

VISUALIZACION 3D DE DATOS DE CALIBRE PARA EL ANALISIS DE LA GEOMETRIA DEL HUECO Y LA DETERMINACION DE LA DIRECCION DE LOS ESFUERZOS TERRESTRES

AUTOR Y EXPOSITOR: Germán David García M. Analista de Registros.
Schlumberger, GeoQuest. Colombia.

RESUMEN

A pesar que el efecto de los esfuerzos presentes en el subsuelo ha sido plenamente identificado en muchas de las actividades en la industria del petróleo, poco era el interés que se daba a este tipo de eventos. El deterioro de la geometría del pozo durante la perforación, por ejemplo, era reconocido como factor causante de pérdidas excesivas de tiempo e incremento dramático de los costos pero, entre las hipótesis consideradas para la explicación del fenómeno, dichos esfuerzos no fueron considerados sino hasta hace poco. De igual manera, el estado de esfuerzos o tensor de esfuerzos como también se le conoce, no era asociado a problemas de arenamiento de pozos ó a la dirección de propagación de fracturas en trabajos de estimulación.

Una vez reconocida la directa injerencia de tales fenómenos en estos problemas operacionales, varias aproximaciones fueron desarrolladas para la determinación de la magnitud y dirección de los esfuerzos. Una de ellas, está basada en las deformaciones que sufre el perfil circular del pozo a medida que la perforación progresa y la presión que el lodo ejerce sobre la pared del pozo no alcanza a equilibrar la magnitud de las fuerzas a las que se encuentra sometido el hueco. Estas deformaciones causadas por esfuerzos, se presentan en direcciones intrínsecamente ligadas a las direcciones de éstos. El presente estudio está basado en la utilización de datos de calibre de cuatro brazos y de datos de inclinación para producir una imagen tridimensional orientada del pozo para, de esta forma, derivar la dirección de los esfuerzos horizontales. Se busca con este tipo de análisis utilizar las herramientas de visualización en tres dimensiones que ofrecen los programas de computación actuales, para desarrollar una aproximación diferente al entendimiento del estado de esfuerzos, como condición fundamental en el refinamiento de las prácticas de exploración y explotación de campos petrolíferos.

INTRODUCCIÓN

El acertado conocimiento de la dirección y magnitud de los esfuerzos terrestres es de suma importancia a la hora de adelantar operaciones orientadas a la búsqueda de hidrocarburos, pues éste puede utilizarse para predecir problemas asociados a operaciones de perforación y producción, adelantar soluciones y por ende, ahorrar considerables sumas de dinero. Un ejemplo de esto es el caso de la perforación. Hasta hace unos años, las prácticas utilizadas en la perforación comúnmente generaban huecos rugosos o ensanchados que hacían las operaciones de toma de registros, cementación o viajes de tubería extremadamente riesgosas y costosas. Varios factores estaban asociados a este hecho, entre ellos, se sabía que la correcta selección del peso del lodo al atravesar zonas potencialmente inestables, podía ayudar bastante en el intento de disminuir los costos en cada pozo. El modelamiento que finalmente establece cual es la correcta selección del peso del lodo en un intervalo requiere de la precisa determinación de la dirección y magnitud de las fuerzas del subsuelo actuantes sobre dicho intervalo.

Diversos estudios comúnmente llevados a cabo en la industria del petróleo como análisis de estabilidad de hueco durante la perforación, predicción de la dirección de propagación de fracturas en trabajos de estimulación y estudios para la prevención de arenamiento en los pozos también requieren de una determinación precisa de la dirección y magnitud de los esfuerzos máximos y mínimos horizontales. Esto no siempre es posible si se tiene en cuenta el elevado costo que tienen la realización de estudios independientes para la determinación del tensor de esfuerzos; en su lugar, tradicionalmente los datos de calibre disponibles de adquisiciones de datos de buzamiento o "dipmeter" se han utilizado en conjunción con criterios simples de reconocimiento de rompimientos, que en el caso de pozos verticales, son formados casi exclusivamente en la dirección del mínimo esfuerzo horizontal. La realidad de las operaciones de exploración y producción actuales demandan la aplicación de dichas técnicas al caso de pozos desviados. En estos casos, los resultados obtenidos utilizando las técnicas tradicionales de interpretación de datos de calibre, no son suficientes para la obtención de evaluaciones confiables y deben ser complementados con la interpretación de las imágenes obtenidas de la visualización tridimensional. La primera parte de este artículo, ilustra la idea conceptual de la deformación del perfil

circular del hueco y describe los criterios tradicionalmente utilizados en la identificación de las deformaciones debidas a esfuerzos, diferenciándolas de aquellas inducidas por el proceso de perforación. Seguidamente, se presentan ejemplos reales de la utilización de la visualización en la resolución de problemas de inestabilidad de hueco y caracterización del estado de esfuerzos en cuencas tectónicamente activas.

ANÁLISIS DE IMÁGENES 3D DE LAS FORMAS DEL POZO OBTENIDAS A PARTIR DE DATOS ORIENTADOS DE CALIPER.

