

POTENCIAR LA IDENTIFICACIÓN DE ANOMALÍAS Y RASGOS ESTRUCTURALES MEDIANTE MEZCLAS DE ATRIBUTOS. CUENCA DEL COLORADO, ARGENTINA

Teresa Santana¹, Sebastián Arismendi¹

1: YPF S.A. teresa.santana@ypf.com, sebastian.arismendi@ypf.com

Keywords: Seismic Attribute, Blend, Anomaly, Structural, Offshore

ABSTRACT

It has been shown that the use of multiple seismic attributes enhances the rapid identification of anomalies and speeds up seismic interpretation, highlighting structural and/or stratigraphic features. The additive method RGB (Red, Green, Blue) is the most widely used, especially for spectral decomposition, which combines the primary colors. On the other hand, the subtractive method CMY (Cyan, Magenta, Yellow), that merges the opposites of the primary colors, cyan opposite to red, magenta to green, and yellow to blue respectively, is mainly used to highlight structural features by blending seismic structural attributes based on seismic amplitude, phase, and frequency. The resulting cube is essentially lighter, while the structural discontinuities and/or faults are observed darker, in shades of gray and black and, consequently, their interpretation is more intuitive and agile for the interpreter. In the present work, an innovative methodology is proposed as a complement to the traditional seismic interpretation to contribute to the identification of anomalies and structural features in frontier exploration zones offshore Colorado basin of Argentina, including: 1) CMY subtractive blend of structural seismic attributes tensor, semblance, and dip to automatically perform structural analysis; 2) Blend of critical attributes, instantaneous frequency, envelope and dip, to highlight anomalies; and 3) Spectral decomposition to recognize stratigraphic features or potential contacts.

INTRODUCCIÓN

Los atributos sísmicos representan una de las herramientas más utilizadas desde hace décadas en la interpretación sísmica junto con el análisis de los riesgos de los escenarios geológicos alternativos a varias escalas. Sin embargo, es fundamental entender el significado de las amplitudes sísmicas y sus atributos derivados para su óptimo manejo durante la evaluación de prospectos, por lo cual es requisito:

- comprender las limitaciones del método sísmico de reflexión
- evaluar la consistencia entre las amplitudes observadas y el modelo geológico de subsuelo
- estimar la incertidumbre asociada

Los atributos sísmicos son mediciones o derivaciones de tiempo, amplitud o frecuencia de las ondas en los datos sísmicos que facilitan su interpretación geológica o geofísica. En términos generales, las medidas de tiempo son relativas a la estructura, mientras que las de amplitud y de frecuencia a la estratigrafía y a la caracterización sísmica de los reservorios.

Los atributos son útiles en la medida que se correlacionan con alguna propiedad física de interés, favoreciendo la interpretación de características y patrones geológicos que de otro modo son poco discernibles en amplitud. El uso de mezclas de atributos sísmicos intensifica el resultado obtenido.

En el presente trabajo, se describen y aplican diferentes atributos sísmicos volumétricos y su combinación a los efectos de investigar rasgos estructurales y estratigráficos de manera rápida y eficaz para agilizar los tiempos de interpretación y priorizar zonas con mayor potencial reduciendo su incertidumbre.

METODOLOGÍA

MEZCLAS DE COLORES

La combinación de tres atributos sísmicos en una mezcla es una técnica muy utilizada en la búsqueda de oportunidades a diferentes escalas. Consiste en utilizar colores específicos para cada atributo que facilitan y potencian la identificación de rasgos geológicos al sumar o restar sus efectos y visualizar características ocultas o poco visibles en los volúmenes individuales. Entre los métodos, se destacan dos más frecuentemente utilizados (Fig. 1):

1- Mezcla aditiva RGB, que utiliza los colores primarios rojo, verde y azul. Cuando los tres atributos se encuentran presentes, los colores se suman generando el color blanco. Se utiliza en descomposición de frecuencias para resaltar rasgos estratigráficos y para detectar posibles contactos o cambios litológicos.

2- Mezcla sustractiva CMY, que emplea los opuestos a los colores primarios cian, magenta y amarillo. En este caso, si los tres atributos están presentes, se absorbe la coloración y en consecuencia se representa en color negro. Esta mezcla es óptima para resaltar rasgos estructurales, donde las discontinuidades se observan en tonos oscuros.

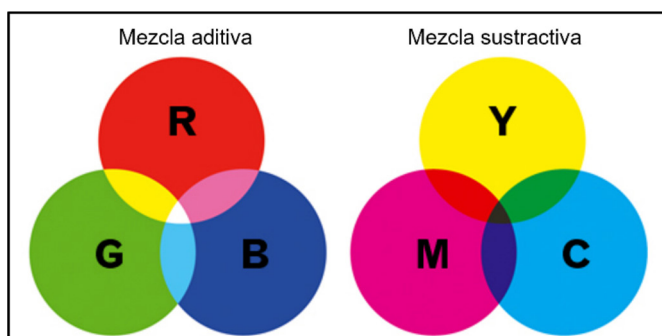


Figure 1. Tipo de mezclas de colores.

USO DE MEZCLAS PARA OPTIMIZAR LA VISUALIZACIÓN DE ATRIBUTOS

Combinar atributos sísmicos tradicionales, tanto estructurales como estratigráficos, facilita y agiliza la visualización e interpretación simultánea de los mismos, permitiendo lograr un alto impacto durante la interpretación sísmica. A continuación, se describen algunas de los posibles grupos:

1- Mezcla de atributos estructurales

La mezcla sustractiva de atributos CMY permite resaltar aspectos estructurales del dato sísmico al combinar atributos estructurales independientes provenientes de la amplitud, fase y orientación de los reflectores, lo que facilita la visualización de discontinuidades, flexuras y fallas de manera rápida y efectiva.

