

ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DEL LINEAMIENTO ESTRUCTURAL DE LOMA LA LATA OESTE - EL CORDÓN - LINDERO ATRAVESADO A PARTIR DE NUEVOS DATOS SÍSMICOS PARA LA FORMACIÓN VACA MUERTA

Rocío Roth¹, René Manceda², Vladimir Merchán Jaimes³, Juan Rossi⁴ y Brian Espíndola⁵

1: YPF S.A. rocio.roth@ypf.com

2: Consultor Independiente. rmanceda@outlook.com

3: YPF S.A. vladimir.e.merchan@ypf.com

4: YPF S.A. juan.rossi@ypf.com

5: YPF S.A. brian.espindola@ypf.com

Palabras clave: Vaca Muerta, Estructura, Restauración, Esfuerzos, Corredor

ABSTRACT

This paper presents a new interpretation of the deformation events linked to the structural evolution of the Lindero Atravesado – El Cordón – Loma La Lata Oeste transcurrent fault system. It's a WNW-ESE trending narrow zone that extends about 100 km along the southern border of the Neuquén Basin. High quality 3D seismic data allowed the definition of a detailed fault pattern and a 2D geomechanical restoration was used to simulate failures and deformation patterns in different time intervals allowing the determination of active and non-active faults as well as folds appearance and evolution. For the determination of stress orientation and the stress field, GPlates software was used. The obtained results indicate a complex displacement field and stress rotation, from deeper levels to Vaca Muerta Formation terms.

INTRODUCCIÓN

El área Loma La Lata Oeste se encuentra ubicada al sur de la localidad de Añelo, provincia de Neuquén, próximo al margen oeste del lago Los Barreales. (Fig. 1). En el área, las estructuras regionales presentes son franjas angostas de fallas agrupadas en echelon que afectan a varias formaciones dentro de la columna sedimentaria. Se propone estudiar el tren estructural de Loma La Lata Oeste (LLLO) - El Cordón (ECó) - Lindero Atravesado (LA) y su influencia en los vectores de deformación locales en todo el sistema Quintuco-Vaca Muerta, a partir de datos de una nueva sísmica 3D adquirida en 2019 en Loma La Lata Oeste.

Dentro de las características estructurales principales, estos corredores Noroeste-Sudeste se relacionan con la reactivación de fallas de basamento preexistentes a través de mecanismos de cizallas con convergencia/divergencia oblicua, con mayor desarrollo en el sector oriental y norte del área dentro del Engolfamiento o Bajo de Añelo (Cristallini *et al.* 2009; Pángaro *et al.* 2011).

Esta modalidad de reactivaciones de lineamientos de basamento tiene una importancia fundamental en la caracterización de fracturas naturales en reservorios convencionales, en la interacción de las fracturas naturales con las fracturas hidráulicas en reservorios tipo *tight* y *shale* y en la definición de los campos de esfuerzos locales que se generan en cada evento, donde la orientación del esfuerzo mínimo horizontal puede desviarse de la orientación N-S generalmente asumida en los sondeos de la Formación Vaca Muerta, lo cual impacta significativamente en la producción.

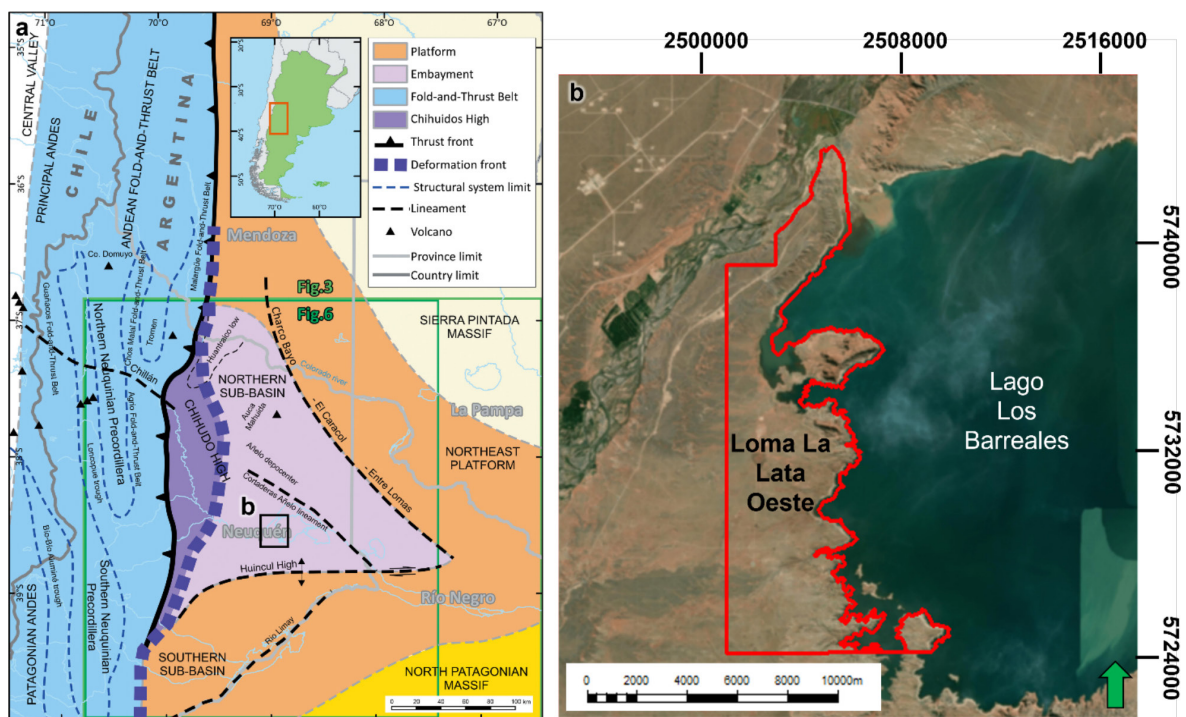


Figura 1. a) Mapa morfoestructural de la Cuenca Neuquina con sus principales rasgos estructurales (modificado de Marchal, *et al.*, 2020). b) Ubicación, ampliación y vista satelital del área de estudio dentro de la Cuenca Neuquina.

MARCO TECTÓNICO REGIONAL

La Cuenca Neuquina se desarrolló durante el Jurásico, Cretácico y Cenozoico afectada por numerosos eventos de deformación en el margen oeste de Gondwana, conformando un arreglo de zonas morfoestructurales (Fig. 1) controlado por las heterogeneidades del basamento de la cuenca (Uliana *et al.* 1989; Tankard *et al.* 1995; Vergani *et al.* 1995; Cobbold y Rossello 2003; Howell *et*

al. 2005; Mosquera y Ramos 2005; Ramos y Folguera 2005; Cristallini *et al.* 2006; Leanza 2009; Mosquera *et al.* 2011; Ramos *et al.* 2011, 2014, 2020; Bechis *et al.* 2014; Rojas Vera *et al.* 2014).

El basamento metamórfico paleozoico y los términos volcanoclásticos del Grupo Choiyoi del Triásico Temprano son involucrados en el evento extensional del oeste de Gondwana en el Triásico Tardío (Fig. 2), donde las secuencias de rift están representadas por depósitos piroclásticos, epiclásticos y volcánicos desde el Triásico Tardío hasta el Jurásico Temprano, rellenando en su mayoría hemigrábenes asimétricos con orientaciones preferenciales Noroeste-Sudeste en la zona de estudio, (Howell *et al.* 2005; Mosquera y Ramos 2006; Cristallini *et al.* 2009., Carbone *et al.* 2011).

La depositación controlada por fallas disminuye en tiempos del Toarciano tardío para dar paso a una cuenca controlada por una subsidencia térmica, con lo cual los depósitos conforman una cuenca integrada por sedimentos marinos y continentales hasta la última etapa que está representada por un gran evento multiepisódico de deformación formando la faja plegada andina durante el Mesozoico Tardío y Cenozoico.

Sin embargo, la etapa de subsidencia térmica fue interrumpida por varios eventos de inversión tectónica en diferentes partes de las cuencas. Según Mosquera y Ramos (2006), la inversión se iniciaría en los bordes de cuencas en los hemigrábenes de China Muerta, Estancia Vieja y Entre Lomas, durante la última parte del Ciclo Precuyano triásico, mientras que Silvestro y Zubiri (2008) encuentran inversiones de la Dorsal de Huincul durante el Toarciano, Jorgensen *et al.* (2014), demuestran la inversión del anticlinal de Sierra Barrosa ubicado al norte de la Dorsal de Huincul durante la discordancia Intracaloviana al tope de la Formación Lajas, como así también la inversión del anticlinal Puesto Cortadera (Vergani *et al.* 1995). En el área de estudio se pudo establecer que la inversión está representada por la discordancia Intratoarciana, como se verá más adelante. Estas discordancias son el resultado de la convergencia de diferentes placas y diferentes orientaciones descriptas por Leanza (2009) y Leanza *et al.* (2020).

Durante el Jurásico Temprano al Cretácico Temprano se desarrolla el estadio Aluk (Mosquera y Ramos, 2006) que se origina con el inicio de la subducción en el margen oeste y una marcada extensión de retroarco en la cuenca con una convergencia oblicua global de N135° que resulta en unos 45° de convergencia con la zona de subducción. La parte final se destaca por la depositación del Grupo Mendoza y estaría limitada por la discordancia Huancállica (Intravalanginiana). A lo largo de este estadio se reactivaron aquellas fallas de basamento cuya dirección estaban favorecidas de acuerdo con las orientaciones de los esfuerzos de ese periodo y particularmente las fallas con orientaciones Noroeste-Sudeste que se encuentran en la zona del Engolfamiento de la Cuenca Neuquina y que están presentes en la zona de Loma La Lata Oeste (Fig. 3).

