

Inversión tectónica cenozoica y variaciones estructurales a lo largo del Valle del Tonco, Valles Calchaquíes – Noroeste de la Argentina

Payrola, Patricio A.^{1*}; Fernando Hongn¹; Cecilia del Papa²; Alejandro Aramayo¹; Sergio Gorustovic³

¹ Instituto de Bio y Geociencias (IBIGEO), CONICET – Universidad Nacional de Salta, Av. Bolivia 5150, (4400) Salta, Argentina. ppayrola@hotmail.com, fhongn@aol.com, alejandrojaramayo@yahoo.com.ar

² Laboratorio de Análisis de Cuencas – CICTERRA-CONICET, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Velez Sarsfield 1611, 2º Piso, Of. 7, X5016GCA, Córdoba, Argentina. delpapacecilia@yahoo.com

³ Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Regional Noroeste, Av. Avenida Bolivia 4650, (4400) Salta, Argentina. gorustov@cnea.gov.ar

* Autor para correspondencia: Patricio Augusto Payrola. Dirección postal: Av. Bolivia 5150, (4400) Salta. e-mail: ppayrola@hotmail.com

► **Resumen** — La cubierta sedimentaria de los Valles Calchaquíes está constituida por dos rellenos sedimentarios principales. El más antiguo corresponde a la cuenca del rift cretácico (Cretácico-Eoceno) representada por el Grupo Salta y el más joven pertenece a la cuenca del antepaís andino (Eoceno-Plioceno) representada por el Grupo Payogastilla. Recientemente ha sido registrada, en la región, una discordancia que separa los dos grupos y se hallaron estructuras de crecimiento en la base del Grupo Payogastilla lo que evidencia un evento de deformación Eoceno. Parte de las fallas que generaron las estructuras de crecimiento mencionadas actuaron como fallas normales durante el rift cretácico y se invirtieron durante el Eoceno. Entre los Valles Calchaquíes se encuentra el valle del Tonco, el cual preserva afloramientos del Grupo Salta y del Grupo Payogastilla en una estructura sinclinal N-S. Limitando la estructura se presentan dos fallas inversas de vergencia occidental, la falla Calchaquí y la falla Tonco, ambas con rumbo N-S, las que han sido interpretadas como fallas normales del rift cretácico. Se presenta en este trabajo una descripción detallada de las variaciones estructurales a lo largo del rumbo del sinclinal, con lo que se interpretó al menos dos direcciones estructurales, una definida por el Grupo Salta y otra por el Grupo Payogastilla que evidencia y refuerza la discordancia que separa estos grupos. Así mismo, son descritos rasgos estructurales/estratigráficos típicos de inversión tectónica que permitieron interpretar que la falla Tonco fue una falla normal y la falla Calchaquí fue el borde de un hemigraben durante el Cretácico, las cuales se habrían invertido durante el Eoceno.

Palabras clave: Valle del Tonco, Grupos Salta y Payogastilla, inversión tectónica, Valles Calchaquíes.

► **Abstract** — “Cenozoic tectonic inversion and structural variations along the Tonco Valley, Valles Calchaquíes – Northwest Argentina”. The sedimentary cover in the Calchaquí valleys is represented by two sedimentary basins. The oldest corresponds to the Cretaceous rift basin (Cretaceous-Eocene) represented by the Salta Group and the youngest is related to the Andean foreland basin (Eocene-Pliocene) represented by the Payogastilla Group. Recently an unconformity has been recorded between the two sedimentary fill basins and growth structures were founded developed in the base of the Payogastilla Group that allow us to interpret an Eocene deformation event. Part of the faults related to the growth structures were normal faults during the Cretaceous rift and inverted during the Eocene. The Tonco valley forms part of the Calchaquíes valleys and preserves Salta and Payogastilla groups sedimentary successions in an N-S synclinal structure. The syncline is bordered by two N-S, retrovergent-inverse faults, Calchaquí and Tonco faults, that have been interpreted as Cretaceous rift normal faults. The main goal of this paper is to present a detailed description of structural variations along the syncline. Two structural directions have been interpreted, the first delin-

eated by the Salta Group and the other by the Payogastilla Group which evidence the unconformity between these Groups. Characteristic structural/stratigraphic inversion features are described, and allow us to interpret that the Tonco fault was a normal fault and the Calchaquí fault was a half-graben border during the Cretaceous and these faults could have been inverted during the Eocene.

Keywords: Tonco valley, Salta and Payogastilla Groups, tectonic inversion, Calchaquíes valleys.

INTRODUCCIÓN

Las cuencas mesozoico-cenozoica y cenozoica del Noroeste argentino están representadas por la cuenca de rift del Grupo Salta, que evolucionó desde el Cretácico inferior y hasta el Eoceno inferior (Salfity y Marquillas, 1994 y Marquillas *et al.*, 2005; entre otros) y por la cuenca del antepaís andino que evolucionó desde el Eoceno medio al Plioceno e integrada por los Grupos Payogastilla, en el área occidental de Cordillera Oriental, y Orán, en el área oriental de Cordillera Oriental, en las Sierras Subandinas y en el Sistema de Santa Bárbara (Díaz y Malizzia, 1983; Allmendinger *et al.*, 1982; Díaz, 1987; Jordan y Alonso, 1987; Grier, 1990; Grier y Dallmeyer, 1990; Salfity y Marquillas 1994; Starck y Vergani, 1996; Galli y Hernández, 1999). Si bien diversos trabajos han abordado la configuración tecto-sedimentaria de la cuenca del Grupo Payogastilla (antepaís andino) y su relación con la inversión cenozoica de la cuenca del rift cretácico (Grier *et al.* 1991; Cristallini *et al.* 1997; Carrera *et al.* 2006; entre otros) recientemente, se ha acotado la edad de inicio (Eoceno medio-superior) del relleno del antepaís andino en los Valles Calchaquíes mediante fósiles y dataciones radiométricas (Hongn *et al.*, 2007, 2008; Payrola *et al.*, 2009; del Papa *et al.*, 2010; Carrapa *et al.*, 2011). Además se hallaron estructuras de crecimiento en la base de la secuencia del Grupo Payogastilla y una discordancia que separa el relleno de la cuenca del rift cretácico del relleno de la cuenca del Grupo Payogastilla (del Papa *et al.*, 2004; Hongn *et al.*, 2007; Hongn *et al.*, 2008; Payrola *et al.*, 2009). Estos elementos (edades fósiles/radiométricas, estratos de crecimiento, discordancias) permitieron interpretar que la inversión de las fallas normales cretácicas ocurrió en

algunos casos durante el Eoceno. A pesar del avance en el conocimiento de las cuencas mencionadas, todavía se mantiene cierta incertidumbre con respecto a la tectónica de las etapas del rift cretácico como ser: estilo geométrico de las fallas que controlaron los depocentros y relieve interno de las subcuencas, edad del inicio de la inversión de cada falla y rol de las fallas cretácicas durante el desarrollo del relleno sinorogénico andino.

Entre los numerosos valles que integran los Valles Calchaquíes (Luracatao, Pucará, Hualfín, La Poma, Amblayo, entre otros) se encuentra el valle del Tonco, el cual constituye una zona con alta calidad de preservación de las secuencias sedimentarias del rift cretácico y del antepaís andino por lo que resulta una excelente área para el estudio de las relaciones estratigráficas y estructurales entre las dos cuencas sedimentarias. El valle del Tonco es una depresión tectónica elongada en sentido submeridiano y está limitado en sus flancos por fallas inversas vergentes al oeste (Figura 1.3). Este valle presenta variaciones estructurales a lo largo de su rumbo, las que no han sido estudiadas en detalle y que pueden brindar información acerca de la configuración tectónica cretácica y de la inversión cenozoica. En esta contribución se presentan los avances en el conocimiento geológico general del área del valle del Tonco, los cuales han permitido realizar interpretaciones sobre la cinemática de la contracción/inversión andina en este sector de los Valles Calchaquíes así como contribuciones sobre el modelo de las cuencas del antepaís andino.

MARCO ESTRATIGRÁFICO

Esta porción de la Cordillera Oriental se caracteriza por poseer extensos afloramientos de la secuencia continental y marina,

cretácico-eoceno, del Grupo Salta y la secuencia sinorogénica andina del Grupo Payogastilla sobre bloques de basamento neoproterozoico-paleozoico inferior (véase síntesis en Salfity, 2004; Marquillas *et al.*, 2005; Hongn *et al.*, 2011). En el valle del Tonco, la unidad más antigua aflorante es la Formación Puncoviscana (Turner, 1960) de edad neoproterozoica terminal a cámbrica, constituida por metasedimentitas sobre las

cuales se asienta la cubierta sedimentaria constituida por los depósitos de la cuenca del rift cretácico del Grupo Salta y la cuenca de antepaís andino del Grupo Payogastilla (Figura 2). El Grupo Salta (Turner, 1960) está constituido por tres subgrupos (Figura 2), el Subgrupo Pirgua (Reyes y Salfity, 1973) que representa la etapa de sin-rift y los subgrupos Balbuena y Santa Bárbara (Moreno, 1970) que representan la etapa de

