

# La ovalización (*breakouts*) de pozos: interpretaciones dinámicas y aplicaciones a perforaciones en la Formación Vaca Muerta, Cuenca Neuquina

Eduardo A. ROSSELLO<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CONICET - Universidad de Buenos Aires, FCEN. Pabellón II. Ciudad Universitaria (1428) BUENOS AIRES, Argentina.

E-mail: ea\_rossello@yahoo.com.ar

## RESUMEN

La ovalización (*breakout*) es la expresión bidimensional perpendicular al eje del pozo del estado tensional actual del macizo rocoso desarrollado durante su perforación que coincide con la elipse de deformación. Esta expresión bidimensional puede no resultar constante a lo largo del desarrollo del pozo ya que pueden exhibirse variaciones debidas a cambios en la historia tectosedimentaria y respuesta reológica de las distintas secuencias involucradas. La variación vertical de la orientación de la ovalización puede asociarse con la superposición de campos de esfuerzos fósiles y actuales con disposiciones espaciales diferentes. Estas variaciones pueden condicionar la mejor posición de las perforaciones dentro de la Formación Vaca Muerta y atenuar severas consecuencias geomecánicas relacionadas con la pérdida de lodos, inestabilidad del pozo, colapsos de tuberías, compactación de los reservorios, subsidencias de la superficie, producción de arenas, reactivación de fallas y pérdida de eficiencia de sellos. Por esta razón, su más precisa localización 4D del estado tensional de las rocas contribuye con el más eficiente manejo de estas actividades.

**Palabras clave:** *ovalización de pozos, geomecánica, tectónica, deformación, Formación Vaca Muerta*

## ABSTRACT

*Breakouts of wells: dynamic interpretations and applications to drilling in the Vaca Muerta Formation, Neuquén Basin.*

The break-out is the two-dimensional expression perpendicular to the axis of the well of the current tensional state of the rock developed during its drilling. This two-dimensional expression may not be constant throughout the development of the well since variations due to changes in the tectosedimentary history and rheological response of the different sequences involved may be exhibited. The vertical variation of the orientation of the breakouts can be associated with the superposition of fields of fossil and current stresses with different spatial arrangements. These variations control the best position of the perforations within the Vaca Muerta Formation and could mitigate severe geomechanical consequences related to the loss of sludge, well instability, pipe collapses, reservoir compaction, surface subsidence, sand production, fault reactivation and loss of efficiency of seals. For this reason, its more precise 4D localization of the stress state of the rocks contributes to the most efficient management of these activities.

**Keywords:** *breakout of wells, geomechanics, tectonics, deformation, Vaca Muerta Formation.*

## INTRODUCCIÓN

Las actividades habituales de perforación en la exploración y producción de hidrocarburos causan cambios en las condiciones geomecánicas del conjunto rocoso-fluidos que resultan de la suma de todos los esfuerzos sufridos a lo largo de su historia. Estas intervenciones provocan

la inmediata respuesta del estado tensional acumulado que se expresa en la geometría del pozo, de tal modo, que puede generar una sección elíptica perpendicular al eje del pozo. Este particular rasgo bidimensional cuando es generado por la acción de campos de esfuerzos asociados a la historia del macizo rocoso se denomina ovalización del pozo (que puede terminar en ruptura de la pared del pozo, llamado

*breakouts*) que es una directa expresión instantánea de la elipse de deformación como consecuencia del estado tensional del macizo rocoso intervenido por la perforación. Por ello, a partir del uso generalizado de esta metodología, muchos autores se han referido a su utilidad en el reconocimiento de las condiciones mecánicas que lo generan (Bell y Gough 1982, Gough y Bell 1982, Zoback *et al.* 1985,

Peska y Zoback 1995, Reinecker *et al.* 2003, Asquith y Krygowski 2004).

Si las variaciones de los estados tensionales a lo largo del pozo no se tienen en cuenta y se considera un único estado tensional homogéneo se pueden evitar las direcciones más eficientes de los pozos productivos y acarrear en determinados tramos negativas consecuencias geomecánicas severas. Estas pueden producir pérdida de lodos, inestabilidad del pozo, colapsos de tuberías, compactación de los reservorios, subsidencias de la superficie, producción de arenas, reactivación de fallas y pérdida de sellos pueden ser en todos los casos una manifestación de los cambios de esfuerzos ejercidos (Zoback *et al.* 1985). Si bien es una información de subsuelo habitual para los profesionales relacionados con la evaluación de campos hidrocarburíferos y bastante accesible a partir de distintos tipos de relevamientos petrofísicos resulta, sin embargo, es en general no suficientemente aprovechada desde el punto de vista del ajuste de interpretaciones estructurales por los geólogos de la industria.

El objetivo de la presente contribución, parcialmente adelantado (Rossello 2017), es proporcionar una descripción de la ovalización de pozos en relación con los campos de esfuerzos responsables y ofrecer algunos ejemplos de su utilización en la interpretación dinámica de escenarios tectónicos vinculados con el desarrollo exploratorio y productivo aplicables a la productividad de la Fm. Vaca Muerta como un reservorio no-conventional. En consecuencia, se considera que este estudio puede ser útil para un mejor postulado y aprovechamiento de modelos petrofísicos y geomecánicos de la exploración y producción no-conventional de hidrocarburos.

## OVALIZACIÓN DEL POZO POR RUPTURA

La ovalización del pozo por ruptura ofrece un método directo para evaluar la distribución de la tensión biaxial alrededor del hueco de la perforación sobre una sección perpendicular al eje del pozo. Esta expresión bidimensional de la deformación es la consecuencia directa de la reacción del macizo rocoso a un campo de esfuerzos

responsable actuante sobre el mismo (Bell y Gough 1982, Blumling *et al.* 1983, Bell 1990, Aleksandrowski *et al.* 1992, Aadnoy y Bell 1998). Por ello, en todo análisis estructural para abarcar la totalidad del problema es indispensable no solo conocer las consecuencias geomecánicas de la deformación sino también las causas debidas al campo de esfuerzo.

Para realizar una interpretación multiescalar y 4D ajustada con los condicionantes físicos de la deformación de un sector sometido a su estudio geomecánico se recomienda vincular las deformaciones reconocidas con las causas que los provocaron (Jaeger y Cook 1979, Cox 1983). De este modo, el análisis efectuado es más robusto y permite pronosticar adecuadamente las mejores condiciones para proponer actividades exploratorias y/o productivas. Así, desde el punto de vista estrictamente mecánico se reconoce una relación unívoca de causa-efecto, donde el primero es el campo de esfuerzos actuante y el segundo la deformación generada. En consecuencia, una vez superado el límite de resistencia del material este puede responder discontinuamente generándose fracturamientos que necesariamente guardan relaciones espaciales unívocas con el campo de esfuerzos.

Si los esfuerzos, y en particular sus diferencias de módulo sobre la pared del pozo, no son suficientes para superar sus límites de resistencia e inducir en consecuencia la ruptura del macizo rocoso, entonces no hay indicios (incluso la presencia de microfracturas o subcritical cracks detectables por microscopia electrónica y/o catodoluminiscencia) sobre la pared del pozo que permitan reconocer la posición del campo deformativo. Contraria-

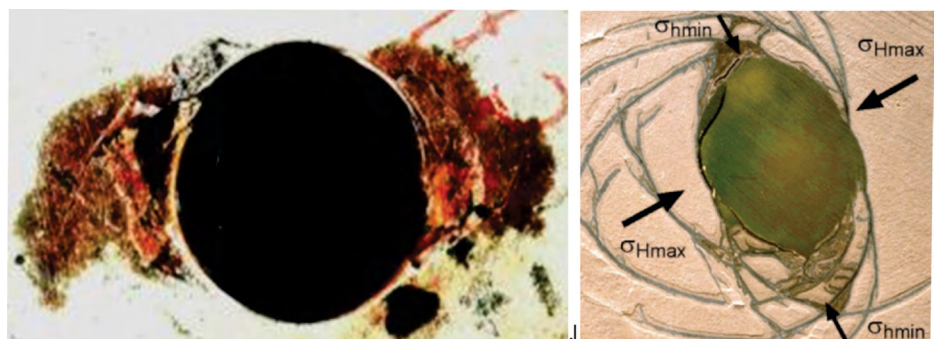
mente, si el campo de esfuerzos aplicado supera el límite de resistencia del macizo rocoso el hueco del pozo exhibirá sobre un plano perpendicular al mismo desarrollará el característico aspecto elipsoidal de la ovalización del pozo (Fig. 1).

Puede considerarse que el origen de la sección ovalizada del pozo se debe al mayor desgaste de las paredes del pozo por abrasión de las herramientas de perforación al mismo momento que ocurre la penetración. Esto es debido a la menor resistencia que ofrece sectores del hueco por la yuxtaposición subparalela de las fracturas potencialmente dilatantes con la superficie cóncava del sondeo. Esta conjunción de superficies próximas a subparalelizarse facilita la mayor liberación de fragmentos idealmente como escamas semilunares que contribuye con una mayor indentación de la herramienta de corte en esa dirección del hueco. De esta manera, la sección circular ideal termina expresándose con una sección elíptica cuyo semieje mayor se dispone en la dirección del esfuerzo menor (Fig. 2).

Merece aclararse, que en una perforación no vertical la sarta de perforación puede recostarse sobre las paredes del pozo y generar un desgaste focalizado sobre el sector de contacto que no necesariamente se considera una ovalización ya que no presenta desgastes opuestos.

