

CARACTERIZACIÓN DE DISCONTINUIDADES SÍSMICAS: CÁLCULO Y PROCESOS DE ATRIBUTOS SOBRE AMPLITUD

Mario R. Atencio¹, Federico G. E. Späth¹, Daniel Rendon²

1: YPF, Buenos Aires, Argentina

2: Paradigm, Argentina

Palabras clave: Discontinuidad sísmica, fallas, fracturas, curvatura, coherencia, amplitud

ABSTRACT

Seismic characterization of breaks: Calculation and process attributes on amplitude

The study of conventional reservoirs, as the new unconventional ones, emphasizes analysis on several approaches. Those include the research of the depositional environment and geological properties, and the analysis of concepts such as organic matter content, reservoir pore pressure, rock brittleness, etc.

In both cases, fault and fracture interpretation and characterization have an important role depending on the purpose and kind of the investigated reservoir. For Conventional cases, their identification is useful for delineating areas of interest. On the other hand, for Unconventional ones these processes optimize the well location and completion.

Seismic discontinuities, represented as vertical and horizontal displacements, flexure deformations and/or seismic reflector variations, are closely related to geological faults, fractures, or stratigraphic features of a given geologic environment.

The present paper focuses on the estimation of 3D geometric attributes for characterizing discontinuities of seismic and subseismic scale fractures associated to geological fractures and faults.

Calculated attributes were: curvature, coherency, Volume Amplitude Technique (TecVA) and TecVA variations. An analysis of its effects and contributions to the seismic interpretation is presented.

INTRODUCCIÓN

El término discontinuidad sísmica se vincula a la presencia de fallas o fracturas y también a aspectos estratigráficos. Las fallas o fracturas sísmicas son desplazamientos del carácter sísmico en la horizontal y/o vertical con suficiente extensión lateral para ser reconocidos como tales. La visualización en secciones verticales y horizontales en tiempo permite detectar trenes de fallas con mayor o menor grado de incertidumbre en función de los parámetros de adquisición y procesamiento del dato sísmico. La Figura 1 muestra una sección vertical (a) y un corte en tiempo (b) de una sección sísmica en amplitud. En ellas se reconoce y fueron marcados algunos de los

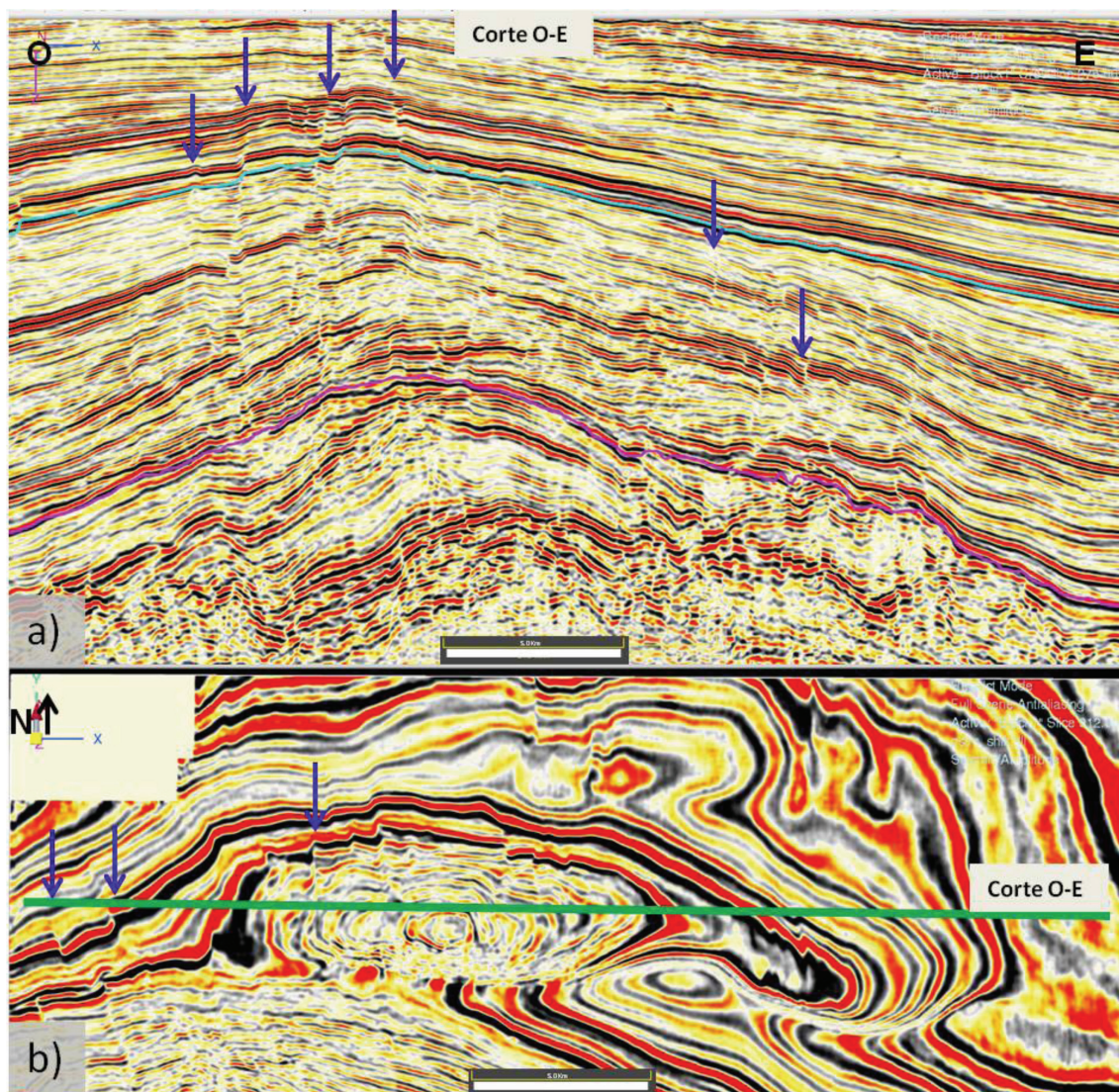


Figura 1. Sección sísmica en vertical (a) y corte en tiempo (b) para la identificación de discontinuidades.

principales trenes de discontinuidades asociadas a fallas que son interpretados según la claridad de la imagen sísmica y la experiencia del intérprete.

El reconocimiento de discontinuidades sísmicas está relacionado con la escala del desplazamiento vertical de un evento sísmico a lo largo de la traza, si este desplazamiento es menor que la mitad de una longitud de onda sísmica estaremos en presencia de pequeñas fallas o las denominadas fallas subsísmicas. En este caso los reflectores (picos o valles) no son interrumpidos por estos desplazamientos y se presentan como flexuras sísmicas. La Figura 2 muestra un desplazamiento que comprende desde una longitud de onda sísmica completa en la vertical hasta un desplazamiento menor a media longitud de onda sin movimiento vertical entre los reflectores a lo que denominaremos como flexura sísmica.

