

EVOLUCIÓN ESTRUCTURAL MEDIANTE RESTAURACIÓN GEOMECÁNICA APLICADA A RESERVORIOS NO CONVENCIONALES

Karina Anis¹, Ramiro López², René Manceda³

1: YPF S.A. karina.anis@ypf.com

2: YPF S.A. ramiro.lopez@ypf.com

3: Consultor independiente. renriman@gmail.com

Palabras clave: Restauración Estructural, No Convencional, Evolución Tectónica

ABSTRACT

We analyze the genesis and tectonic evolution of a structural feature that crosses the Loma Campana block (Southern Flank of Cuenca Neuquina) with a N-S direction. The position of this feature, classified in this paper as a lineament, coincides with the Auquilco Formation pinch-out at depth, as well as with a zone of structural style change in the block, being normal to the east while reverse westward. For this purpose, the structural restoration of five seismic sections, perpendicular to the lineament, was carried out, with a software that allows us to analyze the evolution of the structures in a sequential way. The model considers geomechanical parameters and decompaction. Deep well data were also used to confirm the areal distribution of the interpreted formations in the seismic sections. It is interpreted that this lineament corresponds to the deformation front of the Vaca Muerta Formation lower section, in response to NW-SE oriented compression that affected the entire area since the middle-upper Jurassic, producing detachments within the Auquilco, La Manga and Tordillo Formations, generating an incipient wedge structure with the presence of thrusts and backthrusts in its blind spots. In this contractional framework, the lineament was controlled by the high mechanical contrast in the pinch-out of the evaporitic facies of the Auquilco Formation.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años el *play* de la Formación Vaca Muerta en Cuenca Neuquina ha sido foco de numerosas investigaciones dado su alto potencial productivo, siendo el yacimiento no convencional más importante de Argentina, y posicionado en cuarto lugar en el ranking mundial en relación con sus reservas de *oil* y en segundo lugar en reservas de gas. Es por ello, que resulta de vital importancia entender la evolución tectónica en los distintos ámbitos estructurales de la cuenca y como afecta la misma tanto a la estrategia de desarrollo de los bloques como a la productividad de los distintos niveles reservorios que están siendo explotados.

La estructura actual de la Cuenca Neuquina es resultado de una deformación poli-episódica de la columna sedimentaria (Figura 1), la cual comenzó en el Jurásico Inferior con una etapa dominada por extensión generando grábenes y hemi-grábenes, y posteriormente siguieron distintas etapas de contracción en el Cretácico y Cenozoico, con diferentes direcciones de vectores, reactivando e invirtiendo las estructuras extensionales previas y generando nuevas (Marchal *et al.*, 2020).

El bloque Loma Campana es uno de los principales yacimientos no convencionales de Argentina, cuya sección productiva incluye a las Formaciones Vaca Muerta y Quintuco del Grupo Mendoza. Se ubica en el centro este de la Cuenca Neuquina, en el paleodominio morfoestructural del Flanco Sur de la misma (Figura 2) (Domínguez *et al.*, 2020). Está delimitado al NNE por el paleo-eje de Añelo, al O por el ámbito de centro de cuenca, y al S por el Alto de Sauzal Bonito (paleo-alto Loma La Lata).

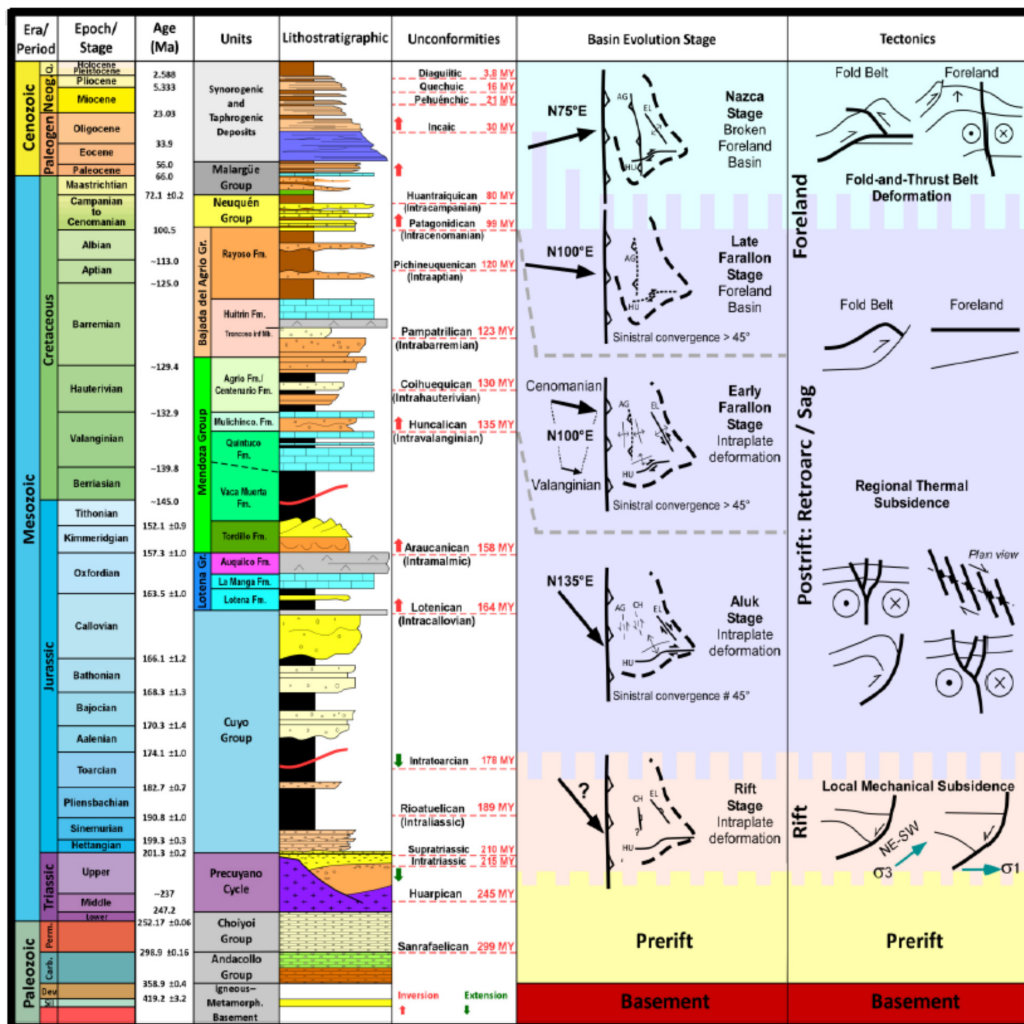


Figura 1. Columna estratigráfica generalizada de Cuenca Neuquina con las disconformidades asociadas con las diferentes etapas de evolución de la cuenca y tectonismo relacionado y estructuras asociadas (tomado de Marchal *et al.*, 2020).

Las estructuras principales de este sector de la cuenca fueron descritas anteriormente por numerosos autores como Vergani *et al.* (1995), Mosquera y Ramos (2006), Pángaro *et al.* (2011), Cristallini y Buhler (2007), Cristallini *et al.* (2005) y Gangui y Grausem (2014). En los trabajos mencionados se describen las estructuras principales más antiguas, relacionadas a los depocentros formados por los grábenes y hemi-grábenes, a la evolución de estos durante las etapas de contracción y a la relación con las estructuras extensionales que afectan al *play* Vaca Muerta.

En esta contribución, se hace foco principalmente en un rasgo lineal N-S, aquí clasificado como lineamiento, que se visualiza en planta en la base de la Formación Vaca Muerta (Figura 3) y su relación con la estructura, estratigrafía y el alto contraste mecánico en el *pinch-out* de las facies evaporíticas de la Formación Auquilco. La posición y extensión lateral del lineamiento está condicionada por la posición en la que se encuentra el bloque de Loma Campana en relación con los dominios estructurales, los cuales determinan la convivencia de cambios faciales litológicos con elementos estructurales formados a partir de una historia tectónica poli-episódica en la evolución de la Cuenca Neuquina (Figura 1).

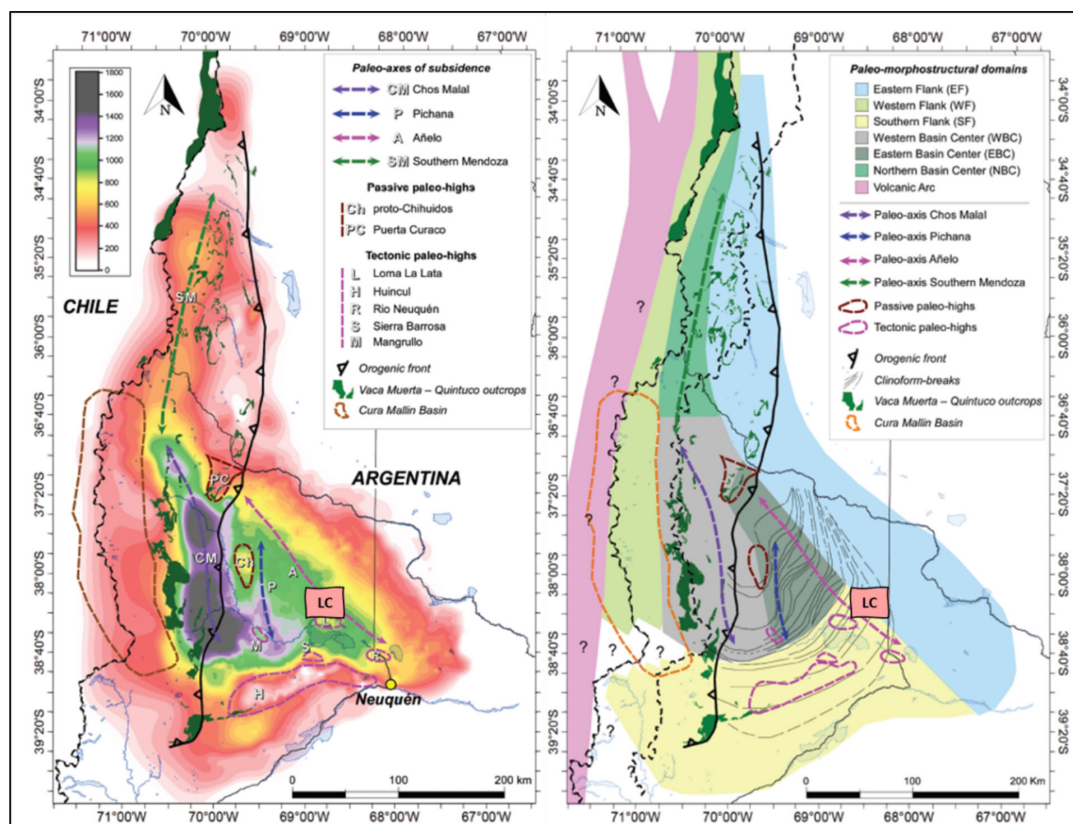


Figura 2. Sistema Vaca Muerta-Quintuco con los principales elementos paleo-estructurales. Izquierda: mapa de espesor (en metros). Derecha: dominios paleo-estructurales. LC: ubicación del bloque Loma Campana (tomado y modificado de Marchal *et al.* 2020 y Domínguez *et al.*, 2020).

El cambio repentino tanto en los estados de los esfuerzos, como en el tipo de estructuras, de las propiedades petrofísicas, de los fluidos asociados a los reservorios de Formaciones Vaca Muerta y Quintuco, y por ende en la productividad de los pozos, hacia el oeste y el este de este lineamiento, es lo que motivó este trabajo.

METODOLOGÍA

El lineamiento en análisis cambia de expresión a lo largo de su rumbo, por lo que fue necesario seleccionar, en el *software* de interpretación utilizado (Petrel®), cinco secciones sísmicas perpendiculares al mismo (Figura 3). De cada una de estas secciones se exportaron las imágenes en amplitud y con atributos sísmicos como RMS (atributo de volumen que resulta del cálculo de la raíz media cuadrática de la amplitud en una traza de una ventana específica) y TecVa (es una combinación de atributos sísmicos que se utiliza para resaltar estructuras, al volumen de RMS se le realiza un cambio de fase de la ondícula).