Generalidades

Los esfuerzos terrestres presentes en cuencas sedimentarias, pueden dividirse en tres componentes mutuamente perpendiculares: un componente vertical (s_1) cuya magnitud está determinada por el peso de estratos suprayacentes a un determinado punto y dos componentes ortogonales horizontales (s_2 y s_3). La magnitud de los esfuerzos horizontales generalmente no es la misma, por tanto se habla de un mínimo (S_h) y un máximo (S_H) esfuerzo horizontal.

Durante la perforación las rocas circundantes al pozo "sienten" los esfuerzos terrestres aplicados sobre ellas y frecuentemente responden deformándose de una manera tal que permite determinar las direcciones y en muchos casos, las magnitudes relativas de los esfuerzos principales presentes. La severidad de éstas deformaciones está también relacionada con la presión que el lodo ejerce sobre la pared del pozo así como la presión de poro de los fluidos contenidos.

La respuesta de la roca a estos esfuerzos es el microfracturamiento y posterior derrumbamiento de fragmentos de formación mas cercanos a la cara del pozo, produciéndose intervalos con secciones transversales elipsoidales conocidos como rompimientos cuya orientación permite inferir la dirección del mínimo esfuerzo horizontal (ver figura1).

La aproximación utilizada en estos casos para la evaluación de la dirección de los esfuerzos es la interpretación de los datos de calibre adquiridos en conjunto con los datos de buzamiento o "dipmeter" ya que estos guardan información importante de la anisotropía de los esfuerzos en un área determinada. Tradicionalmente, los datos de calibre eran solo utilizados para la cuantificación de los volúmenes de lechada utilizada durante las operaciones de cementación y para tener idea de los lugares en los que se podían encontrar problemas durante los viajes de tubería(figura 2a). La aplicación de la visualización tridimensional adiciona mucho valor a los datos de calibre como puede observarse en la figura 2b pues permite no solo extraer la información ya mencionada sino que proporciona una idea global del estado del hueco y permite ubicar las formaciones problema dentro de un marco espacial.

Para inferir la dirección del mínimo esfuerzo horizontal a partir de la identificación de rompimientos y su dirección, se considera que la herramienta de registro de buzamiento rota mientras es movida hacia arriba durante la operación de registro, debido al torque que sobre ella ejerce el cable. Cuando se encuentra un rompimiento, un par de brazos opuestos de la herramienta queda "atrapado" y la rotación de la herramienta cesa (ver figura 3). Sin embargo, este criterio se limita a pozos esencialmente verticales (desviación no mayor a 5 grados) en los que la dirección del rompimiento del hueco se presenta en la dirección del mínimo esfuerzo horizontal. La Tabla 1 recoge algunos de los criterios de reconocimiento de rompimientos partir de registros de buzamiento de cuatro brazos que, para el caso de pozos verticales, proponen Fodjor y otros (1983) y Springer (1987). Estos criterios de una u otra forma son de carácter subjetivo ya que por ejemplo en rompimientos poco desarrollados en rocas duras, la herramienta puede no dejar de rotar descartándose información valiosa. La aproximación utilizada para la visualización tridimensional permite, como se expone mas adelante, utilizar otros criterios de reconocimiento de rompimientos.

-
1. La herramienta tiene que dejar de rotar
 2. La medida de la curva de calibre mas larga debe exceder el tamaño de la broca. La medida del mas corto no debe ser inferior al hueco “en calibre” y su trazo debe ser recto.
 3. La dirección de los rompimientos no debe coincidir con la dirección de la desviación del pozo.
-

Tabla 1. Criterios de reconocimiento de rompimientos a partir de datos de registros de buzamiento de cuatro brazos propuestos por Fodjor y otros (1983) y Springer (1987).

Visualización tridimensional

Los criterios de reconocimiento de rompimientos mencionados no siempre reflejan las condiciones reales de formación de éstos cuando la desviación del hueco excede cierto límite, usualmente de 5 a 10 grados. En huecos desviados, contrario al caso vertical, la formación de rompimientos depende de la dirección y magnitudes relativas de los tres esfuerzos principales.

Recientemente, poco se ha avanzado en la determinación de la dirección de los esfuerzos a partir del análisis de rompimientos y otras geometrías de pozo causadas por el estado de esfuerzos en pozos desviados. Las razones se deben en parte a la dificultad de distinguir formas del hueco inducidas por esfuerzos de las inducidas durante la perforación. En múltiples ocasiones las deformaciones del perfil hueco debido a los esfuerzos tectónicos se confunden con las deformaciones del perfil del pozo como ensanchamientos o “washouts” y ojos de silla o “key seat” debidas a otro tipo de agentes. En estos casos, la técnica de visualización en tres dimensiones de los datos orientados de calibre es una herramienta poderosa ya que permite descartar el ensanchamiento debido a estos agentes distintos a los esfuerzos y de esta manera, permitir una aproximación real a la hora de determinar acertadamente los esfuerzos tectónicos pozo a pozo o a nivel regional utilizando la interpretación de la dirección de los rompimientos.

Aunque la forma que adquiere el pozo una vez perforado es irregular, la mejor aproximación de la sección transversal del pozo es una elipse. La visualización 3D de los datos orientados de calibre esta basada en la creación de elipses punto a punto utilizando los datos de calibre mutuamente perpendiculares como ejes de éstas (Ver figura 4).