El estadio Farallón Temprano se desarrolla en el Cretácico Temprano a Tardío (Mosquera y Ramos 2006; Ramos *et al.* 2011) correspondiente al período de subsidencia termal, pero con numerosas discordancias regionales producto de una interacción de la dirección de convergencia de

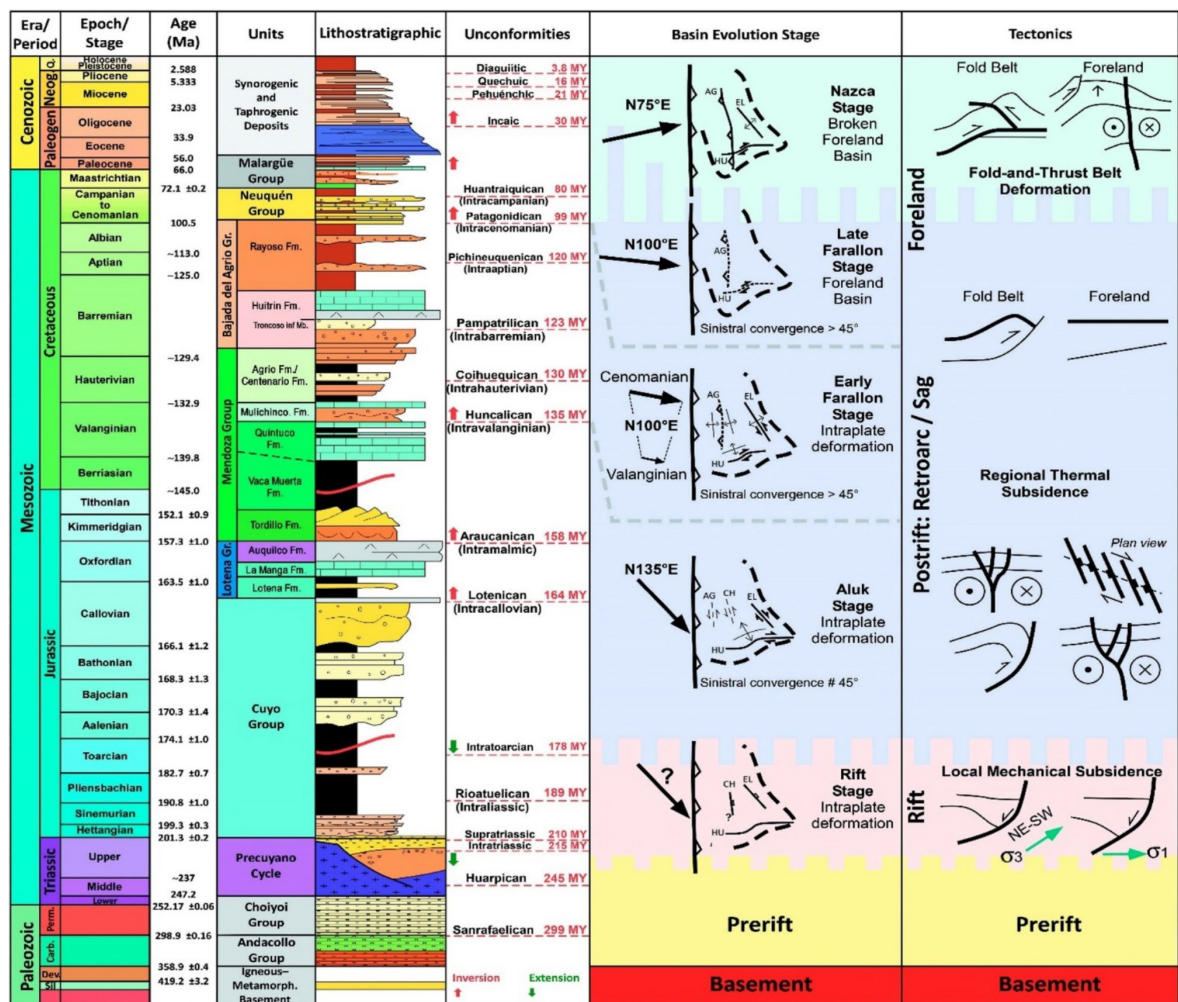


Figura 2. Columna estratigráfica generalizada de la Cuenca Neuquina, mostrando la evolución tectónica y sus discordancias relacionadas (Marchal *et al.* 2020)

placas de N100° y que se enmarcaría entre las discordancias de Huancálica (Intravalanginiana, 135 Ma) y la discordancia Patagónica (Intracenomaniana, 99 Ma) con la deformación concentrada en el sector oriental de la cuenca, en el área de Entre Lomas (Mosquera y Ramos 2006).

El estadio de Farallón Tardío, con una convergencia de 100°, se desarrolla entre las discordancias Patagónica y aproximadamente en el Paleoceno, período en el cual comienza la deformación de la Faja Plegada del Agrio en el oeste de la Cuenca Neuquina (Zamora Valcarce *et al.* 2006; Tunik *et al.* 2010; Ramos *et al.* 2011).

La placa de Nazca comenzaría a subducir en el margen sudamericano a latitudes ecuatoriales alrededor de los 80 Ma, mientras que la convergencia en ese tiempo a la latitud de la Cuenca Neuquina correspondería con una gran componente lateral (Chen *et al.* 2019), con lo cual hay un tiempo de transición entre el último estadio de Farallón y el inicio de la Placa Nazca. Recién a los 55 Ma se establecería la zona de subducción de la Placa Nazca en estas latitudes y su asociación con el estadio andino de deformación.

En la distribución de los corredores Noroeste-Sudeste se pueden distinguir dos grupos (Marchal *et al.* 2020): el lineamiento NW-SE y el NW-SE (EE*) (Fig. 3). El primero corresponde al tren Cerro Bayo-El Caracol-Entre Lomas con fallas alineadas en fajas angostas en el margen noreste de la cuenca delimitada por el área de color azul oscuro (Arregui *et al.* 2005; Mosquera y Ramos 2005; Cristallini *et al.* 2006). Este grupo se caracteriza por grandes longitudes y rechazos normales, que involucran el basamento en profundidad, formando los clásicos hemigrábenes del Precuyano. El

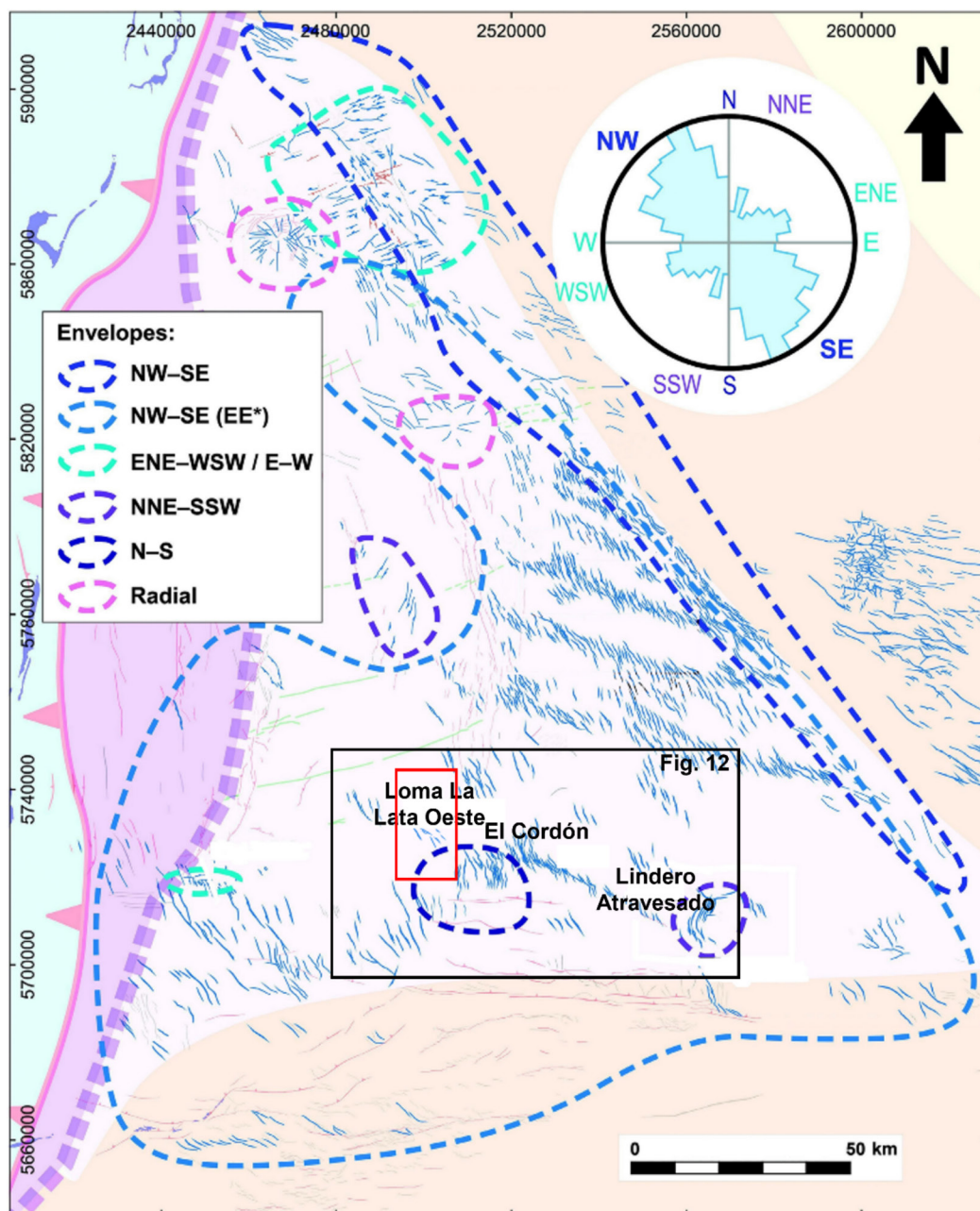


Figura 3. Distribución de fallas al tope de la Formación Vaca Muerta con predominancia de las fallas normales en echelon producto de la reactivación lateral de fallas de basamento. El recuadro rojo indica la ubicación del área de estudio. (Modificado de Marchal *et al.* 2020).

segundo hace referencia al área de color azul claro (las orientaciones tienden a ser más WNW que las del primer grupo) que se encuentran en la parte oriental y sur de la zona del Engolfamiento, con longitudes de 50 km (Cristallini *et al.* 2009; Pángaro *et al.* 2011), y se caracterizan por un patrón en echelon de las fallas normales bien desarrollados en la zona noreste del Engolfamiento como producto de reactivaciones dextrolaterales de fallas del basamento (Pángaro *et al.* 2011; Gangui y Grausem 2014), aunque hay autores que las asocian con subsidencia diferencial de los hemigrábenes Precuyanos (Cristallini *et al.* 2009).