## INTERPRETACIONES

La posibilidad por la que un plano genere una sinusoide sobre las paredes extendidas del pozo depende del diámetro del hueco (caliper) y de la inclinación que exhibe el plano con respecto al eje

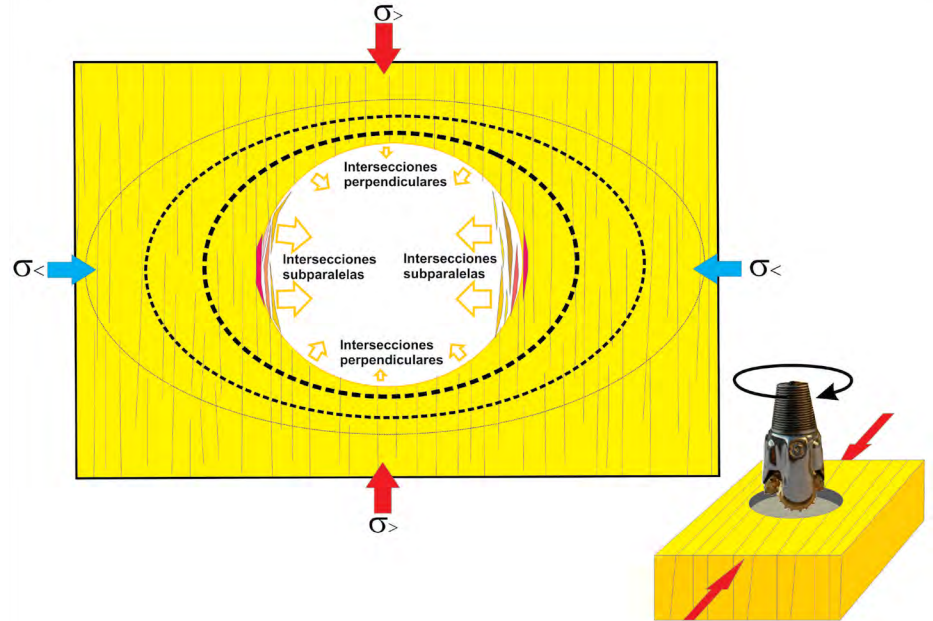


**Figura 1.** Ejemplos de imágenes de ovalizaciones en planos perpendiculares a un pozo y sus relaciones con las deformaciones discontinuas asociadas (tomado de Reinecker *et al.* 2003).

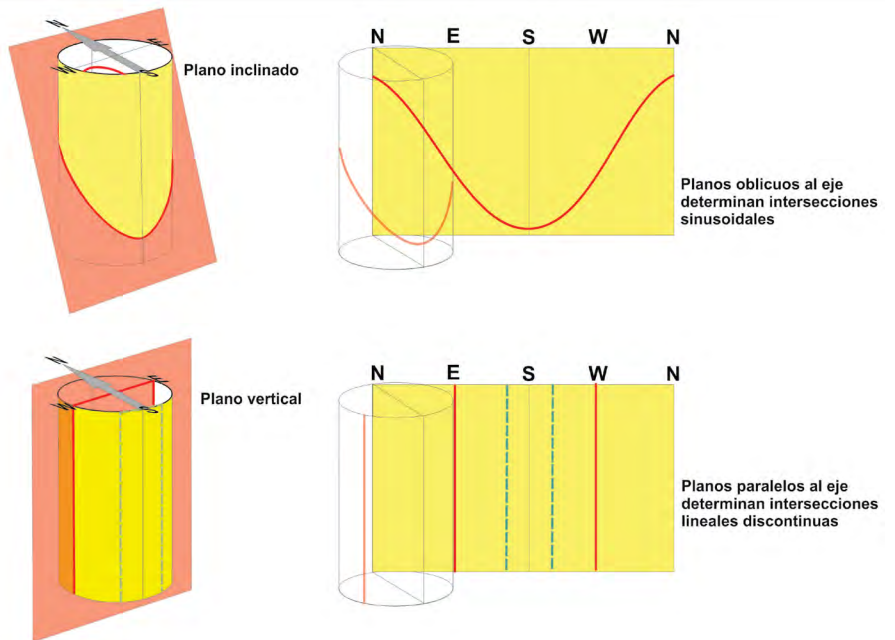
del sondeo sea desde el punto de vista práctico menores de 80°. En general, los relevamientos a partir de los programas disponibles de registro de planos estructurales, sean estos de fracturas o estratificación-laminación no pueden visualizarse adecuadamente cuando tienen ángulos cercanos a la disposición de los ejes del pozo (Plumb y Hickman 1985, Ekstrom *et al.* 1987). Cuando esto ocurre, la intersección del plano en las paredes del pozo genera sinusoides tan apretados que escapan a la ventana de observación. Incluso, en casos extremos cuando la disposición de los planos son subparalelos al pozo generan trazas subparalelas en los pozos que no pueden ser relevados por estas metodologías (Fig. 3).

Para que la información de ovalización provista por los registros de pozos sea más confiable en la interpretación estructural se debe conjugar con el estudio microtectónico de núcleos (Seeburger y Zoback 1982, Mastin 1988, Tingay *et al.* 2008) y/o escenarios tectónicos mayores (Moos y Zoback 1990, Spemer *et al.* 2003). De este modo, se robustece la interpretación de la deformación y especialmente la identificación del campo de esfuerzos responsable (Zajac y Stock 1992). La metodología usualmente más práctica es la de cubrir de modo envolvente la superficie cilíndrica del núcleo con un material transparente (celuloide, acetato, plástico, etc.) donde se pueda copiar con marcadores los rasgos estructurales detectados. Luego, al desenrollarse se tiene un plano extendido de la superficie cilíndrica del núcleo que puede compararse fácilmente con los registros de imágenes de pozos, fotografías tomadas a 360° y últimamente con tomografías 3D de coronas.

También, con respecto a la interpretación tectónica de rasgos estructurales a partir de las imágenes pueden producirse controversias generadas por la correlación de los rasgos que se identifiquen. Por ejemplo, si los rasgos son verticales, muy discretos y restringidos a determinados niveles con respuestas mecánicas competentes se pueden correlacionar de modo integral al punto de generar interpretaciones que las vinculan con una única estructura mayor con una angularidad con respecto al eje del pozo al considerarlas continuas y por lo tanto presentes en nive-



**Figura 2.** Esquema del desarrollo de la sección ovalizada del pozo por la yuxtaposición de la fracturación potencialmente dilatante (paralela al esfuerzo mayor en ese plano) de modo subparalelo a las paredes del sondeo.



**Figura 3.** Representaciones de rasgos planares en los núcleos y su relevamiento. En el caso que el plano a relevar presente ángulos de intersección significativos con las superficies extendidas del hueco desarrollará sinusoides. En el caso que el plano a relevar se disponga subparalelo al eje del núcleo su intersección generará rasgos subparalelos.

les intercalados sin que tengan respuestas evidentes (Fig. 4).

### RELACIONES ENTRE LA OVALIZACIÓN Y EL CAMPO DE ESFUERZOS

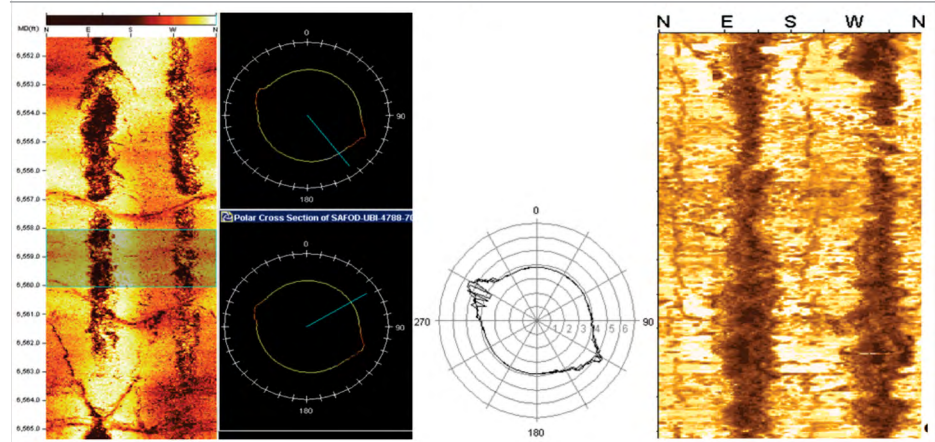
En la industria petrolera, a partir de la medición de la ovalización se puede es-

timar la posición bidimensional del campo de esfuerzos perpendicular a un pozo (Blumling *et al.* 1983, Bell 1990). El método de medición en este caso consiste en evaluar la ruptura de la perforación mediante técnicas de escáner acústico o resistivo donde se mide la magnitud angular de la ovalización (Peska y Zoback 1995, Reinecker *et al.* 2003). Existen metodologías que permiten esti-



mar la tensión mínima y si además se tiene un buen conocimiento de la resistencia del material donde ocurrió la ovalización, entonces se puede reconocer no solo la posición del campo de esfuerzos si no también calcular la tensión máxima perpendicular al agujero (Gough y Bell 1982, Blumling *et al.* 1983, Bell 1990). Por lo tanto, si se dispone de un núcleo que ha sido extraído del pozo en el sitio de la ovalización para la prueba de resistencia a la compresión uniaxial (UCS, por sus siglas en inglés) y se conoce la presión de cierre de la fractura hidráulica, entonces existe una base para calcular la tensión máxima perpendicular al pozo (Hickman *et al.* 1982, 1985). Para hacer esto se necesita disponer de buena información sobre la resistencia de la roca. Por ejemplo, al intentar establecer una UCS mediante la correlación a partir de un registro sónico normalmente no aportaría un valor lo suficientemente preciso para ser utilizado en el cálculo de la tensión de la ovalización. Lo que se necesita realmente es una medición de UCS transversal a las paredes del pozo (Fig. 5).

Para comprender las relaciones espaciales que existen entre el campo de esfuerzo y los fracturamientos, primero es necesario diferenciar: i) los fallamientos como superficies de discontinuidad que



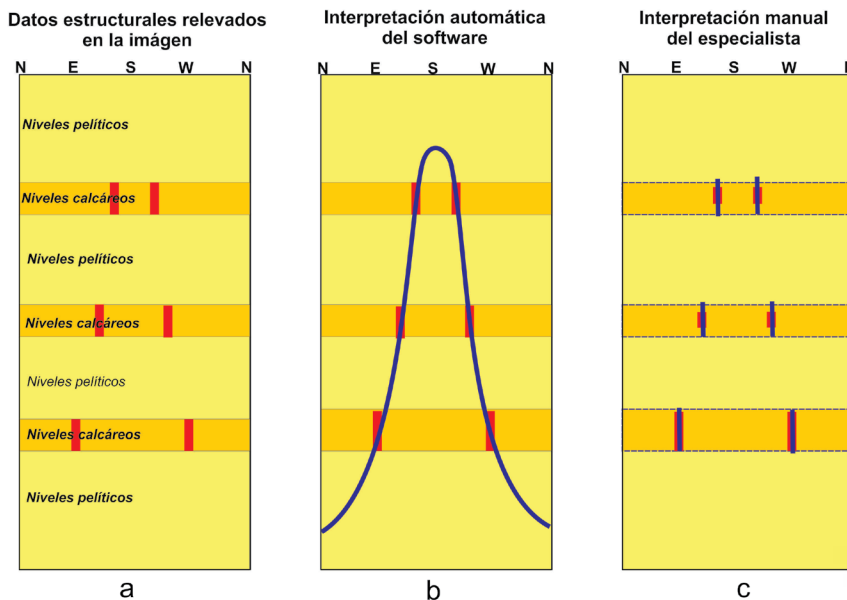
**Figura 5.** Izquierda: Registro de imagen de pozo que exhibe la presencia de ovalización por el mayor diámetro puesto de manifiesto por las zonas oscuras a 180°. (Tomado de <http://sigra.com.au/wp/wp-content/uploads/2013/06/Capture-4-291x300.jpg>). Derecha: Imágenes perpendiculares al pozo donde se aprecian los daños vinculados con la ovalización (tomado de Reinecker *et al.* 2003).

observan movimientos de los bloques que determinan contenidos en ellas, y ii) los diaclasamientos como superficies de discontinuidad que exhiben movimientos de los bloques solamente perpendiculares a los mismos.