Los atributos estructurales independientes recomendados para esta técnica son: 1) el tensor, que detecta cambios de amplitud o de fase de los reflectores, proporcionando una buena continuidad a lo largo de fallas regionales (Fig. 2 a); 2) la semblanza orientada estructuralmente que corresponde a una medida de correlación cruzada o similitud entre formas de onda relacionada con la fase de los reflectores. La semblanza resalta eventos discontinuos destacando los detalles y nitidez de las fallas. Es el atributo más comúnmente utilizado para detectar discontinuidades (Fig. 2 b); y 3) el *dip* que distingue cambios en el buzamiento de los reflectores sísmicos, identificando zonas de alto y bajo buzamiento, además de detectar límites litológicos y capas delgadas (Fig. 2 c). En esta mezcla, los planos de fallas se observan como reflectores facilitando su interpretación.

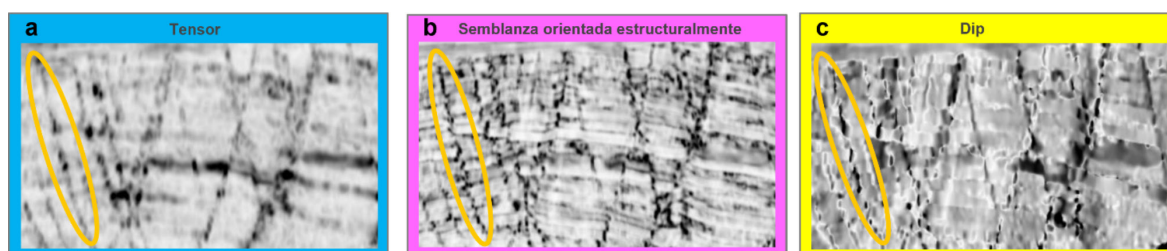


Figure 2. Atributos independientes para resaltar rasgos estructurales mediante mezclas de atributos.

Al utilizar la mezcla sustractiva CMY con atributos estructurales independientes (Fig. 2 y 10), se logra un modelo más claro con las discontinuidades estructurales y/o fallas en tonos de grises y negros, por lo cual su visualización e interpretación resulta más intuitiva y rápida para el intérprete (Purves *et al.* 2011).

Además, esta mezcla puede utilizarse como volumen de entrada a la interpretación estructural volumétrica automática de fallas como complemento a la interpretación sísmica clásica para enriquecer el entendimiento estructural de nuevas oportunidades (Santana *et al.* 2022).

2 - Mezcla de atributos estratigráficos

La mezcla utilizada más frecuentemente es la mezcla aditiva RGB de colores primarios, óptima para resaltar detalles estratigráficos. El uso de esta combinación en la descomposición de la señal sísmica permite mezclar tres bandas de frecuencias, asignándole color rojo a las señales de ancho de banda baja, verde a las medias y azul a las altas, que al combinarse proporcionan los tonos necesarios para identificar los rasgos estratigráficos o contactos de fluidos que de otra manera son complejos de visualizar en el dato de ancho de banda completo (Chopra y Marfurt, 2007).

Existen varios métodos de descomposición espectral. El estándar con ancho de banda constante, y el de alta definición, también denominado *matching pursuit* en el cual la traza se descompone en ondículas individuales que pueden reconstruirse a una frecuencia dada.

La geomorfología sísmica basada en la descomposición espectral facilita la interpretación de los ambientes deposicionales. Su importancia reside en la efectividad para la detección y extracción volumétrica de geocuerpos, maximizando el análisis del espectro de amplitud de la sísmica y mejorando el entendimiento de los reservorios.

CASO DE ESTUDIO: ALTO EXTERNO DE LA CUENCA DEL COLORADO, ARGENTINA

MARCO GEOLÓGICO Y TECTÓNICO

El margen continental Atlántico de Argentina está segmentado por varias zonas de cizallamiento. El segmento entre la zona de falla de Ventana y del Río de la Plata se caracteriza por la presencia de las cuencas del Colorado, Salado y Punta del Este con perfiles perpendiculares a la costa (Lovecchio *et al.* 2018, Fig. 3).

Existen varias hipótesis para explicar esta disposición, que implican el desarrollo simultáneo de estas cuencas en un único y continuo evento de *rifting* que finalmente llevó a la apertura del Atlántico Sur.

La cuenca del Colorado, en el Mar Argentino norte, es una depresión orientada principalmente en dirección Este-Oeste, en alto ángulo con la línea de costa y con el límite entre el continente y el océano, orientados en dirección NNE (Gerster *et al.* 2011, Lovecchio *et al.* 2018, Fig. 3 y 4). Se extiende a lo largo de 120.000 km² y se ubica en mayor parte en la actual plataforma y talud continental, con profundidades de agua que llegan a los 3.900 m. Se compone de tres depocentros denominados occidental, central y oriental, con ejes orientados NO-SE, separados por altos estructurales y limitados por fallas de transferencia. Los espesores máximos de columna sedimentaria llegan hasta los 8.000 a 9.000 m en el depocentro oriental.

La extensión que originó estas cuencas, además de generar los depocentros, muestra una compleja interacción estructural como consecuencia de al menos tres estadios diferentes de *rifting*

- un segundo evento en el Jurásico temprano a medio, responsable de generar los principales depocentros de las cuencas, orientados en dirección SE-NO.
- un último evento de extensión, del Cretácico temprano, que genera fallas orientadas en dirección SO-NE desarrolladas exclusivamente en los 100 a 200 km externos de la cuenca, paralelas a la transición continente-océano, responsables de la apertura del Atlántico sur.

