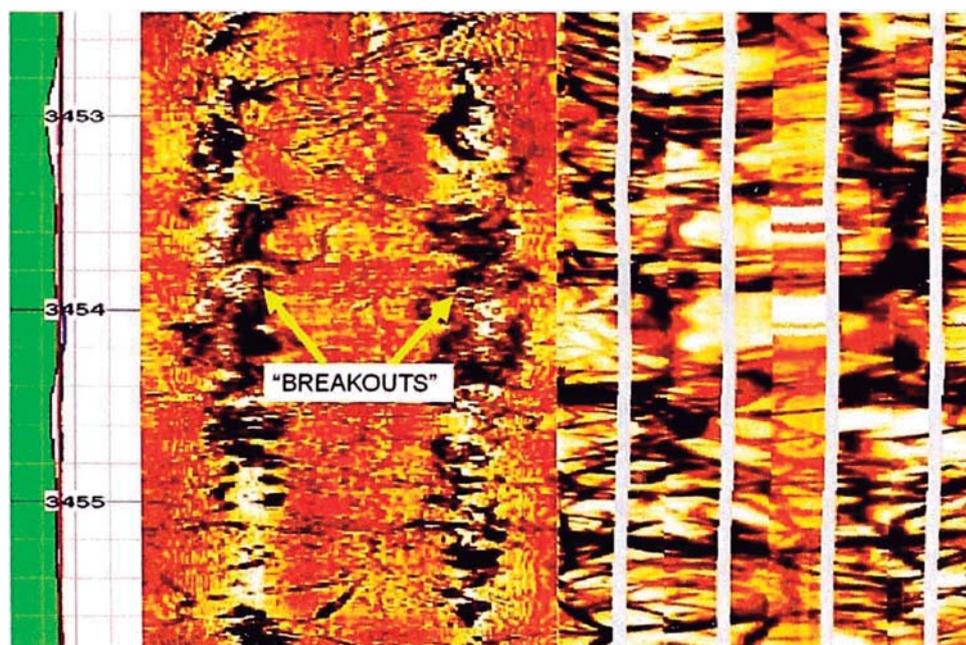


Ilustración 40 – Modelo de registro de FMI

b) “Borehole Televiewer”

El BHTV es una herramienta que provee una imagen ultrasónica orientada y continua de las paredes del pozo. Consiste en un transductor que está montado en un motor dirigido con precisión y apuntado a la pared del pozo. El transductor rota rápidamente y genera pulsos acústicos ultrasónicos múltiples cada segundo.



Ilustración 41 - Esquema del borehole televiewer

La geometría del pozo es registrada mientras se levanta la herramienta a velocidad constante. El tiempo de viaje y la amplitud de las ondas reflejadas que retornan al transductor son registrados. Un trazo claro corresponde a una buena reflexión y un trazo oscuro indica una señal dispersa o absorbida.

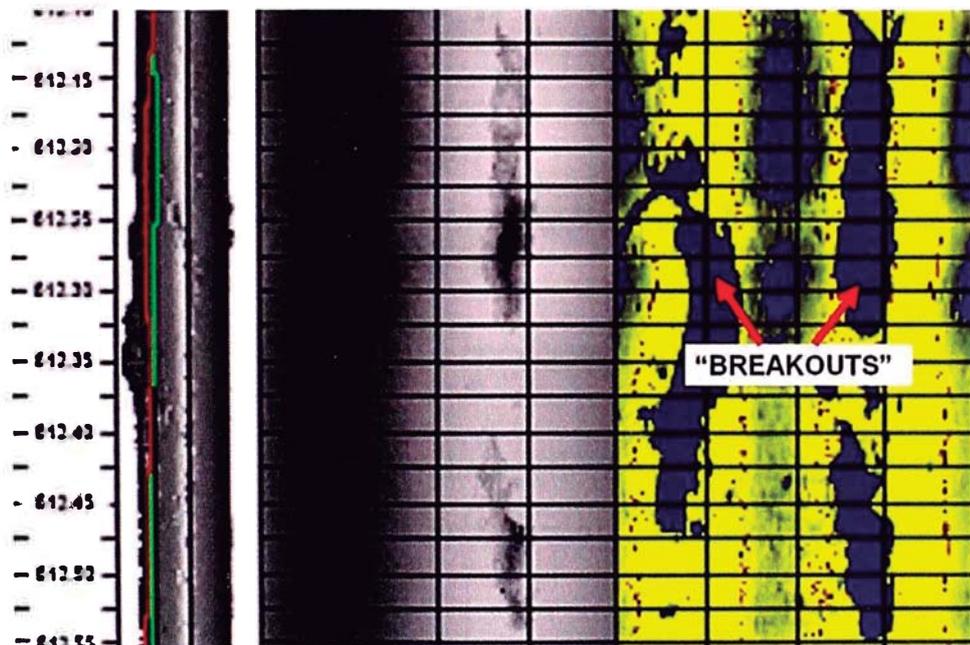


Ilustración 42 – Modelo de registro de BHTV