

Análisis estructural del extremo sur de la Precordillera Central Sanjuanina

Pablo GIAMPAOLI¹ y Marcelo I. CEGARRA²

¹Cachimayo 241 Dto. 7 - 1424 - Buenos Aires, Argentina. E-mail: pgiampaolic@repsol-ypf.com

²Departamento de Ciencias Geológicas, FCEyN, UBA. E-mail: marcega@gl.fcen.uba.ar

RESUMEN. La Precordillera Central de San Juan es una faja plegada y corrida de piel fina que está limitada hacia el este por las estructuras de piel gruesa de la Precordillera Oriental. El objetivo de este estudio es describir e interpretar las estructuras encontradas en el extremo sur de esta faja plegada y corrida. Los pliegues presentes en las lomas de Andapaico son asimétricos, abiertos, de tipo *chevron* y están genéticamente relacionados a la propagación de una falla. Hacia el norte el pliegue es más cerrado y está fragmentado por fallas. La estructura regional consiste en un abanico imbricado de pliegues por propagación de falla y corrimientos fuera de secuencia relacionados al levantamiento de las estructuras de la Precordillera Oriental. El nivel de despegue principal está localizado cerca del techo de la caliza de la Formación San Juan. La evolución de la deformación se produjo en dos etapas. Primero se desarrolla un abanico imbricado de pliegues por propagación de falla como resultado de la migración hacia el antepaís del frente de corrimientos. Luego el levantamiento de la Precordillera Oriental impide la propagación del frente de corrimiento, lo cual pudo disparar la formación de las estructuras fuera de secuencia de la Precordillera Central. El acortamiento horizontal mínimo calculado es de 4,8 km y la estructura regional muestra una disminución del acortamiento en dirección sur que afecta a estructuras de varios órdenes y estilos de deformación.

Palabras clave: *Análisis estructural, Faja plegada y corrida, Descripción del plegamiento, Historia de la deformación*

ABSTRACT. *Structural analysis at the southern end of the Central Precordillera of San Juan.* The Central Precordillera of San Juan is a thin-skinned fold and thrust belt bounded to the east by the thick-skinned structures of the Eastern Precordillera. The objective of this study is to describe and interpret the structural features found at the southern end of this fold and thrust belt. The lomas de Andapaico's folds are of asymmetric, open chevron type, and are genetically related to fault propagation. Toward the north, the folding becomes tighter and broken by faults. The regional structure consists of an imbricated fan of an array of separated to overlapping fault-propagation folds, and out-of-sequence structures related to the Eastern Precordillera uplift. The major décollement thrust is located near the top of the San Juan Formation limestone. Deformation occurred in two main stages. First, an imbricate array of fault-propagation folds was developed as the thrust front migrated toward the foreland. Then, the uplift of the eastern Precordillera impeded the migration of the thrust front and may have caused the development of out-of-sequence structures in the Central Precordillera. The minimum horizontal shortening calculated is 4.8 km, and the whole structure shows a southward decreasing shortening that is shown by structures of different orders and a variety of styles of deformation.

Key words: *Structural analysis, Fold and thrust belt, Folding description, Deformation history, Shortening variation*

Introducción y antecedentes

El objetivo de este trabajo es presentar una descripción de la estructura superficial y profunda del extremo sur del frente orogénico de la Precordillera Central y postular una interpretación sobre la secuencia de deformación de las estructuras involucradas y la variación del acortamiento a lo largo del rumbo.

La zona de estudio comprende los afloramientos más australes de la Precordillera Central de San Juan, inmediatamente al oeste del cerro Pedernal y al norte del límite con la provincia de Mendoza. En la figura 1 se indica la ubicación de la zona de estudio y se señalan

sobre una imagen satelital los cordones montañosos analizados en este trabajo.

Las primeras interpretaciones sobre la estructura precordillerana fueron propuestas a principios de este siglo por Bodenbender (1902) y Stappenbeck (1910) quienes diseñaron modelos de plegamiento que explicaban las sucesivas repeticiones estratigráficas observables en cortes este-oeste como resultado del desarrollo de pliegues volcados con o sin corrimientos asociados. Braccacini (1946 y 1950) introduce el concepto, de estructuras de fallamiento dominante y acompañadas por pliegues que dan lugar al modelo actual de bloques imbricados. Baldis y Chebli (1969) realizan las

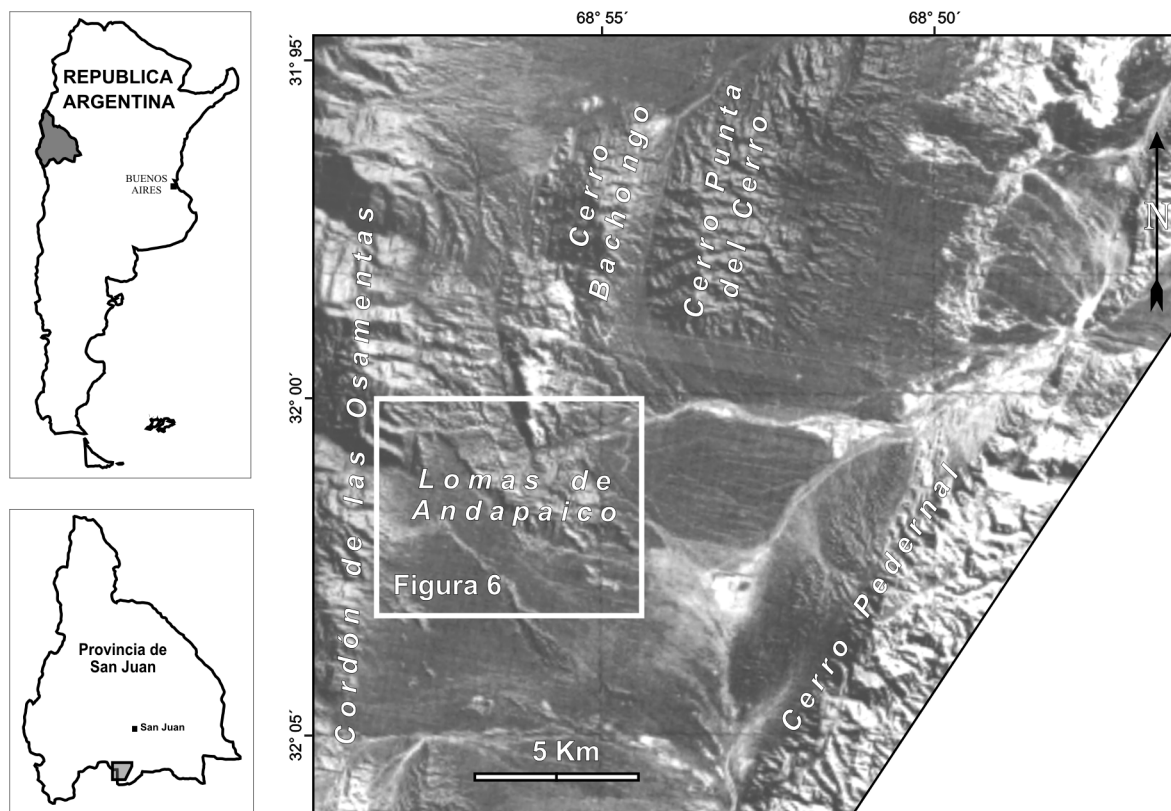


Figura 1: Ubicación de la zona de estudio. Sobre la imagen satelital se señalan los cordones montañosos analizados en este trabajo. El rectángulo representa el área cubierta por la figura 6.

primeras interpretaciones sobre la estructura profunda del área central de la Precordillera, indicando que los corrimientos se resuelven en un único plano de muy bajo ángulo ubicado en la caliza llanvirniana y que aumenta rápidamente su valor de inclinación hacia la superficie. Además, los perfiles construidos por estos autores ilustran como decrece hacia el sur el ancho de la faja de corrimientos, la cual desaparece al sur del extremo austral del cerro Pedernal.