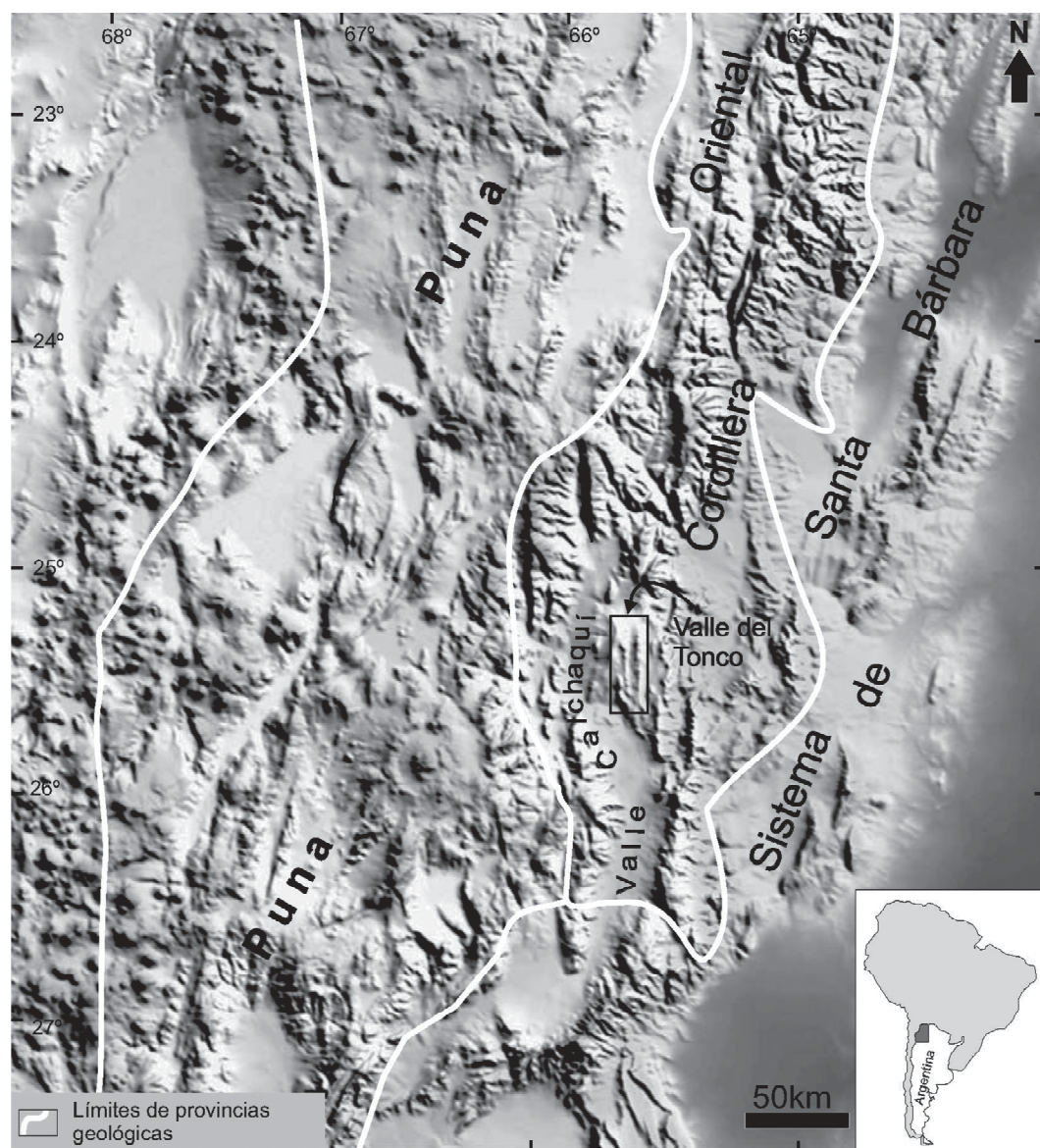


Figura 1. Imagen satelital del noroeste argentino con la ubicación del área de estudio en referencia a las provincias geológicas del NOA.

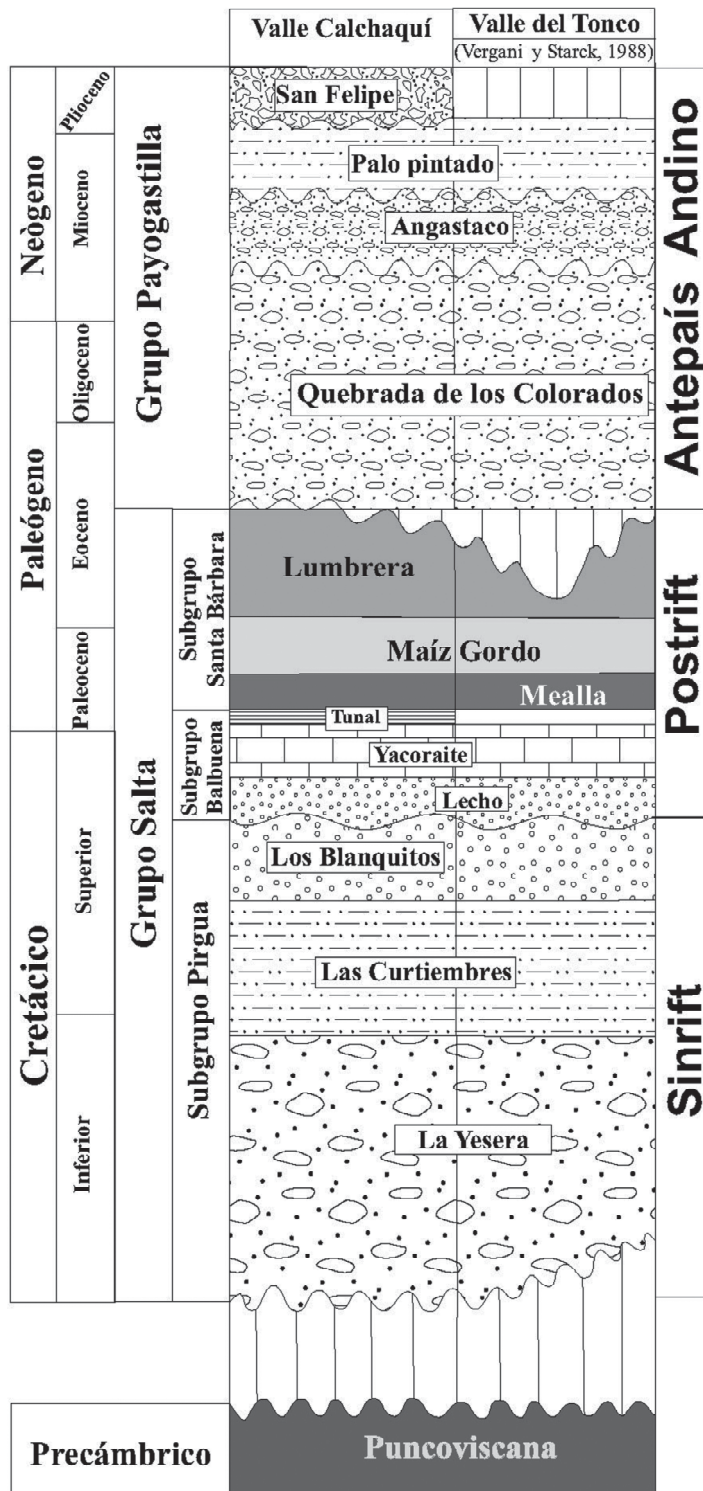


Figura 2. Cuadro estratigráfico del Valle del Tonco en comparación con la estratigrafía del centro y norte del valle Calchaquí.

postrift. A su vez, cada subgrupo está constituido por tres unidades litoestratigráficas de la siguiente manera: El Subgrupo Pírgua está compuesto por las Formaciones La Yesera, Las Curtiembres y Los Blanquitos (Figura 2) y comprende bancos de conglomerados gruesos, areniscas conglomerádicas intercaladas con limolitas, color rojo. En la Formación Las Curtiembres interestratifican niveles de basaltos conocidos como Basalto Isonza (Valencio *et al.*, 1976; Reyes *et al.*, 1976; Galliski y Viramonte, 1988). Le sigue el Subgrupo Balbuena (Figura 2) compuesto por las Formaciones Lecho y Yacoraite. No se identificó en el valle a la Formación Tunal. Este subgrupo se caracteriza por la presencia de areniscas calcáreas blanquecinas y calizas amarillentas, las que se desarrollan concordantemente sobre areniscas rojizas y conglomerados de la Formación Los Blanquitos. Culminando la sucesión sedimentaria se asientan las Formaciones Mealla, Maíz Gordo y Lumbrera (Subgrupo Santa Bárbara) compuestas por areniscas gruesas rojizas y blanquecinas y pelitas rojas. Consideraciones estratigráficas y sedimentológicas de detalle sobre el Grupo Salta pueden ser consultadas en la extensa bibliografía de trabajos científicos existentes (Reyes, 1972; Cortelezzi *et al.* 1973; Salfity, 1982; Schwab, 1984; Gómez Omil *et al.*, 1989; Salfity y Zambrano, 1990; del Papa y Salfity, 1999; Salfity y Marquillas, 1994; Sabino, 2002; Marquillas *et al.*, 2005; Do Campo *et al.*, 2007; entre otros). Por otra parte el Grupo Payogastilla (Díaz y Malizzia, 1983; Díaz *et al.*, 1987) está constituido por cuatro formaciones (Figura 2), que de base a techo son: Quebrada de los Colorados, Angastaco, Palo Pintado y San Felipe, aunque esta última unidad no se reconoció en el valle del Tonco. La sucesión posee un arreglo granocreciente-granodecreciente general desde pelitas en la base a conglomerados gruesos y culmina con niveles pelíticos y arenosos hacia el techo. El ambiente de sedimentación es principalmente fluvial, comienza con facies de planicies de ríos enlazados y meandriformes, se intercalan facies eólicas poco potentes, que pasan hacia el techo a depósitos de

abánicos aluviales, finalmente culmina la sucesión con facies lacustres y de ríos meandriformes (Díaz y Malizzia, 1983; del Papa *et al.*, 2005; del Papa, 2006).

MARCO ESTRUCTURAL

El área de estudio se encuentra en el sector central de la Cordillera Oriental de Argentina y dentro de ésta en el borde oriental del Valle Calchaquí principal o Calchaquenia (Salfity, 2004). La Cordillera Oriental posee un estilo tectónico de piel gruesa siendo un cinturón plegado y fallado con doble vergencia (Mon, 1979; Drozdowski y Mon, 1999) con predominancia de fallas vergentes al oeste (Turner y Mon, 1979; Grier, 1990; Cahill *et al.*, 1992; Hongn y Seggiaro, 2001; entre otros). La estructura regional está determinada por fallas inversas y pliegues de hasta decenas de kilómetros de largo. Tanto las fallas como los pliegues tienen una orientación general meridiana a submeridiana (Mauri, 1948; Turner, 1964, Turner y Mon, 1979; Salfity y Monaldi, 2006). Sin embargo, también existen estructuras con dirección oblicua, que se apartan del rumbo general N-S, las que han sido relacionadas a: i) reactivación de estructuras del basamento, ii) inversión positiva de estructuras extensionales preexistentes, iii) interferencia de pliegues y rampas oblicuas/laterales (Urreiztieta *et al.*, 1996; Mon, 2001; Riller y Oncken, 2003; Mon *et al.*, 2004; Mon *et al.*, 2005; Carrera *et al.*, 2006; Payrola *et al.*, 2011). En su conjunto la Cordillera Oriental, tomada como provincia geológica, tiene una dirección de transporte tectónico regional hacia el Este (Allmendinger *et al.*, 1982). Este sector de la Cordillera Oriental presenta un basamento debilitado por el desarrollo del rift cretácico del Grupo Salta (Salfity y Marquillas, 1994; Hongn *et al.*, 2010). Las fallas normales cretácicas tendrían geometría lítrica y se unirían a un despegue basal ubicado a unos 10-12 km (Grier *et al.*, 1991; Cristallini *et al.*, 1997). La posición de las fallas normales del rift del Grupo Salta fue controlada, en parte, por heterogeneidades eopaleozoicas del basamento regional

(Hongn y Seggiaro, 1998, 2001; Riller y Hongn, 2003; Hongn *et al.*, 2010, entre otros) y por cambios litológicos de alto contraste reológico (Hongn *et al.*, 2010, Payrola *et al.*, 2011). A su vez, las fallas normales cretácicas fueron invertidas positivamente por la deformación cenozoica controlando la localización de ciertas fallas andinas (Salfity *et al.*, 1993; Boll y Hernández, 1986; Grier *et al.*, 1991; Cristallini *et al.*, 1997; Hongn y Seggiaro, 2001; Kley *et al.*, 2005; Seggiaro y Aguilera, 2006; Salfity y Monaldi, 2006; Hongn *et al.*, 2007, Hongn *et al.*, 2010). En síntesis, en el área de estudio se pueden diferenciar dos grandes configuraciones estructurales, una de edad neoproterozoico-eopaleozoica y otra cretácico-cenozoica, siendo la segunda el objetivo principal de este estudio. A continuación se describen en detalle

las variaciones estructurales que se observan en el valle del Tonco, con especial énfasis en el sinclinal del Tonco.