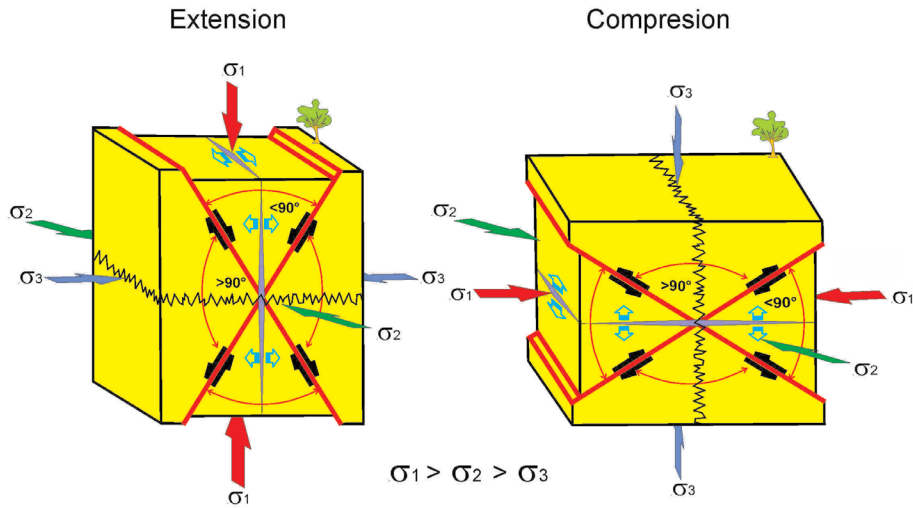
El esfuerzo principal máximo  $\sigma_1$  y las superficies de fallamientos siempre van a mantener un ángulo menor a 45°, frecuentemente del orden de 30-40°, conocido como Ley de Anderson (Jaeger y Cook 1979, Ramsay y Huber 1983, Price y Cosgrove 1990, Davis y Reynolds 1996, Rossello 2001). Por lo tanto, independientemente que se trate de

un fallamiento normal, inverso o transcurrente, siempre el esfuerzo principal máximo  $\sigma_1$  se dispone invariablemente con un ángulo menor de 45° (cerca a 30 - 40°) con respecto al plano de fallamiento sobre el cual actúa (Fig. 6).

De esta manera, mediante la utilización del círculo de Mohr y dentro de condiciones ideales de comportamiento mecánico isótropo, el valor máximo del esfuerzo eficaz  $\sigma$  está dado por el  $\cos \theta \cdot \sin \theta$  máximo, o sea  $\frac{1}{2} \sin 2 \theta$  máximo (puesto que  $\cos \theta \cdot \sin \theta = \frac{1}{2} \sin 2 \theta$ ), o  $\sin 2 \theta$  máximo = 1, que corresponde a un ángulo  $2 \theta = 90^\circ$ , o sea un ángulo  $\theta$  máximo = 45° (Ramsay y Huber 1983, Price y Cosgrove 1990, Rossello 2001). Lo único que varía para definir la nomenclatura del tipo de fallamiento es la posición espacial que exhiben con respecto al nivel de referencia horizontal que es el determinante para la nomenclatura: i) si producen acortamiento de la superficie terrestre son contraccionales, ii) si producen un estiramiento de la superficie terrestre son extensionales y iii) si producen una traslación lateral de la superficie terrestre son fallas con desplazamiento lateral o transcurrentes (Fig. 7). También, deben tenerse en cuenta las condiciones de aplicación de los esfuerzos en el macizo rocoso ya que son particularmente modificados sus efectos por la temperatura, la velocidad de aplicación, la presencia de fluidos, la presión confinante y las anisotropías preexistentes (Sibson 1975, 1981, Price y Cosgrove 1990, Rossello, 2009, entre otros). De esta manera, un mismo material puede responder, si se



**Figura 4.** Interpretaciones tectónicas esquemáticas de rasgos discontinuos a partir de imágenes. a) fracturas verticales discontinuas asociadas con ciertos niveles competentes; b) fracturas inclinadas extensas por extrapolación generadas por los programas que afectan indistintamente niveles con diversas competencias; c) fracturas verticales discretas que afectan solamente a niveles competentes e incluso con estratificación mecánicamente activa (debida a las discontinuidades de las capas).



**Figura 6.** Esquemas de la Ley de Anderson que establece relaciones espaciales unívocas entre el campo de esfuerzos y las fracturas (fallas y diaclasas) desarrolladas. *Izquierda:* extensión de la superficie terrestre. *Derecha:* compresión de la superficie terrestre.

superan sus límites elásticos, deformándose de modo continuo (dúctil) o de modo discontinuo (frágil).

Como la ovalización es una respuesta bidimensional perpendicular a la posición del eje del pozo su expresión puede ser diferente en cada tramo de un pozo que tenga una variación espacial de su recorrido a pesar de estar desarrollado dentro de un macizo rocoso afectado con un único campo de esfuerzos (Fig. 8).

Es importante tener en cuenta también, la profundidad del sector estudiado, ya que el campo de esfuerzo presente que afecta al conjunto del macizo rocoso o de una secuencia sedimentaria de una cuenca es dependiente de este factor (Ramsay y Huber 1983, Zoback 2007, Rossello 2016). De este modo, en los sectores más someros el campo de esfuerzo está directamente relacionado con los esfuerzos tangenciales horizontales determinados por los escenarios compresionales o tensionales regionales que los determinen. En cambio, en los sectores más profundos el soterramiento que soportan por el apilamiento de las secuencias más jóvenes produce una sobrecarga que puede determinar que el campo de esfuerzos mayor sea el vertical (Fig. 9). Por otra parte, a partir de la acción de un campo de esfuerzo invariable longevo se puede reconocer una deformación evolutiva de la disposición del campo de esfuerzos que puede exhibir una rotación de las fracturas con respecto a la profundidad del

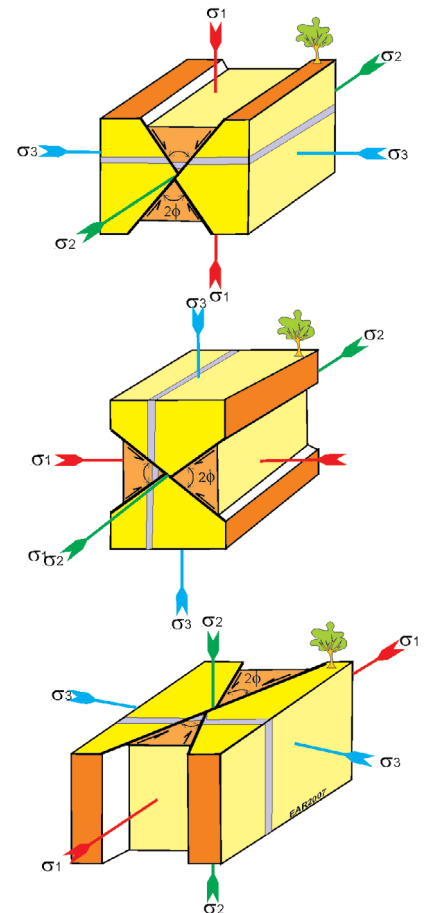
sector estudiado. De este modo, si se considera un esquema simplificado, se puede interpretar un diseño de rasgos tectónicos discontinuos que exhiben superficies alabeadas que permiten interpretar un incremento de la rotación (horaria o anti-horaria) a medida que se profundiza. Estos alabeos sigmoidales, independientemente de posibles cambios de esfuerzos debidos a sobrepresiones efectivas variables y localizadas, se fundamentarían en que las secuencias depositadas más tempranamente acumulan mayor deformación rotacional que las más tardías dentro de un campo de esfuerzos dispuesto invariante en el espacio a través de un lapso contemporáneo con todas las secuencias involucradas (Fig. 10).

## CONTEXTO GEOMECANICO DE LA CUENCA NEUQUINA

La Formación Vaca Muerta es una de las mayores fuentes de hidrocarburos de la Cuenca Neuquina por estar constituida mayoritariamente por pelitas y margas marinas con contenidos altos de materia orgánica total (COT) que promedian el 4% (Legarreta *et al.* 2005). Como exhibe muy buenas características para el desarrollo de producción de campos no-convencionales a partir de sus grandes volúmenes, profundidades promedio moderadas en

torno a los 2500 m b.b.p. y condiciones de sobrepresión se ha convertido en una de las mayores expectativas por su potencial hidrocarburífero a nivel mundial (Boyer *et al.* 2012).

La Cuenca Neuquina es un depocentro que evolucionó de un ambiente pasivo a otro de retroarco desarrollado durante el Mesozoico en el margen del Pacífico de América del Sur (Fig. 11). Diferentes regímenes tectónicos ejercieron un control de primer orden en el desarrollo de la cuenca y la evolución sedimentaria donde inicialmente se estableció un régimen extensional durante el Triásico Superior-Jurásico Temprano y se caracterizó por una serie de depocentros estrechos y aislados controlados por grandes sistemas de fallas transcurrentes (en el sentido original de Moody y Hill 1956) y rellenos principalmente de depósitos continentales de la mesosecuencia del Pre-Cuyo (Gulisano



**Figura 7.** Relaciones unívocas del campo de esfuerzo con respecto a la posición del fracturamiento (fallamientos y diaclasamientos) que determina, independientemente del tipo extensional, compresional o transcurrente del sistema en función a su afectación de la superficie terrestre.

