

RASGOS ESTRUCTURALES DEL HEMIGRABEN LOS TORDILLOS, CUENCA CUYANA, ARGENTINA

Pablo Giampaoli¹

1: YPF S.A., Gerencia de Exporación, Buenos Aires, Argentina. pablo.giampaoli@ypf.com

Palabras clave: rift triásico, extensión oblicua, reactivación de fallas, Cuenca Cuyana

ABSTRACT

Structural features of Los Tordillos half-graben, Cuyo Basin, Argentina

This sub-basin has two tectonic depressions named Los Algarrobos and Los Tordillos, separated by a positive feature called Los Retoños. The sedimentary fill is made up of more than 2000 meters of continental Triassic deposits of variable thickness and around 1000 meters of foreland tertiary deposits related to the Andean orogeny. In this article, the half-graben structural configuration is analyzed and interpreted through the integration of gravimetric, magnetometric, seismic and well data. The Bouguer anomaly map shows the location and strike of the main structural lows and highs, while the depth to the magnetic basement map indicates that high angle lineaments are NNE-SSO and ONO-ESE oriented. The Los Algarrobos depocenter has an anticline-syncline pair filled with growth beds. The Los Tordillos trough is a wedge-shaped half-graben that deepens to the south against an active border fault. Secondary deformation structures include antithetic planar normal faults that cut through the basement and slightly curved growth faults that were active during synrift accumulation. The Los Retoños high could be related to a transfer zone or lateral ramp that accommodates along strike extension variations and connects detachment levels located at different depths. Hangingwall structures can be related to extension above single planar or flat-ramp shaped master faults formed by the reactivation of medium to low angle discontinuities. Secondary structures orientation, shape and lateral extent indicate that the overall strain pattern was coaxial and that the paleostress direction was orthogonal or oblique to the master fault. Basement fabric reactivation could be responsible for strike-slip or oblique-slip structures related to stress partitioning under local non-coaxial deformation. Cross-section restoration helped to identify a second rift event that could be linked to existent upper Triassic to middle Jurassic basic intraplate magmatism. Calculated extension was 3,25 km (32%) at the initial rift stage and 1,72 km (11%) during the second rift event.

INTRODUCCIÓN

La zona de estudio se ubica dentro del bloque legal Los Tordillos Oeste, abarca una superficie de 2629 km² y se localiza a 200 km al sudeste de la ciudad de Mendoza, próxima al límite con la provincia de San Luis (Figuras 1a y 1b). Desde un punto de vista morfoestructural, la misma se ubica en la denominada “Llanura Oriental fluvio-eólica” o “de La Travesía” (Polansky 1954). Esta planicie se caracteriza por su poco relieve topográfico (entre 400 y 600 metros), escasa pendiente

y por estar rellena de potentes series de sedimentos arenosos, limosos y arcillosos de origen continental (Abraham 2000).

El subsuelo de esta comarca forma parte de la cuenca Cuyana (Figura 1a), la cual ha sido interpretada como un *rift* pasivo (Uliana *et al.* 1989) conformado por varios hemigrábenes de orientación general noroeste y rellenos de espesas secuencias continentales clásticas y piroclásticas de edad triásica que en ocasiones alcanzan los tres mil metros de espesor (Rolleri y Criado Roqué 1968; Barredo y Ramos 2010).

El bloque cuenta con dos pozos de estudio y diez sondeos exploratorios perforados entre los años 1966 y 1974. La información geofísica disponible incluye 740 km de sísmica 2D de calidad regular, 395 km² de sísmica 3D de buena calidad y 6455 km de gravimetría y magnetometría aérea.

Dentro del área del hemigraben se distinguen dos zonas deprimidas denominadas Los Algarrobos y Los Tordillos, separadas por un alto relativo llamado Los Retoños (Figura 1c).

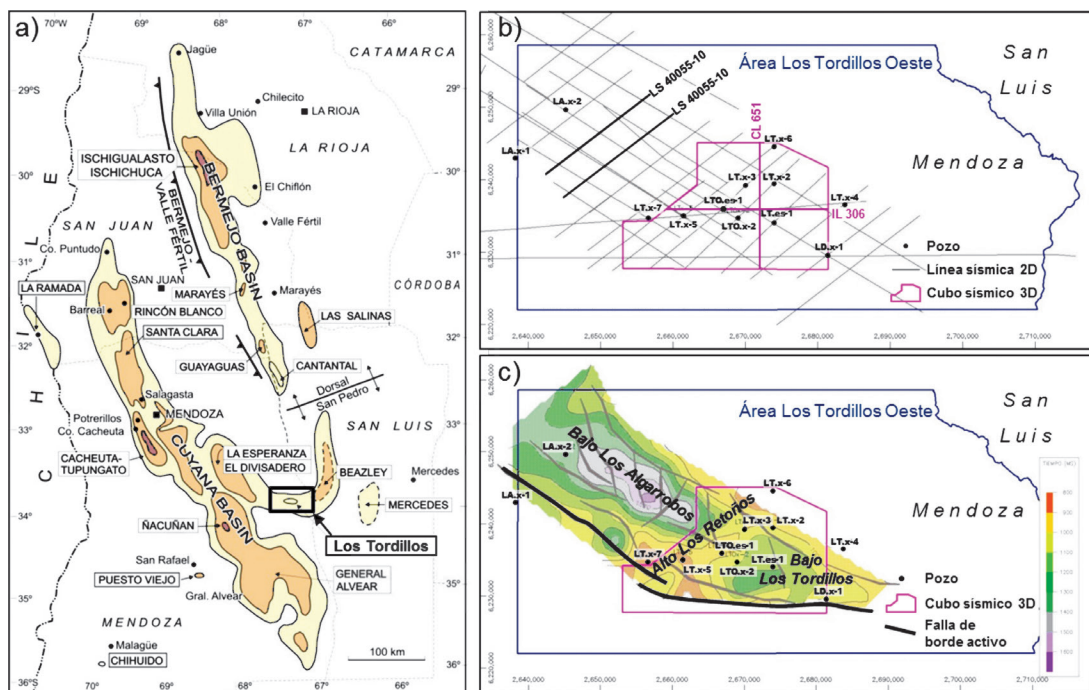


Figura 1. Mapas de ubicación: a) Localización del depocentro Los Tordillos en el contexto de las cuencas sedimentarias del centro-oeste de Argentina (Stipanovic y Marsicano 2002); b) Ubicación de los pozos, líneas sísmicas 2D y cubo sísmico 3D dentro del bloque legal Los Tordillos Oeste; c) Mapa estructural en tiempo del techo de la F. Potrerillos (contornos cada 100 msec) y localización de los principales rasgos estructurales.

ESTRATIGRAFÍA

La columna sedimentaria alcanza un espesor superior a los 3000 metros en la zona del depocentro Los Tordillos, dos tercios de los cuales corresponden a depósitos triásicos de espesor variable y el tercio restante al terciario sinorogénico (Figura 2).

La información sobre los tipos litológicos proviene exclusivamente de los datos de pozos (recortes de roca, coronas y perfiles), mientras que la geometría y distribución espacial del relleno sedimentario se deriva también de la interpretación de la información geofísica.

Los nombres formacionales y edad de los terrenos atravesados fueron asignados en base a la similitud litológica y contenido palinológico de los equivalentes estratigráficos presentes en los afloramientos del Río Mendoza y en el subsuelo de la Cuenca Cuyana (Yrigoyen y Stover 1970; Stipanovic 2002 y referencias allí citadas). Estudios recientes de la paleoflora hallada en las muestras de roca confirman la edad triásica media a tardía de estos depósitos (Gema 2003a y 2003b).

El basamento cristalino de la cuenca ha sido alcanzado en varios de los pozos perforados (Figuras 2 y 3b) y está compuesto en su mayoría por esquistos micáceos verdosos y menos frecuentemente por granitos porfíricos rosados (Morales Chamón 1971). Este cuadro es semejante al observado en la Sierra Grande de San Luis donde predominan los esquistos micáceos localmente intruidos por rocas graníticas y migmatitas (Gordillo y Lencinas 1979). Las rocas metamórficas de esta región tienen asignada una edad proterozoica mientras que los granitoides plutónicos se habrían emplazado durante el paleozoico inferior (González *et al.* 2004).