Figueroa y Ferraris (1989) establecen la existencia de una zona triangular ubicada entre la sierra de Pedernal y el río de las Peñas y que podría extenderse hacia el norte en el margen occidental de las sierras Chica de Zonda y de Villicum. Hacia el sur, en cambio, los bajocorrimientos van perdiendo rechazo. Allmendinger *et al.* (1990) calculan un valor de acortamiento para la Precordillera a la latitud de 30°S de 70 %; sugieren que el plano de despegue estaría situado dentro de la secuencia cambro-ordovícica y atribuyen el principal modo de plegamiento como de propagación de falla, existiendo la posibilidad de registrarse variaciones en la magnitud del desplazamiento a lo largo del plano de corrimiento.

Comínguez y Ramos (1991) mediante el análisis de secciones sísmicas profundas mencionan que la manifestación de actividad sísmica por debajo de la sierra de Zonda a profundidades de hasta 40 km (Smalley 1988)

podría estar controlada por un sistema de bajocorrimiento que involucrase al basamento precámbrico precordillerano. Von Gosen (1992) confecciona un perfil estructural interpretativo de la Precordillera a lo largo del curso del río San Juan y obtiene un valor de acortamiento de 50 %. Además, muestra estructuras de hemigraben en la sección restaurada en cuyos márgenes los depósitos carboníferos poseen diferentes espesores.

Zapata y Allmendinger (1994 y 1996) indican la presencia de una zona triangular de piel gruesa desarrollada en el frente orogénico de la Precordillera Central y definen las características estructurales del extremo norte del mismo, entre los 30° y 31° de latitud sur. Ramos *et al.* (1997) reconstruyen la migración del frente orogénico de la Precordillera mediante el análisis de los depósitos sinorogénicos situados en el cerro Salinas, al oeste y sur del río del Agua y al este del cerro Punta del Cerro.

Base de datos y metodología empleada

Para la elaboración de este trabajo fue utilizado material previamente elaborado durante la preparación del Trabajo Final de Licenciatura de uno de los autores (Giampaoli 1997). Sin embargo, algunos aspectos sobre

la estructura profunda han sido modificados por la incorporación de una sección sísmica que atraviesa el sector sur de la zona de estudio.

La metodología empleada consistió en: investigación bibliográfica sobre la geología de la comarca, interpretación de imágenes satelitales y fotos aéreas, levantamiento geológico de superficie y procesamiento e interpretación de la sección sísmica 5428 proporcionada por Repsol-YPF S.A.

Para redactar este trabajo se ha optado por mostrar, luego de una descripción general de la estructura y estratigrafía del área, los resultados del análisis estructural de detalle realizado sobre el plegamiento de las lomas de Andapico. Estos resultados son extrapolados a una escala mayor e integrados con la información de subsuelo teniendo en cuenta el marco geológico regional, el mapeo geológico de superficie y la interpretación de la sección sísmica 5428. De este modo se presentará una descripción integral de las estructuras y una interpretación de su secuencia de formación.

Marco tectónico

La Precordillera es una faja plegada y corrida andina establecida sobre rocas sedimentarias paleozoicas como resultado de la migración hacia el este del frente orogénico. Este sector se encuentra afectado por la subducción subhorizontal de la placa de Nazca por debajo de la Sudamericana, característica que determina la migración del frente orogénico, la ausencia de volcanismo, la intensa sismicidad de intraplaca y la notable actividad neotectónica ubicada principalmente en el frente orogénico (Ramos *et al.* 1986).

Las áreas de la Precordillera Occidental y Central pueden considerarse, en conjunto, como una faja plegada y corrida de piel fina constituida, dependiendo de la latitud, por cuatro a seis corrimientos principales de vergencia oriental los cuales aparentemente tienen su nivel de despegue en la secuencia cambro-ordovícica (Allmendinger *et al.* 1990). Estos corrimientos se disponen en abanico imbricado hacia el antepaís (Boyer y Elliot 1982) en el cual la fracturación se propaga hacia el este transportando las láminas imbricadas antiguas sobre las más jóvenes produciendo un aumento progresivo de las inclinaciones originales de las fallas hacia el oeste e incluso el vuelco de los planos de corrimiento (von Gosen 1992). A este esquema hay que adicionar la existencia de corrimientos fuera de secuencia y estructuras de interferencia resultantes de la interacción con la estructuración de la Precordillera Oriental (Zapata y Allmendinger 1996).

La Precordillera Oriental, por otra parte, exhibe estructuras de vergencia occidental (Ortiz y Zambrano 1981) controladas por fábricas de basamento que inclinan al este y por un nivel de despegue profundo probablemente formado durante la orogenia acaecida en el Ordovício temprano-Devónico tardío (Zapata 1998). Estas estructuras cortan pero no exponen basamento

siendo el mecanismo de deformación de tipo piel gruesa y análogo al existente en el ámbito de Sierras Pampeanas (Ortiz y Zambrano 1981, Allmendinger *et al.* 1990).

Analizados en conjunto, el frente orogénico de la faja plegada y corrida de piel fina y el margen occidental de la Precordillera Oriental conforman una zona triangular de piel gruesa (Zapata y Allmendinger 1994 y 1996) cuya región axial coincide con la ubicación del bolsón de Matagusanos (Rolleri 1969). Al sur del río de las Peñas esta zona triangular desaparece como resultado de la pérdida de rechazo de los bajocorrimientos lo cual podría estar relacionado al aumento en la inclinación de la zona de Wadati-Benioff y el consiguiente traslado de la deformación hacia regiones occidentales (Figuerola y Ferraris 1989).

En cuanto a las características del plegamiento asociado a los corrimientos, el mecanismo dominante está representado por pliegues de propagación de falla, asimétricos, formados por la transferencia de acortamiento por encima de las terminaciones de corrimientos ciegos. Éstos pueden ser reactivados dando como resultado el transporte de los pliegues por encima de los corrimientos. Además, la magnitud del desplazamiento puede variar a lo largo del rumbo de las fallas, lo cual modificaría la posición estratigráfica de dichas terminaciones (Allmendinger *et al.* 1990).

Para completar este esquema de corrimientos y plegamiento resultado de la progresiva migración de la deformación andina hacia el este, es necesario añadir el control del fallamiento ejercido por elementos estructurales y paleogeográficos preexistentes (Baldis *et al.* 1982, Ramos *et al.* 1986), así como la presencia de fallas fuera de secuencia y de estructuras tensionales menores oblicuas al rumbo general de los cordones montañosos (Allmendinger *et al.* 1990).

Unidades estratigráficas involucradas en la deformación

A continuación se realizará una breve descripción de las unidades estratigráficas que participan en la deformación analizada en este trabajo, ordenadas de acuerdo al sistema al que pertenecen (Fig. 2):

Basamento precámbrico

En todo el ámbito de la Precordillera no se conocen afloramientos de basamento precámbrico. Sin embargo, éste ha sido caracterizado a partir de evidencia indirecta proveniente de xenolitos extraídos de rocas volcánicas miocenas vinculadas a los centros volcánicos de Ullum, cerro Blanco, Ciénaga de Gualilán y Tocota (Leveratto 1968 y 1976). Estas evidencias indirectas indican que el basamento está formado por rocas metamórficas altamente deformadas, de composición ácida y

SISTEMA	COLUMNA ESTRATIGRÁFICA	UNIDAD
CUATERNARIO		
TERCIARIO		Proximal Medio Distal
		Fm. Albarracín
		Fm. Andapaico
CARBONÍFERO		
DEVÓNICO		Fm. Punta Negra
ORDOVÍCICO		Fm. San Juan
CÁMBRICO		Fm. La Flecha Fm. Zonda Fm. La Laja
PRECÁMBRICO		Basamento

Figura 2: Columna estratigráfica generalizada de la zona de estudio.

máfica en facies de anfibolita y granulita (Abbruzzi *et al.* 1993 a y b). El estudio geocronológico efectuado por U/Pb en circones extraídos de estos xenolitos evidencian una edad grenviliana para el basamento de Precordillera (Kay *et al.* 1996).

Calcáreos cambro-ordovícicos

Los depósitos sedimentarios correspondientes a los sistemas Cámbrico y Ordovícico afloran en el sector oriental del área de estudio, mientras que en el sector occidental se infiere su presencia en subsuelo.