True 3D relationships between stress field ( $\sigma$ ) vs well directions

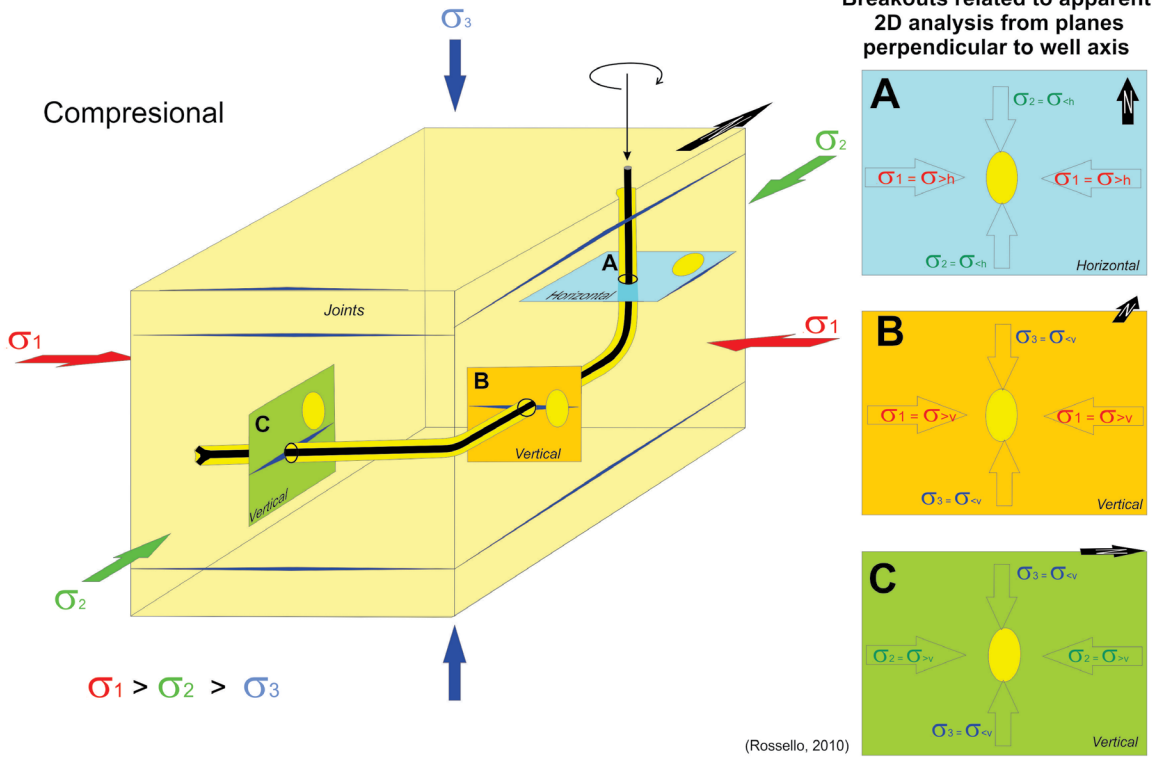


Figura 8. Esquema idealizado de la expresión estructural de distintas ovalizaciones de un mismo pozo en función de segmentos con posiciones espaciales variables dentro de un macizo rocoso afectado por un único campo de esfuerzo compresional. a) Ovalización horizontal del segmento vertical; b) ovalización vertical sublatitudinal del segmento horizontal submeridional; c) ovalización vertical submeridional del segmento horizontal sublatitudinal.

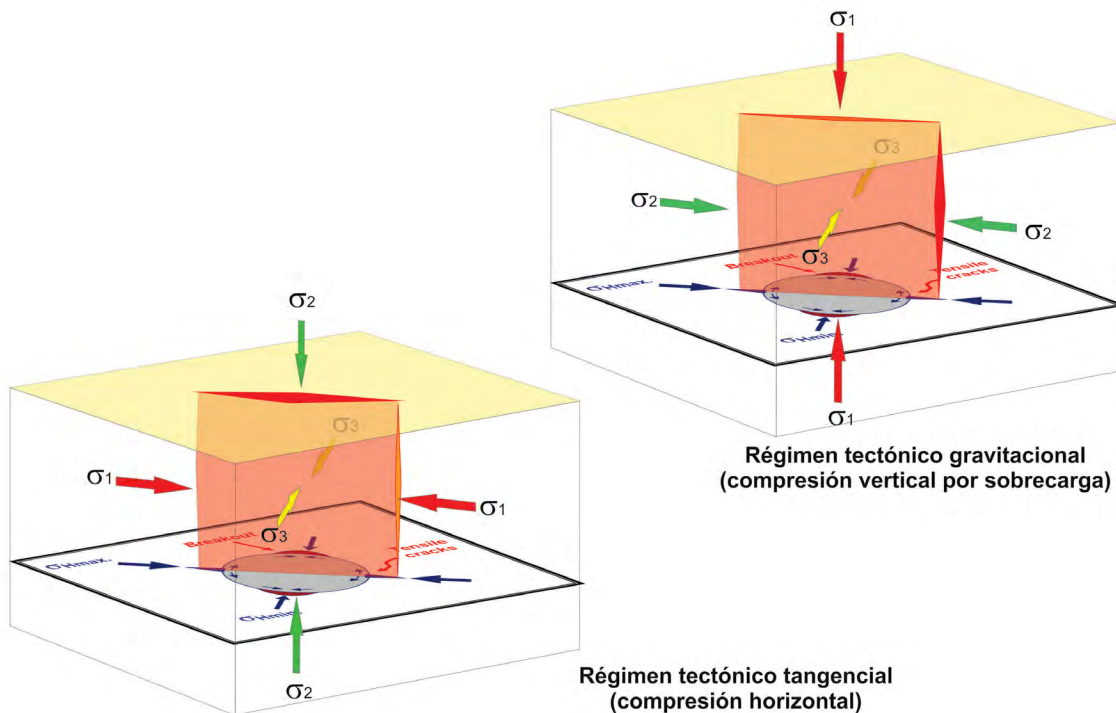


Figura 9. Relaciones espaciales entre la ovalización y el campo de esfuerzos dependiente de la profundidad (tomado de Rossello 2016).

1981, Kozłowski *et al.* 1993, 1996, Cristallini *et al.* 2009, Legarreta y Villar 2012). Posteriormente, durante el lapso Jurásico temprano al Cretácico Tardío (Vergani *et al.* 1995) se caracteriza por el desarrollo de una subsidencia térmica con eventos tectónicos localizados donde los depo-

centros se colmataron con sedimentos siliciclásticos, carbonatados y evaporíticos continentales y marinos (Grupos Cuyo, Lotena y Mendoza). Legarreta y Villar (2012) describen las secuencias marinas desarrolladas durante el Jurásico Superior - Cretácico Inferior del Grupo

Mendoza o mesosecuencia de Mendoza en tres ciclos sedimentarios principales: i) la mesosecuencia de Mendoza Inferior (Tithoniano temprano - Valanginiano temprano), que incluye a la Formación Vaca Muerta (Chebli *et al.* 2011, Legarreta y Villar 2012, Kietzmann *et al.* 2016), ii) la



mesosecuencia de Mendoza Media (Valanginiano tardío - Hauteriviano temprano) y iii) la mesosecuencia de Mendoza Superior (Hauteriviano tardío - Barremiano temprano).

En la parte central de la cuenca, las secuencias del Subgrupo Mendoza Inferior muestran una geometría sigmoidea general progradacional, que alcanzan hasta 2000 m de espesor (Chebli *et al.* 2011) que comienzan con los depósitos continentales de la Formación Tordillo (Kimmeridgiano - Tithoniano inferior bajo?) que subyacen a los depósitos marinos de la Formación Vaca Muerta (Tithoniano inferior alto - Berriasiano superior a Valanginiano inferior). En los flancos orientales las facies cambian a depósitos de ambientes costeros de la Formación Quintuco (Tithoniano superior - Valanginiano inferior), a los depósitos sabkha de la Formación Loma Montosa (Valanginiano inferior) y a los depósitos continentales de la Formación Puesto González (Valanginiano inferior). De este modo, determinan en conjunto un sistema deposicional mixto carbonato-siliciclástico (Mitchum y Uliana

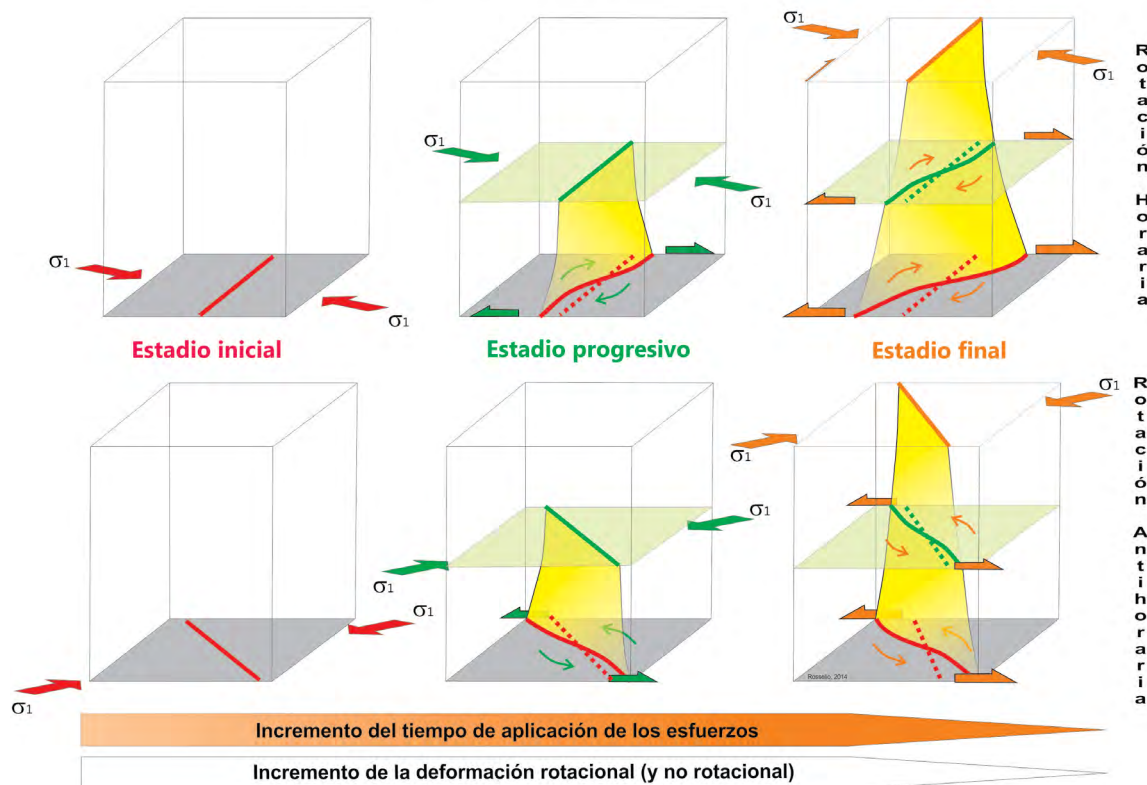
1985, Carozzi *et al.* 1993, Legarreta y Villar 2012).