La identificación de rompimientos se hace mediante la comparación punto a punto de los ejes medidos de la elipse con el diámetro nominal establecido para el hueco (usualmente el tamaño de broca). De esta manera se establece una medida de la “ovalización” del hueco que inmediatamente es confrontada con un criterio establecido por el usuario en cada caso. Luego se determina la rata de crecimiento del diámetro del pozo cuando se entra en un rompimiento (medida en pulgadas de incremento por pie de longitud del pozo) que al igual que en el caso de la medida de “ovalización” también es confrontada con un criterio. El manejo de parámetros por zonas permite la identificación de rompimientos pequeños en rocas mecánicamente competentes y de igual forma de rompimientos grandes en rocas fácilmente derrumbables. Una vez detectado el rompimiento se define su orientación determinando la orientación del eje mayor de la elipse. La figura 5 muestra los rompimientos detectados y su orientación en un intervalo de 300 pies.

Algunas referencias destacan el carácter discreto de los rompimientos debido a que la resistencia mecánica de las formaciones varían con litología. Sin embargo, en áreas de grandes movimientos tectónicos, es posible observar cientos de pies de rompimientos como se aprecia en la figura 6 donde los ensanchamientos son continuos sobre una intercalación arcilla-arena en un intervalo superior a 300 pies.

Aplicaciones de la visualización a casos reales.

Ejemplo 1. Elaboración del estudio de estabilidad del hueco para un proyecto de perforación de un pozo horizontal.

Como se mencionó previamente, el reto de la determinación acertada de la dirección de los esfuerzos horizontales radica en que la forma del hueco esta influenciada también por fenómenos diferentes a esfuerzos. La sarta de perforación puede erodar la pared del hueco produciendo una elongación cuando el hueco es desviado. De igual forma, la formación asimétrica de torta también puede producir geometrías de hueco semejantes a los rompimientos, además en los ensanchamientos el hueco “crece” en todas las direcciones.

Para el cálculo de la estabilidad del hueco en el intervalo seleccionado para la construcción de ángulo durante la planeación de un pozo horizontal en los llanos colombianos, se requería de la determinación de la dirección de esfuerzos. Con este propósito, datos de calibres de pozos en el mismo bloque fueron visualizados para determinar dirección de los rompimientos. La figura 7 muestra los resultados de la visualización para uno de los pozos. Nótese que la curva que indica el lado mas alto de la sección transversal del hueco coincide con la dirección del rompimiento. Esto ocurre en pozos moderadamente desviados cuando la tubería de perforación, siempre en tensión, hace contacto con el lado alto del pozo. Se concluyó que la información de este pozo no era representativa y que la deformación del perfil circular del pozo observada en los calibres era causada por la sarta de perforación. La dirección del mínimo esfuerzo horizontal para efectos del modelamiento, fue asumida de acuerdo a información geológica regional.

Ejemplo 2. Optimización de la perforación en áreas de grandes esfuerzos tectónicos.

La perforación de pozos profundos en el piedemonte colombiano se ha convertido en uno de los retos mas importantes para la industria del petróleo en general durante los últimos años. Las estructuras complejas y las enormes fuerzas tectónicas presentes en esta área generaron en principio un gran número de problemas de pegas por empaquetamiento, elevados costos de disposición de la gran cantidad de sólidos producidos durante la perforación y el deterioro de los huecos, imposibilitando muchas operaciones de registro y generando altos riesgos en la operaciones de revestimiento, cementación etc. Conscientes de ello, varias compañías que adelantan operaciones en el área, decidieron profundizar en el estudio de causas de las deformaciones del hueco durante la perforación (Ver referencia 5). Dentro de las actividades desarrolladas durante el proyecto, se realizó el análisis de rompimientos en varios pozos arrojando una orientación NW-SE para el máximo esfuerzo horizontal. Varios de los pozos analizados en esa ocasión presentaban patrones de deformación bastante extraños dado que exhibían cambios progresivos en las orientaciones de los rompimientos. Ver figura 8a.

Recientemente, la utilización de la visualización de los datos ha aportado significativamente al entendimiento del problema. El refinamiento del modelo estructural y la aplicación de nuevos criterios a las imágenes en tres dimensiones permiten establecer que en el área de estudio se presenta rotación del tensor de esfuerzos en intervalos cortos cercanos a grandes fallas. Esta hipótesis, planteó la necesidad de modelar la estabilidad del hueco teniendo en cuenta que la dirección de las componentes de los esfuerzos tectónicos no es constante como usualmente se asumía. La figuras 8b y 8c muestra la rotación progresiva que presentan los rompimientos debido al cambio de orientación del tensor de esfuerzos en uno de los pozos visualizados.

CONCLUSIONES

La visualización de datos de calibre orientados, permite a partir del estudio de la geometría del pozo inferir las dirección de los esfuerzos horizontales en gran número de casos. Este análisis puede ser utilizado también para validar el tensor de esfuerzos derivado de otras observaciones.

La visualización en tres dimensiones de datos orientados de calibre sumado al conocimiento geológico y estructural en una región, proporciona un mejor entendimiento del estado de esfuerzos en áreas

tectónicamente complejas, donde el simple análisis cuantitativo de los ensanchamientos del hueco no brinda suficiente información para dar soluciones de fondo a problemas de la perforación.