El relleno triásico se inicia con un conglomerado de relativamente poco espesor (alrededor de 150 metros) y distribución restringida, atribuido a la Fm Cerro de Las Cabras. El carácter local de estos depósitos se desprende del hecho de que fueron descriptos solamente en dos de los ocho pozos que alcanzaron el basamento (LT.x-5 y LD.x-1), ambos situados en las cercanías del borde activo de la cuenca (Figuras 1c y 2).

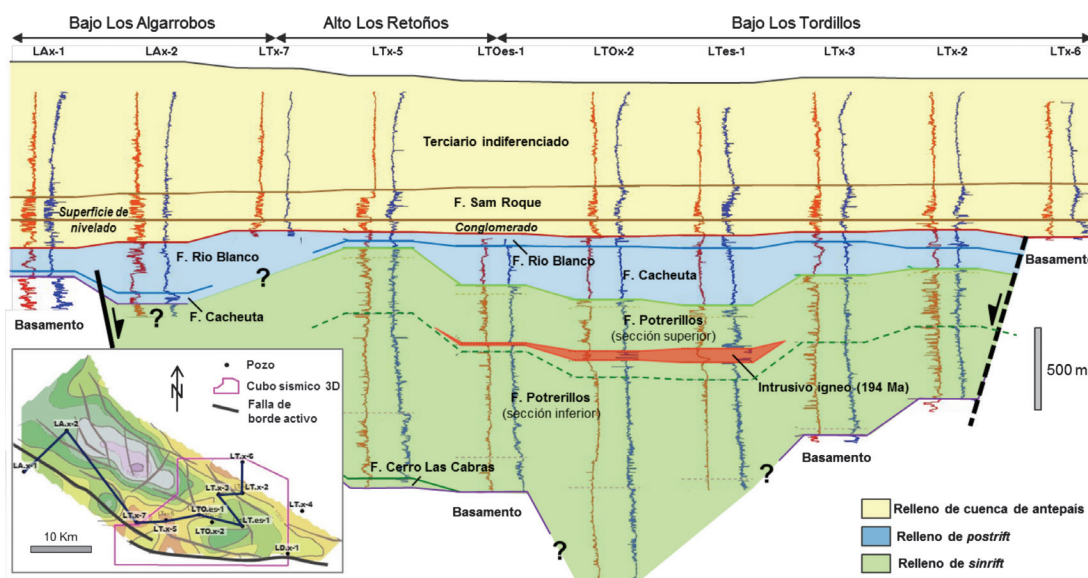


Figura 2. Corte estratigráfico entre pozos nivelado a un paquete arcilloso cercano a la base del terciario sinorogénico (ver la Figura 1c para la descripción del mapa de ubicación).

Continúa una potente secuencia sedimentaria de más de 1700 metros de espesor asignada a la Fm Potrerillos. La misma está conformada por una alternancia de areniscas tobáceas y pelitas negras con

restos de vegetales, dispuestas en un arreglo general grano y estrato-creciente (Figura 2). Estos depósitos tienen forma de cuña y aumentan de espesor en dirección al borde activo de la cuenca (Figuras 2 y 5a), pudiéndose diferenciar una sección inferior con mayor contenido piroclástico y una sección superior de composición más clástica (Zencich *et al.* 2004). Las formaciones Cerro Las Cabras y Potrerillos se habrían generado durante la etapa de *sinrift* de la cuenca (Kokogian *et al.* 1993; Spalletti 1999).

Por encima y engranando lateralmente siguen las pelitas negras bituminosas de la F. Cacheuta, las cuales registran la conexión de los depocentros individuales y la máxima expansión del lago sobre los márgenes de la Cuenca Cuyana cuenca (Kokogian *et al.* 1993). Los espesores registrados por los sondeos son variables, desde 45 metros en las cercanías del borde pasivo del hemigraben Los Tordillos (pozo LT.x-4), hasta 348 metros en parte profunda del depocentro (sondeo LT.es-1) (Figuras 1c y 2).

El registro estratigráfico del triásico en esta región culmina con los depósitos de la F. Río Blanco, litológicamente representada por tobas rosadas, grises, amarillentas y verdosas, con escasas intercalaciones de areniscas y pelitas tobáceas. Esta unidad se dispone en relación de paraconcordancia por encima de la Fm Cacheuta y tiene un espesor poco variable en la parte interna del hemigraben (promedio de 65 metros) pero que aumenta en las cercanías del borde activo (310 y 237 metros en los sondeos LA.x-2 y LD.x-1 respectivamente) (Figuras 1c y 2).

Si bien se considera que las formaciones Cacheuta y Río Blanco se habrían depositado bajo un régimen de subsidencia generalizada (etapa de *postrift*; Kokogian *et al.* 1993), las variaciones en los espesores indicarían que la subsidencia en el entorno del hemigraben continúa ejerciendo un control significativo en la generación de espacio de acomodación (Figura 2).

Hacia la mitad superior de la Fm Potrerillos y sobre la parte central del depocentro Los Tordillos, se destaca un filón capa extenso que alcanza los 82 metros de espesor en el sondeo LT.es-1 (Figura 2). Estudios realizados por Delpino y Bermúdez (2004) informan que se trata de una roca ígnea básica, con cristales de plagioclasas y anfíboles, cuya datación radimétrica por el método Ar/Ar arrojó una edad de 194 Ma. La clasificación geoquímica realizada sobre elementos mayoritarios y minoritarios muestra que es un basalto alcalino cuyas características se agrupan con las correspondientes a la colada de superficie de la Fm Punta de las Bardas. Otros cuerpos ígneos concordantes a la estratificación, pero de menor espesor, aparecen entre los estratos triásicos en la zona de los pozos LA.x-1 y LA.x-2, con edades correspondientes al Triásico Superior (221 ± 1 Ma) y Jurásico Medio (158 ± 4 Ma) respectivamente (Delpino y Bermúdez 2004). La intrusión de estos cuerpos ígneos en la columna triásica implica la existencia de uno o varios pulsos de actividad extensional posteriores a la etapa de *sinrift* principal de la cuenca.

Los depósitos continentales del terciario sinorogénico cubren en relación de discordancia angular o paralela a los estratos triásicos y al basamento. El relleno se inicia con la Fm San Roque, la cual presenta un conspicuo conglomerado polimíctico que aflora en varias localidades de la Provincia de San Luis (Flores 1979). En los pozos perforados en el hemigraben Los Tordillos, este conglomerado tiene alrededor de 20 metros de espesor y es cubierto por un paquete de 30 metros de arcillitas

rojizas lateralmente continuas (Figura 2). En subsuelo, la Fm San Roque culmina con una arenisca blanquecina, mediana a gruesa de alrededor de 200 metros de espesor. El resto del terciario está representado por una secuencia indiferenciada de areniscas gruesas friables, por encima de las cuales sigue una sucesión compuesta por arcillitas y limolitas rosadas con intercalaciones de areniscas gruesas y niveles de yeso nodular. La acumulación de estos sedimentos se habría iniciado durante el Neógeno en una cuenca de antepaís relacionada a la orogenia andina (Flores 1979; Yrigoyen 1993).

El espesor total del relleno sinorogénico es de aproximadamente 900 metros en el depocentro Los Tordillos y supera los 1500 metros en el bajo Los Algarrobos (Figura 2). Este aumento en el espesor de los estratos terciarios hacia el oeste de la cuenca se atribuye al incremento del efecto de la carga tectónica andina en la generación del espacio de acomodación.

ESTRUCTURA

El bajo de Los Algarrobos se ubica hacia el sector noroccidental del bloque, tiene forma alargada en la dirección NO-SE con un largo aproximado de 25 km y un ancho de alrededor de 5 km (Figura 1c). El bajo de Los Tordillos se ubica al sudeste de la estructura anterior de la cual está separada por un alto de orientación NE-SO (alto Los Retoños). El depocentro Los Tordillos es de forma más redondeada, ligeramente asimétrica en dirección E-O y tiene una longitud máxima de 12 km.