ESTRUCTURA DEL SINCLINAL DEL TONCO

El valle del Tonco es una depresión tectónica constituida por un sinclinal (Russo, 1948, Mauri, 1948) con una longitud de 37 km y un ancho aproximado de 4 km en su sección más ancha, el cual se encuentra entre dos anticlinales: el anticlinal Filos del Pelado ubicado al oriente y el anticlinal Colorado ubicado al occidente (Figura 3) conformando un tren de pliegue con rumbo general N-S. Su estilo estructural varía a lo largo de su rumbo y su configuración puede ser seguida, en parte, a través de los excelentes afloramientos

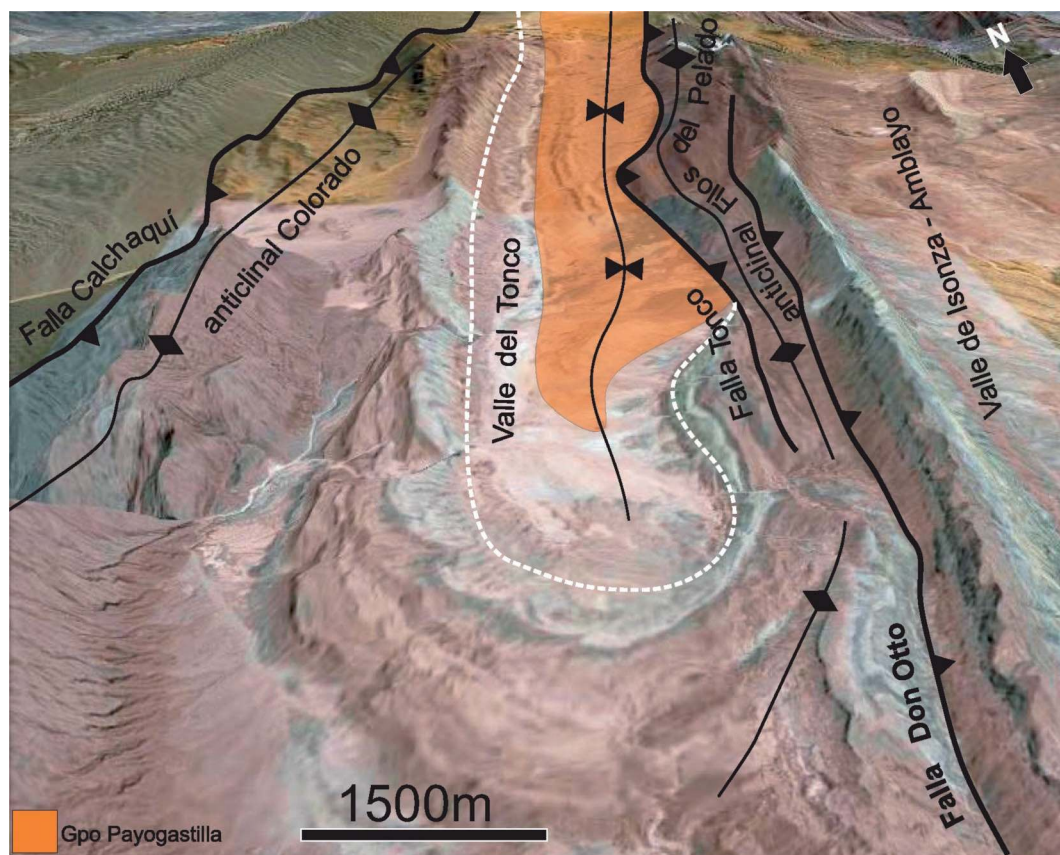


Figura 3. Imagen satelital del Valle del Tonco, en la cual se remarcen en color naranja los afloramientos del Grupo Payogastilla, en color blanco las líneas de contorno del Grupo Salta y en color negro los ejes de pliegues y trazas de fallas.

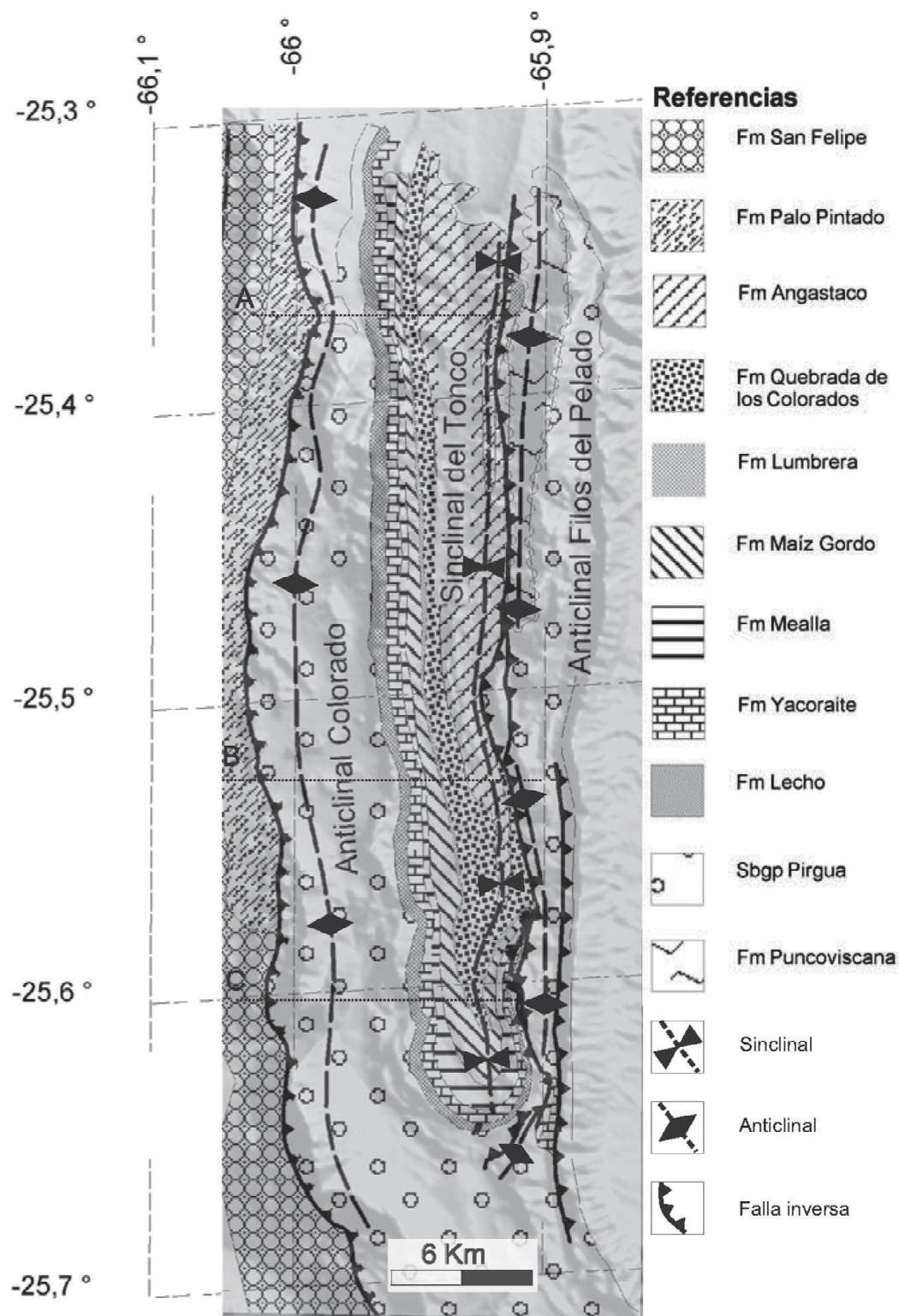


Figura 4. Mapa geológico del Valle del Tonco (Modificado de Vergani y Starck, 1989).

ramientos de los niveles guías calcáreos, de color amarillento, de la Formación Yacoraite (véase Raskovsky, 1970). El sinclinal del Tonco es un pliegue abierto, asimétrico, siendo el flanco occidental continuo y el menos inclinado, mientras que el flanco oriental está cortado por una falla inversa regional (60° - 75° E) vergente hacia el oeste (Russo, 1948; Ravskosky, 1970), denominada falla Tonco (Vergani y Starck, 1989), que establece diferentes relaciones de contactos estratigráficos a lo largo de su traza (Figura 4). El

plano axial del pliegue inclina con alto ángulo hacia el este, en tanto el eje posee una dirección general N-S, buza al norte y expone una inflexión compleja en el sector sur. Hacia el oeste del sinclinal, una extensa falla inversa denominada falla Calchaquí (Vergani y Starck, 1989), corta el anticlinal Colorado en su flanco frontal, con estilo de estructura en arpón, poniendo en contacto la sucesión sedimentaria espesa del Subgrupo Pirgua ($>2300\text{m}$, Salfity com. pers.) con las Formaciones Angastaco y Palo Pintado en el