Los modelamientos como la predicción de la dirección de propagación de fracturas, el análisis de arenamientos, el cálculo de la estabilidad de hueco etc que requieren la determinación de el estado de esfuerzos pueden utilizar la visualización 3D como la mejor aproximación para descartar las deformaciones inducidas por la perforación.

CONTRIBUCIONES TÉCNICAS

En general es una herramienta para el monitoreo de las condiciones del hueco. De igual forma se utiliza como guía para validar o re-evaluar las practicas de perforación sobre la base de un pozo o para un región determinada.

Utiliza la recientemente introducida visualización tridimensional para analizar datos ya adquiridos y que se consideraban solo información complementaria, para elaborar una mejor evaluación de las condiciones del hueco tanto en pozos antiguos como en pozos nuevos.

Permite dar un nuevo enfoque a viejos interrogantes abriendo posibilidades a soluciones de problemas no resueltos.

Establece una dirección hacia la cual deben orientarse esfuerzos en el diseño de aplicaciones que permitan la integración de otros datos como los modelos geológicos y estructurales para de ésta manera observar la ocurrencia de éstos eventos en una forma espacial.

BIBLIOGRAFIA

1. CJ EVANS & NR BRERETON. In situ crustal stress in the United Kingdom from bore hole breakouts. British geological survey, keyworth, nottingham, NG12 5GG, UK
2. JS BELL. Investigating Stress regimes in sedimentary basins using information from oil industry wireline logs and drilling records. Geological survey of canada, atlantic geoscience centre, bedford institute of oceanography, PO box 1006, Dartmouth, nova scotia, B2Y 4A2, canada
3. JHON BRUMLEY, ROBERT KUHLMAN, HAZIM ABASS, CLAUS CHRISTIANSEN AND LARS NYDAHL JORGENSEN. In-situ stress field determination and formation characterization- Offshore Qatar case history. SPE Paper.
4. TOM BRATTON, TED BORNEMANN, QIMING LI, DICK PLUMB, JHON RASMUS AND HELLE KRABBE. Logging-while-drilling images for geomechanical geological and petrophysical interpretations.
5. NIGEL LAST, DICK PLUMB. Managing wellbore instability in the cusiana field. SEARCH magazine, number 2, 1995.
6. N.C LAST, D. LOPEZ NAVARRO AND M.E. MARKLEY. Case history: Integration of rock mechanics, structural interpretation and drilling performance to achieve optimum horizontal well planning in the llanos basin, Colombia. SPE paper No 38601.
7. M. CESARO, M. GONFALINI, P CHEUNG, A. ETCHECOPAR. Shaping up to stress in the Apennines.

LEYENDA DE ILUSTRACIONES

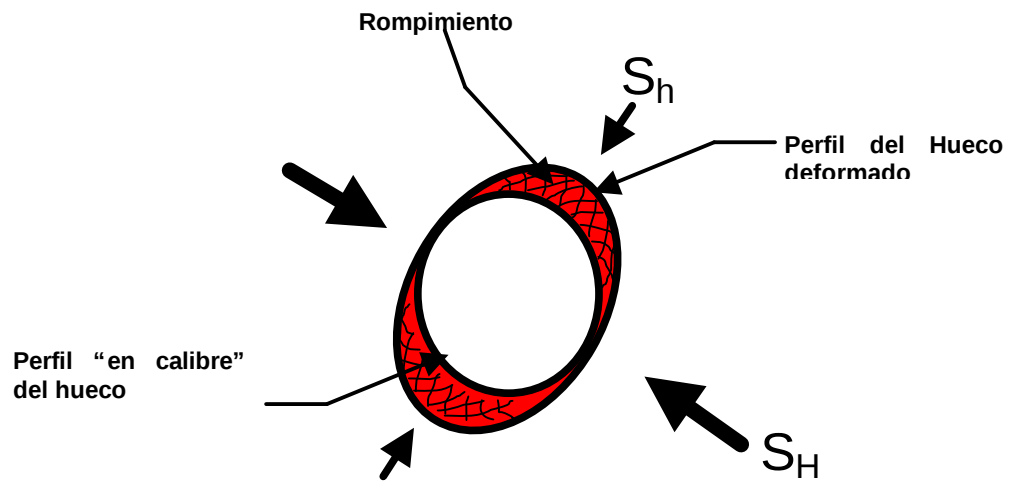


Figura 1. Disposición de la deformación del hueco causada por esfuerzos. Caso pozo vertical.