El mapa de anomalía de Bouger (Fugro 2009) refleja la posición relativa y la orientación de los elementos estructurales antes descriptos, pero en esta representación se invierten las relaciones de tamaño (Figura 3a). Esto podría deberse a la existencia de una columna sedimentaria más espesa en el depocentro de Los Tordillos o a una mayor abundancia de materiales densos (cuerpos ígneos, sedimentos volcanoclásticos o depósitos psefíticos proximales) en la zona de Los Algarrobos.

El mapa de la profundidad del basamento magnético (Fugro 2009) permite inferir la existencia de un zócalo heterogéneo fragmentado en numerosos polígonos de forma irregular y alrededor de 10 km de longitud (Figura 3b). Los bloques están delimitados por lineamientos orientados en dos direcciones preferenciales: NNE-SSO y ONO-ESE. En el sector donde coexisten pozos con basamento de composición metamórfica y granítica (región del alto Los Retoños) se aprecia una mayor abundancia de lineamientos de orientación NNE-SSO. Esto podría indicar que la heterogeneidad en la composición del basamento genera una respuesta mecánica particular ante los esfuerzos tensionales, resultando en una geometría compleja con mayor abundancia de estructuras de deformación frágil y posible partición de la deformación (Figuras 3b y 9).

Depocentro Los Algarrobos

Esta zona de acumulación de estratos triásicos dispone de datos sísmicos 2D y ha sido investigada

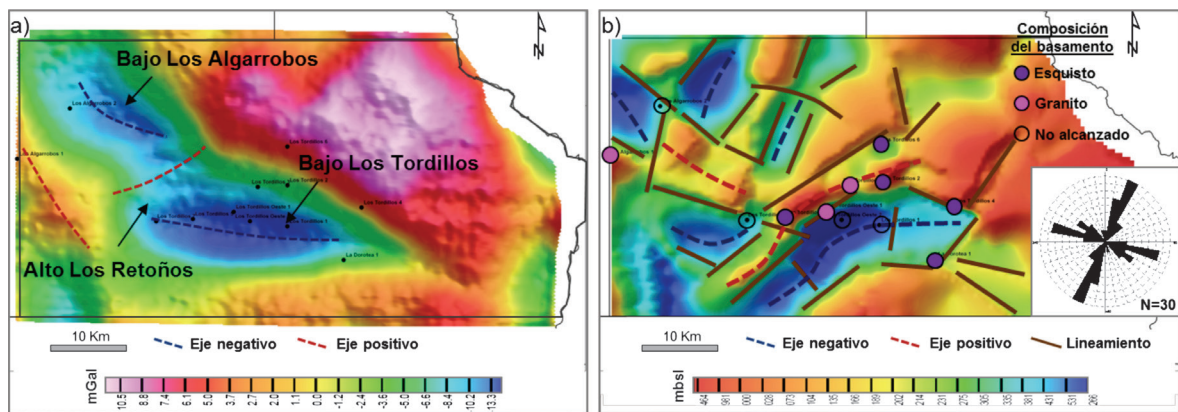


Figura 3. a) Mapa de anomalía de Bouger mostrando la respuesta gravimétrica de los principales elementos estructurales; b) Mapa de la profundidad del basamento magnético y gráfico de roseta de la orientación de los lineamientos interpretados. Se indica también la composición del basamento alcanzado por los pozos.

por dos pozos solamente: Los Algarrobo x-1 (julio de 1972) y Los Algarrobo x-2 (diciembre de 1974). Ambos sondeos atravesaron una porción reducida de la columna triásica (formaciones Río Blanco y Cacheuta), permaneciendo sin investigar la Fm Potrerillos y unidades más antiguas, las cuales podrían alcanzar espesores considerables de acuerdo a los datos geofísicos disponibles (Figuras 3a y 4).

El análisis de las geometrías de los reflectores en secciones sísmicas 2D perpendiculares al eje del depocentro permite distinguir los siguientes elementos estructurales y estratigráficos (Figura 4):

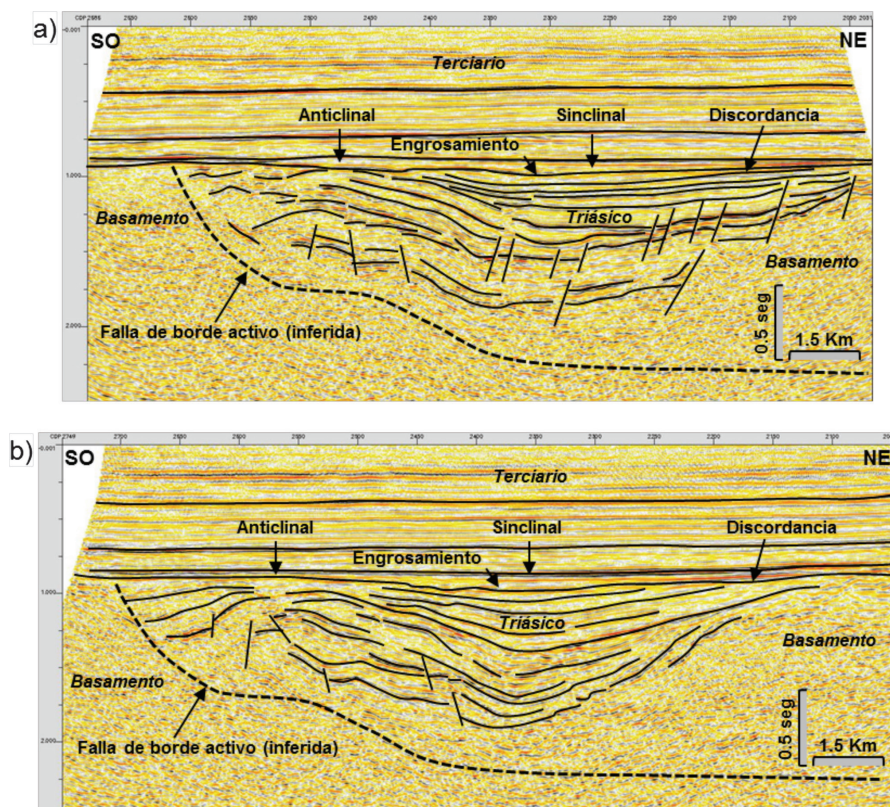


Figura 4. Interpretación de las líneas sísmicas 40055-10 (a) y 40056-10 (b) señalando los principales rasgos estructurales y estratigráficos observados en el depocentro Los Algarrobo (ver la Figura 1b para la ubicación).

Discordancia de la base del Terciario: en la zona de la cubeta sedimentaria este rasgo se destaca por la relación de truncamiento entre los reflectores sub-horizontales del terciario sinorogénico y los reflectores más inclinados de las unidades sedimentarias subyacentes. Fuera del ámbito de la cuenca, la discordancia queda evidenciada por el contraste de impedancias acústicas entre el paquete de reflectores paralelos del terciario y la zona de baja relación señal-ruido que caracteriza a las unidades de basamento.

Anticlinal Los Algarrobos: se trata de una estructura positiva localizada hacia el borde occidental del depocentro y que puede ser observada en varias de las líneas 2D de orientación NE-SO. Esta estructura queda definida por la presencia de reflectores de inclinación opuesta que trazan un flanco oriental extenso y bien definido, una zona de cresta amplia y sub-redondeada y un flanco occidental de menor tamaño y no tan claramente desarrollado debido a la escasa continuidad de los reflectores y la baja relación señal-ruido que predomina en este sector de la estructura.