ESTRUCTURA LOCAL

A partir de la interpretación de los nuevos datos sísmicos de Loma La Lata Oeste, se considera que el área bajo estudio se encuentra en el mismo corredor formado por los lineamientos individuales de Lindero Atravesado y El Cordón (Fig. 4a), perteneciendo al segundo grupo de fallas NW-SE (EE*) de la Figura 3.

Las características del corredor a mayores profundidades (Fig. 4b), donde las fallas están presentes en la Formación Lajas, muestran un arreglo un poco diferente. Hay un mayor número de fallas, lo que indica que en el mismo corredor hay una segmentación vertical además de la segmentación horizontal. La zona de cizalla está limitada en sus bordes por fallas normales de rumbo N110° en coincidencia con la orientación del corredor. En el sector interno de la zona se

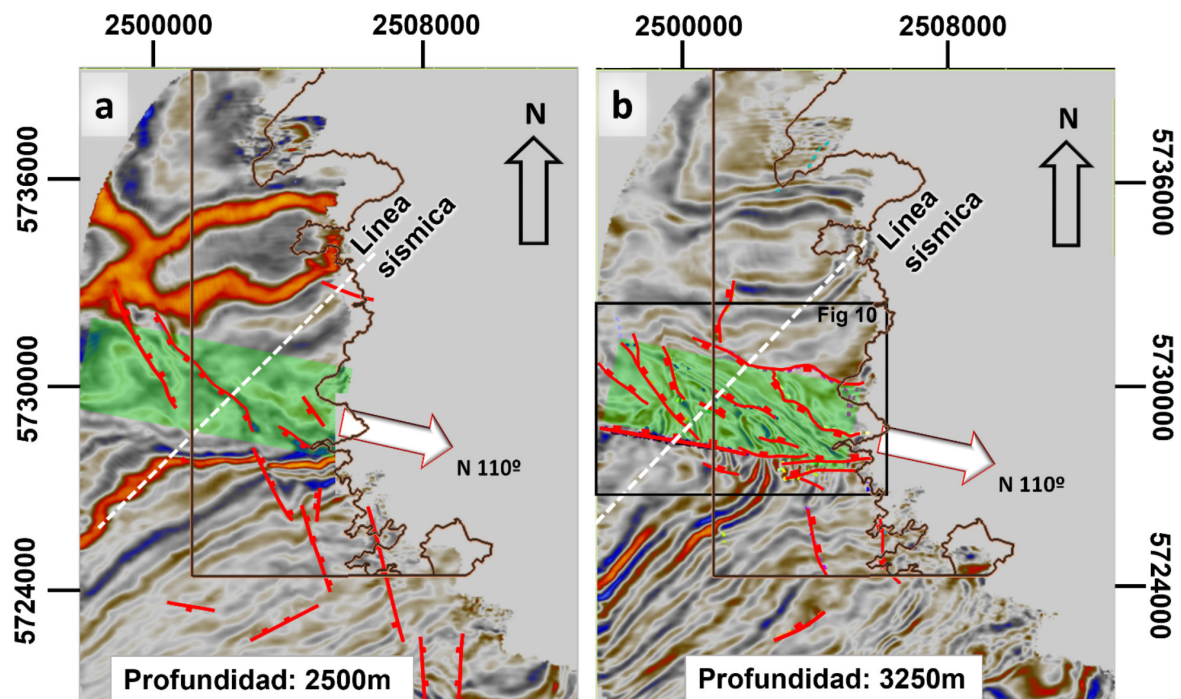


Figura 4. Vista en planta de la concesión del área (marrón) y de la amplitud de los nuevos datos sísmicos a la profundidad (*depth-slice*) de: a) 2500 m, involucra términos de la Formación Vaca Muerta. b) 3250 m, muestra el corredor en términos de la Formación Lajas. Interpretación de fallas (rojo) y del corredor (verde), con dirección N110°.

encuentran fallas normales, pero con una disposición en echelon como las que se encuentran en profundidades más someras.

La Figura 5 muestra una sección a través de la zona de cizalla de Loma la Lata Oeste y cuya ubicación se observa en los *depth-slices* de las figuras 4a y 4b. La zona central de la sección sísmica corresponde a la zona de cizalla de los *depth-slices* a la profundidad de 2500 m y 3250 m. Como se observa la zona central tiene una geometría cónica cuyo vértice se encuentra en profundidad y con una mayor densidad de fallas por debajo de la discordancia Intratoarciana, que se caracterizan por su segmentación y rechazos máximos de 60 m. Este patrón es típico de una deformación por cizalla conformando una estructura en flor y debido a sus características de tamaños y rechazos menores corresponde a un movimiento lateral mínimo de la falla que se encuentra en basamento.

Las fallas normales que se encuentran limitando la estructura en flor como aquellas que se encuentran en la parte media se formaron en el tope de Formación Quintuco, edad de la discordancia Intratoarciana. La mayoría de las fallas se encuentran en las formaciones Los Molles, Lajas, Lotena, Auquilco y Sierras Blancas mientras que en Vaca Muerta y Quintuco están presentes en menor cantidad, pero algunas de las fallas tienen la mayor altura. El basamento contiene

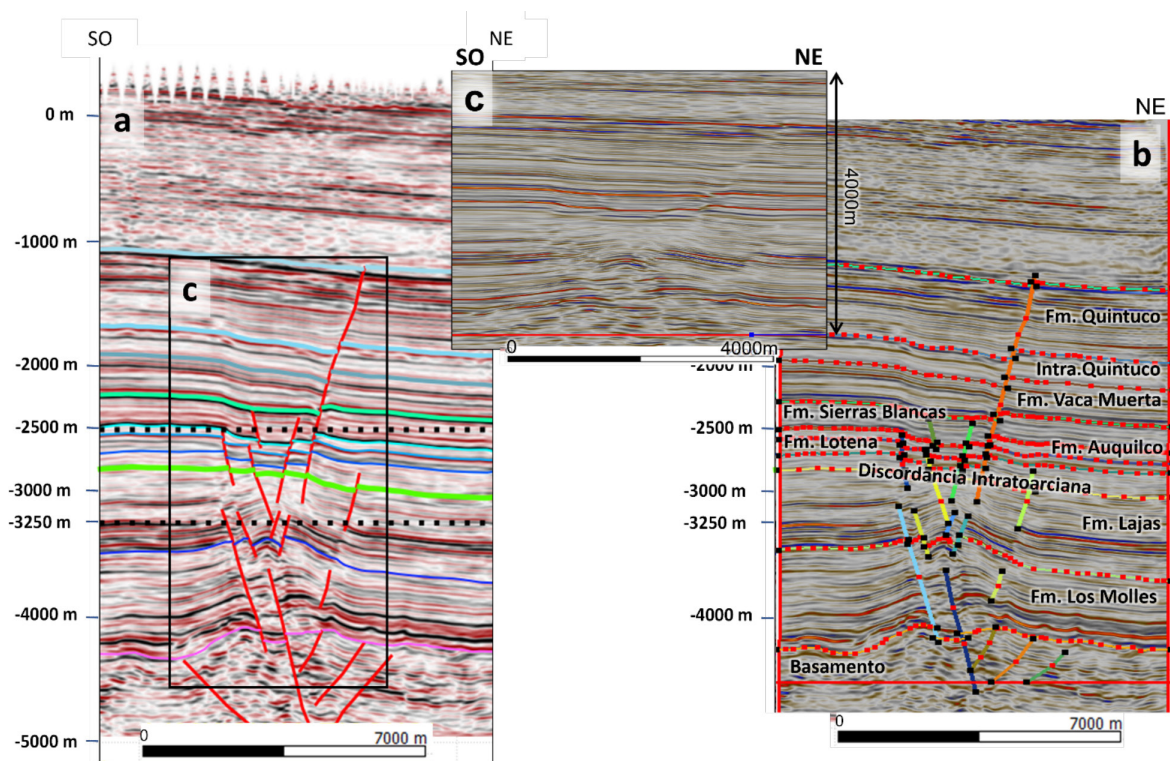


Figura 5. a) Sección sísmica SO-NE interpretada en Petrel, perpendicular a la zona de cizalla (ver Figura 4 para su ubicación) donde se muestra la estratigrafía involucrada y las profundidades a -2500 m y -3250 m en líneas punteadas negras. b) Grilla del modelo estructural interpretado en Dynel 2D en la misma sección. Las secciones tienen una exageración vertical de 3 veces para mostrar el cambio de una estructura en flor positiva en profundidad y una negativa en niveles superiores. c) Ampliación de la sección sísmica SO-NE en Dynel 2D, sin interpretar, a escala 1:1. A una escala real se observa claramente la geometría de las estructuras positiva y negativa en los niveles mencionados.

también fallas normales, pero de rechazos mínimos formando un abanico de mayor apertura que las fallas someras.

Un rasgo interesante que se observa en la sección es que, a pesar de la deformación divergente oblicua que produce en toda la columna fallamiento normal, por encima de la discordancia Intratoarciana (Fig. 5) la estructura en flor se caracteriza por un relieve estructural negativo y por debajo de la discordancia, a pesar del fallamiento normal se observa que el basamento, la Formación Los Molles y la parte inferior y media de la Formación Lajas se encuentran por encima de su nivel regional en la zona de cizalla, lo que indica que hubo otros procesos involucrados en la misma.