A partir del Cretácico Tardío la tectónica Andina estableció un régimen deformacional contraccional sublatitudinal debido a la convergencia de las placas Nazca y Sudamericana que continuó durante todo el Cenozoico, aunque alternantes con eventos extensionales a (Vergani *et al.* 1995, Manceda y Figueroa 1995, Cobbold y Rossello 2003, Zapata y Folguera 2005). Esta deformación andina dio como resultado el desarrollo de una serie de cinturones de plegamientos y fallamientos preferencialmente submeridiales que determinan la generación de excelentes afloramientos de las sucesiones mesozoicas. Estas estructuras fueron interpretadas como el resultado de la inversión tectónica de fallas extensionales preexistentes que delimitaban los grábenes del Triásico - Jurásico Temprano (Manceda y Figueroa 1993 y 1995, Uliana *et al.* 1995, Cobbold y Rossello 2003, entre otros).

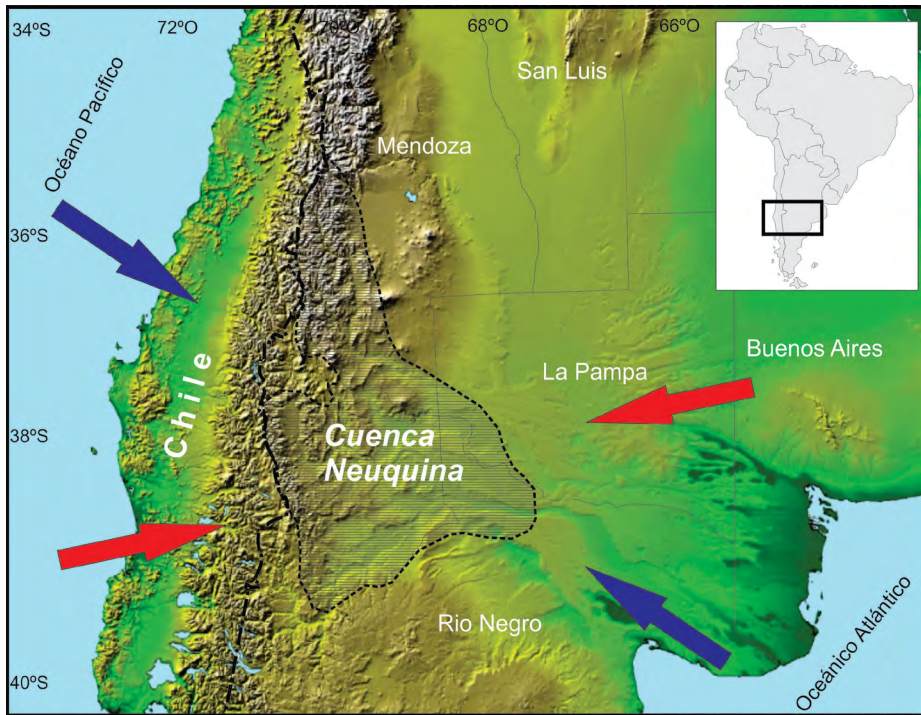
Guzmán (2007) y Guzmán *et al.* (2011) estudiaron la continuidad y la evolución de la dirección de los esfuerzos horizontales en

el ámbito de la cuenca Neuquina, a partir de resultados previamente obtenidos a partir del análisis de ovalizaciones de pozos y con información de la disposición espacial de diques asfálticos y volcánicos. Los diques asfálticos se emplazaron durante el Paleoceno - Eoceno en un contexto en el que el esfuerzo máximo era horizontal y con orientación NE. Por su parte, los diques volcánicos se disponen en dos poblaciones principales orientadas NE y NNE y una secundaria NO. Si bien, la edad de estos diques no está bien establecida, Guzmán *et al.* (2011) la consideran vinculada con un escenario magmático Oligoceno tardío - Mioceno y los interpreta durante gran parte del Terciario la orientación del esfuerzo horizontal máximo fue NE. Sin embargo, reconocen que los datos de las ovalizaciones muestran en la actualidad una dirección preferencial media ENE. Este cambio en la dirección de los esfuerzos es coherente con el cambio en el vector de subducción producido entre el Eoceno y la actualidad. Complementariamente, el cambio entre la dirección de convergencia y la que se en-

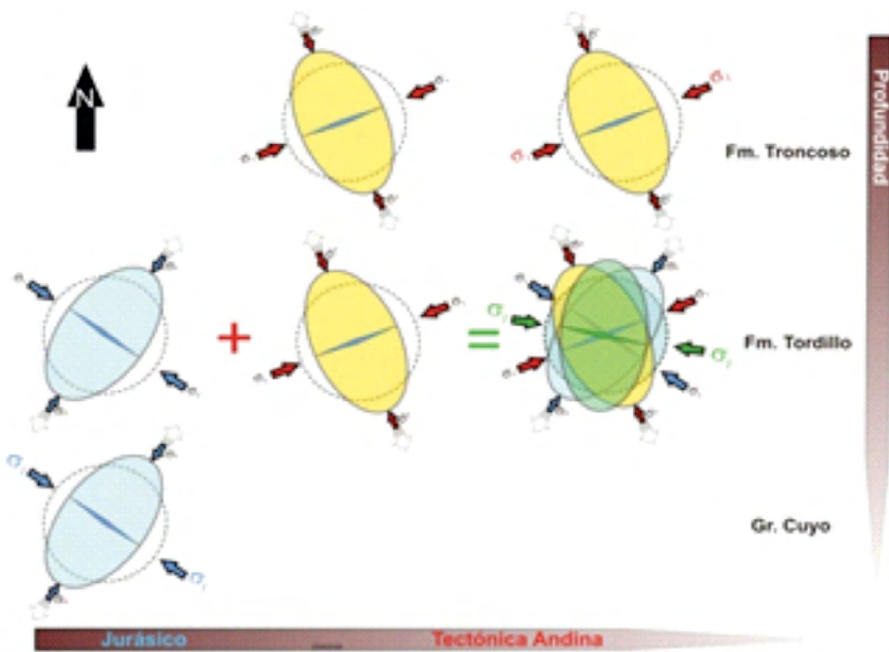
**Desarrollo de una superficie alabeada por deformación rotacional**



**Figura 10.** Esquema evolutivo de la rotación de fallamientos en función de la profundidad dentro de un campo de esfuerzos longevo. Las secuencias más tempranas exhiben mayores rotaciones con respecto a las secuencias más tardías en función del tiempo que permanecen en un campo de esfuerzos sintectónico.



**Figura 11.** Localización de la Cuenca Neuquina en la porción centro-occidental de Argentina. Las flechas rojas indican la orientación generalizada del esfuerzo principal máximo horizontal Andino. Las flechas azules indican la orientación generalizada del esfuerzo principal máximo horizontal pre-Andino.



**Figura 12.** Esquemas idealizados de ovalizaciones producidas por la tectónica temprana (Jurásica) y tardía (Andina) y los escenarios híbridos. a) Jurásico relacionados con los tiempos de deposición del Grupo Cuyo; b) Tectónica Andina y c) Escenario híbrido por la superposición de ambos campos de esfuerzos.

cuentra en el retroarco también se debe a que los esfuerzos generados en la zona de subducción tienen que pasar a través de 300 km de los Andes y en consecuencia hay una modificación de las direcciones

debido a la presencia del arco magmático y las estructuras contraccionales (Rene Manceda, com. verbal). La disposición actual del esfuerzo horizontal máximo es distinta y de dirección ENE

que implica una variación entre la conformación espacial del campo de esfuerzo desde el Jurásico a la actualidad (Fuchs y Müller 2001, Cobbold y Rossello 2003, Brooks *et al.* 2003, Guzmán *et al.* 2007, 2009). Esta variación es compatible con la rotación del vector de convergencia determinado a partir de datos paleomagnéticos desde el Eoceno a la actualidad (Pardo Casas y Molnar 1987, Manceda y Figueroa 1995). En consecuencia, el cambio en la dirección de esfuerzo horizontal máximo basado en la disposición de los diques asfálticos y volcánicos y de las ovalizaciones de pozos resulta consistente con el cambio en la dirección de convergencia que ocurre durante el Oligoceno (Fig. 11). Si se toma como ejemplo un sector centro-occidental representativo de la Cuenca Neuquina con relevamientos sísmicos 3D se puede realizar un análisis a partir de la interpretación de horizontes (time-slices) donde es posible reconocer rasgos estructurales distintivos relacionados con determinados horizontes: niveles atribuidos con el Grupo Cuyo permiten interpretar fallamientos extensionales contemporáneos dispuestos con rumbos generales en el cuadrante NO-SE, en cambio a partir de las Formaciones Quintuco y Mulichinco se hacen más conspicuos los fallamientos contraccionales coetáneos dispuestos con rumbos en el cuadrante NE-SO. De este modo, si se tiene en cuenta el cambio de posición de los campos de esfuerzos a lo largo de la historia deposicional de la cuenca Neuquina, es posible interpretar una evolución de la orientación de las ovalizaciones que puede exhibir en función de la profundidad de un pozo desarrollado en esta columna estratigráfica. En consecuencia, las secuencias más tempranas (Grupo Cuyo) van a expresar ovalizaciones híbridas a partir de las adquiridas por los campos de esfuerzos temprano y tardío, en cambio las secuencias más tempranas solo expresarán ovalizaciones relacionadas al único campo de esfuerzo actuante más tardío determinado por los procesos geológicos contemporáneos relacionados (Fig. 12).