Sinclinal Los Algarrobos: corresponde a la estructura negativa que constituye la expresión morfológica del depocentro del mismo nombre. Se trata de un pliegue simétrico y suave en cuya ala oeste es posible observar una progresiva rotación de los estratos y relaciones de *onlap* que estarían indicando crecimiento de la estructura en forma sincrónica a la sedimentación. Las geometrías de *onlap* y de crecimiento también pueden interpretarse en el flanco oriental del sinclinal, el cual es algo más tendido y aparece fragmentado por fallas de alto ángulo que inclinan al oeste. Puede observarse que la zona de acumulación asociada a este bajo coincide con un mayor espesor de los estratos basales del terciario sinorogénico, lo cual podría atribuirse a la compactación diferencial de los sedimentos depositados en el sinclinal (Figuras 4 y 8).

Las estructuras antes descriptas pueden interpretarse como pliegues de flexión de falla extensionales asociados a una falla directa con desarrollo de rampas y planos que provocan el plegamiento de los estratos del bloque colgante a medida que se desplazan por la superficie de la falla. Esta situación se habría producido en forma simultánea a la sedimentación generando geometrías de crecimiento sintectónico (Ellis y McClay 1988).

Depocentro Los Tordillos

La mayor parte de este bajo estructural se halla cubierto por sísmica 3D, excepto el borde oriental cuya forma puede observarse en unas pocas líneas 2D (Figuras 1b y 1c). El relleno de esta cuenca triásica es asimétrico, con forma de cuña y fue investigado por un total de diez pozos exploratorios y de estudio en el período comprendido entre octubre de 1966 y agosto de 1972.

La inspección de la información sísmica 3D en secciones paralelas y perpendiculares al eje del depocentro (Figura 5) permite identificar los siguientes rasgos estructurales y estratigráficos:

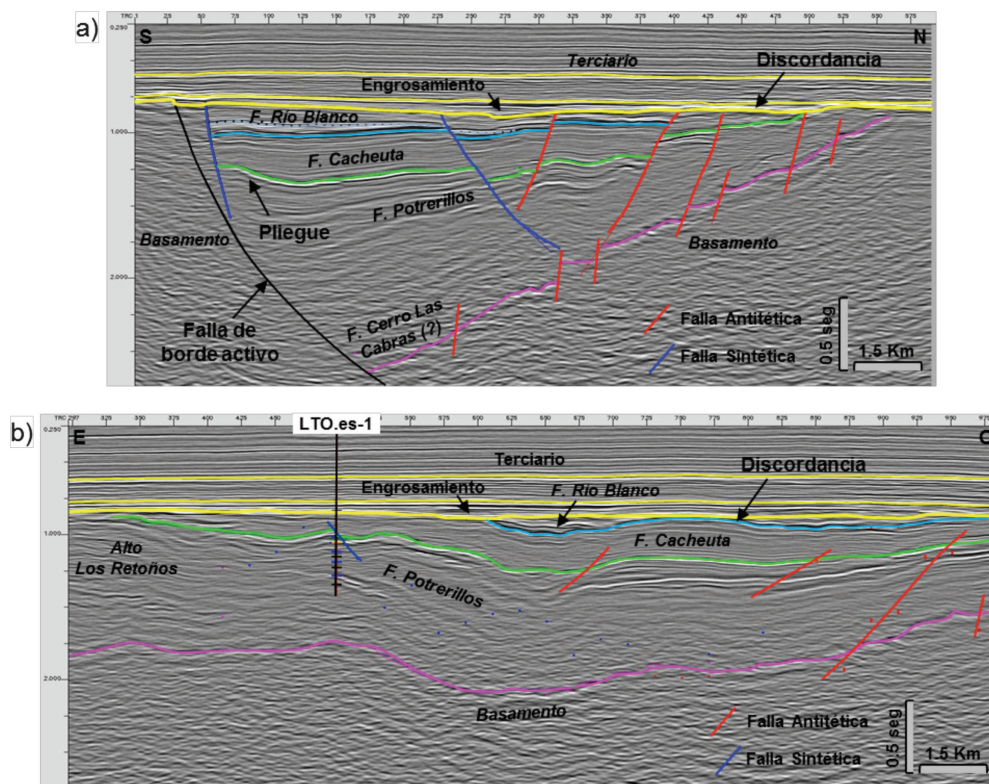


Figura 5. Interpretación de: a) Crossline 651 y b) Inline 306, señalando los principales rasgos estructurales y estratigráficos observados en el depocentro Los Tordillos (ver la Figura 1b para la ubicación).

Discordancia de la base del Terciario: presenta similares características a las descritas para el depocentro Los Algarrobos (Figuras 4 y 5).

Hemigraben de polaridad norte: caracterizado por la presencia de un relleno sedimentario en forma de cuña y reflectores sísmicos que divergen en dirección a la falla de borde activo (Figura 5a). Esta asimetría queda reflejada también en la distribución del espesor y la relación *net to gross* de los depósitos de la Fm Potrerillos documentada por los pozos perforados en la zona (Figura 6). Los sondeos ubicados hacia la parte distal del depocentro (LT.es-1, LTO.es-1, LTO.x-2 y LT.x-5) se caracterizan por una baja relación *net to gross* (3 a 5%) y espesores de sedimentos mayores a 1707 metros (LTO.x-2); mientras que los localizados en posiciones medias y proximales duplican esta relación (10 a 11%) y atraviesan espesores inferiores de columna sedimentaria (máximo de 1307 metros en LT.x-3 y solamente 341 metros en LT.x-4).

Falla de borde activo: la misma tiene un rumbo general E-O, supera los 30 km de longitud y tiene más de 5 km de desplazamiento (Figuras 1c, 5a y 10). Presenta una forma plana a ligeramente curva por la presencia de quiebres en la pendiente hacia menores ángulos. Este rasgo actúa como límite entre una zona septentrional con reflectores subparalelos y baja relación señal-ruido (bloque colgante) y una zona austral con reflectores caóticos y alta relación señal-ruido (bloque yacente). En el bloque colgante del tramo superior de la falla, se observa un pliegue y una falla sintética de poco rechazo (Figura 5a) que se habrían formado por el arrastre friccional a lo largo de

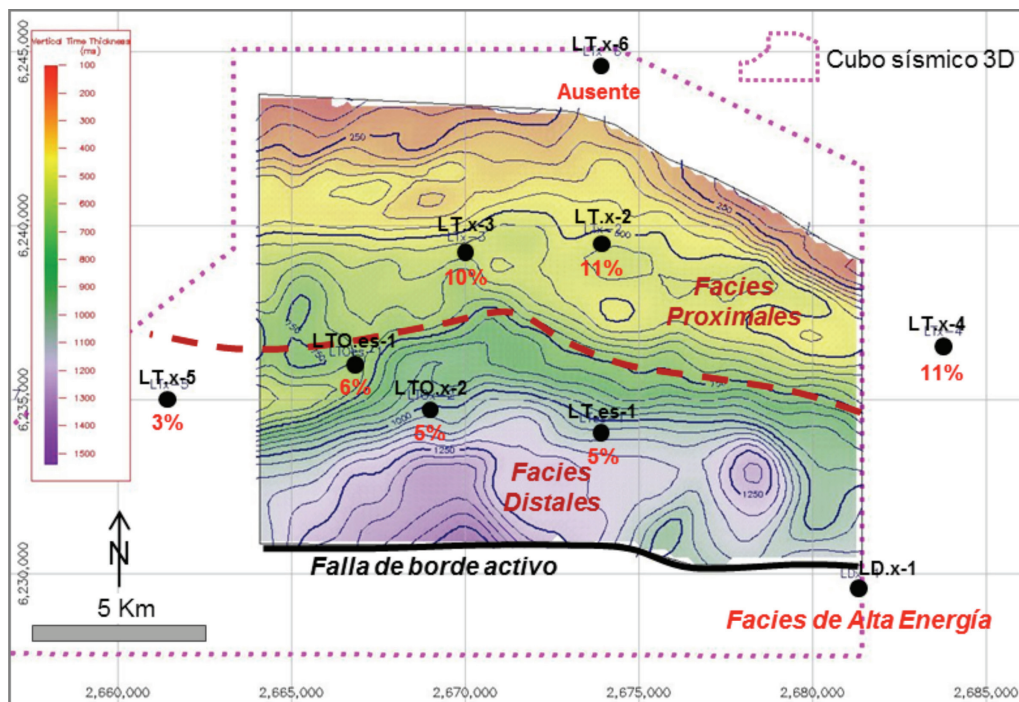


Figura 6. Mapa isocronopéutico de la F. Potrerillos (contornos cada 50 msec) en el depocentro Los Tordillos. Se indican también los valores porcentuales de la relación net to gross de la Fm Potrerillos atravesada por los pozos y el esquema de distribución de facies sedimentarias inferido.

la superficie de la falla y/o por la presencia de un quiebre en el plano de la misma hacia menores ángulos (Figura 10) (Xiao y Suppe 1992; Withjack *et al.* 1995).