Los estratos cámbricos se agrupan en tres unidades: Formación La Laja (Borrello 1962), Formación Zonda (Bordonaro 1980) y Formación La Flecha (Baldis *et al.* 1981a). Las dos primeras están aunadas en el Grupo Marquesado (Bordonaro 1980) y la tercera, junto con la Formación San Juan en el Grupo Matagusanos (Baldis *et al.* 1981a). Estos estratos han sido interpretados como una sucesión de margen pasivo asociado a una plataforma calcárea con topografía de rampa que se profundiza hacia el oeste (Astini *et al.* 1996).

La Formación San Juan (Amos 1954), representa a las rocas del sistema ordovícico presente en esta zona y se trata de calizas grises cuyo ambiente de sedimentación corresponde a una plataforma calcárea poco profunda, con geometría de rampa (Astini *et al.* 1996).

Sedimentitas devónicas

Se trata de una potente sucesión de metagrauvas, metacuarcitas, pizarras y fillitas de color azul oscuro a verde oscuro (Harrington 1971) atribuidas a la Formación Punta Negra (Braccacini 1949). Debido al intenso plegamiento e imbricación de los estratos, no se conoce el espesor total de la secuencia. Pese a ello, Harrington (1971) indica que el espesor no ha de ser menor a 2000 m y que incluso podría superar los 3000 metros. En el área que nos ocupa, el contacto basal de esta formación es de falla sobre rocas terciarias, mientras que el contacto superior es concordante con las secuencias carboníferas de la Formación Andapaico.

Casi la totalidad de la Formación Punta Negra representa secuencias turbidíticas desarrolladas por la progradación de lóbulos deltaicos sobre una plataforma submarina fangosa, de muy escasa pendiente y sujeta ocasionalmente a eventos de tormenta (Astini 1990, Bustos y Astini 1997).

Depósitos continentales carboníferos

Las rocas de este sistema corresponden a la Formación Andapaico (Harrington 1971), la cual aflora al norte del curso del río del Agua, extendiéndose como una faja de 18 km de longitud y rumbo norte-sur. Se trata de una secuencia continental de más de 1000 m de espesor constituida principalmente, por areniscas eólicas y fluviales y, en menor proporción, por pelitas. En el área examinada el contacto basal de la Formación Andapaico es concordante con la Formación Punta Negra, mientras que en el techo el pasaje a los depósitos terciarios puede ser a través de una discordancia angular suave o de una falla. Estos depósitos se habrían generado en un ambiente de tipo fluvial y lacustre que hacia el techo de la secuencia pasan a facies eólicas que indican un cambio a condiciones de aridez (Coca y Bercowski 1994).

Terciario sinorogénico

Las rocas de esta edad son correlacionadas con la Formación Albarracín (Leveratto 1968). Bercowski *et al.* (1993) a su vez correlacionan a esta unidad con la secuencia La Chilca, la cual se habría depositado entre los $15,4 \pm 0,4$ Ma (Ar40/Ar39) y probablemente los 10-12 Ma. Como fue mencionado en el párrafo anterior, el contacto basal puede estar constituido por una falla o una suave discordancia angular. Al oeste y sur del curso del río del Agua pueden distinguirse dos grupos de depósitos con características litológicas contrastantes: un paquete inferior predominantemente pelítico y otro paquete superior, con mayor contenido de areniscas y algunos niveles delgados de conglomerados hacia el techo (Rivara 1998). Se interpreta que estos depósitos se

acumularon en áreas distales de abanicos aluviales y lagunas efímeras o playas terminales (Cuerda *et al.* 1988, Rivara 1998). En el sector oriental del área de estudio, afloran conglomerados terciarios correspondientes a las facies proximales del ambiente deposicional antes mencionado (Ramos *et al.* 1997).

La relación con los depósitos cuaternarios suprayacentes es de marcada discordancia angular. El espesor total de la secuencia es de alrededor de 3000 metros.

Sedimentos cuaternarios

Los depósitos cuaternarios aflorantes en la región se disponen en forma horizontal y yacen en relación de discordancia angular sobre las unidades antes descriptas.

Estructura general

El área de estudio abarca los ambientes tectónicos de la Precordillera Central y Oriental de San Juan, las cuales tienen propiedades estructurales características (Fig. 3):

El sector occidental, ubicado en la subprovincia geológica de la Precordillera Central, está constituido por tres láminas de corrimientos de vergencia oriental y rumbo norte a noreste. Estos corrimientos ponen en contacto rocas devónicas sobre sedimentitas terciarias y depósitos cuaternarios. Asociado a la terminación austral del corrimiento que levanta al cerro Bachongo, se presenta un plegamiento asimétrico de rumbo nornoroeste y buzante al sur, que afecta a rocas terciarias y carboníferas. Este pliegue, a su vez, muestra en su limbo dorsal una falla inversa de alto ángulo y que

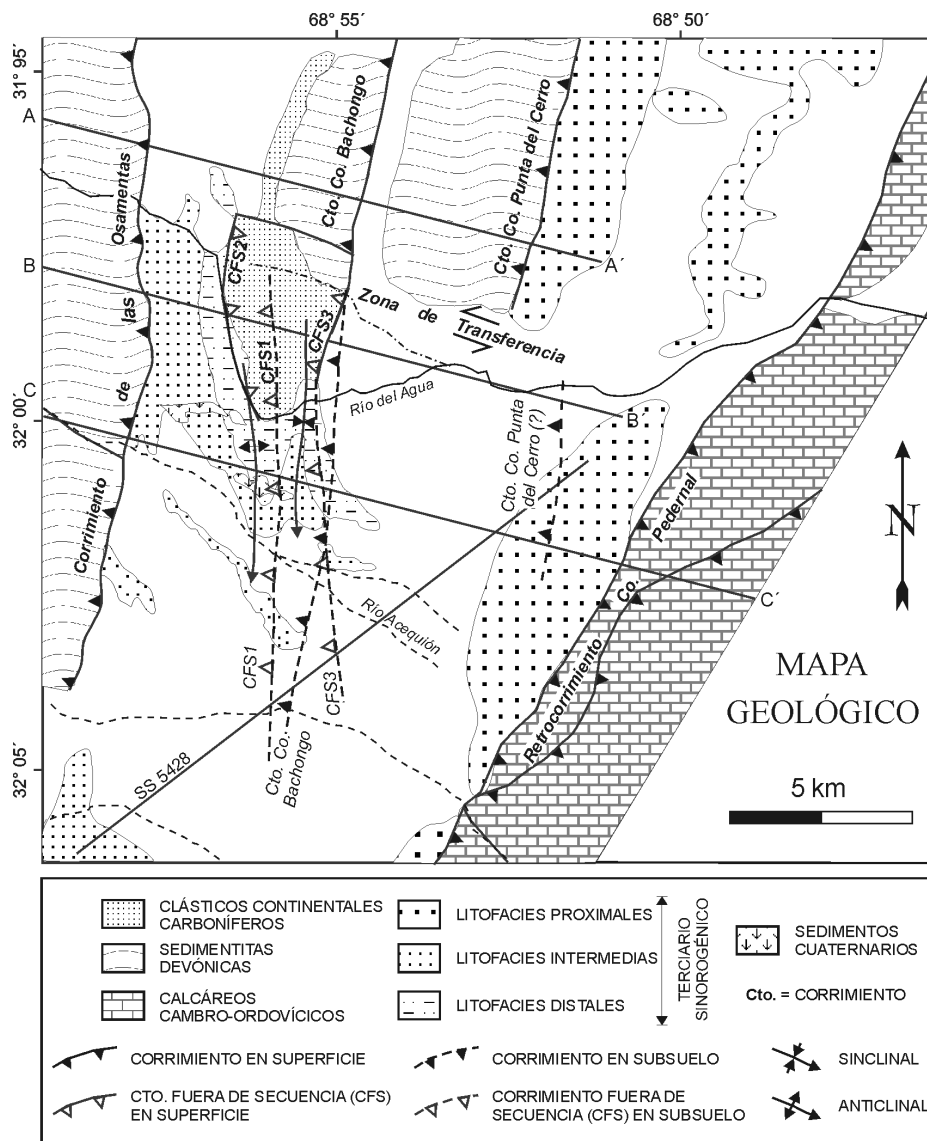


Figura 3: Mapa geológico del sector sur de la Precordillera de San Juan. Las líneas indican la ubicación de la sección sísmica y de los cortes estructurales discutidos en este trabajo.

levanta estratos carboníferos sobre terciarios.