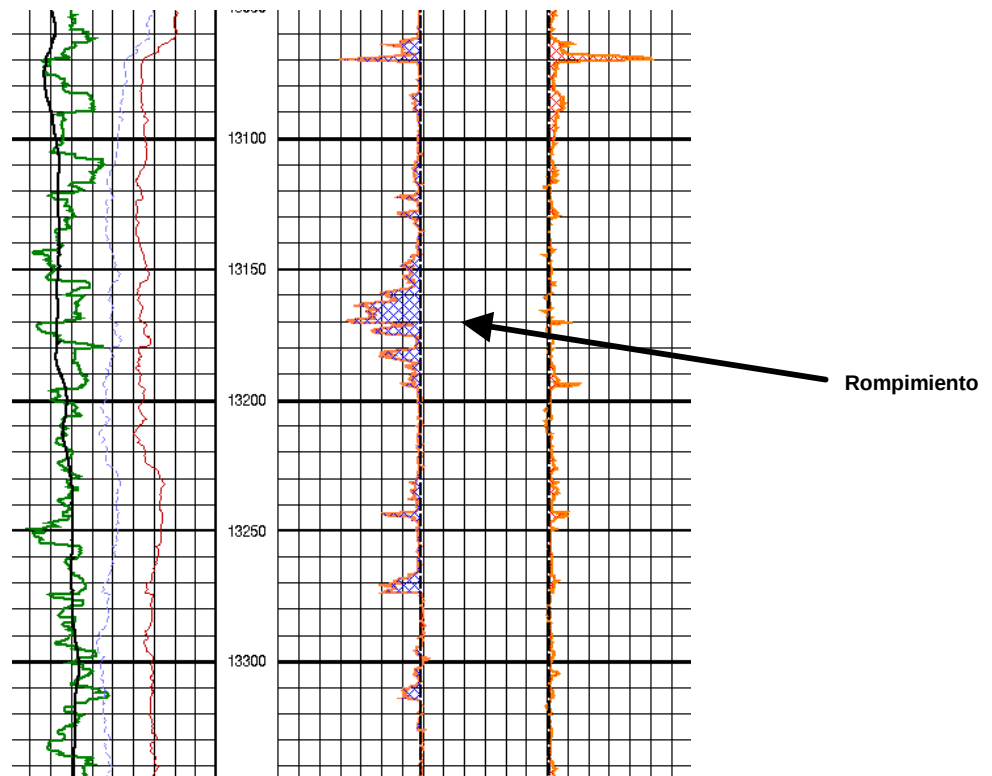


Figura 2a. Registro de calibres mostrando un rompimiento a 13170 pies.

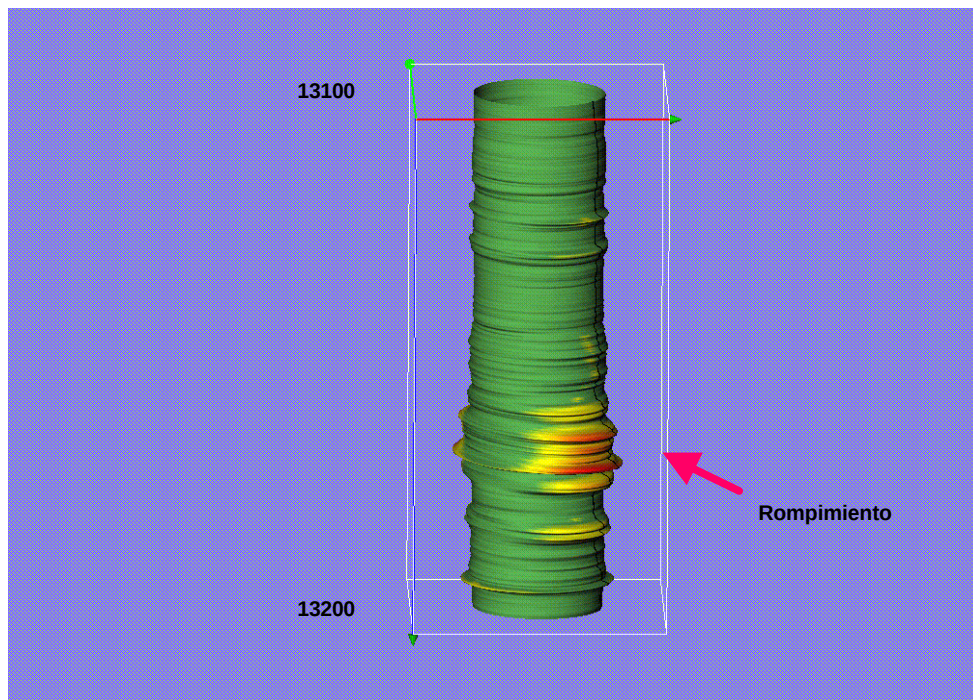


Figura 2b. Imagen tridimensional mostrando el rompimiento a 13170 pies.