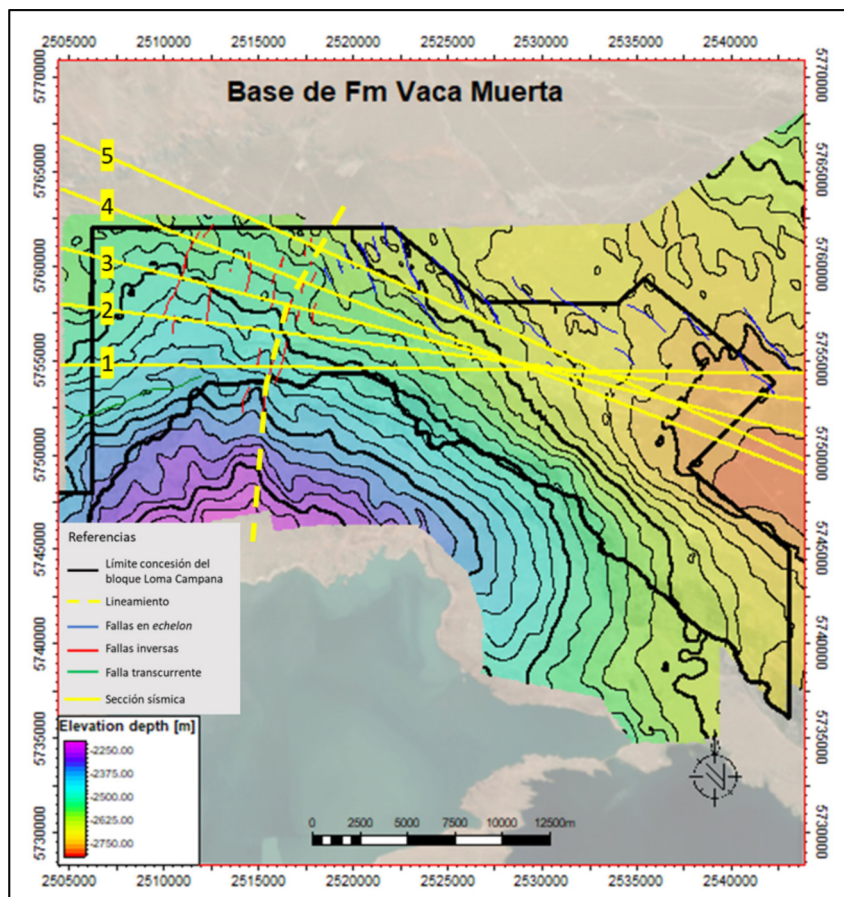


Figura 3. Mapa estructural de la base de la Formación Vaca Muerta en el bloque de Loma Campana, mostrando las estructuras principales y la posición del lineamiento en análisis en este aporte. Se muestra la ubicación de las cinco secciones sísmicas utilizadas en este trabajo. A los fines prácticos, en la sección de resultados, sólo se mostrará la sección para describir las interpretaciones por intervalo.

En el *software* de interpretación se utilizó el cubo sísmico 3D que cubre todo el bloque, para interpretar las estructuras y los topes de las principales unidades formacionales presentes en el área. Las unidades interpretadas son las siguientes: Basamento (indiferenciado), Ciclo Precuyano, Grupo Cuyo (Inferior y Superior, definidos informalmente), Grupo Lotena (Formaciones Auquilco y La Manga), Grupo Mendoza (Formaciones Tordillo, Vaca Muerta, Quintuco, Mulichinco y Centenario) y Grupo Bajada del Agrio (Formación Rayoso) (Figura 4).

Tal como se puede ver en la Figura 5, se interpretaron en detalle las relaciones geométricas entre los reflectores, tanto lateral como verticalmente, y las terminaciones de estos, para poder determinar el origen de las geometrías observadas y distinguir entre las generadas por rasgos estratigráficos de las estructurales.

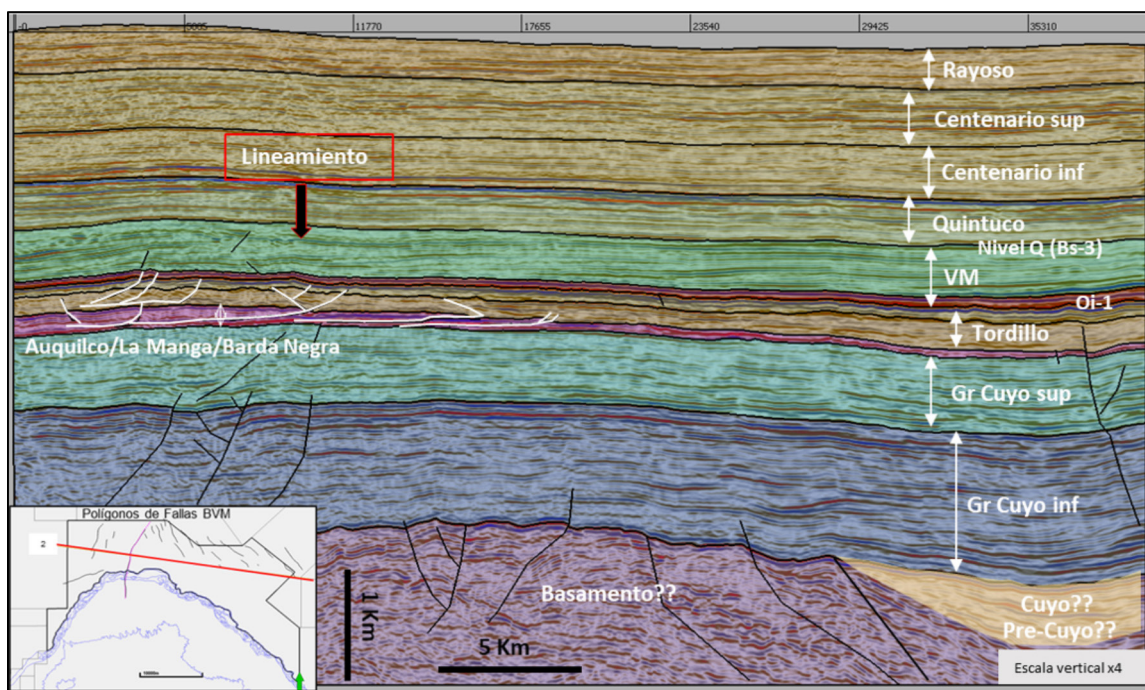


Figura 4. Modelo geológico de la sección sísmica 2 mostrando las unidades y estructuras interpretadas, la posición del lineamiento en análisis y las dos zonas mencionadas previamente en las que se observan distintas características estructurales.

Paralelamente, con el fin de corroborar los pases formacionales que se interpretaron en las secciones sísmicas y confirmar las litologías (por ende, sus propiedades geomecánicas), se revisaron los registros de pozos profundos que atraviesan la sección del Grupo Lotena (Formaciones Auquilco, La Manga, Lotena) y la base del Grupo Mendoza (Formación Tordillo). Este control es necesario considerando que las estructuras más complejas analizadas en este trabajo están relacionadas a los contrastes litológicos que se dan intra-Grupo Lotena, a partir del *pinch-out* de las evaporitas de la Formación Auquilco con las calizas de la Formación La Manga (Figura 6).

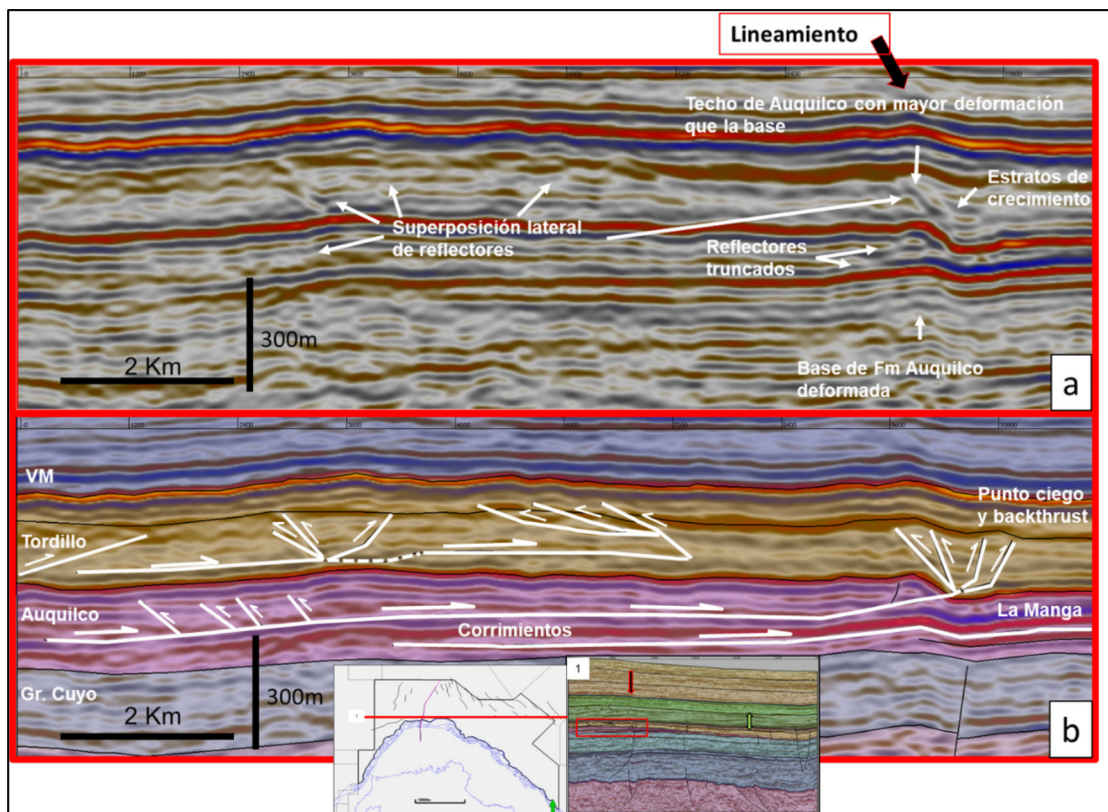


Figura 5. Ampliación de la zona de interés en la sección sísmica 1. a) sección sísmica en amplitud indicando los elementos y/o relaciones geométricas entre los reflectores y b) sección sísmica interpretada.

También se generó el modelo estructural del área de toda la columna litológica, con el fin de obtener mapas de fallas para cada nivel interpretado (Figura 7), para entender las relaciones entre las estructuras generadas en los diferentes tiempos.

A su vez, se construyeron mapas de espesor de las distintas secuencias interpretadas, para entender cuáles macroestructuras tuvieron influencia o condicionaron de alguna manera los distintos estilos estructurales que se observan en el área (Figura 8).

Luego se utilizó otro *software* (Dynel 2D[®]) para realizar la restauración estructural de las cinco secciones sísmicas mencionadas previamente, y simular la evolución tectónica en el área del bloque. Esta plataforma permite efectuar restauraciones estructurales de forma secuencial, teniendo en cuenta a través de los parámetros geomecánicos de las unidades, la componente de decompactación relativa a cada una de ellas.

La técnica desarrollada por Maerten y Maerten (2006) se basa en el método de elementos finitos (FEM), simula el comportamiento físico de la masa de roca y considera propiedades heterogéneas de los materiales y la interacción mecánica de las fallas. Honra las leyes físicas que gobiernan la deformación geológica, incluyendo la conservación del momento, masa y energía. Por lo tanto, es muy útil para modelar el comportamiento de estructuras complejas tales como plegamientos, fracturas y fallas.