ANTECEDENTES

Las evidencias de un sistema petrolero activo en la cuenca del Colorado son escasas, debido a que los pozos (26 en total) fueron perforados en los flancos de la cuenca en posiciones poco favorables, en base a información sísmica escasa o de mala calidad. Las perforaciones a la fecha han comprobado la presencia de rastros de petróleo en el Cretácico (pozo Bahía Blanca A1, flanco norte de la cuenca), trazas de petróleo en el Pérmico (pozo Corona Austral), rastros y roca madre de calidad de edad posiblemente Pérmica (pozo Estrella), petróleo en reservorios de buena calidad en el synrift Jurásico con recuperación de petróleo liviano en niveles Mesozoicos (pozo Cruz del Sur x-1), y reservorios marinos someros del Cretácico con excelente calidad petrofísica (pozo Pejerrey).

Por otra parte, se observan fugas naturales de hidrocarburos, varias muestras de fondo marino con evidencias de gas termogénico (Gerster R. *et al.* 2011, Anka, Z. *et al.* 2014), y detecciones de derrames naturales de petróleo por radar, que confirman la existencia de un sistema petrolero activo.

Los recientes descubrimientos de petróleo en la cuenca de Orange en África del Sur, margen conjugado del margen argentino, ponen en valor la presencia de la roca madre Aptiana y abre perspectivas exploratorias sumamente alentadoras para las cuencas costa afuera en la zona norte en Argentina.

ESTRATIGRAFÍA Y PLAYS

La columna estratigráfica en la cuenca del Colorado se inicia con un basamento Paleozoico (Carbonífero/Pérmico) y depósitos fluvio-lacustres de *rift* en la parte basal. Por encima, en fase de *sag*, se produce una importante inundación marina Barremiana-Aptiana con depósitos marinos someros a fluvio/deltaicos de la Formación Colorado. Luego, se inicia y consolida la inundación Maastrichtiana correspondiente a la Formación Pedro Luro, y por último los depósitos de margen pasivo del Cenozoico (Fig. 5, Gerster *et al.* 2011). La extensión asociada al *rifting* que da origen a la cuenca es de edad Jurásica y podría contener una roca madre lacustre. Al abrirse el Atlántico sur en el Cretácico temprano, se produce la primera ingresión marina en el Barremiano/Aptiano con potencial de roca generadora y, en el Cretácico tardío, los depósitos de margen pasivo alojan interesantes reservorios y sellos.

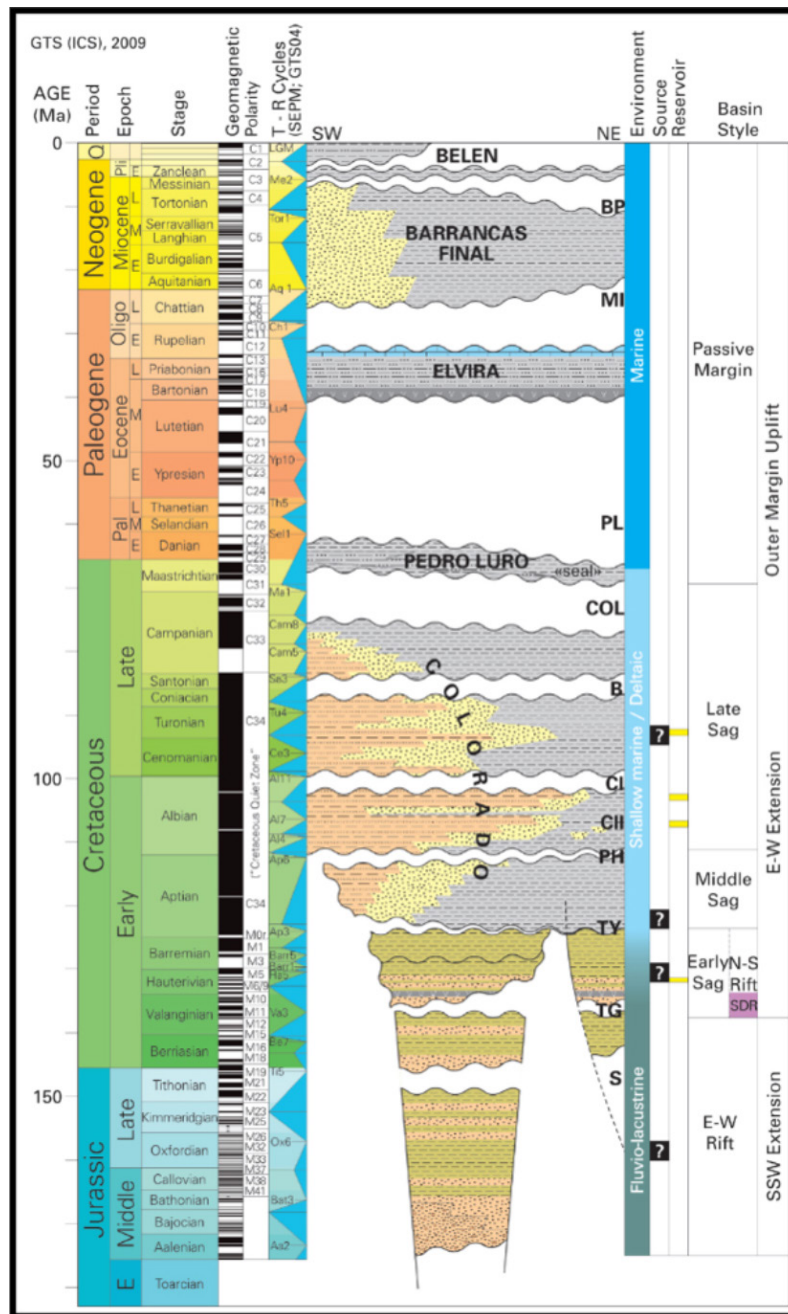


Figura 5. Estratigrafía de la cuenca del Colorado.