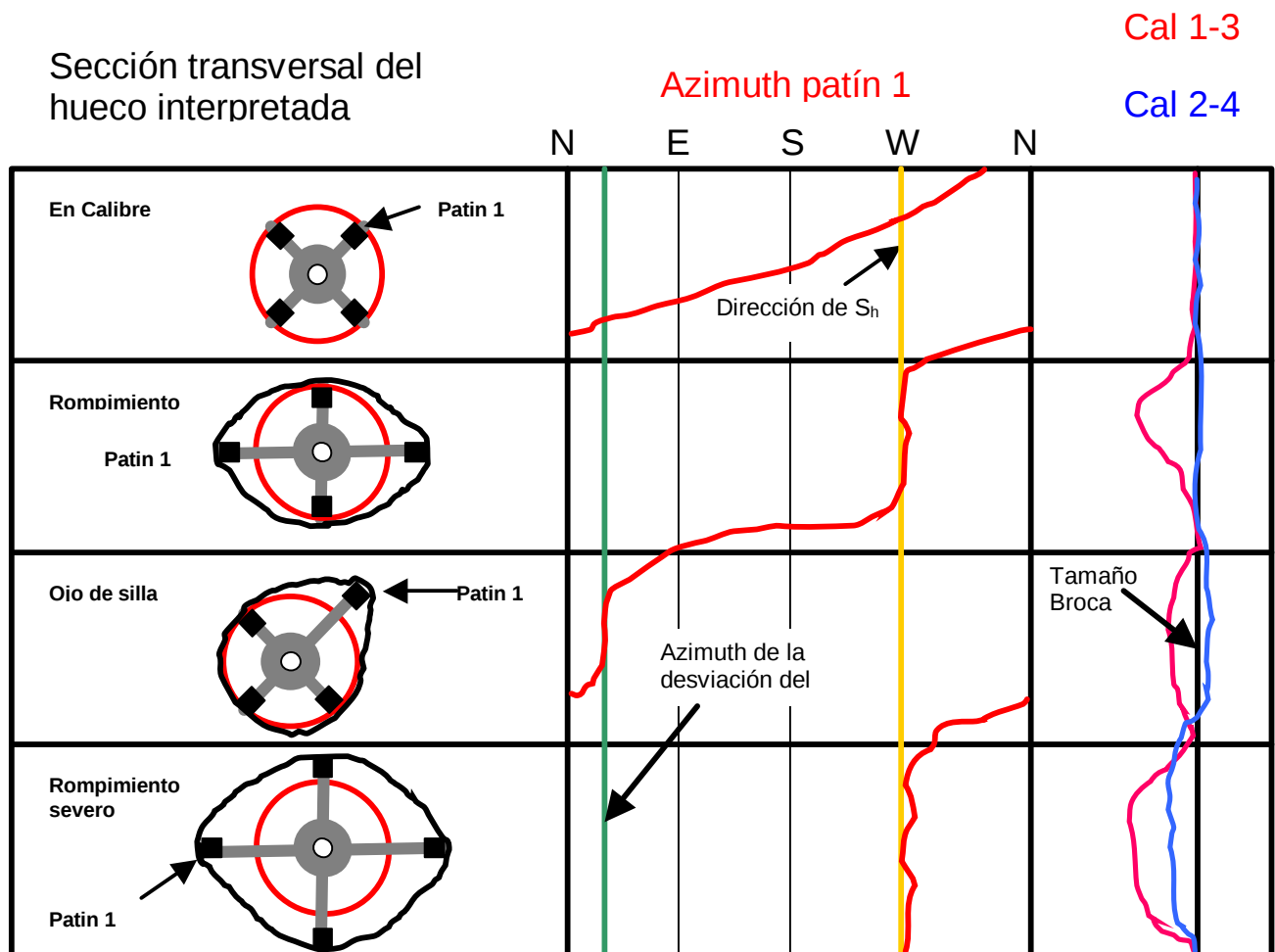


Figura 3. Criterio de reconocimiento de rompimientos utilizando datos de calibre. Caso pozo vertical.

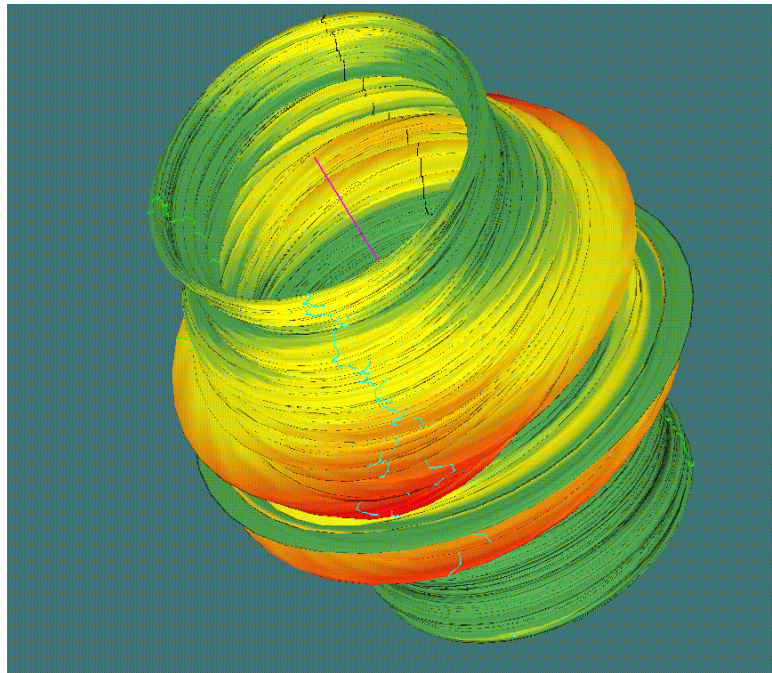


Figura 4. Vista tridimensional del pozo construida a partir de datos de calibre.

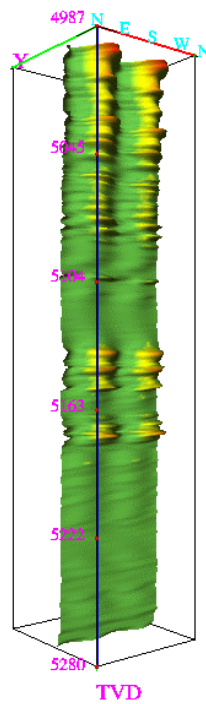


Figura 5. Vista desarrollada del perfil de un pozo en el intervalo 4987 pies a 5280 pies.