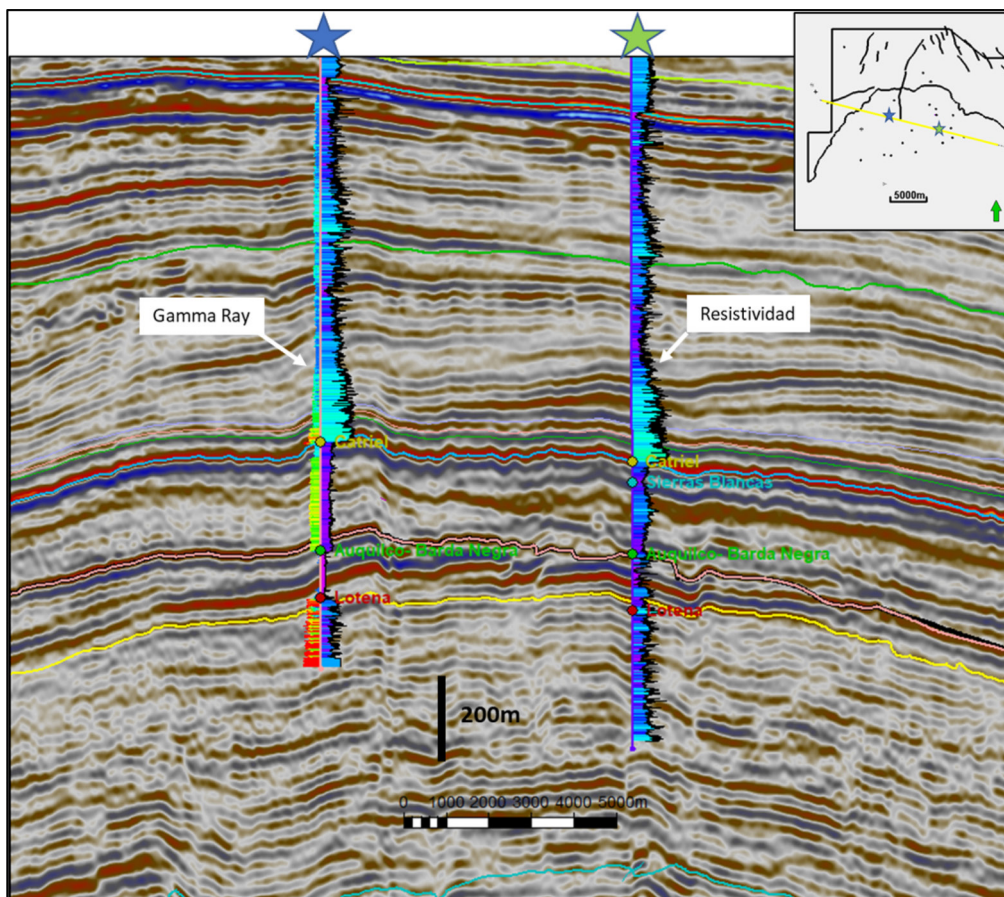


Figura 6. Sección sísmica mostrando como ejemplo 2 pozos profundos que se utilizaron para calibrar las interpretaciones de los pases formacionales. Las curvas de los registros corresponden a Gamma Ray a la izquierda y Resistividad a la derecha.

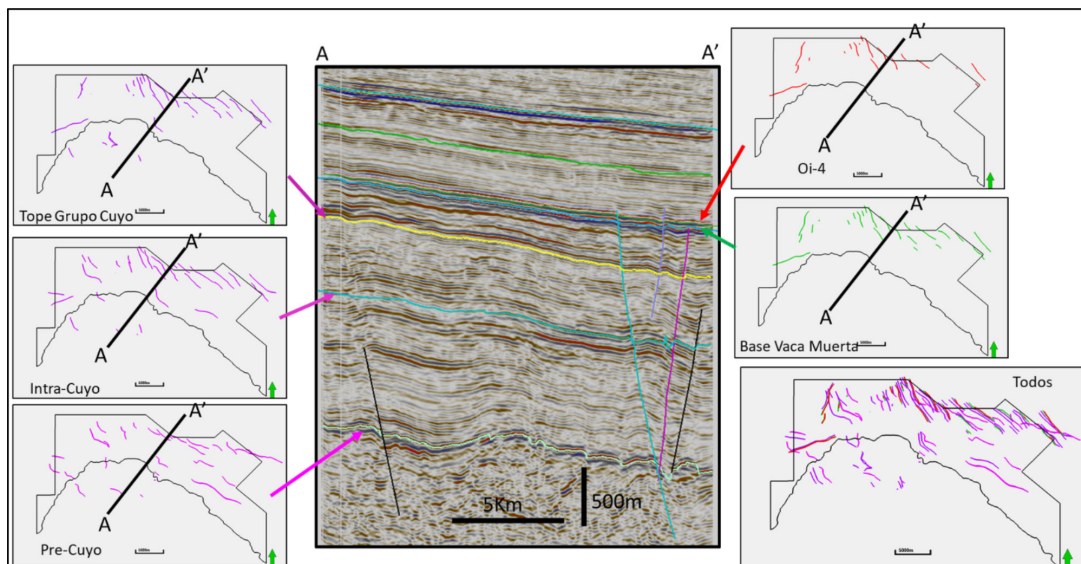


Figura 7. En los bordes de la Figura se muestran los mapas de polígonos de fallas para cada nivel interpretado, extraídos del modelo estructural del bloque. En el centro de la figura, una sección sísmica mostrando la posición de cada nivel que muestran los mapas.

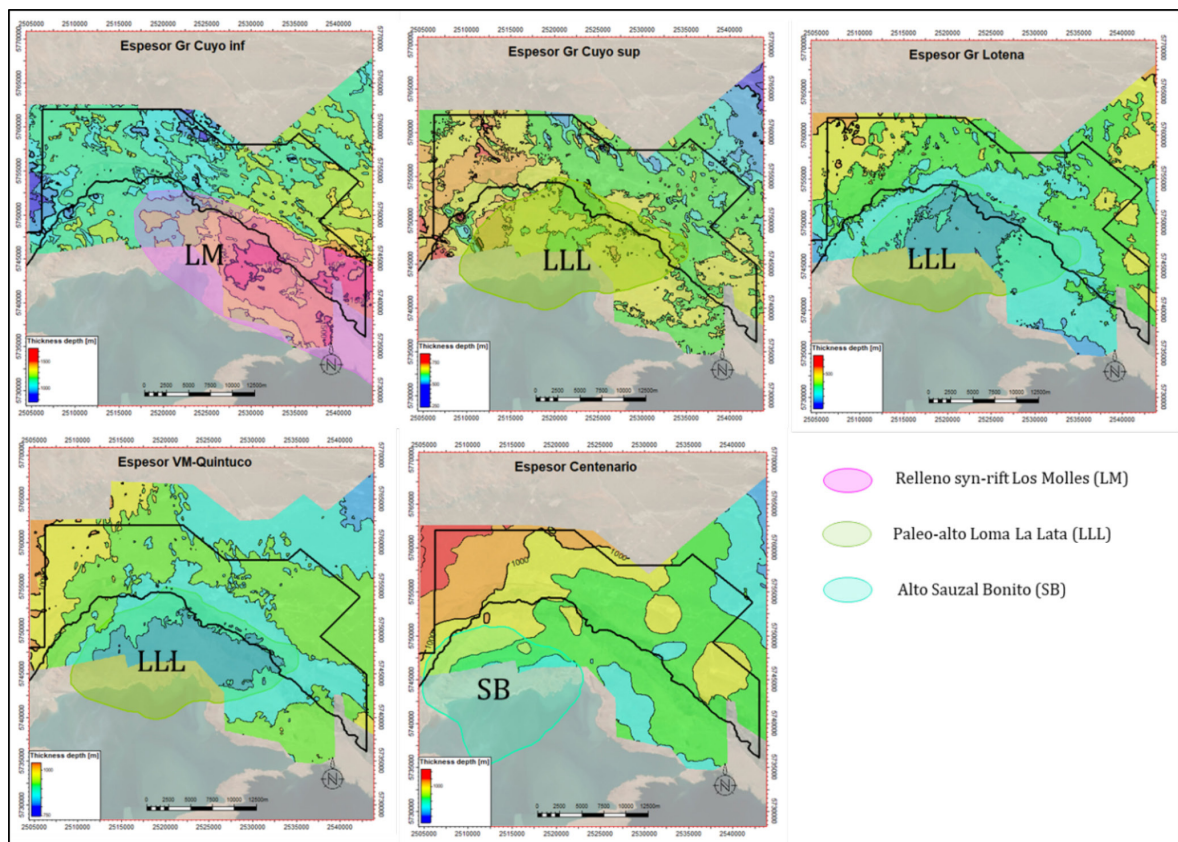


Figura 8. Mapas de espesor de las secuencias interpretadas y posición de las macroestructuras que se identifican en el área para cada intervalo.

El algoritmo de compactación/decompactación usado en este programa computa los desplazamientos, la deformación y el campo elástico de esfuerzos sobre la estructura para evitar los errores comúnmente observados con los algoritmos basados en cizalla vertical, por ejemplo (Figura 9, A).

El programa es un código basado en elementos finitos. La sección estructural es discretizada en elementos triangulares cuyas dimensiones es ajustada por el usuario. A cada elemento se le asignan las propiedades elásticas de cada unidad de la sección, que son datos de entrada en el programa y en el caso de no tener datos específicos de estas propiedades (Modulo de Young, Coeficiente

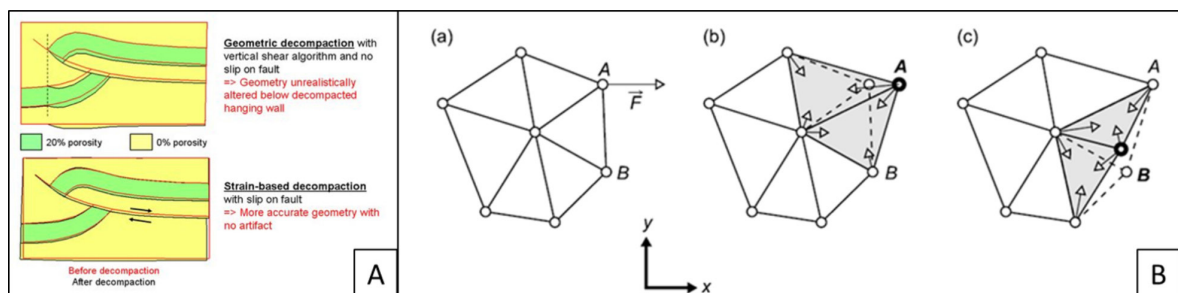


Figura 9. A) comparación entre algoritmo de decompactación geométrica y decompactación basada en la deformación (Schlumberger, 2010). B) esquema de funcionamiento del solucionador sobre un elemento lineal triangular que conforma la malla (Maerten y Maerten, 2006).

de Poisson, etc.) se pueden caracterizar mediante las litologías presentes con propiedades elásticas promedio. Cada elemento puede diferir en las propiedades elásticas asignadas en respuesta a los controles del modelo tal como las fuerzas internas, desplazamientos o reacción ante un contacto de una interfaz formacional. De manera que las fuerzas son transmitidas de nodo a nodo a través del sistema total hasta que se alcance un equilibrio usando en una solución iterativa basada en el método Gauss-Seidel (Maerten & Maerten, 2006) (Figura 9, B).

Las propiedades elásticas asignadas a las unidades interpretadas en este trabajo se obtuvieron a partir del modelo geomecánico del área y de bloques vecinos con pozos más profundos que tuvieran datos de las unidades más antiguas.

Para cada sección se siguió el flujo mostrado en la Figura 10, el cual comienza con la reinterpretación de las fallas y horizontes principales (interpretadas previamente en 3D), luego se generan el modelo estructural y el geológico. El siguiente paso es configurar para cada una de las unidades consideradas los parámetros que se utilizaran en la simulación y por último correr la simulación.