Los principales *plays* de la cuenca son: 1) abanicos aluviales y fan deltas en el synrift y *sag* inicial; 2) carbonatos y areniscas costeras asociadas a la transgresión Aptiana; 3) reservorios continentales a marino someros del Cretácico tardío; y 4) turbiditas de aguas profundas en el talud y cuenca del Cretácico tardío (Arismendi *et al.* 2021).

ALTO EXTERNO DEL COLORADO

El alto externo del Colorado es un enorme anticlinal, un elemento único en la región costa afuera norte de Argentina. Se ubica entre el depocentro de Colorado oriental y la cuenca Argentina en el talud, y entre el alto de Tandilia al norte y el alto de Rawson al sur. Su cierre estructural en tres dimensiones es mayor a los 5.000 km². Presenta fallamiento normal, asociado a la reactivación de las fallas que formaron los depocentros del Cretácico temprano. En su formación también pudo haber contribuido la compactación diferencial sobre el alto de basamento (Fig. 6, 7 y 8).

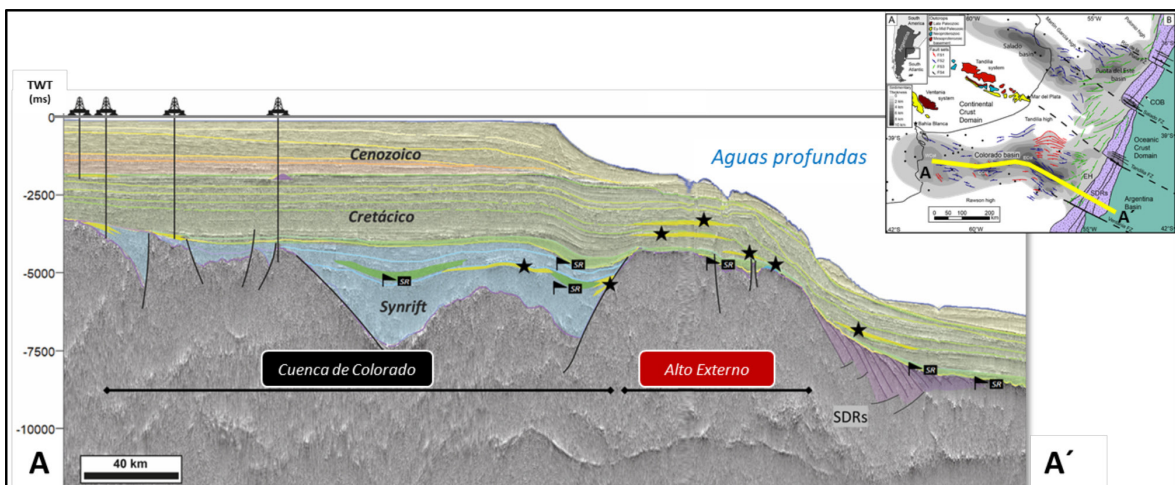


Figura 6. Sección sísmica 2D legacy con la interpretación, pasando por el alto externo del Colorado y hacia la cuenca argentina norte. Los principales plays están indicados con estrellas de color negro.

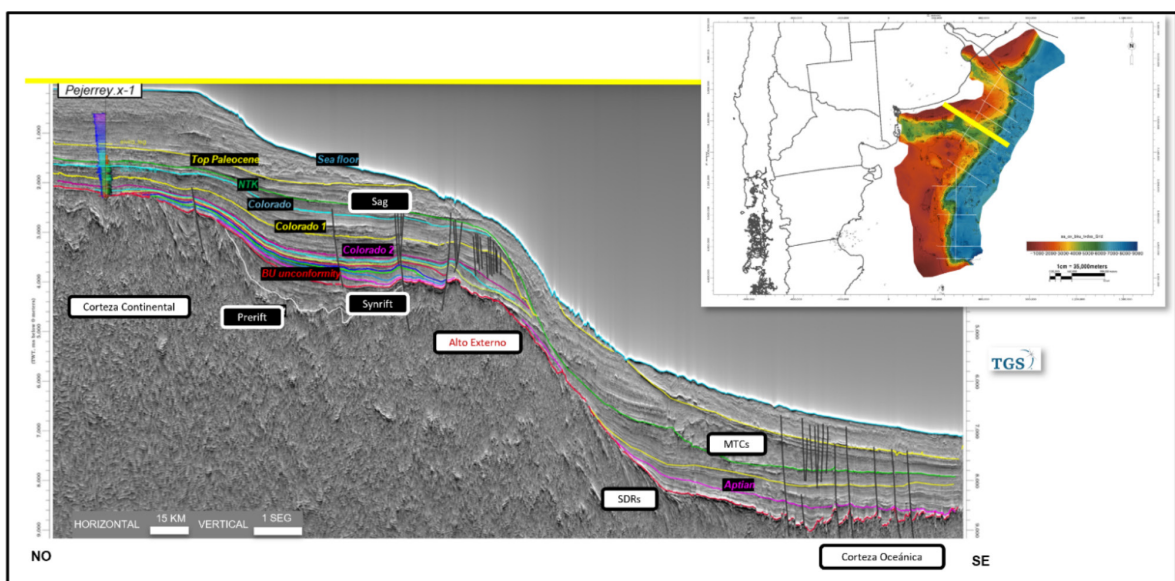


Figura 7. Sección sísmica 2D moderna con la interpretación de la cuenca del Colorado, pasando por el alto externo del Colorado y hacia la cuenca Argentina norte.

Su posición única y gran área de captación lo convierte en un centro focal de la migración de los hidrocarburos procedentes de las eventuales rocas madres de la cuenca, en especial de edad Barremiana-Aptiana (Arismendi *et al.* 2021).