RESTAURACIÓN GEOMECÁNICA

Los detalles observados en la sección sísmica de la Figura 5, se pueden analizar a través de una restauración estructural evolutiva para chequear la consistencia de la interpretación estructural. Tradicionalmente las secciones son construidas y balanceadas usando técnicas de restauración geométricas basadas en la preservación de áreas, minimización de la deformación en los cambios de longitud estratales, desplazamientos de las fallas constantes, fallas fijas en el espacio y bloques rígidos discontinuos. La restauración en estos casos se realiza en los bloques yacente y colgante separadamente y luego se trata de ajustar los mismos a través de los *cut-offs*. Sin embargo, siempre se presentan espacios o solapamientos, y además en los algoritmos no se tienen en cuenta los comportamientos reológicos de las rocas. Tampoco se consideran los desplazamientos transcurrentes en este tipo de restauraciones, o son difíciles de parametrizar.

En este trabajo se usará una técnica geomecánica de restauración basada en elementos finitos para analizar las deformaciones y conjuntamente las decompactaciones involucradas para medios discontinuos, anisotrópicos y heterogéneos, y en donde los algoritmos tienen en cuenta leyes físicas como la conservación de energía, masa y momento. Estas técnicas tienen en cuenta las deformaciones de los bloques relacionando los esfuerzos con la masa y la aceleración lineal y, por lo tanto, no son tratados como bloques rígidos (Maerten y Maerten 2006).

Los tratamientos modernos del fallamiento tienen en cuenta lo que sucede en los puntos finales de las fallas, y la masa de rocas que se encuentra alrededor de las fallas, es considerada como un cuerpo de roca continuo y deformable, para ampliar nuestra perspectiva sobre los controles de cómo la masa y el momento se conservan a través de ese cuerpo de roca. En este modelo las ecuaciones de movimiento están enfocadas en fallas y fracturas en materiales elásticos.

La elasticidad lineal se usa como una herramienta de restauración debido a que las propiedades fundamentales son muy adecuadas para el modelado estructural y, además, provee una solución única, a diferencia de los modelos geométricos que permiten varios resultados.

En consecuencia, con la sección sísmica interpretada se construye un modelo estructural en una grilla adecuada a la resolución de este modelo y teniendo en cuenta los parámetros elásticos de cada unidad como el Módulo de Young y el Coeficiente de Poisson.

De esta manera, en la Figura 5b se muestra la misma sección sísmica NE-SO de la Figura 5a, que se introduce al modelo con definición de los distintos niveles -desde el tope de la Formación Quintuco hasta el Basamento- y las respectivas fallas interpretadas.

Se restauran todos los niveles, comenzando desde el tope de la Formación Quintuco hasta el basamento, y, a continuación, se describen las restauraciones de niveles más representativas de la evolución estructural en el bloque.

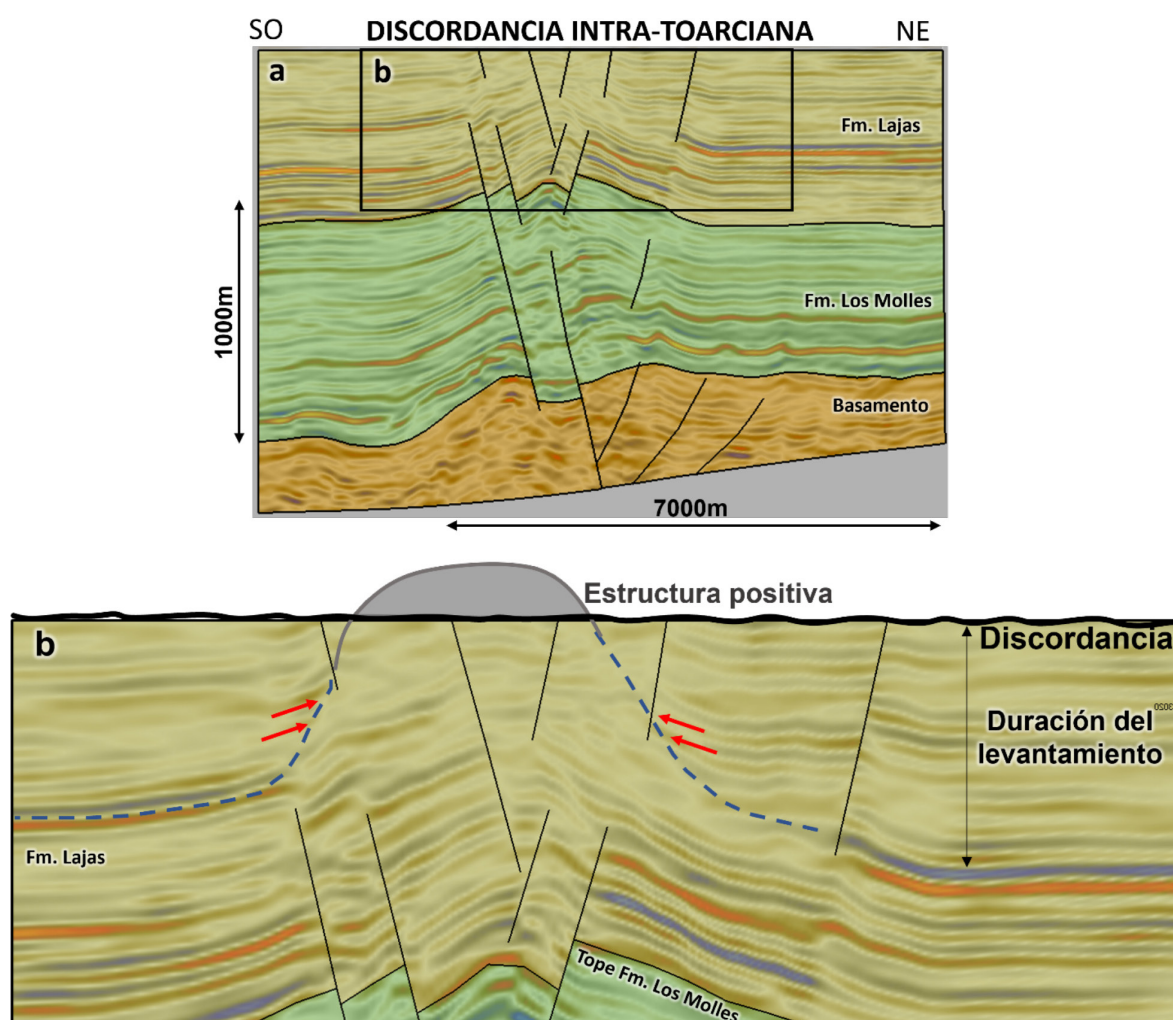


Figura 6. a) Restauración al tope de la discontinuidad Intratoarciana en la línea sísmica SO-NE de la Figura 4. b) Ampliación de la interpretación de la estructura positiva erosionada por esta discordancia. Los sedimentos se disponen en relación de onlap sobre la estructura (flechas rojas). Se muestra la duración del levantamiento de la estructura mediante los reflectores sísmicos de la derecha de la imagen.

Restauración a la Discordancia Intratoarciana

En la sección de la Figura 6 se observa una secuencia de eventos muy relevante a nivel estructural: (1) Transpresión y generación de una estructura en flor positiva; (2) Depositación en los flancos de la estructura positiva (punteada en azul) en forma simultánea con el levantamiento. Las flechas rojas en la Figura señalan la relación de *onlap* entre los reflectores sísmicos y dicha estructura. Hacia los bordes del anticlinal se puede observar claramente el tiempo acontecido por el levantamiento; (3) Procesos erosivos asociados a la discordancia habrían eliminado la cresta de la estructura anticlinal interpretada en la Figura 6a en línea punteada azul; (4) En una etapa de deformación posterior y reactivación se sobre-impone una dinámica extensional responsable de la ocurrencia de pequeños *pull-apart*, como el que se observa en el tope de la Formación Molles. Es importante aclarar que las fallas normales de la Formación Molles se interpretan como fallas generadas coetáneas con el plegamiento, ya que la cinemática convergente genera zonas de contracción y extensión (en menor porcentaje) debido a la trayectoria curva que tienen las fallas dentro de la zona de cizalla. La Figura 6b representa los últimos tres puntos descriptos.

Restauración al tope de la Formación Vaca Muerta

La falla F1 de la Figura 7 se encontraba con baja actividad durante la depositación de las unidades próximas al tope de la Formación Vaca Muerta. Esto queda de manifiesto al observar