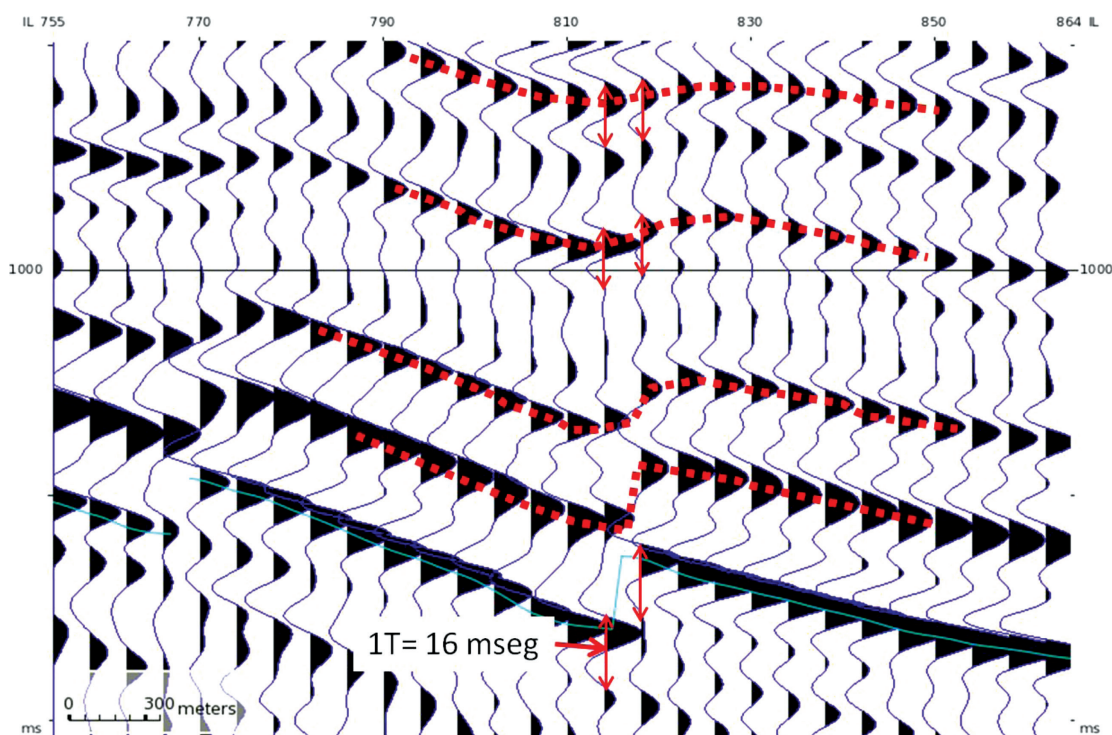


Figura 2. Sección sísmica con identificación de los desplazamientos en la vertical de un período de la ondícula.

En este trabajo se considera a todas las discontinuidades en la vertical, tanto con desplazamientos mayores a una longitud de onda como menores a media longitud de onda, como fallas sísmicas. Es decir, denominaremos fallas o fracturas tanto a los desplazamientos verticales como a la presencia de flexuras sísmicas.

Actualmente los atributos geométricos por horizontes y volumétricos que ponen de manifiesto cambios en la forma de la onda, tanto en la vertical como lateral, son usados para el reconocimiento de las discontinuidades asignadas a fallas o fracturas. La coherencia, curvatura, TecVa y un flujo de atributos sobre amplitud, junto con técnicas de visualización serán descriptos y utilizados en este trabajo para la interpretación de fallas o fracturas de diferentes escalas.

En el caso particular de objetivos No Convencionales, caracterizados por permeabilidades muy bajas que requieren en general de estimulación hidráulica, la presencia de fracturas o sistemas de fracturas Naturales favorece la productividad de fluidos. Si bien esta condición mejora en parte su productividad, puede ser un elemento no deseado si la conectividad del fracturamiento se traduce en vías de migraciones o si intervienen en el desarrollo adecuado de las fracturas en la etapa de terminación.

Es crítico conocer el sistema de fracturas naturales, como su dirección e intensidad, al momento de fracturar un reservorio no convencional puesto que condicionan el desarrollo de las fracturas inducidas durante la terminación.

En este punto debemos diferenciar un sistema de fracturas o microfracturas naturales a escala de coronas, como en *cutting*, de aquellas fracturas identificables en la sísmica. La eficiencia de la estimulación hidráulica, clave para la productividad, es proporcional al grado de fracturabilidad de la roca. La fracturabilidad, en términos de estimulación, está estrechamente relacionada a la composición mineralógica, a menor contenido de minerales de arcilla, por ejemplo, mayor es la fragilidad de la roca y por ende mas facturable. Este concepto puede estar representado en variaciones de las propiedades de las trazas sísmicas en amplitud, fase o frecuencia representadas por una discontinuidad sísmica. En este trabajo se analiza en términos de discontinuidad sísmica, identificada mediante atributos volumétricos geométricos.

MÉTODOS DE CÁLCULO PARA EL RECONOCIMIENTO DE FALLAS

Coherencia

Este atributo, ampliamente difundido en la industria, permite medir la similitud entre las trazas sísmicas (Bahorich y Farmer 1995). Los algoritmos de implementación operan en una ventana espacial que involucra una traza central y trazas circundantes tomando en cuenta cinco, nueve o más trazas con el objeto de obtener resultados de mayor calidad (Chopra y Marfurt, 2007). Este atributo, al medir la similitud de un reflector entre las trazas, puede resaltar discontinuidades abruptas producto de las fallas. Sin embargo deja de ser efectivo en el caso de que los reflectores se encuentren curvados de un lado y/o del otro del plano de falla.

Los algoritmos para cálculo de volúmenes de coherencia han evolucionado desde aquellos basados en correlación cruzada (sensibles a las variaciones de los valores de amplitud) a los más sofisticados que incluyen cálculos de subespacios o lo que comúnmente se denomina Análisis de Componentes principales (Chopra y Marfurt, 2007). Éste último recibe el nombre de algoritmo de Estructura Eigen (Eigenstructure) y es capaz de producir resultados con menor cantidad de ruido, lo cual se traduce en una mejor delineación de discontinuidades estructurales o estratigráficas (Marfurt *et al.*, 1999).

Para el cálculo de coherencia se utilizó el método denominado *Dip Bins* en el que la similitud de la forma de la onda es calculada a lo largo de planos arbitrarios con distintos rumbos y buzamientos que pasan a través de las muestras a ser analizadas. La dimensión del plano en la horizontal está definida por la apertura espacial o ventana horizontal definido por las trazas circundantes y la apertura en la vertical por el intervalo de muestreo seleccionado. De esta forma se analiza la semejanza en todos los planos arbitrarios y se elige el plano con mayor coherencia que es tomado como plano verdadero. Esto garantiza menor filtrado para discontinuidades laterales. Para este método el usuario define el buzamiento máximo de los planos arbitrarios que se generan así como su cantidad. Este método no depende de los horizontes interpretados. La Figura 3 muestra el cálculo realizado de coherencia.