En el año 2006 se registró sísmica 3D en el alto externo de la cuenca del Colorado, otorgando considerable cobertura 3D de buena calidad, que permitió calibrar el trabajo regional efectuado con sísmica 2D adquirida en diferentes etapas durante las últimas décadas (Fig. 7 y 8) con el presente estudio.

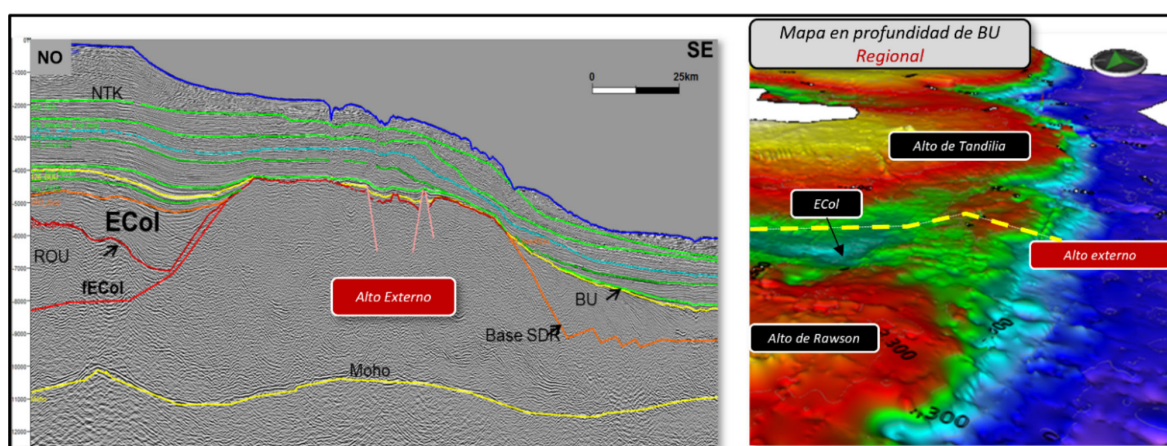


Figura 8. Sección sísmica 2D (TecVA, atributo de pseudo-relieve que facilita la interpretación estructural mediante acondicionamiento) con un detalle del alto externo del Colorado.

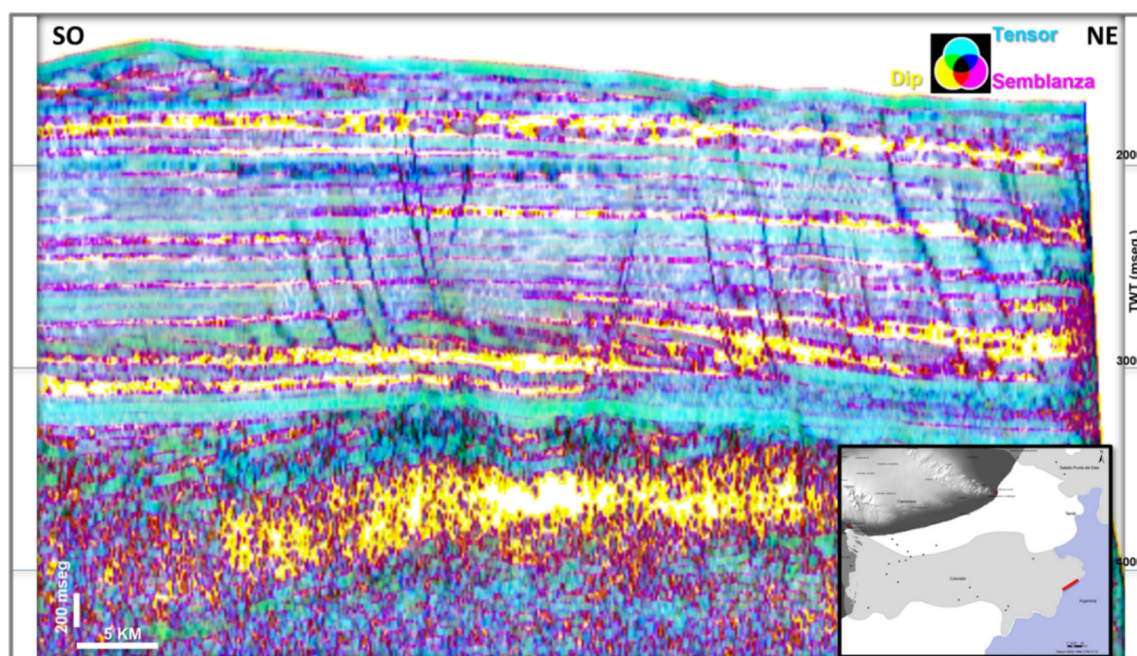


Figura 9. Mezcla sustrativa CMY utilizando los atributos estructurales tensor, semblanza y *dip* (línea roja en el mapa)

ANÁLISIS DE ATRIBUTOS Y MEZCLAS

Para iniciar la interpretación y el análisis de la zona de estudio, se calcularon una serie de atributos, estructurales y estratigráficos, junto con su combinación utilizando las mezclas descriptas anteriormente.

En la mezcla sustractiva CMY estructural de tensor, semblanza y *dip* (Fig. 9), se resaltan las discontinuidades en tonos oscuros, lo cual brinda una mayor confianza en la ubicación y extensión de las discontinuidades facilitando su interpretación volumétrica. El atributo *dip* diferencia claramente las clinoformas, mientras que el tensor identifica principalmente zonas con estratos no caóticos y potenciales cambios de fase. Esta mezcla facilita, por un lado, la interpretación volumétrica automática de fallas, y por el otro, la extracción volumétrica de geoformas en la zona de clinoformas.

La mezcla RGB de atributos frecuencia instantánea, *envelope* y *dip* resalta características estructurales y estratigráficas de manera combinada, facilitando la rápida identificación de anomalías de amplitud (Fig. 10).