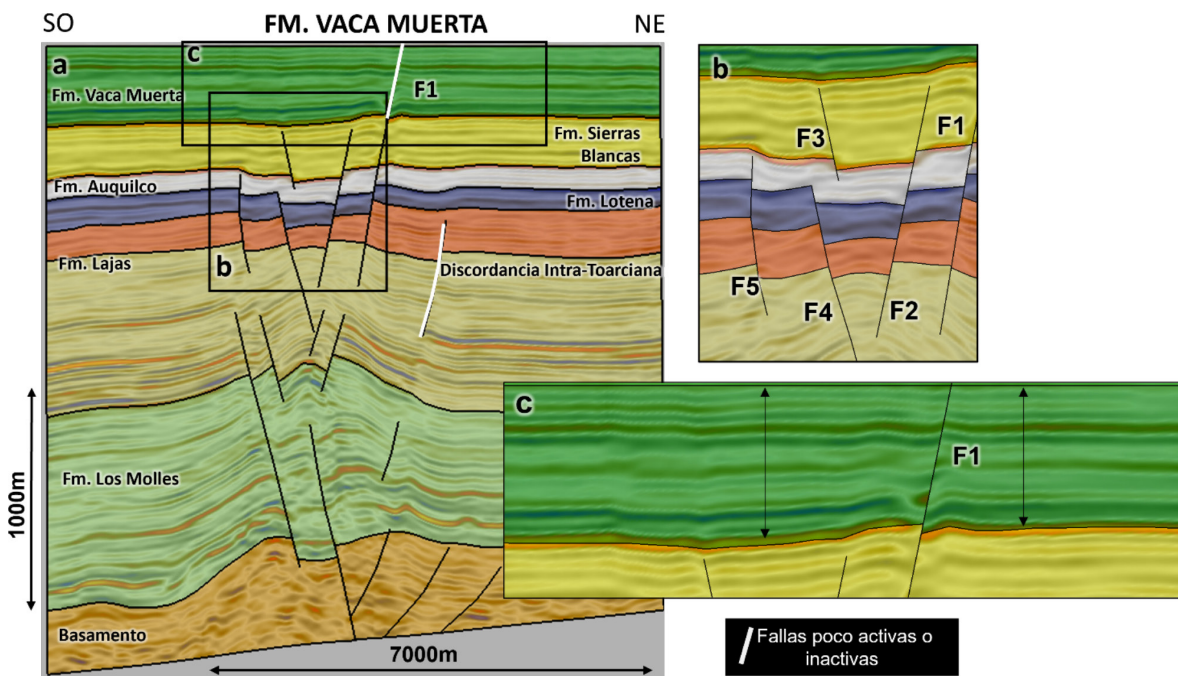


Figura 7. a) Restauración al tope de la Formación Vaca Muerta en la línea sísmica SO-NE de la Figura 4. Se muestra una ampliación para observar detalles de: b) fallas activas del Kimeridgiano, c) depocentro por actividad de fallas del Kimeridgiano.

continuidad de los horizontes sísmicos de un lado y del otro de dicha estructura. Sin embargo, se infiere un sutil movimiento hacia abajo de las unidades de la base de la Formación Vaca Muerta, en la pared colgante de F1. Las fallas F2 a F5 se originaron con anterioridad a la sedimentación de la Formación Vaca Muerta (Kimeridgiano) (Fig. 7b) y contribuyeron a la generación de un depocentro local hacia el SO de F1. Nótese el aumento en el espesor desde el NE hacia el SO en la unidad con sombreado color verde (Fig. 7c).

Restauración al tope de la Formación Quintuco

La falla normal F1 de la Figura 8 se encontraba activa al momento de la depositación de la Formación Quintuco, lo cual queda evidenciado por el desarrollo de estratos de crecimiento y por el aumento de espesor de dicha unidad hacia el SO. De esta manera puede observarse que el rechazo de F1 es máximo en la base de Quintuco (50 m aprox.) y que luego disminuye en profundidad hasta hacerse casi nulo en la base de la Formación Lajas.

Probablemente las fallas F3 a F5 estaban activas en este período, ya que, si bien no cortan estos niveles, provocan un plegamiento en los niveles inferiores de la Formación Quintuco.

ANÁLISIS DEL CAMPO DE ESFUERZOS

De acuerdo con la conclusión de la restauración geomecánica se definen dos procesos en el segmento de Loma La Lata Oeste del lineamiento del cual forma parte con Lindero Atravesado y El Cordón que contribuyen a su reactivación. La formación de una estructura en flor positiva -cuyo relieve estructural es de un centenar de metros o más, y que está claramente definida por el onlap de los estratos de crecimiento (Fig. 6)- en el Jurásico Medio durante la discordancia Intratoarciana, y una flor negativa durante la discordancia Intravalanginiana en el Cretácico, en el mismo lineamiento, indica que el campo de esfuerzos debe tener una polaridad opuesta en cada evento.

Para analizar la orientación de los campos de esfuerzos de cada evento se usó el programa de placas tectónicas GPlates en el cual se reconstruyen los modelos geológicos y paleogeográficos a través del tiempo, utilizando la reconstrucción de las líneas de costas y rotaciones de Muller *et al.* (2019), y la paleogeografía de Scotese Paleoproject Map, en una grilla de puntos de coordenadas en un sistema Mercator. La distancia entre los puntos es igual a una superficie esférica tal como la Tierra. La utilización de la grilla tiene un uso principal en la asociación de la cinemática de las placas y su modelo geodinámico para calcular las orientaciones y velocidad de los eventos a través del tiempo en cada nodo.

El evento durante la discordancia Intratoarciana que produjo la estructura en flor positiva involucrando términos del basamento y de la mitad del Grupo Cuyo responde necesariamente a

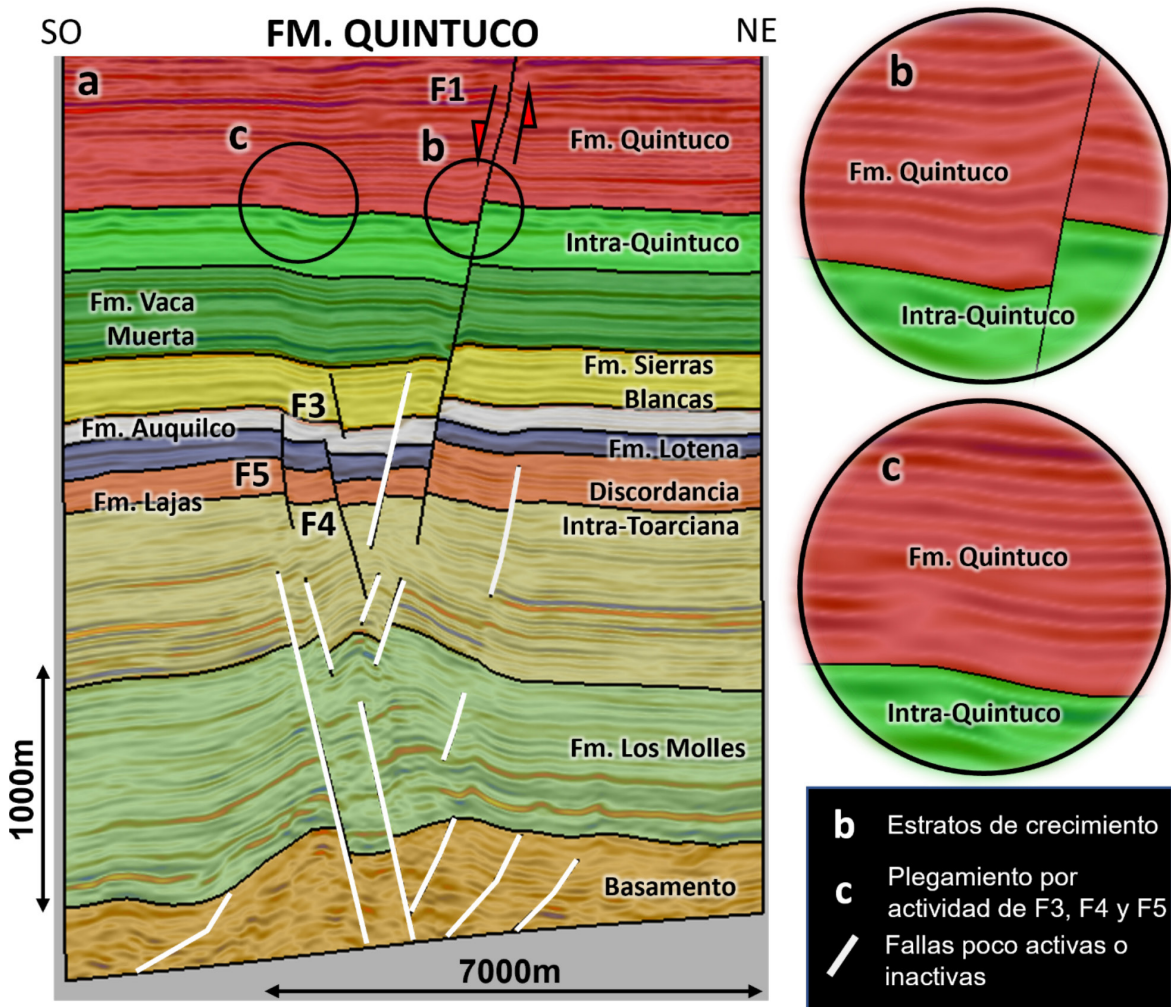


Figura 8. a) Restauración al tope de la Formación Quintuco en la línea sísmica SO-NE de la Figura 4. Se muestra una ampliación para observar detalles de: b) estratos de crecimiento, c) plegamiento por actividad de las fallas F3, F4 y F5. En blanco las fallas que se encontraban poco activas o inactivas para este tiempo geológico.

una reactivación lateral izquierdo del lineamiento del basamento. De acuerdo con la orientación del lineamiento LA-ECO-LLLO, con un promedio de $N110^\circ$ se necesita una orientación del esfuerzo menor para producir tal cinemática. En la reconstrucción a los 178 Ma se observa cómo la orientación y velocidad de la placa Aluk (Fig. 9a) tiene las propiedades adecuadas para reactivar el lineamiento de manera lateral izquierdo y por lo tanto concuerda con el análisis de interpretación sísmica y restauración geomecánica.

El panorama durante el Cretácico y particularmente a los 135 Ma durante la discordancia Intra-valanginiana cambia radicalmente (Fig. 9b), los vectores tienen una orientación Noroeste y una menor velocidad relativa al evento de los 178 Ma. La orientación Noroeste del movimiento de Aluk en este tiempo, que es levemente superior a la orientación del lineamiento LA-ECO-LLLO, produce la reactivación lateral derecho que produce la estructura en flor negativa y el consecuente cortejo de fallas normales en echelon a lo largo de dicho lineamiento.