La superposición de estos dos campos de esfuerzos con orientaciones distintas determina la posibilidad de reactivaciones e inversiones tectónicas de las estructuras más antiguas, donde por ejemplo, el dia-



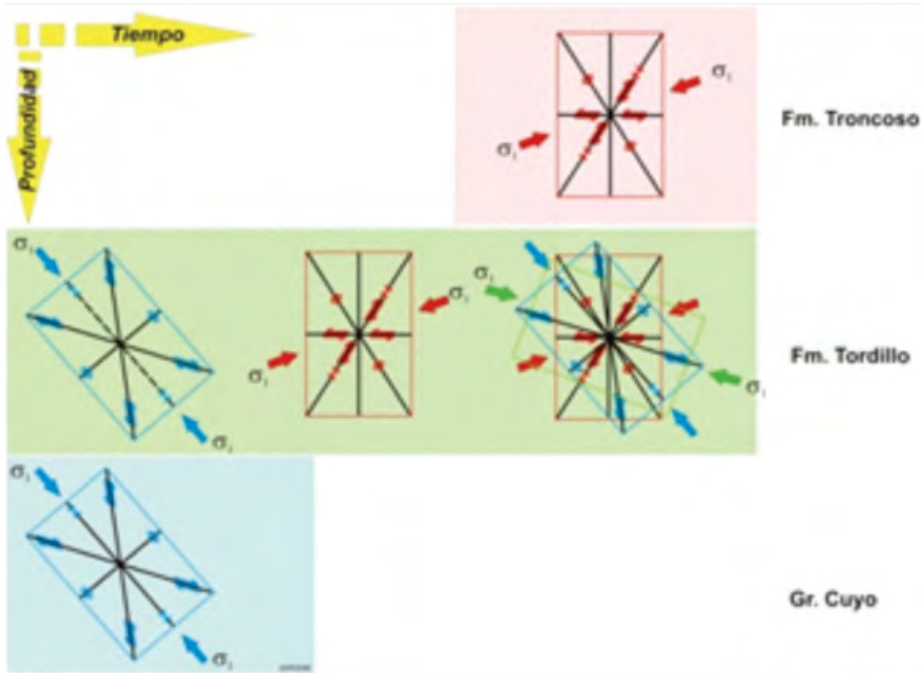


Figura 13. Esquemas ideales simplificados de los fracturamientos normal, inverso y transcurrente y generados por los campos de esfuerzos de las tectónicas Jurásica y Andina. a) Jurásico, relacionados con los tiempos de deposición del Grupo Cuyo; b) Tectónica Andina y c) Escenario híbrido por la superposición de ambos campos de esfuerzos.

clasamiento original puede evolucionar a estructuras con componentes de desplazamiento lateral, y viceversa, fallamientos con componentes de desplazamiento lateral pueden evolucionar a diaclasamientos (Fig. 13).

En consecuencia, a partir de la acción de un campo de esfuerzo con una posición regional invariable de un material tenga una respuesta homogénea y que haya actuado a lo largo de un lapso considerable puede controlar una deformación evolutiva incremental de la disposición rotacional de las estructuras generadas (Fig. 14).

### ORIENTACIÓN PREFERENCIAL DE LOS SONDEOS

Los objetivos perseguidos en la orientación de los pozos que permitan una exploración y producción de reservorios no convencionales eficiente es localizar la posición preferencial de los planos de discontinuidades potencialmente abiertas que determinan los campos de esfuerzos que actuaron sobre ellos para con

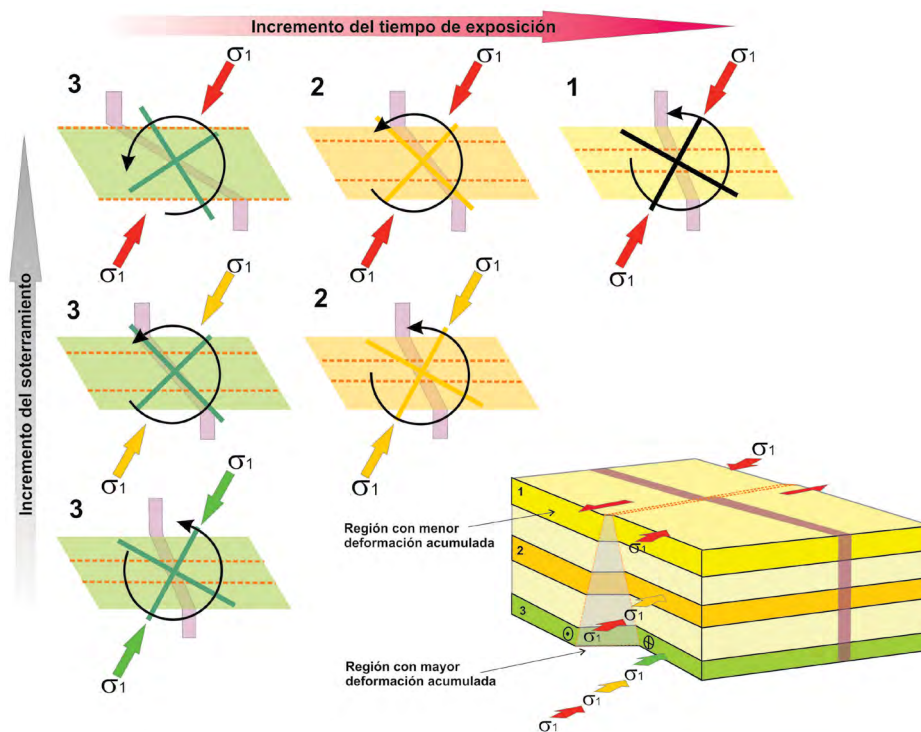


Figura 14. Esquemas idealizados que muestran la influencia de un campo de esfuerzos invariable espacialmente pero actuante durante un tiempo largo.

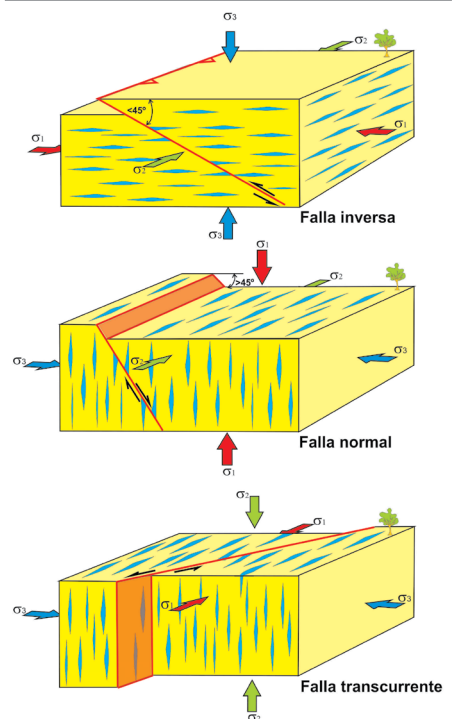
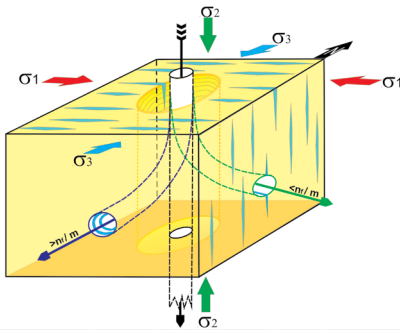


Figura 15. Relaciones espaciales entre los planos de fracturas potencialmente abiertas (en azul diaclasas). Según los distintos escenarios estructurales siempre son paralelos al esfuerzo principal máximo (flechas rojas) y perpendiculares al esfuerzo principal mínimo (flechas azules) (modificado de Sibson 1990).

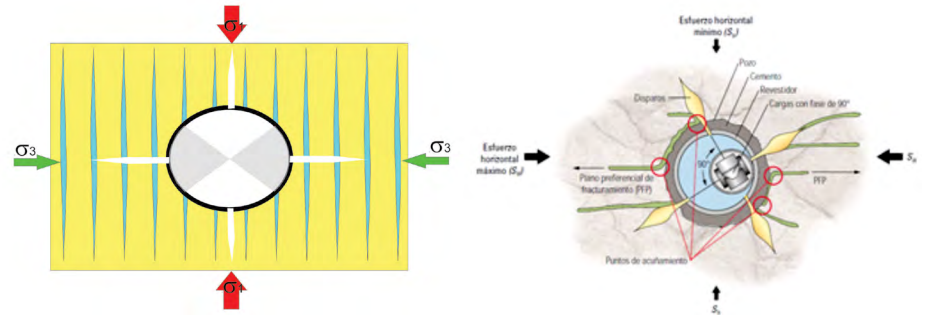


**Figura 16.** Esquema idealizado 3D de la orientación preferencial de sondeos en reservorios no convencionales con la finalidad de mejorar la intersección de fracturas potencialmente abiertas que siempre tenderán a orientarse paralelamente al  $\sigma_1$  y perpendicular al  $\sigma_3$  (tomado de Rossello 2016).

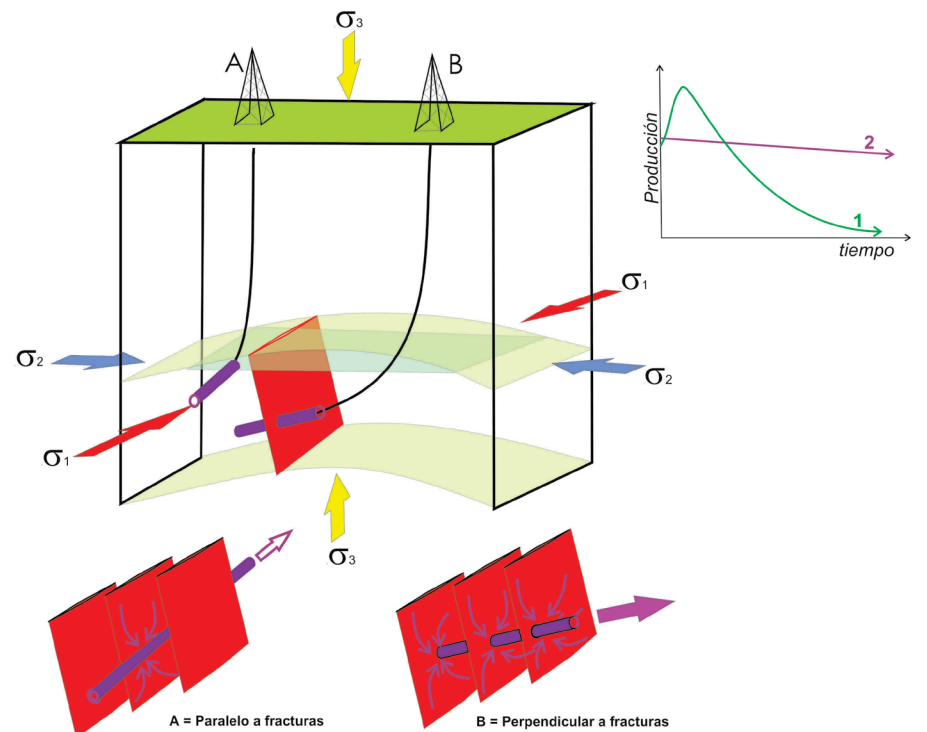
maniobras artificiales de fracturamiento (fracking) activarlos. Estos planos preferenciales corresponden a la posición del diaclasamiento que tiende a estar siempre dispuesto paralelamente a la localización del esfuerzo principal máximo ( $\sigma_1$ ) y perpendicular al esfuerzo principal mínimo ( $\sigma_3$ ) independientemente de un contexto extensional, compresional o transcurrente (Fig. 15).