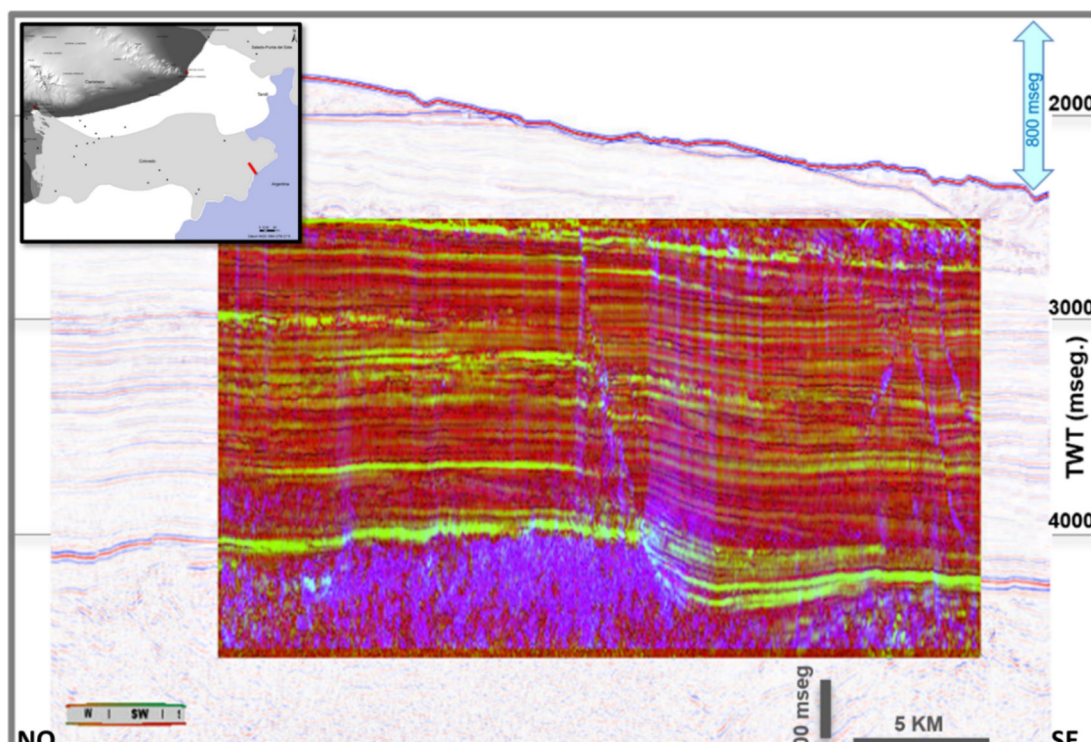


Figura 10. Mezcla RGB de atributos frecuencia instantánea, *envelope*, *dip* (línea roja en el mapa).

La frecuencia instantánea indica cambios estructurales y/o estratigráficos. El *envelope*, también llamado reflector *strength*, revela cambios en la litología y/o fluidos de los poros. En general, no posee una gran resolución vertical sino lateral, mostrando la variación de amplitud

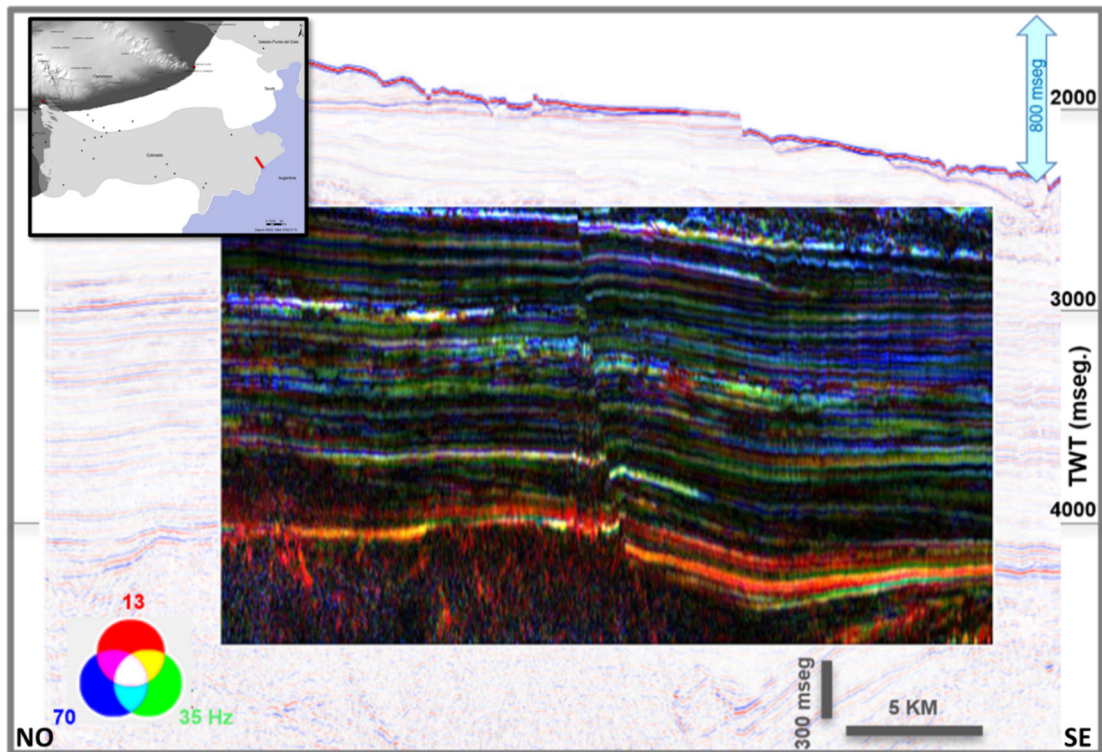


Figura 11. Mezcla RGB de descomposición espectral de alta definición (13, 35 y 70 Hz)