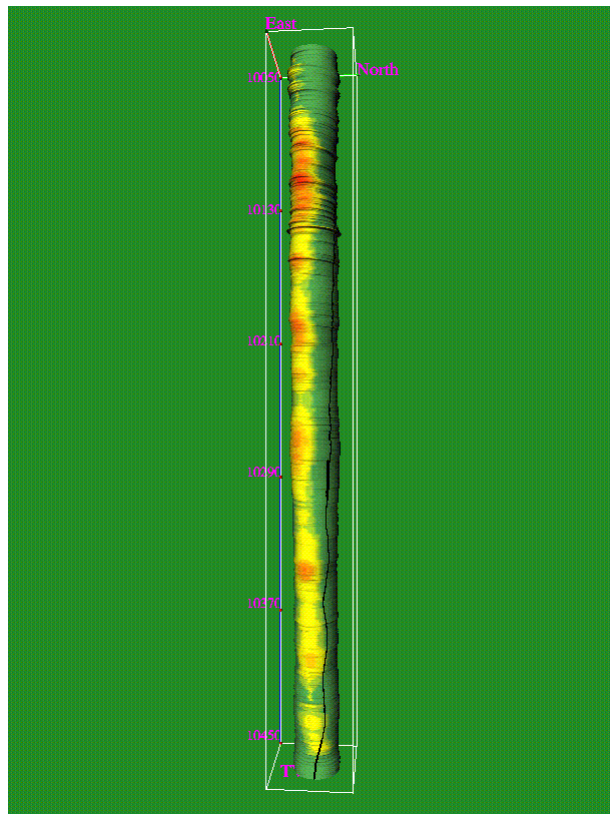


Figura 6. Rompimientos prolongados son comunes en bloques sometidos a altos esfuerzos regionales.

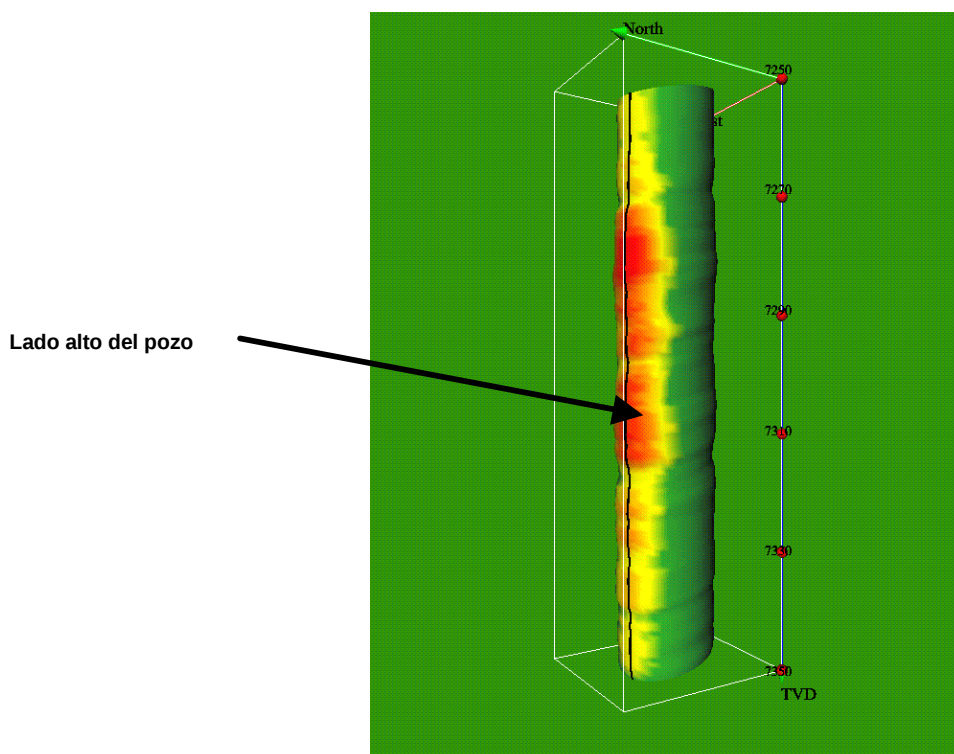


Figura 7. Elongacion del hueco causada por la tubería de perforación.