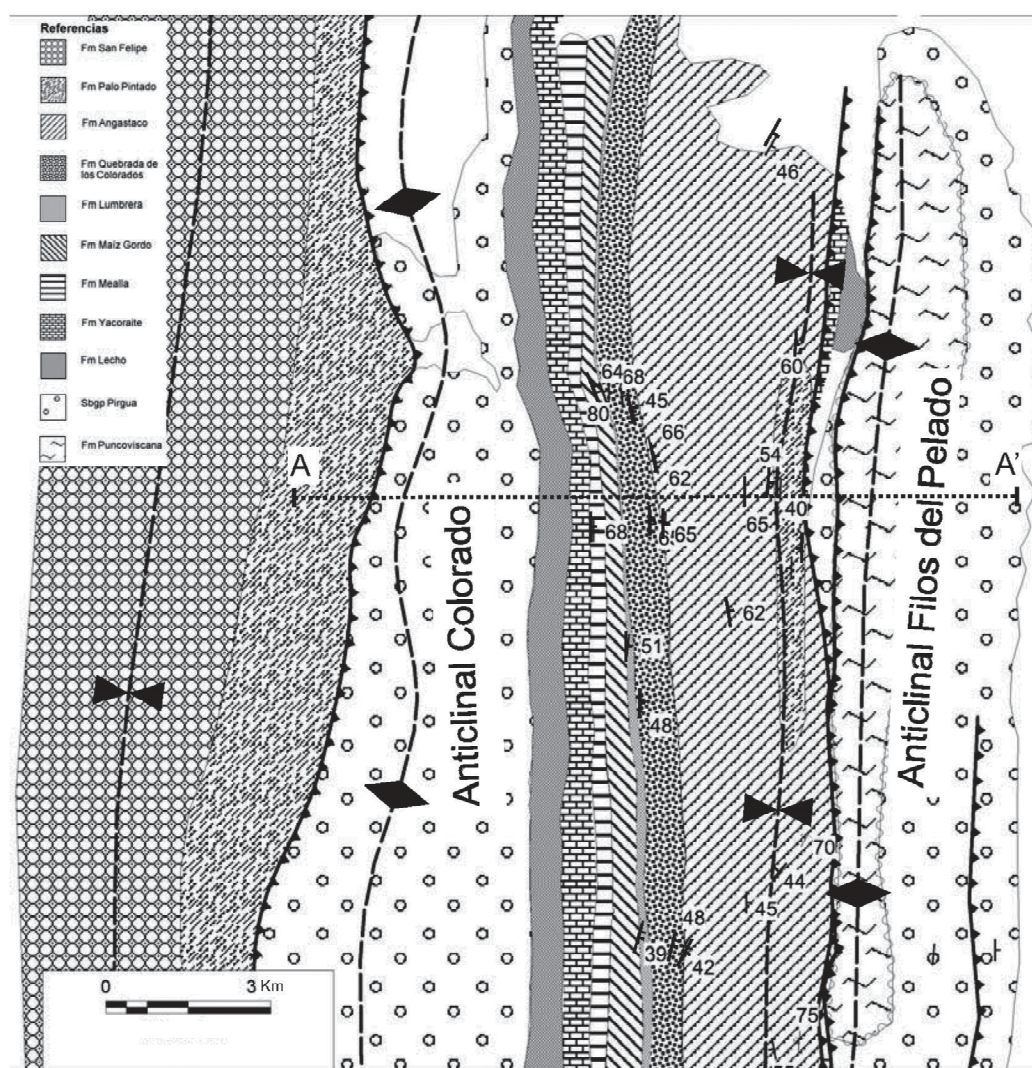


Figura 5. Mapa del sector norte del Valle del Tonco (Modificado de Vergani y Starck, 1988). Observe el adelgazamiento de la Formación Lumbreira.

borde occidental del área de estudio (Figs. 4 y 5).

Numerosas fallas cortan la estructura y tienen rumbo meridiano, dos de ellas, la falla Tonco y la Calchaquí, han sido interpretadas como fallas normales del rift cretácico del Grupo Salta, las que fueron invertidas positivamente durante la contracción andina cenozoica (Grier *et al.*, 1991; Carrera *et al.*, 2006-2008; Salfity y Monaldi, 2006). Se reconoce en este trabajo una falla inversa (45° - 60° E), denominada falla Don Otto (Figura 3), vergente hacia el oeste, con estilo de falla *bypass*, la cual repite la sucesión sedimentaria del Subgrupo Pirgua en el flanco oriental del anticlinal Filos del Pelado (Figuras 4 y 5). La configuración del sinclinal

puede ser dividida en 3 sectores a lo largo del rumbo de acuerdo a las variaciones estructurales que presenta. En el sector norte el sinclinal (entre $25^{\circ}18'$ y $25^{\circ}27'S$) posee un eje con dirección general N-S (Figura 5). Los Subgrupos Pirgua, Balbuena y Santa Bárbara y las Formaciones Quebrada de los Colorados y Angastaco integran el flanco occidental el cual presenta dos pliegues, tipo gravitacionales, internos en el Subgrupo Balbuena (Figura 6A); únicamente la Formación Angastaco describe el flanco oriental. A su vez, la Formación Palo Pintado se preserva en el núcleo, muy cerca de la falla Tonco (Figura 6B). Esta falla hace emerger pequeñas escamas tectónicas del Subgrupo Pirgua y de las Formaciones Lecho y Yacoraite (Fi-

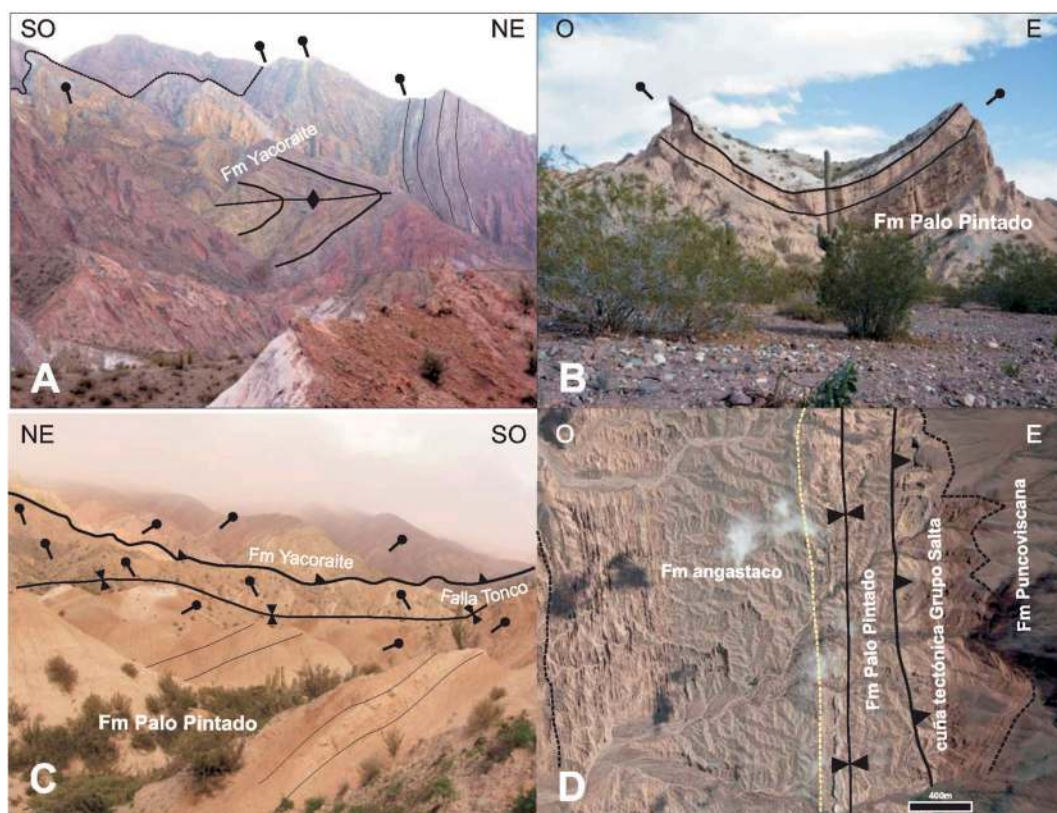


Figura 6. Fotos de estructuras del sector norte del Valle del Tonco. A. Anticlinal volcado, tipo gravitacional, en la Formación Yacoraite, B. Núcleo del sinclinal en el cual se preserva la Formación Palo Pintado, C. Vista del núcleo del sinclinal compuesto por la Formación Palo Pintado y de la escama tectónica compuesta por las Formaciones Lecho y Yacoraite, D. Vista en planta de los elementos estructurales de la Figura C. Fig. 7. Mapa del sector central del Valle del Tonco (Modificado de Vergani y Starck, 1989).

guras 6C y D) con estilo de las fallas de atajo. Hacia el este, el núcleo del anticlinal Filos del Pelado está compuesto por la Formación Puncoviscana (Figura 6D) que constituye el basamento regional, siendo este el único afloramiento de basamento en el tren de pliegues. En el sector central (entre 25°27' y 25°35'S) el eje del sinclinal presenta una curvatura siguiendo la traza curva de la falla Tonco (Figura 7), en la cual una falla inversa genera una escama tectónica repitiendo la base del Subgrupo Pírgua (Figuras 7 y 8A). El flanco occidental se mantiene sin grandes cambios, sin embargo el flanco oriental es descrito no sólo por la Formación Angastaco (Figuras 7 y 8A) sino también por algunos asomos de la Formación Quebrada de los Colorados (Figura 8B). El núcleo del sinclinal está compuesto por la Formación Angastaco la cual cierra el plie-

gue hacia el sur (Figuras 8B y C). En este caso el núcleo del anticlinal Filos del Pelado está compuesto por el Subgrupo Pírgua, el cual cierra esta estructura también hacia el sur (Figura 8D).

En el sector sur (entre 25°35' y 25°40'S) el eje del sinclinal presenta otra inflexión siguiendo la curvatura que posee el flanco oriental (Figura 9) y aflora en su núcleo la Formación Quebrada de los Colorados (Figura 9). Tanto el flanco occidental como el flanco oriental son descritos por los Subgrupos Pírgua, Balbuena y Santa Bárbara y la Formación Quebrada de los Colorados (Figura 10A). Además, el flanco oriental es afectado por fallas inversas que producen complejidades estructurales (Figuras 10B y C) como por ejemplo: repetición de una sección del Subgrupo Pírgua y del Subgrupo Balbuena (Figura 10B); repetición del

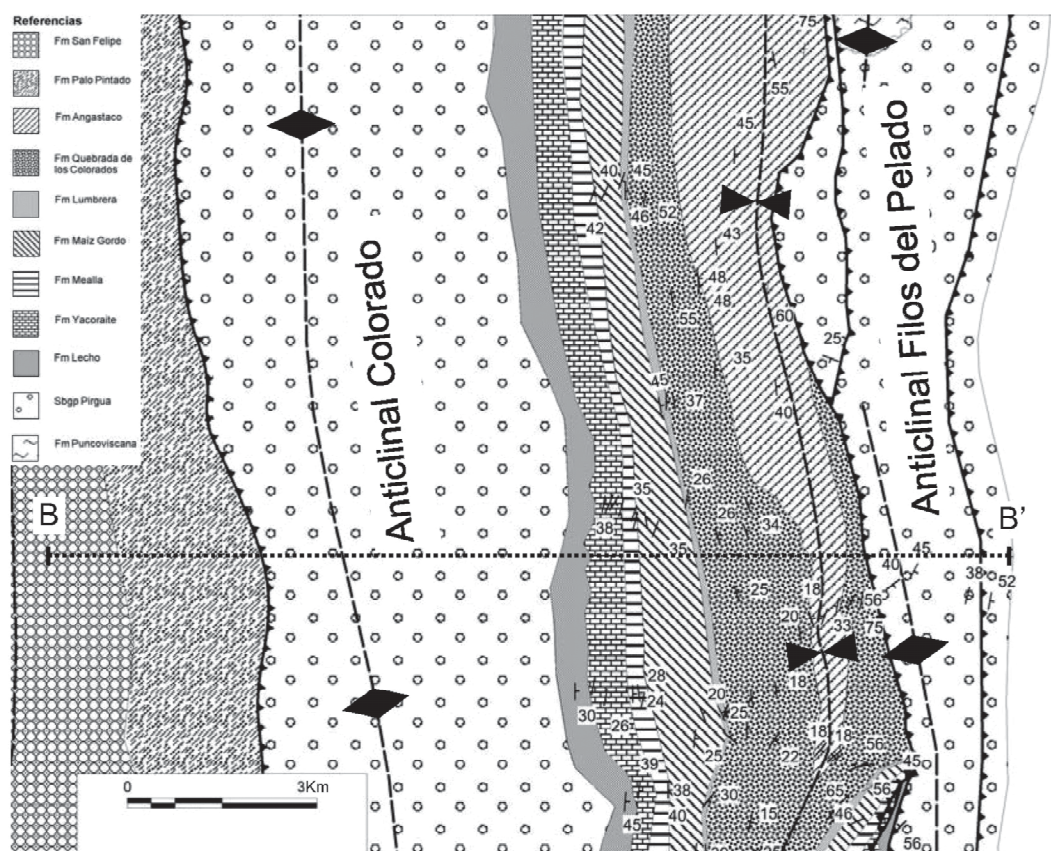


Figura 7. Mapa del sector central del Valle del Tonco (Modificado de Vergani y Starck, 1989).