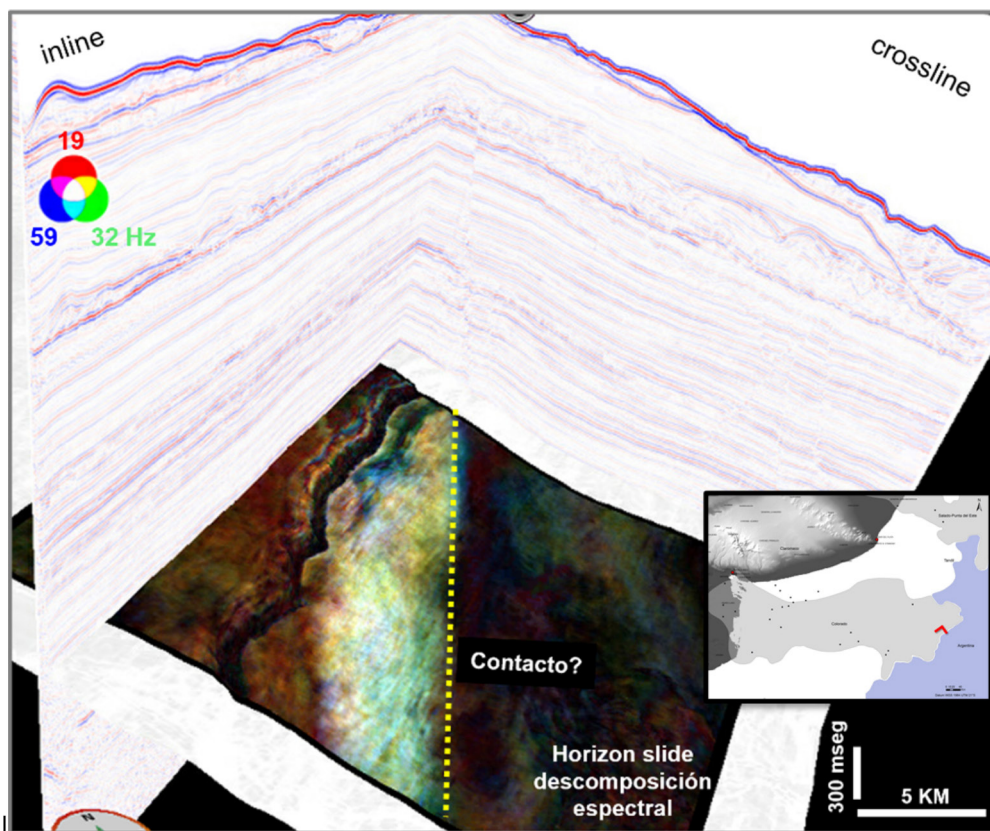


Figura 12. Identificación de posibles contactos mediante descomposición espectral (19, 32, 59 Hz). Líneas rojas en el mapa.

una vez eliminada la fase. Y el atributo *dip* detecta discordancias, identifica bloques de fallas con diferentes inclinaciones, capas delgadas y potenciales cambios litológicos. La combinación de los atributos frecuencia instantánea y *dip*, resaltan claramente las discontinuidades representadas en tonos rosados, mientras que el atributo envelope destaca las anomalías de amplitud propiamente dichas, en color verde. Por lo cual, se propone utilizar este volumen combinado para la detección y extracción volumétrica de geocuerpos.

La descomposición de frecuencia de alta definición resulta óptima para mejorar la resolución del dato sísmico en el dominio del tiempo, y de esta manera identificar posibles variaciones deposicionales en el análisis de reservorio, permitiendo disminuir las incertidumbres del modelo geológico propuesto, y detectar potenciales contactos de fluidos (Fig. 11 y 12).

CONCLUSIONES

Los atributos sísmicos y el uso de mezclas de atributos son esencialmente útiles cuando se correlacionan con propiedades físicas de los reservorios. Combinar atributos sísmicos claves permite lograr un alto impacto durante la interpretación sísmica, en términos de agilizar tiempos, optimizar la detección y extracción automática de geocuerpos y priorizar zonas de mayor interés.

El uso de mezclas aditivas en la descomposición espectral de alta definición permite identificar rasgos estratigráficos que no se observan en los volúmenes individuales, mientras que las mezclas sustractivas facilitan la identificación de rasgos estructurales aumentando su confianza al efectuar la interpretación estructural volumétrica automática de discontinuidades. Las mezclas aditivas y sustractivas cumplen un rol fundamental en el análisis de la información sísmica que de otra manera resulta imperceptible o difícil de reconocer.

Las combinaciones de atributos basados en características independientes como la amplitud, frecuencia y fase del dato sísmico constituyen un soporte crítico a la interpretación sísmica tradicional. La mezcla CMY de los atributos tensor, semblanza y *dip* resalta las discontinuidades, otorgando mayor certeza en la ubicación y extensión de estas para su interpretación volumétrica, mientras que la mezcla RGB de atributos frecuencia instantánea, *envelope* y *dip* resalta características estructurales y estratigráficas de manera combinada, facilitando la rápida identificación de anomalías de amplitud y fallamientos simultáneamente.

La interpretación de multi volúmenes (Fig. 13) es sustancialmente beneficiosa durante la delineación y análisis de prospectos optimizando la definición del modelo deposicional y geológico más probable junto a sus incertidumbres.