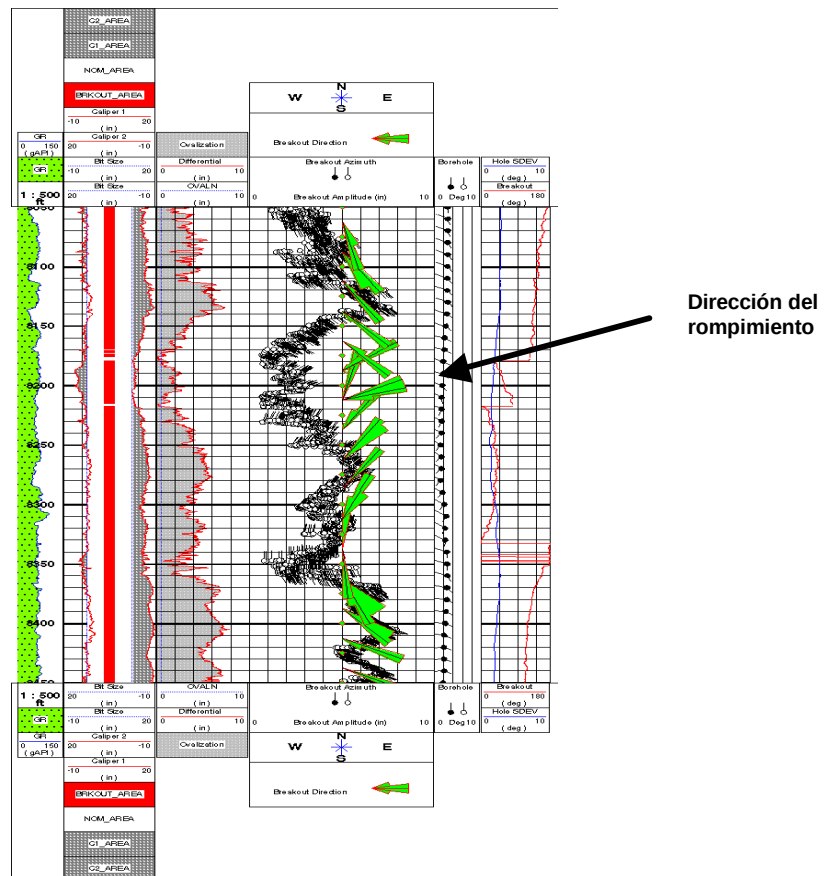


Figura 8a. Aspecto del registro de calibres en zonas cercanas a grandes fallas. Nótese la rotación de los rompimientos indicando una variación angular en la dirección del tensor de esfuerzos.

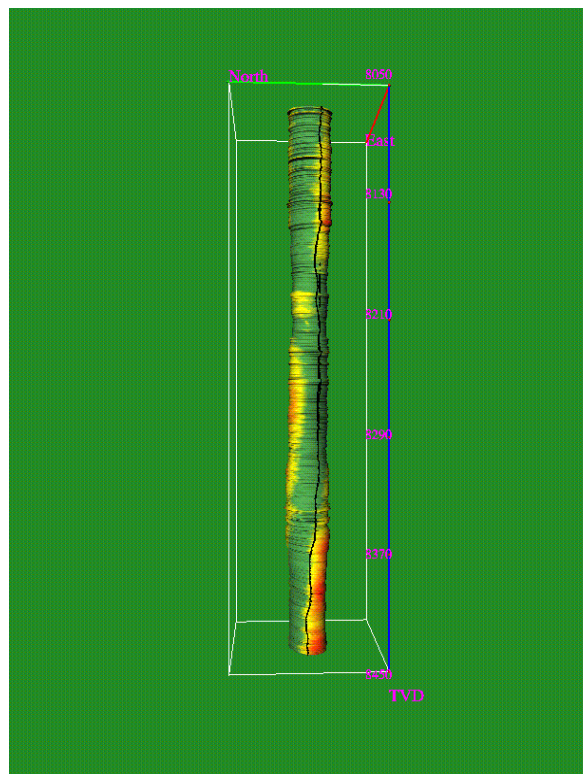


Figura 8b. En esta vista se observa el cambio progresivo en la orientación de los rompimientos.

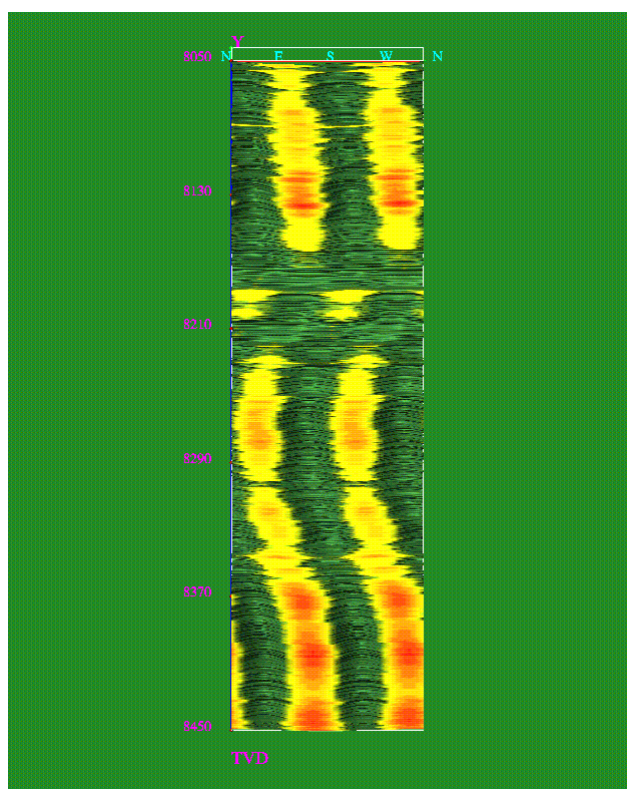


Figura 8c. Vista desarrollada del perfil del pozo en la que se observa el cambio en la dirección de los rompimientos.