Subgrupo Balbuena (Figura 10C) y adelgazamiento de las Formaciones Lecho y Yacoraite hacia el norte. En este sector se observa que el eje descrito por la Formación Quebrada de los Colorados es curvo y está localizado próximo al centro del valle, mientras que el eje que describiría en subsuelo el Subgrupo Santa Bárbara pasaría próximo al flanco oriental (Figura 10A).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En general, se interpreta a los sinclinales como estructuras pasivas relacionadas a la generación de anticlinales (Rich, 1934; Dahlstrom, 1970; Suppe, 1983, entre otros); por lo que debe ser analizada la configuración de los anticlinales y fallas que limitan el sinclinal del Tonco para reconstruir la cinemática de esta estructura, la que presenta

variaciones en las configuraciones estructurales, lo cual puede estar ligado a diferentes mecanismos y edades de deformación / plegamiento. En el sector norte la falla Tonco hace aflorar a la Formación Puncoviscana en el núcleo del anticlinal Filos del Pelado (Figs. 5, 11A y 12A). Esto implicaría que el basamento está involucrado en el plegamiento del anticlinal dando indicios del mecanismo implicado. Actualmente, el modelo de plegamiento de propagación de falla por cizalla triangular (*tri-shear*; Erslev, 1991) es uno de los más aplicados cuando el basamento está involucrado en el plegamiento (y la cubierta no está despegada) dependiendo de la geometría del pliegue, por lo que este anticlinal podría haber sido generado por el mecanismo mencionado.

En el sector central deja de aflorar la Formación Puncoviscana, el núcleo del anticli-

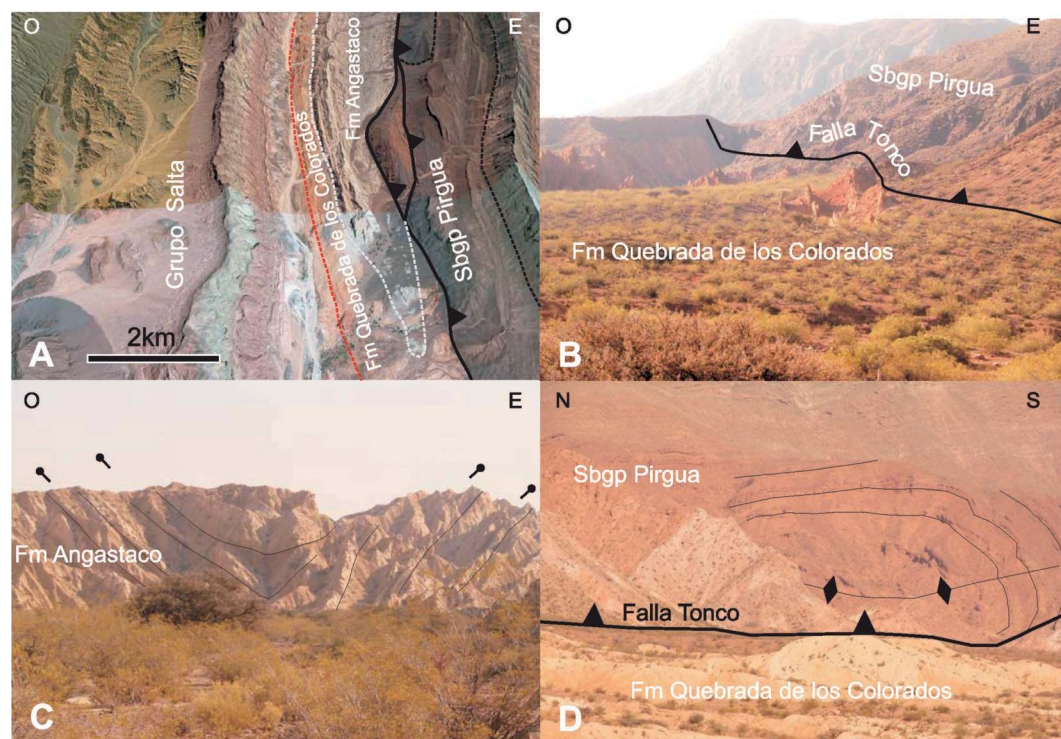


Figura 8. A. Imagen satelital en el cual se remarcan los contactos estratigráficos en el flanco oriental del sinclinal del Tonco, B. Contacto entre la Formación Quebrada de los Colorados y el Subgrupo Pirgua en el flanco oriental del sinclinal del Tonco, C. Núcleo del sinclinal del Tonco descrito por la Formación Angastaco, D. Cierre del anticlinal Filos del Pelado descrito por el Subgrupo Pirgua.

nal Filos del Pelado presenta menor altitud y está compuesto por el Subgrupo Pirgua (Figuras 7, 8D y 11B). Estas características evidencian una disminución del rechazo de la falla Tonco hacia el sur. En el sector austral, la falla Tonco deja de aflorar y numerosas fallas internas en la sucesión sedimentaria del Grupo Salta producen repeticiones y adelgazamientos de unidades estratigráficas (Figuras 9 y 10). La disminución del rechazo de la falla y la presencia de complejidades estructurales que presenta el flanco oriental podrían responder a una disminución del acortamiento producido por la falla Tonco, lo cual debe ser compensado por múltiples fallas internas en la sucesión sedimentaria (Figura 11C) para acomodar el acortamiento. La falla Tonco presenta una inflexión al SO y luego al SE (Figuras 7 y 8A), la que es seguida levemente por la curvatura que expone el eje del sinclinal descripto

por las Formaciones Quebrada de los Colorados y Angastaco (Figura 8A), mientras que los Subgrupos Balbuena y Santa Bárbara mantienen un rumbo N-S en el flanco occidental (Figura 8A). Esta diferencia de orientación en el flanco occidental entre las unidades estratigráficas permite interpretar que la actividad compresiva de la falla Tonco afectó en mayor medida a los depósitos del Grupo Payogastilla que a los del Grupo Salta. Es posible que esta falla haya tenido varias reactivaciones durante el Cenozoico. Por otro lado, la dirección del eje sinclinal es definida por las unidades del Grupo Payogastilla y es simple desde el sector norte al central. En cambio, entre el sector central y el sector sur es posible trazar un eje curvado que sigue el diseño del flanco oriental del sinclinal (Figuras 9 y 10A). Esta curvatura podría estar relacionada a movimientos de rumbo de la falla Tonco y de las fallas me-

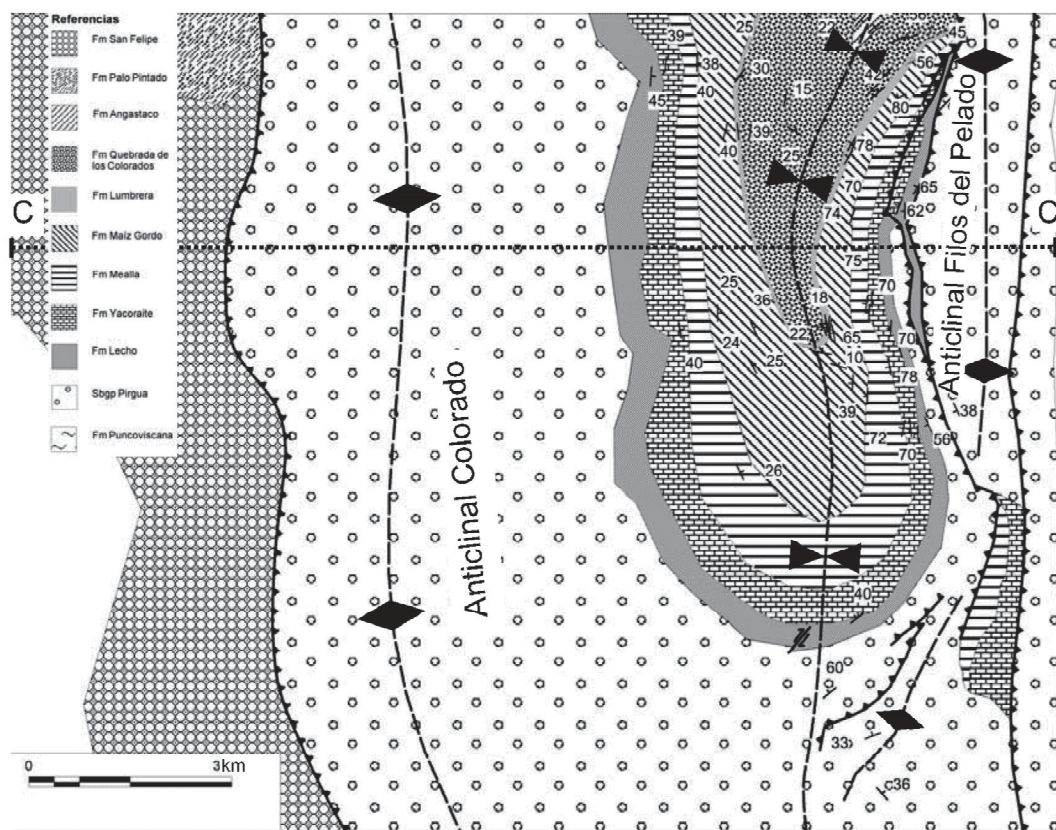


Figura 9. Mapa del sector sur del Valle del Tonco (Modificado de Vergani y Starck, 1989).

nores que cortan internamente al flanco oriental en el sector sur, o a una falla de traza curva. A pesar de que no se disponen de datos estructurales certeros que expliquen esta complejidad, una de las fallas internas del flanco posee traza curva lo que nos permite explicar este fenómeno por el momento. Sin embargo, se requiere un estudio minucioso para determinar con precisión el origen de la curvatura y si corresponde realmente a un solo eje curvado o varios ejes.