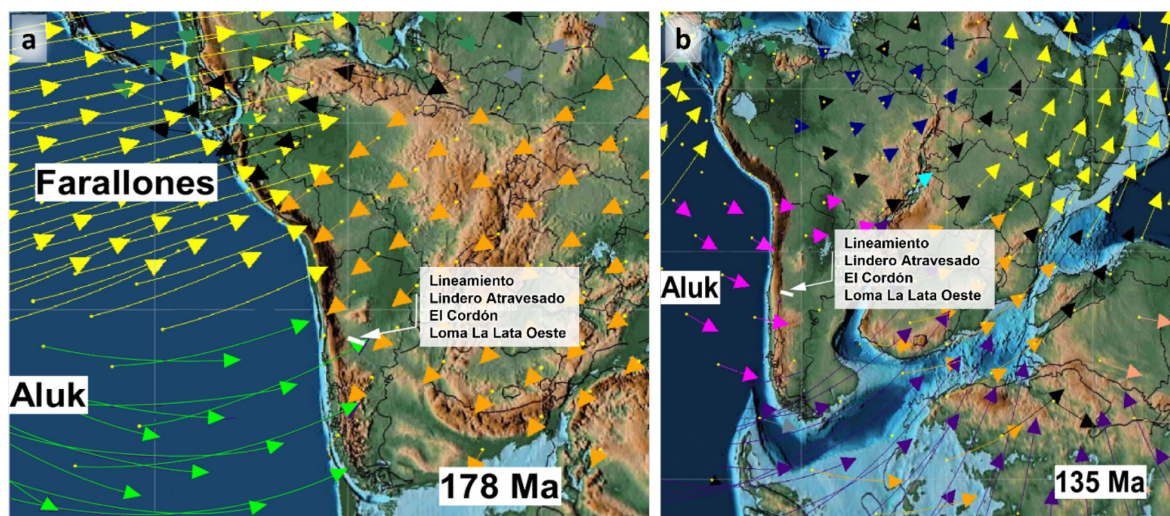


Figura 9. Reconstrucción paleogeográfica y orientación y magnitud de las velocidades de convergencia a los: a) 178Ma durante la discordancia Intratoarciana, b) 135Ma durante la discordancia Intravalanginiana.

Estas reconstrucciones paleogeográficas permiten analizar el comportamiento de las reactivaciones de fallas o lineamientos, la distribución de los campos de esfuerzos locales y la presencia de fracturas y fallas subsísmicas, mediante modelos numéricos que implican soluciones para casos con valores límites elásticos de dislocaciones angulares en un espacio total infinito a la mitad de un espacio semi-infinito compuesto de un material isotrópico lineal-elástico.

Las fallas interpretadas en los datos sísmicos en la plataforma Petrel, son discretizadas en elementos triangulares con condiciones límites como desplazamiento constante y/o tracción para capturar las relaciones entre la geometría de la falla, la distribución de desplazamientos y el campo de esfuerzos remoto perturbado, teniendo en cuenta la orientación de los lineamientos y la orientación de los esfuerzos remotos tomados de las reconstrucciones paleogeográficas.

Este lineamiento está conformado por fallas que están confinadas a la corteza y por lo tanto se definen como fallas transcurrentes (Sylvester 1988), que en su reactivación se pueden encontrar deformaciones contraccionales, extensionales o desplazamiento lateral puro dependiendo en gran porcentaje de la geometría de la traza de la falla. De esta manera el lineamiento Lindero Atravesado-El Cordón-Loma La Lata Oeste, cuya orientación es de N110°, tuvo una reactivación lateral izquierda oblicua debido a que el esfuerzo remoto horizontal máximo es N65°, lo que produjo una estructura positiva en las unidades jurásicas en tiempos de la discordancia Intratoarciana (Fig. 10).

En el *depth-slice* de la Figura 10 se observan los campos de desplazamiento de los bloques limitados por fallas dentro del lineamiento. Los planos de fallas fueron suprimidos porque la cantidad y altura de los mismos no permite visualizar los campos de desplazamiento y por lo tanto se visualizan las intersecciones de los planos de falla con el *depth-slice* que se encuentra a una

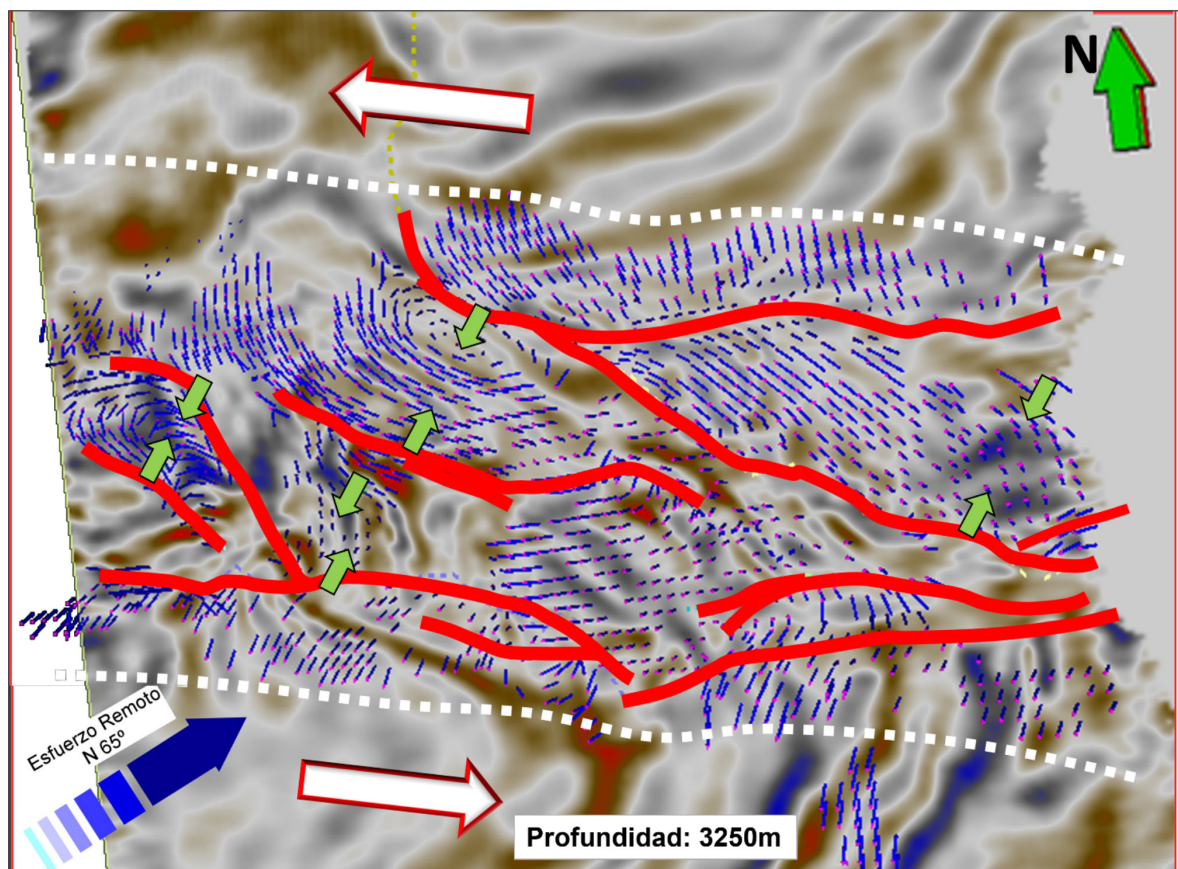
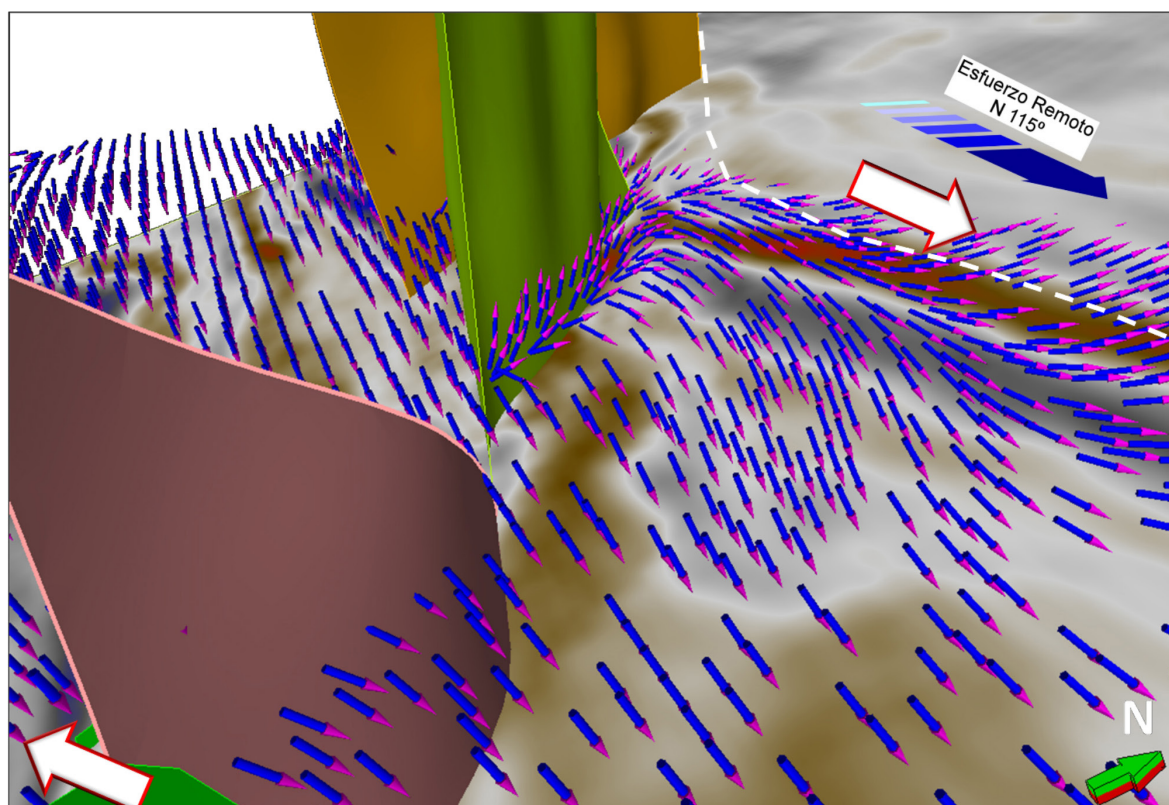


Figura 10. Lineamiento LLLO, limitado por las líneas blancas punteadas, en una vista en planta de la amplitud sísmica a una profundidad de 3250 m, mostrando las intersecciones de las fallas con el corte en profundidad en rojo y la distribución del campo de desplazamientos de los bloques en azul al tiempo de la discordancia Intratoarciana. Para su ubicación ver Figura 4.

profundidad de 3250 m correspondiente a las proximidades del tope de la Formación Los Molles. Claramente, los patrones de desplazamiento responden a la orientación de los segmentos de falla respecto de la orientación del esfuerzo remoto, inclusive dentro del cambio de orientación de las fallas individuales se registran cambios de los campos de desplazamiento. En consecuencia, los patrones complejos de la Figura responden a un movimiento lateral izquierdo y no a un acomodamiento a una subsidencia vertical. Inclusive hay zonas donde se observa la formación de estructuras positivas, señaladas con pequeñas flechas verdes en la Figura 10, de acuerdo con la cinemática definida.