Fallas antitéticas de geometría plana: conforman un conjunto de fallas normales de alto ángulo y conjugadas a la falla maestra que afectan al basamento y la cobertura sedimentaria del bloque colgante (Figuras 5a y 7a). Son de orientación subparalela u oblicua a la falla maestra, tienen rechazo variable y alcanzan los 10 km de longitud. Se interpreta que estas discontinuidades acomodan la deformación asociada a la generación del *rollover* en el labio bajo de la falla maestra mediante el mecanismo de cizalla simple antitética (White *et al.* 1986).

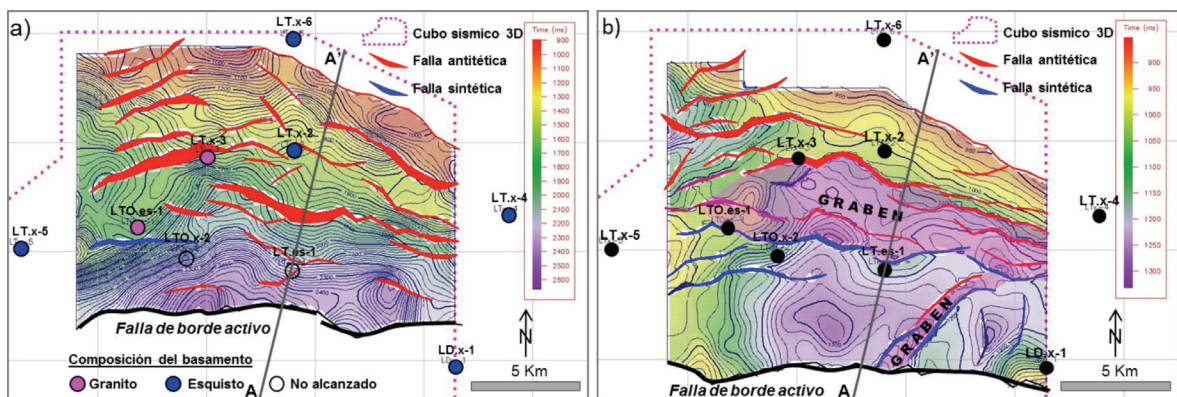


Figura 7. Forma y distribución de las fallas antitéticas y sintéticas: a) Mapa estructural referido al techo del basamento y litología reportada en los pozos; b) Mapa estructural referido al techo de la Fm Potrerillos. Contornos cada 20 msec.

Fallas de crecimiento: son fallas normales que cortan el relleno de *sinrift* y cuya actividad se relaciona con aumentos locales en el espesor de los sedimentos de las formaciones Potrerillos y Cacheuta. Son de forma plana a ligeramente curva y sintéticas o antitéticas a la falla maestra (Figuras 5 y 7b).

Un subgrupo de estas fallas se extiende hacia la parte media del hemigraben formando un bajo local orientado de forma paralela a la falla de borde activo (Figura 7b). La formación de pliegues asociados a las fallas y la combinación de distintos tipos de zonas de transferencia dentro del graben dan lugar a una geometría de altos y bajos estructurales locales de poca extensión. Es posible observar que el área de influencia de este graben habría actuado también como una zona de mayor subsidencia durante la sedimentación de los estratos basales del terciario sinorogénico (Figura 8).

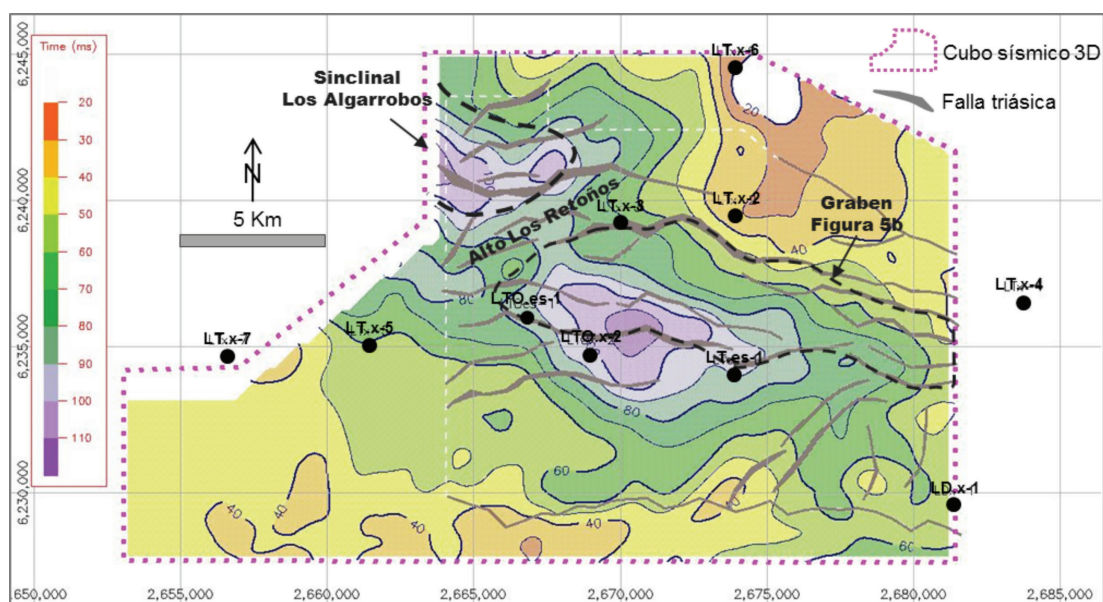


Figura 8. Mapa isocronopáquico de la sección basal de la Fm San Roque (Terciario). En líneas punteadas se delimitan los bajos estructurales triásicos.

Hacia el sector suroriental del depocentro se destaca otra depresión relacionada a fallas de crecimiento pero de menor magnitud que la antes descrita. La misma es de orientación oblicua a la falla maestra, subparalela al alto Los Retoños y no se habría reactivado durante la sedimentación del terciario basal (Figuras 7b y 8).

Alto Los Retoños

Se trata de una estructura positiva de rumbo ENE-OSO, de alrededor de 12 km de longitud y 5 km de ancho que separa los depocentros antes descritos (Figura 1c).

La configuración estructural interna de este alto es difícil de precisar debido a la poca continuidad de los reflectores sísmicos, la extensión restringida de la información sísmica 3D y la omisión de columna sedimentaria triásica por la erosión asociada a la discordancia de la base del terciario.

El alto Los Retoños puede interpretarse como una zona de transferencia localizada entre dos hemigrábenes con diferentes valores de extensión. Bajo un punto de vista geométrico sería asimilable a una rampa lateral que conecta zonas de despegue situadas en diferentes niveles del basamento (Figura 9). El plano más profundo sería el correspondiente al bajo Los Tordillos, donde se estiman mayores espesores de la secuencia sedimentaria triásica de acuerdo a los datos geofísicos disponibles. La localización de la rampa en este tramo específico del hemigraben podría estar relacionada a una variación lateral en la respuesta mecánica de la corteza por la presencia de cuerpos graníticos que atraviesan el basamento metamórfico (Figura 9).

La elevación actual relativa del alto Los Retoños en relación al bajo Los Algarrobos puede deberse en parte a la flexura por carga tectónica que muestra la pendiente regional del terciario sinorogénico (Figura 9). Otros factores que pueden contribuir a la amplificación de este alto son la mayor subsidencia por carga sedimentaria en los depocentros adyacentes y el aumento en la compactación de los sedimentos allí acumulados.