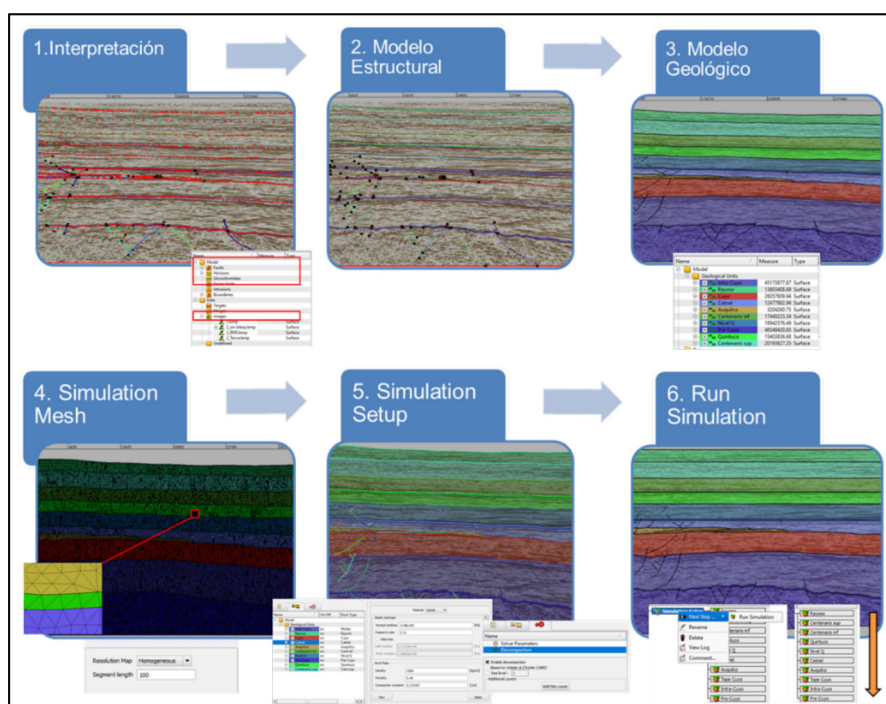


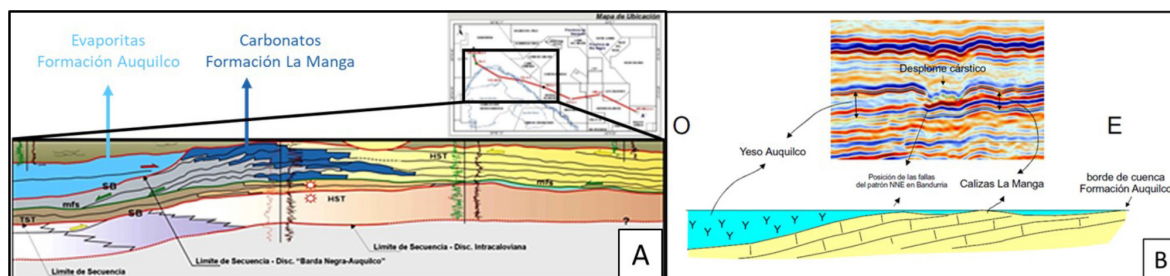
Figura 10. Flujo de trabajo seguido en la plataforma en la que se realizó la restauración estructural.

CONSIDERACIONES GENERALES

Es necesario tener en cuenta algunas consideraciones con respecto a la secuencia del Grupo Lotena, específicamente en la zona de *pinch-out* de las evaporitas de la Formación Auquílco, ya que coincide en posición con el lineamiento que es objeto de este análisis.

Fernández *et al.* (2002), realizaron un análisis sismoestratigráfico del Grupo Lotena, definiendo relaciones estratigráficas y arquitectura deposicional, a partir del cual plantean un arreglo de clinoformas en la transición entre las evaporitas de la Formación Auquilco y las calizas de la Formación La Manga (Figura 11, A).

Por otra parte, Cristallini *et al.* (2005) realizaron un análisis estructural en el bloque que se encuentra al norte de Loma Campana, en el que mencionan un efecto de desplome cárstico en relación con el rasgo sísmico que se observa en el tope de la Formación Auquilco en la zona del lineamiento que es objeto de este análisis (Figura 11, B).



RESULTADOS

Para el presente trabajo se interpretaron los topes de las formaciones Auquilco y La Manga y del Grupo Cuyo, en base a sísmica y a datos de pozos, con el fin de obtener los mapas estructurales de las unidades y el isopáquico de la primera. Se observó que el lineamiento coincide espacialmente con el *pinch-out* de la Formación Auquilco, razón por la cual se considera que el mismo determinaría el límite mecánico para el desarrollo de las estructuras que se detallarán a continuación.

Se considera que los elementos de origen estratigráfico y sedimentológico descriptos previamente por otros autores complementan y refuerzan la presencia de la estructuración que da lugar a la deformación que se observa actualmente en la base de la Formación Vaca Muerta en esta posición de la cuenca.

El desarrollo del lineamiento N-S en estudio se analizó en intervalos de tiempos discretos y en consecuencia se tuvieron en cuenta las orientaciones de los esfuerzos regionales (remotos) para cada uno de ellos de acuerdo con los definidos en Marchal *et al.* (2020). El esfuerzo principal máximo horizontal remoto durante el desarrollo del lineamiento en estudio tuvo una orientación NO-SE lo que produjo una reactivación en la porción NNE del bloque y la generación de un campo local tensional y, por lo tanto, una deformación divergente oblicua representada por un sistema de fallas normales con moderados rechazos.

En el área del bloque Loma Campana se diferencian dos regiones estructuralmente distintas:

- Un sector oriental, caracterizado por un sistema menos deformado para los intervalos de las formaciones Vaca Muerta y Quintuco, representado por la reactivación de un lineamiento Precuyano generado por un movimiento lateral derecho, lo que dio lugar a un sistema de fallas normales en echelon, con rechazos moderados, a lo largo de ese lineamiento.
- Sector oeste con deformación compleja, la cual se describirá en este aporte.

Como se mencionó previamente, y como se puede ver en la Figura 12, se realizó la interpretación de detalle en las secciones sísmicas en la zona del lineamiento, teniendo en cuenta tanto la continuidad de los reflectores en lateral como de los patrones de apilamiento de estos en la vertical.

En la Figura 12 se muestra una sección sísmica sin interpretar e interpretada, a modo de ejemplo para mostrar cuáles fueron los criterios seguidos para interpretar la compleja estructura en la zona del lineamiento. Se observan:

- Superposición lateral de reflectores,
- Reflectores truncados, los cuales fueron interpretados como resultado de corrimientos con niveles de despegue intraformacionales,
- Estratos de crecimiento indicando zonas estructuralmente activas durante la depositación de las unidades,
- Diferencia entre las longitudes de onda de los pliegues en el techo y base de la Formación Auquilco, indicando que probablemente los eventos compresivos que los generaron serían distintos.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente se interpreta que, en la zona del lineamiento, los contrastes geomecánicos dentro de la Formación Auquilco y con la Formación La Manga dieron lugar al desarrollo de un sistema de retrocorrimientos que se extiende hacia arriba en la columna, dentro de la Formación Tordillo y deformando e incluso fallando la base de la Formación Vaca Muerta. Este sistema se extiende lateralmente hasta la posición del *pinch-out*, en donde se genera un punto ciego a partir del cual se generan fallas inversas, que son las que dan origen a la deformación representada en planta por el lineamiento N-S.

Lebinson *et al.* (2020), describen la cinemática de los retrocorrimientos con despegues en la base del Grupo Lotena en la Faja Plegada de Agrio (Figura 13). Si bien lo que se observa en esta sección es de menor escala que lo descrito por ellos, se puede tomar como análogos los comportamientos geomecánicos observados y la generación de un sistema de retrocorrimientos de menor escala, con niveles de despegue intraformacionales.

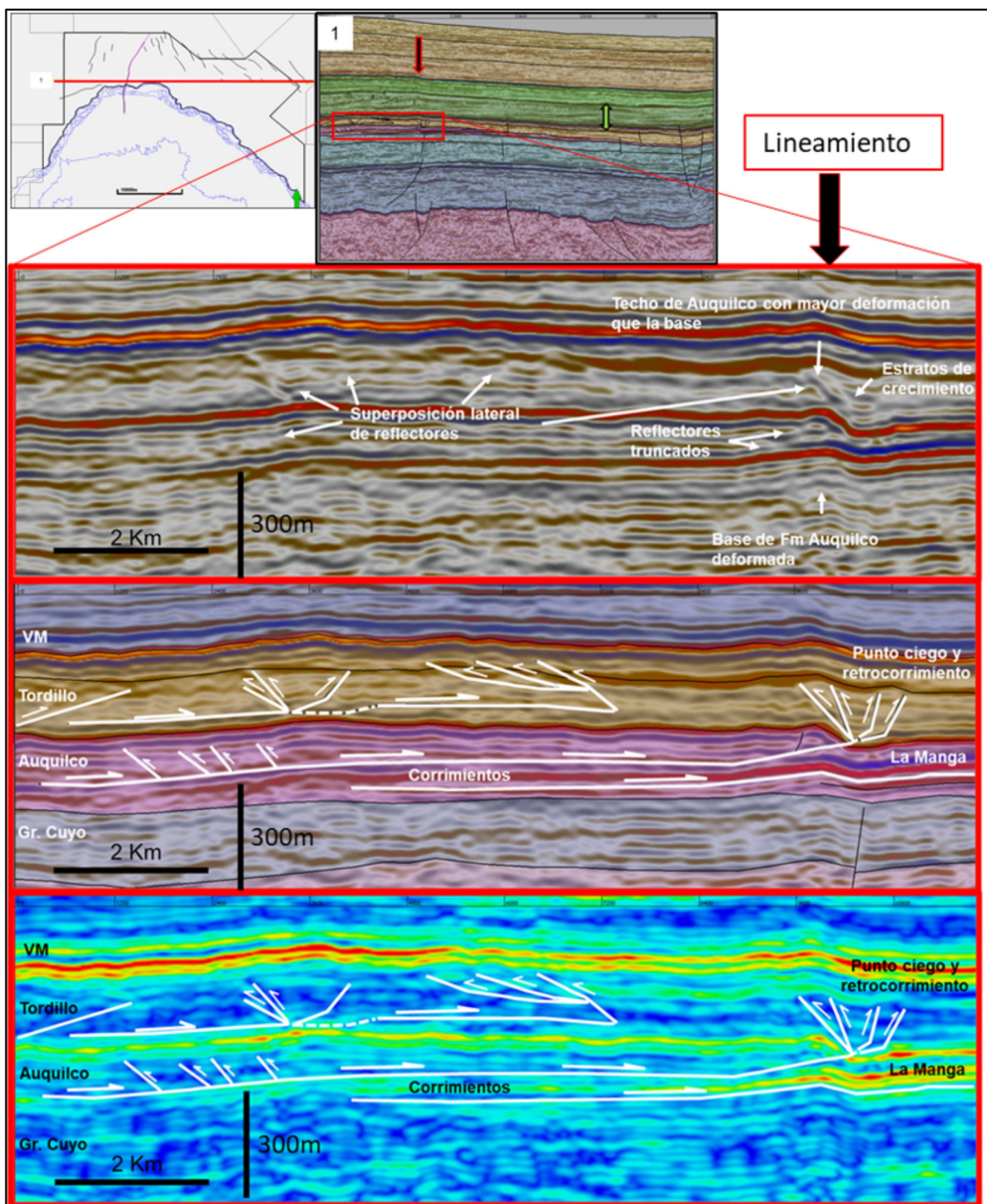


Figura 12. Ampliación de la zona de interés en la sección sísmica 1, mostrando las evidencias del modelo interpretado como sistema de retrocorrimientos. a) sección sísmica en amplitud indicando los elementos y/o relaciones geométricas entre los reflectores, b) sección sísmica interpretada y c) sección sísmica con el atributo RMS interpretada.

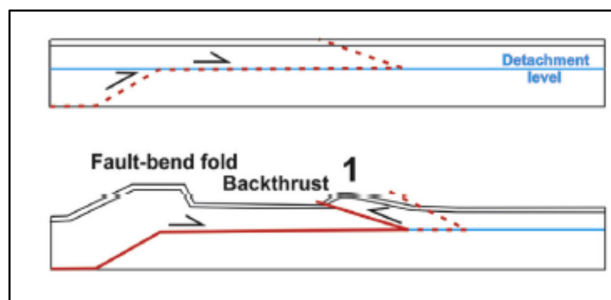


Figura 13. Esquema de generación secuencial de un sistema de retrocorrimientos (tomado de Lebinson *et al.*, 2020)

Para mostrar los resultados obtenidos a través de esta metodología se usará como ejemplo sólo una de las cinco secciones interpretadas y restauradas (denominada sección 2), y se avanzará en la descripción de los intervalos cronológicos de acuerdo con los topes formacionales interpretados.