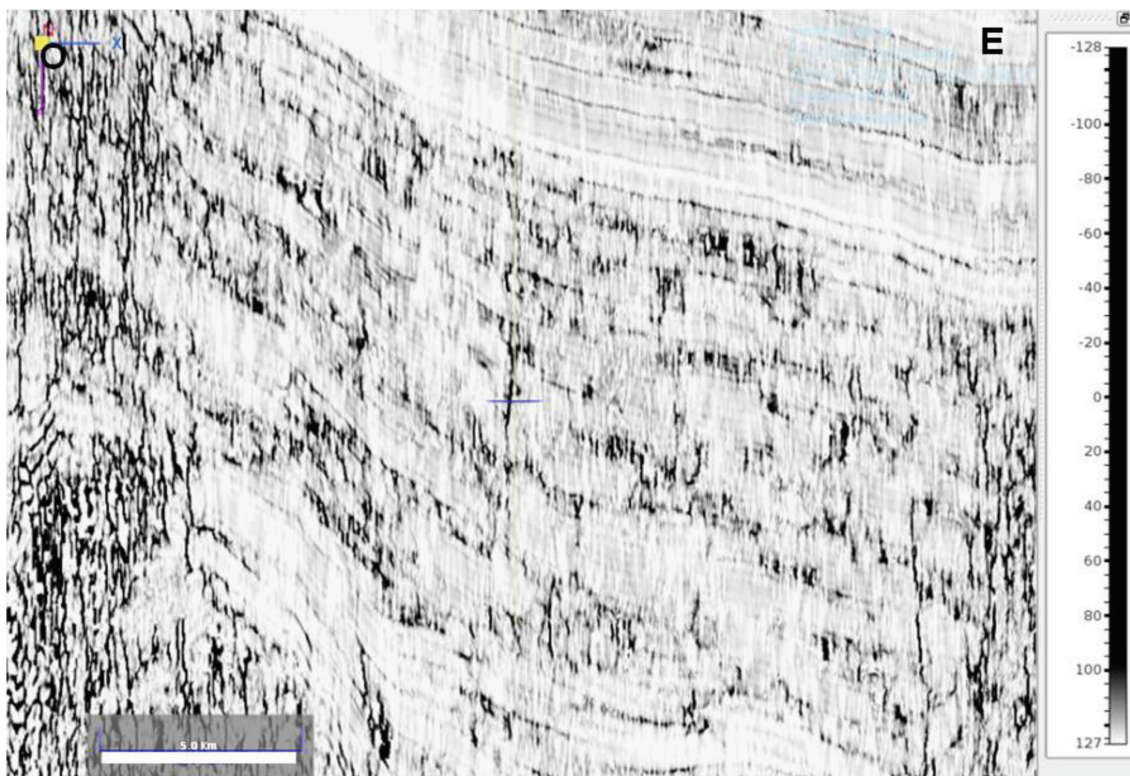


Figura 3. Sección sísmica con atributo de Coherencia.

Curvatura

El atributo curvatura (*dip curvature*) puede ser un buen indicador de fallas. Este atributo mide cuán “curvado” se encuentra un reflector. En efecto, el atributo resalta el efecto de flexura de las capas en el área cercana a los planos de falla, por consiguiente demarca la zona de fallas. Por lo contrario, no logra resaltar las fallas cuando los reflectores no presentan ningún cambio de buzamiento en ambos lados de la falla. La curvatura puede ser descrita como un atributo que permite remover la tendencia o buzamientos regionales de los eventos y, de este modo, resaltar eventos más sutiles o de menor escala como lo son también aspectos estratigráficos.

El cálculo de la curvatura es sensible al ruido sísmico, por lo tanto su utilidad puede decrecer a medida que aumenta el tiempo o profundidad. Al ser combinada con volúmenes de coherencia se logra obtener mayor detalle del fracturamiento por falla (Chopra y Marfurt, 2005).

La curvatura se define, para una línea 2D, como el inverso del radio de una circunferencia tangente a una curva en un punto determinado. La curvatura de una línea recta es cero (Figura 4 a). Mientras más curvada es una línea, el atributo curvatura es más alto en valor absoluto. Como convención se define la curvatura de un anticlinal como positiva, mientras que la de un sinclinal es negativa (Figura 4 b).

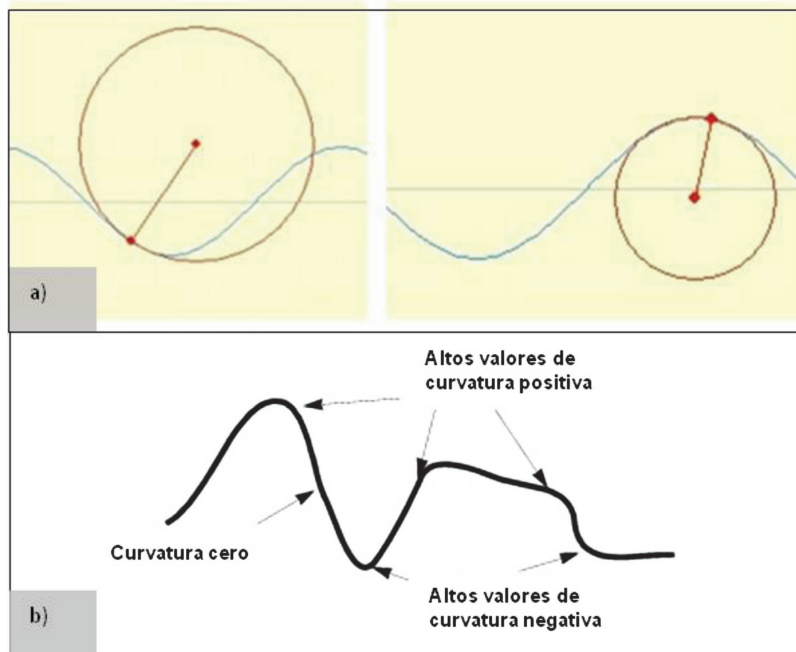


Figura 4. Definición (a) y convención (b) de valores de curvatura.

Para un punto de una superficie S en un espacio tridimensional, se puede definir una curva resultado de la intersección de la superficie S y un plano vertical a ella con un cierto azimuth. Esta curva se denomina Curvatura Normal. Al variar el azimuth del plano se obtienen distintos valores de Curvatura Normal. El máximo de estos valores se denomina Curvatura Principal, Mayor

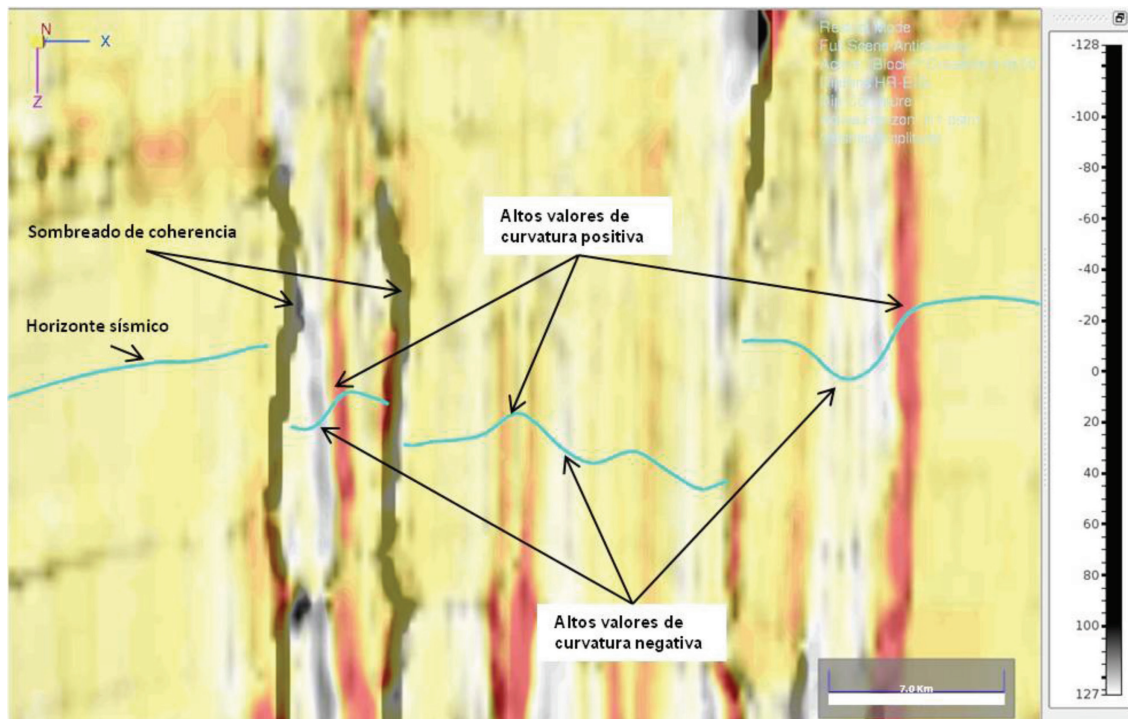


Figura 5. Sección sísmica con atributos de Curvatura y convención de valores.

o Curvatura Principal Máxima. El valor mínimo se denota como Curvatura Principal Menor o Curvatura Principal Mínima. Cuando el azimut es definido por el ángulo del atributo *Dip-Azimuth*, el atributo pasa a denominarse *Dip Curvature*.