Las diferencias de orientación y posición de los elementos estructurales (posición y flexión de ejes, configuración de flancos, entre otros) descriptos estarían evidenciando, al menos, dos estructuraciones: una definida por los Subgrupos Balbuena-Santa Bár-

bara (Grupo Salta) y otra por las Formaciones Quebrada de los Colorados y Angastaco (Grupo Payogastilla). Las disímiles configuraciones estructurales indicarían la presencia de una discordancia entre el Grupo Salta y el Grupo Payogastilla, lo cual fortalece su carácter regional ya que también fue hallada en otras zonas de los Valles Calchaquíes (La Poma, Luracatao, Tin-Tin; Hongn *et al.*, 2007; Hongn *et al.*, 2008; Payrola *et al.*, 2009, Payrola, 2010). Esta discordancia, datada como eocena (Hongn *et al.*, 2007; Payrola *et al.*, 2009; Carrapa *et al.*, 2011) y ahora registrada en el valle del Tonco, está ligada al crecimiento de los anticlinales que limitan el sinclinal del Tonco y por ende a la actividad de las fallas Tonco y Calchaquí

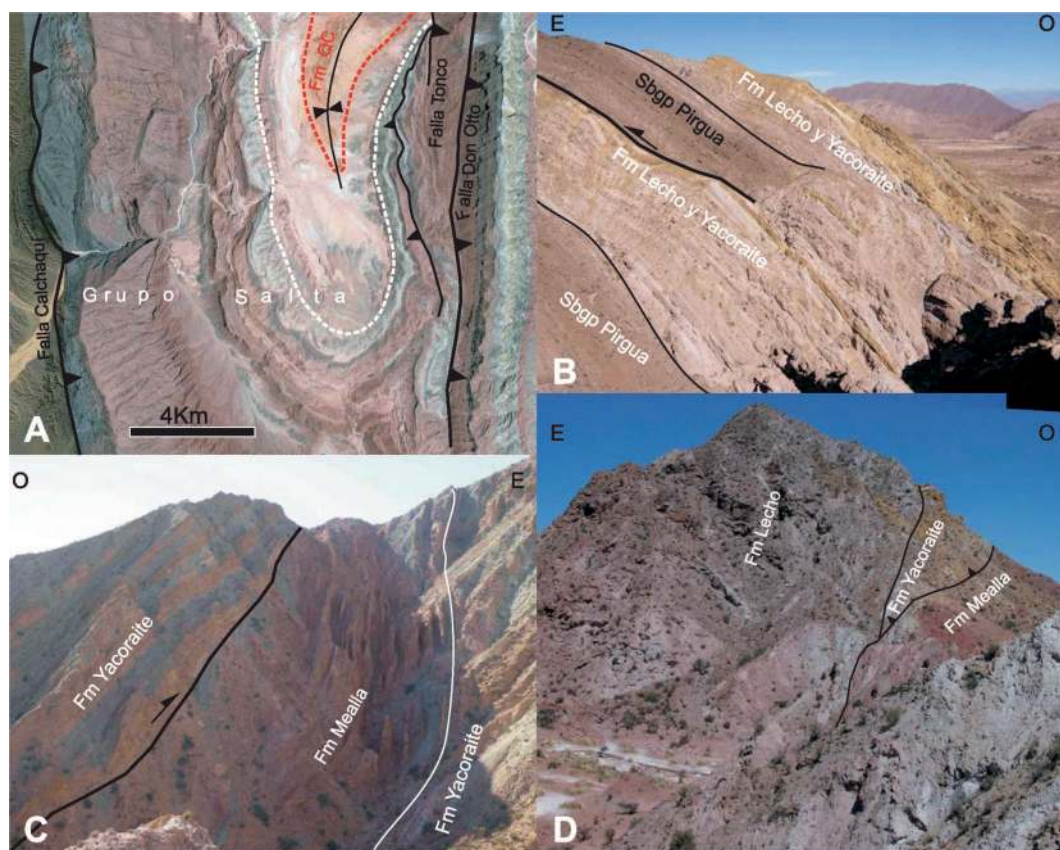


Figura 10. A. Imagen satelital con línea de forma del Subgrupo Balbuena y de la base de la Formación Quebrada de los Colorados; Estructuras del flanco oriental B. Repetición del Subgrupo Pirgua y Balbuena debido a una falla inversa menor, C. Repetición del Subgrupo Balbuena debido a variación en la posición de una falla inversa menor, D. Adelgazamiento de la Formación Lecho y acuñamiento de la Formación Yacoraite.

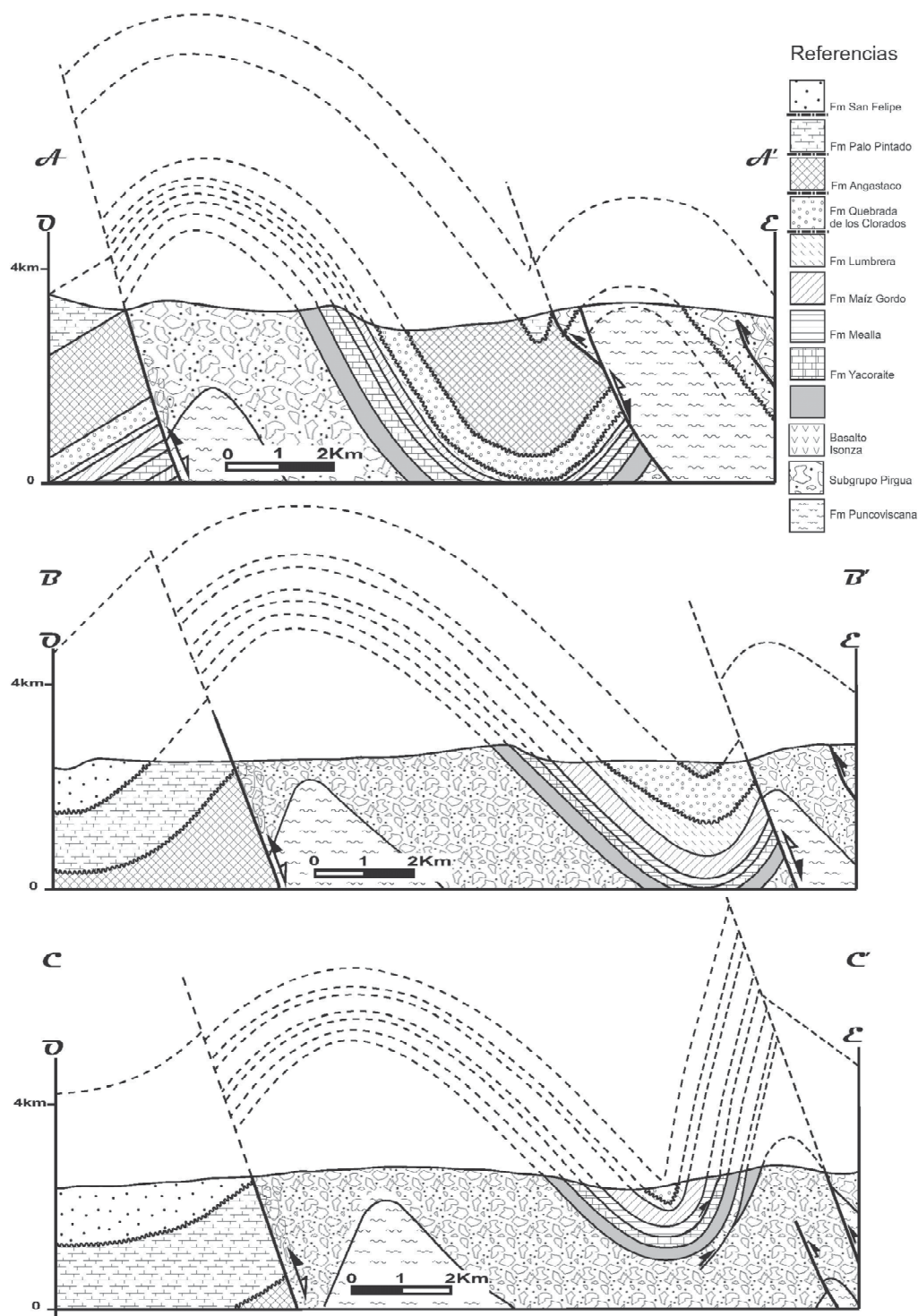


Figura 11. Cortes estructurales a lo largo del rumbo del sinclinal del Tonco, A-A'. Corte estructural del sector norte, B-B'. Corte estructural del sector central, C-C'. Corte estructural del sector sur.

que dan lugar a estos anticlinales. En consecuencia, es posible interpretar que parte de la historia cinemática de estas fallas tuvo lugar en el Eoceno. Tanto la falla Tonco como la falla Calchaquí, fueron interpretadas como fallas normales cretácicas debido a la preservación de la espesa sucesión sedimentaria del relleno de sinrift (Subgrupo Pirgua), las que fueron invertidas positivamente durante la contracción andina (Grier *et al.*, 1991; Salfity y Monaldi, 2006; Hongn *et al.*, 2010). En la proximidad a la falla Don Otto tuvo lugar la efusión de rocas volcánicas cretácicas (Basalto Isonza) (Figura 11A) lo cual implica un marco distensivo para el emplazamiento de éstas rocas volcánicas y que refuerza la interpretación de una

falla normal en las cercanías. Las relaciones estratigráficas y los elementos estructurales, descritos en este trabajo y por otros autores en los Valles Calchaquíes, indicarían que estas fallas empezaron a invertirse durante el Eoceno Medio-Superior. Estas interpretaciones no sólo impactan sobre la edad de la inversión tectónica sino que las dos fallas estudiadas (Calchaquí y Tonco) son retrovergentes, característica que le confiere mayor dificultad para la inversión en un marco de propagación de la deformación hacia el antepaís, donde lo más sencillo y factible sería que el acortamiento se traduzca en fallas secuencia adelante (vergentes hacia el este). Sin embargo, requiere menor energía la inversión/reactivación de una falla de rift/ba-