En términos generales, en las secciones sísmicas utilizadas (Figura 14) se interpretan dos zonas separadas por el lineamiento en análisis, con rasgos estructurales distintos que afectan a la base de la Formación Vaca Muerta:

- Sector Occidental: con desarrollo de pliegues por propagación de fallas y presencia de fallas inversas. Estas fallas tienen niveles de despegue Intra- Formación Tordillo y en la interfase entre la secuencia de las Formaciones Auquillo/La Manga y Formación Tordillo. Hacia el sector oriental se observan corrimientos dentro de las facies de las formaciones La Manga y Tordillo, pero no afectan a la base de la Formación Vaca Muerta.
- Sector Oriental: caracterizado por presencia de fallas extensionales en echelon, con rumbo NO-SE.

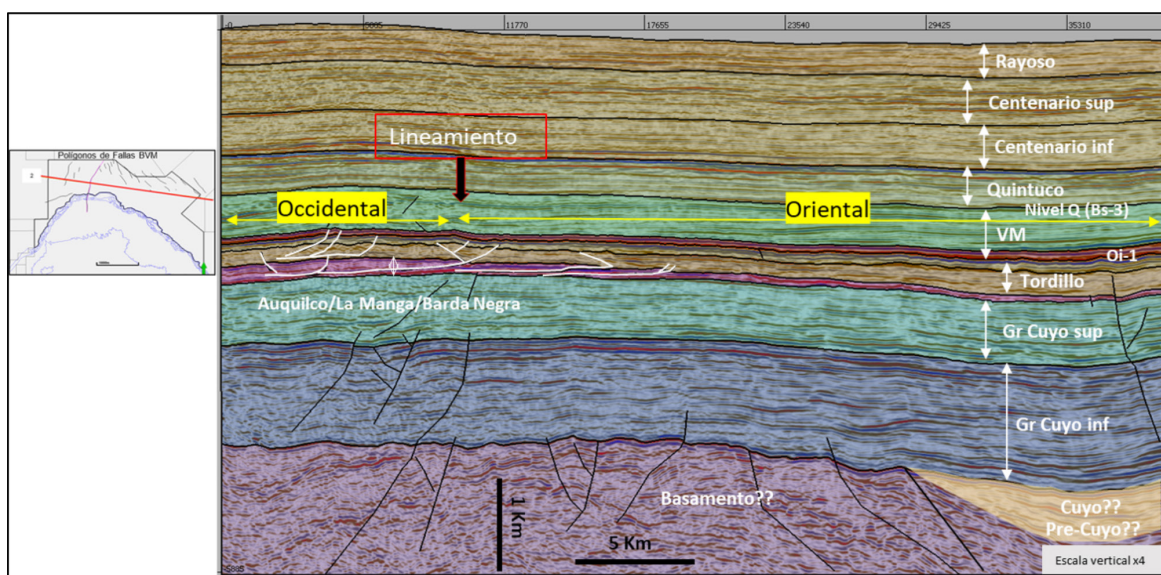


Figura 14. Sección sísmica 2 mostrando las unidades y estructuras interpretadas, y el modelo geológico resultante. Se indica la posición del lineamiento en análisis y las 2 zonas en las que se divide el bloque de acuerdo con las observaciones mencionadas en el párrafo.

A continuación, se mostrarán las restauraciones secuenciales por tiempo, desde lo más reciente a los más antiguos. Cada intervalo temporal de restauración se denominó informalmente con el nombre del tope formacional asociado de acuerdo con la interpretación realizada.

Para cada intervalo considerado, además de mostrar la sección sísmica interpretada y restaurada, se realiza una descripción de lo observado en la restauración y se muestran los mapas de polígonos de las estructuras extraídos del modelo estructural del bloque (Figura 7) para ese *timing* y un esquema de la dirección del esfuerzo regional durante el intervalo tomado del resumen de eventos tectónicos presentado por Marchal *et al.* (2020).

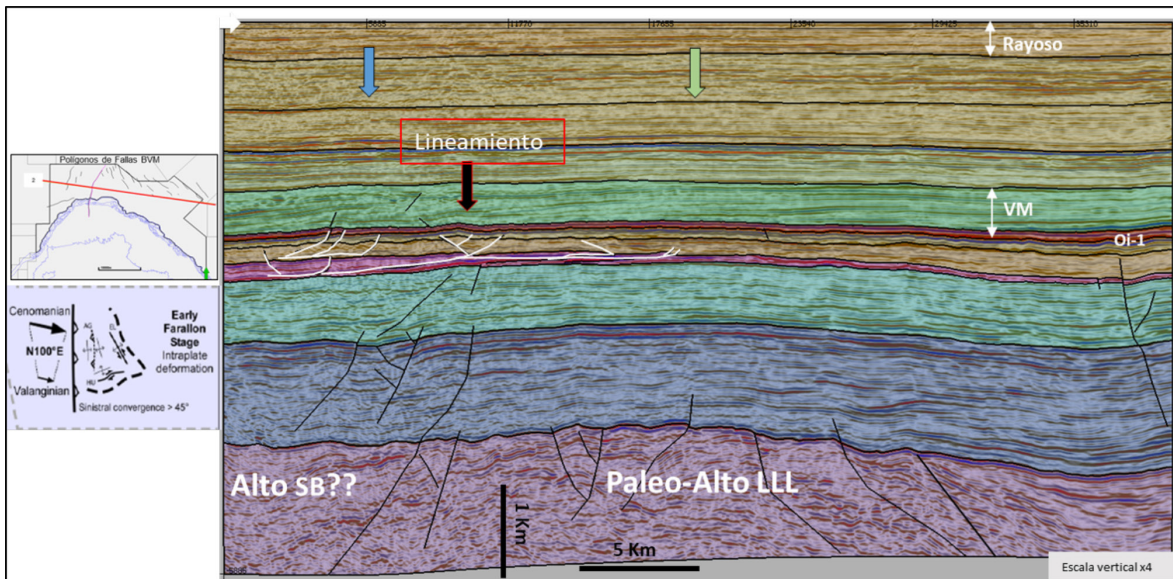


Figura 15. Sección sísmica 2 restaurada al tope de la Formación Rayoso. A la izquierda, abajo, esquema de la dirección del máximo esfuerzo horizontal remoto durante el intervalo tomado Marchal *et al.* (2020).

I. Rayoso (Cretácico superior)

Con esta primera restauración de la sección sísmica 2 (Figura 15), se puede resaltar que las secuencias cambian de inclinación en relación con la estructura actual (Figura 14), pasando a bascular hacia el oeste-noroeste.

En la posición de la flecha verde de la Figura 15, se observa la estructura del Paleo-Alto de Loma La Lata cuyo relieve estructural va disminuyendo hacia los niveles superiores. El tope de la Formación Quintuco se ve afectado por un pliegue muy amplio y suave relacionado a una reactivación de la estructura de basamento. Si bien hay un máximo muy sutil en las unidades superiores, podrían inferir algún cambio de espesores en la interpretación. Lo mismo sucede en la porción occidental, donde la deformación en ese sector se podría relacionar con la actividad del alto Sauzal Bonito (flecha azul).

II. Centenario superior (Cretácico medio)

Al restaurar en el tope de la Formación Centenario vemos que en la zona donde está la flecha celeste en la Figura 16 hay un leve plegamiento en la sección inferior de la misma.

Se interpreta que el Paleo-Alto de Loma La Lata está activo durante la depositación de la sección superior de la Formación Centenario, evidenciado por un leve abombamiento en la misma (flecha naranja). En la zona del lineamiento no se observa deformación en las unidades superiores.

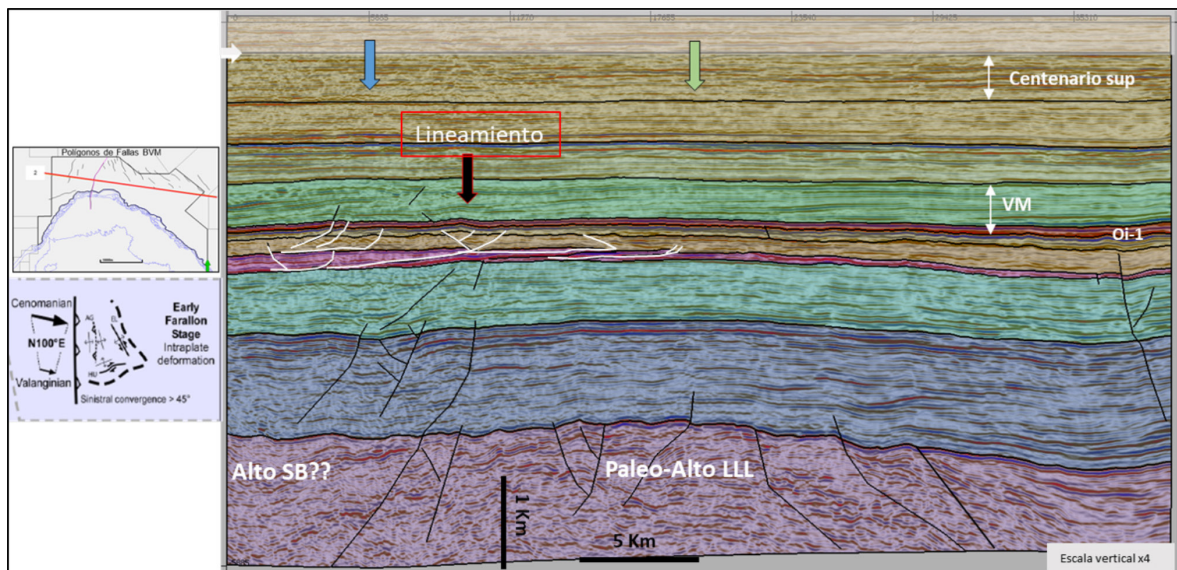


Figura 16. Sección sísmica 2 restaurada al tope de la Formación Centenario superior. A la izquierda, abajo, esquema de la dirección del máximo esfuerzo horizontal remoto durante el intervalo tomado Marchal *et al.* (2020).

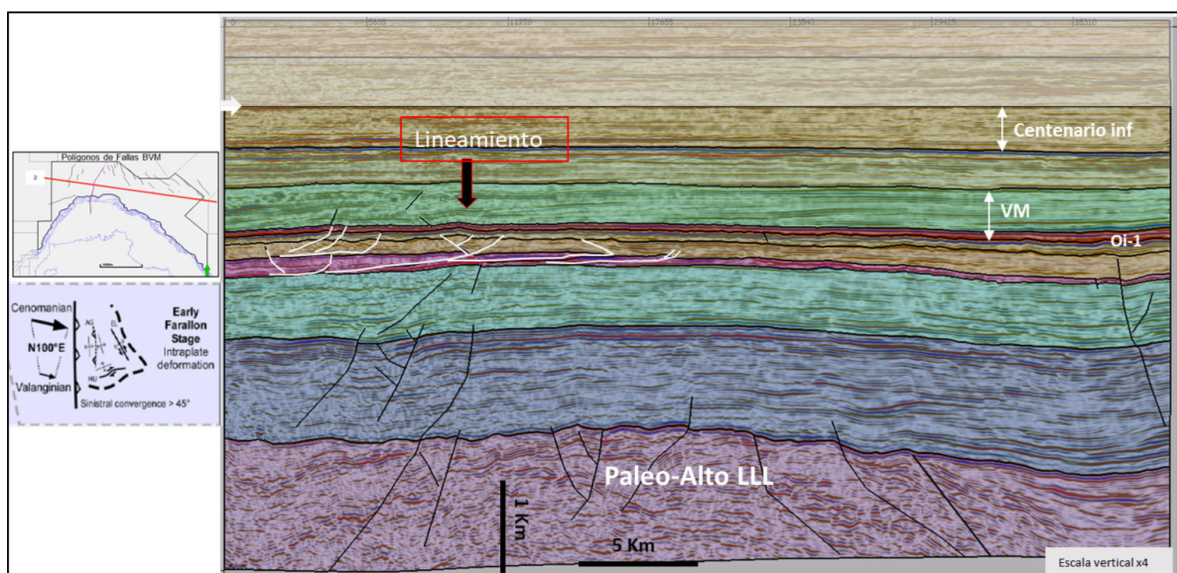


Figura 17. Sección sísmica 2 restaurada al tope de la Formación Centenario inferior. A la izquierda, abajo, esquema de la dirección del máximo esfuerzo horizontal remoto durante el intervalo tomado Marchal *et al.* (2020).