La Figura 5 es una sección sísmica con el atributo de curvatura en escala de colores rojos y grises junto con un horizonte interpretado y el cubo de coherencia en sombreado negro. Se muestra en ésta la convención de los valores de curvatura tomando como referencia al horizonte sobre la escala de colores. Rojo representa a los valores altos que representan curvaturas positivas y grises a los valores bajos de curvatura negativa.

PROCESO DE ATRIBUTOS SOBRE AMPLITUDES SÍSMICAS

Además de generar los atributos de coherencia y curvatura para mejorar la visualización de las discontinuidades sísmicas, se procedió al cálculo de atributos sobre las amplitudes sísmicas. La referencia utilizada en este trabajo para este tipo de procesos sobre amplitudes es el atributo TecVa (Técnica de Volumen de amplitudes) que permite identificar el efecto de las fallas sobre las amplitudes de las trazas sísmicas que atraviesa, propuesto por Bulhões (1999).

El algoritmo propuesto calcula la amplitud media cuadrática (RMS) en una ventana deslizante sobre cada traza (del orden de los 10 ms) y luego realiza una rotación de fase de la sísmica de -90 grados (Figura 6). De esta forma se logra resaltar todos los altos contrastes de impedancia presentes en la sísmica.

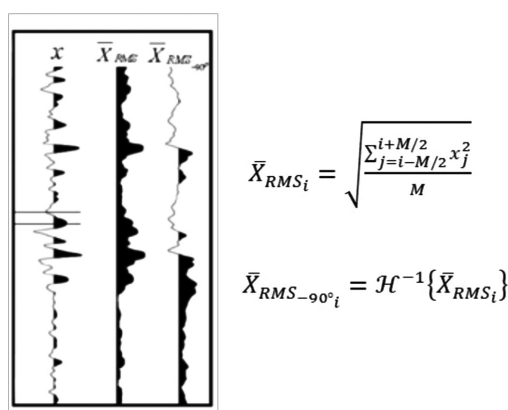


Figura 6. Cálculo de TecVa según Bulhões [2005] en una ventana de tiempo M. Se muestra la traza original (X), su amplitud RMS (XRMS), y la traza RMS rotada -90 grados (XRMS-90). También se presentan las expresiones empleadas para el cálculo del atributo.

A continuación se describirá una breve referencia de los atributos utilizados en los procesos para luego comparar sus resultados.

– Envolvente de la señal

Se obtiene al calcular la raíz cuadrada de los cuadrados de la parte real e imaginaria de la traza sísmica (Chopra y Marfurt, 2007). Representa la energía instantánea de la señal y es directamente proporcional al coeficiente de reflexión. Permite resaltar los eventos más importantes de la sísmica, entre ellos, fallas, discontinuidades, límites de secuencia. Adicionalmente, desde el punto de vista geológico, se podrían asociar sus resultados a cambios en la depositación y en la litología.

– Cálculo de RMS

El atributo RMS es generado actualmente en forma automática por varios *software* disponibles en la industria. En este caso se procedió a su cálculo utilizando 8 muestras que corresponden a medio período de longitud de onda para la zona central utilizada. Esto redujo el contenido de altas frecuencias respecto al dato original, conservando el carácter de contraste del dato sísmico.

– Rotación de fase

Proceso para rotar la fase de cualquier dato sísmico. Por ejemplo, en ocasiones se aplica una rotación de fase para obtener un dato sísmico de fase cero, y facilitar la interpretación. Para analizar la fase de la sísmica se sigue el flujo de trabajo de calibración sísmica pozo. En éste se analiza y se selecciona la ondícula con la fase que mejor ajusta. Si de este análisis se obtiene una rotación de 90° , para convertir la sísmica a fase cero, se aplicará una rotación de fase -90° a la sísmica. En este proceso en particular la rotación de fase se realiza con el objeto de llevar los valores de amplitudes positivos obtenidos luego de calcular las amplitudes RMS a valores tanto positivos como negativos.

Para el presente trabajo, se realizó el cálculo de una variante del atributo TecVa. El flujo de trabajo involucra la normalización de las amplitudes sísmicas (Figura 7a), el cálculo del valor absoluto de las trazas (Figura 7b) y una rotación de 90 grados de la fase sísmica (Figura 7c). El atributo así obtenido es comparable al atributo TecVA calculado en ventanas deslizantes de pocos milisegundos (menos de 10 ms).

También se comparan en la Figura 7 los espectros de amplitud para la ventana de tiempo de 1100 ms a 2400 ms. Se observa que, al aplicar el atributo RMS-RF, se incorporan amplitudes de baja frecuencia en el espectro. Por otra parte la variante TecVA posee un mayor contenido de altas frecuencias que el proceso RMS-RF. Esto se vincula a las dimensiones de la ventana deslizante sobre la cual se calculan los atributos. En el caso del proceso RMS-RF la ventana se define en función de la resolución sísmica por lo que no se resaltan las altas frecuencias y se preserva el carácter geológico de la sección.

El flujo de trabajo realizado, al igual que el TecVa, mejora la continuidad de los reflectores sísmicos logrando un aspecto de relieve en las secciones sísmicas. La impronta visual otorga un efecto geológico de las fallas en su aspecto en profundidad.