El sector oriental corresponde a la subprovincia geológica de la Precordillera Oriental y está conformado por corrimientos de vergencia occidental y rumbo nordeste. Esta estructuración es responsable del engrosamiento tectónico del cerro Pedernal y pone en contacto calizas cambro-ordovícicas sobre sedimentitas terciarias y depósitos cuaternarios.

Por último, cabe mencionar la existencia de actividad neotectónica evidenciada por una serie de lineamientos de rumbo este-nordeste y que afectan a la morfología cuaternaria.

Análisis estructural del plegamiento de las lomas de Andapaico

Se trata de un plegamiento que afecta a los depósitos terciarios de la Formación Albarracín y a los estratos carboníferos de la Formación Andapaico. El plegamiento está formado, de oeste a este, por un anticlinal, un sinclinal y un pliegue de orden menor ubicado en el flanco dorsal del anticlinal (Fig. 4). El eje del plegamiento posee un buzamiento suave a moderado al sursureste y el plano axial inclina con alto ángulo al oeste.

La figura 5 muestra el plegamiento del techo de la sección inferior de la Formación Albarracín. Esta imagen tridimensional fue construida mediante la disposición, en forma serial, de las secciones verticales 1, 2 y 3 señaladas en la figura 6. Puede observarse que los pliegues son asimétricos, abiertos y de tipo *chevron* dado que presentan charnelas subangulares y limbos planos (Ramsay 1974). La distancia vertical entre la cresta y el valle del plegamiento (A) es de aproximadamente 950 m, mientras que la distancia horizontal (L) es del orden de los 625 metros.

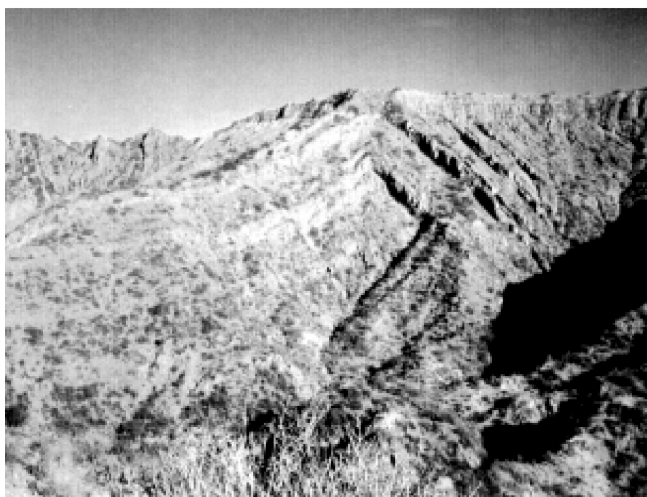


Figura 4: Vista dirigida al sur del plegamiento desarrollado sobre el flanco dorsal del anticlinal de las lomas de Andapaico. El pliegue presenta limbos planos, charnela angulosa y afecta a los depósitos terciarios de la Formación Albarracín.

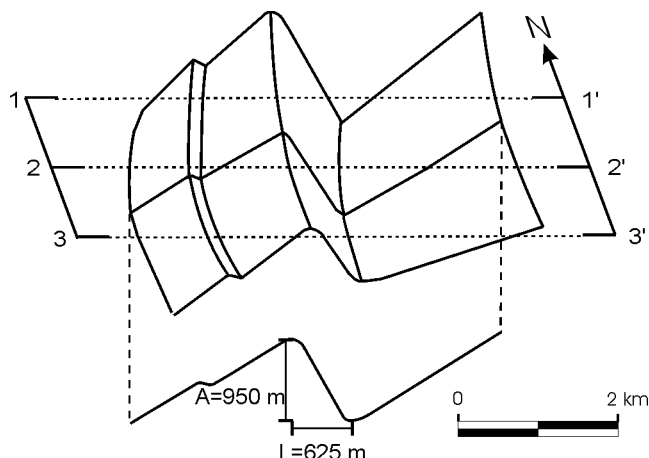


Figura 5: Plegamiento del techo de la sección inferior de la Formación Albarracín. El gráfico fue construido mediante la disposición en forma serial de las secciones verticales 1, 2 y 3 señaladas en la figura 6. A: Altura; L: Longitud.

Para caracterizar en forma detallada esta estructura y cuantificar las variaciones geométricas a lo largo del rumbo, el área del plegamiento que afecta a las rocas terciarias fue subdividida en nueve dominios estructurales (cuatro anticlinales y cinco sinclinales), que constituyen cada uno de ellos un pliegue de tipo cilíndrico (Fig. 6). Los datos de actitudes de las capas correspondientes a cada dominio fueron ploteados utilizando diagramas de polos de área constante (red de Schmidt) con proyección en el hemisferio inferior. Los diagramas se muestran en la figura 6 con los datos representados en ploteos de líneas de contornos.

Dado que la mayor parte de los polos caen en una banda alrededor de un círculo máximo común (círculo π), estos pliegues pueden clasificarse como subcilíndricos (Ramsay y Hubert 1987). La disposición de las líneas de contorno indica que los limbos conforman una superficie estadísticamente plana típica de los pliegues *chevron*. De la interpretación de estos diagramas se ha obtenido la actitud del eje y el valor del ángulo interlimbar para cada dominio estructural (Cuadro 1).

Los valores tabulados indican que, hacia el sur, el azimut de los ejes se desplaza levemente en esa dirección al tiempo que disminuyen los ángulos de buzamiento. También se observa un aumento del ángulo interlimbar, el cual es más pronunciado en el sinclinal. Puede notarse que en el sector norte, a partir de A1-B1, el pliegue tiende a ser más cerrado y a buzarse con mayor ángulo que en el sector sur donde los pliegues se abren, particularmente el sinclinal y los ángulos de buzamiento disminuyen en 14° .

Esta variación a lo largo del rumbo de los rasgos geométricos del plegamiento puede interpretarse como el resultado de la introducción de una componente extra de acortamiento, asociada a un aumento en la intensidad de los esfuerzos compresionales en el sector norte. A este efecto puede vincularse el desarrollo de la

Cuadro 1: Análisis estructural del extremo sur de la Precordillera Central Sanjuanina.

Dominio estructural (pliegue)	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3	B4
Azimuth del eje	194°	194°	185°	186°	202°	199°	197°	185°	202°
Buzamiento del eje	44°S	30°S	25°S	27°S	26°S	34°S	20°S	22°S	16°S
Ángulo interlimbar	64°	80°	78°	91°	84°	66°	79°	102°	105°

falla inversa de alto ángulo y escaso rechazo ubicada al norte del plegamiento y que pone estratos carboníferos de la Formación Andapaico sobre las capas terciarias de la Formación Albarracín.

Las propiedades geométricas superficiales descritas en el punto anterior poseen las características necesarias para ser interpretadas dentro del espectro de los modelos de pliegues asociados a fallas y propios de los ambientes tectónicos asociados a fajas plegadas y corridas. Jamison (1987) señala que los pliegues con moderados a pequeños ángulos interlimbares pueden corresponder a modelos de plegamiento por propagación de falla o a modelos de plegamiento por despegue, siendo la única forma de resolver la controversia el conocimiento directo de la existencia o no de una rampa profunda en propagación.

Con relación a esto último, la presencia en la sección

sísmica 5428 de reflectores inclinados al oeste (Fig. 8) permiten inferir la existencia de una rampa en profundidad, favoreciendo la interpretación del plegamiento dentro del espectro de los modelos de pliegues de propagación de falla. De este modo se podría vincular el aumento progresivo de la cantidad de deformación en dirección norte con el aumento de la magnitud del rechazo del corrimiento asociado al pliegue.