El alto externo de la cuenca del Colorado constituye un gran anticlinal con considerable cobertura de sísmica 3D, único en la región norte costa afuera de Argentina, con perspectivas exploratorias alentadoras debido a sus antecedentes y a los recientes descubrimientos de petróleo en la cuenca de Orange de África del Sur, margen conjugado al argentino. El análisis combinado de los

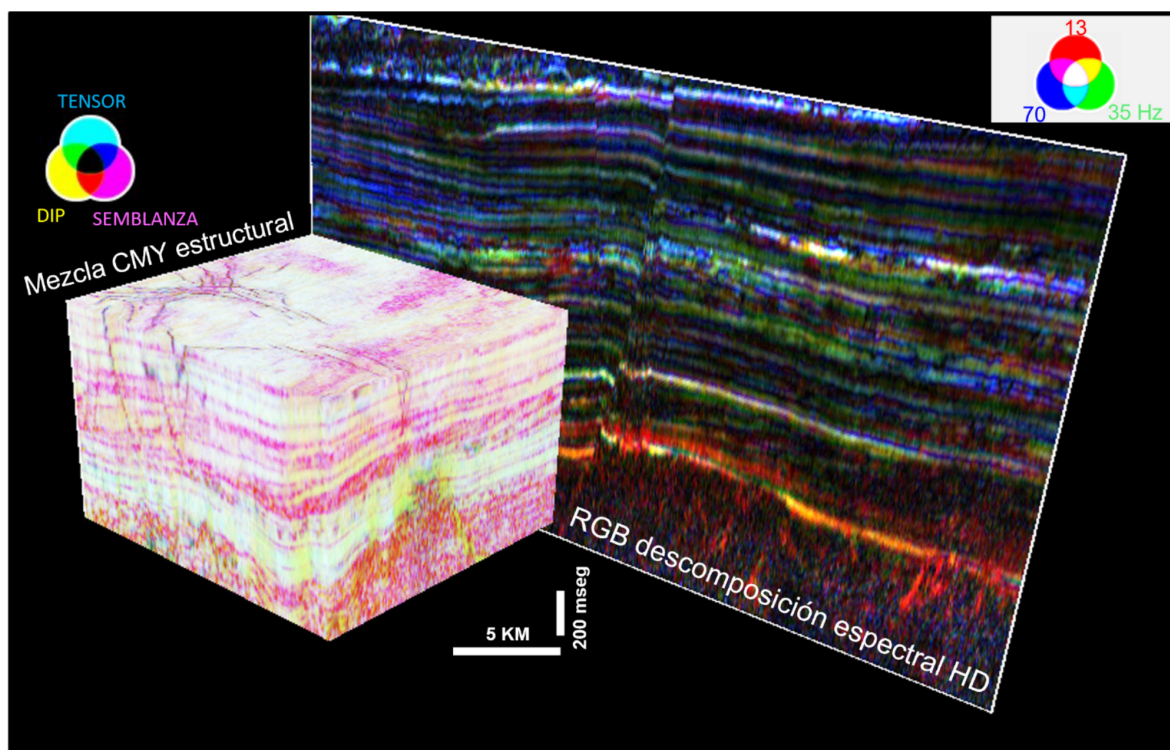


Figura 13. Importancia del uso de multi volúmenes con mezcla de atributos aditivas (descomposición espectral de alta definición) y sustractivas (mezcla estructural tensor/semblanza/dip).

atributos y mezclas permitió agilizar la identificación y priorización de zonas de interés exploratorio para realizar estudios avanzados de AVO y caracterización sísmica de reservorios, entre otros, con el objetivo de disminuir los riesgos de los prospectos planteados en la zona de estudio.

El presente trabajo demuestra el valor agregado de la metodología propuesta para potenciar la identificación de anomalías y rasgos estructurales, especialmente en regiones de frontera con escasa o sin calibración de pozos. El uso de mezclas de atributos permite agilizar, identificar y reducir los riesgos e incertidumbres complementando la interpretación sísmica tradicional mediante la identificación temprana de zonas con alto potencial, posibles contactos y estructuras complejas para delinear el modelo geológico más probable.

REFERENCIAS CITADAS

- Anka Z., Loegering M.J., di Primio R., Marchal D., Rodríguez J.F. y Vallejo E., 2014. Distribution and origin of natural gas leakage in the Colorado Basin, offshore Argentina Margin, South America: seismic interpretation and 3D basin modelling. *Geológica Acta*. Vol.12, No 4, ALA-GO Special Publication. DOI:10.1344/GeologicaActa2014.12.4.1.
- Arismendi S., Lovecchio J. P., Silio O., Pagán F. y Bollatti N., 2021. Regional geology and hydrocarbon potential of the Salado and Colorado basins, north Argentina Offshore. Instituto Argen-

- tino del Petróleo y el Gas, Ciclo de Conferencias virtuales E&D 2021, Exploración Offshore en el Atlántico Sur.
- Chopra, S. y Marfurt, K., 2007. Seismic Attributes for Prospect Identification and Reservoir Characterization. SEG Geophysical Developments Series N°11. Society of Exploration Geophysicists. 464pp.
- Gerster R., Welsink H., Ansa A. y Raggio F., 2011. Cuenca de Colorado. VII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Simposio Cuencas Argentinas: visión actual, IAPG, Actas, p.65-80, Mar del Plata, Argentina.
- Lovecchio, J.P., Rohais, S., Joseph, P., Bolatti, N.D., Kress, P.R., Gerster, R. y Ramos, V.A., 2018: Multistage *rifting* evolution of the Colorado basin (offshore Argentina): Evidence for extensional settings prior to the South Atlantic opening. Terra Nova. 30(5): 359-368. ISSN: 0954-4879.
- Purves, S. y Basford, H., 2011. Visualizing Geological Structure with Subtractive Color Blending. GCS SEPM Gulf Coast Section SEPM: pp. 85-93, United States.
- Santana, T. y Eckerman, L., 2022. Visualización e interpretación volumétrica mediante mezcla subtractiva de atributos. Anticlinal Perales, Cuenca del Golfo San Jorge Argentina. XXI Congreso Geológico Argentino. Puerto Madryn, Argentina.