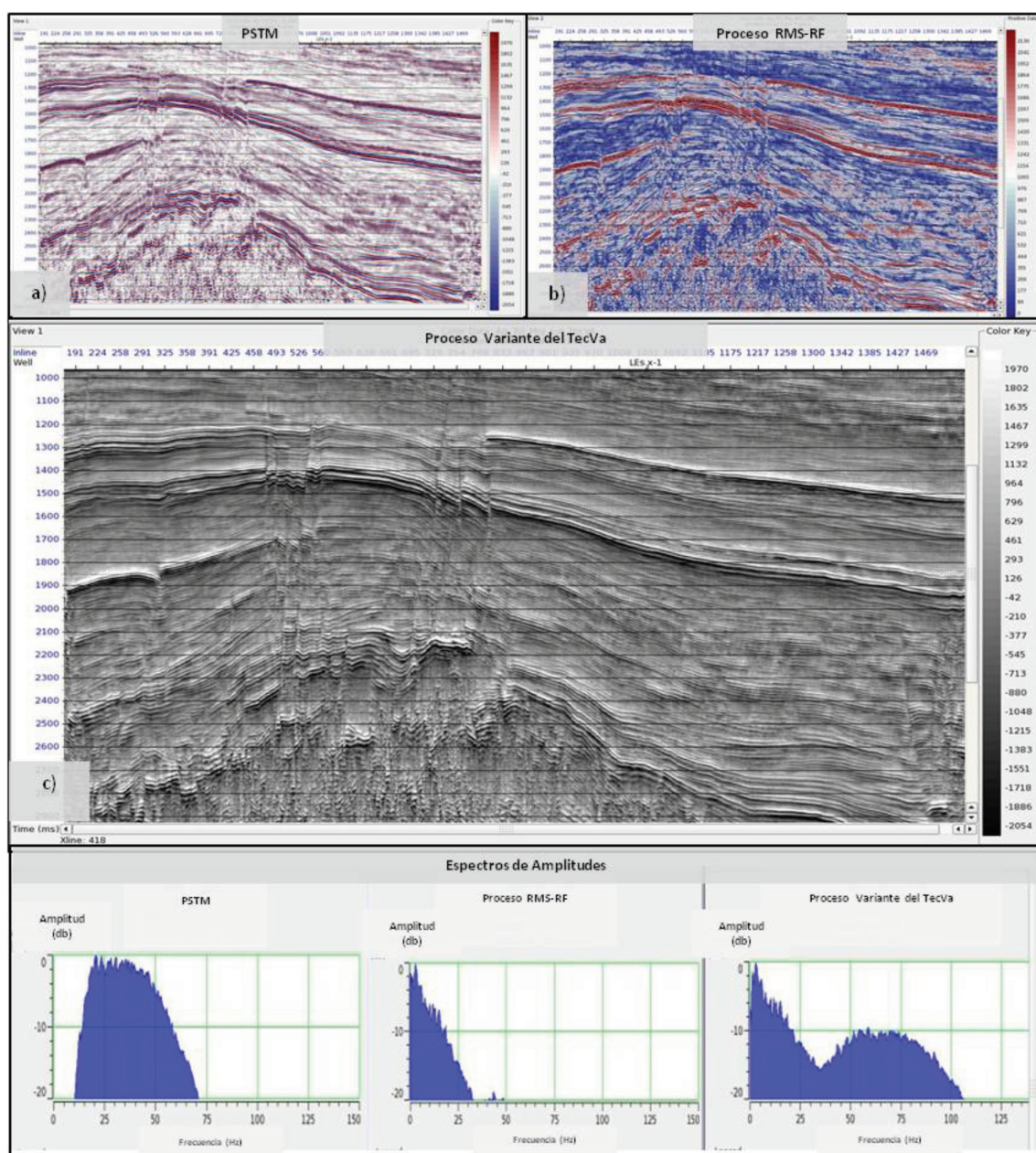


Figura 7. Flujo de proceso sobre amplitudes (Variante TecVa) y espectros de amplitudes correspondientes.

A continuación se describen dos procesos más de cálculos de atributos aplicados. Ambos parten del dato PSTM, en uno de ellos se calcula el atributo señal de la envolvente, y una rotación de fase de 90 grados (Proceso SE-RF) (Figura 8 c); y en el otro se aplica un RMS por fórmula, un

AGC y luego la rotación de fase 90 grados (Proceso RMS-RF) (Figura 8 d). En la Figura se muestra además el dato PSTM inicial (Figura 8 a), el proceso sobre amplitudes (Variante TecVa) (Figura 8 b), caracterizado por el alto contenido de frecuencia y en las imágenes c) y d) el mayor contenido de energía envolvente.

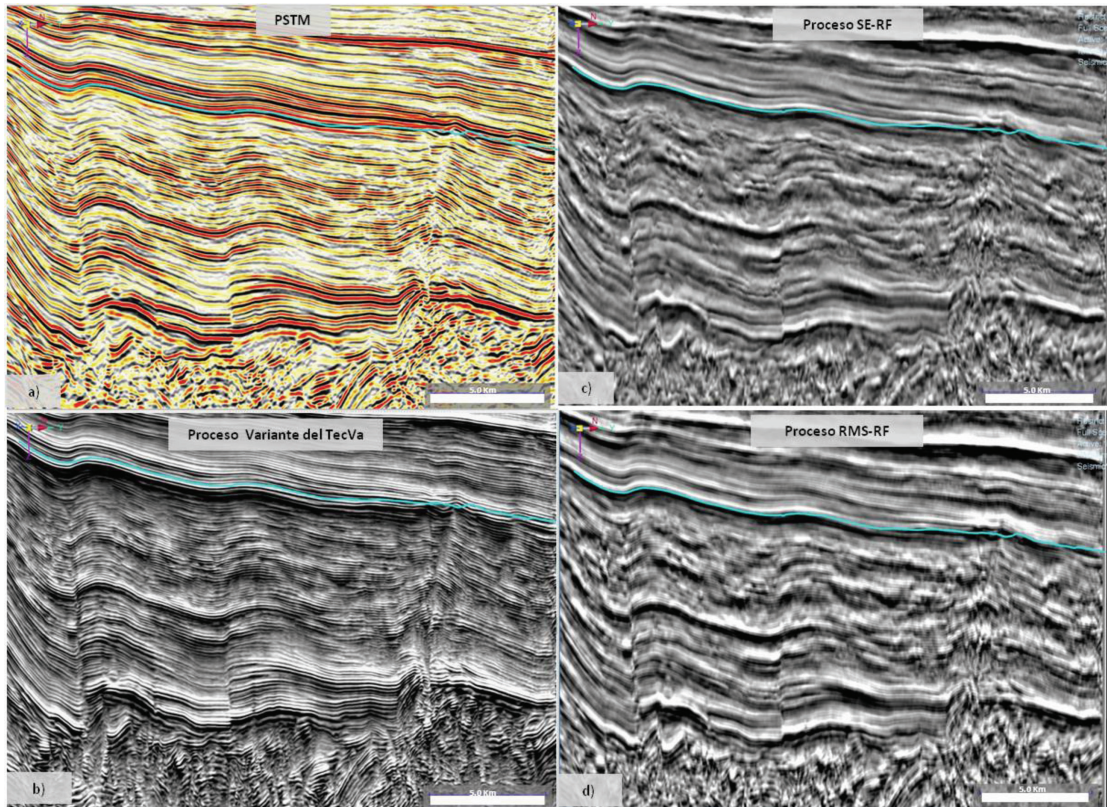


Figura 8. Flujo de proceso sobre amplitudes.

En todos los casos el objetivo es dar énfasis a las discontinuidades, por lo que el carácter o efecto relieve es buen indicador de las grandes fallas por la presencia de altas frecuencias y el mayor contraste de las reflexiones pero disminuye su definición en fallas menores en los que el efecto de energía envolvente ayuda a su seguimiento.

VISUALIZACIÓN E INTEGRACIÓN DE ATRIBUTOS GEOMÉTRICOS Y DE AMPLITUD

Aporte de los atributos en el desplazamiento vertical de fallas.

El reconocimiento de los desplazamientos verticales (rechazo) en los planos de fallas está dado por los saltos en la vertical de un horizonte sísmico interpretado de un reflector a otro. En

algunos casos el patrón de reflectividades nos impide decidir cuál es el salto de interpretación para lograr el verdadero rechazo en un plano de falla.

Para este objetivo, partiremos de analizar en detalle la información visual que presentan los cubos PSTM, y los procesos aplicados sobre amplitudes (Figura 9). El seguimiento de un determinado patrón sísmico identificado como (A) es claro en el dato en amplitud PSTM, y puede reconocerse el esquema de saltos de fallas para los bloques en la posición B y C. La incertidumbre en la interpretación se da para el salto de falla a la posición D y el siguiente bloque E, en la que el dato en amplitud debe ser observado con mayor detalle para lograr la confiabilidad en el salto de falla. Para estos dos últimos saltos el dato de atributo Variante del TecVa aporta menor claridad debido a la mayor frecuencia presente y por el contenido de la distribución de amplitudes.

Podemos considerar para los datos PSTM y Variante del TecVa que el patrón de reflectores que define al horizonte de referencia para la zona de falla entre D y E son flexuras sin desplazamiento en la vertical. Sin embargo interpretado en el dato Proceso SE-RF es claro un desplazamiento en la vertical dado por las variaciones laterales de amplitud de este atributo resultante.