Interpretación de la estructura del subsuelo

La estructura en el subsuelo de la zona de estudio ha sido interpretada mediante la integración de los datos superficiales (mapa geológico y análisis geométrico del plegamiento) con la información de subsuelo obtenida de la interpretación y proyección de los rasgos

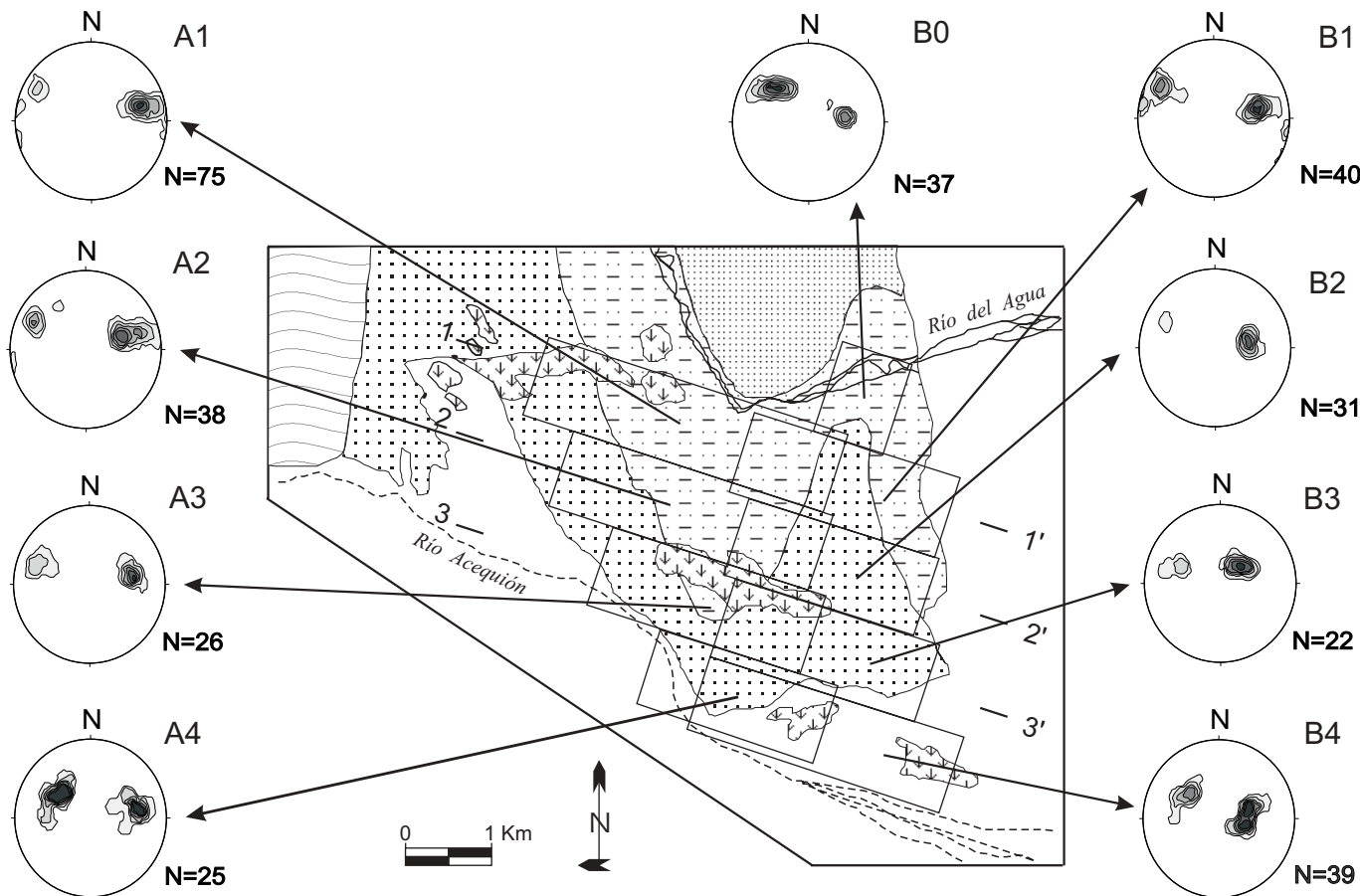


Figura 6: Diagramas de líneas de contorno (hemisferio inferior, igual área) correspondientes a los dominios A1, A2, A3, A4, B0, B1, B2, B3 y B4 señalados en el mapa geológico (véase la figura 1 para la ubicación y la figura 3 para las referencias); N: cantidad de datos utilizados.

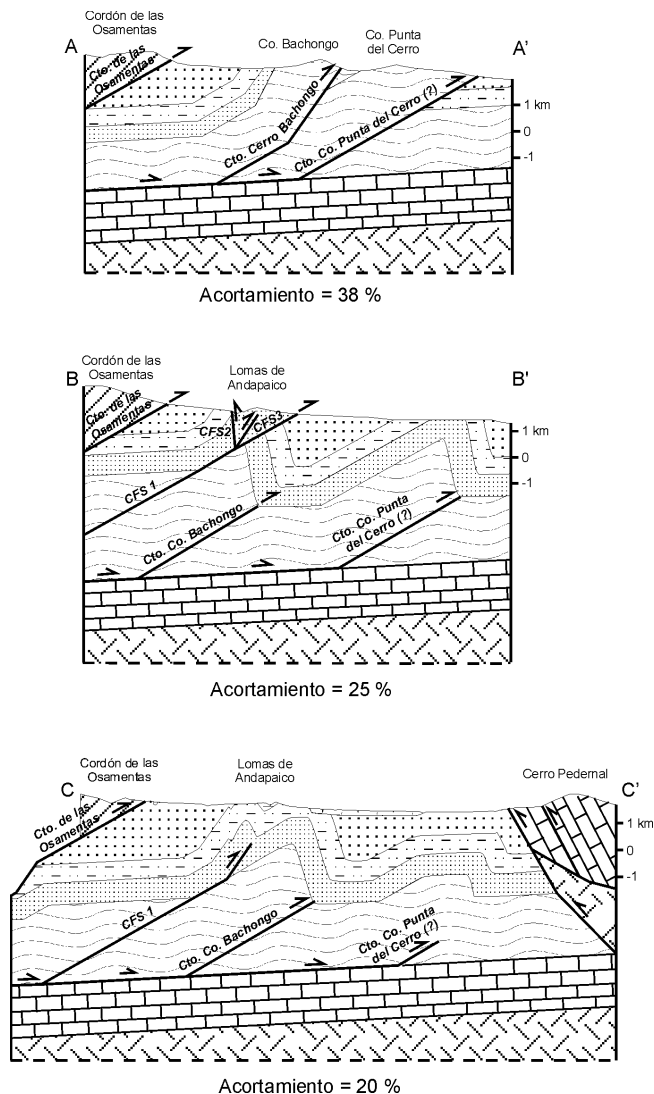


Figura 7: Cortes estructurales balanceados A-A', B-B' y C-C' (véase la figura 3 para la ubicación y referencias). El modelo estructural propuesto consiste en un sistema de fallas conformado por un abanico imbricado hacia el antepais de pliegues por propagación de falla. Hacia el norte de la zona de estudio, la magnitud de la propagación de las fallas supera al distanciamiento entre rampas provocando el apilamiento de las láminas de corrimiento. En el sector sur, en cambio, el acortamiento es menor y es acomodado por corrimientos fuera de secuencia.

sísmicos detectados en la sección sísmica 5428. De este modo y teniendo en cuenta el marco tectónico regional, se han elaborado tres secciones estructurales balanceadas que representan una posible interpretación del estilo estructural del sector austral de la Precordillera Central de San Juan y cuantifican el acortamiento existente en esta región (Fig. 7).

El examen de la sección sísmica 5428 (Fig. 8) muestra la presencia en el tramo nordeste de un relieve estructural profundo evidenciado por la geometría de un reflector continuo y de alta amplitud que ha sido interpretado como el resultado del fuerte contraste de

impedancias acústicas entre los depósitos terciarios y las rocas paleozoicas. Otro rasgo de interés corresponde a las relaciones de truncamiento que se observan en el sector suroeste de la sección sísmica involucrando paquetes de reflectores de alta inclinación interpretados en este modelo como rampas profundas asociadas a corrimientos de vergencia oriental.