De esta manera, con la finalidad que un sondeo productor involucre la mayor cantidad de fracturas potencialmente abiertas por metro lineal (nf/m) se deberán dirigir siempre dentro de los objetivos exploratorios-productores de los reservorios no convencionales en la dirección del esfuerzo principal mínimo ( $\sigma_3$ ) para de este modo obtener mayor eficiencia (Fig. 16). Sin embargo para que estos argumentos teóricos se cumplan tienen que estar acompañados por otros estudios para determinar la cantidad de cemento en las fracturas, la densidad, la conectividad, etc. En la industria se realiza estos estudios con la generación de modelos de fracturas naturales tridimensionales y muchas veces las fracturas en esa dirección no son las que tienen la mejor conductividad o pueden no estar abiertas (Rene Manceda, *com. verbal*).

En el caso de realizarse cañoneos (a partir de pozos pilotos y fases de fracturación hidráulica) con la finalidad de estimular y/o aumentar la fluencia de fluidos hacia el pozo productor por la fracturación inducida de los niveles productores (Almaguer *et al.* 2002), estos deberán disponerse preferencialmente hacia la dirección del esfuerzo



**Figura 17.** Izquierda: esquema de la relación espacial entre la ovalización, las fracturas potencialmente abiertas y los esfuerzos actuantes en el plano perpendicular al eje del pozo. Derecha: Arreglos de procesos de estimulación de fracturas a partir de disparos orientados (tomada de Almaguer *et al.* 2002).



**Figura 18.** Relaciones espaciales tridimensionales ideales entre la ovalización y el campo de esfuerzos que pueden optimizar la intervención de reservorios; a) Pocas fracturas por metro lineal involucradas y desconectadas que pueden proporcionar una fuerte producción inicial pero rápida disminución de un volumen mínimo a drenar; b) Muchas fracturas por metro lineal involucradas y conectadas que pueden proporcionar una producción más sostenida en el tiempo de un mayor volumen a drenar (tomado de Rossello 2016).

menor en ese plano. De este modo, se optimizarán los disparos al dirigirlos hacia las direcciones más eficientes, evitándose así las opciones con direcciones radiales donde muchos de ellos intervendrán sectores potenciales productores más escasos (Fig. 17).

## CONCLUSIONES

La interpretación de la ovalización de pozos es una herramienta muy útil y muchas

veces accesible en la evaluación geomecánica de un objetivo exploratorio-productivo particularmente en reservorios no convencionales por el reconocimiento bidimensional y dinámico del campo de esfuerzo en el plano perpendicular al eje del pozo. De esta manera, si se lo localiza adecuadamente se puede relacionar unívocamente la causa (esfuerzos) y efectos (deformación) presentes en un macizo rocoso que necesita ser intervenido para mejorar las condiciones de producción de fluidos y la de su propia estabilidad mecánica.

Los relevamientos a partir de los programas comerciales disponibles de identificación y relevamiento de planos estructurales, sean estos de fracturas o estratificación-laminación no pueden registrarse adecuadamente cuando tienen ángulos cercanos a la disposición de los ejes del pozo. Cuando esto ocurre, la intersección del plano en las paredes del pozo genera sinusoides tan apretados que no pueden registrarse porque escapan a la ventana de observación. Incluso, en casos extremos cuando la disposición de los planos contienen al eje del pozo generan trazas subparalelas que no pueden ser adecuadamente relevados.

Se deben tener en cuenta las condiciones de aplicación de los esfuerzos en el macizo rocoso ya que son particularmente modificados sus efectos por la temperatura, la velocidad de aplicación, la presencia de fluidos, la presión confinante y las anisotropías preexistentes. De esta manera, un mismo macizo rocoso puede responder si se superan sus límites elásticos deformándose de modo continuo (dúctil) o de modo discontinuo (frágil). Tanto en los ejemplos naturales como los obtenidos en ensayos de laboratorio los fallamientos exhiben siempre una disposición oblicua con respecto al esfuerzo principal máximo ( $\sigma_1$ ) cercana a los 30-40° y subparalela a las diaclasas que a su vez se disponen perpendiculares al esfuerzo principal mínimo ( $\sigma_3$ ).

De este modo, el mejor conocimiento de las mayores probabilidades de localizar tridimensionalmente los planos de fractura potencialmente abiertos se pueden direccionar intervenciones (sondeos dirigidos, disparos, fracturamientos inducidos, etc.) en los pozos que se realicen en la Fm. Vaca Muerta. Así, se podrán mejorar considerablemente los comportamientos de producción de hidrocarburos por la optimización de las características petrofísicas del reservorio no-convencional, sea de tipo *gas-shale* y/o *tight-sand*, en proyectos de desarrollo exploratorios y productivos de la Formación Vaca Muerta (Fig. 18).

Si se tienen en cuenta estas variaciones espaciales del comportamiento de la deformación dirigiéndose los pozos preferencialmente con dirección NO-SE se pueden evitar severas consecuencias geomecánicas relacionadas con la pérdida de lo-

dos, inestabilidad del pozo, colapsos de tuberías, compactación de los reservorios, subsidencias de la superficie, producción de arenas, reactivación de fallas y pérdida de eficiencia de sellos. Por otro lado, se pueden mejorar considerablemente los comportamientos petrofísicos de reservorios no convencionales en proyectos exploratorios y productivos.

#### AGRADECIMIENTOS

Se desea dejar constancia de agradecimiento a los colegas editores del Simposio sobre Vaca Muerta por la invitación a presentar este trabajo y a los árbitros, en particular al colega René Manceda, cuyas correcciones y sugerencias han mejorado notablemente claridad del manuscrito.

#### REFERENCIAS

- Aadnoy, B.S. y Bell, J.S. 1998. Classification of drill-induced fractures and their relationship to in situ stress directions. *Log Analyst* 39: 27-42.
- Aleksandrowski, P., Inderhaug, O.H. y Knapsstad, B. 1992. Tectonic structures and wellbore breakout orientation. 33th U.S. Symposium on Rock Mechanics, Santa Fe, NM. A.A. Balkema: 2p., Rotterdam.
- Almaguer, J., Manrique, J., Wickramasuriya, S., Habbat, A., López-Cárdenas, J., May, D., McNally, A.C. y Sulbarán, A. 2002. Orientación de disparos en la dirección correcta. *Oilfield Review* 16: 18-33.
- Asquith, G. y Krygowski, D. 2004. Basic well log analysis. *American Association of Petroleum Geologists, Methods in Exploration* 16: 244 p., Tulsa.
- Bell, J.S. 1990. Investigating stress regimes in sedimentary basins using information from oil industry wireline logs and drilling records. En: Hurst, A., Lovell M. y Morton A. (eds.), *Geological applications of wireline logs*. Geological Society of London, Special Publication 48: 305-325.
- Bell, J.S. y Gough, D.I. 1982. The use of borehole breakouts in the study of crustal stress. U.S. Geological Survey, Open File Report 82-1075: 539-557.
- Blumling, P., Fuchs, K. y Schneider, T. 1983. Orientation of the stress field from breakouts in a crystalline well in a seismic active area. *Physical Earth Planetary International* 33: 250-254.

- Boyer, C., Clark, B., Jochen, V., Lewis, R. y Miller, C.K. 2012. Gas de lutitas: un recurso global. *Oilfield Review* 23: 28-39.
- Brooks, B.A., Bevis, M., Smalley Jr., R., Kendrick, E., Manceda, R., Lauría, E., Matu-rana, R. y Araujo, M. 2003. Crustal motion in the Southern Andes (26° 36° S): Do the Andes behave like a microplate?, *Geochemistry, Geophysical Geosystems* 4: 1085, doi:10.1029/2003GC000505.
- Carozzi, A.V., Orchueta, I.A. y Rodríguez Schelotto, M.L. 1993. Depositional models of the Lower Cretaceous Quintuco-Loma Montosa Formation, Neuquén Basin, Argentina. *Journal of Petroleum Geology* 16: 421-450.
- Chebli G., Mendiberri, H., Giusano, A., Ibáñez, G. y Alonso, J. 2011. El "Shale Gas" en la Provincia del Neuquén, 8° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Instituto Argentino del Petróleo y Gas: 669-710, Buenos Aires.
- Cobbold, P.R. y Rossello, E.A. 2003. Aptian to recent compressional deformation, foothills of the Neuquén Basin, Argentina. *Marine and Petroleum Geology* 20: 429-443.
- Cox, J.W. 1983. Long axis orientation in elongated boreholes and its correlation with rock stress data. 24th Annual Logging Symposium. Society of Professional Well Log Analysis: 27-30, Calgary.
- Cristallini, E.O., Tomezzoli, R., Pando, G., Gazzera, C., Martínez, J.M., Quiroga, J., Buhler, M., Bechis, F., Barredo, S. y Zambrano, O. 2009. Controles Precuycanos en la estructura de la Cuenca Neuquina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65: 248-264.
- Davis, G.H. y Reynolds, S.J., 1996. *Structural geology of rocks and regions*. John Wiley & Sons 776p., New York.
- Ekstrom, M.P., Dahan, C.A., Chen, M.Y., Lloyd, P.M. y Rossi, D.J. 1987. Formation imaging with microelectrical scanning arrays. *Log Analyst* 28: 294-306.
- Fuchs, K. y Müller, B. 2001. World stress map of the Earth: a key to tectonic processes and technological applications. *Naturwissenschaften* 88: 357-371.
- Gulisano, C.A. 1981. El Ciclo Cuyano en el norte de Neuquén y sur de Mendoza. 8° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 579-592, Buenos Aires.
- Gough, D.I. y Bell, J.S. 1982. Stress orientation from borehole wall fractures with examples from Colorado, east Texas, and northern Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences* 19: 1358-1370.