I. Centenario inferior (Cretácico medio)

No se observa deformación en la base de Formación Centenario en ningunas de las zonas que se mencionaron en la Figura anterior (Figura 17).

I. Quintuco (Cretácico inferior)

Como se puede ver en la Figura 18 en este tiempo se ve deformación en el Nivel Q (Barresiano superior 3) en la zona del lineamiento y también en la zona de los pliegues que están asociados a las fallas inversas en el oeste (flecha verde). Esto indica un pulso de compresión activo durante la deposición de Formación Quintuco.

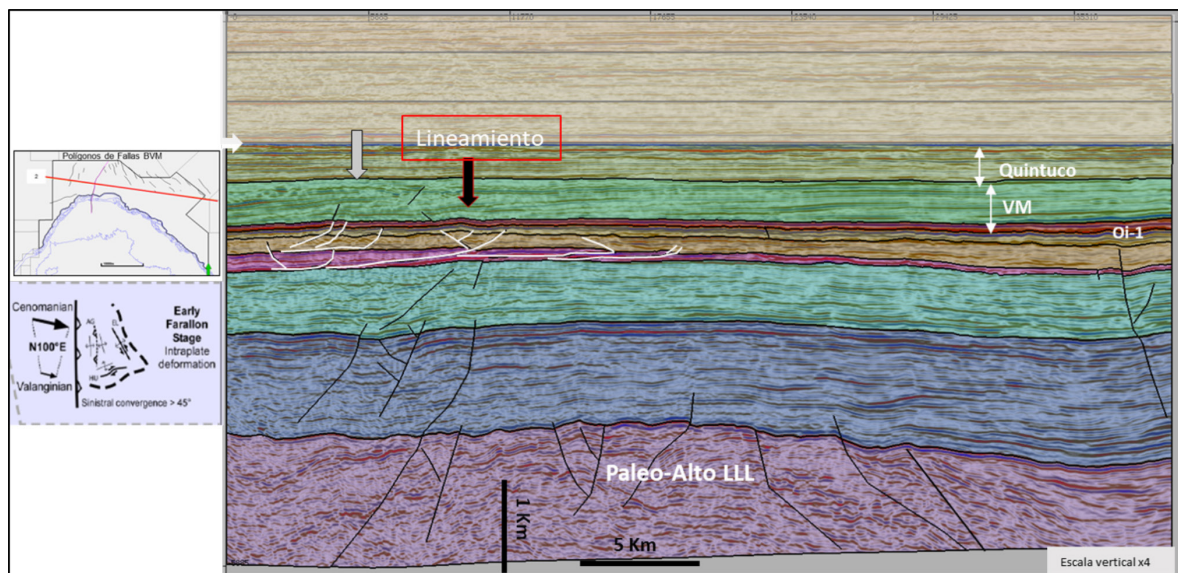


Figura 18. Sección sísmica 2 restaurada al tope de la Formación Quintuco. A la izquierda, abajo, esquema de la dirección del esfuerzo máximo esfuerzo horizontal remoto durante el intervalo tomado Marchal *et al.* (2020).

II. Nivel Q/Barresiano superior 3 (Formación Vaca Muerta, Cretácico inferior)

Restaurando al tope del Nivel Q (Figura 19), se observa que la base de la Formación Vaca Muerta se encuentra deformada en la zona del lineamiento, como así también en la de los pliegues que están asociados a las fallas inversas en el oeste (flecha verde) y en los pliegues asociados a las fallas en echelon (flecha violeta).

Esta deformación se desarrolla mediante despegues dentro de la Formación Auquilco y en la interfaz de las formaciones Auquilco y Tordillo, generando pequeños pliegues en las

unidades basales de la Formación Vaca Muerta, lo que significa una reactivación de este sistema de despegues en tiempos intermedios entre el nivel Q y las unidades basales de la Formación Vaca Muerta.

Si bien no se registran eventos contraccionales en tiempos de Vaca Muerta, estas reactivaciones menores incentivadas por unidades incompetentes son posibles teniendo en cuenta la presencia de un esfuerzo máximo horizontal remoto N100°E.

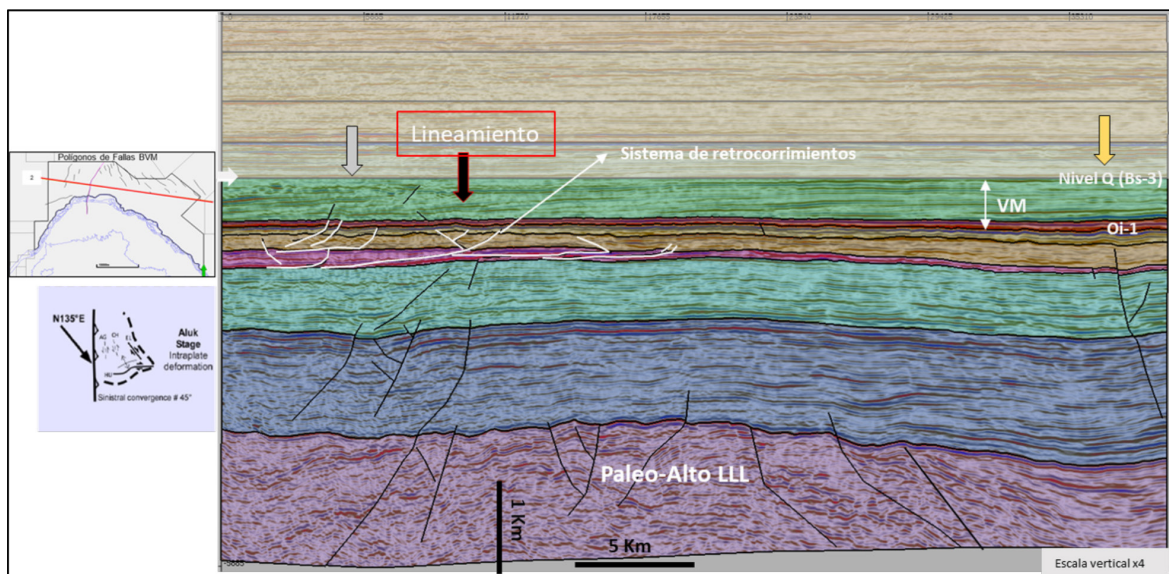


Figura 19. Sección sísmica 2 restaurada al tope del Nivel Q/Barresiano superior 3 (Formación Vaca Muerta). A la izquierda, abajo, esquema de la dirección del esfuerzo regional durante el intervalo tomado Marchal *et al.* (2020).

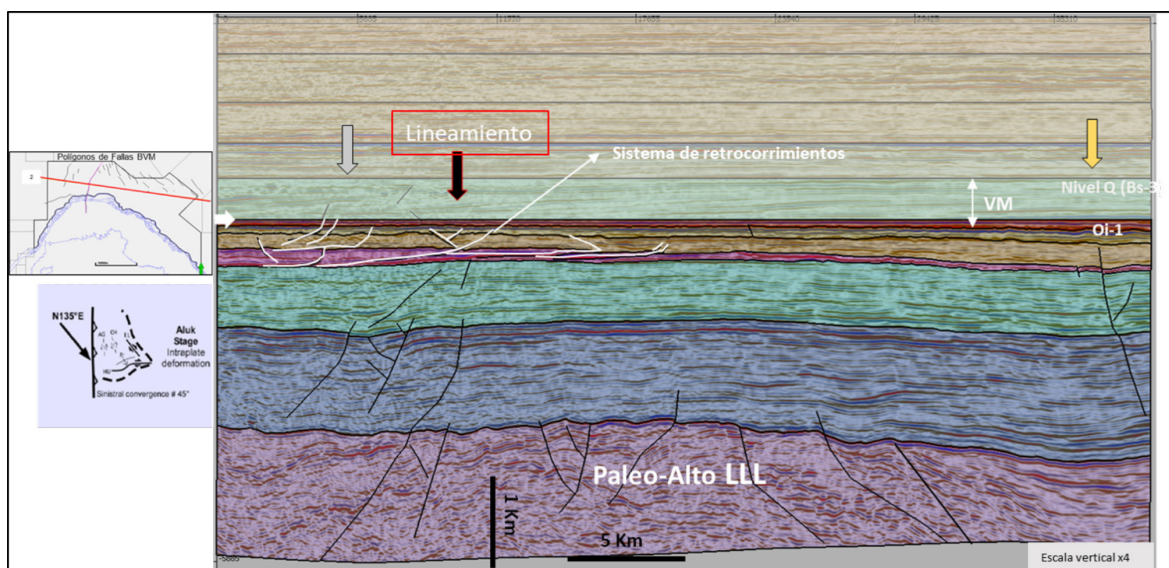


Figura 20. Sección sísmica 2 restaurada al tope del Nivel Orgánico inferior 1 (Formación Vaca Muerta). A la izquierda, abajo, esquema de la dirección del esfuerzo regional durante el intervalo tomado Marchal *et al.* (2020).

III. Orgánico inferior 1 (Oi-1, Formación Vaca Muerta, Jurásico superior)

En la Figura 20 se observa que para este tiempo no hay deformación en la base de la Formación Vaca Muerta en la zona del lineamiento ni en los pliegues que están asociados a las fallas inversas en el oeste (flecha gris). En cambio, si hay deformación asociada a las fallas en echelon hacia el este (flecha amarilla).

Esto indicaría que el lineamiento que se interpreta en la base de la Formación Vaca Muerta se genera durante la depositación de la misma, entre tiempos de Oi-1 y Bs-3, por una compresión que reactiva la estructura asociada al sistema de retrocorrimientos previo.

IV. Base de la Formación Vaca Muerta (Jurásico superior)

Al restaurar la sección en la base de la Formación Vaca Muerta (Figura 21), se observa deformación en la Formación Tordillo, asociada al sistema de retrocorrimientos. Se identifican estratos de crecimiento en el retrocorrimiento, lo cual indica que el sistema estaba activo durante la depositación de Formación Tordillo. También hay deformación asociada a fallas inversas con despegues Intra Formación Auquilco (flecha verde). No hay deformación asociada a las fallas en echelon (flecha violeta).