El corte estructural C-C' (Fig. 9) ha sido confeccionado proyectando sobre el plano de la sección los valores de actitud de las capas plegadas de las lomas de Andapaico así como los rasgos sísmicos más destacados, previa migración y puesta en profundidad de los reflectores. Los cortes estructurales B-B' y A-A' constituyen interpretaciones de la evolución en el rumbo de los rasgos estructurales definidos en el corte C-C' y que respetan la información geológica de superficie.

De acuerdo a la interpretación realizada, la estructura profunda de este sector de la Precordillera Central estaría conformada por tres láminas de corrimiento dispuestas en un abanico imbricado hacia el antepais: lámina Cordón de las Osamentas, lámina Puesto Bachongo y lámina Cerro Punta del Cerro. Todos los corrimientos tienen su nivel de despegue en el techo de la Formación San Juan y tienen un ángulo de corte de aproximadamente 27°. El estilo de plegamiento vinculado a estas fallas que mejor representa la geología superficial del área es por propagación de falla, cualidad ya señalada en el ámbito precordillerano por otros autores (Allmendinger *et al.* 1990).

El frente orogénico es de tipo emergente a la latitud del corte A-A' y hacia el sur pasa a no emergente tal como se ilustra en los cortes B-B' y C-C'. Asociada a esta característica se infiere la existencia de una zona de transferencia de rumbo oeste-noroeste y desplazamiento levógiro ubicada hacia la terminación austral de los afloramientos de los cerros Bachongo y Punta del Cerro (Fig. 3). Al sur del cerro Pedernal y coincidente con la terminación de los retrocorrimientos de la Precordillera Oriental, el frente orogénico vuelve a ser de tipo emergente (Figuroa y Ferraris 1989).

La lámina de corrimiento de Puesto Bachongo presenta en la zona de las lomas de Andapaico un corrimiento fuera de secuencia desarrollado en el flanco dorsal del pliegue asociado al corrimiento principal. Esta estructura difiere de las antes descritas por tener un despegue superior en la base de la Formación Andapaico y un escalón en esta unidad con un ángulo de corte de aproximadamente 25°. Asociado a la terminación de este escalón se explica el desarrollo del plegamiento de propagación de falla analizado en la sección anterior. Hacia el norte, esta estructura es transportada en forma pasiva mediante la propagación del despegue activado en la base de los estratos carboníferos, truncando a la estructura profunda.

El acortamiento horizontal mínimo obtenido para el corte C-C' es de 4,8 km, equivalente a un porcentaje de acortamiento de 20,5 % (Fig. 9). Para los cortes B-B' y A-A' se calcularon valores de acortamiento de 25 % y

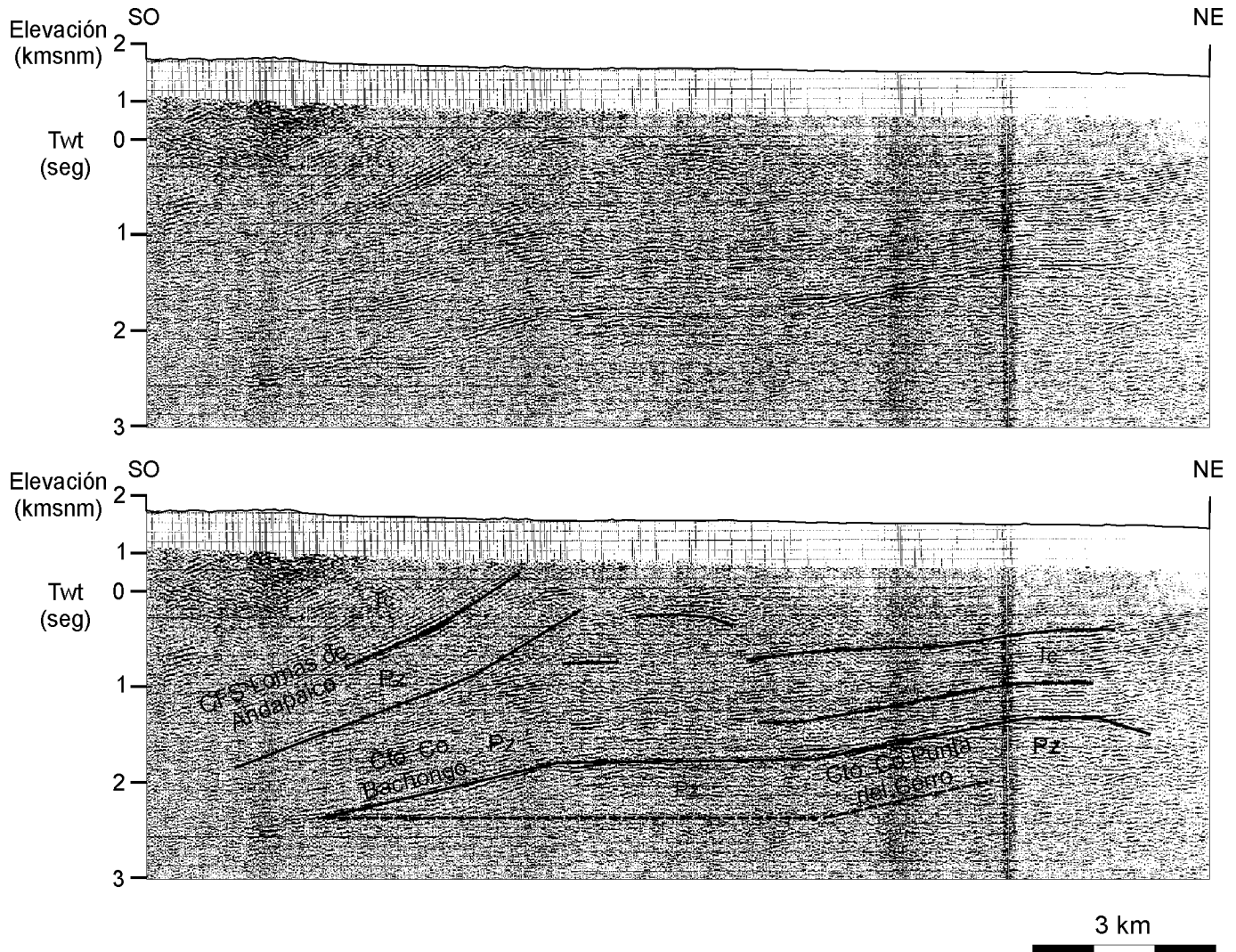


Figura 8: Sección sísmica 5428 (véase la figura 3 para la ubicación) en donde se resaltan los principales reflectores sísmicos detectados y la interpretación geológica realizada.

38 % respectivamente, evidenciando que la cantidad de acortamiento en este sector de la Precordillera Central aumenta en dirección norte (Fig. 8).

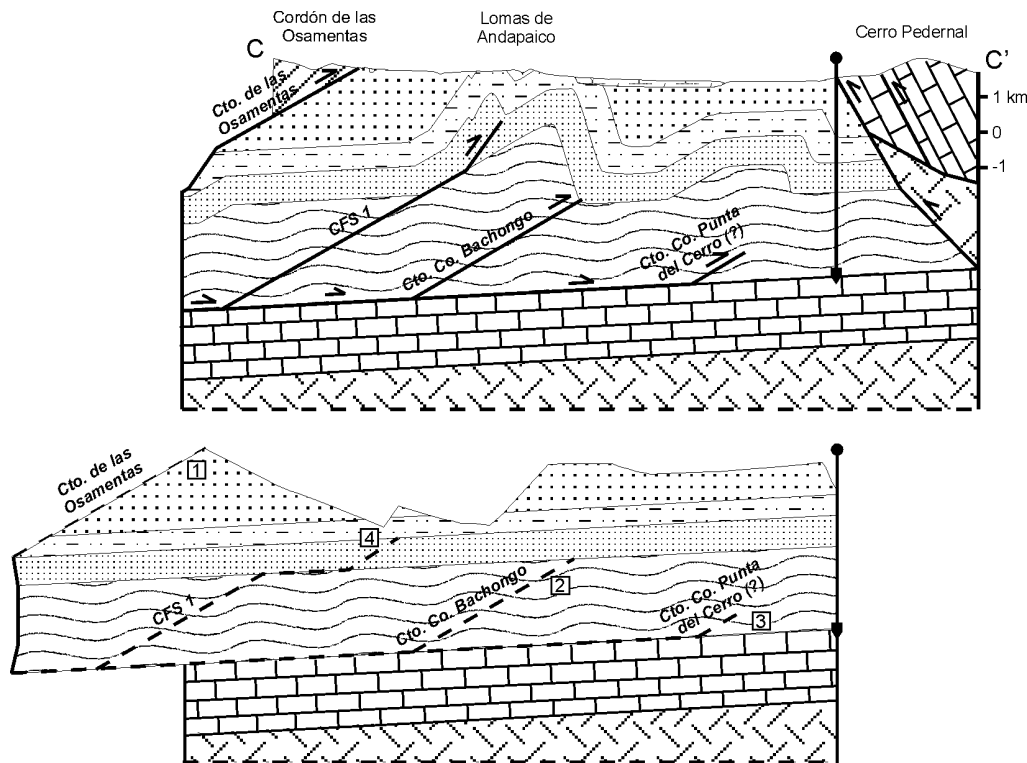
Secuencia de formación de las estructuras