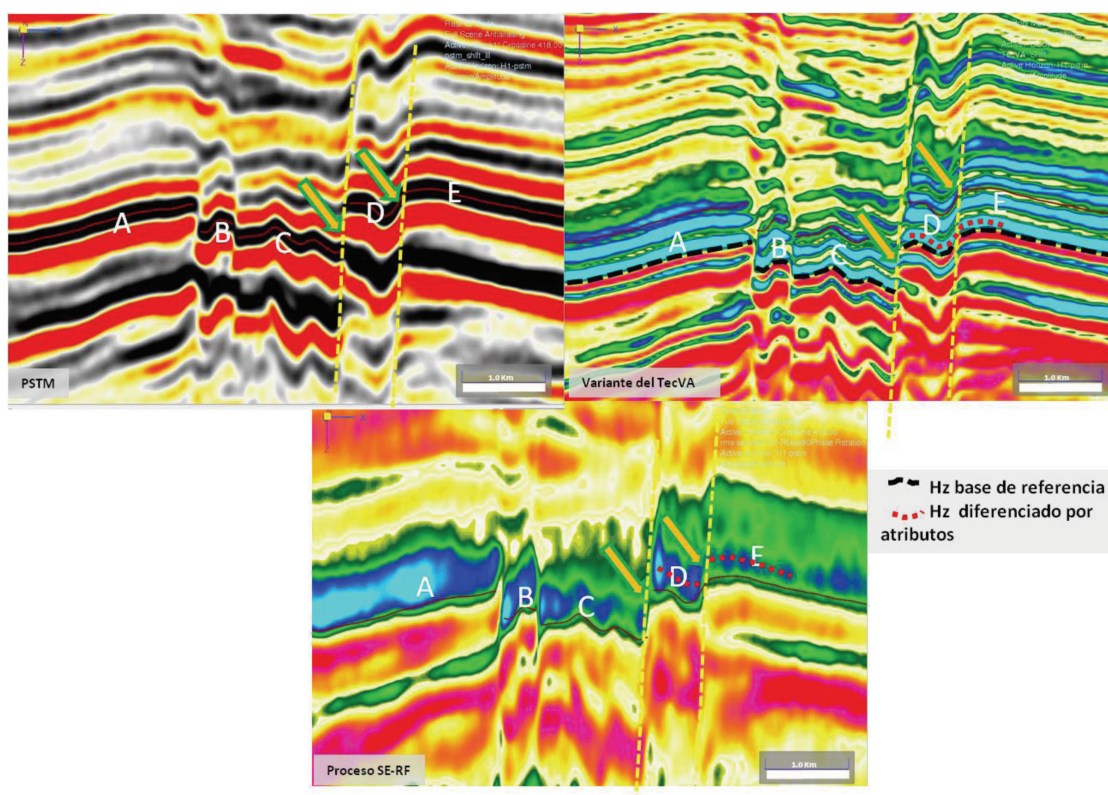


Figura 9. Análisis de Interpretación sobre procesos de amplitud.

En ambas versiones de procesos, es posible seguir los planos de fallas pero para el caso particular en los ámbitos entre D y E difieren en la asignación sísmica del plano de falla. En un caso es un efecto de flexura sísmica y en el otro es un desplazamiento con rechazo vertical.

Esta diferenciación modifica la interpretación del comportamiento geomecánico para la zona circundante, por lo que esta situación debe ser tenida en cuenta para propuestas de ubicación de pozos en casos No Convencionales.

Aporte para el caso de fallas.

El reconocimiento inicial de las fallas parte de la observación en amplitud del dato sísmico. Para el caso de discontinuidades de gran extensión en la vertical, el dato sísmico en amplitud es suficiente para interpretarlas como fallas tanto en la vertical como en horizontal (Figura 10 a).

El reconocimiento de fallas pequeñas en el dato en amplitud posee un mayor grado de incertidumbre tanto en las secciones verticales en tiempo como en los cortes en secciones horizontales (Figura 10 a) y b)). Las fallas pequeñas aun visibles en el dato sísmico poseen en general poca continuidad vertical y lateral por lo que su identificación y seguimiento está condicionado a la calidad del dato sísmico en amplitud disponible.

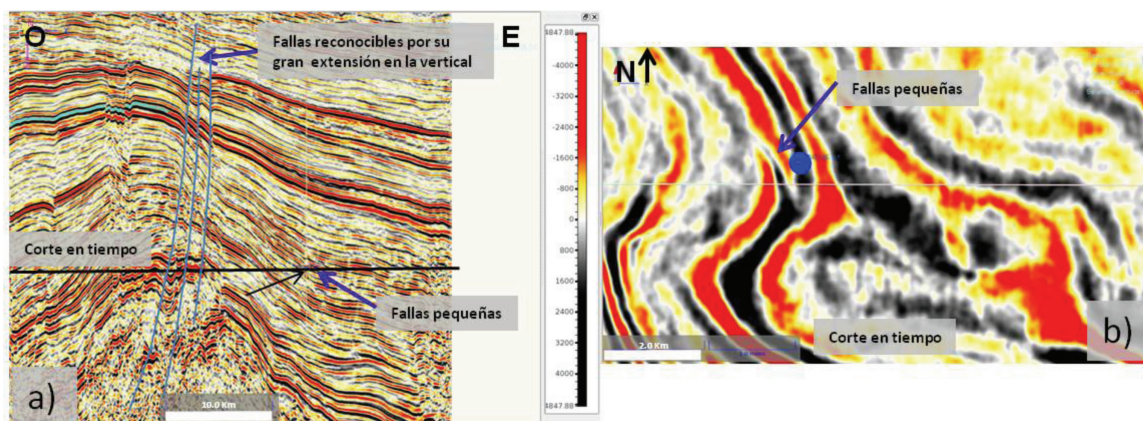


Figura 10. Análisis de Interpretación sobre procesos de amplitud.

En la sección sísmica en vertical mostrada en amplitud no se identifica claramente la zona de fallas pequeñas, sólo en el corte en tiempo se identifica una discontinuidad de reflectores a los cuales se les puede asignar este tipo de fallas. Éste es el punto de partida, junto a información proveniente del pozo, de la existencia de una falla con poco rechazo vertical y que pueda ser considerada como un dato de entrada.

Para la problemática anterior, los atributos como la coherencia, curvatura y procesos de atributos sobre la amplitud son necesarios para la identificación e interpretación de este tipo de fallas. Un primer paso es la visualización en forma individual de estos atributos, como se muestra en la Figura 11 a) con el dato de coherencia y la Figura 11 c) con el proceso SE-RF. En éstos se reconocen por sí mismo pequeñas discontinuidades o cambios en las reflectividades que indican

la presencia de fallas pequeñas. Sobre la imagen se señala un caso especial de falla comprobada por pozo.

El siguiente paso consiste en la aplicación de las técnicas de combinación de atributos. Para este caso se presenta la combinación amplitud PSTM junto a la coherencia (Figura 11 b)) y la amplitud PSTM junto al proceso SE-RF (Figura 11d). En este caso se puede apreciar la utilidad de estos atributos al lograr una mejor visualización e interpretación de fallas o fracturas pequeñas visibles sísmicamente. Todas otorgan un nivel más de confiabilidad al momento de reconocer fallas pequeñas.