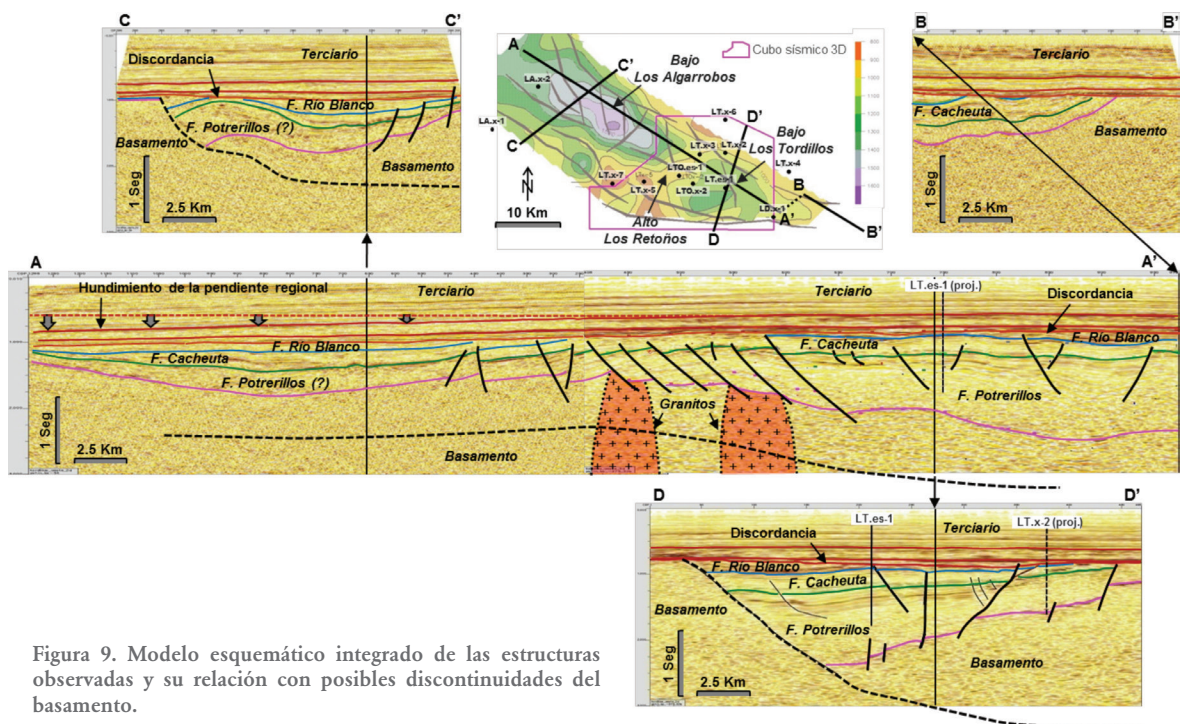


Figura 9. Modelo esquemático integrado de las estructuras observadas y su relación con posibles discontinuidades del basamento.

DISCUSIÓN

Control estructural y mecánica de la deformación triásica

El esquema estructural ilustrado en la Figura 9 involucra la existencia de fallas normales con quiebres en la pendiente hacia menores ángulos (depocentro Los Tordillos) o con desarrollo de rampas y planos (depocentro Los Algarrobos). Modelos geométricos y experimentales de la deformación extensional del bloque colgante para estas configuraciones de falla reproducen estructuras comparables a las observadas en este hemigraben (Ellis y McClay 1988; Xiao y Suppe 1992; Withjack *et al.* 1995). Desde un punto de vista mecánico, la formación de este tipo de geometrías de falla bajo un régimen tensional de intraplaca requiere la reactivación de discontinuidades de bajo ángulo preexistentes que luego pueden desarrollar tramos de mayor ángulo en la roca intacta (fallas de atajo) (Simpson *et al.* 2001; Morley *et al.* 2004).

En el contexto tectónico de las cuencas triásicas del oeste argentino, las condiciones descritas en el párrafo anterior estarían asociadas a reactivaciones de discontinuidades de ángulo bajo a moderado formadas durante la acreción paleozoica de terrenos sobre el margen occidental de Gondwana (Uliana *et al.* 1989; Ramos y Kay 1991). En la región que nos ocupa, la reutilización de la fábrica estructural del basamento durante la extensión triásica sería mecánicamente preferible a la formación de nuevas fallas de alto ángulo (Simpson *et al.* 2001).

El rumbo de los lineamientos en el basamento derivados del análisis de los datos gravimétricos y magnetométricos (Figura 3) es consistente con una dirección NNE-SSO de los paleoesfuerzos tensionales triásicos. Esta orientación coincide con la reportada para los afloramientos del sector norte de la Cuenca Cuyana (Barredo 2004; Japas *et al.* 2008) y es oblicua al rumbo de las estructuras presentes en el bajo Los Algarrobos, pero prácticamente ortogonal a las observadas en el depocentro Los Tordillos.

La orientación subparalela a la falla maestra de las estructuras secundarias (Figura 7), la geometría del relleno sedimentario en forma de cuña y las relaciones *net to gross* de los depósitos de *sinrift* (Figura 6) indican que la mecánica general de la deformación habría sido de tipo coaxial, similar a extensión ortogonal pura (Morley *et al.* 2004). Estructuras oblicuas al tren principal (alto Los Retosños y graben menor de la Figura 7b) pueden mostrar localmente características de desplazamiento de rumbo y contracción debido a la partición de la deformación que tiene lugar bajo condiciones locales de deformación no-coaxial (Fossen y Tikoff 1993).

Las características antes descriptas permiten inferir que el hemigraben Los Tordillos evolucionó bajo un régimen de esfuerzo mayormente tensional, de orientación NNE-SSO y perpendicular u oblicuo a las discontinuidades preexistentes. Esta idea se contrapone, al menos localmente, al modelo de esfuerzo transtensional asociado a transcurrancia sinistral y tracción propuesto por otros autores para la generación de las cuencas triásicas del oeste argentino (Criado Roque *et al.* 1981; Uliana *et al.* 1989).

Modelo de evolución tectónica del depocentro Los Tordillos

Se describe a continuación un posible modelo 2D de evolución para las estructuras y relleno sedimentario observado en el bajo Los Tordillos (Figura 10).

El mismo fue elaborado sobre una sección sísmica 3D perpendicular al eje del depocentro y transformada a profundidad utilizando velocidades intervállicas. El relleno sedimentario fue descompactado y removido utilizando la técnica de *backstripping* (Allen y Allen 2005 y referencias allí citadas) y las geometrías estructurales y estratigráficas sucesivamente restauradas al estado inicial de los principales eventos tectónicos.

Rift inicial: en respuesta a la acción de un campo de esfuerzo tensional se produce la apertura de una cuenca de *rift* asimétrica con su parte más profunda en el borde activo de una falla directa de rumbo general E-O y polaridad norte (Figura 10a). El bloque colgante de esta falla acomoda la flexura de las unidades *prerift* (basamento) mediante cizalla simple antitética de aproximadamente 60° de inclinación hacia el sur. Utilizando el método de cizalla inclinada (White *et al.* 1986) fue posible reconstruir la forma de la falla que da origen el hemigraben y obtener una profundidad estimada del despeque de alrededor de 3500 m. El cálculo de la extensión arrojó un valor de 3,25 km (32%) (Figura 10b). La escasa profundidad a la cual la falla maestra se pone horizontal y el