A una profundidad de 2500 m, cercana a la base de la Formación Vaca Muerta se observan los planos de fallas con un patrón en echelon característico de éste y otros lineamientos en la zona central de la Cuenca Neuquina que afectó a unidades del Cretácico Inferior. El campo de desplazamiento sobreimpuesto a la zona de cizalla de orientación N110° muestra una orientación acorde con la de un esfuerzo máximo horizontal remoto N115°, levemente superior a la orientación del lineamiento, lo que produce un movimiento lateral derecho en el lineamiento Loma La Lata Oeste. En la Figura 11, se observa en detalle la interacción de los esfuerzos con los planos de fallas,

mostrando la perturbación de un campo de esfuerzo tensional representado por el campo de desplazamiento, que se acomodan a un proceso de desplazamiento lateral derecho produciendo una reactivación opuesta a la Intratoarciana dentro del mismo lineamiento. Las flechas están indicando un movimiento hacia abajo de los bloques en el oeste de la Figura y un movimiento lateral oblicuo en la parte oriental, típico de divergencias oblicuas.



Por otra parte, desde el punto de vista geomecánico es necesario conocer el estado de esfuerzos horizontales actuales asociados a un campo particular. En este sentido, tanto la magnitud como la determinación de la dirección de los esfuerzos horizontales es clave para el análisis de estabilidad de pozo, el diseño de la fractura hidráulica y la determinación de la dirección de los pozos horizontales actuales. Para esta última, se realizan análisis de imágenes para determinar la dirección de la aparición de *breakouts*, que se presentan en dirección del esfuerzo horizontal mínimo y, por otra parte, se interpretan fracturas inducidas coincidentes con la dirección del esfuerzo horizontal máximo. En la zona de estudio, se cuenta con varias imágenes de pozo como se puede observar en la Figura 12. El resultado de la interpretación sugiere que la dirección del esfuerzo horizontal

máximo es en promedio $N100^\circ \pm 15^\circ$. Este resultado es concordante con otros campos cercanos a la zona de estudio y en general con el estado tensional actual de la Cuenca Neuquina. Existe una ligera variación respecto a la dirección del esfuerzo máximo horizontal remoto $N115^\circ$ (obtenida del mapa de convergencia de placas mostrado en la Figura 9), pero que es aceptable teniendo la complejidad estructural de las zonas vecinas a los pozos donde se tomaron las imágenes y la rotación en los vectores de desplazamiento observados en la Figura 10. Las implicaciones de la dirección de esfuerzos en términos del lineamiento de los pozos horizontales, sugiere en principio que se siga una dirección $N10^\circ$, sin embargo, esto se descarta por optimización del diseño factoría y se sugiere como orientación de los pozos N-S. En principio, se sugiere una separación mínima de 250-300 m de los pozos a las zonas de falla para reducir el riesgo de tiempos no productivos por perforación en zonas con daño por fracturamiento natural y pérdida de presión poral por permeabilidad secundaria. Aunque debe ajustarse mediante un modelado con la interpretación de las fallas y determinar las zonas de mayor o menor intensidad de fracturación.

La Figura 12 combina las imágenes de esfuerzos con un atributo de *dip* calculado a la base de la Formación Vaca Muerta con la información de varios cubos sísmicos en tiempo, el cual ayuda a identificar de mejor manera los lineamientos o fallas principales en la superficie. En este marco semiregional se infiere la continuación del lineamiento de LA, que podría dar cierre hacia el oeste, sobre la falla de rumbo $N70^\circ$ que abarca las áreas de Aguada Pichana, La Calera y Loma Campana, indicada en la figura en línea punteada verde.

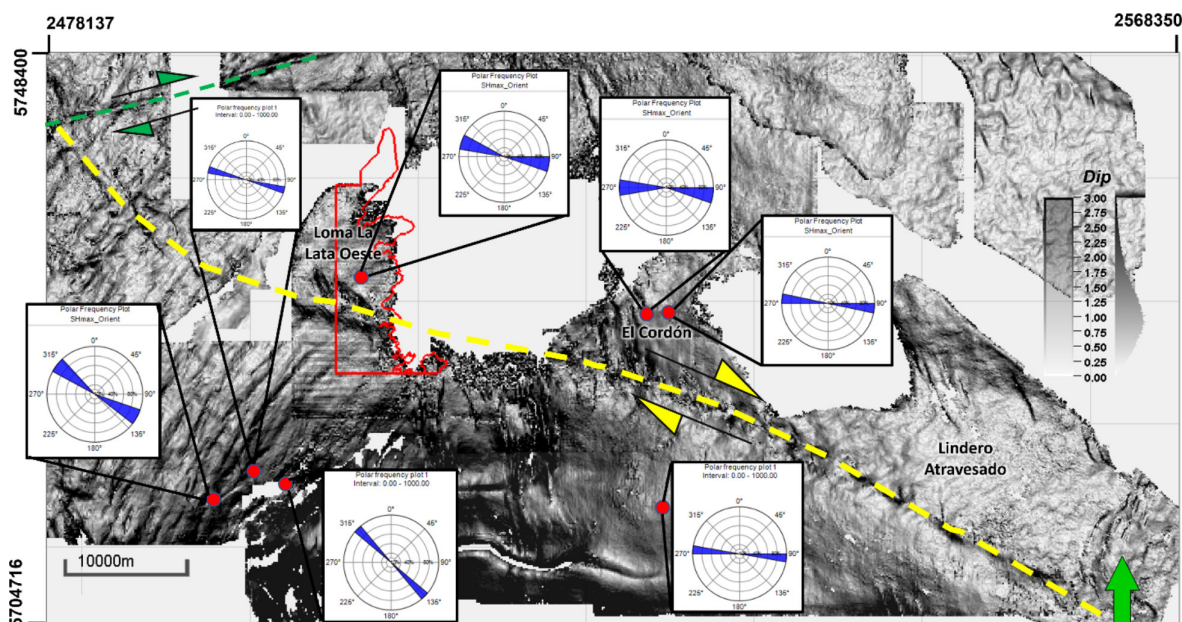


Figura 12. Atributo regional de buzamiento (dip) entre 0° y 3° a la base de la Formación Vaca Muerta y marco estructural de LLLO. Rosetas que indican la dirección del esfuerzo horizontal máximo con base en el análisis de *breakouts* y fracturas inducidas en las formaciones Quintuco - Vaca Muerta y Tordillo en imágenes de pozo. Para su ubicación ver Figura 3.

CONCLUSIONES

El corredor de cizalla Lindero Atravesado-El Cordón-Loma La Lata Oeste, dominado por fallas normales en echelon en las unidades cretácicas y particularmente en la Formación Vaca Muerta, es el producto de la reactivación de lineamientos previos del basamento. Este lineamiento, presente en el Engolfamiento de la Cuenca Neuquina, tiene una extensión que abarca alrededor de 100 km con una orientación N110°.

Los nuevos datos sísmicos, la restauración geomecánica y la reconstrucción confirman la superposición de dos eventos en este lineamiento, particularmente en el segmento Loma La Lata Oeste y en El Cordón, donde se ven características similares en la información sísmica. Uno de ellos hace referencia a una estructura en flor positiva, ocurrida durante la discordancia Intratoarciana a los 178 Ma, y el otro a una flor negativa, producto de la discordancia Intravalanginiana a los 135 Ma, debido a un cambio del ángulo de convergencia de la Placa Aluk para esas edades.

Como se observa en el mapa de estos corredores de cizallas, podrían encontrarse procesos similares a los ocurridos en este lineamiento, aunque se debe analizar en detalle cada uno y los segmentos que lo integran. Las reactivaciones de estos lineamientos con cinemáticas de desplazamiento lateral dependen de la orientación de los mismos respecto de la orientación de los esfuerzos generados en la evolución de la cuenca.

A partir del análisis de los *breakouts* y fracturas inducidas en imágenes de pozo, se considera un régimen de esfuerzo máximo semiregional para la Formación Vaca Muerta cercano a la dirección $N100^\circ \pm 15^\circ$.

Este estudio muestra que existen esfuerzos locales en cercanías a las fallas (figuras 10 y 11), que no permitirían un desarrollo óptimo de las fracturas hidráulicas. Además, la perforación de pozos en esta zona genera el riesgo de pérdida total o parcial del pozo, o pérdida de producción debido a migración por fracturas naturales alrededor de las fallas.

La metodología propuesta para ajustar un distanciamiento prudente a la zona de fallas es realizar un modelado con la interpretación de fallas y determinar las zonas de mayor o menor intensidad de fracturación.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a YPF S.A. el permiso para publicar los datos sísmicos del área de estudio, a Daniela Ceccon por permitir realizar este análisis, a Ernesto Cristallini por sus aportes, a Pablo Giampaoli por sus sugerencias y predisposición y a todos nuestros compañeros de NOC Gas de YPF SA por sus contribuciones.