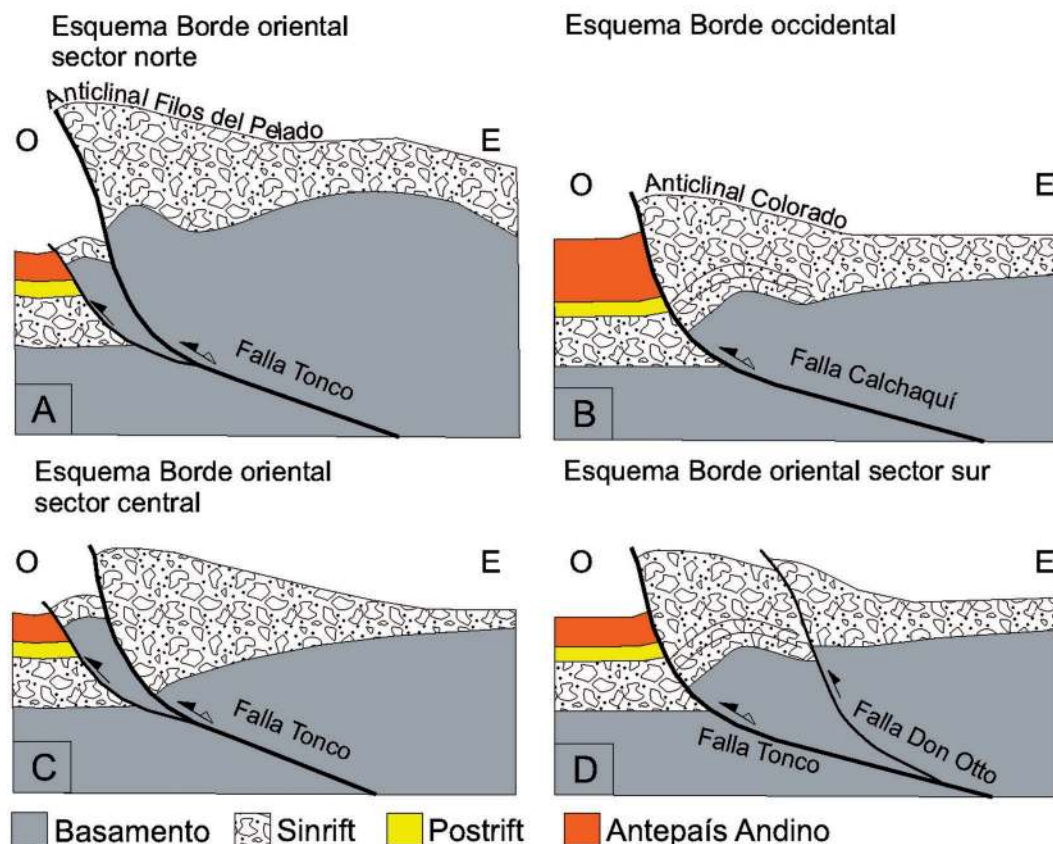


Figura 12. Esquemas de inversión tectónica positiva. A. Falla de atajo en el bloque yacente, con extrusión del basamento, B. Estructura en arpón, C. Falla de atajo en el bloque yacente, con preservación del relleno sinrift, D. Falla *bypass* en el bloque colgante (Modificadas de McClay y Buchanan, 1992).

samento que la generación de una nueva falla (Anderson, 1951; Sibson, 1995), por lo que es posible invertir o reactivar fallas antiguas que generar fallas nuevas, lo que explicaría la inversión eocena de fallas normales retrovergentes. Los datos e interpretaciones de este trabajo permiten confirmar que las fallas normales del rift cretácico del Grupo Salta, tanto las vergentes hacia el este como las hacia el oeste, comenzaron a invertirse durante el Eoceno en la Cordillera Oriental y que esta provincia geológica podría haberse iniciado ya en el Eoceno como un cinturón doble vergente. En síntesis, se pueden enunciar los siguientes puntos: a) La falla Tonco pierde rechazo hacia el sur y causa las diversas relaciones de contactos estratigráficos en el flanco oriental del sinclinal, b) La falla Calchaquí fue una falla normal durante el Cretácico y controló el borde de un hemigraben, c) La falla Tonco fue una falla normal durante el Cretácico, d) Existe una discordancia de baja angularidad que separa el Grupo Salta del Grupo Payogastilla, e) La sedimentación del Grupo Payogastilla fue contemporánea con eventos de deformación que generaron las configuraciones estructurales internas de este Grupo en el valle del Tonco, f) Algunas fallas normales cretácicas, retrovergentes, comenzaron a invertirse durante el Eoceno en los Valles Calchaquíes.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación forma parte de los proyectos ANPCyT (Pict 2006-381) y CONICET (PIP 0781). Se agradece a la dirección de la CNEA Regional Norte por autorizar y financiar parte de este trabajo, y al personal profesional y técnicos por colaborar en los trabajos de campo. También los autores agradecen los valiosos comentarios y discusiones sobre la geología del valle del Tonco al Dr. Salfity. Este trabajo fue mejorado gracias a las sugerencias del Dr. Ernesto Cristallini y de un árbitro anónimo.

BIBLIOGRAFÍA

- Allmendinger, R., Jordan, T., Palma, M. y Ramos, V. 1982. Perfil estructural de la Puna catamarqueña (25°-27°S), Argentina. *Actas 5º Congreso Latinoamericano de Geología*, 1: 499-518. Buenos Aires.
- Anderson, E. M. 1951. *The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Applications to Britain*. Oliver and Boyd, Edinburgh, 191pp.
- Boll, A. y Hernández, R. 1986. Interpretación estructural del área de Tres Cruces. *Boletín de Informaciones Petroleras*, Tercera Época, 3, 7, 2-14.
- Cahill, T., Isacks, B. L., Whitman, D., Chatelain, J. L., Pérez, A. y Chiu, J. M. 1992. Seismicity and tectonics in Jujuy Province, Northwestern Argentina. *Tectonics*, 11 (5): 944-959.
- Carrapa, B., Trimble, J. D., Stockli, D. F. 2011. Patterns and timing of exhumation and deformation in the Eastern Cordillera of NW Argentina revealed by (U-Th)/He thermochronology. *Tectonics*, 30, TC30003, doi:10.1029/2010TC002707.
- Carrera, N., Muñoz, J.A., Sábato, F., Mon, R. y Roca, E. 2006. The role of inversion tectonics in the structure of the Cordillera Oriental (NW Argentinean Andes). *Journal of Structural Geology*, 1-12.
- Cortelezzi, C. R., Martel de Salfity, M. E., Nadir, A. R., Orce de Cuttica, N. A. y Solis, J. 1973. Consideraciones litoestratigráficas sobre los Subgrupos Pirgua y Santa Bárbara (Grupo Salta, Cretácico-Terciario) en el sud-oeste de la provincia de Salta (Argentina). *Actas V Congreso Geológico Argentino*, 3: 165-181.
- Cristallini, E., Cominquez, A. H., Ramos, V. A. 1997. Deep structure of the Metán-Guachipas region: tectonic inversion in Northwestern Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 110 (5-6), 403-421.
- Dahlstrom, C. D. A. 1970. Structural geology of the eastern margin of the Canadian Rocky Mountains, *Bulletin of Canadian Petroleum Geology* 18, pp. 331-406.
- del Papa, C. y Salfity, J. 1999. Non-marine Paleogene sequences, Salta Group, Northwestern Argentina. *Acta Geológica Hispánica*, 34: 105-121.
- del Papa, C., Hongn, F., Petrinovic, I. y Domínguez, R. 2004. Evidencias de deformación pre miocena media asociada al antepaís andino en la Cordillera Oriental (24°35'S- 66°12'O). *Revista Asociación Geológica Argentina* 59 (3): 506-509.
- del Papa, C.; Hongn, F., Mon, R., Powell, J., Petrinovic, I. 2005: Stratigraphy and syndepositional structures of the basal foreland deposits in the northern Valle Calchaquí, NW Argentina. VI International Symposium on Andean Geodynamics, *Actas* pp. 215-217. Barcelona, Septiembre, 2005.
- del Papa, C., Hongn, F., Petrinovic, I., Powell, J.,

- Mon, R. 2006. Stratigraphy of the Quebrada de los Colorados Formation: a complex unit of the basal foreland basin in northern Valle Calchaquí. IV Congreso Latinoamericano de Sedimentología y XI Reunión Argentina de Sedimentología, Actas, p. 90, Bariloche.
- del Papa, C., Kirschbaum, A., Powell, J., Brod, A., Hongn, F. y Pimentel, M. 2010. Sedimentological, geochemical and paleontological insights applied to continental omission surfaces: A new approach for reconstructing an eocene foreland basin in NW Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 29 (2): 327-345.
- Díaz, J. 1987. Estratigrafía y Sedimentología del Terciario Superior de la región comprendida entre los valles de los ríos Calchaquí y Guachipas, provincia de Salta, República Argentina. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Tucumán (inédito), 122 p., San Miguel de Tucumán.
- Díaz, J., 1987. Estratigrafía y Sedimentología del Terciario Superior de la región comprendida entre los valles de los ríos Calchaquí y Guachipas, provincia de Salta, República Argentina. Tesis doctoral. Universidad Nacional de Tucumán. 122 p. (Inédito). Tucumán.
- Díaz, J. y Malizzia, D. 1983. Estudio geológico y sedimentológico del Terciario Superior del valle Calchaquí (Dpto. San Carlos; Salta), *Boletín Sedimentológico* 2: 8-28.
- Díaz, J., Malizzia, D. y Bossi, G. 1987. Análisis estratigráfico del Grupo Payogastilla (Terciario Sup.) 10 Congreso Geológico Argentino, 2: 113-117. San Juan.
- Drozdowski, G. y Mon, R. 1999. Oppositely-verging thrusting structures in the North Argentine Andes compared with the German Variscides. *Acta Geológica Hispánica*, 34 (2-3): 185-196.
- Do Campo M., del Papa, C., Jiménez-Millán, J., Nieto, F., 2007. Clay mineral assemblages and analcime formation in a Palaeogene fluvial-lacustrine sequence (Maiz Gordo Formation Palaeogen) from northwestern Argentina. *Sedimentary Geology* 201, 56-74.
- Erslev, E. A. 1991. Trishear fault-propagation folding. *Geology* 19, pp. 617-620.
- Galli, C. I. y Hernández, R. M., 1999. Evolución de la Cuenca de Antepais desde la zona de la Cumbre Calchaquí hasta la Sierra de Santa Bárbara, Eoceno inferior- Mioceno medio, provincia de Salta, Argentina. *Acta Geológica Hispánica*, 34 (2-3): 167-184.
- Galliski, M. A. y Viramonte, J. G. 1988. The cretaceous paleorift in northwestern Argentina: A petrologic approach. *Journal of South American Earth Sciences*, 1: 329-342.
- Gómez Omil, R. J., Boll, A. y Hernández, R. M. 1989. Cuenca cretácico-terciaria del Noroeste argentino (Grupo Salta). En Chebli, G. A., Spalletti, L.A. (Eds.) *Cuencas Sedimentarias Argentinas*, 6: 43-64. Universidad Nacional de Tucumán, Serie de Correlación Geológica.
- Grier, M. 1990. The influence of the cretaceous Salta rift basin on the development of andean structural geometries. NW Argentina Andes. Tesis Doctoral, Cornell University, (Inédito). 178p. Ithaca-USA.
- Grier, M. y Dallmeyer, R. D. 1990. Age of the Payogastilla Group: Implications for foreland basin development. NW Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 3: 269-278.
- Grier, M. E., Salfity, J. A. y Allmendinger, R. W. 1991. Andean reactivation of the Cretaceous Salta rift, northwestern Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 4 (4): 351-372.
- Hongn, F. D. y Seggiaro, R. E. 1998. Estructuras del basamento y su relación con el rift cretácico, valles Calchaquíes, provincia de Salta. *Actas 10º Congreso Latinoamericano de Geología* 2: 4-9. Buenos Aires.
- Hongn, F. D. y Seggiaro, R. E. 2001. Hoja Geológica 2566-III, Cachi, 1:250.000. Mapa geológico y capítulo Tectónica (p. 53-65). SEGEMAR. Boletín 248. Buenos Aires.
- Hongn, F. D., del Papa, C., Powell, J., Petrinovic, I., Mon, R. y Deraco, V. 2007. Middle Eocene deformation and sedimentation in the Puna-Eastern Cordillera transition (23°26'S): Control by preexisting heterogeneities on the pattern of initial Andean shortening. *Geology* 35: 271-274.
- Hongn, F. D., del Papa, C., Powell, J., Petrinovic, I., Mon, R. 2008. Discordancias en el Cerro Tin Tin (Salta): Claves para interpretar la evolución tectónica en el noroeste argentino. 17º Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 27, San Salvador de Jujuy.
- Hongn, F., Mon, R., Petrinovic, I., del Papa, C., Powell, J. 2010. Inversión y reactivación tectónicas cretácico-cenozoicas en el noroeste argentino: Influencia de las heterogeneidades del basamento neoproterozoico-paleozoico inferior. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 66 (1), 38-53.
- Hongn, F., del Papa, C., Powell, J., Payrola, P., Petrinovic, I., Mon, R. 2011. Fragmented Paleogene foreland basin in the Valles Calchaquíes, NW of Argentina. En: Salfity y Marquillas (Ed.) «Cenozoic Geology of the Central Andes of Argentina», p. 189-209. Salta-Argentina.
- Jordan, T. E. y Alonso, R. N. 1987. Cenozoic stratigraphy and basin tectonics of the Andes Mountains, 20-28 south latitude. *American Association Petroleum Geologist Bulletin*, 71: 49-64.
- Kley, J., Rossello, E. A., Monaldi, C. R., Habighorst, B. 2005. Seismic and field evidence of Cretaceous normal faults and selective inversion, Salta rift, Northwest Argentina. *Tectonophysics* 399, 155-172.
- Marquillas, R. A., del Papa, C. y Sabino, I. F. 2005. Sedimentary aspects and paleoenvironmental