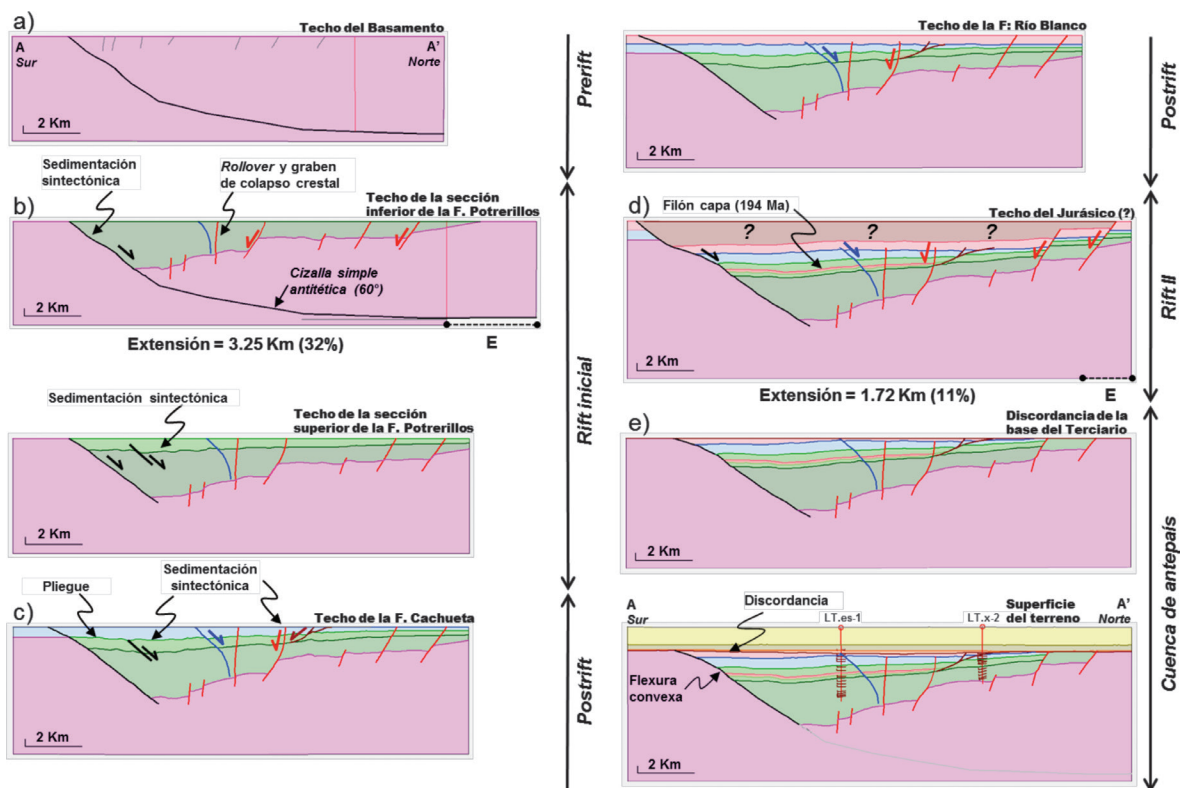


Figura 10. Modelo de evolución tectónica del depocentro Los Tordillos (ver la Figura 5 para la ubicación): a) Estado inicial no deformado del bloque colgante (*prerift*). b) Etapa de *rift* inicial; c) Etapa de *postrift*; d) Etapa de *rift*-II; y e) Etapa de cuenca de antepaís.

bajo ángulo de la misma cerca de la superficie (36°) permiten especular sobre la reactivación de una discontinuidad preexistente de bajo ángulo. Se interpreta asociada a esta etapa la acumulación de los sedimentos de las formaciones Cerro de las Cabras y Potrerillos, los cuales conforman un depósito en forma de cuña que se profundiza hacia el sur.

Postrift: corresponde a un evento de subsidencia generalizada durante el cual la acumulación de sedimentos habría superado los hombros del hemigraben (Figura 10c) conectándolo con las otras cuencas triásicas de la región. Se vincula a esta etapa la depositación de las formaciones Cacheuta y Río Blanco, las cuales muestran poca variación en sus características litológicas. El espesor de estas unidades es mayor en la zona del depocentro debido al ajuste isostático y la compactación de las unidades del *sinrift* (Figura 10c).

Rift II: la disposición de las fallas y estratos obtenida por la restauración del corte estructural revela la posible existencia de un evento extensional que habría reactivado líneas de debilidad previas y formado otras nuevas. Este efecto se observa principalmente sobre los bordes del hemigraben, donde es necesario generar saltos de falla de hasta 1500 metros para poder reproducir las geometrías estructurales observadas (Figura 10d). Se puede interpretar que esta ruptura habría sido contemporánea al magmatismo que produjo la intrusión de filones capa dentro de la columna triásica y en consecuencia vincular este evento a la extensión de edad jurásica que afectó a la Cuenca Cuyana y amplios sectores de América del Sur (Uliana *et al.* 1989). La extensión horizontal estimada para esta etapa es de 1720 metros (11%) (Figura 10d).

Cuenca de Antepaís: luego de un período de erosión y *bypass* sedimentario comienza la generación de espacio por subsidencia flexural de la corteza producto del engrosamiento tectónico ocurrido durante la orogenia andina. Regionalmente este proceso habría formado una serie de cuencas asimétricas que se profundizan hacia el oeste de la región de estudio (Yrigoyen 1993).

En el ámbito del depocentro Los Tordillos, se observa una zona con mayores espesores para la sección basal del terciario controlada por la posición de un graben formado durante la etapa de *rifting* triásico (Figuras 8 y 10e). Por encima de estos depósitos, el terciario sinorogénico muestra espesores lateralmente poco variables y se interpreta que la región habría tenido un comportamiento mecánico rígido, transfiriendo los esfuerzos compresivos en forma pasiva hacia las Sierras Pampeanas.

CONCLUSIONES

El hemigraben Los Tordillos es un *rift* asimétrico de polaridad norte relleno por secuencias sedimentarias de edad triásica media a tardía que superan los 2000 metros de espesor. Cuerpos ígneos básicos de edad triásico superior a jurásico medio intruyen de manera concordante a las secuencias de *sinrift*. La cuenca está cubierta por más de 1000 metros de sedimentitas terciarias sino-

rogénicas cuyo tramo basal alcanza los máximos espesores sobre los bajos estructurales triásicos.

Los rasgos tectónicos principales lo conforman dos bajos de orientación NO-SE y E-O (Los Algarrobos y Los Tordillos respectivamente) separados por un alto relativo de rumbo ENE-OSO (Los Retoños). Sobre este último, la discordancia de la base del Terciario erosiona los términos triásicos más jóvenes y agrega complejidad a la interpretación de las relaciones estratigráficas y estructurales con los depocentros.

El bajo Los Algarrobos contiene un par anticlinal-sinclinal con geometrías de crecimiento sintectónico que son interpretados como pliegues de flexión de falla extensionales asociados a una falla maestra con geometría de rampa y plano.

El bajo Los Tordillos muestra un relleno sedimentario en forma de cuña relacionado a una falla de borde activo de forma plana con quiebres hacia menores ángulos en profundidad. Las estructuras secundarias incluyen fallas antitéticas planas que cortan al basamento y fallas de crecimiento ligeramente curvas que afectan mayormente a la cobertura sedimentaria. Entre estas últimas se destaca un graben dentro del *sinrift* cuya subsidencia se reactiva durante el Neógeno controlando la acumulación de la sección basal del terciario sinorogénico.

El alto Los Retoños constituye una estructura compleja que relaciona lateralmente fallas de borde activo de diferente orientación, geometría y profundidad del despegue. En forma simplificada puede visualizarse como un pliegue de flexión de falla extensional asociado a una rampa lateral que conecta ambas fallas maestras.

Se interpreta que los rasgos estructurales del hemigraben Los Tordillos responden a la reactivación extensional u oblicua de la fábrica preexistente del basamento. La orientación, forma y extensión lateral de las estructuras secundarias permiten inferir que la deformación interna habría sido principalmente de tipo coaxial. Las estructuras oblicuas al tren principal pueden mostrar rasgos de desplazamiento de rumbo o contracción debido a efectos locales de partición de la deformación.