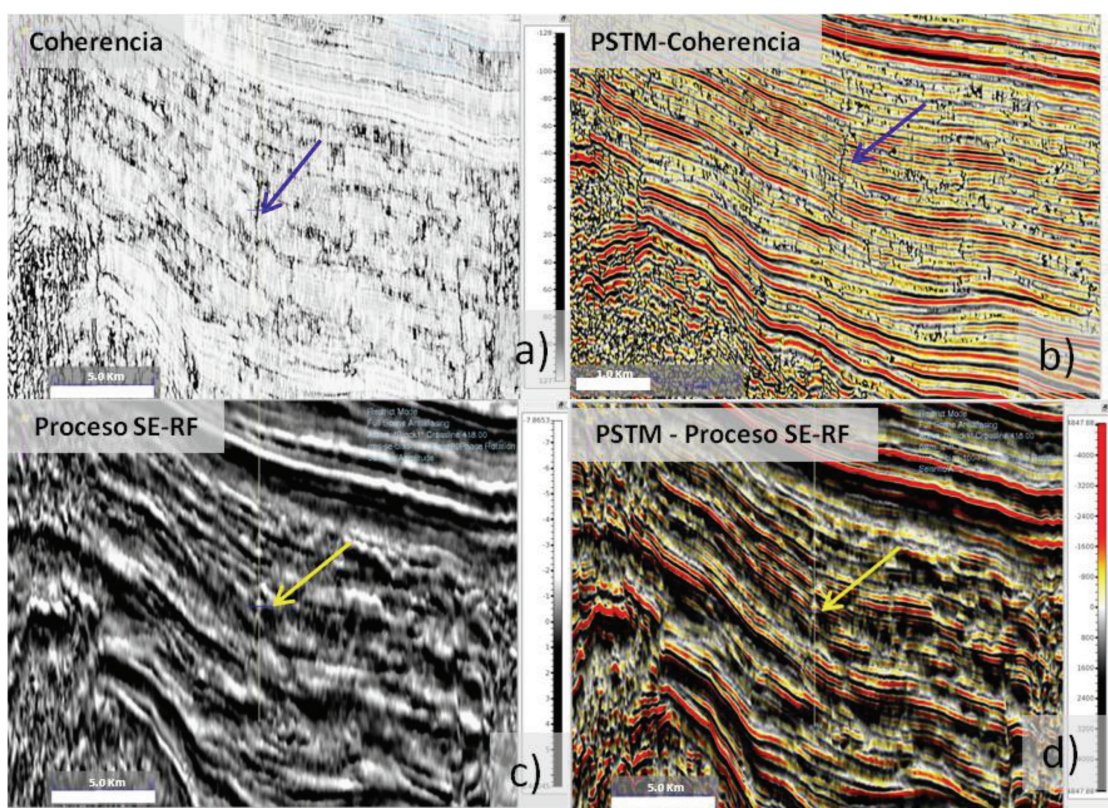


Figura 11. Combinación de atributos para el reconocimiento de fallas pequeñas.

Aporte de la combinación de Coherencia y Curvatura.

La utilización del atributo coherencia en combinación con el de curvatura nos permite reconocer y definir ámbitos de influencia de una falla y/o fractura. La superposición de ambos atributos puede identificar una separación espacial entre ambos. Esta separación se debe a que la curvatura manifiesta las flexuras sobre el dato sísmico cuando los reflectores presentan cambios de buzamiento sin necesidad de que exista una discontinuidad en la vertical. Este efecto posee una implicancia directa en considerar que una flexura sísmica representa fracturamiento sobre la roca

con el consiguiente cambio del estado en las propiedades geomecánicas de las rocas. Por lo tanto la influencia o ámbito de afectación de la roca alrededor de un pozo dependería no solo de la discontinuidad vertical sísmica sino también de cambios de curvatura cercanos al pozo.

La Figura 12 muestra en detalle el impacto en la utilización de combinada de la coherencia y curvatura para el reconcomiendo de zonas de fallas. La Figura 12 a) muestra la superposición del dato en amplitud PSTM y la coherencia, la Figura 12 b) la curvatura y el dato PSTM y la Figura 12 c) la superposición de coherencia, curvatura y la amplitud PSTM. Es claro detectar aquellas discontinuidades sísmicas con desplazamientos y aquellas representadas por flexuras. Todas ellas poseen una implicancia en las consideraciones geomecánicas de las rocas por lo que representan un dato importante incorporado por los atributos sísmicos geométricos.

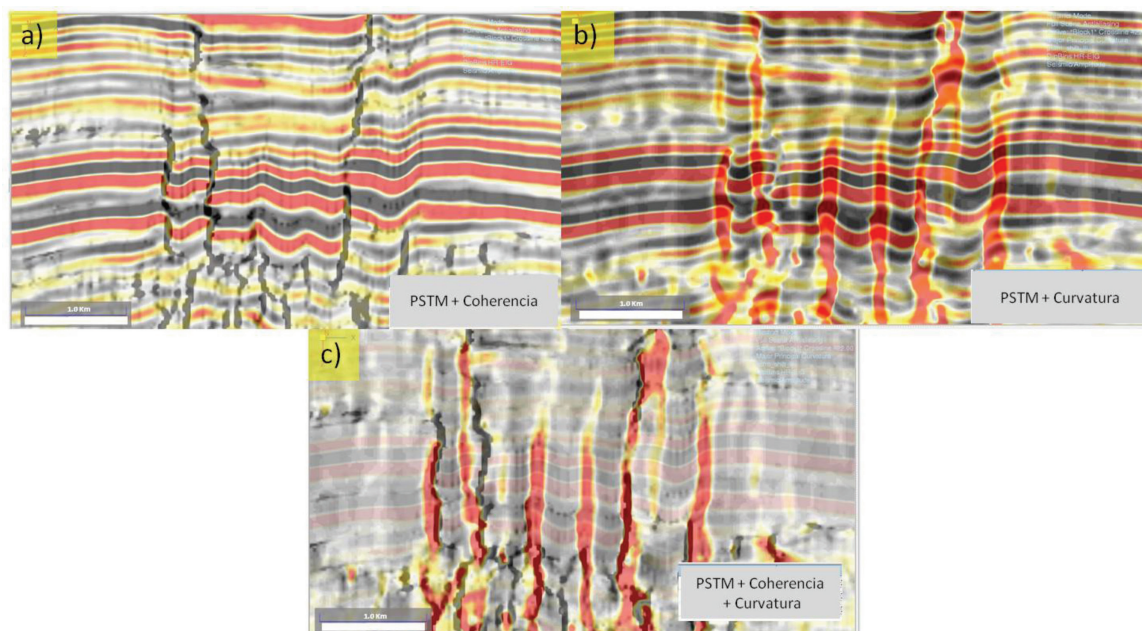


Figura 12. Combinación con opacidades de atributos Coherencia, Curvatura y PSTM.

Un aporte de mayor detalle de la integración y combinación de los atributos coherencia y curvatura junto a la amplitud está dado por la detección de la interferencia de zonas de fracturas en las inmediaciones de una zona del pozo en particular. Muchas veces es de utilidad medir cualitativamente la distancia en la horizontal de una zona de fracturas respecto de la ubicación del pozo.

En este caso particular ejemplificado, la continuidad y poco buzamiento del conjunto de reflectores sísmicos nos limita una interpretación definida de fallas y/o fracturas. De manera difusa la coherencia demarca una zona en grises relacionados a la discontinuidad de los reflectores sin un desplazamiento en la vertical visible a nivel sísmico. Si medimos la distancia en la horizontal

según el atributo coherencia desde el pozo, por ejemplo A, se mide aproximadamente 240 m (Figura 13 a)). Si consideramos el atributo curvatura esta distancia se reduce a 110 m (Figura 13 b)). Esta diferencia puede ser incorporada a nuestra interpretación para prever zonas probables de fracturas en las inmediaciones del pozo.