- evolution of a rift basin: Salta Group (Cretaceous-Paleogene), northwestern Argentina. *International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau)*, 94: 94-113.
- Mauri, E. T. 1948. Observaciones geológicas en el sudoeste de la provincia de Salta (departamentos de Cafayate, San Carlos, Molinos, Guachitas y La Viña). Yacimientos Petrolíferos Fiscales. Trabajo inédito. Buenos Aires.
- McClay, K. R. y Buchanan, P. G., 1992. Thrust faults in inverted extensional basins, En K.R. McClay, (Ed.): *Thrust tectonics*, 93-121. Chapman y Hall, London.
- Mon, R. 1979. Esquema tectónico de los Andes del Norte Argentino. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 35 (4): 582-585.
- Mon, R. 2001. Estructuras curvadas y levantamientos verticales en la Cordillera Oriental (prov. Salta y Tucumán). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 56: 367-376.
- Mon, R. y Drozdowski, G. 1999. Estructura doble-vergente en los Andes del Norte Argentino. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 54 (1): 3-8.
- Mon, R., Monaldi, C. R., Salfity, J. A. 2004. Interferencia de pliegues en el valle del río Juramento - Cordillera Oriental (provincia de Salta). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 59 (2), 213-219.
- Mon, R., Monaldi, C. R. y Salfity, J. A. 2005. Curved structures and interference fold patterns associated with lateral ramps in the Eastern Cordillera, Central Andes of Argentina. *Tectonophysics*, 399: 173-179.
- Moreno, J. A. 1970. Estratigrafía y Paleogeografía del Cretácico superior en la cuenca del noroeste argentino, con especial mención de los Subgrupos Balbuena y Santa Bárbara. *Revista Asociación Geológica Argentina*, 24: 9-44.
- Payrola Bosio, P. A. 2010. Estratigrafía y Estructura del valle de Luracatao, transición Puna-Cordillera Oriental, Salta: Vinculaciones con las cuencas de Rift cretácico y Antepaís andino. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Salta (inédito), 208 p., Salta.
- Payrola Bosio, P. A., Powel, J., del Papa, C. y Hongn, F. 2009. Middle Eocene deformation sedimentation in the Luracatao Valley: Tracking the initial Andean deformation in the Central Andes (NW Argentina). *Journal of South American Earth Sciences*, 28 (2): 142-154.
- Payrola, P. A., Hongn, F., Cristallini, E., García, V., del Papa, C. 2011. Andean oblique folds in the Cordillera Oriental - Northwestern Argentina: Insights from analogue models. *Journal of Structural Geology*. En revisión.
- Raskovsky, M. A. 1970. Geología del valle del Tonco, Salta. Comisión Nacional de Energía Atómica, Departamento Regional Noroeste. Trabajo Inédito. Salta.
- Reyes, F. C., 1972. Correlaciones en el Cretácico de la cuenca Andina de Bolivia, Perú y Chile. *Rev. Téc. YPFB*, 1:101:144.
- Reyes, F. C. y Salfity, J. A. 1973. Consideraciones sobre la estratigrafía del Cretácico (Subgrupo Pirgua) del noroeste argentino. *Actas 5 Congreso Geológico Argentino*, 3: 355-385.
- Reyes, F. C., Salfity, J. A., Viramonte, J. G., Gutiérrez, W. 1976. Consideraciones sobre el volcanismo del subgrupo Pirgua (Cretácico) en el norte argentino. *Actas 6 Congreso Geológico Argentino*, 1: 205-223.
- Rich, J. L. 1934. Mechanics of low-angle overthrust-generated folds as illustrated by the Cumberland thrust block, Virginia, Kentucky, and Tennessee. *American Association of Petroleum Geologist*, 280: 271-318.
- Riller, U. y Hongn, F. 2003. Structural influence of Paleozoic discontinuities on Cretaceous to Quaternary tectonism in the Eastern Cordillera, NW-Argentina. *European Geophysical Society (Contributions of the EGS-AGU-EUG joint assembly, Nice, April 2003)*, *Geophysical Research Abstracts* 5: 02303. -Riller, U. y Oncken, O. 2003. Growth of the central Andean Plateau by tectonic segmentation is controlled by the gradient in crustal shortening. *Journal of Geology*, 3: 367- 384.
- Russo, A. 1948. Levantamiento geológico en la cuenca del río Calchaquí, departamento de Molinos, provincia de Salta. Yacimientos Petrolíferos Fiscales, (inédito), 34 p. Buenos Aires.
- Sabino, I. F. 2002. Geología del Subgrupo Pirgua (Cretácico) del noroeste argentino. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta, p 1-260. (Inédito).
- Salfity, J. A. 1982. Evolución paleogeográfica del Grupo Salta (Cretácico - Eogénico), Argentina. *Actas V Congreso Latinoamericano de Geología*, 1: 11-26. Buenos Aires.
- Salfity, J. A. 2004. Geología regional del Valle Calchaquí, Argentina. *Anales Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 56: 133-150.
- Salfity, J. A. y Marquillas, R. A. 1994. Tectonic and sedimentary evolution of Cretaceous-Eocene Salta Group basin, Argentina. En: Salfity, J. A. (Ed.): *Cretaceous Tectonics of the Andes. Earth Evolution Sciences*, 266-315. Friedr,Vieweg and Sohn.
- Salfity, J. A., Monaldi, C. R. 2006. Hoja Geológica N°2566 IV Metán, 1:250000, Boletín 319, 74 pp. Servicio Geológico Minero Argentino. Buenos Aires.
- Salfity, J. A. y Zambrano, J. J. 1990. Cretácico. En: Bonaparte, J. F., Toselli, A. J., Aceñolaza, F. G. (Ed.): *Geología de América del Sur*, 2: 185-284. Universidad Nacional de Tucumán, Serie de correlación Geológica.
- Salfity, J. A., Monaldi, C. R., Marquillas, R. A. y Gonzáles, R. E. 1993. La inversión tectónica del

- Umbral de los Gallos en la cuenca del Grupo Salta durante la fase incaica. *Actas XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos*, 3: 200-210. Mendoza.
- Schwab, K. 1984. Contribución al conocimiento del sector occidental de la cuenca sedimentaria del Grupo Salta (Cretácico-Eogénico) en el noroeste argentino. *Actas IX Congreso Geológico Argentino*, 1: 586-604. Bariloche.
- Seggiaro, R., Aguilera, N. 2006. Inversión Tectónica en la quebrada de las Conchas, provincia de Salta. *Asociación Geológica Argentina, Serie D: Publicación Especial N° 10*, 128-135.
- Sibson, R. H. 1995. Selective fault reactivation during basin inversion: potential for fluid redistribution through fault-valve action. En: Buchanan, J. G., Buchanan, P. G. (Eds.), *Bain Inversion*. Geological Society of London, pp. 3-19. Special Publications 88.
- Starck, D. y Vergani, G. 1996. Desarrollo tectosedimentario del Cenozoico en el sur de la provincia de Salta. *13 Congreso Geológico Argentino, Argentina*, 1: 433-452. Buenos Aires.
- Suppe, J., 1983. Geometry and kinematics of fault-bend folding. *American Journal of Sciences*, 283: 684-721.
- Turner, J. C. 1960. Estratigrafía de la Sierra de Santa Victoria y adyacencias. *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias de Córdoba*, 41: 163-196.
- Turner, J. C. 1964. Descripción Geológica de la hoja 7c, Nevado de Cachi, provincia de La Salta. Dirección Nacional de Geología y Minería. *Boletín* 99: 79p., Buenos Aires.
- Turner, J. C. y Mon, R. 1979. Cordillera Oriental. In: Turner, A. F. (Ed.): *Geología Regional Argentina. Segundo Simposio de Geología Regional Argentina*. Academia Nacional de Ciencias, 1: 57-94. Córdoba.
- Urreiztieta, M. de, Gapais, D., Le Corre C., Cobbold P. R. y Rossello E. A. 1996. Cenozoic dextral transpression and basin development at the southern edge of the Altiplano-Puna, northwestern Argentina. *Tectonophysics* 254: 17-39.
- Valencio, D. A., Giúdice, J. A., Mendía, Oliver, J. 1976. Paleomagnetismo y edades K-Ar del Subgrupo Pigua, provincia de Salta, República Argentina. *Actas 6 Congreso Geológico Argentino*, 1: 527-542.
- Vergani, G. y Starck, D. 1989. Aspectos estructurales del Valle de Lerma al sur de la Ciudad de Salta: *Boletín de Informaciones Petrolíferas*, 16: 2-9. Buenos Aires.
- Viramonte, J. G., Kay, S. M., Becchio, R., Escayola, M. y Novitski, I. 1999. Cretaceous rift related magmatism in central-western South America. *Journal of South american Earth Sciences*, 12: 109-121.