REFERENCIAS CITADAS

- Arregui, C., Gazzera, C., Seguí, C., Carbone, O. y Quiroga, J., 2005. Las trampas del eje Charco Bayo-El Caracol. En Kozlowski, E., Vergani, G., and Boll, A. (eds.), *Las Trampas de Hidrocarburos en las Cuenas Productivas de Argentina*, VI Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG, p. 239–260, Mar del Plata, Argentina.
- Bechis, F., Cristallini, E., Giambiagi, L., Yagupsky, D., Guzmán, C. y García, V., 2014. Transtensional tectonics induced by oblique reactivation of previous lithospheric anisotropies during the Late Triassic to Early Jurassic rifting in the Neuquén Basin: Insights from analog models. *Journal of Geodynamics*, v. 79, p. 1–17.
- Carbone, O., Franzese, J., Limeres, M., Delpino, D., y Martinez, R., 2011. El Ciclo Precuyano (Triásico Tardío-Jurásico Temprano) en la Cuenca Neuquina. En Leanza, H. A., Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J. C. and Vallés, J. M. (eds.), *Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén: Relatorio del 18° Congreso Geológico Argentino*, p. 63–76, Neuquén, Argentina.
- Chen, Y. W., Wu, J. y Suppe, J., 2019. Southward propagation of Nazca subduction along the Andes. *Nature*, v. 565, p. 441–447.
- Cobbald, P. R. y Rossello, E. A., 2003. Aptian to recent compressional deformation of the Neuquén Basin, Argentina. *Marine Petroleum Geology*, v. 20, p. 429–443.
- Cristallini, E., Bottesi, G., Gavarrino, A., Rodríguez, L., Tomezzoli, R. N. y Comeron, R., 2006. Syn-rift geometry of the Neuquén Basin in the north-eastern Neuquén Province, Argentina. En Kay, S. M. and Ramos, V. A., eds. *Evolution of the Andean margin: A tectonic and magmatic view from the andes to the Neuquén Basin (35°23' S lat)*. Geological Society of America Special Paper 407, p. 147–161.
- Cristallini, E., Tomezzoli, R., Pando, G., Gazzera, C., Martínez, J. M., Quiroga, J., Bühler, M., Bechis, F., Barredo, S. y Zambrano, O., 2009. Controles Precuyanos en la Estructura de la Cuenca Neuquina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, v. 65, no. 2, p. 248–264.
- Gangui, A. y 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 Galeazzi, S., González, G., Santiago, M., García, D., Maschio, L., González, R. y Ramírez Martínez, J. (eds.), *Simposio de Recursos No Convencionales: 9° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos*, IAPG, p. 341–364, Mendoza, Argentina.
- Howell, J. A., Schwarz, E., Spalletti, L. A. y Veiga, G. D., 2005. The Neuquén Basin: An overview. En Howell, J., Schwarz, E., Spalletti, L. A. y Veiga, G. D. (eds.), *The Neuquén Basin, Argentina: A case study in sequence stratigraphy and basin dynamics*. Geological Society Special Publication 252, p. 1–14, London.
- Jorgensen, L., Manceda, R. y Coppo, R., 2014. Impacto de las fracturas naturales en la producción de un yacimiento tight: Fm. Lajas, Cuenca Neuquina. En Galeazzi, S., González, G., Santiago, M., García, D., Maschio, L., González, R. y Ramírez Martínez, J. (eds.), *Simposio de Recursos No Convencionales: 9° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos*, IAPG, p. 187–208, Mendoza, Argentina.

- Leanza, H. A., Kietzmann, D. A., Iglesia Llanos, M. P. y Kohan Martínez, M., 2020. Stratigraphic context: Cyclostratigraphy, magnetostratigraphy, and seismic stratigraphy En Minisini, D., Fantín, M., Lanusse Noguera, I. y Leanza, H. A. (eds.), Integrated geology of unconventional: The case of the Vaca Muerta play, Argentina, AAPG Memoir 121, p. 39–60.
- Leanza, H. 2009. Las principales discordancias del Mesozoico de la Cuenca Neuquina según observaciones de superficie. Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales 11(2), p. 145-184.
- Maerten, L. y Maerten, F., 2006. Chronologique modeling of faulted and fractured reservoirs using geomechanically based restoration: Technique and industry applications: American Association of Petroleum Geologist Bulletin, v. 90, p. 1201-1226.
- Marchal, D., Manceda, R., Fabián Domínguez, R. y Sattler, F., 2020. Structural Geology: Tectonic History, Macrostructures, Regional Fault Map, Fault Systems, Second-Order Structures, and Impact of the Inheritance. En Minisini, D., Fantín, M., Lanusse Noguera, I., and Leanza, H. A. (eds.), Integrated geology of unconventional: The case of the Vaca Muerta play, Argentina, AAPG Memoir 121, p. 99–140.
- Mosquera, A. y Ramos, V. A., 2006. Intraplate deformation in the Neuquén embayment. Geological Society of America Special Paper 407, pp. 97–123.
- Mosquera, A. y Ramos V. A., 2005. Intraplate deformation in the Neuquén embayment. 16° Congreso Geológico Argentino, p. 193–202, La Plata, Argentina.
- Mosquera, A., Silvestro, J., Ramos, V. A., Alarcón, M. y Zubiri, M., 2011. La estructura de la Dorsal de Huincul. En Leanza, H. A., Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J. C. y Vallés, J. M. (eds.), Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén. Relatorio del 18° Congreso Geológico Argentino, p. 385–397, Neuquén, Argentina.
- Müller, R. D., Zahirovic, S., Williams, S. E., Cannon, J., Seton, M., Bower, D. J., Tetley, M. G., Heine, C., Le Breton, E., Liu, S., Russell, S. H. J., Yang, T., Leonard, J. y Gurnis, M., 2019. A Global Plate Model Including Lithospheric Deformation Along Major Rifts and Orogens Since the Triassic. Tectonics, v. 38. p.1884–1907.
- Pángaro, F., Martinez, R., Sattler, F. y Bettini, F. H., 2011. El Flanco Oriental, en Leanza, H. A., Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J. C., y Vallés, J. M., eds. Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén. Relatorio del 18° Congreso Geológico Argentino, pp. 407–418, Neuquén, Argentina.
- Ramos, V. A. y Folguera, A., 2005. Tectonic evolution of the Andes of Neuquén: Constraints derived from the magmatic arc and foreland deformation. En Veiga, G. D., Spalletti, L. A., Howell, J. A., and Schwarz, E. (eds.), The Neuquén Basin: A case study in sequence stratigraphy and basin dynamics. Geological Society Special Publication 252, p. 15–35, London.
- Ramos, V. A., Mosquera, A., Folguera, A. y García Morabito, E., 2011. Evolución tectónica de los Andes y del Engolfamiento neuquino adyacente. En Leanza, H. A., Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J. C. y Vallés, J. M. (eds.), Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén. Relatorio del 18° Congreso Geológico Argentino, pp. 335–348, Neuquén, Argentina.
- Ramos, V. A., Litvak, V. D., Folguera, A. y Spagnuolo, M., 2014. An Andean tectonic cycle: From crustal thickening to extension in a thin crust (34°23'7"SL). Geoscience Frontiers, v. 5, pp. 351–367.

- Ramos, V. A., Naipauer, M., Leanza, H. A. y Sigismondi, M. E., 2020. An exceptional tectonic setting along the Andean continental margin. En Minisini, D., Fantín, M., Lanusse Noguera, I. y Leanza, H. A. (eds.), *Integrated geology of unconventional: The case of the Vaca Muerta play, Argentina*. AAPG Memoir 121, p. 25–38.
- Rojas Vera, E., Folguera, A., Zamora Valcarce, G., Bottesi, G. y Ramos, V. A., 2014. Structure and development of the Andean system between 30° and 39°S. *Journal of Geodynamics*, v. 73, pp. 34–52.
- Silvestro, J. y Zubiri, M., 2008. Convergencia oblicua: Modelo estructural alternativo para la Dorsal Neuquina (39°S)–Neuquén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, v. 63, no. 1, p. 49–64.
- Sylvester, A. 1988. Strike-slip faults. *Geological Society of America Bulletin*, v. 100, pp. 1666–1703, 31 figs., 1 table.
- Tankard, A. J., Uliana, M. A., Welsink, H. J., Ramos, V. A., Turic, M., França, A. B. y Milani, E. J., 1995. Tectonic controls of basin evolution in southwestern Gondwana. En Tankard, A. J., Suárez Soruco, R. y Welsink, H. J. (eds.), *Petroleum basins of South America*. AAPG Memoir 62, p. 5–52.
- Tunik, M., Folguera, A., Naipauer, M., Pimentel, M. y Ramos, V. A., 2010. Early uplift and orogenic deformation in the Neuquén Basin: Constraints on the Andean uplift from U-Pb and Hf isotopic data of detrital zircons. *Tectonophysics*, v. 489, p. 258–273.
- Uliana, M., Biddle, K. y Cerdán, J., 1989. Mesozoic extension and the formation of Argentina sedimentary basins. En Tankard, A. J. y Balkwill, R. H. (eds.), *Extensional Tectonics and Stratigraphy of the North Atlantic Margin*. AAPG Memoir 46, p. 599–613.
- Vergani, G., Tankard, A., Belotti, H. y Welsink, H., 1995. Tectonic evolution and paleogeography of the Neuquén Basin, Argentina. En Tankard, A., Suárez, R. y Welsink, H. (eds.), *Petroleum basins of South America*. AAPG Memoir 62, p. 383–402.
- Zamora Valcarce, G., Zapata, T., Del Pino, D. y Ansa, A., 2006. Structural evolution and magmatic characteristics of the Agrio fold-and-thrust belt. En Kay, S. M. y Ramos, V. A. (eds.), *Evolution of an Andean Margin: A tectonic and magmatic view from the Andes to the Neuquén Basin (35239°S Lat)*. *Geological Society of America Special Paper* 407, p. 125–145.