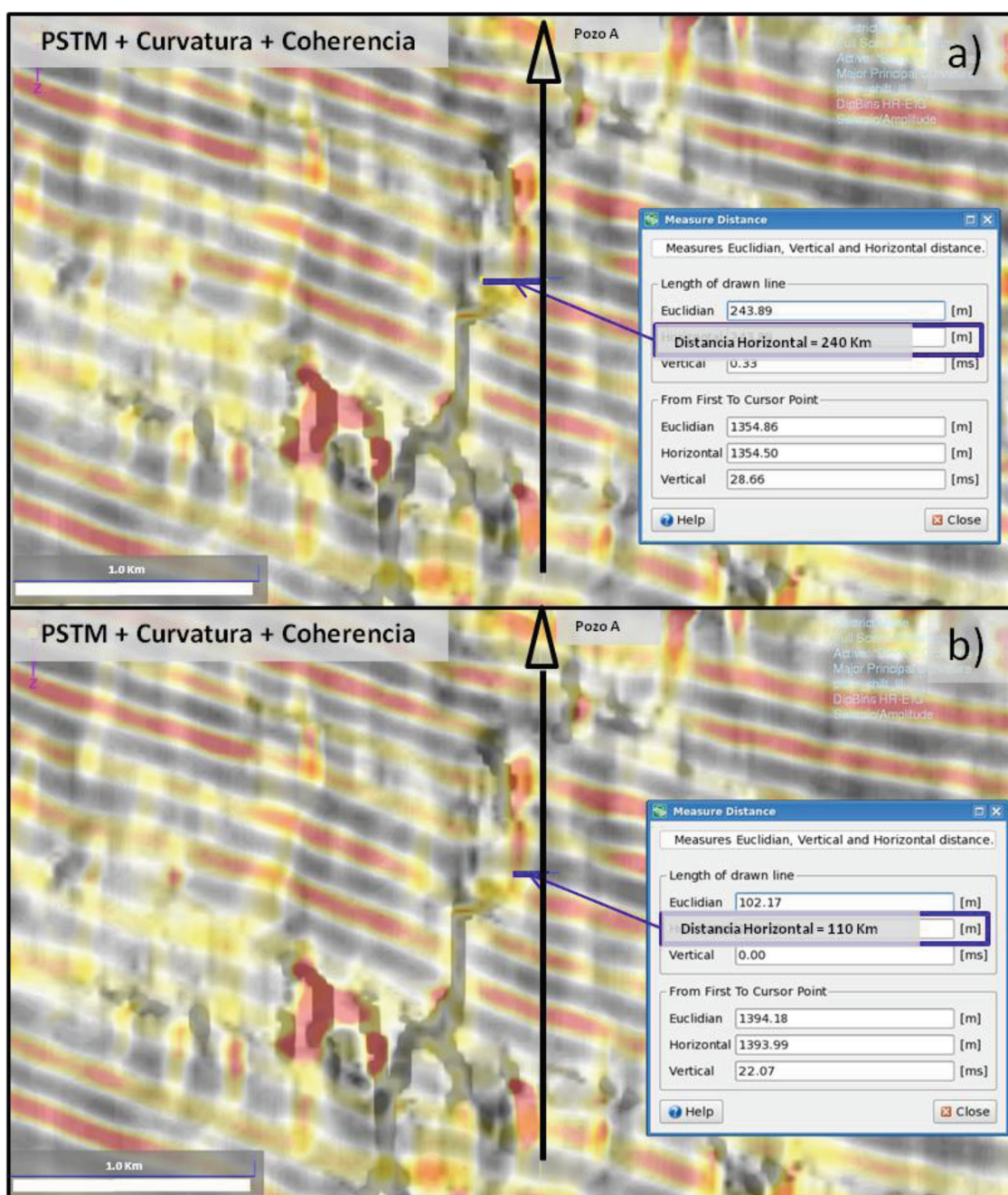


Figura 13. Interferencia de fracturas por atributos respecto del pozo.

Esta interpretación de distancias está dado porque el atributo curvatura (*dip curvature*) puede ser un buen indicador de fallas, pero hay que tener presente que este atributo mide cuán “curvado” se encuentra un reflector. En efecto, el atributo resalta el efecto de flexura de las capas en el área cercana a los planos de falla, por consiguiente demarca la zona de fallas. Por lo contrario, no logra resaltar las fallas cuando los reflectores no presentan ningún cambio de buzamiento en ambos lados de la falla.

CONCLUSIONES

- Se define a las discontinuidades sísmicas como aquellas reconocidas por desplazamientos verticales, horizontales y/o cambios laterales de las propiedades de los reflectores en datos de amplitud sísmica.
- Se incorpora a la definición de discontinuidades sísmicas a todos los cambios flexurales de los reflectores.
- Las discontinuidades sísmicas son identificadas como zonas de fallas o fracturas.
- La utilización de los atributos geométricos optimizan la visualización e interpretación de fallas y zonas de fracturas.
- Las técnicas de combinación de atributos son una herramienta para el reconocimiento de zonas de fallas y/o fracturas.
- El atributo de coherencia aporta la componente de discontinuidad de reflectores y el atributo de curvatura las variaciones de buzamientos de éstos.
- A partir de datos en amplitud el cálculo de coherencia y curvatura en volumen ayudan a identificar áreas con propiedades geomecánicas distintivas.
- Los procesos variantes de TecVa verifican su utilidad al momento de lograr una definición de fallas por el aspecto en volumen.
- Al calcular el atributo TecVA con ventanas de tiempo inferiores a media longitud de onda se logra resaltar las altas frecuencias de la sísmica pero se pierde el contenido geológico del dato respecto de la envolvente en amplitud.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Gerencia de No Convencional y a la Gerencia de Geofísica de YPF S.A. por permitirnos publicar este trabajo. Y a la Sra. Laura Evins por el soporte aportado.

REFERENCIAS CITADAS

- Araujo Dos Santos Meneses, A., 2010. Estudio teórico de atributos sísmicos em dados sísmicos de reflexao. Universidade Federal Da Bahia.
- Babarsky, A., Gao, D. 2012. 3D seismic attribute-assisted fracture detection in the Middle Devonian Marcellus Shale, southwestern PC, Central Appalachian Basin. Annual International Meeting, SEG.
- Bahorich, M., Farmer, S. 1995. The Coherence Cube. The Leading Edge, October 1995.
- Bulhões, Élvio M. 2005. Princípio da SismoCamada Elementar e sua aplicação à Técnica Volume de Amplitudes (tecVA). Ninth International Congress of the Brazilian Geophysical Society.
- Chopra, S., Marfurt, K. 2008. Emerging and future trends in seismic attributes. The Leading Edge, March.
- Chopra, S. y Marfurt, K. 2008. Seismic Attributes for Prospect Identification and Reservoir Characterization, SEG Geophysical Developments Series No. 11.
- Dorn, G., Kadlec B., Murtha, P. 2012. Imaging faults in 3D seismic volumes. Annual International Meeting, SEG.
- Kazmi, H., Aftab Alam, I, Ahmad, S., Shaiq, A. 2012. Fault characterization using volumetric curvature from continuous phase spectrum. Annual International Meeting, SEG.
- Liu, W., He, Y. 2012. Seismic geometric attributes and information integration techniques for interpretation of small faults. Annual International Meeting, SEG.
- Marfurt, K., Sudhaker, V., Gerztenkorn, A., Crawford, K. D., Nielsen, S. E, 1999. Coherency calculations in the presence of structural dip: Geophysics, 64, 104-111.