Para las estructuras aflorantes en el área de estudio se propone un mecanismo de evolución de la deformación según una secuencia de fallamiento normal hacia el antepaís de las láminas de corrimiento principales (Fig. 9): primero la lámina Cordón de las Osamentas, luego la lámina Cerro Bachongo y por último la lámina Cerro Punta del Cerro. El bloque colgante de cada una de estas láminas se deforma internamente por cizalla flexural a medida que se propaga el corrimiento, transportando y replegando a las láminas de corrimiento previas durante el proceso.

Posteriormente, la deformación andina provoca la

reactivación de estructuras basamentales preexistentes y formadas durante la acreción precámbrica-eopaleozoica (Comínguez y Ramos 1991), dando lugar al levantamiento del cerro Pedernal y la formación de una zona triangular sobre el margen oeste de la Precordillera Oriental. La posición, rumbo y vergencia de estas estructuras, así como la ubicación del plano de despegue, estarían controlados por un sistema inferido de fallas de vergencia occidental de edad ordovícico-devónica (Zapata 1998).

Con posterioridad o en forma simultánea al evento anterior, la concentración de los esfuerzos tectónicos en el frente de corrimientos de la Precordillera Central dispara la estructuración fuera de secuencia de las retroinclinaciones de la terminación austral de la lámina Cerro Bachongo. En el corte C-C', esta estructura está representada por el corrimiento fuera de secuencia CFS1 (Figs. 3, 7 y 9) que provoca el plegamiento de los estratos carboníferos y terciarios de las lomas de



Acortamiento horizontal mínimo: 4,8 km

Porcentaje de acortamiento: 20,5 %

Figura 9: Corte estructural balanceado C-C' (véase la figura 3 para la ubicación y referencias) con su correspondiente sección restituida. Los números indican la secuencia de fallamiento propuesta.

Andapaico. En el corte B-B' (Fig. 7), la mayor intensidad de los esfuerzos tectónicos en dirección norte determina que este plegamiento sea más apretado, se fracture el limbo dorsal del pliegue (CFS2 en Figs. 3 y 7) y se eleve la estructura por la activación del despegue superior del corrimiento fuera de secuencia CFS1 (CFS3 en Figs. 3 y 7). La edad relativamente reciente de esta estructuración podría estar avalada por la presencia de un paleovalle que atraviesa a la Formación Andapaico en dirección este-sudeste y situado aproximadamente a la misma latitud en que el río del Agua desvía bruscamente la dirección de su curso hacia el sur-sudeste (Fig. 3).

La ubicación en la estructura regional de esta deformación fuera de secuencia parece estar relacionada con la existencia de una potente columna de estratos carboníferos que aflora en la zona de las lomas de Andapaico. En efecto, hacia el norte esta estructuración desaparece junto con la disminución en el desarrollo de los mencionados depósitos y, en cambio, el acortamiento es acomodado por un mayor desplazamiento de los corrimientos Cerro Bachongo y Cerro Punta del Cerro.

Por último, en tiempos actuales tienen lugar procesos neotectónicos evidenciados por una serie de lineamientos y fallas extensionales que afectan a la morfología cuaternaria.

Variación del acortamiento

Los acortamientos mínimos calculados a lo largo de los cortes estructurales muestran una continua disminución en la magnitud de los mismos en dirección sur (Fig. 8), análogo al evidenciado en el análisis geométrico del plegamiento de las lomas de Andapaico. Esta característica puede también vincularse a la pérdida de rechazo del retrocorrimiento de piel gruesa del cerro Pedernal, cuya expresión morfológica de superficie disminuye hacia el sur hasta desaparecer por completo bajo la cubierta de sedimentos cuaternarios.

No ha sido posible identificar un único mecanismo deformacional responsable de la variación observada en el acortamiento. Sin embargo, la persistencia de este rasgo en estructuras de distinto orden y estilo de deformación permite especular que este comportamiento es consecuencia de una disminución regional en dirección sur de la intensidad de la deformación andina.

Conclusiones

La interpretación de los datos de superficie y subsuelo disponibles para el extremo sur de la Precordillera Central de San Juan ha permitido elaborar un

modelo sobre la estructura superficial y profunda cuyas características se resumen a continuación:

- Los depósitos sinorogénicos terciarios aflorantes al sur del río del Agua presentan un plegamiento de rumbo submeridiano, asimétrico y de vergencia oriental. La geometría de esta estructura de deformación continua responde a los modelos de pliegues por propagación de falla formados por la transferencia del acortamiento por encima del punto ciego de un corrimiento en profundidad.

- La estructura de la faja plegada y corrida del extremo sur de la Precordillera Central de San Juan está formada por un abanico imbricado hacia el antepaís de pliegues por propagación de fallas con despegue en el contacto entre las calizas de la Formación San Juan y las sedimentitas devónicas de la Formación Punta Negra. En forma secundaria, se observa una estructuración fuera de secuencia generada por la concentración de esfuerzos tectónicos resultante de la formación de la zona triangular de piel gruesa.

- La evolución de la deformación para las estructuras descriptas en la Precordillera Central se produjo en dos etapas. Primero se desarrolla el abanico imbricado hacia el antepaís de pliegues por propagación de falla resultantes del traslado progresivo de la deformación andina hacia el antepaís. Luego se produce el levantamiento de las estructuras basamentales de la Precordillera Oriental impidiendo la propagación del frente de corrimiento y promoviendo el desarrollo de las estructuras fuera de secuencia.