I. Intra-Tordillo (Formación Tordillo, Jurásico superior)

Al restaurar en la sección superior de Formación Tordillo (Figura 22) se ve una deformación suave en la misma, asociada al desarrollo de un sistema de retrocorrimientos generado a partir de

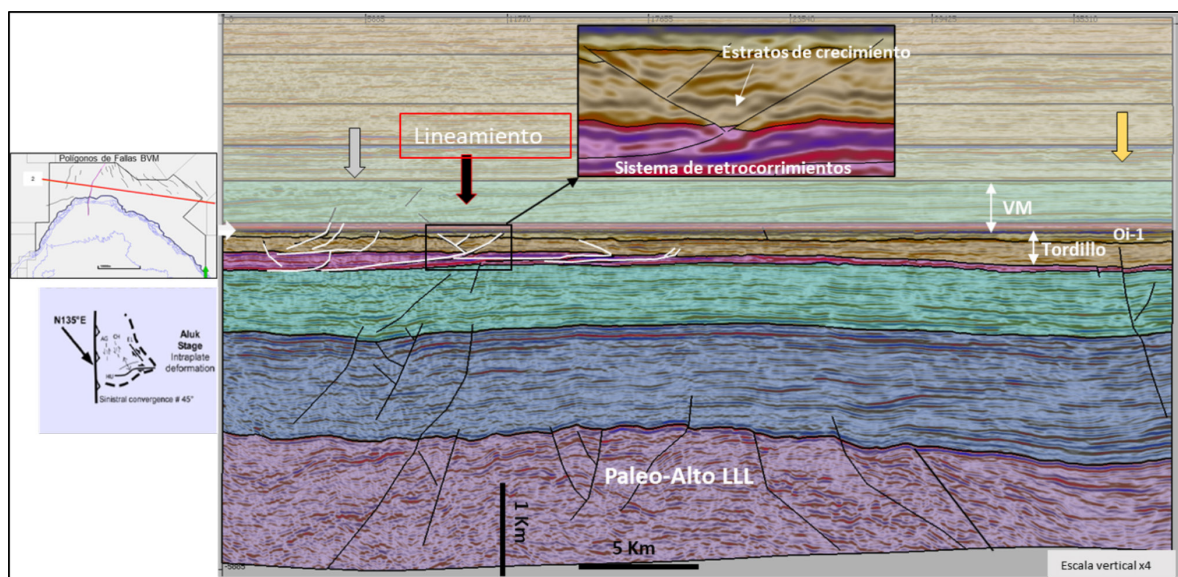


Figura 21. Sección sísmica 2 restaurada a la base de la Formación Vaca Muerta. A la izquierda, abajo, esquema de la dirección del esfuerzo regional durante el intervalo tomado Marchal *et al.* (2020).

puntos ciegos de las fallas de despegues en la base de Formación Auquilco y a las fallas inversas con despegues intraformacionales.

El techo de la Formación Auquilco está deformado con longitudes de onda distintas de las que se ven en la base, lo cual evidencia que esos plegamientos corresponden a dos eventos compresivos distintos, e indicaría el comienzo de la generación de los corrimientos y del desarrollo del sistema de retrocorrimientos asociado, durante la depositación de la Formación Tordillo.

También se observa un pliegue de longitud de onda amplia (entre las flechas negras de la Figura 22), lo cual evidencia que el Paleo-Alto Loma La Lata estaba activo en este tiempo.

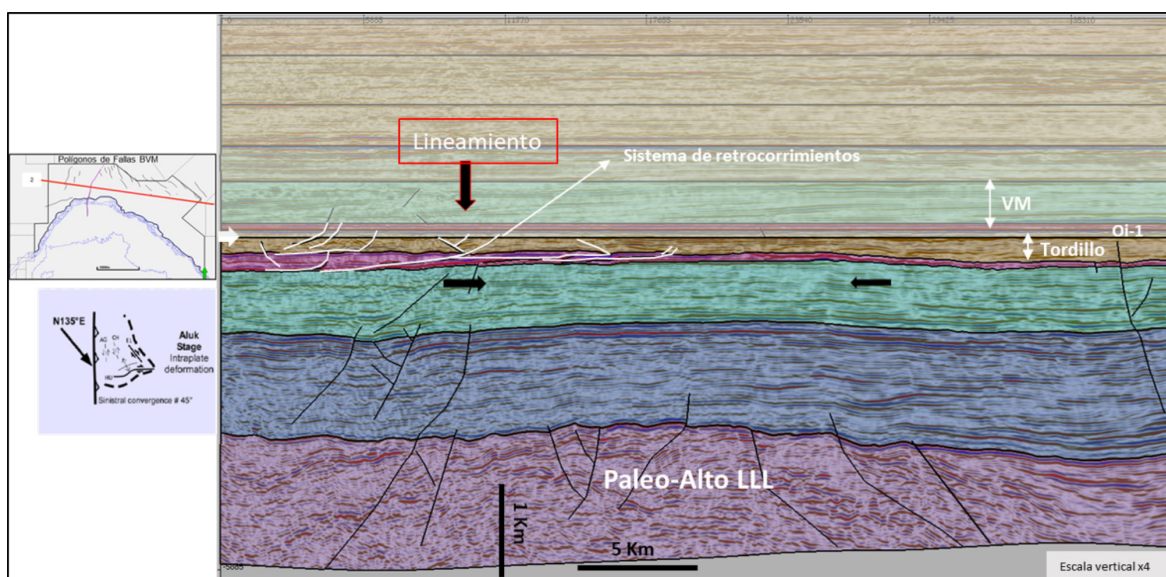


Figura 22. Sección sísmica 2 restaurada al Nivel Intra-Tordillo. A la izquierda, abajo, esquema de la dirección del esfuerzo regional durante el intervalo tomado Marchal *et al.* (2020).

II. Auquilco (Jurásico superior)

En la Figura 23 se observa que al restaurar al tope de la secuencia de las Formaciones Auquilco y La Manga, la base de esta unidad sigue mostrando deformación (flecha verde), razón por la cual se considera que hubo un evento de deformación intraformacional que genera la reactivación de fallas de edad cuyana.

La no deformación de la sección superior de la secuencia indicaría que el comienzo de los corrimientos y desarrollo del sistema de retrocorrimientos asociado se da durante la depositación de la Formación Tordillo.

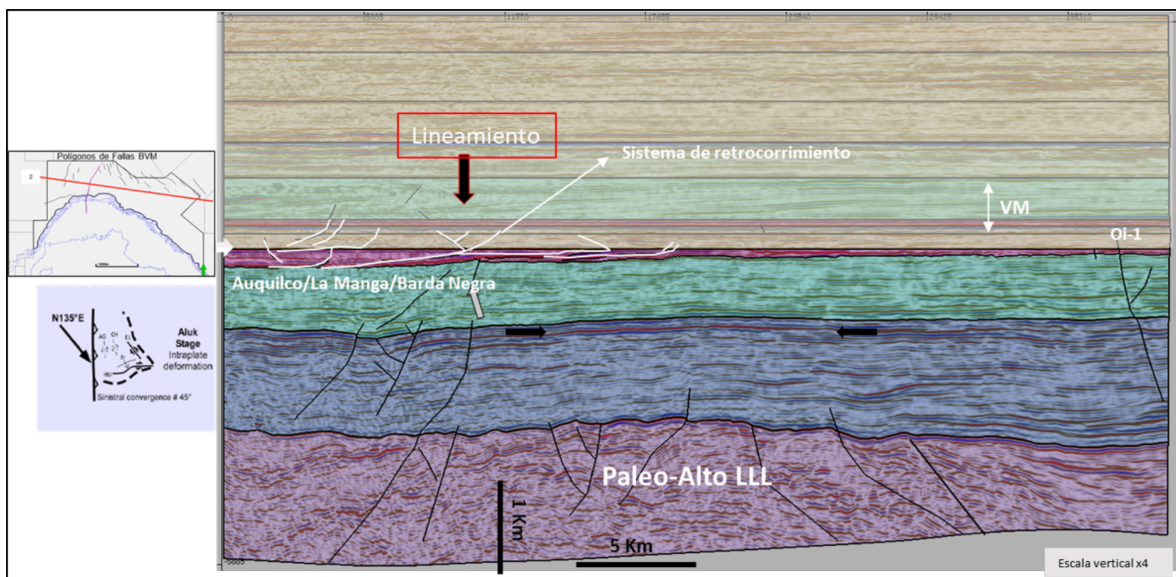


Figura 23. Sección sísmica 2 restaurada al tope de la Formación Auquileo. A la izquierda, abajo, esquema de la dirección del esfuerzo regional durante el intervalo tomado Marchal *et al.* (2020).

III. Tope Grupo Cuyo superior (Jurásico medio)

Al restaurar en el tope del Grupo Cuyo (Figura 24) se observa que la sección inferior del mismo se encuentra ya deformada, indicando un evento compresivo activo durante la depositación del mismo. Este evento genera fallas inversas con despegues en la base de Formación Los Molles e inversión de fallas de los hemigrabenes precuyanos, una de las cuales da lugar al crecimiento de la estructura del Paleo-Alto de Loma La Lata en este tiempo (esta sección se encuentra en el borde del flanco norte del mismo).

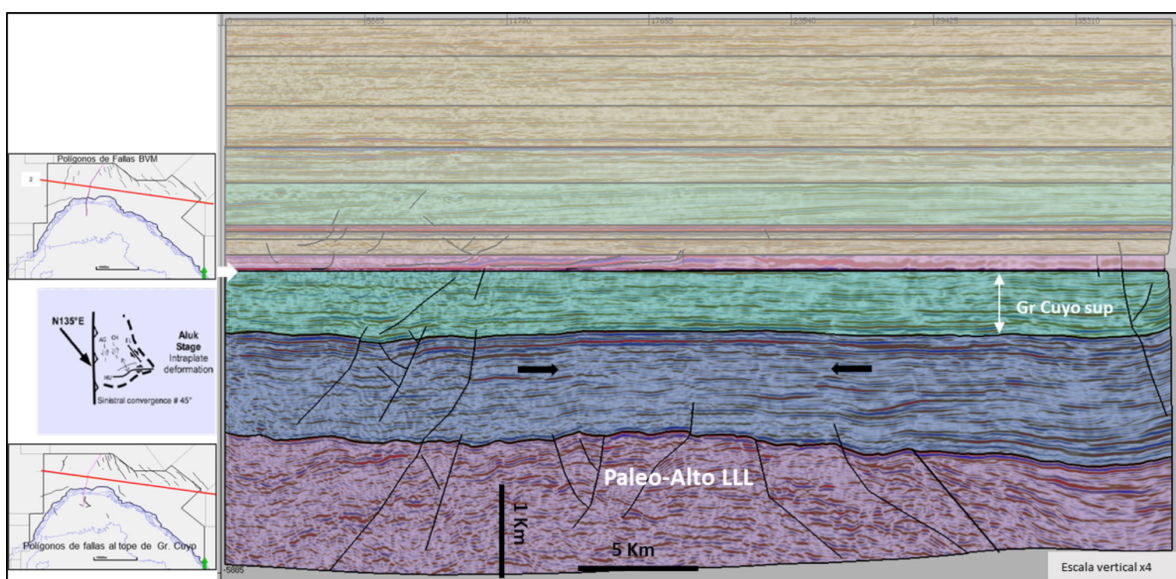


Figura 24. Sección sísmica 2 restaurada al tope del Grupo Cuyo superior. A la izquierda, centro, esquema de la dirección del esfuerzo regional durante el intervalo tomado Marchal *et al.* (2020).

Como se ve en el mapa de la izquierda (margen inferior), los rumbos de los polígonos de las fallas principales al tope del Grupo Cuyo, coinciden con las orientaciones de las estructuras interpretadas en la base de la Formación Vaca Muerta. Esto indicaría que, para este tiempo, el vector de convergencia tiene el mismo rumbo que el que genera la deformación en la base de la Formación Vaca Muerta.

IV. Grupo Cuyo inferior (Jurásico inferior-medio)

Al restaurar al tope de Grupo Cuyo Inferior (Figura 25) se observa que casi toda la sección se “horizontaliza”. Esto implica que la estructuración de este se dio en tiempos de la depositación de las unidades superiores del Grupo.

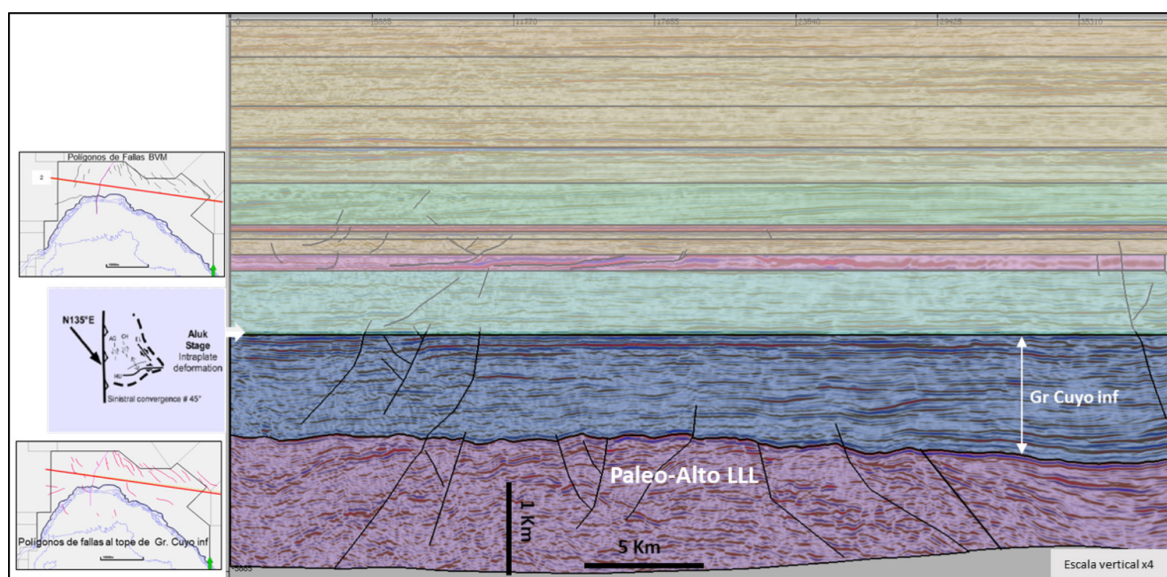


Figura 25. Sección sísmica 2 restaurada al tope del Grupo Cuyo inferior. A la izquierda, centro, esquema de la dirección del esfuerzo regional durante el intervalo tomado Marchal *et al.* (2020).