- Guzmán, C.G. 2007. Estudio de la deformación andina entre los 32° y los 39° latitud sur mediante el análisis de *breakout* de pozos. Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires (inédita), 241 p., Buenos Aires.
- Guzmán, C.G., Cristallini, E.O. y Bottesi, G.L. 2007. Contemporary stress orientations in the Andean retroarc between 34°S and 39°S from borehole breakout analysis. *Tectonics* 26, TC3016, doi:10.1029/2006TC001958
- Guzmán, C.G. y Cristallini, E.O. 2009. Contemporary stress orientations from borehole breakout analysis in the southernmost flat-slab boundary Andean retroarc (32° 44' and 33° 40'S). *Journal of Geophysical Research*, 114: B02406, doi:10.1029/2007JB005505.
- Guzmán, C.G., Cristallini, E.O., García, V.H., Yagupsky, D.I. y Bechis, F. 2011. Evolución del campo de esfuerzos horizontal desde el Eoceno a la actualidad en la Cuenca Neuquina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 68: 542-554.
- Hickman, S.H., Healy, J.H., Zoback, M.D., Svitek, J.F. y Bretches, J.E. 1982. In-situ stress, borehole elongation, and natural fracture distribution at depth in central New York State. *American Geophysical Union, Eos Trans.* 63: 11-18.
- Hickman, S.H., Healy, J.H. y Zoback, M.D. 1985. *In situ* stress, natural fracture distribution, and borehole elongation in the Auburn geothermal well, Auburn, New York. *Journal of Geophysical Research* 90: 5497-5512.
- Jaeger, J.C. y Cook, N.G.W. 1979. *Fundamentals of rock mechanics*. Chapman and Hall: 593 p., London.
- Kietzmann, D.A., Ambrosio, A.L., Suriano, J., Alonso, M.S., González-Tomassini, F., Depine, G. y Repol, D. 2016. The Vaca Muerta-Quintuco system (Tithonian-Valanginian) in the Neuquén Basin, Argentina: A view from the outcrops in the Chos Malal fold and thrust belt. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin* 100: 743-771.
- Kozlowski, E.E., Manceda, R. y Ramos, V. 1993. Estructura. En Ramos, V. (ed.) *Geología y Recursos Naturales de Mendoza*, 12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Relatorio: 235- 256, Buenos Aires.
- Kozlowski, E.E., Cruz, C. y Sylwan, C.A. 1996. Geología estructural de la zona de Chos Malal. Cuenca Neuquina, Argentina. 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 1: 15- 26, Buenos Aires.
- Legarreta, L., Villar, H., Laffitte, G., Cruz, C. y Vergani, G. 2005. Cuenca Neuquina. En: Chebli, G. (ed.), *Frontera Exploratoria de la Argentina 6° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos*, IAPG: 233- 250, Buenos Aires.
- Legarreta, L. y Villar, H.J. 2012. Las facies generadoras de hidrocarburos de la Cuenca Neuquina. *Petrotecnia*: 14-42.
- Manceda, R. y Figueroa, D. 1993. La inversión del rift mesozoico en la faja fallada y plegada de Malargüe. *Provincia de Mendoza. 12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración de Hidrocarburos*, Actas 3: 219- 232, Buenos Aires.
- Manceda, R. y Figueroa, D. 1995. Inversion of Mesozoic Neuquén rift in the Malargüe fold and thrust belt, Mendoza, Argentina. En: Tankard, A.J., Suárez, R. y Welsink, H.J. (eds.) *Petroleum Basins of South America*, American Association of Petroleum Geology, *Memoir* 62: 369-382, Tulsa.
- Mastin, L. 1988. Effect of borehole deviation on breakout orientations. *Journal of Geophysical Research* 93: 9187-9195.
- Mitchum, Jr.R.M. y Uliana, M.A. 1985. Seismic stratigraphy of carbonate depositional sequences, Upper Jurassic-Lower Cretaceous, Neuquen Basin, Argentina. *American Association of Petroleum Geologists, Chapter 15 Special Volumes: Seismic Stratigraphy II: An Integrated Approach to Hydrocarbon Exploration* 39: 255-274.
- Moody, J.D. y Hill, M.J. 1956. Wrench fault tectonics. *Geological Society of America, Bulletin* 67: 1207.1246.
- Moos, D. y Zoback, M.D. 1990. Utilization of observations of wellbore failure to constrain the orientation and magnitude of crustal stresses: application to continental, deep sea drilling project, and Ocean Drilling Program Boreholes. *Journal of Geophysical Research* 95: 9305-9325.
- Pardo Casal, F. y Molnar, P. 1987. Relative motion of the Nazca (Farallon) and South American Plates since Late Cretaceous time. *Tectonics* 6: 233-248.
- Peska, P. y Zoback, M.D. 1995. Compressive and tensile failure of inclined well bores and determination of in situ and rock strength. *Journal of Geophysical Research* 100: 12791-12811.
- Plumb, R.A. y Hickman, S.H. 1985. Stress-induced borehole elongation: A comparison between the four-arm dipmeter and the borehole televiewer in the Auburn geothermal well. *Journal of Geophysical Research* 90: 5513-5521.
- Price, N.J. y Cosgrove, J.W. 1990. *Analysis of geological structures*. Cambridge University Press: 494 p., Cambridge.
- Ramsay, J.G. y Huber, M.I. 1983. *The techniques of modern structural geology, 1: Strain analysis*. Academic Press: 307 p., Londres.
- Reinecker, J., Tingay, M. y Müller, B. 2003. Borehole breakout analysis from four-arm caliper logs. *World Stress Map Project*: 5p.
- Rossello, E.A. 2001. Sistemas tectónicos transcurrentes: una síntesis de sus condiciones mecánicas y aplicaciones geoeconómicas. En: Cortés, J.M., Rossello, E.A. y Dalla Sarda, L. (eds.). *Avances en Microtectónica*. Asociación Geológica Argentina Serie D, *Publicación Especial* 5: 19-43, Buenos Aires.
- Rossello, E.A. 2009. Localización de espacios dilatantes en fallamientos: controles de la mineralización y pronósticos económicos. 9° Congreso Argentino de Geología Económica, Actas: 229-234, San Fernando del Valle de Catamarca.
- Rossello, E.A. 2016. La fracturación del borde oriental de las Sierras Australes de Buenos Aires y su potencial como reservorio de fluidos en la adyacente cuenca Claromecó (Argentina). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 73: 493-512.
- Rossello, E.A. 2017. Interpretaciones estructurales dinámicas a partir del análisis de ovalización (*break-outs*) de pozos: aplicaciones a perforaciones en la Formación Vaca Muerta (Cuenca Neuquina, Argentina). 20° Congreso Geológico Argentino, Simposio Geología de la Fm. Vaca Muerta, Actas SVM07: 5p., San Miguel de Tucumán.
- Seeburger, D.A. y Zoback, M.D. 1982. The distribution of natural fractures and joints at depths in crystalline rock. *Journal of Geophysical Research* 87: 5517-5534.
- Sibson, R.H., Moore, J.Mc.M. y Rankin, A.H. 1975. Seismic pumping - a hydrothermal fluid transport mechanism. *Journal of the Geological Society* 131: 653-659.
- Sibson, R. 1981. A brief description of natural neighbor interpolation (Chapter 2). En: Barnett, V. (ed.), *Interpreting Multivariate Data*. John Wiley, 21-36, Chichester.
- Sibson, R.H. 1990. Conditions for fault-valve behavior. *Geological Society, Special Publications* 54: 15-28, London,
- Sperner, B., Müller, B., Heidbach, O., Delvaux, D., Reinecker, J. y Fuchs, K. 2003. *Tectonic*

- stress in the Earth's crust: Advances in the World Stress Map Project. En: Nieuwland, D. (ed.), New insights into structural interpretation and modeling. Geological Society of London, Special Publication 212: 101-116, London.
- Tingay, M., Reinecker, J. y Müller, B. 2008. Borehole breakout and drilling-induced fracture analysis from image logs. World Stress Map Project, 8 p.
- Uliana, M.A., Arteaga, M.E., Legarreta, L., Cerdán, J.J. y Peroni, G. 1995. Inversion structures and hydrocarbon occurrences in Argentina. En: Buchman, J.G. y Buchman, P.G. (eds.), Basin inversion, Geological Society of London, Special Publication 88: 211-233, London.
- Vergani, G.D., Tankard, A.J., Belotti, H.J. y Welsink, H.J. 1995. Tectonic evolution and paleogeography of the Neuquén Basin, Argentina. En: Tankard, A.J., Suárez, R. y Welsink, H.J. (eds.), Petroleum Basins of South America, American Association of Petroleum Geologists, Memoir 62: 383-402, Tulsa.
- Zajac, B.J. y Stock, J.M. 1992. Using borehole breakouts to constrain the complete stress tensor: Results from the Sijan Deep Drilling Project and offshore Santa Maria basin, California. *Journal Geophysical Research* 102: 10083-10100.
- Zoback, M.D., Moos, D., Mastin, L. y Anderson, R.N. 1985. Well bore breakouts and in situ stress. *Journal of Geophysical Research* 90 (B7): 5523-5530.
- Zoback, M.D. 2007. *Reservoir Geomechanics*. University Press, Cambridge doi:10.1017/CBO9780511586477
- Zapata, T. y Folguera, A. 2005. Tectonic evolution of the Andean Fold Thrust Belt of the southern Neuquén Basin, Argentina. En: Veiga, G.D., Spalletti, L.A., Howell, J.A. y Schwarz, E. (eds.), *The Neuquen Basin, Argentina: A Case Study in Sequence Stratigraphy and Basin Dynamics*. Geological Society of London, Special Publications 252: 37-56, London.

Recibido: 26 de diciembre, 2017

Aceptado: 27 de mayo, 2018