- El acortamiento horizontal mínimo calculado para este sector de la Precordillera Central es de 4,8 kilómetros. Se observa una persistente disminución del acortamiento en dirección sur que afecta a estructuras de varios órdenes y estilos de deformación.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su reconocimiento a Repsol-YPF por facilitar la línea sísmica utilizada en este trabajo. Agradecemos al Dr. Víctor A. Ramos y al Dr. Tomás R. Zapata por las valiosas sugerencias efectuadas al revisar una versión preliminar de este trabajo y a la Dra. Gabriela LoForte y la Lic. Anabella A. Rivara por el apoyo prestado durante el relevamiento de campo.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Abbruzzi, J.M., S.M. Kay and M.E. Bickford, 1993a. Implications for the nature of the Precordilleran basement from the geochemistry and age of Precambrian xenoliths in Miocene volcanic rocks, San Juan province. *Actas del 12º Congreso Geológico Argentino y 2º Congreso de Exploración de Hidrocarburos*, 3: 331-339. Mendoza.
- Abbruzzi, J.M., S.M. Kay and M.E. Bickford, 1993b. Evidence of a Grenville age island arc basement in Precordillera, San Juan Province, Argentina. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 25(A): 232-233. Boulder.
- Allmendinger, R.W., Figueroa, D., Snyder, D., Beer, J., Mpodozis C. and Isacks, B.L., 1990. Foreland shortening and crustal balancing in the Andes at 30°S latitude, *Tectonics* 9(4): 789-809.
- Astini, R. A., 1990b. Formación Punta Negra: ¿Un abanico submarino ó un complejo deltaico de plataforma?. 3ª Reunión Argentina de Sedimentología: 13-18. San Juan.
- Astini, R.A., V.A. Ramos, J.L. Benedetto, N.E., Vaccari y F.L. Cañas, 1996. La Precordillera: un terreno exótico a Gondwana. 13º Congreso Geológico Argentino y 3º Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 1: 351-368. Buenos Aires.
- Amos, A., 1954. Estructura de las Formaciones Paleozoicas de la Rinconada, Pie Oriental de la sierra Chica de Zonda, San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 9 (1): 3-32. Buenos Aires.
- Baldis, B. A. y Chebli, G.A., 1969. Estructura profunda del área central de la Precordillera sanjuanina. *Actas 4º Jornadas Geológicas Argentinas*, 1:47-65.
- Baldis, B.A.J., Bordonaro, O., Beresi, M. y Uliarte, E., 1981. Zona de dispersión estromatolítica en la secuencia calcareo-dolomítica del Paleozoico Inferior de San Juan. *Actas del 8º Congreso Geológico Argentino*, 1: 419-434. Buenos Aires.
- Baldis, B.A.J., Beresi, M.S., Bordonaro O. y Vaca, A., 1982. Síntesis evolutiva de la Precordillera Argentina. *Actas del 5º Congreso Latinoamericano de Geología*, 2: 329-341.
- Bercowski, F., Ruzycki, L., Jordan T., Zeitler, P., Caballero, M.M. y Perez, I., 1993. Litofacies y edad isotópica de la secuencia La Chilca y su significado paleogeográfico para el Neógeno de Precordillera. *Actas del 12º Congreso Geológico Argentino y 2º Congreso de Exploración de Hidrocarburos*, 1: 212-217. Mendoza.
- Bodenbender, G., 1902. Contribución al conocimiento de la Precordillera y de las Sierras Centrales de la República Argentina. *Academia Nacional de Ciencias*, 18: 203,264. Córdoba.
- Bordonaro, O., 1980. El Cámbrico en la quebrada de Zonda, Provincia de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 25(1): 26-40. Buenos Aires.
- Borrello, A.V., 1962. Caliza La Laja (Cámbrico medio de San Juan). *Notas de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires*, 2: 3-8. La Plata.
- Boyer, S.E. and Elliott, D., 1982. Thrust systems. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 66: 1196-1230.
- Bracaccini, O.I., 1946. Contribución al conocimiento geológico de la Precordillera Sanjuanino-mendocina. *Boletín de Informaciones Petroleras*: 258-264. Buenos Aires.
- Bracaccini, O.I., 1949. El perfil de Tambolar (Provincia de San Juan). *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 4: 165-179, Buenos Aires.
- Bracaccini, O.I., 1950. Investigaciones tectónicas en la Precordillera sanjuanina. *Boletín de Informaciones Petroleras*: 301. Buenos Aires.
- Bustos U. D. y Astini R. A., 1997. Formación Punta Negra: análisis secuencial y evolución de la Cuenca Devónica Precordillerana. *Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología*, 4(2): 97-102.
- Coca, M. y Bercowski, F., 1994. Facies eólicas en el Neopaleozoico de Bachongo, Precordillera Central, San Juan. *Actas de la 5º Reunión Argentina de Sedimentología*: 71-76.
- Comínguez, A. y Ramos, V.A., 1991. La estructura profunda entre Precordillera y Sierras Pampeanas de la Argentina: evidencias de la sísmica de reflexión profunda. *Revista Geológica de Chile* 18(1): 3-14.
- Cuerda, A., Cigolani, C.A. y Schauer, O.C., 1988. Descripción Geológica de la Hoja 21c - San Juan. *Carta geológico-económica de la República Argentina*, 1:200.000. Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de la Plata, 259 p. (Inédito).

- Figuroa, D.E. y Ferraris, O.R., 1989. Estructura del margen oriental de la Precordillera Mendocino-sanjuanina. 1º Congreso Nacional de Exploración de Hidrocarburos, 1: 515-529.
- Giampaoli, P., 1997. Geología del sector austral de las lomas de Andapaico (Provincia de San Juan). Trabajo Final de Licenciatura, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, 96 p. (Inédito).
- Harrington, J.H., 1971. Descripción geológica de la Hoja 22c, "Ramblon", Provincias de Mendoza y San Juan. Dirección Nacional de Geología y Minería, Boletín 114, 87p., Buenos Aires.
- Kay S.M., S. Orrell and J.M. Abruzzi, 1996. Zircon and whole rock Nd-Pb isotopic evidence for a Grenville age and Laurentia origin for the basement of the Precordilleran terrane in Argentina. Geological Society of America South-Central Section, Abstracts with Programs, 28(1): 21-22. Austin.
- Jamison, W.R., 1987. Geometric analysis of fold development in overthrust terranes. *Journal of Structural Geology*, 9(2): 208-219.
- Leveratto, M.A., 1968. Geología del oeste de Ullum-Zonda, borde oriental de la Precordillera de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 23(2): 129-157. Buenos Aires.
- Leveratto, M.A., 1976. Edad de intrusivos cenozoicos en la Precordillera de San Juan y su implicancia estratigráfica. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 31(1): 53-58. Buenos Aires.
- Ortiz, A. y Zambrano, J.J., 1981. La provincia geológica Precordillera Oriental. *Actas 8º Congreso Geológico Argentino*, 3: 59-74.
- Ramos, V.A., Jordan, T.E., Allmendinger, R., Mpodozis, C., Kay, S.M., Cortes, J.M. and Palma, M., 1986. Paleozoic terranes of the Central Argentine-Chilean Andes. *Tectonics*, 5(6): 855-880.
- Ramos, V.A., 1988. The Tectonics of the Central Andes; 30° to 33° S latitude. *Geological Society of America Special Paper*, 218: 31-54.
- Ramos, V. A., Cegarra, M. I., Lo Forte, G. y Comíngues, A., 1997. El frente orogénico de la sierra de Pedernal (San Juan, Argentina): su migración a través de los depósitos sinorogénicos. *Actas 8º Congreso Geológico Chileno*, 3: 1709-1713, Chile.
- Ramsay, J.G., 1974. Development of chevron folds. *Bulletin of the Geological Society of America*, 85: 1741-1754.
- Ramsay, J.G. and Hubert, M.I., 1987. The techniques of modern structural geology, volumen 2: folds and fractures. Academic Press Limited, 700 p., San Diego.
- Rivara, A. A., 1998. Estratigrafía y sedimentología de los depósitos terciarios del Río del Agua, Provincia de San Juan. Trabajo Final del Licenciatura, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, 112 p. (Inédito).
- Rolleri, E.O., 1969. Rasgos tectónicos generales del valle de Matagusanos y de la zona entre San Juan y Jocolí. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 24(4):408-412. Buenos Aires.
- Smalley, R.F., 1988. Two earthquakes studies: 1) Seismicity of Argentine foreland and 2) A renormalization group approach to earthquake mechanics. Cornell University, Philosophical Doctor Dissertation, 174 p. (Inédito). Ithaca.
- Stappenbeck, R., 1910. La Precordillera de San Juan y Mendoza. Ministerio de Agricultura de la Nación, sección Geología, *Anales* 4(4): 1-187. Buenos Aires.
- Von Gosen, W., 1992. Structural evolution of the Argentine Precordillera: the Río San Juan section. *Journal of Structural Geology*, 14(6): 643-667.
- Zapata, T.R. and Allmendinger, R. W., 1994. "Thick Skinned" Triangular zone of the Precordillera Thrust Belt, Argentina. *Canadian Society of Exploration Geophysicist and Canadian Society of Petroleum Geologist Joint National Convention, Program with Expanded Abstracts and Bibliographies*, pp. 72-73.
- Zapata, T.R. and Allmendinger, R.W., 1996. Thrust front zone of the Precordillera, Argentina: a thick skinned triangle zone. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 80(3): 350-381.
- Zapata, T.R., 1998. Crustal structure of the Andean thrust front at 30°S latitude from shallow and deep seismic reflection profiles, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 11(2): 131-151.

Recibido: 22 de agosto, 2001

Aceptado: 4 de marzo, 2003