Como se ve en el mapa de la izquierda (margen inferior), hay una rotación del rumbo de las estructuras interpretadas en la sección media del Grupo Cuyo en relación con las estructuras precuynanas, como resultado de la compresión por convergencia N135°E.

V. Basamento indiferenciado

Al restaurar en el tope del Basamento indiferenciado (indefinido por falta de registro de pozo) no se observa deformación asociada al Paleo-Alto Loma La Lata ni dentro de los rellenos de las cubetas, lo cual nos indica que el evento compresivo que da lugar a la inversión de las estructuras es posterior (Figura 26).

Como se ve en el mapa de polígonos de fallas al tope de Precuyo/Grupo Cuyo (mapa margen izquierdo inferior Figura 26), las estructuras principales tienen el rumbo asociado a las fallas generadas durante de la etapa de *rifting* triásico de la cuenca.

CONCLUSIONES

En función del presente trabajo se interpreta que el lineamiento que atraviesa el bloque de Loma Campana con rumbo N-S se debe a la visión en planta del plegamiento presente en la sección inferior de la Formación Vaca Muerta.

Se interpreta que este plegamiento se origina como consecuencia de la deformación contraccional que afectó a toda el área desde el Jurásico medio-superior, produciendo despegues intraformacionales en las Formaciones Auquilco, La Manga y Tordillo. Esto generó un engrosamiento por corrimiento de la Formación Auquilco en el oeste del bloque y una incipiente estructura de cuña con la presencia de retrocorrimientos en sus puntos ciegos.

El esfuerzo principal máximo horizontal en este tiempo era predominantemente NO-SE, lo que produjo la reactivación de lineamientos de basamento y fajas de fallas en echelon con rumbo NO-SE en la parte nor-noreste del bloque, con carácter normal debido la generación de un campo local tensional y por lo tanto una deformación divergente oblicua.

Sin embargo, el lineamiento estuvo controlado en ese marco contraccional por el *pinch-out* de las facies evaporíticas de la Formación Auquilco, cuya orientación es N-S. En consecuencia, el alto contraste mecánico que existía en el *pinch-out* de las evaporitas, prevaleció a pesar de la formación coetánea de las demás estructuras con una orientación NO-SE.

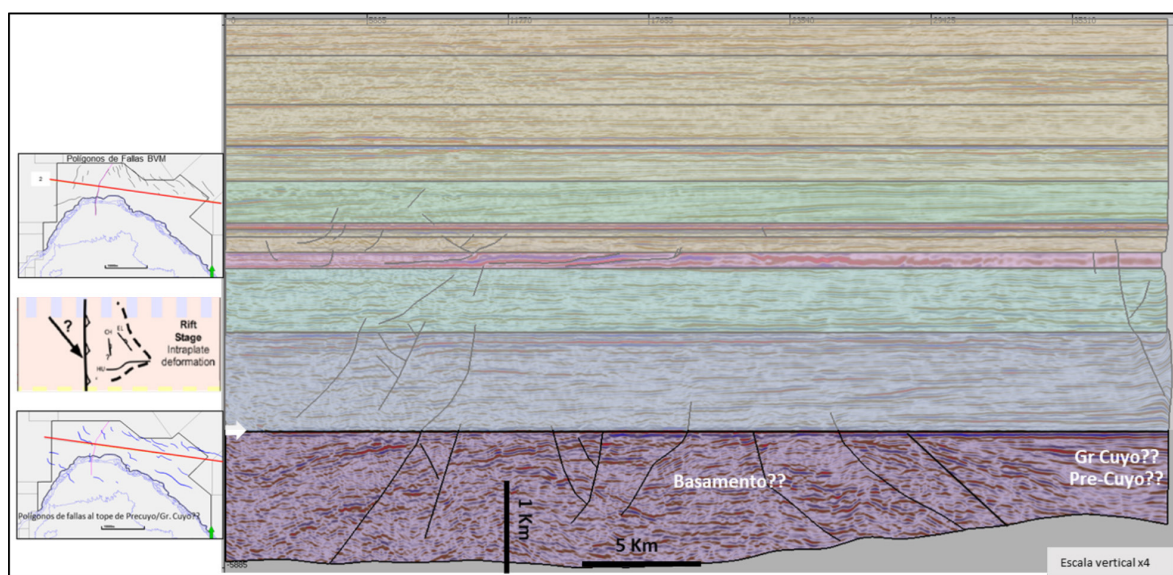


Figura 26. Sección sísmica 2 restaurada al tope de Basamento indiferenciado. A la izquierda, centro, esquema de la dirección del esfuerzo regional durante el intervalo tomado Marchal *et al.* (2020).

En tiempos de la parte basal superior de la Formación Vaca Muerta (*post Oi1*), el Nivel Q (Bs-3) y la Formación Quintuco, se reactivaron los corrimientos de la Formación Auquilco, particularmente la cuña presente en el *pinch-out* evaporítico, lo que generó el plegamiento de las unidades arriba mencionadas conformando el lineamiento que se encuentra muy bien representado en la base de la Formación Vaca Muerta.

La interacción de las fallas normales en echelon con los corrimientos de la Formación Auquilco es menor, sólo se observa en la parte norte del bloque.

Finalmente, se puede concluir que la metodología empleada de restauración y decompactación, permitió identificar los diferentes eventos de formación y reactivación de las fallas de las unidades analizadas (Figura 27), tal como se resume a continuación:

1. *Rifting* Triásico que da lugar a estructuras de grabenes y hemigrabenes, que se rellenan con sedimentos Precuyanos (algunas cubetas podrían estar rellenas con niveles basales de Formación Los Molles)
2. Compresión que afecta al Grupo Cuyo (Jurásico inferior a medio). Generación de fallas inversas con niveles de despegue en la base del grupo, y otras que corresponden a inversiones de las fallas pre-cuyanas. Desarrollo del Paleo-Alto Loma La Lata.
3. Compresión durante la depositación del Grupo Lotena y Formación Tordillo. Generación corrimientos y sistemas de retrocorrimientos, a partir de los puntos ciegos de fallas de despegue en Formaciones Auquilco y La Manga.
4. Compresión durante la depositación de las unidades basales de Formación Vaca Muerta. Fallas intra-Tordillo: generación de fallas inversas con niveles de despegue en el techo de Auquilco y/o intra-Tordillo (algunas que afectan a los niveles basales de la Formación Vaca Muerta). Generación de fallas extensionales (en echelon) en el sector oriental.
5. Reactivación compresiva de las estructuras en tiempos de Formaciones Quintuco y Centenario. Desarrollo del Alto Sauzal Bonito.

Finalmente, cabe resaltar la importancia de realizar este tipo de análisis evolutivo de la estructura de un bloque que se encuentra en desarrollo de reservorios no convencionales. El riesgo estructural considerado en la estrategia de desarrollo a futuro (*Full Field Development*) tiene un alto impacto en la misma, por la cantidad y/o largo de los pozos a considerar y por la productividad esperada. Este trabajo permitió un mejor entendimiento del estado de esfuerzos actual en el área del bloque analizada. Queda como tarea pendiente relacionar esta evolución estructural con el cambio en fluido que se observa hacia el oeste del bloque, principalmente asociado al mayor corte agua de los pozos estimulados en la sección de la Formación Vaca Muerta.

AGRADECIMIENTOS

Nos gustaría agradecer a YPF S.A. y a Chevron Corporation por permitir realizar y publicar este trabajo integrado.

REFERENCIAS CITADAS

- Cristallini, E., Martínez, J. M., Sánchez E., Periale S., y Locarich A., 2005. Evaluación Estructural del Bloque Bandurria (Provincia de Neuquén, Argentina). Reporte interno de YPF, 67 p.
- Cristallini, E. y Bühler, M., 2007. Revisión del esquema estructural de área Loma La Lata: Buenos Aires, Informe interno de REPSOL-YPF, p. 1–24.
- Domínguez, R. F., Leanza H. A., Fantín, M., Marchal, D. y Cristallini, E., 2020. Basin configuration during the Vaca Muerta times. En Daniel Minisini, Manuel Fantín, Iván Lanusse Noguera, y Héctor A. Leanza, eds., *Integrated geology of unconventional: The case of the Vaca Muerta play*, Argentina: AAPG Memoir 121, p. 141–162.
- Fernández, P.; Maretto, H.; Verzi, H.; Hechem, J., 2002. Análisis estratigráfico y secuencial del Grupo Lotena en la porción centro-oriental de la Cuenca Neuquina, Argentina. En Congreso Geológico Argentino, No. 15, El Calafate, Actas: 631-636.
- Gangui, A., and Grausem, M., 2014. Tectonismo y estilos estructurales en el Engolfamiento Neuquino: implicancias en la interpretación de las fracturas monitoreadas por microsísmica en la formación Vaca Muerta. En S. Galeazzi, G. González, M. Santiago, D. García, L. Maschio, R. González, and J. Ramírez Martínez, eds., *Simpósio de Recursos No Convencionales: 9º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos*, Mendoza, p. 341–364.
- Lebinson, F. O., Turienzo, M. M., Sánchez, N. P., Cristallini, E. O. y Araujo, V. S., 2020. Kinematics of a backthrust system in the Agrio fold and thrust belt, Argentina: Insights from structural analysis and analogue models. Pergamon-Elsevier Science Ltd; *Journal of South American Earth Sciences*; 100; 7-4-2020; p. 1-18.
- Maerten, L. y Maerten, F., 2006. Chronologic modeling of faulted and fractured reservoirs using geomechanically based restoration: Technique and industry applications. *AAPG Bulletin*, v. 90, no. 8, pp. 1201–1226.
- Marchal, D., Mancada, R., Domínguez, R. F. y Sattler, F., 2020. Structural geology: Tectonic history, macrostructures, regional fault map, fault systems, second-order structures, and impact of the inheritance. En D. Minisini, M. Fantín, I. Lanusse Noguera, y H. A. Leanza, eds., *Integrated geology of unconventional: The case of the Vaca Muerta play*, Argentina: AAPG Memoir 121, p. 99–140.
- Mosquera, A. y Ramos, V., 2006. Intraplate deformation in the Neuquen Embayment. En Kay, S. and V. Ramos (Eds). *Evolution of an Andean margin: A tectonic and magmatic view from the Andes to the Neuquen Basin (35°-39°S lat)*. Geological Society of America, Special Paper 407: 97-123.
- Pángaro F., Martínez, R., Sattler, F. y F. Bettini, 2011. El Flanco Oriental. VIII Congreso Geológico Argentino. Neuquén: p. 407-417.
- Vergani, G., Tankard, A., Belotti, H. y Welsink H., 1995. Tectonic evolution and paleogeography of the Neuquén Basin, Argentina. En A. Tankard, R. Suárez, and H. Welsink, eds., *Petroleum basins of South America*: AAPG Memoir 62, p. 383–402.
- Schlumberger, 2010: Dynel2D 1.7.1 - User manual