En la evolución tectónica del depocentro más austral se identifica una etapa de *rift* inicial que alcanza los 3,25 km de extensión (32%) y una etapa de *rift-II* que contabiliza 1,72 km de extensión (11%). El relleno sedimentario acumulado en la etapa de *rift* inicial tiene forma de cuña y el bloque colgante acomoda la flexura de las unidades *prerift* (basamento) mediante cizalla simple antitética de 60° de inclinación. Durante el estadio de *postrift*, la subsidencia tectónica local continúa ejerciendo un control apreciable en el espesor de las secuencias sedimentarias. La etapa de *rift-II* se infiere contemporánea al magmatismo Triásico superior a Jurásico medio que intruye a las secuencias de *sinrift*. Cuando la región se incorpora a la cuenca de antepaís neógena, los bajos estructurales triásicos influyen en la acumulación del conglomerado basal del terciario sinorogénico. Posteriormente, la región se comporta como un bloque rígido transfiriendo los esfuerzos compresivos en forma pasiva hacia las Sierras Pampeanas.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a las autoridades de YPF S.A. y Sinopec Argentina Exploration and Production, Inc. por autorizar la publicación de este trabajo.

REFERENCIAS CITADAS

- Abraham, E.M., 2000, Geomorfología de la Provincia de Mendoza, En *Inventario de Recursos para la Planificación y Gestión de la Región Andina, Argentina* (versión electrónica). Junta de Gobierno de Andalucía (España) y Universidades y Centros de Investigación de la Región Andina Argentina.
- Allen P.A. y J.R. Allen, 2005, *Basin Analysis: Principles and Applications*, Second edition. Blackwell Publishing: 549 p.
- Barredo S. y V.A. Ramos, 2010, Características tectónicas y tectosedimentarias del hemigraben Rincón Blanco, Cuenca Cuyana: una síntesis. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 66: 133-145.
- Barredo S.P., 2004, *Análisis estructural y tectosedimentario de la subcuenca de Rincón Blanco, Precordillera Occidental, provincia de San Juan*. Tesis Doctoral: 325 p. Buenos Aires, Argentina.
- Criado Roque P., C.A. Mombrú y V.A. Ramos, 1981, Estructura e interpretación tectónica. En Irigoyen M. (ed.) *Geología y recursos naturales de la provincia de San Luis*, VIII Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 155-192.
- Delpino D. y A. Bermúdez, 2004, Informe sobre dataciones radimétricas y análisis geoquímicos de muestras de testigos corona: Md.LA.x-2 (Los Algarrobos), MD.LT.es-1 (Los Tordillos) y Md.LA.x-1 (Los Algarrobos), Cuenca Cuyana. YPF, Informe interno inédito.
- Ellis P.G. y K.R. McClay, 1988, Listric extensional fault systems: results of analogue model experiments. *Journal of Basin Research* 1: 55-70.
- Flores M.A., 1979, Cuenca de San Luis. En: Turner, J.C.M. (Ed.): *Segundo Simposio Geología Regional Argentina*: 311-327, Academia Nacional de Ciencias, Córdoba.
- Fossen H. y B. Tikoff, 1993, The deformation matrix for simultaneous simple shearing, pure shearing and volume change, and its application to transpression/transension tectonics. *Journal of Structural Geology* 15: 423-432.
- Fugro Gravity & Magnetic Services Inc., 2009, Airbone gravity gradiometry and magnetic interpretation of Los Tordillos Oeste, Provincia de Mendoza, Argentina. YPF, Informe interno inédito.
- Gema S.R.L., 2003a, Informe palinológico de muestras provenientes del pozo M.LT.es-1 (Los Tordillos), Triásico. YPF, Informe interno inédito.
- Gema S.R.L., 2003b, Informe palinológico de muestras provenientes del pozo M.LT.x-5 (Los Tordillos), Triásico. YPF, Informe interno inédito.
- González P.D., A.M. Sato, E.J. Llambías, M.A.S. Basei y S. Vlach, 2004, Early Paleozoic structural and metamorphic evolution of western Sierra de San Luis, in relation to the accretion of Cuyania. *Gondwana Research* 7: 1157-1170.
- Gordillo, C y Lencinas, A.N., 1979, Sierras Pampeanas de Córdoba y de San Luis. En: Turner, J.C.M. (Ed.), *Segundo Simposio Geología Regional Argentina*: 577-650. Academia Nacional de Ciencias, Córdoba.

- Japas M.A., J.M. Cortés y M.M. Pasini, 2008, Tectónica extensional triásica en el sector norte de la cuenca Cuyana: primeros datos cinemáticos. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 63 (2): 213-222.
- Kokogian D. A., F. Fernández Seveso y A. Mosquera, 1993, Las secuencias sedimentarias triásicas. En: Ramos V.A. (Ed.), *Geología y Recursos Naturales de Mendoza*, XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Relatorio (7): 65-78.
- Morales Chamón, C., 1971, Informe Final Zona Los Tordillos, Provincia de Mendoza. YPF, Informe interno inédito, Mendoza, Argentina.
- Morley C. K., C. Haranya, W. Phoosongsee, S. Pongwapee, A. Kornsawan y N. Wonganan, 2004, Activation of rift oblique and rift parallel pre-existing fabrics during extension and their effect on deformation style: examples from the rifts of Thailand. *Journal of Structural Geology* 26(10): 1803-1829.
- Polanski, J. 1954, Rasgos geomorfológicos del territorio de la provincia de Mendoza. Instituto de Investigaciones Económicas y Tecnológicas, Cuaderno de Estudios e Investigación 4, 10 p., Buenos Aires.
- Ramos V.A. y S.M. Kay, 1991, Triassic rifting and associated basalts in the Cuyo basin, central Argentina. En Harmon, R.S. y C. Rapela, (eds.), *Andean Magmatism and its Tectonic Setting*, Geological Society of America, Special Paper 265: 79-91.
- Rolleri E.O. y P. Criado Roque, 1968, La cuenca triásica del norte de Mendoza. *Terceras Jornadas Geológicas Argentina* 1: 1-76, Comodoro Rivadavia.
- Simpson C., S. Whitmeyer, D.G. De Paor, L.P. Gromet, R. Miro, M.A. Krol y Short, H., 2001, Sequential ductile through brittle reactivation of major fault zones along the accretionary margin of Gondwana in Central Argentina. En Holdsworth R. E., R.A. Strachan, M.J.F. y R.J. Knipe (eds.), *The nature and tectonic significance of fault zone weakening*. Geological Society of London Special Publication 186: 233-255.
- Spalletti L.A., 1999, Cuencas triásicas del oeste argentino: origen y evolución. *Acta Geológica Hispánica* 32 (1-2): 29-50, Buenos Aires.
- Stipanovic P.N. y C.A. Marsicano (eds.), 2002, Triásico. En: *Léxico Estratigráfico de la Argentina*, Volumen VIII, Asociación Geológica Argentina, Serie B (26): 1-343, Buenos Aires.
- Uliana M.A., K.T. Biddle y J. Cerdan, 1989, Mesozoic extension and the formation of the Argentine sedimentary basins. En Tankard A.J. y H.K. Balkwill (eds.), *Extensional tectonics and stratigraphy of the North Atlantic margins*, American Association of Petroleum Geologists Memoir 46: 599-614.
- White N. J., J. A. Jackson y D. P. McKenzie, 1986, The relationship between the geometry of normal faults and that of the sedimentary layers in their hanging walls: *Journal of Structural Geology* 8: 897-909.
- Withjack M.O., Q. Islam y P. Lapointe, 1995, Normal faults and their hanging-wall deformation: an experimental study. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 79: 1-18.
- Xiao H. y J. Suppe, 1992, Origin of rollover. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 76: 509-529.
- Yrigoyen M.R. y L.E. Stover, 1970, La palinología como elemento de correlación del Triásico en la Cuenca Cuyana, *Cuartas Jornadas Geológicas Argentinas* 2: 427-447, Buenos Aires.

Yrigoyen M.R., 1993, Los depósitos sinorogénicos terciarios. En Ramos V.A. (ed.), Geología y Recursos Naturales de la provincia de Mendoza, XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Relatorio: 123-148, Mendoza.

Zencich S., Y. Ruiz Pérez, F. Rodríguez Monreal, R. Calejari, R. Baudino, F. Raggio, J. Beecher, O. Pioli y M. Peralta, 2004, Bloque CC y B-4 Los Tordillos Oeste, Informe evaluación del bloque, YPF, Informe interno inédito.